

Erweiterung der Komponentenmethode nach EC 3-1.8 um die Interaktion der Schnittgrößen Biegemoment und Normalkraft

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung der
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation vorgelegt

von

Diplom-Ingenieur
Anja Schwarzlos

aus Schwarzenberg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. H. Pasternak

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. U. Kuhlmann

Gutachter: Habil. Dr. Ir. J.-P. Jaspart (Professeur Adjoint)

Tag der Disputation: 07.02.2005

Inhaltsverzeichnis

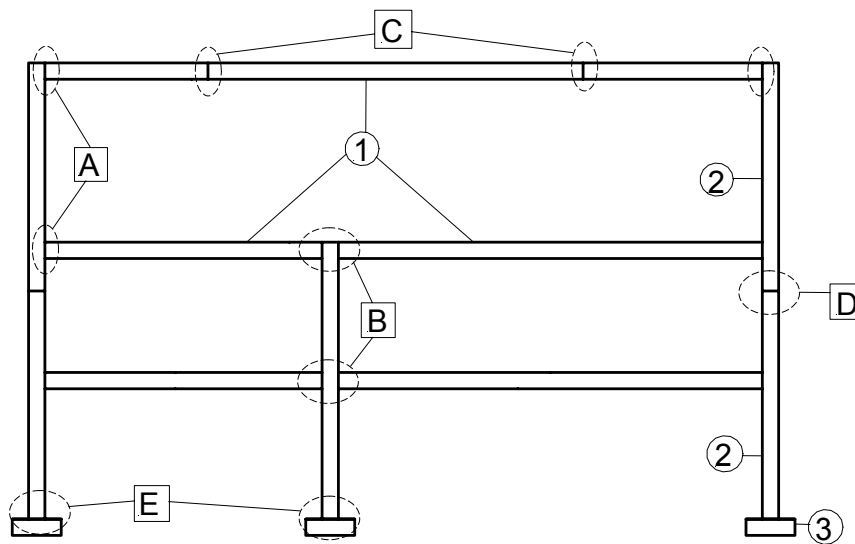
1	Einleitung	1
1.1	Verbindungen in Rahmensystemen	1
1.2	Annex J und EC 3-1.8	3
1.3	Zielstellung und Gliederung der Arbeit	4
2	Nachgiebige Verbindungen	5
2.1	Das Komponentenmodell	5
2.2	Die Komponenten	7
2.3	Klassifizierung	12
2.4	Vor- und Nachteile des EC 3-1.8	15
3	Zur Interaktion	19
3.1	Was ist Interaktion?	19
3.2	Interaktion nach Annex J und EC 3-1.8	22
3.3	Interaktionsvorschlag nach [Pas-02]	24
3.4	Bewertung der beiden Interaktionsvorschläge	25
4	Untersuchung mit der Finiten-Elemente-Methode	27
4.1	Zu den ausgewählten Verbindungen	27
4.2	Analyse mit der FEM	29
4.2.1	Allgemeine Hinweise	29
4.2.2	Modellierung der Verbindungen	29
4.2.2.1	Knotenmodell	29
4.2.2.2	Elemente	30
4.2.2.3	Randbedingungen, Schnittgrößendefinition	33
4.2.2.4	Materialdefinitionen	35
4.2.3	Validierung der Ergebnisse	37
4.2.4	Entwicklung von Interaktionskurven auf der Basis der FE-Berechnung	41
5	Untersuchung einzelner Komponenten	45
5.1	Einfluss Komponentenverhalten am Gesamt-Momenten-Rotations-Verhalten	45
5.2	Komponenten	51

5.2.1	Allgemeines	51
5.2.2	Träger	51
5.2.3	Kopfplatte mit Schrauben (T-Stoß)	55
5.2.4	Kopfplatte (ohne Schrauben)	57
5.2.5	Stützensteg	58
5.3	Fazit	62
6	Anwendung und Erweiterung der Komponentenmethode	63
6.1	Hintergrund	63
6.2	Beanspruchung durch eine Normalkraft	63
6.2.1	Vorgehen	63
6.2.2	Druckkraft	71
6.2.3	Zugkraft	83
6.3	Beanspruchung durch Biegemoment und Normalkraft	89
6.4	Weitere Hinweise zur Anwendung	114
6.4.1	Allgemeines	114
6.4.2	Geneigte Träger- und Stützenachsen	114
6.4.3	Verbindung von Träger und Stütze durch einen Gehrungsschnitt	116
6.4.4	Weitere Aussteifungsmöglichkeiten	118
6.4.5	Schlanke Profile	119
7	Auswertung und Anwendung	121
7.1	Auswertung und Vergleich der Ergebnisse	121
7.2	Anwendung der Erweiterung der Komponentenmethode	131
8	Zusammenfassung, Bewertung	137
	Formelzeichen	139
	Literaturverzeichnis	151
	Weiterführende Literatur	154
	Abbildungsverzeichnis	159
	Tabellenverzeichnis	162

1 Einleitung

1.1 Verbindungen in Rahmensystemen

Rahmensysteme von Hallenbauten bestehen aus verschiedenen Bauteilen – Stützen und Trägern. Diese Bauteile werden durch unterschiedliche Anschlüsse – den Verbindungen, je nach statischer Vorgabe, miteinander kombiniert, um als ein Ganzes – als Rahmen – zusammenzuwirken.



- | | |
|-----------------|--|
| 1 ... Träger | A ... Träger-Stützen-Verbindung, einseitig |
| 2 ... Stütze | B ... Träger-Stützen-Verbindung, zweiseitig |
| 3 ... Fundament | C ... Träger-Träger-Verbindung (Trägerstoß) |
| | D ... Stützen-Stützen-Verbindung (Stützenstoß) |
| | E ... Stützenfuß |

Bild 1.1: Rahmen nach [N 3]

Im Bild 1.1 ist ein Rahmensystem dargestellt, welches die unterschiedlichen Varianten von Verbindungen aufzeigt. Die Träger-Stützen-Verbindungen können in ein- und zweiseitig unterschieden werden. Eine zweiseitige Verbindung (B) kann in zwei einseitige Verbindungen (A) aufgegliedert und dementsprechend bei der Betrachtung behandelt werden. Hinsichtlich der

Anwendung und Berechnung von Stößen – Träger- (C) und Stützenstöße (D) – gibt es keine großen Unterschiede zu den Träger-Stützen-Verbindungen. Es existieren lediglich einige Komponenten, wie zum Beispiel das „Stützen-Stegblech“ nicht bzw. sind nicht aktiv und werden daher in der Berechnung außen vor gelassen. Bei Stützenfüßen (E) hingegen kommen spezielle Komponenten in der Berechnung hinzu.

Weitere Verbindungen bei Hallen- und Geschossbauten stellen zum Beispiel die Anschlüsse von Wand- und Dachverbänden an die Rahmen dar. Diese sollen jedoch in dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Die in Bild 1.1 schematisch dargestellten Verbindungen werden entweder geschweißt oder mit hochfesten, vorgespannten Schrauben realisiert.

Bei Verbindungen mit hochfesten Schrauben wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass die Stirnplatte des Anschlusses sich

elastisch-plastisch verhält. Das heißt, die Kopfplatte kann sich verformen und bleibt somit unter Belastung nicht ideal eben. Dies wiederum kann dazu führen, dass in der Verbindung Abstützkräfte K durch die Verformung der Kopfplatte entstehen können, die zusätzlich von den Schrauben mit aufgenommen werden müssen.

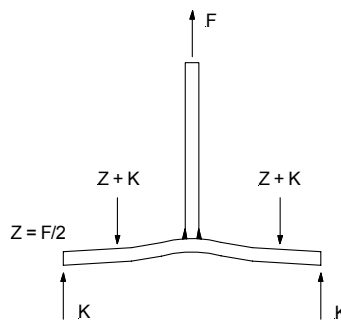


Bild 1.2: T-Stoß

Nach DIN 18800-1 [N 4], Element 801 können diese Abstützkräfte durch das T-Stoß-Modell, das in Bild 1.2 dargestellt ist, in der Berechnung berücksichtigt werden. Die Abstützkräfte entstehen in der Verbindung bei Beanspruchung durch Zugkräfte aufgrund der Blechbiegungen (Flanschbiegung). Je dicker dabei das Blech (Stirnplatte, Flansch) ist, desto geringer fallen die Abstützkräfte aus.

EC 3-1.8 [N 3] beinhaltet hingegen ein Bemessungsmodell, das einerseits die Berechnung der plastischen Beanspruchbarkeit und andererseits die Verformbarkeit von Verbindungen gestattet. Der T-Stoß bildet dabei nur einen Teil der Verbindung. Dieses Modell – das Komponentenmodell, das prinzipiell in Bild 1.3 gezeigt wird – ist der Stand der Technik und stellt somit die Grundlage dieser Arbeit dar. Die plastische Bemessung bringt zwei Vorteile hervor. Zum einen ergibt sich ein geringerer Aufwand bei der Bemessung mit Anwendung der Plastizitätstheorie im Vergleich zur Elastizitätstheorie. Zum anderen werden höhere Tragfähigkeiten erzielt, was somit zu kleineren Querschnitten führen kann [Kin-03].

Es wird angemerkt, dass die Anwendung des T-Stoß-Modells nur bei Verbindungen mit hochfesten und vorgespannten Schrauben möglich ist, da bei Verbindungen mit normalfesten Schrauben die Stirnplatte bzw. der Stützenflansch als starr angenommen wird und entsprechend dem Navier-Modell eben bleibt.

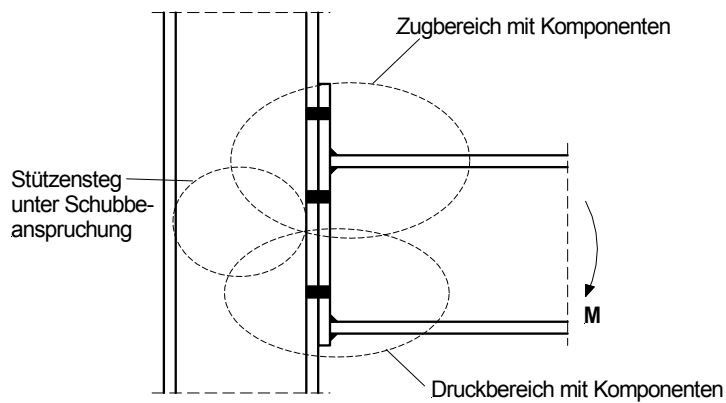


Bild 1.3: Komponentenmodell

1.2 Annex J und EC 3-1.8

Der Annex J des EC 3 [N 2] beschäftigt sich mit Träger-Stützen- und Träger-Träger-Verbindungen im Stahlhochbau. Der Normentwurf beinhaltet Bemessungsregeln für geschraubte und geschweißte Verbindungen.

2001/2002 wurde die Norm EC 3 weiter überarbeitet und in seiner Gliederung geändert. Der bis dahin selbständige Annex J des EC 3 [N 2] wurde in EC 3, Teil 1.8 [N 3] eingebracht. In diesem Teil 1.8 sind jedoch nicht nur die Bemessungsregeln für die Träger-Stützen- und Träger-Träger-Verbindungen mit hochfesten, vorgespannten Schrauben enthalten, sondern für alle möglichen Verbindungsarten im Stahlhochbau. Dazu gehören die Schweißverbindungen ebenso wie die Verbindungen mit normalfesten Schrauben oder mit Bolzen bzw. Nieten. Im Rahmen dieser Arbeit soll jedoch das Hauptaugenmerk auf die geschraubten Verbindungen gelegt werden, wobei hochfeste vorgespannte Schrauben verwendet werden.

Die Bezeichnungen Annex J und EC 3-1.8 können in dieser Arbeit als gleichwertig betrachtet werden. Die Quellenangaben zu Gleichungen, Tabellen und Abbildungen beziehen sich allerdings auf den EC 3-1.8, sofern nicht anderes vermerkt wird.

Eine Art Kommentar zu EC 3-1.8 bzw. dem vorhergehenden Annex J ist [Wal-03]. Hier wird einerseits ein kurzer Überblick zu den einzelnen Kapiteln der Norm gegeben. Andererseits werden Fragen, welche im Lauf der Zeit während der Arbeiten an EC 3-1.8 gesammelt wurden, beantwortet. Damit wird auch ein Einblick in den Hintergrund der Norm gegeben.

1.3 Zielstellung und Gliederung der Arbeit

In den letzten Jahren sind viele Forschungsarbeiten im Hinblick auf die Verbindungen durchgeführt worden [siehe „weiterführende Literatur“]. Ein Teil der Ergebnisse ist in der neuesten vorliegenden Fassung des EC 3-1.8 [N 3] enthalten, andere Ergebnisse oder Vorschläge hingegen nicht. Hierauf soll jedoch nicht eingegangen werden, da dies sonst zu einer zu umfangreichen und ausschweifenden Arbeit im Hinblick auf das eigentliche Thema führen würde. Eine eingehende Beschreibung bzw. Auflistung der Entwicklung in den letzten Jahren liefert beispielsweise [Jas-97], [Jas-99].

In dieser Arbeit wird auf das Problem der Interaktion der Schnittgrößen Biegemoment und Normalkraft eingegangen, wobei es sich hier um die Normalkrafteintragung in die Verbindung über den Trägerquerschnitt handelt. Die Problematik der Einbeziehung einer Stützennormalkraft bei der Bemessung von Verbindungen wird beispielsweise von Kuhlmann in [Ku-01] behandelt. Allerdings muss auch hier unterschieden werden in das Problem der Verbindungen im Rahmen selbst – also Träger-Stützen- und Träger-Träger-Verbindungen – und den Anschlüssen wie Stützenfüße. Der Berechnung von Stützenfüßen wird auch das Komponentenmodell zugrunde gelegt [Wey-01]. Die Stützenfüße werden aber aufgrund ihrer eigenen Anschlussproblematik im Übergang zum Fundament (Beton-Komponenten) in dieser Arbeit nicht behandelt.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der *Problematik der Interaktion der Schnittgrößen Biegemoment M und Normalkraft N (Druck- oder Zugkraft) bei geschraubten Träger-Stützen- und Träger-Träger-Verbindungen*. Es werden dabei auch Hinweise zur Behandlung von geschweißten Verbindungen gegeben. Es wird das zugrunde liegende Komponentenmodell sowie die Klassifizierung der Verbindungen beschrieben. Dabei werden die Stichwörter „nachgiebige Verbindungen“ und „Interaktion“ erläutert. Der Abschnitt 3 beinhaltet weiterhin Erläuterungen zu bisherigen Interaktionsregeln bzw. Vorschlägen zur Interaktion. Ausführungen zu den untersuchten Verbindungen sowie deren Modellierung mit finiten Elementen sind in Kapitel 4 zu finden. In Kapitel 5 werden die Voruntersuchungen und -betrachtungen zu einzelnen Komponenten beschrieben. Abschnitt 6 enthält den Vorschlag zur Berechnung der Tragfähigkeit einer Verbindung bei alleiniger Beanspruchung durch eine Normalkraft sowie Regeln zur Interaktion der beiden Schnittgrößen und stellt damit den Kern der Arbeit dar. Der Bemessungsvorschlag bezieht sich dabei nur auf *symmetrisch aufgebaute Verbindungen*. Hier ergeben sich die maximalen Normalkrafttragfähigkeiten für Zug- und Druck bei $M_{y, sd} = 0$ kNm. Mit dem Vergleich und der Auswertung der verschiedenen Berechnungen in Kapitel 7 soll einerseits die Gültigkeit und Sicherheit sowie andererseits die Handhabbarkeit und Fähigkeit des Vorschlages gezeigt werden. Im Teil 2 des Kapitels 7 wird der vorgeschlagene Berechnungsalgorithmus an einem Beispiel dargestellt. Das Kapitel 8 dient der Zusammenfassung und Bewertung der Arbeit.

2 Nachgiebige Verbindungen

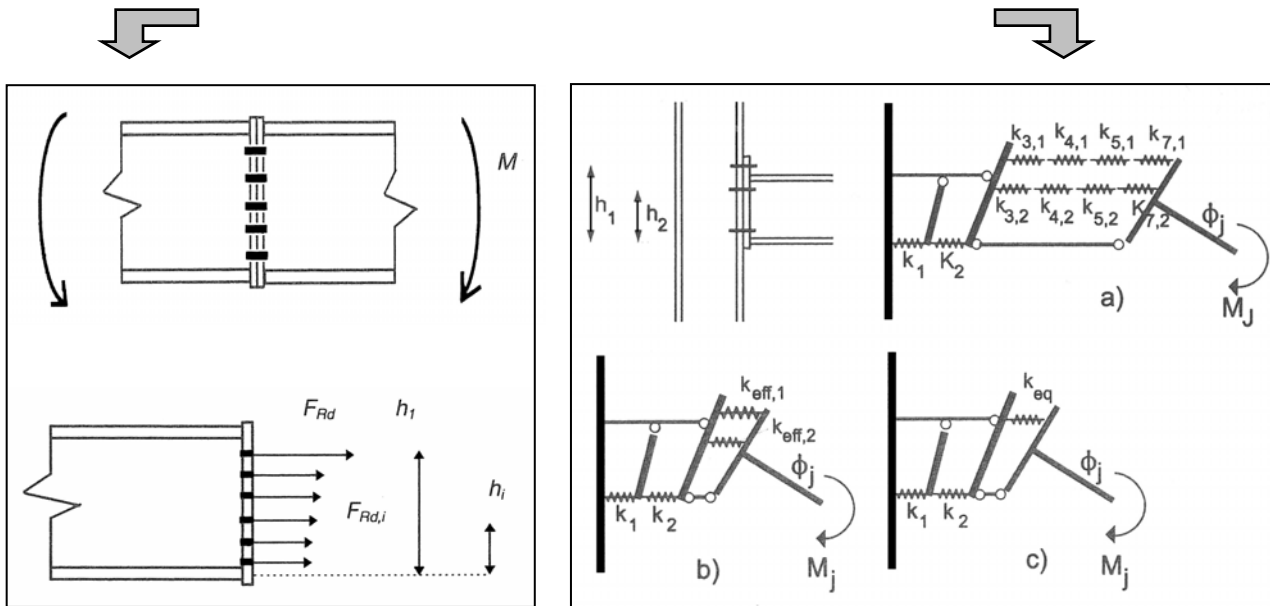
2.1 Das Komponentenmodell

Verbindungen werden charakterisiert durch ihre Tragfähigkeit, Steifigkeit und die Fähigkeit, Verformungen zu ertragen (Duktilität, Rotationskapazität). Mit den Regeln nach EC 3-1.8 [N 3] können die Grenzmomenten Tragfähigkeit und die Rotationssteifigkeit einer Verbindung berechnet werden. Grundlage ist dabei das Komponentenmodell. Der Grundgedanke hierbei ist die Aufspaltung einer Verbindung in die elementaren Bestandteile. Jede Verbindung unter Momentenbeanspruchung wird in einen Schub-, Druck- und Zugbereich aufgeteilt (Bild 1.3) [Pas-98]. Diesen Bereichen sind bestimmte Komponenten zugeordnet. Die einzelnen Komponenten können hinsichtlich der eigenen Tragfähigkeit bei Druck-, Zug- oder Schubbeanspruchung berechnet und nachgewiesen werden. Mittels Gleichgewichtsbeziehungen kann dann aus den Tragfähigkeiten der Komponenten die Grenzmomenten Tragfähigkeit bestimmt und die Verbindung entsprechend nachgewiesen werden. Die Komponenten werden im Folgenden vorgestellt und näher erläutert.

Für die Ermittlung der Rotationssteifigkeit wird analog zur Bestimmung der Grenzmomenten Tragfähigkeit vorgegangen. Die Verbindung wird in die Komponenten zerlegt und für bestimmte Komponenten werden äquivalente Wegfedersteifigkeiten berechnet. Mit Gleichgewichtsbeziehungen werden die Translationsfedersteifigkeiten in eine der gesamten Verbindung entsprechende Rotationsfedersteifigkeit überführt [Wey-95]. Diese Steifigkeit bzw. die Momenten-Rotations-Charakteristik kann in Stabwerksprogrammen für die realitätsnahe Simulation der Verbindung eingesetzt werden. Das Komponentenmodell ermöglicht somit, die Verformbarkeit und Tragfähigkeit einer Verbindung und deren Auswirkung auf das gesamte Rahmensystem zu erfassen. Ausführliche Erläuterungen zur Berechnung der Rotationssteifigkeit der Verbindung über die Einzelsteifigkeiten der Komponenten sowie zur Berechnung des Grenzmomentes aus den Einzeltragfähigkeiten werden beispielsweise in [Höß-92], [Maq-98], [Tsc-99] gegeben.

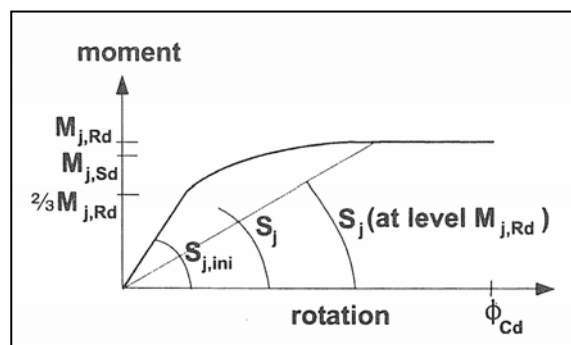
Die Norm enthält hinsichtlich der Rotationskapazität nur allgemeine Regelungen. Zur Bestimmung der Rotationskapazität sind die Ausführungen von Kuhlmann und Kühnemund in [CISM 00, Part III] ausführlicher als in der Norm und daher empfehlenswert.

Verbindung



Verteilung der inneren Kräfte zur Berechnung der Tragfähigkeit

Wegfedern der einzelnen Komponenten zur Berechnung der Rotationssteifigkeit



Momenten-Rotations-Charakteristik einer Verbindung

Bild 2.4: Komponentenmodell

In Bild 2.4 ist prinzipiell die Gesamtheit des Komponentenmodells dargestellt. Auf der einen Seite können die Einzeltragfähigkeiten, die die inneren Kräfte darstellen, berechnet werden. Andererseits werden die Steifigkeitskoeffizienten der einzelnen Komponenten definiert. Beides wird letztlich zusammengeführt in der Momenten-Rotations-Charakteristik der Verbindung.

2.2 Die Komponenten

Eine Verbindung besteht aus mehreren Bauteilen, die mit entsprechenden Verbindungsmitteln miteinander verknüpft sind. Unter Belastung stellen sich innerhalb der Verbindung verschiedene Beanspruchungsbereiche ein (Bild 1.3). Die Verbindung kann in einzelne Komponenten zerlegt werden, die diesen Beanspruchungsbereichen, wie in Bild 2.5 zu sehen ist, zugeordnet werden können.

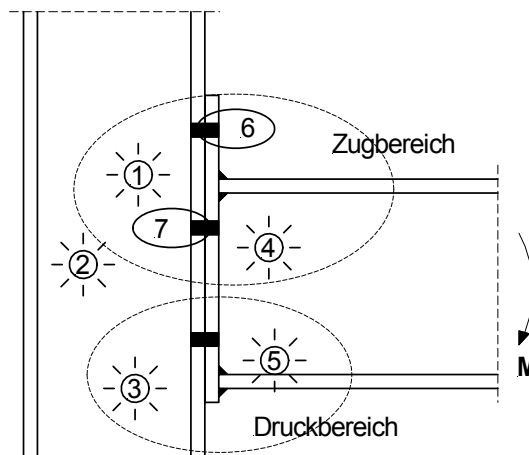


Bild 2.5: Beanspruchungsbereiche und Komponenten

In Tabelle 2.1 sind alle Komponenten aus dem EC 3-1.8, unterteilt nach der Beanspruchung, aufgelistet. Die Verbindungsmittel Schrauben unter Schubbeanspruchung und Schweißnähte unter Zug-/Scherbeanspruchung sind ebenfalls nachzuweisen, stellen aber im Sinne des Modells keine eigenständigen Komponenten dar und sind deshalb in der Auflistung nicht enthalten. Bei den angesprochenen Verbindungsmitteln wird davon ausgegangen, dass diese für die jeweilige Beanspruchung ausreichend bemessen sind und daher für das Versagen der gesamten Verbindung nicht maßgebend werden.

Tabelle 2.1: Komponenten nach EC 3-1.8

Komponenten unter Zugbeanspruchung	Komponenten unter Druckbeanspruchung	Komponenten unter Schubbeanspruchung
Stützensteg Stützenflansch und Schrauben (T-Stoß) Kopfplatte und Schrauben (T-Stoß) Flanschlaschen und Schrauben (T-Stoß) Trägersteg Lasche Grundplatte und Ankerbolzen	Stützensteg Trägerflansch und dazugehöriger Trägersteganteil Lasche Beton Grundplatte	Stützensteg

Jede Komponente hat ihre eigene Tragfähigkeit und ihre eigene Steifigkeit. Im Folgenden werden nur die in der weiteren Arbeit verwendeten Komponenten hinsichtlich der Tragfähigkeit näher erläutert. Je nach Verbindungsanordnung können jedoch weitere Komponenten beteiligt sein. Hier wird auf den EC 3-1.8 selbst verwiesen. Ebenso wird in der Arbeit auf die Rotationssteifigkeit der Verbindung und damit auf die Einzelsteifigkeiten der Komponenten nicht eingegangen.

- Stützenflansch und Schrauben (T-Stoß) unter Zugbeanspruchung

Zur Berechnung der Tragfähigkeit dieser Komponente, schematisch gezeigt in Bild 2.6, wird das Tragmodell „T-Stoß“ (Fließgelenkmodell) herangezogen. Bei einem T-Stoß gibt es drei Versagensmöglichkeiten [Zoe-74], [Zoe-83], die untersucht werden müssen:

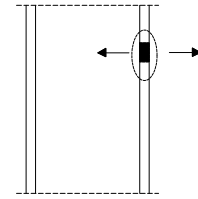


Bild 2.6: Stützenflansch und Schrauben unter Zugbeanspruchung

- Ausbildung einer Fließgelenkkette im Stützenflansch
- Schraubenversagen
- Schraubenversagen in Kombination mit Fließen des Flansches.

Der eintretende Versagensmechanismus ist abhängig von den gewählten Abmessungen für Stützenflansch und Schraubendurchmesser. Die T-Stöße können aus einer einzelnen Schraubenreihe, aber auch aus mehreren Schraubenreihen, die eine Gruppe bilden, bestehen. Dies ist von der Anordnung von Steifen zwischen den Schraubenreihen und der Verbindungsanordnung (bündige oder überstehende Kopfplatte) an sich abhängig. Für die T-Stöße müssen entsprechende effektive Längen berechnet werden. Im EC 3-1.8 sind in den Tabellen 6.4 und 6.5 die dafür zu verwendenden Gleichungen enthalten. Mit den effektiven Längen können die plastischen Momente für die Ausbildung der Fließgelenke bestimmt und die Tragfähigkeit des T-Stoßes nach den Gleichungen (2.1) bis (2.4) berechnet werden.

Modus 1: Fließen des Flansches

$$F_{t.1.Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m} \quad (2.1)$$

Modus 2: Schraubenversagen und Fließen des Flansches

$$F_{t.2.Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd} + n \cdot \sum B_{t.Rd}}{m + n} \quad (2.2)$$

Modus 3: Schraubenversagen

$$F_{t.3.Rd} = \sum B_{t.Rd} \quad (2.3)$$

Tragfähigkeit des T-Stoßes

$$F_{t.fc.Rd} = \min \begin{pmatrix} F_{t.1.Rd} \\ F_{t.2.Rd} \\ F_{t.3.Rd} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

In Bild 2.7 ist die Möglichkeit der Aussteifung durch hinterlegte Bleche (backing plates) im Zugbereich von Verbindungen gezeigt. Auf die Berücksichtigung dieser in der Berechnung wird hier nicht explizit eingegangen. Die Vorgehensweise und die dabei anzuwendenden Gleichungen für die Berechnung der plastischen Momententragfähigkeit können der Norm (EC 3-1.8, Tab. 6.2) [N 3] entnommen werden.

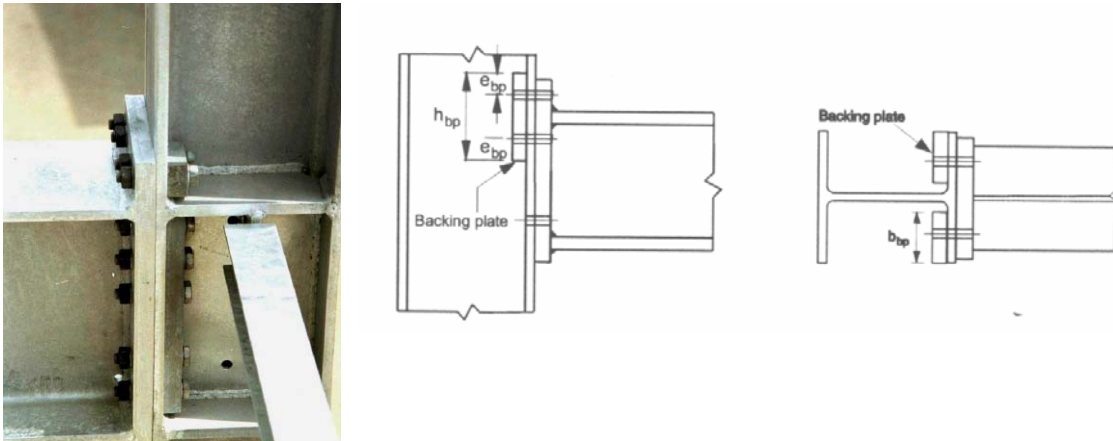


Bild 2.7: Hinterlegte Platte

- Kopfplatte und Schrauben (T-Stoß) unter Zugbeanspruchung

Die Berechnung dieser Komponente, zu sehen in Bild 2.8, ist analog zur Berechnung der Komponente Stützenflansch und Schrauben unter Zugbeanspruchung durchzuführen. Für die Berechnung der effektiven Längen der T-Stöße ist Tabelle 6.6 des EC 3-1.8 zu verwenden. Die Tragfähigkeit des T-Stoßes ergibt sich nach Gleichung (2.5) wiederum aus der kleinsten Kraft aus den drei bekannten Versagensmechanismen.

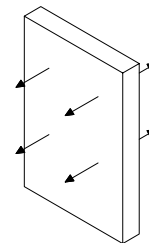


Bild 2.8: Kopfplatte und Schrauben unter Zugbeanspruchung

Tragfähigkeit des T-Stoßes

$$F_{t,ep,Rd} = \min \begin{pmatrix} F_{t,1,Rd} \\ F_{t,2,Rd} \\ F_{t,3,Rd} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

- Stützensteg unter Zugbeanspruchung

In Bild 2.9 ist die Komponente Stützenstegblech unter Zugbeanspruchung schematisch dargestellt. Bei der Berechnung der Komponente Stützensteg unter Zugbeanspruchung ist ein Reduktionsfaktor ω einzubeziehen. Dieser Reduktionsfaktor berücksichtigt die Möglichkeit, dass gleichzeitig Schubeffekte im Stützenstegblech infolge der Beanspruchung auftreten.

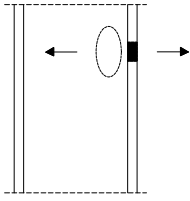


Bild 2.9: Stützensteg unter Zugbeanspruchung

Der Faktor ist abhängig von der Verbindungskonfiguration – ein- oder zweiseitig – sowie der Belastung – gleich- oder gegenläufige Momente. Die zu verwendende effektive Breite b_{eff} ist für geschraubte und geschweißte Verbindungen verschieden, siehe [N 3], 6.2.4.3 (2). Bei geschraubten Verbindungen ist zur Wahrung der Kompatibilität mit den anderen Komponenten die effektive Länge des T-Stoßes als effektive Breite b_{eff} zu nutzen. Die Tragfähigkeit der Komponente Stützensteg unter Zugbeanspruchung kann mit der Gleichung (2.6) berechnet werden.

Stützensteg unter Zugbeanspruchung

$$F_{t.wc.Rd} = \omega \cdot b_{\text{eff}} \cdot t_{wc} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (2.6)$$

- Stützensteg unter Druckbeanspruchung

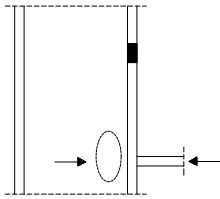


Bild 2.10: Stützensteg unter Druckbeanspruchung

Der unausgesteifte Stützensteg unter Druckbeanspruchung, wie in Bild 2.10 abgebildet, wird analog zur Komponente Stützensteg unter Zugbeanspruchung berechnet. Im Unterschied zur Zugbeanspruchung, die stabilisierend wirkt, kann es bei Druckbeanspruchung unter anderem zu lokalen Instabilitäten (Beulen) kommen. Daher wird zusätzlich zum Reduktionsfaktor ω zur Berücksichtigung der Schubeffekte ein weiterer Reduktionsfaktor ρ eingeführt. Durch diesen Faktor wird die Schlankheit des Stegbleches in die Berechnung einbezogen. Hiermit wird beachtet, dass ab einem bestimmten Plattenschlankheitsgrad das Blech sich der Beanspruchung durch lokales Ausbeulen zu entziehen versucht. Um diesem Versagen entgegen zu wirken, wird somit die zulässige Beanspruchbarkeit der Komponente abgemindert. Die effektive Breite zur Lasteintragung der Druckkraft aus dem Trägerflansch über die Kopfplatte und den Stützenflansch in den Stützensteg wird für geschweißte und geschraubte Verbindungen unterschiedlich berechnet ([N 3], Gl. 6.10 und 6.11). Es wird ein Lastausbreitungswinkel von 30° bei geschraubten Verbindungen zugrunde gelegt. Die Tragfähigkeit der Komponente Stützensteg unter Druckbeanspruchung kann mit der Gleichung (2.7) ermittelt werden.

Stützensteg unter Druckbeanspruchung

$$F_{c.wc.Rd} = \omega \cdot \rho \cdot b_{\text{eff}} \cdot t_{wc} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (2.7)$$

- Stützensteg unter Schubbeanspruchung

Die Komponente, die in Bild 2.11 dargestellt ist, beinhaltet den Schubwiderstand des Stützenstegbleches. Dieser Bauteilwiderstand wird nur bei Randknoten (einseitige Verbindung) und bei antisymmetrisch belasteten Innenknoten (zweiseitige Verbindung) eines Rahmensystems aktiviert. Bei symmetrisch belasteten Innenknoten wird der Widerstand der Komponente nicht aktiviert.

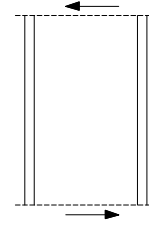


Bild 2.11: Stützensteg unter Schubbeanspruchung

Die Tragfähigkeit der Komponente unter Schubbeanspruchung wird mit der Gleichung (2.8) berechnet und kann durch Anwendung zusätzlicher Stegbleche (ein- oder beidseitig) oder Steifen erhöht werden.

Stützensteg unter Schubbeanspruchung

$$V_{wp.Rd} = 0,9 \cdot A_{vc} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \quad (2.8)$$

Während bei den Komponenten Stützensteg unter Druckbeanspruchung bzw. Stützensteg unter Zugbeanspruchung der Reduktionsfaktor ω zur Berücksichtigung der möglichen kombinierten Beanspruchung des Stützenstegbleches durch Schub- und Normalspannungen eingeführt wurde, wird hier die Schubbeanspruchbarkeit stets um 10 % abgemindert, um dieser Beanspruchungskombination gerecht zu werden. Es wird darauf hingewiesen, dass für diese Komponente die Schlankheit auf $d/t_w \leq 69 \cdot \varepsilon$ begrenzt ist.

- Trägerflansch und dazugehöriger Trägersteganteil unter Druckbeanspruchung

Diese Komponente, die in Bild 2.12 zu sehen ist, wird nach dem Komponentenmodell nur hinsichtlich der Tragfähigkeit berechnet. Hinsichtlich der Steifigkeit werden die Verformungsanteile der Verformung des Trägers und nicht der Verbindung zugeordnet, so dass der Trägerflansch und dazugehörige Trägersteganteil keinen Beitrag zur Rotationssteifigkeit liefern.

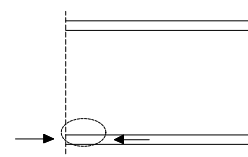


Bild 2.12: Trägerflansch und Trägersteganteil unter Druckbeanspruchung

Der Bemessungswiderstand dieser Komponente ergibt sich über den entsprechend der Verbindungsanordnung angesetzten Hebelarm aus der Momententragfähigkeit des Trägers nach der Gleichung (2.9). Das Grenzmoment ist dabei abhängig von der Querschnittsklasse:

- für Querschnittsklasse 1 und 2 – plastisches Grenzmoment
- für Querschnittsklasse 3 – elastisches Grenzmoment
- für Querschnittsklasse 4 – Grenzmoment des effektiven Querschnitts.

Trägerflansch und -steganteil unter Druckbeanspruchung

$$F_{c.fb.Rd} = \frac{M_{b.Rd}}{h_b - t_{fb}} \quad (2.9)$$

- Trägersteg unter Zugbeanspruchung

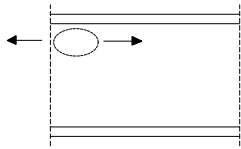


Bild 2.13: Trägersteg unter Zugbeanspruchung

Bei der Ermittlung der Tragfähigkeit des Trägersteges unter Zugbeanspruchung, dargestellt in Bild 2.13, ist für die effektive Breite die entsprechende effektive Länge der kopfplattenseitigen T-Stöße zur Wahrung der Kompatibilität zu verwenden. Hinsichtlich der Steifigkeit gelten die Ausführung zur Komponente Trägerflansch und dazugehöriger Trägersteganteil unter Druckbeanspruchung. Die Tragfähigkeit des Trägersteges unter Zugbeanspruchung wird nach der Gleichung (2.10) berechnet.

Trägersteg unter Zugbeanspruchung

$$F_{t.wb.Rd} = b_{eff} \cdot t_{wb} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (2.10)$$

2.3 Klassifizierung

Eine Klassifizierung ist eine Einordnung von Objekten in Gruppen (Klassen) entsprechend bestimmter Merkmale. Dies dient zum Teil der Unterscheidung und aber andererseits auch der Zusammenfassung.

Da der Eurocode 3 vor allem Regeln zur Berechnung der Tragfähigkeit und der Rotationssteifigkeit, jedoch kaum hinsichtlich der Rotationskapazität enthält, werden die Verbindungen nach der Norm auch nur nach der Tragfähigkeit und der Steifigkeit eingeordnet. Wie für die Berechnung der Rotationskapazität gibt es auch für die Klassifizierung nach diesem charakteristischen Merkmal Vorschläge, die in diesem Zusammenhang mit aufgeführt werden.

Die beiden bisherigen Bezeichnungen „biegesteif“ und „gelenkig“, die nach der DIN 18800 [N 4] und dem allgemeinen Verständnis sowohl für die Klassifizierung der Tragfähigkeit als auch für die Steifigkeitsbeschreibung gebraucht worden, werden weiterhin genutzt, allerdings nur für die Einordnung hinsichtlich der Steifigkeit einer Verbindung.

Tabelle 2.2: Einordnung nach der Steifigkeit

Einordnung hinsichtlich Steifigkeit		
	unverschiebliche Rahmen	verschiebliche Rahmen
gelenkig	$S_{j.ini} < 0,5 \cdot S_{system}$	$S_{j.ini} < 0,5 \cdot S_{system}$
nachgiebig	$0,5 \cdot S_{system} \leq S_{j.ini} \leq 8 \cdot S_{system}$	$0,5 \cdot S_{system} \leq S_{j.ini} \leq 25 \cdot S_{system}$
biegesteif/starr	$S_{j.ini} > 8 \cdot S_{system}$	$S_{j.ini} > 25 \cdot S_{system}$

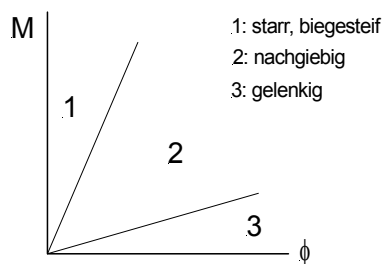


Bild 2.14: Grenzen für die Klassifizierung nach der Steifigkeit

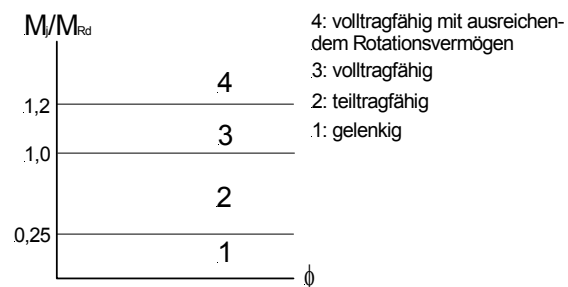


Bild 2.15: Grenzen für die Klassifizierung nach der Tragfähigkeit

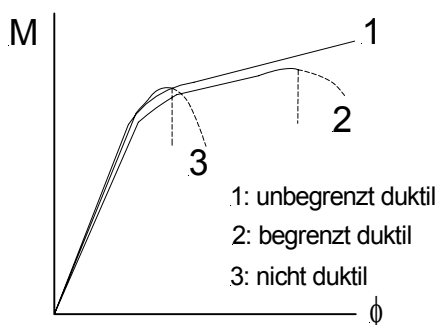
Diese beiden Beschreibungen stellen im Hinblick auf die Steifigkeit für die nachgiebigen Verbindungen wie in Bild 2.14 zu sehen ist, die obere und untere Grenze dar. Die Einordnung der Verbindung in die drei Steifigkeitsklassen ist ein Vergleich der Rotationssteifigkeit der Verbindung $S_{j.ini}$ mit der „Systemsteifigkeit“ und mit dementsprechenden Grenzen in Tabelle 2.2 aufgeführt. Diese Systemsteifigkeit, zu berechnen nach der Gleichung (2.11), entspricht der Biegesteifigkeit des Trägers in Abhängigkeit von der Rahmenseitenweite.

$$S_{system} = \frac{E \cdot I_b}{l_{sp}} \quad (2.11)$$

Die Klassifizierung hinsichtlich der Tragfähigkeit der Verbindung wird als Vergleich zur Momententragfähigkeit der beiden angeschlossenen Bauteile vorgenommen. Aus Tabelle 2.3 und Bild 2.15 wird ersichtlich, dass eine als gelenkig bezeichnete Verbindung nicht nur Kräfte übertragen kann, sondern begrenzt auch Momente. Dies stellt einen Unterschied zur bisherigen Auffassung der Bezeichnung „gelenkig“ dar. Nach DIN 18800 sind gelenkige Verbindungen momentenfrei. Als volltragfähig wird eine Verbindung hinsichtlich der aufnehmbaren und übertragbaren Momente bezeichnet, wenn das Grenzmoment der Verbindung mindestens dem kleineren der beiden Grenztragmomente der angeschlossenen Bauteile – Träger und Stütze – entspricht.

Tabelle 2.3: Einordnung nach der Tragfähigkeit

Einordnung hinsichtlich Tragfähigkeit	
gelenkig	$M_{j,Rd} \leq 0,25 \cdot M_{Rd}$
teiltragfähig	$0,25 \cdot M_{Rd} < M_{j,Rd} < M_{Rd}$
volltragfähig	$M_{j,Rd} \geq M_{Rd}$

**Bild 2.16: Klassifizierung nach der Rotationsfähigkeit****Tabelle 2.4: Einordnung nach der Rotationskapazität**

Einstufung der Verbindung hinsichtlich der Rotationskapazität	
Klasse 1	es liegt ein ausreichendes Rotationsvermögen vor plastische Verteilung der inneren Kräfte
Klasse 2	es liegt ein beschränktes Verformungsvermögen vor plastische Verteilung der inneren Kräfte
Klasse 3	es liegt keine Duktilität vor elastische Verteilung der inneren Kräfte

Tabelle 2.4 werden daher die 3 Klassen nach [Wey-97] beschrieben. Bild 2.16 zeigt mögliche dazugehörige Momenten-Rotations-Kurven.

Die Erläuterungen zur Klassifizierung von Verbindungen macht die Vielfalt deutlich. Nach diesen Einordnungskriterien sind nachgiebige Verbindungen solche Verbindungen, welche hinsichtlich ihrer Rotationssteifigkeit bei Momentenbeanspruchung zwischen „gelenkigen“ und „biegesteifen“ Verbindungen angesiedelt sind. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sich der Winkel der Systemlinien des Anschlusses bei Belastungssteigerung ändert. Bei biegesteifen Anschlüssen bleibt der Winkel der Systemlinien konstant.

Einer volltragfähigen Verbindung wird zudem ausreichendes Rotationsvermögen unterstellt, wenn die Verbindung ein 20 % größeres Grenztragemoment gegenüber den angeschlossenen Bauteilen aufweist. Besitzt eine Verbindung ein Grenzmoment zwischen den beiden Grenzen für volltragfähig und gelenkig, dann wird diese Verbindung als teiltragfähig bezeichnet.

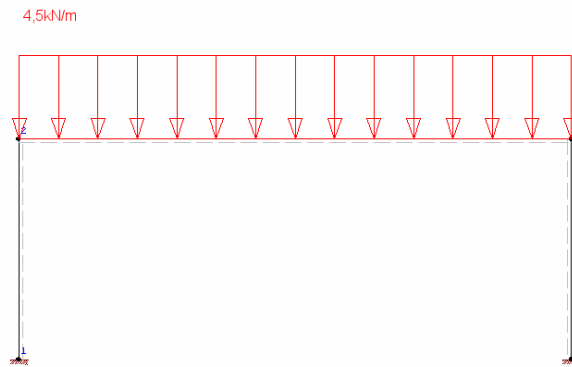
Neben diesen beiden bisher im Annex J bzw. EC 3-1.8 verankerten Klassifizierungen müssen und können die Verbindungen ähnlich wie die Querschnitte hinsichtlich ihres Rotationsvermögens bewertet werden [Maq-98], [Wey-97]. Diese Einstufung ist bisher nicht im Normenentwurf enthalten, aber im Hinblick auf die Regeln zur Rotationskapazität ist eine Erweiterung des Entwurfs um diese Klassifizierung wünschenswert.

Wie in Bild 2.16 zu sehen ist, kann anhand der Momenten-Rotations-Charakteristik einer Verbindung deren Verformbarkeit, also die Duktilität eingeschätzt werden. Damit sind Rückschlüsse auf das Tragverhalten der Verbindung selbst, aber auch innerhalb des gesamten Systems möglich. Verbindungen mit nicht ausreichender Rotationskapazität dürfen beispielsweise nicht in Systemen angewendet werden, die plastisch bemessen sind ([N 3], Abschnitt 6.4). Die Rotationskapazität ist von Bedeutung hinsichtlich der Möglichkeit der plastischen Umlagerung der inneren Kräfte. In

Nachgiebige Verbindungen können trotzdem volltragfähig, teiltragfähig, aber auch gelenkig im Sinne der Tragfähigkeitsklassifizierung sein. Der Begriff „nachgiebige Verbindungen“ wird also vor allem aufgrund der realitätsnäheren Beschreibung hinsichtlich der Verformbarkeit genutzt und gibt dabei einen Hinweis auf die verwendete Grundlage, den EC 3-1.8 bzw. EC 3, Annex J. Es werden somit auch die Verbindungen, die letztendlich als biegesteif eingeordnet werden können, innerhalb dieser Arbeit mit betrachtet.

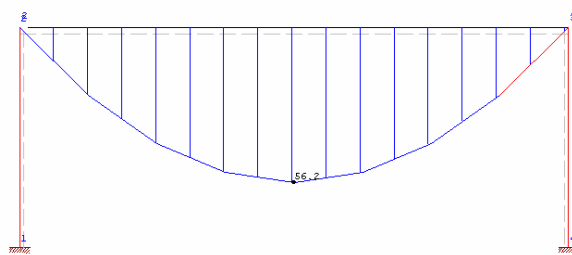
2.4 Vor- und Nachteile des EC 3-1.8

Mit den Bemessungsregeln für Verbindungen ermöglicht der EC 3-1.8 Rahmensysteme mit verformbaren Anschlüssen sowie die Ausnutzung plastischer Reserven (Ausbildung von Fließgelenken auch im Anschlussbereich) und die Möglichkeit der Momentenumlagerung. Somit können Anschlüsse einfacher konstruiert und montiert werden, da versteifende Maßnahmen entfallen können. Verbindungen müssen nicht mehr überdimensioniert werden, um den Kriterien „biegesteif“ und „volltragfähig“ gerecht zu werden. Es ergibt sich somit eine kostengünstigere Herstellung und damit wirtschaftliche Konstruktionen [Wey-97]. Bisher ausgeschlossene Verbindungen, wie halbsteife und nicht volltragfähige Verbindungen, erhöhen nun die Anschlussvielfalt. Durch die Möglichkeit der Einbeziehung der Momenten-Rotations-Charakteristik (Steifigkeit) in die Systemberechnung kann eine wirtschaftliche Minimierung der Querschnitte und eine Abstimmung zwischen Knotenausbildung und den Stützen bzw. Trägern erfolgen. Mittels der Klassifizierungen kann das Tragverhalten der Verbindung realitätsnah eingeschätzt, nachvollzogen und modelliert werden. Somit kann bei der Systemberechnung die Wechselwirkung zwischen Tragwerk und Randbedingungen (Anschlüsse) hinsichtlich der Schnittgrößen und Verformungen berücksichtigt werden. In den Bildern 2.14 bis 2.17 werden zur Veranschaulichung die Momentenverläufe von Rahmen mit verschiedenen Anschlusssteifigkeiten unter Belastung gezeigt. Natürlich haben die Verbindungen auch Einfluss auf die anderen Schnittgrößen sowie die Verformungen.



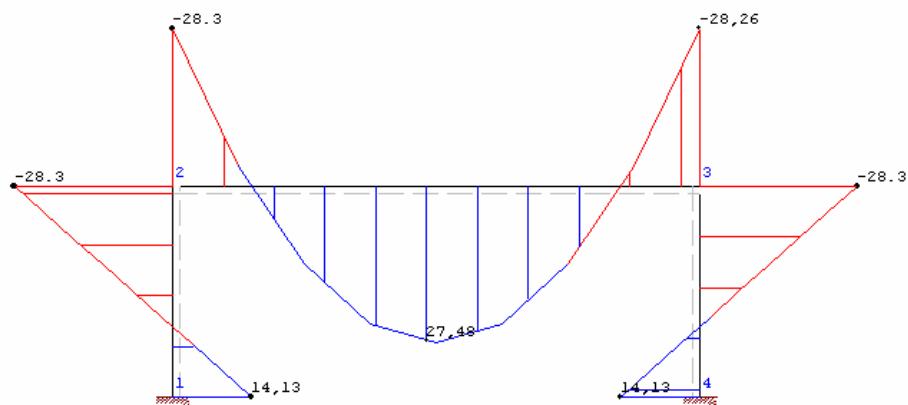
$h = 4 \text{ m}$
 $l = 10 \text{ m}$
 $q = 4,5 \text{ kN/m}$
 IPE 330
 S235

Bild 2.17: System und Lasten



$M_E = 0 \text{ kNm}$
 $M_F = 56,2 \text{ kNm}$

Bild 2.18: Momentenverlauf bei gelenkigen Träger-Stützen-Verbindungen



$M_E = -28,3 \text{ kNm}$
 $M_F = 27,48 \text{ kNm}$

Gelenkfedern
 in den
 Rahmenecken:
 $c = 500 \text{ Nm/rad}$

Bild 2.19: Momentenverlauf bei nachgiebigen Träger-Stützen-Verbindungen

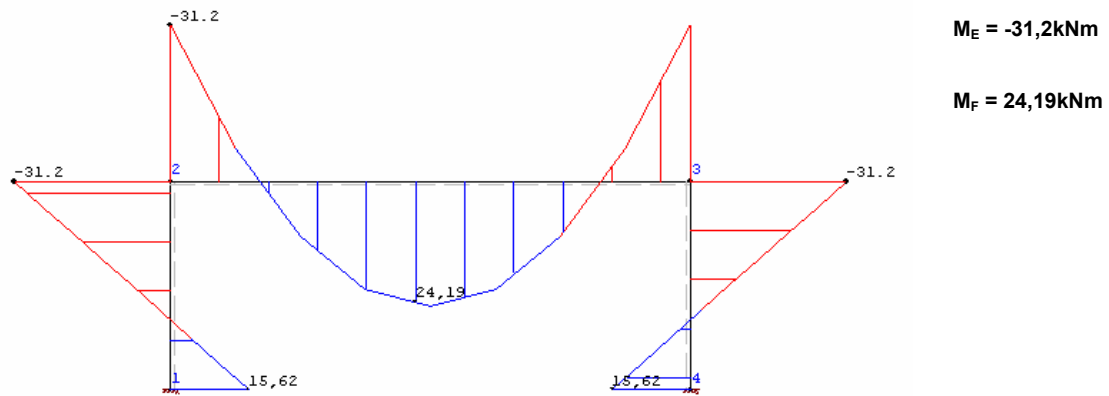


Bild 2.20: Momentenverlauf bei biegesteifen Träger-Stützen-Verbindungen

Wie der Vergleich in Tabelle 2.5 zeigt, ergibt sich bei der Anwendung des Komponentenmodells und damit der Klassifizierung der Verbindung als „Nachgiebige Verbindung“ ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Eck- und Feldmoment für diesen Rahmen unter dieser Belastung. Es wäre somit eine wirtschaftlichere Profilauswahl und Bemessung möglich im Vergleich zu den anderen beiden Varianten, biegesteifer Ausbildung der Rahmenecke. Es ist zu sehen, dass die Momente stark unterschiedlich sind in den beiden Grenzbereichen, sich aber annähern in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Verbindung im Bereich der nachgiebigen Verbindungen.

Tabelle 2.5: Vergleich der Ergebnisse

	gelenkig	nachgiebig	biegesteif
Feldmoment [kNm]	56,2	27,48	24,19
Eckmoment [kNm]	0	-28,3	-31,2
Verhältnis Eckmoment/ Feldmoment (Betrag)	(56,2)	1,03	1,29

Die Klassifizierung der Verbindungen entsprechend der Tragfähigkeit und Steifigkeit bietet den Vorteil die Verbindung realistisch einschätzen zu können und die Bemessung des Systems entsprechend – elastisch oder plastisch – durchführen zu können. Wird ein Tragwerk elastisch berechnet, dann wird die Klassifizierung nach der Steifigkeit herangezogen, denn die Rotationssteifigkeit beruht auf den elastischen Steifigkeiten der Komponenten. Bei einer starr-plastischen Tragwerksberechnung hingegen werden die Verbindungen nach der

Tragfähigkeit gewählt. Bei der elastisch-plastischen Tragwerksberechnung werden beide Klassifikationen herangezogen und es werden die Verbindungen sowohl hinsichtlich ihrer Steifigkeit als auch ihrer Tragfähigkeit ausgewählt. Die Berechnung der Beanspruchbarkeiten und der Beanspruchungen auf der Grundlage der Plastizitätstheorie erfordert eine reelle Einschätzung des Systems, da hierbei die plastischen Querschnitts- und Systemreserven genutzt werden. Wird die Knotensteifigkeit falsch (zu hoch) eingeschätzt, dann kann es infolge von Knotennachgiebigkeiten zu einem anderen Versagensmechanismus kommen, als bei der Bemessung angenommen wird. Dies kann zu einer Überbeanspruchung bei falscher Einschätzung der Tragfähigkeit (teiltragfähig statt volltragfähig) und damit eventuell zum Versagen des Systems führen, da im Anschluss selbst ein Fließgelenk auftreten kann.

Für eine breite Anwendung des Annex J (EC 3-1.8) als Bemessungsgrundlage von Verbindungen ist die Ausdehnung der Norm auf mehr als 60 Seiten eher hinderlich. Durch die Bereitstellung von Bemessungshilfen wie [Tsc-99], [DASt 01], [S 1] kann dieser Nachteil jedoch behoben werden. Ein weiterer Nachteil ist die Begrenzung der Schlankheit des Stützenstegbleches auf $d_c/t_{wc} \leq 69 \cdot \varepsilon$. Damit wird die Querschnittsklasse 4 (teils auch Querschnittsklasse 3) und damit der Stahlleichtbau von der Anwendung weitestgehend ausgeschlossen. Weitere Nachteile oder Lücken des Annex J konnten im EC 3-1.8 beseitigt werden, wie beispielsweise die Handhabung der Vorspannung der Schrauben, wobei die enthaltene Lösung nicht wirklich zufriedenstellend ist. In diesem Zusammenhang wird auf [Fae-98], [Schw-00] verwiesen.

Auch das Problem der Interaktion der Schnittgrößen Biegemoment und Normalkraft wird nun im Normenentwurf Eurocode 3-1.8, allerdings nicht ausreichend und umfassend, thematisiert. Nähere Ausführungen dazu sind in Abschnitt 3 enthalten.

3 Zur Interaktion

3.1 Was ist Interaktion?

Die Beschreibung der Interaktion bzw. der Interaktionsbeziehungen bezieht sich auf die Querschnittstragfähigkeit. Das Versagen von Bauteilen durch Stabilitätsversagen wird in der Arbeit nicht untersucht und daher hier auch nicht mit einbezogen. Unter Interaktion versteht man allgemein die wechselseitige Beeinflussung mehrerer verschiedener Größen (hier Schnittgrößen), die miteinander in Beziehung stehen. Interaktion zwischen den einzelnen Schnittgrößen ist notwendig, da jede Schnittgröße für sich die Beanspruchbarkeit des Querschnitts bzw. der Verbindung vollständig ausnutzen kann, das heißt eine maximal mögliche Normal- bzw. Schubspannungsverteilung bis zur, bei bestimmten Querschnitten und Schnittgrößen (siehe Bild 3.1a), vollständigen Plastizierung hervorrufen kann. Durch die Interaktionsbeziehung wird beschrieben, in welchem Zusammenhang die Schnittgrößen zueinander stehen können, um die Beanspruchbarkeit des Querschnitts bzw. der Verbindung bei Beanspruchung des Querschnitts durch verschiedene Schnittgrößen vollständig zu beanspruchen und auszunutzen.

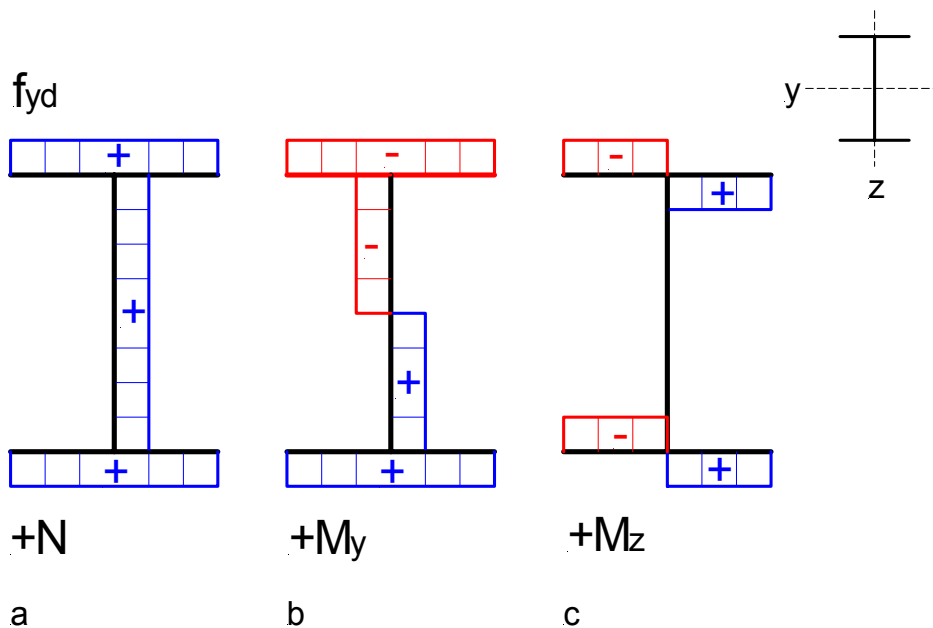


Bild 3.1: Normalspannungsverteilungen an einem Querschnitt

- a ... infolge positiver Normalkraft
- b ... infolge positiven Moments M_y
- c ... infolge positiven Moments M_z

Bild 3.1 zeigt beispielhaft für einen I-Querschnitt die Spannungsverteilungen infolge Normalkraft und der beiden Biegemomente, die am Querschnitt Normalspannungen hervorrufen. Jeweils unter alleiniger Wirkung der Schnittgröße ergibt sich die plastische Grenzschnittgröße für den Querschnitt. Darüber hinaus kann die Grenzschnittgröße nicht gesteigert werden [Vay-00] bzw. nur unter Wirkung einer weiteren Schnittgröße durch beispielsweise Überdrücken bestimmter Querschnittsteile wie dies am so genannten „balance point“ bei der Bemessung im Stahlbeton- oder Verbundbau für die Berechnung des maximal aufnehmbaren Biegemoments bei gleichzeitiger Normalkrafteinwirkung geschieht. Plastische Grenzschnittgrößen sind dadurch gekennzeichnet, dass die Querschnittsreserven vollständig für die jeweilige Beanspruchung ausgeschöpft werden – die auftretenden Spannungen entsprechend der Größe der Streckgrenze, dabei muss nicht der gesamte Querschnitt durchplastiziert sein, wie in Bild 3.1c festzustellen ist.

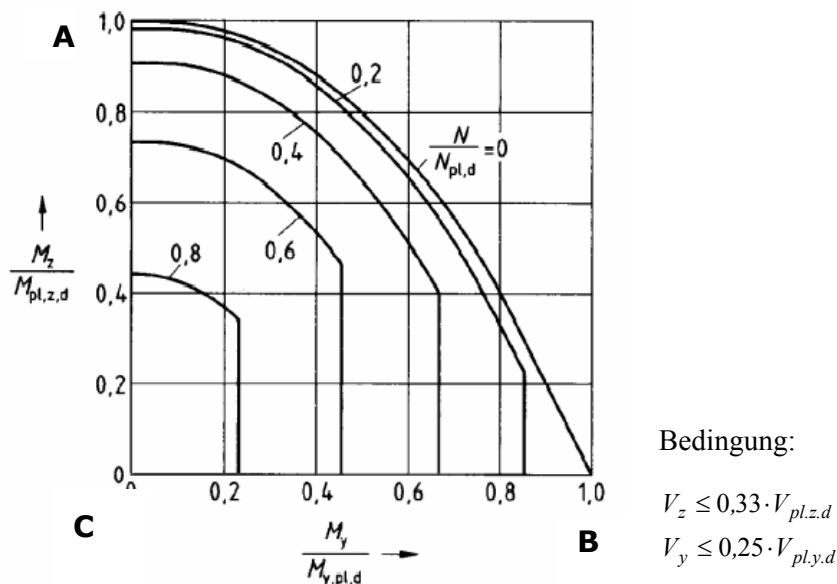


Bild 3.2: Interaktionsbeziehung bei zweiachsiger Biegung und Normalkraft nach DIN 18800-1, Elm. (757)

Bild 3.2 zeigt die Interaktionsbeziehungen für die Schnittgrößen aus Bild 3.1. Am Punkt A tritt nur das Biegemoment (normiert) um die schwache Achse auf. Es wird daher nicht abgemindert. Wird nur die Ordinate betrachtet, ist zu erkennen, dass mit zunehmender Normalkraft N (normiert) das Biegemoment $M_z/M_{pl,z,d}$ entsprechend abgemindert werden muss. Für den Punkt B und die Abzisse ergeben sich die gleichen Betrachtungen, hier für das Biegemoment M_y um die starke Achse.

Anhand der gezeigten Spannungsverteilungen in Bild 3.1 ist zu sehen, dass bei Normalkraftbeanspruchung $N/N_{pl,d} = 1$ (Punkt C in Bild 3.2) der gesamte Querschnitt – Steg, oberer und unterer Flansch – voll beansprucht wird und damit ausgelastet ist. Würde in dem Fall noch eine Beanspruchung durch ein positives Moment M_y hinzukommen, dann käme es zum

Überschreiten der Spannungsblöcke ($\sigma_{\max} = f_y$) und damit zur Überbeanspruchungen im unteren Flansch und im unteren Teil des Steges. Damit wird deutlich, dass bei gleichzeitigem Auftreten mehrerer Beanspruchungen eine Interaktion notwendig wird. Für die Interaktion der Schnittgrößen bei Querschnitten existieren solche Interaktionsregeln, für Verbindungen bisher nur in einem ungenügenden Rahmen.

In der vorliegenden Arbeit wird somit die gegenseitige Beeinflussung zwischen aufnehmbarem Biegemoment und aufnehmbarer Normalkraft (Druckkraft bzw. Zugkraft) bei nachgiebigen Verbindungen, also Verbindungen berechnet nach EC 3-1.8, betrachtet.

Wie bei der Interaktion einzelner Schnittgrößen, betrachtet an einem Querschnitt ([N 1], Abschnitt 6.2.8-6.2.10 bzw. [N 4], Element 757), muss auch bei Verbindungen die Wechselbeziehung zwischen den einzelnen Schnittgrößen für die Bemessung und den daraus folgenden Nachweis beachtet werden. Treten Biegemoment und Normalkraft gleichzeitig auf, dann muss durch eine geeignete Interaktionsbeziehung die Tragfähigkeit für diese kombinierte Beanspruchung berechnet werden können. Bei einer bestimmten Normalkraft darf nur ein entsprechend durch die Interaktionsbeziehung festgelegtes maximales Moment auftreten. Ein Überschreiten dieses Momentes führt dann zum Überschreiten der Interaktionskurve und damit zum Überschreiten der Tragfähigkeit der Verbindung. Dies gilt analog für den umgekehrten Fall: bei einem bestimmten Moment kann nur noch eine begrenzte Normalkraft aufgenommen werden, ohne dass die Verbindung versagt.

Ein grundlegender Unterschied zwischen einem Querschnitt und einer Verbindung ist allerdings der Aufbau. Eine Verbindung besteht aus einer bestimmten Anzahl von Komponenten, die für verschiedene Beanspruchungen unterschiedliche Tragfähigkeiten aufweisen und verschiedenartig zusammenwirken können.

3.2 Interaktion nach Annex J und EC 3-1.8

Der Annex J enthielt keine Interaktion für das Auftreten von Biegemoment und Normalkraft in einer Verbindung, sondern schrieb nur eine Beschränkung der maximal auftretenden Normalkraft vor ([N 2], J.1.1 (6)). Die Begrenzung, dargestellt in Bild 3.3, betrug $N_{Sd} \leq 0,1 \cdot N_{b,pl.Rd}$, wobei $N_{b,pl.Rd}$ die maximale aufnehmbare Normalkraft des angeschlossenen Riegels ist. Mit dieser Bedingung jedoch wird die Normalkraft selbst in der Bemessung nicht berücksichtigt. Die nachfolgenden Gleichungen (3.1) und (3.2) dienen zur Beschreibung der Koordinatenachsen in Bild 3.3.

$$v_b = \frac{N_{Sd}}{N_{b,pl.Rd}} \quad (3.1)$$

$$\mu = \frac{M_{Sd}}{M_{j,pl.Rd}} \quad (3.2)$$

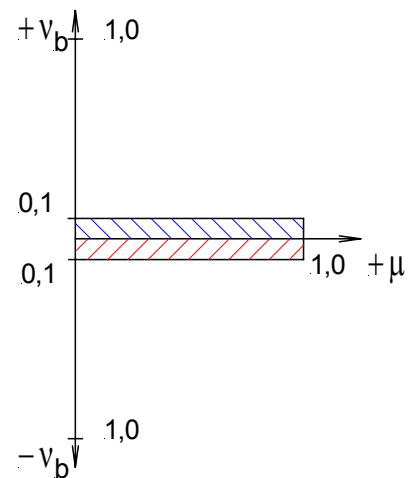
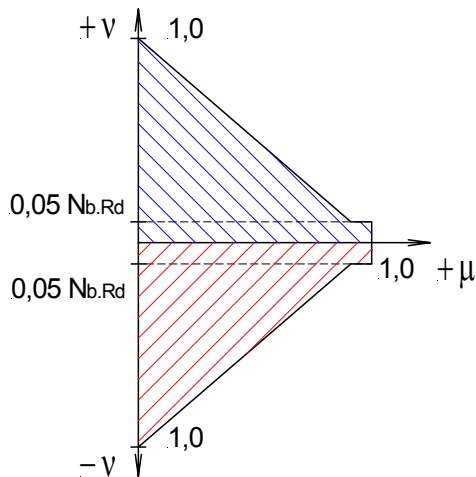


Bild 3.3: Berücksichtigung der Normalkraft nach EC 3, Annex J

Im Geschossbau kann diese Festlegung im Allgemeinen eingehalten werden, da auftretende Horizontalkräfte durch aussteifende Elemente wie Scheiben und Treppenhauskerne aufgenommen und abgetragen werden. Im Hallenbau treten jedoch einerseits deutlich größere Normalkräfte auf und andererseits wird die Aussteifung durch das gewählte statische System des Rahmens selbst bzw. mittels Aussteifungsverbänden, die an die Rahmen angeschlossen sind und mit diesen zusammenarbeiten, realisiert. Hier können also die Normalkräfte nicht mehr vernachlässigt werden.



Mit dem EC 3-1.8 [N 3], Abschnitt 6.2.5 wird nun erstmals eine Interaktionsregel für das kombinierte Auftreten von Normalkraft und Biegemoment gegeben. Die Interaktionsbeziehung ist in Bild 3.4 entsprechend dargestellt. Die Berechnung der bezogenen Normalkraft wird nun mit Gleichung (3.3) durchgeführt, wobei nur Normalkräfte nach Gleichung (3.4) berücksichtigt werden.

Bild 3.4: Berücksichtigung der Normalkraft und Interaktion nach EC 3-1.8

$$\nu = \frac{N_{Sd}}{N_{j.pl.Rd}} \quad (3.3)$$

für

$$N_{j.Sd} > 0,05 \cdot N_{b.Rd} \quad (3.4)$$

Gleichung (3.5) gibt die zu anzuwendende Interaktionsbeziehung wieder.

$$\frac{M_{j.Sd}}{M_{j.Rd}} + \frac{N_{j.Sd}}{N_{j.Rd}} \leq 1,0 \quad (3.5)$$

Wie in Bild 3.4 deutlich wird, wird die Begrenzung der Normalkraft in der Verbindung in Abhängigkeit von der Grenznormalkraft des angeschlossenen Trägers vorgenommen, das Interaktionsdiagramm selbst benutzt aber die Grenznormalkraft der Verbindung. Dies geschah so auch schon mit der 10 %-Regel im Annex J nach Bild 3.3. Diese Begrenzungen haben jedoch laut [Sil-00] keinen mechanischen Hintergrund. Dies ist außerdem ungünstig, da bei der Berechnung der Verbindung so nicht sofort festgestellt werden kann, wo die Begrenzung liegt (siehe auch Abschnitt 3.4).

In [N 3] wird bei Überschreiten der Normalkraftgrenze im Gegensatz zum Annex J [N 2] nun eine lineare Interaktion zwischen Normalkraft und Biegemoment vorgeschlagen.

Weiterhin ist in beiden Abbildungen zu sehen, dass zwischen einer Drucknormalkraft und einer Zugnormalkraft in Kombination mit dem Biegemoment in der Verbindung kein Unterschied gemacht wird.

[Wal-03] gibt Auskunft zum Hintergrund einer alternativen Interaktionsbeziehung von Normalkraft und Biegemoment bei der Bemessung einer Verbindung nach [Jas-99a], [Sok-02]. Die dort angegebenen Interaktionsregeln basieren auf der Erweiterung der Komponentenmethode zu den Stützenfüßen. Nach Ansicht der Verfasserin kann diese Analogie nur bei überproportional starken bzw. übermäßig im Bereich von Verbindungen ausgesteiften Stützenquerschnitten genutzt werden. Bei „normalen“ bzw. nicht ausgesteiften Stützenquerschnitten treten Nachgiebigkeiten der einzelnen Komponenten auf, die in die Berechnung mit einbezogen werden müssen und daher diesen Ansatz nicht rechtfertigen. Zu den weiteren Ausführungen kann einerseits aufgrund des Erscheinungsdatums (Februar 2004) keine Stellung genommen werden. Andererseits basiert diese Erweiterung der Komponentenmethode teils auf computergestützter Berechnung und empirischen Werten, die der Verfasserin nicht zugänglich sind.

Die in der Arbeit vorgestellte Erweiterung der Komponentenmethode zur Interaktion der Schnittgrößen Biegemoment und Normalkraft wurde zeitgleich, aber unabhängig erarbeitet.

3.3 Interaktionsvorschlag nach [Pas-02]

Innerhalb eines Projektes für das Deutsche Institut für Bautechnik über die „M-N-Interaktion bei nachgiebigen Verbindungen für Eurocode 3“ [Pas-02] wurde das beschriebene Problem untersucht. Dabei wurde die Begrenzung der Stegslankheit nicht eingehalten, so dass alle Querschnittsklassen einbezogen wurden. Ergebnis des Projektes war eine konservative, aber auf der sicheren Seite liegende Interaktionsregel. Die auftretende Normalkraft wird, wie in Bild 3.5 ersichtlich, ohne Begrenzung zusammen mit dem Biegemoment über die normierte Interaktionsbeziehung nach Gleichung (3.6) in der Bemessung der Verbindung berücksichtigt. Die bezogene Normalkraft v wird nach Gleichung (3.3), das bezogene Biegemoment μ nach Gleichung (3.2) verwendet.

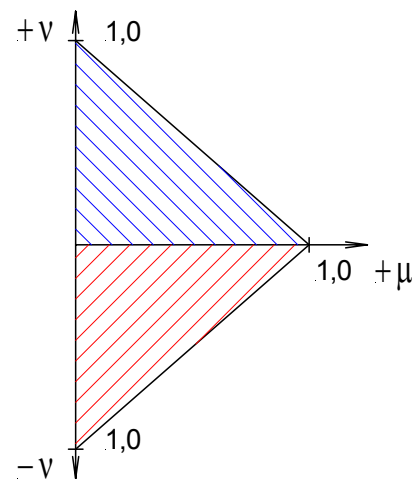


Bild 3.5: Interaktion nach DIBt-Vorschlag [Pas-02]

$$|v| + \mu \leq 1,0 \quad (3.6)$$

3.4 Bewertung der beiden Interaktionsvorschläge

Hinsichtlich der Interaktionsregel nach EC 3-1.8 ist vor allem darauf hinzuweisen, dass keine Differenzierung zwischen Druck- und Zugnormalkraft stattfindet. Dies ist jedoch von Bedeutung, da stets eine bestimmte Normalkraft gleichzeitig mit dem maximalen Moment zugelassen wird. Bei der Berechnung des Momentes wird nach dem Komponentenmodell die Verbindung in bestimmte Komponenten unterteilt, die bezüglich der auftretenden Beanspruchung – Zug, Druck oder Schub – untersucht und berechnet werden. Eine der Komponenten ist für das Versagen der Verbindung bzw. für die Größe des Grenzmomentes maßgebend. Ist diese Komponente eine Zugkomponente, dann kann, nach Auffassung der Verfasserin, nicht zusätzlich zum maximalen Moment eine Zugnormalkraft von der Verbindung aufgenommen werden. Analog gilt für den Fall, dass eine Druckkomponente maßgebend ist, dass keine Druckkraft zusätzlich zum maximalen Moment aufgenommen und übertragen werden kann. Es muss also eine Differenzierung und weitergehende Betrachtung durchgeführt werden.

Ein weiteres Problem besteht, nach Ansicht der Verfasserin, in der Begrenzung der Normalkraft in Abhängigkeit von der Grenznormalkraft des Trägers. Da Verbindungen sehr unterschiedlich aufgebaut sein können, kann auch die Normalkrafttragfähigkeit – für Druck und Zug – sehr unterschiedlich in Bezug auf die Grenznormalkrafttragfähigkeit des Trägers ausfallen. Das heißt, es gibt keine direkte Abhängigkeit zwischen diesen beiden Tragfähigkeiten. Damit gibt es auch keine einheitlich prozentuale Begrenzung der Normalkraft in der Verbindung bezüglich der Normalkrafttragfähigkeit der Verbindung. Zwei Beispiele aus dem unter Abschnitt 3.3 erwähnten DIBt-Projekt sollen dies verdeutlichen.

Die Verbindungen RS1 und RS3 sind Träger-Stützen-Verbindungen mit kompakten Profilen aus S235, das heißt die Begrenzung hinsichtlich der Schlankheit des Stützensteges ist bei diesen beiden Verbindungen eingehalten. Die relevanten Daten sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Für weitere Informationen zu den Verbindungen wird auf [Pas-02] verwiesen.

Tabelle 3.1: Vergleich zur Beurteilung der Normalkraftbegrenzung nach [Pas-02]

Verbindung nach [Pas-02]	$d_c / t_{wc} \leq 69 \cdot \varepsilon$ (S235: $\varepsilon = 1,0$)	$N_{b.Rd}$ [kN]	$0,05 \cdot N_{b.Rd}$ [kN]	$N_{j.Rd}$ [kN]	$\frac{0,05 \cdot N_{b.Rd}}{N_{j.Rd}}$
RS1	$\frac{134mm}{9mm} = 14,89 < 69$	2295,56	114,78	178,2	0,644
RS3	$\frac{243mm}{12mm} = 20,25 < 69$	665,5	33,28	348,4	0,096

Wie in der letzten Spalte der Tabelle 3.1 zu sehen ist, kann die tatsächliche Begrenzung der Normalkraft in Bezug auf die Normalkrafttragfähigkeit der Verbindung sehr unterschiedlich ausfallen. Bei der Verbindung RS1 ist, nach Meinung der Verfasserin, die Begrenzung der Normalkraft der Verbindung über die Normalkrafttragfähigkeit des Trägers bedenklich, wenn nicht gar unsicher. Die Begrenzung der Stützenstegschlankheit durch $d_c/t_{wc} \leq 69 \cdot \varepsilon$ war in diesem Fall eingehalten und kann daher nicht als Begründung angeführt werden.

In anderen untersuchten Verbindungen, welche aus schlanken Profilen bestehen, ergaben sich teilweise noch gravierendere $0,05 \cdot N_{b.Rd} / N_{j.Rd}$ -Verhältnisse. Hier war jedoch vor allem die Schlankheit des Stützensteges ursächlich.

Bei der Interaktionsbeziehung des DIBt-Projektes wird einerseits keine Begrenzung der Normalkraft und andererseits keine Unterscheidung in Druck- und Zugnormalkraft vorgenommen. Aufgrund der durchgängig linear gewählten Interaktion bringt dies aber keine Nachteile oder gar Unsicherheiten in der Berechnung. Allerdings ist diese Interaktionsregel konservativ, das heißt zum Teil unwirtschaftlich. In Versuchen, beispielsweise [Sil-00], konnte nachgewiesen werden, dass es grundsätzlich möglich ist, dass zusätzlich zum maximalen Moment eine bestimmte Normalkraft aufgenommen und abgetragen werden kann. Gleichzeitig stellt dies die Veranlassung zur Überarbeitung der bisher vorgeschlagenen Interaktionsbeziehungen dar.

4 Untersuchung mit der Finiten-Elemente-Methode

4.1 Zu den ausgewählten Verbindungen

Die für die Untersuchung mit der Finiten-Elemente-Methode ausgewählten geschraubten Verbindungen sind dem DASt-Ringbuch „Typisierte Verbindungen“ [DASt 01] entnommen. Erläuterungen zur Untersuchung und die Ergebnisse der Berechnungen sind in diesem Abschnitt bzw. in den Anhängen A, B und E enthalten.

Die Verbindungen besitzen alle einen symmetrischen Aufbau hinsichtlich der Schraubenanordnung (Loch- und Randabstände), haben bündige Kopfplatten sowie stets zwei Schraubenreihen. Jeweils eine Schraubenreihe kann dem Zugbereich bzw. dem Druckbereich zugeordnet werden. Es wurden fünf Träger-Träger-Verbindungen (Trägerstoß) und zehn Träger-Stützen-Verbindungen untersucht, wobei stets zwei Träger-Stützen-Verbindungen zu einer Träger-Träger-Verbindung gehören. Das heißt, hinsichtlich der Riegelseite sowie der Schraubenanordnung haben jeweils drei Verbindungen, davon zwei Träger-Stützen-Verbindungen und eine Träger-Träger-Verbindung einen gleichen Aufbau, wie es auch in Bild 4.1 dargestellt ist. Die beiden Träger-Stützen-Verbindungen einer solchen Gruppe haben dabei jeweils unterschiedliche Stützenprofile, so dass sich verschiedene Versagensmechanismen sowie unterschiedliche Grenztragfähigkeiten und Rotationssteifigkeiten ergeben.

Hinsichtlich der Werkstoffe wurden Profile der Festigkeiten S235 und S355 ausgewählt. Bei den Schrauben kamen sowohl die Festigkeitsklasse 8.8 als auch 10.9 sowie die Durchmesser M16 und M20 zur Anwendung. Die ausgewählten Verbindungen sind aus Profilen konfiguriert, welche alle der Querschnittsklasse 1 sowohl unter Biegung als auch unter Druck zugeordnet werden können. Es werden somit die Voraussetzungen des EC 3-1.8 hinsichtlich der Schlankheit der Profile, insbesondere des Stützenstegbleches, eingehalten.

In Tabelle 4.1 sind die Verbindungen zusammen mit ihrer Klassifizierung nach Momententragfähigkeit und Rotationssteifigkeit aufgeführt. Bei der Einordnung nach der Steifigkeit wird von realisierbaren Spannweiten des Rahmensystems ausgegangen. Dazu wurden für die beiden Grenzbereiche starr und gelenkig nach den Gleichungen aus Bild 5.4 des EC 3-1.8 die sich ergebenden Systemspannweiten berechnet und bewertet.

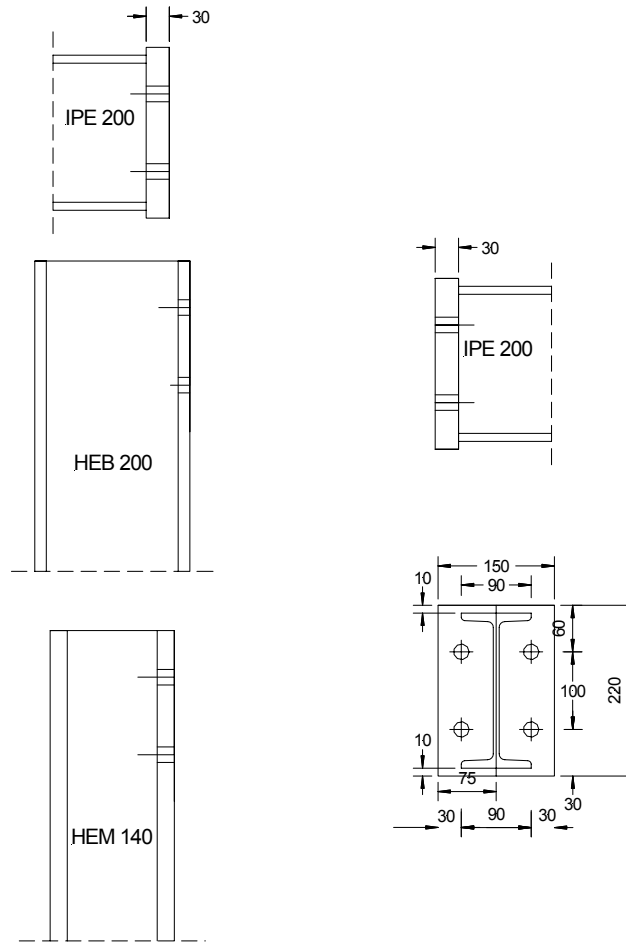


Bild 4.1: Gruppe aus zwei Träger-Stützen-Verbindungen und einer Träger-Träger-Verbindung

Tabelle 4.1: Untersuchte Verbindungen

Verbindung	Verbindungskonfiguration		Einordnung nach	
	TS	TT	Tragfähigkeit	Steifigkeit
A	x		volltragfähig	biegesteif
B	x		volltragfähig	biegesteif
C	x		teiltragfähig	biegesteif
D		x	volltragfähig	biegesteif/nachgiebig*
E		x	teiltragfähig	biegesteif/nachgiebig*
F		x	volltragfähig	biegesteif
G		x	teiltragfähig	biegesteif/nachgiebig*
H		x	teiltragfähig	biegesteif/nachgiebig*
I		x	teiltragfähig	biegesteif/nachgiebig*
K		x	teiltragfähig	biegesteif
L	x		teiltragfähig	biegesteif/nachgiebig*
M		x	teiltragfähig	biegesteif
N	x		teiltragfähig	biegesteif
O		x	teiltragfähig	biegesteif
P		x	volltragfähig	biegesteif/nachgiebig*

* nachgiebig bei unverschieblichen Rahmen, je nach Spannweite

Anhang A enthält alle relevanten Angaben zu den gewählten Verbindungen.

4.2 Analyse mit der FEM

4.2.1 Allgemeine Hinweise

Für die Untersuchung der Verbindungen wurden die Programme MSC.Patran von MSC Software Corporation und ABAQUS von der Firma Hibitt, Karlsson & Sörensen, Inc., Providence, Rhode Island, USA genutzt. Das Programm MSC.Patran dient dabei der Modellierung der Finiten-Element-Modelle sowie der Ergebnisausgabe.

Das Ziel bei der Erstellung der Finiten-Elemente-Modelle für die Verbindungen bzw. die Komponenten waren möglichst einfache Modelle unter Einbeziehung der Gesichtspunkte Genauigkeit der Ergebnisse, Speicherplatz, Rechenzeit und Aufwand bei der Modellierung selbst.

Alle Modelle für die Verbindungen benutzen stets das gleiche Koordinatensystem. Die Definition der verwendeten positiven Schnittgrößenrichtung wird in Abschnitt 4.2.2.3 wiedergegeben.

Bei den FE-Modellen für die einzelnen Komponenten bzw. Schnitte, welche nach Kapitel 5 untersucht werden, ist die Ausrichtung im Koordinatensystem nicht einheitlich. Dies hat jedoch auch keine Bedeutung, da es um das allgemeine Interaktionsverhalten der Komponenten ging und diese Modelle einen symmetrischen Aufbau besitzen.

4.2.2 Modellierung der Verbindungen

4.2.2.1 Knotenmodell

Nach dem Bemessungsmodell des EC 3-1.8 ist eine Verbindung ein Knoten mit endlichen Abmessungen. In der Norm sind jedoch keine genauen Angaben zu den Abmessungen bzw. Ausdehnungen eines Knotens enthalten. Für die untersuchten Verbindungen wurden daher nach Bild 4.2 jeweils der Knoten selbst und in Abhängigkeit von der Höhe der Kopfplatte Teile des Riegels und der Stütze (nach unten) modelliert. Wie in Bild 4.2 ersichtlich, wurden nur Rahmenecken und keine Rahmenknoten, das heißt mit durchgehender Stütze, modelliert.

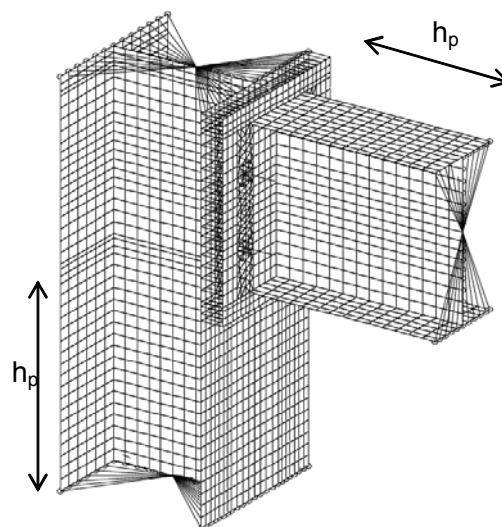


Bild 4.2: Ausdehnung der Verbindungsknoten

4.2.2.2 Elemente

Für alle Komponenten mit flächiger Ausdehnung, wie Kopfplatten, Stege und Flansche, wurden Schalenelemente aus der ABAQUS-Elementebibliothek verwendet. Die genutzten Elemente sind S4R- und S3R-Elemente, die mit drei bzw. vier Knoten in der Schalenmittelebene definiert werden. Die Elemente haben somit eine lineare Ansatzfunktion und sind allgemein verwendbare 3D-Elemente. Die Schalenelemente wurden, wie in [Bur-97] vorgeschlagen, als „dicke“ Schalenelemente definiert. Dies bedeutet, dass Schubeffekte innerhalb des Elementes mit berücksichtigt werden. Das heißt wiederum, die Kirchhoff'sche Theorie, nach der Schubeffekte im Element vernachlässigt werden, findet keine Anwendung mehr. Es wird stattdessen die Mindlin'sche Theorie genutzt. Dies bedeutet, dass die normale Gerade zur Mittelfläche bei Deformation (Lasteinwirkung) dann nicht mehr normal zur verformten Mittelfläche ist. Weiterhin schließt die Bezeichnung der Schalenelemente reduzierte numerische Integration (R) ein. Zur Bildung der Steifigkeitsmatrix wird somit eine geringere Stufe der Integrationsordnung benutzt, während die Massenmatrix und der Lastvektor die ursprüngliche Integrationsordnung beibehalten. Dies führt einerseits zu einem exakteren Wert der Systemsteifigkeit und andererseits zu verkürzter Rechenzeit. In Bild 4.3 ist zusehen, dass die dreieckigen Schalenelemente S3R bei den Kopfplatten im Bereich der Schraubenlöcher verwendet wurden. Dadurch konnten übermäßig verzerrte viereckige Elementen mit Winkeln von $> 135^\circ$ bzw. $< 45^\circ$ vermieden werden.

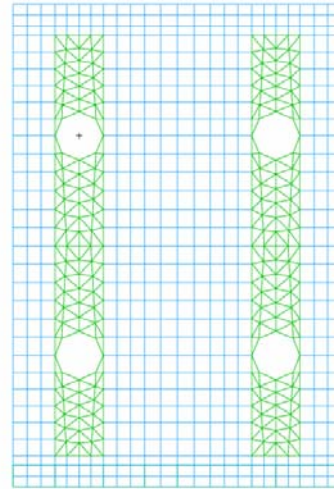


Bild 4.3: Anwendung von drei- und viereckigen Schalenelementen bei der Modellierung der Kopfplatten

Die Schrauben wurden der Einfachheit halber mit Stabelementen (beam) B32 modelliert. Diese Elemente besitzen drei Knoten mit jeweils sechs Freiheitsgraden und beruhen daher auf einer quadratischen Ansatzfunktion. Diese einfache Modellierung der Schrauben wurde einerseits aufgrund der schnellen und einfachen Modellierung und andererseits wegen einer kürzeren Rechenzeit gewählt.

Die Modellierung von Verbindungen ist vorrangig ein Problem der Kontaktmodellierung [Wan-97]. Folgende Kontakte ergeben sich bei der Modellierung von Verbindungen

- (a) Kontakt zwischen den beiden Kopfplatten bei Träger-Träger-Verbindungen bzw. zwischen der Kopfplatte und dem Stützenflansch bei Träger-Stützen-Verbindungen
- (b) Kontakt zwischen Mutter bzw. Schraubenkopf und Unterlegscheibe
- (c) Kontakt zwischen Unterlegscheibe und Kopfplatte bzw. Stützenflansch und
- (d) Kontakt zwischen Schraubenschaft und Lochwandung.

Der Kontakt (a) wird mit speziellen Kontaktelementen gebildet. Dazu werden Elemente vom Typ GAPUNI verwendet. Mit diesen Elementen kann der Kontakt zwischen zwei Knoten mit fester Richtung im Raum hergestellt werden, wobei definiert wird, ob der Kontakt geschlossen oder geöffnet ist. Bei diesen Elementen werden nur Kontaktkräfte übertragen.

Die Kontakte (b) und (c) konnten aufgrund der Modellierung der Schrauben mit Beam-Elementen und durch Anwendung von MPC's vom Typ *EQUATION eliminiert werden. Diese MPC's werden zwischen den Knoten des Lochrandes und dem entsprechenden Schraubenelement-Knoten vereinbart. Mit diesen Multi-Point Constraints wird erreicht, dass einerseits sich die Schraubenelemente zusammen mit dem restlichen Modell verschieben bzw. verdrehen und andererseits, dass die aufgebrachte Schraubenvorspannung auch im gesamten Modell, vorrangig auf die Kopfplatte und den Stützenflansch (Lamellenpaket) wirkt.

Der Kontakt (d) zwischen Schraubenschaft und Lochwandung wird mittels Stabelementen, sogenannten TRUSS-Elementen vom Typ T3D2 realisiert. Diese 3D-Elemente besitzen zwei Knoten mit den drei Freiheitsgraden der Verschiebungen u_x , u_y und u_z . Es werden somit nur Axialkräfte und keine Biegemomente übertragen. Im vorliegenden Fall sind die Element-eigenschaften so definiert worden, dass nur Druckkräfte und keine Zugkräfte aufgenommen werden können. Das heißt, dass die Trusselemente unter Zugbeanspruchung sich nicht an der Lastabtragung beteiligen.

Wie in Bild 4.4 und Bild 4.5 zu sehen ist, wurde an den Randbereichen (Schnittufer) der Modelle jeweils ein MPC vom Typ BEAM angeordnet. Diese MPC's gewährleisten einerseits das Ebenbleiben des Querschnittes, andererseits ein gleichmäßiges Auftragen der jeweiligen Randbedingungen (Belastung und Lagerung) über den gesamten Querschnitt.

In Tabelle 4.2 sind die bei der Modellierung der Verbindungen verwendeten Elemente mit den Bezeichnungen nach dem Programm „ABAQUS“ mit der entsprechend Beschreibung aufgeführt.

Tabelle 4.2: Verwendete Elemente

Elementbezeichnung	Elementtyp	Elementbeschreibung nach ABAQUS [ABA-00]
S3R	Schalenelement	3-node triangular general-purpose shell finite membrane strain
S4R	Schalenelement	4-node double curved general purpose shell reduced integration with hourglass control finite membrane strain
GAPUNI	Kontaktelement	unidirectional gap between two nodes
B32	Stabelement	3-node quadratic beam
T3D2	Stabelement	2-node linear displacement
MPC BEAM	Stabelement	multi-point constraint, rigid beam

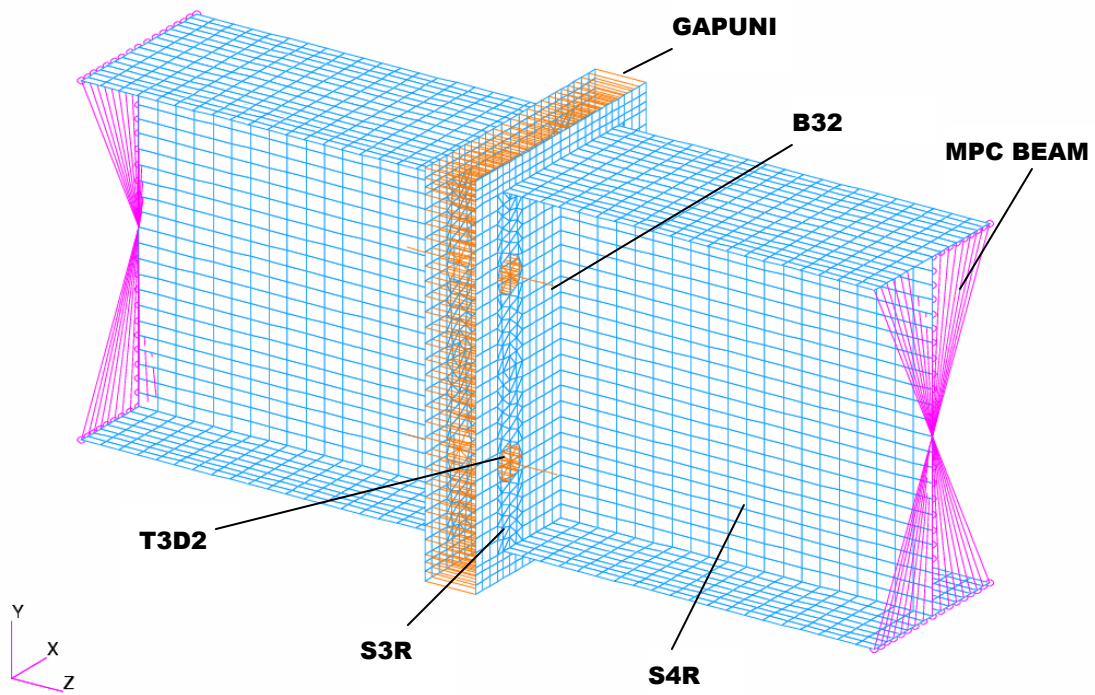


Bild 4.4: Anwendung der Elemente nach Tabelle 4.2 bei Träger-Träger-Verbindungen

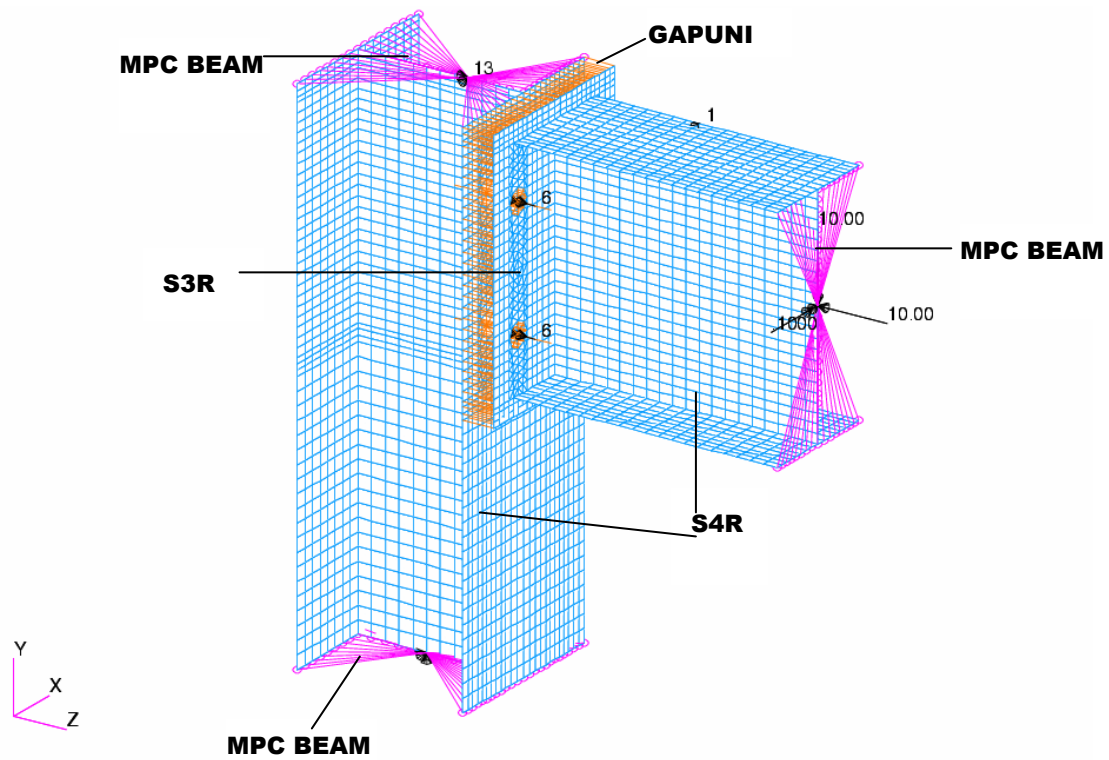


Bild 4.5: Anwendung der Elemente nach Tabelle 4.2 bei Träger-Stützen-Verbindungen

4.2.2.3 Randbedingungen, Schnittgrößendefinition

Die Lösung eines FE-Problems ist von der Definition der Anfangsbedingungen und Randbedingungen abhängig. Mit der Änderung einzelner Werte der Anfangs- oder Randbedingungen ändert sich auch die Lösung des gesamten Systems. Daher wurden für alle FE-Modelle die gleichen Anfangs-, Rand- und Verträglichkeitsbedingungen festgelegt. Neben den Verträglichkeitsbedingungen, die durch die Anwendung verschiedener MPC's in die Modelle eingearbeitet wurden (siehe auch Abschnitt 4.2.2.2), sind entsprechende Randbedingungen zu definieren. Zu den Randbedingungen gehören die Lagerung und die Belastung. Man unterscheidet dabei unter anderem in die geometrischen Randbedingungen (vorgeschriebene Verschiebungen oder Verdrehungen) und in die natürlichen Randbedingungen, die auch Krastrandbedingungen genannt werden.

Zur Beschreibung der Lagerung der Modelle wird Bild 4.6 benötigt, das das verwendete Koordinatensystem im globalen System, beispielsweise eines Rahmens, wiedergibt. Daraus ergibt sich für die Teilsysteme „Träger-Stützen-Verbindung“ bzw. „Träger-Träger-Verbindung“, dass die Schraubensachse stets in z-Richtung verläuft und die Kopfplatte in der x-y-Ebene angeordnet ist, auch zu

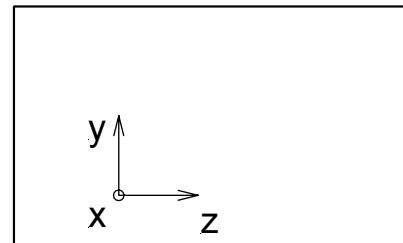


Bild 4.6: Verwendetes Koordinatensystem

sehen in Bild 4.4 und Bild 4.5.

Um ein Verschieben in seitlicher Richtung zu verhindern, wurden die Modelle in x-Richtung mehrfach an diskreten Knoten sowie an den unabhängigen Knoten der MPC's, die die verbindungslinksseitigen Schnittufer begrenzen, gehalten. Damit kann auch ein Versagen des Modells durch Biegedrillknicken oder Knicken der Stütze bzw. des Trägers ausgeschlossen werden. Dies ist notwendig, da die Teilsysteme nicht auf Stabilitätsversagen untersucht werden. Bei den Träger-Stützen-Verbindungen wurden die stützenseitigen MPC's weiterhin mit Verschiebungsbehinderungen in y- und z-Richtung versehen. Dabei wurde darauf geachtet, dass keine Zwangsbehinderungen entstehen. Das heißt, das Modell wurde an beiden unabhängigen Knoten in z-Richtung und am unteren unabhängigen Knoten zusätzlich in y-Richtung gehalten. Bei den Träger-Träger-Verbindungen wurde stets am linken MPC eine Einspannung durch Verschiebungsbehinderung in allen Richtungen erzielt. Zusätzlich werden die Beamelemente der Schrauben in der Verdrehung um die Längsachse gehindert.

Die Belastung aller Verbindungsmodelle wurde dann am rechten MPC (am Trägerquerschnitt) durch entsprechende Verschiebungen in y-Richtung (für eine Querkraft) und z-Richtung (für die Normalkraft) und eine Verdrehung um die x-Achse (für das Biegemoment) aufgebracht. Einziger Unterschied bei der Belastung war die Richtung der Verdrehung. In Bild 4.7 ist ein Momentenverlauf für einen beispielsweise durch Eigengewicht und Schnee belasteten zweifach gelenkig gelagerten Rahmen zu sehen.

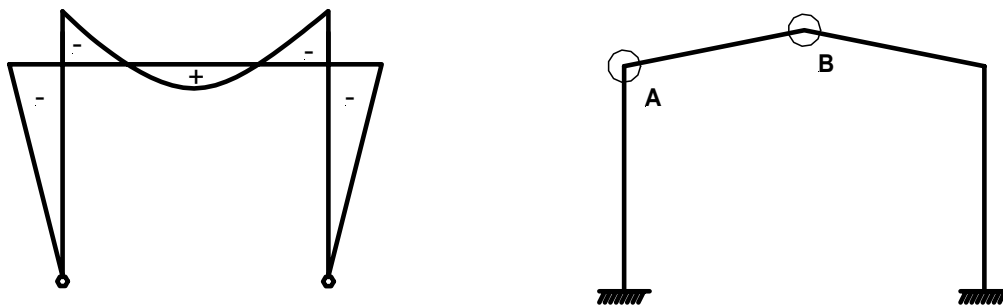


Bild 4.7: Momentenverlauf und mögliches Rahmensystem

Demnach sind Rahmenecken (Detail A) nach der allgemein üblichen Schnittkraftdefinition überwiegend durch negative Biegemomente beansprucht. Firstpunkt oder andere Träger-Träger-Verbindungen (Detail B) hingegen befinden sich im Bereich der positiven Biegemomente. Nach dem Diagramm mit vollständiger Vorzeichenzuordnung für Momente und Normalkraft in Bild 4.8 sind für Träger-Stützen-Verbindungen demzufolge die Quadranten II und III, für Träger-Träger-Verbindungen hingegen die Quadranten I und IV hauptsächlich zu betrachten. Innerhalb der Arbeit wurden die Verbindungen mit den vorwiegend typischen Beanspruchungen untersucht, so dass einerseits keine vollständigen Interaktionskurven aufgestellt wurden. Andererseits war bei den ausgewählten Verbindungen dies aber auch nicht notwendig, da die Verbindungen in ihrer Konfiguration (Schraubenanordnung) stets symmetrisch waren, so dass durch Spiegelung der „halben“ Interaktionskurve ein vollständiges Interaktionsdiagramm sich ergibt. Dennoch werden nur Diagramme mit jeweils 2 Quadranten angegeben. Die daraus entsprechende, während der Untersuchung verwendete, positive Schnittgrößendefinition für die Modelle ist in Bild 4.9 dargestellt.

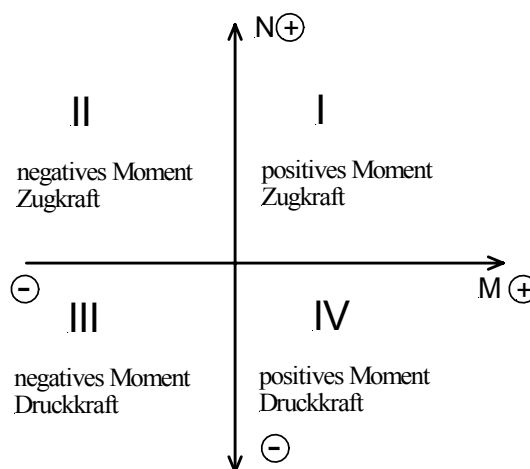


Bild 4.8: Interaktionsdiagramm mit Vorzeichenzuordnung

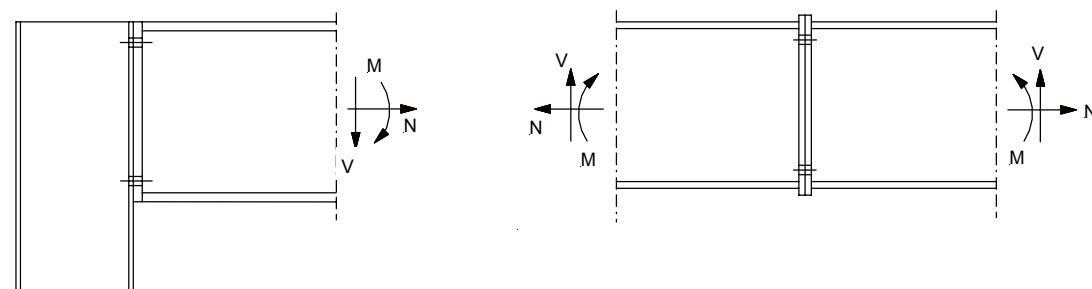


Bild 4.9: Gewählte Schnittgrößendefinitionen

Für die Träger-Träger-Verbindungen werden demnach die Biegemomente als positiv wie üblich angesetzt. Für Träger-Stützen-Verbindungen wurde das Moment entgegen der allgemein üblichen Schnittgrößendefinition als positiv definiert. Die Definition der Normalkraft als Zug- oder Druckkraft bleibt so, wie es im Allgemeinen üblich ist, erhalten. Die Querkraft wurde als positiv definiert, wenn sie in der Verbindung durch den entsprechend vorhandenen Hebelarm ein Moment im gleichen Drehsinn erzeugt, wie das durch die Verdrehung angesetzte Moment. Für die Interaktionsdiagramme ergeben sich daraus die in Bild 4.10 und Bild 4.11 ersichtlichen Quadrantenzuordnungen.

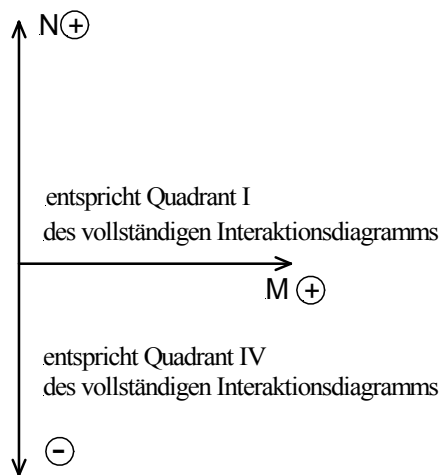


Bild 4.10: Interaktionsdiagramm für Träger-Träger-Verbindungen

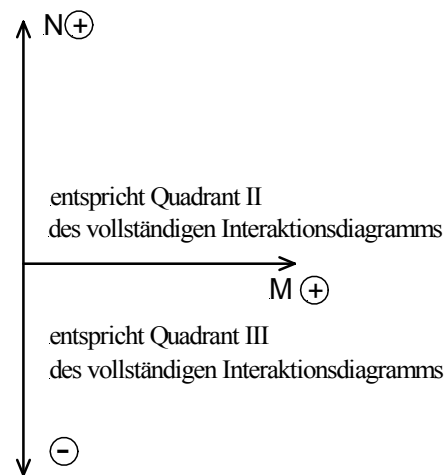


Bild 4.11: Interaktionsdiagramm für Träger-Stützen-Verbindungen

4.2.2.4 Materialdefinitionen

Den FE-Berechnungen liegt das ideal-elastische ideal-plastische Materialgesetz als bilineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung nach EC 3 [N 1] bzw. DIN 18800 [N 4] wie es in Bild 4.12 dargestellt ist, zugrunde.

Die Werkstoffkennwerte wie beispielsweise Elastizitätsmodul und Streckgrenze wurden mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten abgemindert und sind in Tabelle 4.3 aufgeführt. Für die hochfesten Schrauben wurde eine ausführlichere Materialkennlinie nach Bild 4.13 verwendet, um der begrenzten Bruchdehnung des Materials gerecht zu werden.

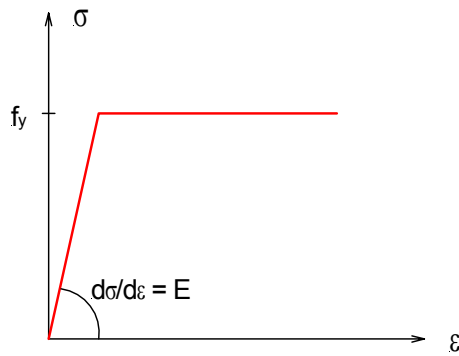


Bild 4.12: Spannungs-Dehnungslinie (Grundwerkstoff)

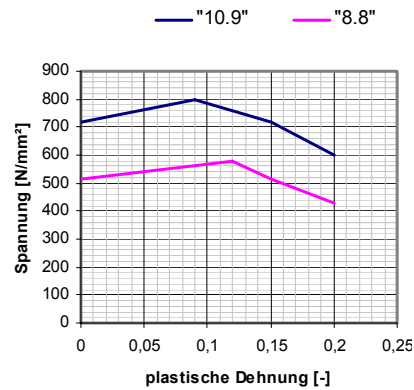


Bild 4.13: Materialkennlinie für das Schraubenmaterial

Tabelle 4.3: Verwendete Materialkennwerte

	charakt.	charakt.	Elasti-	Bruch-	Teilsicher-	Bemessungswert		
	Streck-	Zugfestig-	zitäts-	deh-	heitsbeiwert	der Streck-	der Zug-	des
	grenze	keit f_{uk}	modul	nung A	γ_M	grenze f_{yd}	festigkeit	Elastizitäts
	f_{yk}		E_k				f_{ud}	moduls E_d
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
S 235	235	-	210000	-	1,1	213,6	-	190909
S 355	355	-	210000	-	1,1	322,7	-	190909
8.8	640	800	210000	12	1,25	512	640	190909
10.9	900	1000	210000	9	1,25	720	800	190909

Als eine Anfangsbedingung wurde die Vorspannung der hochfesten Schrauben im Modell als Initialspannung auf die Schrauben aufgebracht. Die Schrauben wurden mit der in der Norm [N5] vorgeschriebenen Grenzvorspannkraft angezogen betrachtet. Dazu wurde die Vorspannkraft auf den entsprechenden Schaftdurchmesser bezogen in eine über den Schaftquerschnitt gleichmäßige Spannung umgerechnet. Die Initialspannung wurde nach Gleichung (4.1) berechnet. In Tabelle 4.4 sind alle Angaben zur Festlegung der Vorspannung als Initialspannung im FE-Modell enthalten.

$$\sigma_{ini} = \frac{0,9 \cdot F_{vor}}{\gamma_{Mb} \cdot A_{Sp}} \quad (4.1)$$

Tabelle 4.4: Angaben zur Vorspannung

Schraube	Spannungsquerschnitt A_{sp} mm ²	Vorspannkraft F_v nach [N5], (5.83) kN	Initialspannung σ_{ini} N/mm ²
M 16-8.8	157	70	321
M 16-10.9	157	100	459
M 20-8.8	245	112	329
M 20-10.9	245	160	470

4.2.3 Validierung der Ergebnisse

Zur Bewertung der FE-Ergebnisse wurde eine Kalibrierung anhand eines Referenzversuchs durchgeführt. Die Versuchsdaten wurden der SERICON-Datenbank bzw. [Len-87] entnommen. Es wurde der Versuch 108.015 (Bezeichnung nach SERICON) gewählt. Die untersuchte Verbindung ist, wie in Bild 4.14 zu sehen ist, ein geschweißter einseitiger Rahmenknoten.

Es wurde eine geschweißte Verbindung gewählt, da die Angaben und Versuchsdaten zu den geschraubten Verbindungen der SERICON-Datenbank nicht genügend genau bzw. unzureichend waren. Zu der gewählten Verbindung selbst waren keine Angaben zu den Schweißnahtdicken vorhanden. Die Schweißnahtdicke hat jedoch insgesamt weniger Einfluss auf die einzelnen Komponenten hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Verformbarkeit als die Rand- und Lochabstände der Schrauben. Die Größe der Schweißnahtdicke wurde nach den allgemeinen Angaben des EC 3-1.8 so festgelegt, dass das Grenzmoment durch die Tragfähigkeit der einzelnen Komponenten, jedoch nicht durch die Tragfähigkeit der Schweißnaht selbst bestimmt wurde. Die Schweißnahtdicke wurde nach DIN 18800-1, Tabelle 22 mit $a_s = 8$ mm festgelegt. Dabei wurde als Werkstoff S355 aufgrund der im Versuch gemessenen Werkstoffkennwerten zugrunde gelegt. Die vollständigen Materialangaben zur Verbindung sind [Len-87] zu entnehmen.

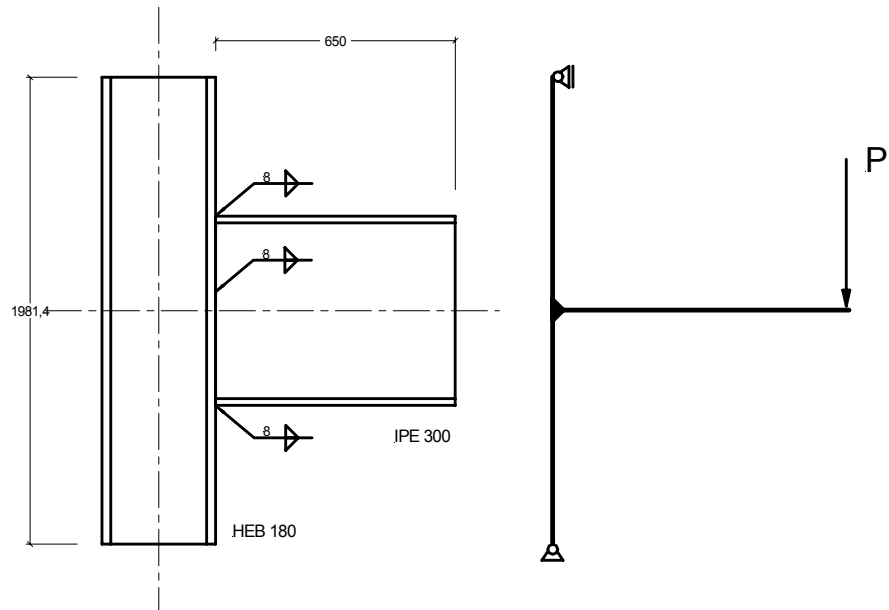


Bild 4.14: Schweißverbindung 108.015 und statisches System

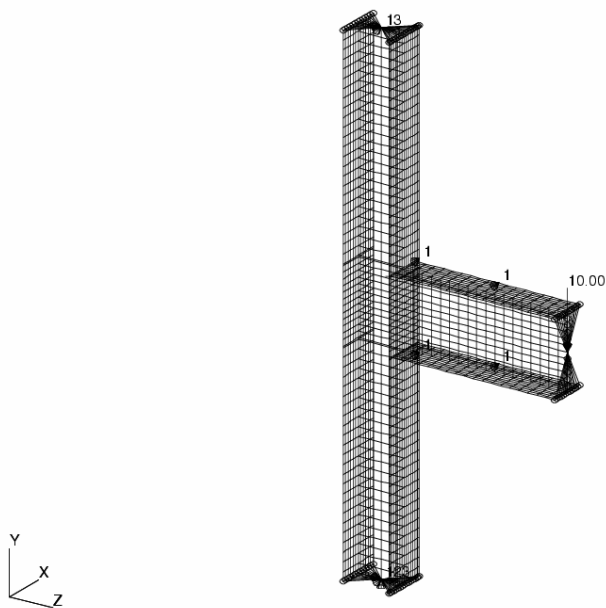


Bild 4.15: FE-Modell

Die Verbindung wurde mit der zuvor beschriebenen Modellierung erstellt. Für die Materialwerte wurden die im Versuch ermittelten und dokumentierten Werkstoffkennwerte genutzt. Die Ergebnisse der FE-Berechnung wurden einerseits mit den Versuchsdaten und andererseits mit der Berechnung nach EC 3-1.8, unter Verwendung der charakteristischen Materialwerte, verglichen. Aus dem Verhältnis der Traglasten ergab sich nach Gleichung (4.2) der zu verwendende Kalibrierungsfaktor für die Tragfähigkeit. Wie in Bild 4.16 zu sehen ist,

sind die Anfangssteifigkeiten von FE-Modell und Versuch stark voneinander abweichend. Da innerhalb der Arbeit keine Ausführungen oder Betrachtungen zur Steifigkeit gemacht werden, wurde das FE-Modell dahingehend nicht weiter verändert bzw. verbessert, zumal keine Angaben zum Elastizitätsmodul in der Versuchsprotokollierung enthalten waren.

Es wird zusätzlich daraufhin gewiesen, dass die Ergebnisse aus der FE-Berechnung nur zur qualitativen Untermauerung der Berechnungsergebnisse nach Kapitel 6 herangezogen werden. Aufgrund der mangelhaften Übereinstimmung der Steifigkeiten fließen die FE-Ergebnisse **nicht quantitativ** in Form von Faktoren in das Berechnungsmodell von Kapitel 6 ein.

Hinsichtlich der Grenztragfähigkeiten und der damit verbundenen Rotation sowie der Versagensmechanismen konnte, wie in Bild 4.16 und Tabelle 4.5 zu sehen ist, eine gute Übereinstimmung mit der gewählten Modellierung erzielt werden.

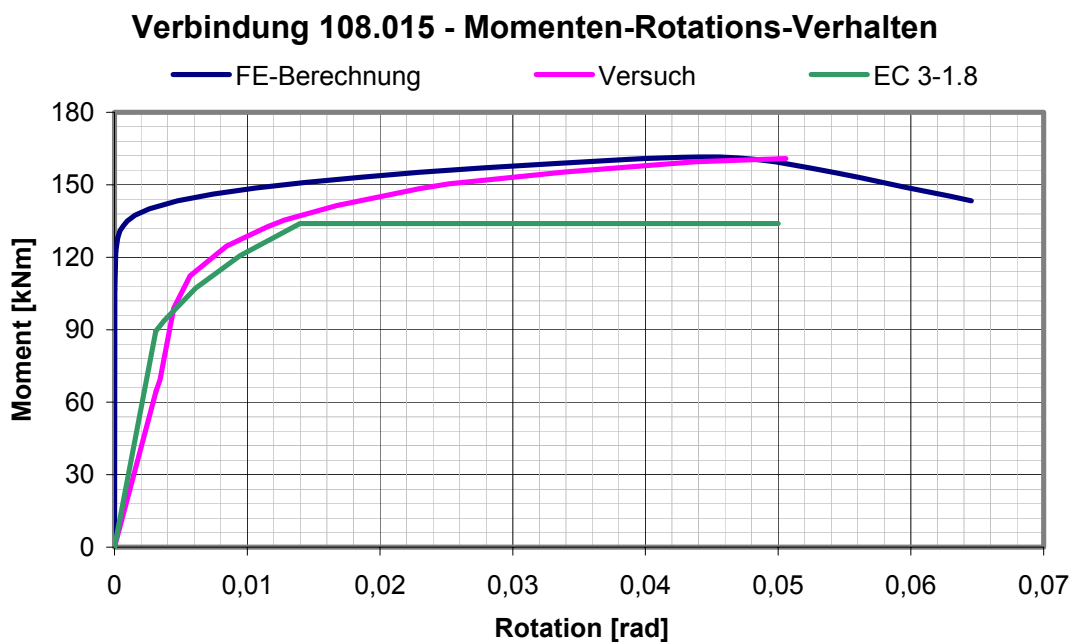


Bild 4.16: Vergleich der Momenten-Rotations-Charakteristiken

Tabelle 4.5: Vergleich – Kalibrierungsverbindung 108.015

	Grenzmoment M_{Rd} [kNm]	Versagensmodus
Versuch	160,85	Stützenflansch unter Zug
FE-Berechnung	161,47	Stützenflansch unter Zug
Komponentenmodell	134,01	Stützenflansch unter Zug

$$k = \frac{M_{Rd,Versuch}}{M_{Rd,FE}} = \frac{160,85kNm}{161,47kNm} = 0,996 \quad (4.2)$$

Im Bild 4.16 ist weiterhin zu sehen, dass die Werte der Tragfähigkeiten aus der FE-Berechnung und dem Versuch über dem Ergebnis der Berechnung nach EC 3-1.8 liegen. Die „Hand“-Rechnung liegt somit stets auf der sicheren Seite (hier etwa 20 %). Dies kann damit erklärt werden, dass die Berechnung nach EC 3-1.8 eine Modellrechnung ist und keine Überfestigkeiten bzw. Verfestigungen des Materials (im Vergleich zum Versuch) sowie keine zusätzlichen Traglaststeigerungen durch beispielsweise Membranwirkung einzelner Komponenten (im Vergleich zu FE-Berechnung und Versuch) beinhaltet (siehe auch [Wey-97]). Es wurde jedoch Wert darauf gelegt, dass sich ein realistischer und mit dem Komponentenmodell vergleichbarer Versagensmechanismus einstellt. Für die Kalibrierungsverbindung sind die Versagensmodi von FE-Berechnung, Versuch und Komponentenmodell identisch.

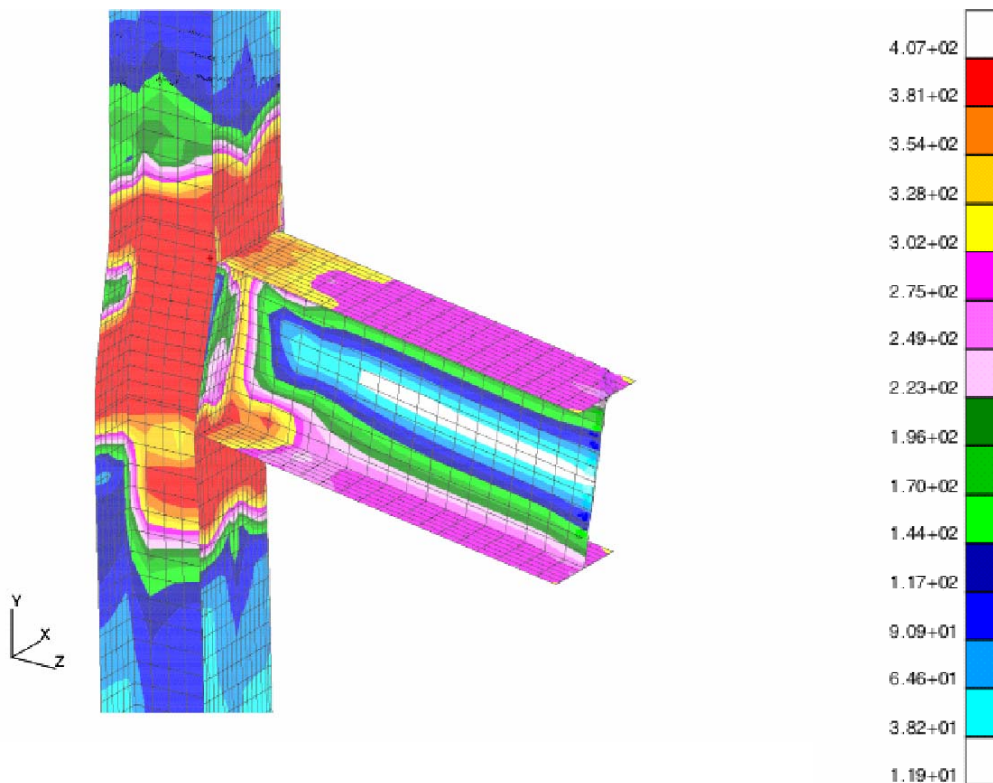


Bild 4.17: Versagenszustand –Vergleichsspannung (von Mises) in N/mm²

Die FE-Modelle wurden mit den Bemessungswerten der Festigkeitskennwerte (Streckgrenze, Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul) für den Grundwerkstoff und die Verbindungsmittel gerechnet, ebenso die Berechnung nach EC 3-1.8 mit den entsprechenden Bemessungswerten durchgeführt. Es wurden somit innerhalb der Kalibrierung einheitliche Teilsicherheitsbeiwerte

($\gamma_{M0} = 1,0$) und innerhalb der Berechnungen der untersuchten Verbindungen einheitliche Teilsicherheitsbeiwerte ($\gamma_{M0} = 1,1$ für Grundwerkstoff bzw. $\gamma_{M2} = 1,25$ für Verbindungsmittel) verwendet, so dass der Kalibrierungsfaktor für die Interaktionskurven angewendet werden kann. Bei den Vergleichen zwischen den Ergebnissen von FE-Berechnung und EC 3-1.8 kam es darauf an, dass möglichst der gleiche Versagensmechanismus bei FE-Berechnung und „Hand“-Rechnung auftrat.

4.2.4 Entwicklung von Interaktionskurven auf der Basis der FE-Berechnung

Die Modelle wurden weggesteuert mit Verschiebungen für die Normalkräfte in z-Richtung und für die Querkkräfte in y-Richtung sowie mit einer Verdrehung für das Moment um die x-Achse belastet. Es wurde bei jeder Verbindung mit den drei Lastfällen

- (1) Biegemoment (Verdrehung um x-Achse) und Querkraft (Verschiebung in y-Richtung mit zusätzlicher Wirkung zum eigentlichen Moment)
- (2) Drucknormalkraft (Verschiebung in z-Richtung mit Druckwirkung auf die Verbindung)
- (3) Zugnormalkraft (Verschiebung in z-Richtung mit Zugwirkung auf die Verbindung)

die Untersuchung begonnen.

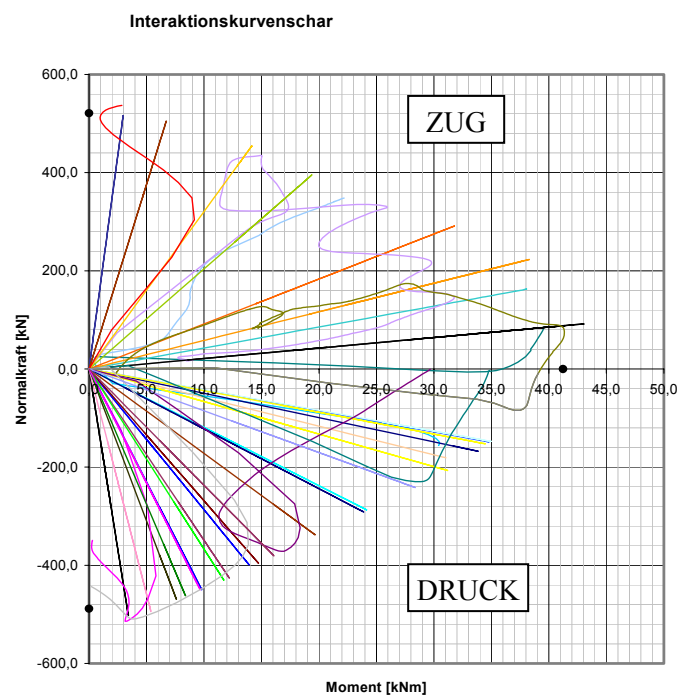


Bild 4.18: Diagramm mit Schar von Interaktionskurven

Danach wurden Kombinationen aus den drei Grundlastfällen gebildet. Bei diesen Lastkombinationen wurde einerseits die Verdrehung für das Moment und die Verschiebung für die Querkraft konstant gehalten und die Verschiebungen für die Normalkräfte variiert und andererseits die Verschiebung für die Normalkraft beibehalten und die Verdrehung für das Moment und die Verschiebung für die Querkraft stufenweise geändert. Aus den Ergebnisdateien konnten die Interaktionskurven für die jeweiligen Kombinationen in Diagrammen ausgewertet werden, so dass für jede Verbindung ein Diagramm mit einer Schar von Interaktionskurven, wie in Bild 4.18 zu sehen ist, mit den exakten Werten, dass heißt noch nicht normiert, entstand.

Aus der Schar der Interaktionskurven wird dann die allgemeine (ebenfalls noch nicht normierte) Interaktionskurve (Umhüllende) für die Verbindung gebildet. Dazu wird für jede separate Interaktionskurve ein markanter Punkt (Knick im stetigen Verlauf oder Endpunkt der Interaktionskurve) ausgewählt, welche dann miteinander verbunden die gesamte allgemeine Interaktionskurve für die Verbindung ergeben.

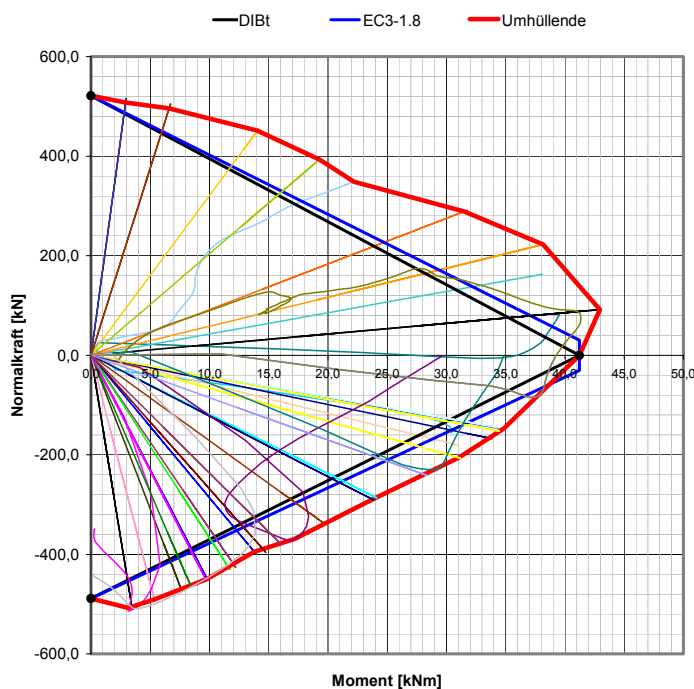


Bild 4.19: Diagramm mit aufgestellten Interaktionskurven

Die Umhüllende wird in Bild 4.19 durch die dicke rote Linie dargestellt. Zum Vergleich sind im Diagramm die Interaktionskurven nach den Vorgaben des EC 3-1.8 [N 3] (dicke blaue Linie) bzw. nach dem Vorschlag in [Pas-02] (dicke schwarze Linie) enthalten.

Da jede Verbindung eine andere Tragfähigkeit, entsprechend den Abmessungen und Festigkeitswerten, besitzt, können die Interaktionskurven nicht mit den absoluten Werten untereinander verglichen und ausgewertet werden. Es werden daher normierte Interaktionskurven, also mit bezogenen Werten, aufgestellt und in sogenannten Nomogrammen abgebildet. Nomogramme sind die grafische Darstellung von Gesetzmäßigkeiten und Gleichungen und gestatten das Ablesen von Ergebnissen zu beliebigen Ausgangswerten. Es werden dabei die drei gebildeten Interaktionskurven (blau, rot, schwarz nach Bild 4.19) genutzt. Zur Normierung dieser Kurven werden die folgenden Gleichungen (4.3) und (4.4) angewendet.

$$\mu = \frac{M_i}{M_{i,j.Rd}} \quad (4.3)$$

$$\nu = \frac{N_i}{N_{i,j.Rd}} \quad (4.4)$$

Für den Indize i stehen jeweils die Ergebnisse aus den einzelnen Berechnungen:

$i = 1$: Werte und Ergebnisse aus den FE-Berechnungen – rote Linie

$i = 2$: Werte und Ergebnisse aus der Berechnung nach [Pas-02] – schwarze Linie

$i = 3$: Werte und Ergebnisse aus der Berechnung nach EC 3-1.8 – blaue Linie.

M_{Rd} ist das Moment aus dem Lastfall „Verdrehung (Moment) und Verschiebung in y -Richtung (Querkraft)“, es wurde dabei keine Verschiebung zur Erzeugung einer Normalkraft im Trägerquerschnitt aufgebracht. Bei der Gleichung (4.4) sind zwei Bereiche – Druck und Zug – zu unterscheiden. Für den jeweiligen Diagrammbereich nach Bild 4.20 ist entweder die maximale Normalkrafttragfähigkeit unter Zug- oder unter Druckbeanspruchung für N_{Rd} zu verwenden. Die maximale Normalkrafttragfähigkeit ergab sich durch alleinigen Ansatz der entsprechenden Verschiebung im FE-Modell.

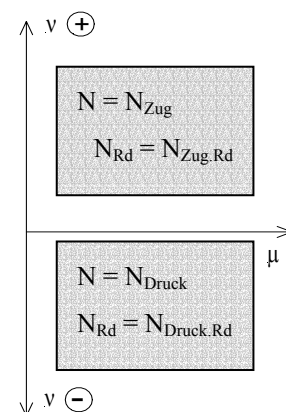


Bild 4.20: Erläuterung zu Gleichung (4.4)

Somit ergeben sich normierte Interaktionskurven, die zur weiteren Auswertung der Ergebnisse und für die Erstellung von Regeln und Aufstellung von Grenzen für die Beziehung zwischen Moment und Normalkraft genutzt werden können.

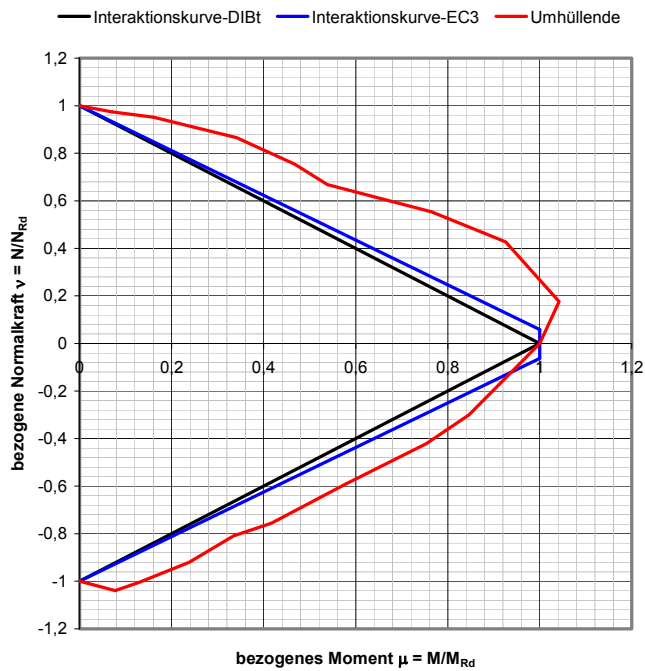


Bild 4.21: Diagramm mit normierten Interaktionskurven

Das Bild 4.21 zeigt die normierten Interaktionskurven aus FE-Berechnung, nach dem EC 3-1.8 sowie dem Vorschlag in [Pas-02] für eine Verbindung im Vergleich.

Im Folgenden wird überwiegend mit normierten Diagrammen zur Beschreibung der Beziehung von Moment und Normalkraft zueinander gearbeitet. Alle normierten Kurven für die Ergebnisse aus der FE-Berechnung sind auf die beschriebene Art und Weise entstanden.

5 Untersuchung einzelner Komponenten

5.1 Einfluss Komponentenverhalten am Gesamt-Momenten-Rotations-Verhalten

Bei der Untersuchung stellt sich allgemein die Frage der Herangehensweise an das Problem. Bei der Erarbeitung des Annex J bzw. des EC 3-1.8 wurde stets von den einzelnen Komponenten ausgegangen und dann auf die gesamte Verbindung geschlossen, wie es im hauptsächlichen auch das Grundwesen des Komponentenmodells ist. Dies soll im Folgenden nochmals kurz erläutert werden.

Bei der Berechnung der Tragfähigkeit einer Verbindung, ob Träger-Träger-Verbindung oder Träger-Stützen-Verbindung, ist stets die Komponente mit der geringsten Tragfähigkeit die maßgebende und wird für die Ermittlung der Grenzmomenten Tragfähigkeit zugrunde gelegt. Es wird davon ausgegangen, dass ein Versagen der Verbindung mit dem Erreichen der geringsten Einzeltragfähigkeit der Komponenten einhergeht. Gleichzeitig müssen die anderen Komponenten nicht bis zur ihrer Grenztragfähigkeit ausgenutzt sein. In Bild 5.1 sind die Einzeltragfähigkeiten der Komponenten einer Träger-Träger-Verbindung (Verbindung A nach Anhang A) und in Bild 5.2 für eine Träger-Stützen-Verbindung (Verbindung G nach Anhang A) dargestellt.

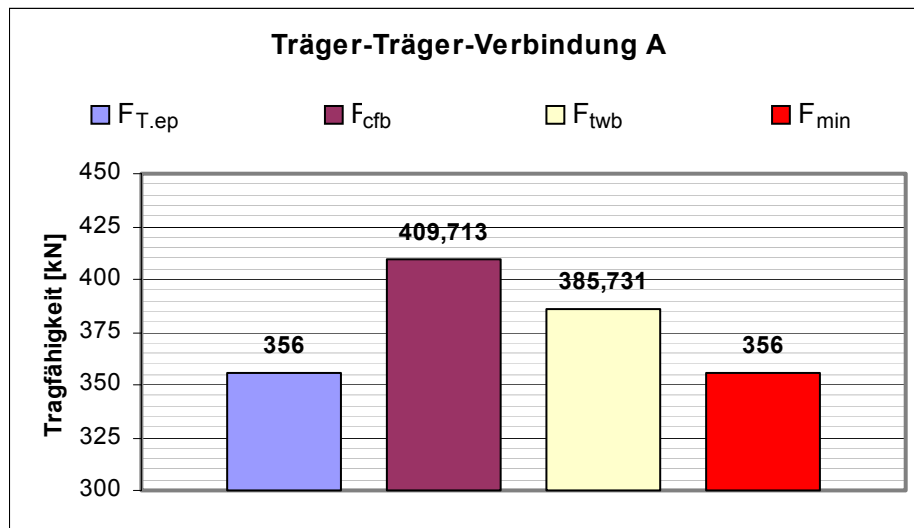


Bild 5.1: Tragfähigkeiten der Komponenten einer Träger-Träger-Verbindung

Bei einer Träger-Träger-Verbindung werden die Komponenten „Kopfplatte unter Biegung“ ($F_{T.ep}$), „Riegelflansch und zugehöriger Riegelsteganteil unter Druck“ (F_{cfb}) und „Riegelsteg unter Zug“ (F_{twb}) berechnet und die kleinste Tragfähigkeit daraus ermittelt. Im gezeigten Beispiel der Verbindung A, zu sehen in Bild 5.1, wird die Grenzmomenten Tragfähigkeit durch

die Tragfähigkeit der Komponente „Kopfplatte unter Biegung“, die nach dem T-Stoß-Modell berechnet wird, bestimmt. Die beiden anderen Komponenten der Verbindung haben bei Erreichen der Grenztragfähigkeit der gesamten Verbindung noch Reserven.

Bei einer Träger-Stützen-Verbindung werden zusätzlich zu den Komponenten einer Träger-Träger-Verbindung die Komponenten „Stützenflansch unter Biegung“ (F_{Tfc}), „Stützensteg unter Schub“ (V_{wp}), „Stützensteg unter Druck“ (F_{cwc}) und „Stützensteg unter Zug“ (F_{twc}) berechnet und aus allen Komponenten wird die geringste Einzeltragfähigkeit ermittelt. Im angegebenen Beispiel der Verbindung G, zu sehen in Bild 5.2, wird die Grenzmomenten Tragfähigkeit durch die Tragfähigkeit der Komponente „Stützenflansch unter Biegung“, die ebenfalls auf der Grundlage des T-Stoß-Modells berechnet wird, bestimmt. Bei Erreichen der Grenztragfähigkeit der Verbindung haben auch hier die anderen Komponenten noch genügend Reserven hinsichtlich der Tragfähigkeit. Im Vergleich ist zu sehen, dass diese Reserven recht beträchtlich sein können. Bei der Konfiguration der Verbindung sollte auf Ausgewogenheit der einzelnen Komponenten geachtet werden, wobei nicht nur die Tragfähigkeit, sondern auch die Duktilität (Rotationskapazität) eine große Rolle spielt.

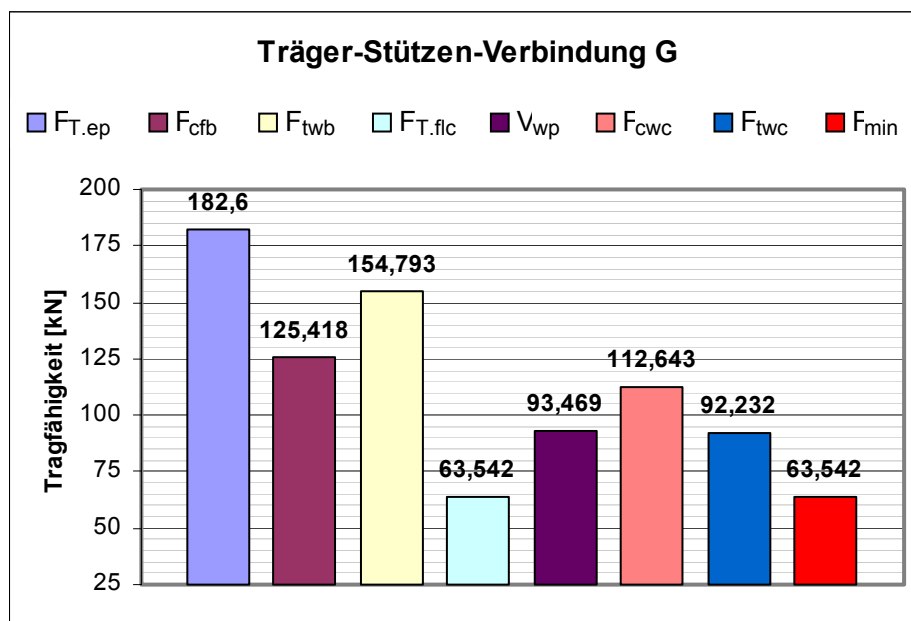


Bild 5.2: Tragfähigkeiten der Komponenten einer Träger-Stützen-Verbindung

Bei der Berechnung der Rotationssteifigkeit einer Verbindung, Träger-Träger-Verbindung dargestellt in Bild 5.3 oder Träger-Stützen-Verbindung zu sehen in Bild 5.4, werden nur bestimmte Komponenten einbezogen. Weitere Ausführungen dazu sind in [Wey-95] und [Pas-98] zu finden. Im Gegensatz zur Berechnung der Tragfähigkeit einer Verbindung, wo nur die kleinste Einzeltragfähigkeit maßgebend war und für die Berechnung des Grenzmoment zugrunde gelegt wurde, werden bei der Berechnung der Rotationssteifigkeit der Verbindung alle

berechneten Steifigkeitskoeffizienten verwendet. Es werden für jede Schraubenreihe die entsprechenden Steifigkeitskoeffizienten für die vorhandenen Komponenten ermittelt und ein effektiver Steifigkeitskoeffizient $k_{\text{eff},i}$ pro Schraubenreihe über Reihenschaltung der einzelnen Federn berechnet. Bei Verbindungen mit mindestens zwei Schraubenreihen im Zugbereich der Verbindung wird für diese Schraubenreihen aus den effektiven Steifigkeitskoeffizienten ein äquivalenter Steifigkeitskoeffizient k_{eq} diesmal über Parallelschaltung der effektiven Federn pro Reihe berechnet. Ausführliche Erläuterungen zum Vorgehen bei der Berechnung der Rotationssteifigkeit sind ebenfalls in [Wey-95] und [Pas-98] zu finden. Bei den untersuchten Verbindungen liegt stets nur eine Schraubenreihe im Zugbereich vor, so dass der effektive Steifigkeitskoeffizient gleich dem äquivalenten Steifigkeitskoeffizient ist.

Bei einer Träger-Träger-Verbindung werden nur die Steifigkeitskoeffizienten für die Komponenten „Kopfplatte unter Biegung“ (k_5) und „Schrauben unter Zug“ (k_{10}) berechnet.

Bei einer Träger-Stützen-Verbindung werden zusätzlich zu den Steifigkeitskoeffizienten einer Träger-Träger-Verbindung die Steifigkeitskoeffizienten der Komponenten „Stützenflansch unter Biegung“ (k_4), „Stützensteg unter Schub“ (k_1), „Stützensteg unter Druck“ (k_2) und „Stützensteg unter Zug“ (k_3) ermittelt und in die Berechnung der Rotationssteifigkeit einbezogen.

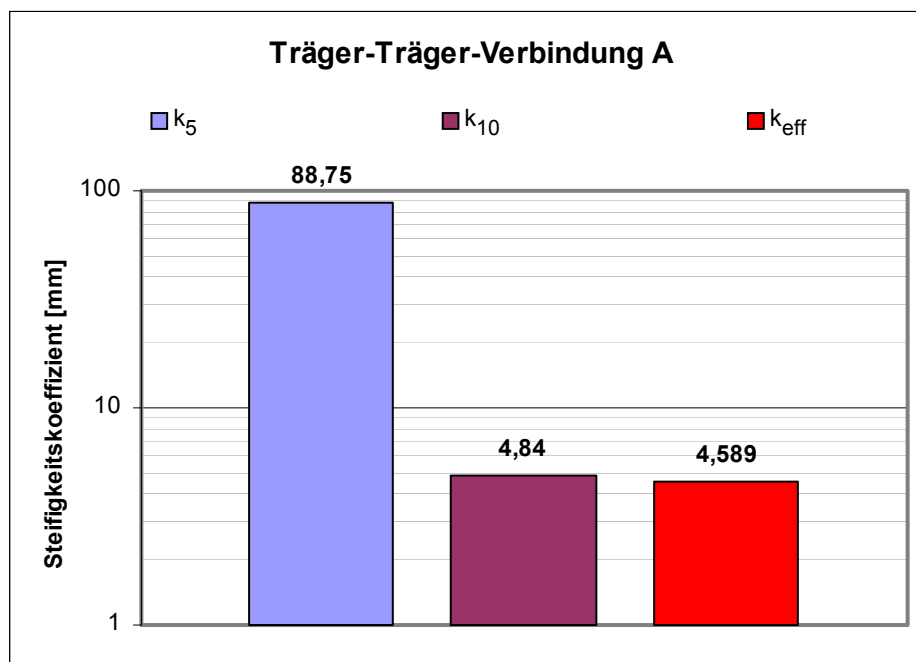


Bild 5.3: Steifigkeitskoeffizienten der Komponenten einer Träger-Träger-Verbindung

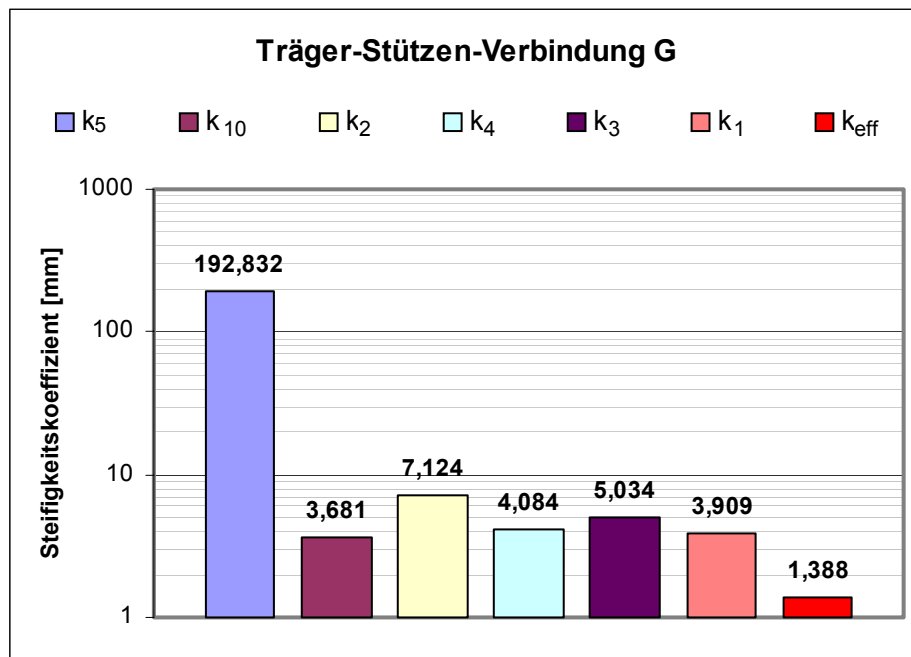
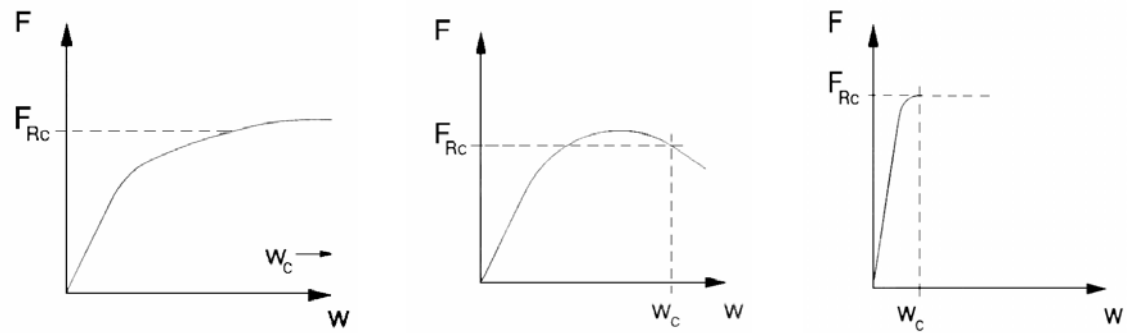


Bild 5.4: Steifigkeitskoeffizienten der Komponenten einer Träger-Stützen-Verbindung

Bei beiden Verbindungen A, dargestellt in Bild 5.3, und G, abgebildet in Bild 5.4, ist zu sehen, dass die kleineren Steifigkeitskoeffizienten den effektiven Steifigkeitskoeffizienten einer Schraubenreihe aufgrund der Reihenschaltung und der damit zusammenhängenden Gesetzmäßigkeiten stärker bestimmen als ein verhältnismäßig großer Steifigkeitskoeffizient. Zusätzlich ist zu sagen, dass je größer die Differenz zwischen den Steifigkeitskoeffizienten ist, desto größer ist der Einfluss einer Änderung des kleineren Steifigkeitskoeffizienten bzw. desto geringer ist der Einfluss einer Änderung des größeren Steifigkeitskoeffizienten. Bei der Ermittlung des äquivalenten Steifigkeitskoeffizienten der Verbindung aus den effektiven Steifigkeitskoeffizienten der einzelnen Schraubenreihen im Zugbereich sind die Wegfedern parallel angeordnet, so dass eine Vergrößerung der effektiven Steifigkeitskoeffizienten auch eine Vergrößerung des äquivalenten Steifigkeitskoeffizienten nach sich zieht.

Der Einfluss einzelner Komponenten auf die Rotationskapazität ist unter anderem von Kuhlmann [CISM 00] untersucht wurden. Bild 5.5 zeigt die unterschiedlichen Momenten-Rotations-Charakteristiken für verschiedene Rotationskapazitäten einzelner Komponenten. In Bild 5.6 ist zu sehen, dass und wie das duktile oder spröde Verhalten von einzelnen Komponenten das Rotationsverhalten der gesamten Verbindung beeinflusst.



hohe Duktilität

begrenzte Duktilität

keine Duktilität (sprödes Verhalten)

z. B. Kopfplatte unter Biegung

z. B. Stützensteg unter Druck

z. B. Schrauben unter Zug

Bild 5.5: Momenten-Rotations-Charakteristiken einzelner Komponenten nach [CISM 00]

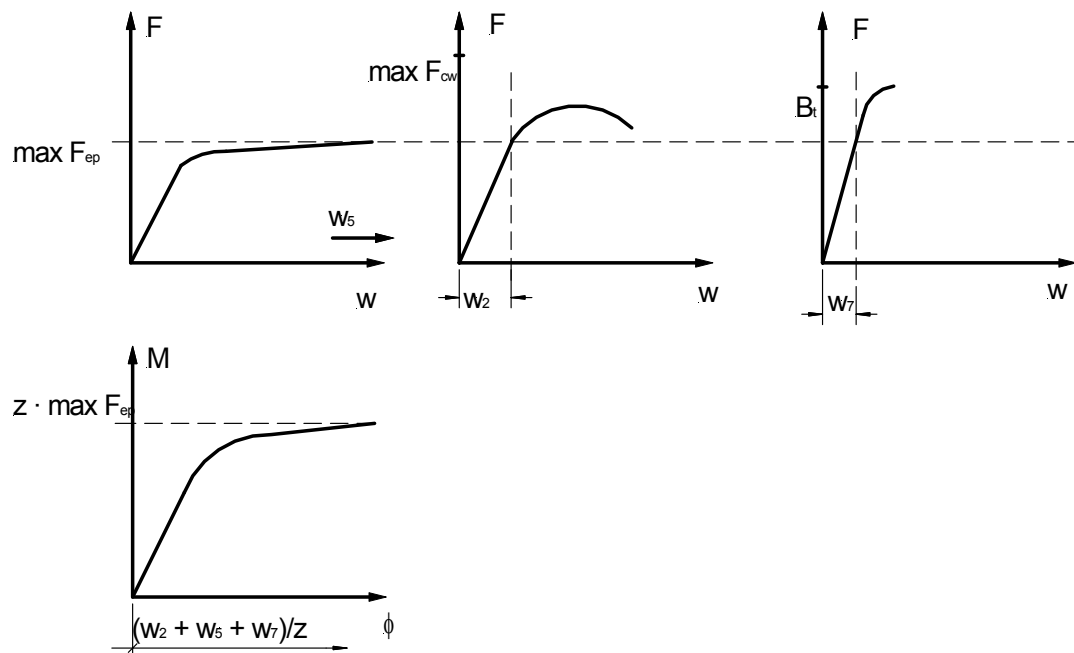
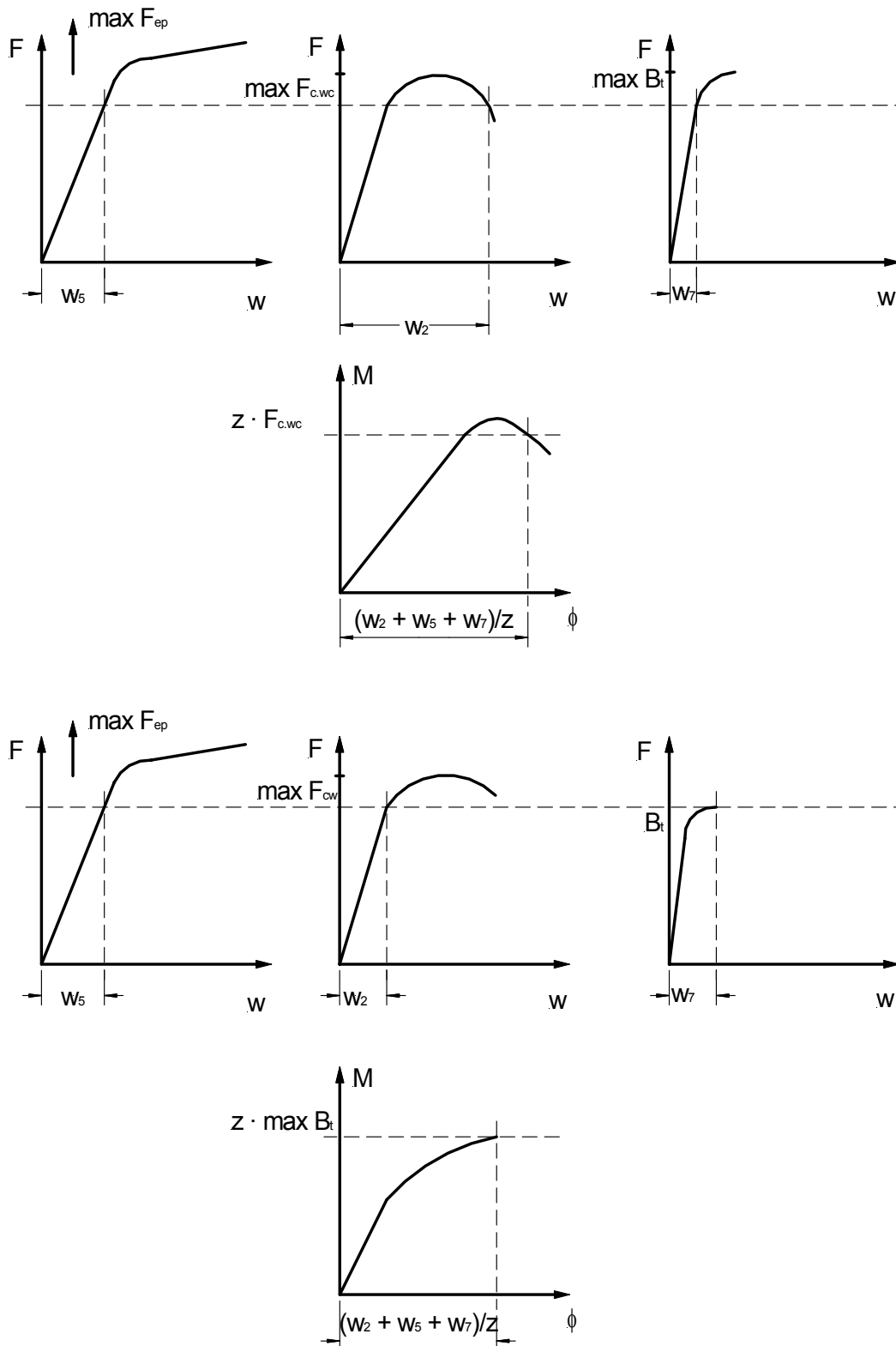


Bild 5.6: Einfluss einzelner Komponenten auf die Rotationskapazität der Verbindung nach [CISM 00]



Fortsetzung Bild 5.6: Einfluss einzelner Komponenten auf die Rotationskapazität der Verbindung nach [CISM 00]

Ausführliche Erläuterungen zur Problematik der Rotationskapazität sind in [CISM 00, Part III] zu finden.

Es stellt sich also die Frage, wie sehen die Interaktionskurven durch die Beanspruchung von Moment und Normalkraft für die einzelnen Komponenten bzw. für die in Abschnitt 6.1 definierten Schnitte aus. Ist es also überhaupt möglich, dass die Verbindung, die aus den einzelnen Komponenten besteht, eine Interaktionskurve besitzt, welche von der linearen Interaktionsbeziehung abweicht. Aufgrund dieser Erfahrungen, Erkenntnisse und Fragen werden im Folgenden die einzelnen Komponenten auch hinsichtlich der Interaktion zwischen Biegemoment und Normalkraft untersucht.

5.2 Komponenten

5.2.1 Allgemeines

Hinsichtlich der Interaktion zwischen Biegemoment und Normalkraft wurden einzelne Komponenten separat untersucht. Diese Komponenten wirken in den in Abschnitt 6.2 definierten Schnitten in den Verbindungen, die für die Berechnung der Interaktionskurven betrachtet werden. Bis auf den Trägerquerschnitt wurden die Komponenten ebenfalls mit der Finiten Elemente Methode untersucht. Mit Hilfe der FEM können somit Effekte wie Membrantrag-wirkung oder Zugfeldausbildung bei den einzelnen Komponenten mit berücksichtigt werden. Überfestigkeiten des Materials infolge der Herstellung bleiben hingegen unberücksichtigt.

5.2.2 Träger

Bei der Betrachtung eines typischen Trägerquerschnittes nach Bild 5.7 im Hinblick auf die Interaktion zwischen den beiden Schnittgrößen Biegemoment (um die starke Querschnittsachse) und Normalkraft (Druck- und Zugkraft) wurde keine Untersuchung mit der Finiten-Element-Methode vorgenommen, da für dieses Problem umfassende Ergebnisse vorliegen und die Interaktion der Schnittgrößen an solchen Querschnitten Bestandteil fast aller Berechnungen ist. Zur Darstellung der Interaktionsbeziehung der Schnittgrößen wurde somit auf die entsprechenden Gleichungen in EC 3-1-1 zurückgegriffen. Dabei wurden verschiedene Querschnitte für den Träger in die Betrachtung einbezogen. Die Untersuchung wurde einerseits für einen

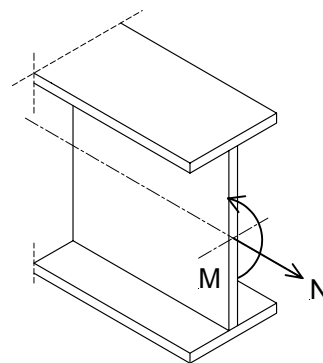


Bild 5.7: Trägerquerschnitt mit Biegemoment und Normalkraft

Rechteckquerschnitt und andererseits für zwei I-Profile durchgeführt. Die I-Profile unterscheiden sich hinsichtlich des Steganteiles am Gesamtquerschnitt. Anhand der Profiltabellen für Walzprofile zwei Profile mit $a_{\min} = 0,20144$ bzw. mit $a_{\max} = 0,49962$ ausgewählt. Je größer a , desto größer ist der Steganteil am Gesamtquerschnitt. In Bild 5.8 sind die Interaktionskurven für die Querschnitte sowie zum Vergleich die lineare Interaktionskurve zwischen Biegemoment und Normalkraft dargestellt. Es wurden folgende Gleichungen (5.1) bis (5.5), welche EC 3-1.1, Abschnitt 6.2.9.1 entsprechen, verwendet:

für einen Rechteckquerschnitt

$$M_{N.Rd} = M_{pl.Rd} \cdot \left[1 - \left(\frac{N_{Sd}}{N_{pl.Rd}} \right)^2 \right] \quad (5.1)$$

für ein I-Profil

$$M_{y.N.Rd} = M_{pl.y.Rd} \cdot \frac{(1-n)}{(1-0,5 \cdot a)} \quad (5.2)$$

wenn

$$\begin{aligned} N_{Sd} &> 0,5 \cdot N_{pl.w.Rd} \\ N_{Sd} &> 0,25 \cdot N_{pl.Rd} \end{aligned} \quad (5.3)$$

mit

$$a = \frac{(A - 2 \cdot b \cdot t_f)}{A} = \frac{A_{Steg}}{A} = \frac{N_{pl.w.Rd}}{N_{pl.Rd}} \quad (5.4)$$

und

$$n = \frac{N_{Sd}}{N_{pl.Rd}} \quad (5.5)$$

Es ist zu sehen, dass im Bereich des Grenzmomentes eine deutliche nach außen gekrümmte Abweichung der drei Querschnittsinteraktionskurven von der linearen Interaktionskurve vorliegt. Dies bedeutet, dass der Querschnitt grundsätzlich zum Grenzmoment noch eine Normalkraft – Zug- oder Druckkraft – aufnehmen kann. Die Querschnitte sind, im Gegensatz dazu, durch eine entsprechende Grenznormalkraft ($n = 1$) vollständig ausgelastet und können kein zusätzliches Moment aufnehmen.

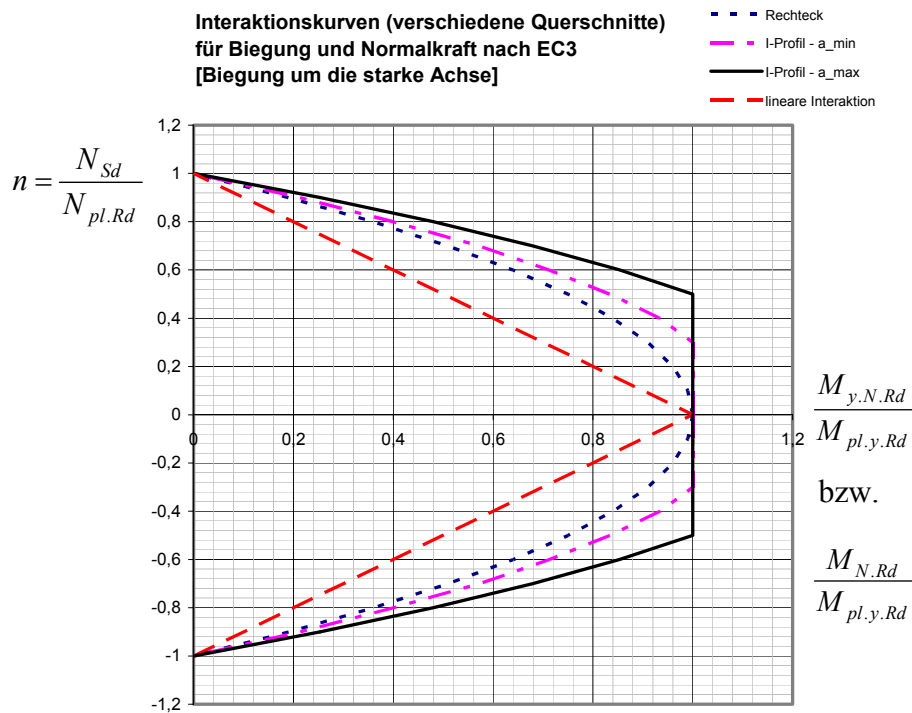


Bild 5.8: Interaktionskurven für verschiedene Trägerquerschnitte

Da in einer Verbindung stets auch Querkräfte auftreten und diese in den einzelnen Schnitten aufgenommen und abgetragen werden müssen, wurden zusätzlich für den Schnitt I „Träger“ Betrachtungen zur Interaktion von Normalkraft-Querkraft, Moment-Querkraft und Normalkraft-Querkraft-Moment aufgestellt, wie es in Bild 5.10 dargestellt ist. Es ist zu sehen, dass die Querkraft einen nicht unerheblichen Einfluss auf die beiden anderen Schnittgrößen Normalkraft und Moment hat. Bei der Betrachtung dieser Komponente sollte daher der Anteil der Querkraft eingeschätzt und entsprechend berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang wird für weitere Informationen auf [Kin-03] verwiesen.

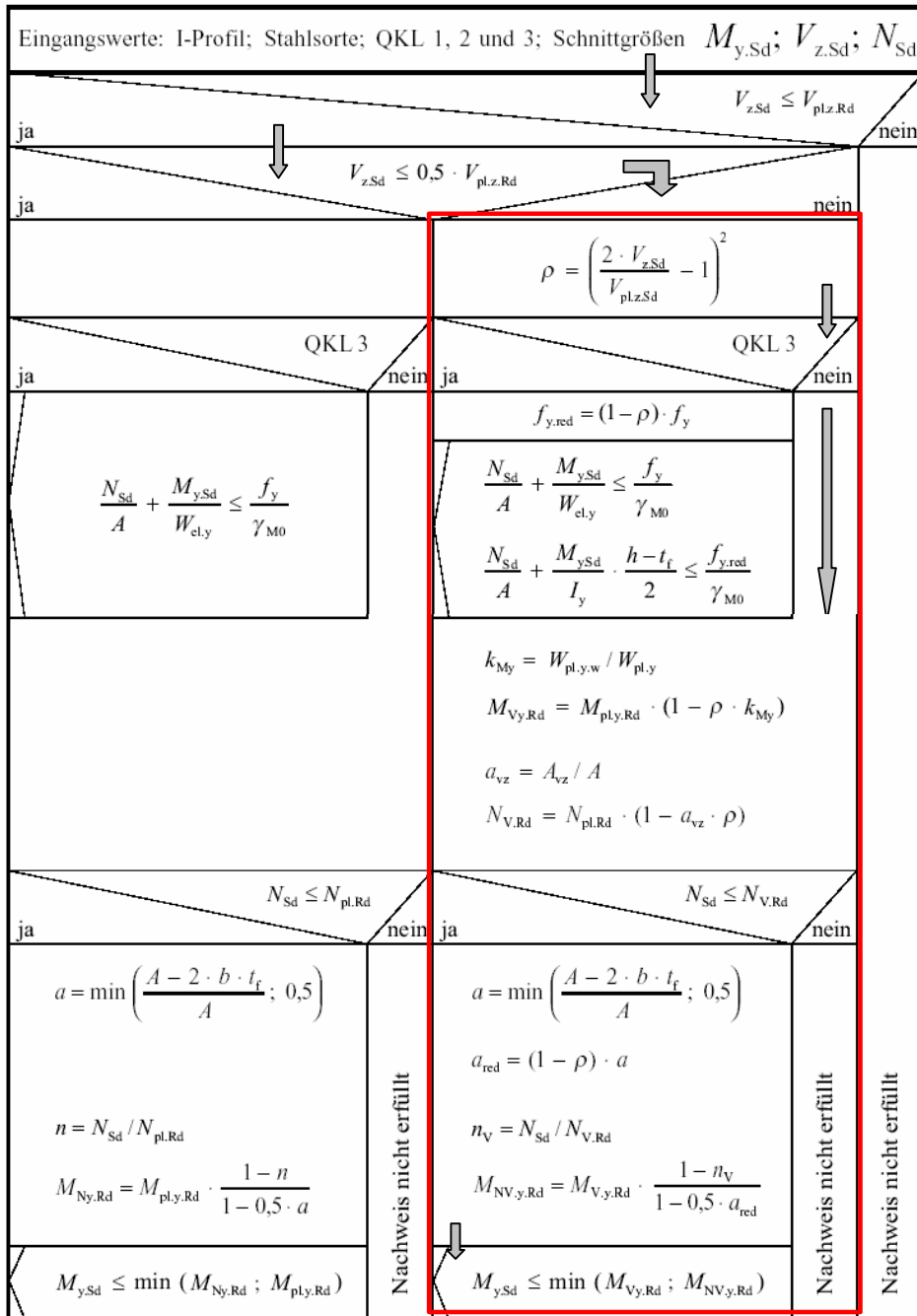


Bild 5.9: Struktogramm zur Interaktion mit Berücksichtigung des Querkrafteinflusses am Trägerquerschnitt

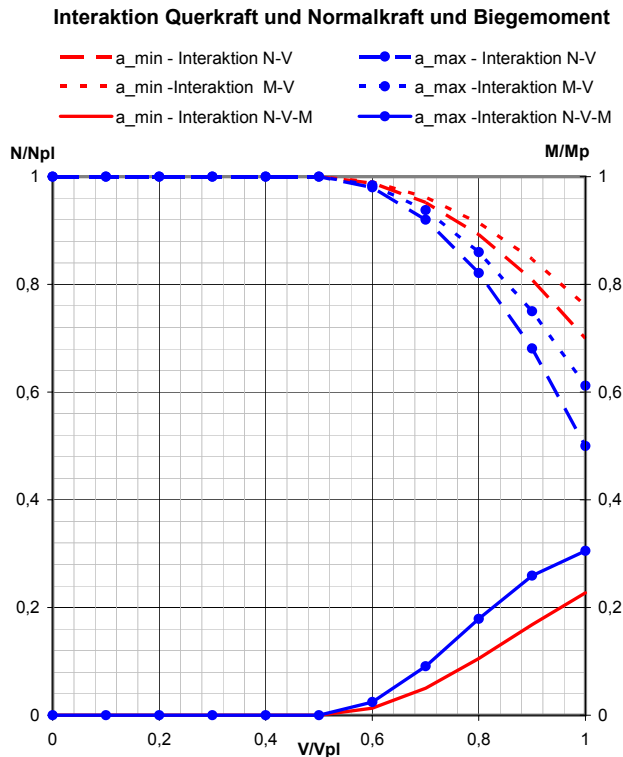
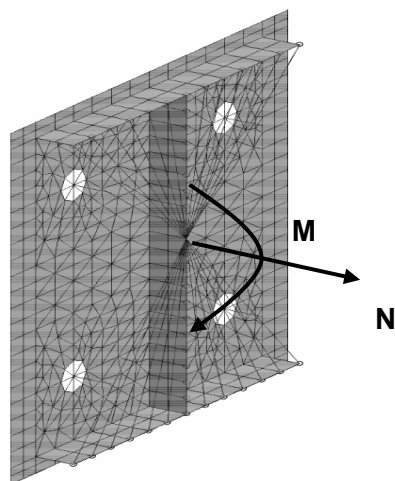


Bild 5.10: Diagramm zur Interaktion mit Berücksichtigung des Querkrafteinflusses am Trägerquerschnitt (Berechnung entsprechend Struktogramm nach Bild 5.9)

5.2.3 Kopfplatte mit Schrauben (T-Stoß)

Die Komponente Kopfplatte in Kombination mit den Schrauben entspricht dem T-Stoß und ist dem Zugbereich einer Verbindung zuzuordnen. Im aus den FE-Berechnungen für die Komponente aufgestellten Interaktionsdiagramm sind jedoch sowohl Zugkraft als auch Druckkraft enthalten. Es ist dabei zu beachten, dass die Schrauben auch im Druckbereich einen Einfluss auf die Kopfplatte ausüben, da die hochfesten Schrauben vorgespannt werden und somit schon vor der eigentlichen Belastung in Teilbereichen Druckspannungen in der (Kopf-) Platte auftreten. In Bild 5.11 ist dazu das verwendete FE-Modell abgebildet.



Abmessungen der Kopfplatte:

$$b = 220 \text{ mm}$$

$$h = 220 \text{ mm}$$

$$t = 25 \text{ mm}$$

Material: S235

Schrauben: M20-10.9

Randabstand: 50 mm

Schraubenabstand: 120 mm

Überstand: 10 mm

Bild 5.11: Kopfplatte und Schrauben mit Biegemoment und Normalkraft (Beispiel)

Die Interaktionskurve in Bild 5.12 wurde aus einzelnen Belastungskurven mit verschiedenen Verhältnissen zwischen Moment und Normalkraft erstellt. Eine ausführliche Beschreibung der Entwicklung der Interaktionskurven auf der Basis von Finiten-Elemente-Berechnungen ist im Abschnitt 4.2.4 enthalten.

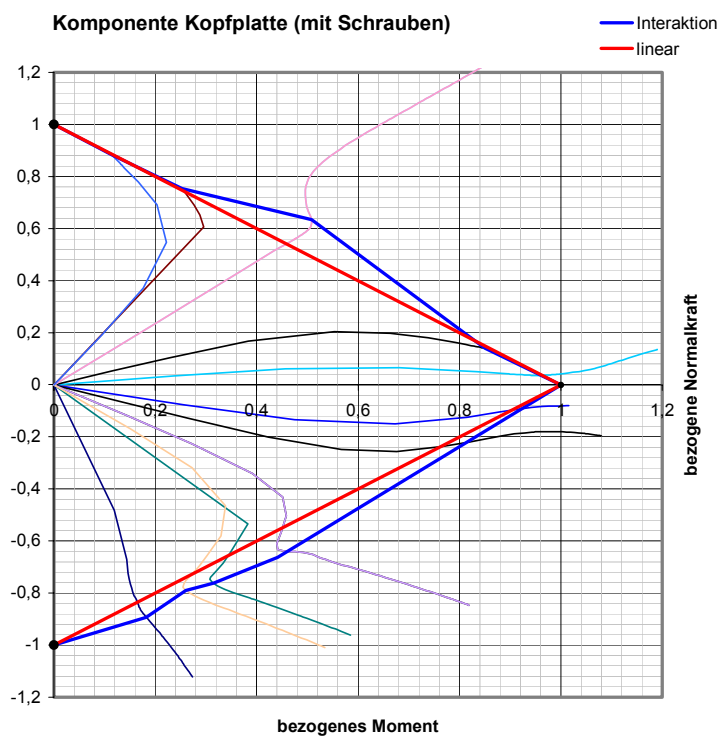
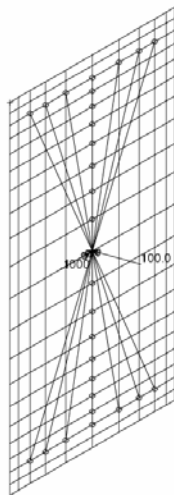


Bild 5.12: Interaktionskurve für die Komponente Kopfplatte mit Schrauben

Im Interaktionsdiagramm sind die eigentliche Interaktionskurve für die symmetrisch ausgeführte Komponente Kopfplatte mit Schrauben sowie die lineare Interaktionskurve, die dem Vergleich dienen soll, dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass im Bereich des Grenzmomentes keine zusätzliche Normalkraft aufgenommen werden kann. Das gleiche gilt für den umgekehrten Fall. Bei vollständiger Beanspruchung der Komponente durch eine Normalkraft kann auch kein zusätzliches Moment aufgenommen werden. Die Bereiche dazwischen, also Momente kleiner als Grenzmoment bzw. Normalkraft kleiner als Grenznormalkraft, ermöglichen eine Interaktion in Grenzen über 1,0 hinaus. Für die symmetrische Variante der Komponente ergibt sich eine symmetrische Interaktionskurve.

5.2.4 Kopfplatte (ohne Schrauben)

Die Komponente Kopfplatte (ohne Schrauben) nach Bild 5.13 ist dem Druckbereich einer Verbindung zuzuordnen. Die Kräfte werden durch Kontaktpressung übertragen. Vorhandene Schrauben dienen im Allgemeinen der Lagesicherung und der Übertragung der Querkräfte, werden jedoch nicht für die Übertragung von Biegemoment oder Normalkraft benötigt. Die untersuchte Kopfplatte stellt hinsichtlich der Abmessungen Höhe, Breite und Dicke den Mittelwert aus allen Kopfplatten dar (siehe Anhang A).



Abmessungen der Kopfplatte:

$$b = 138 \text{ mm}$$

$$h = 200 \text{ mm}$$

$$t = 28 \text{ mm}$$

Material: S235

Bild 5.13: Kopfplatte mit Biegemoment und Normalkraft

Im Interaktionsdiagramm nach Bild 5.14 sind sowohl Zugkraft als auch Druckkraft der Vollständigkeit halber enthalten. Die Interaktionskurve wurde auch hier wieder aus einzelnen Belastungskurven mit verschiedenen Verhältnissen zwischen Moment und Normalkraft erstellt.

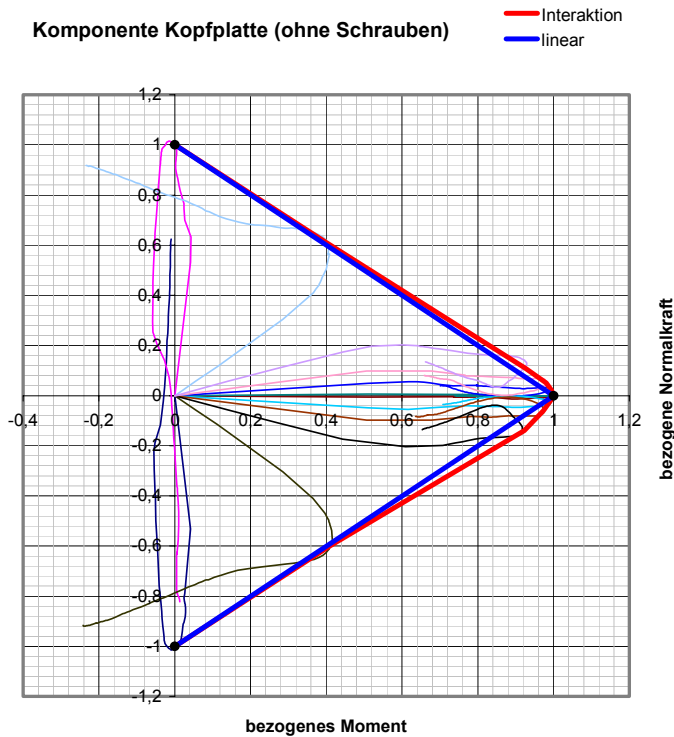


Bild 5.14: Interaktionskurve für die Komponente Kopfplatte

Das Bild 5.14 enthält die Interaktionskurve für die Komponente und die lineare Interaktionskurve zum Vergleich. Es ist wiederum deutlich zu sehen, dass im Bereich des Grenzmomentes keine zusätzliche Normalkraft aufgenommen werden kann. Dies gleich gilt für den entgegengesetzten Fall. Bei vollständiger Beanspruchung der Komponente durch eine Normalkraft kann auch kein zusätzliches Moment aufgenommen werden. Die Interaktionskurve der Komponente entspricht fast vollständig der linearen Interaktionskurve. Die Bereiche für Druckkraft/Biegemoment und Zugkraft/Biegemoment unterscheiden sich nur geringfügig.

5.2.5 Stützensteg

Bei der Komponente Stützensteg wurden die Betrachtungen erweitert. Zum einen war die Belastung, wie bisher, Biegemoment und Normalkraft. Zum anderen wurde diese Belastung mit einer zusätzlichen Normalkraft (Normalkraft in der Stützenlängsachse) kombiniert, wobei diese zusätzliche Drucknormalkraft in verschiedenen Lastfällen unterschiedlich groß war. Des Weiteren wurden zwei unterschiedliche Stegbleche, hinsichtlich Dicke und Abmessungen untersucht. Tabelle 5.1 enthält die Abmessungen der beiden untersuchten Stegbleche. Das Material war für beide Bleche S235.

Tabelle 5.1: Abmessungen der Stegbleche

Profil	Dicke in mm	Höhe in mm	Breite in mm	Schlankheitsgrad
IPE 240	6,2	100	200	35,48
HEM 120	12,5	100	98	7,84

In Bild 5.15 sind die beiden FE-Modelle der Bleche mit den entsprechenden Randbedingungen – Lagerung und Belastung – dargestellt.

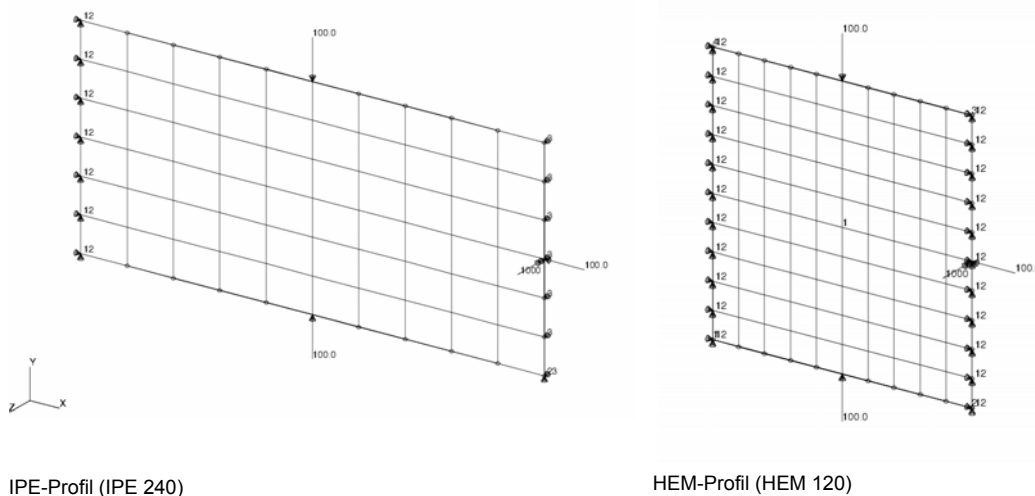


Bild 5.15: Komponente Stützensteg mit Stützennormalkraft, Biegemoment und Trägernormalkraft

Für die Komponente Stützenstegblech wurde erwartet, dass sich zum Teil überkritische Tragreserven ergeben. Überkritische Tragreserven treten auf bei Beanspruchung durch Normalspannungen und bei allseitiger Lagerung des Bleches. Das Stützenstegblech ist allseitig gelagert bei Anordnung von Steifen in Verlängerung der Trägerflansche. Ist der Verbindungsbereich unausgesteift, dann ist das Stützenstegblech zumindest zweiseitig gelagert durch die beiden Stützenflansche. Durch die Fortführung des Stegbleches nach oben und unten bei Rahmenknoten (nicht Rahmenecken!) ist das Blech zusätzlich zweiseitig nachgiebig gelagert und kann dann als allseitig gelagert betrachtet werden. Bei der Betrachtung dieser Komponente ist somit die gesamte Konfiguration zu berücksichtigen.

Für den Fall der Belastung ohne Stützennormalkraft ergibt sich für beide Profile im Druck- und Zugbereich der Interaktionskurven, dargestellt in Bild 5.16, ein recht symmetrisches Bild mit geringfügigen Abweichungen. Eine Interaktion über 1,0 im Bereich der Grenznormalkräfte bzw. des Grenzmomentes ist nicht möglich, jedoch teilweise in den Bereichen dazwischen. Für das IPE-Profil ist die Interaktionskurve teils etwas „bauchiger“ als die für das HEM-Profil.

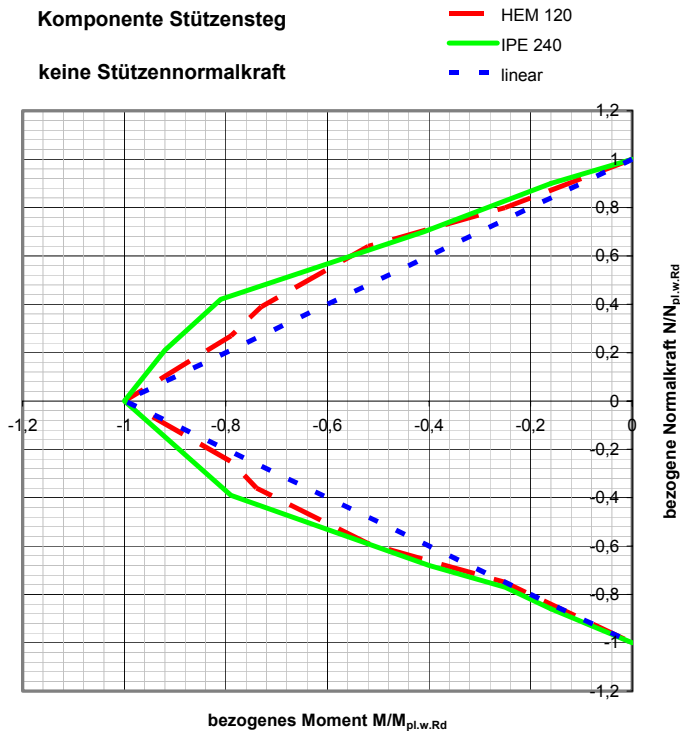


Bild 5.16: Interaktionskurven für Komponente Stützensteg ohne Stützennormalkraft

Folgende Stützennormalkräfte wurden in Kombination mit Biegemoment und Trägernormalkraft als Belastung für das jeweilige Stützenstegblech angesetzt:

1 kN, 10 kN, 50 kN, 100 kN, 250 kN (IPE), 500 kN (IPE), 1000 kN (HEM).

In Bild 5.17 sind die Interaktionskurven unter Einbeziehung der Stützennormalkraft für das IPE-Profil ist dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass bis zu einer bestimmten Stützennormalkraft eine Interaktion über das eigentliche Grenzmoment hinaus mit einer (Träger-)Normalkraft möglich ist. Die Interaktionskurve weist sowohl Werte $v > 1,0$ (nach Gleichung (3.3)) als auch Werte $\mu > 1,0$ (nach Gleichung (3.2)) auf. Aber es ist auch zu sehen, dass eine größere Stützennormalkraft (ab etwa 250 kN) die Interaktionskurve stark verkleinert, das heißt, dass das eigentliche Grenzmoment ($\mu < 1,0$) und die eigentliche Grenznormalkraft ($v < 1,0$) nicht mehr erreicht werden. Dieser Umstand wird bisher auch schon im Annex J bzw. EC 3-1.8 berücksichtigt durch die Anwendung des Faktors k_{wc} bei der Komponente „Stützensteg auf Druck“ [N 3]. Ansonsten kann wieder ein symmetrischer Verlauf zwischen Druck- und Zugbereich für fast alle der Interaktionskurven festgestellt werden. Eine Abweichung liegt vor für die maximale Stützennormalkraft von 500 kN. Hier ist der Kurvenverlauf im Druckbereich deutliche flacher als im Zugbereich. Es wird Stabilitätsversagen angenommen.

Komponente Stützensteg - IPE 240 mit Stütznormalkraft

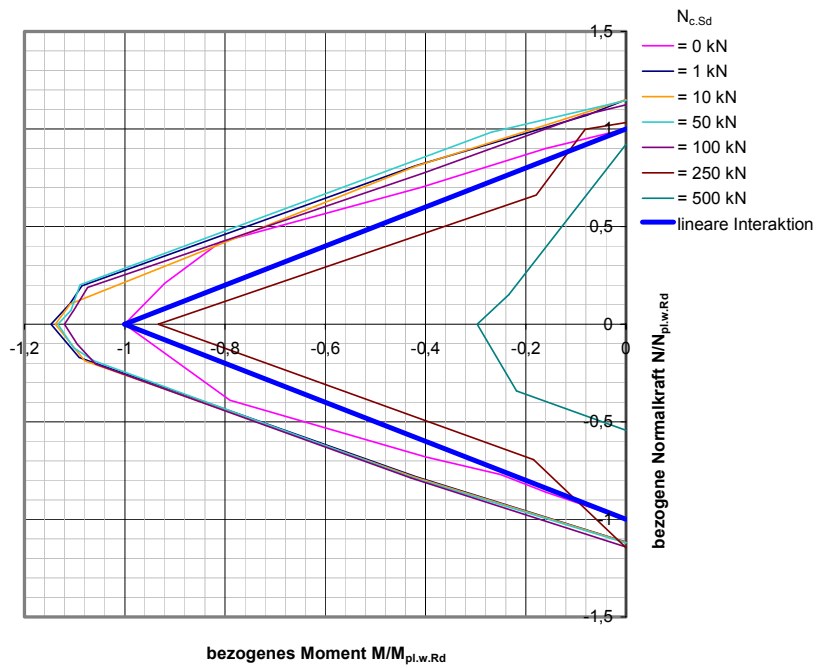


Bild 5.17: Interaktionskurven für Komponente Stützensteg (IPE-Profil) mit Stütznormalkraft

Komponente Stützensteg - HEM 240 mit Stütznormalkraft

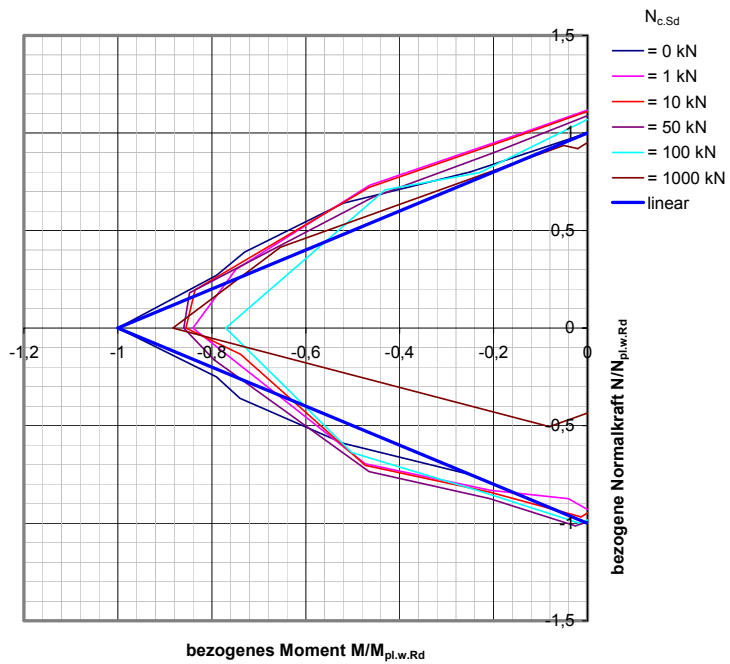


Bild 5.18: Interaktionskurven für Komponente Stützensteg (HEM-Profil) mit Stütznormalkraft

Bei den Interaktionskurven mit Stützennormalkraft für das HEM-Profil in Bild 5.18 ist zu sehen, dass offensichtlich eine Normalkraft in der Stütze stets zu einer Verringerung des Grenzmomentes und der Grenznormalkräfte und somit zu einer Verkleinerung der Interaktionskurve führt. Für den Großteil der untersuchten Belastungen durch die Stützennormalkraft kann ein symmetrischer Verlauf zwischen Druck- und Zugbereich der Interaktionskurven festgestellt werden. Eine Abweichung tritt beim Stegblech des Profils HEM 120 für die hier untersuchte maximale Stützennormalkraft von 1000 kN auf. Im Druckbereich ist die Interaktionskurve deutlich flacher als im Zugbereich. Dies deutet auf Stabilitätsverlust des untersuchten Stegbleches hin.

Aufgrund des größeren Schlankheitsgrades des Stützenstegbleches des IPE-Profiles im Vergleich zum HEM-Profil und den erhaltenen Interaktionskurven wird von einer größeren Plattenwirkung (Laststeigerung im Nachbeulbereich) ausgegangen.

5.3 Fazit

Die Ausführungen zur Rotationskapazität zeigen, dass das Ergebnis für die gesamte Verbindung davon abhängig ist, welche Komponente maßgebend für das Versagen bei der Berechnung der Tragfähigkeit ist (siehe auch Bild 5.6).

Allgemein ist festzustellen, dass keine der Komponenten eine Interaktion zwischen Biegemoment und Normalkraft zulässt, wenn $v = 1,0$ bzw. $v = -1,0$. Das heißt, die Schnitte, die in Abschnitt 5.2 untersucht wurden, sind durch Belastung einer alleinigen Normalkraft im Träger voll ausgelastet. Die Aufnahme eines zusätzlichen Biegemomentes ist nicht möglich. Diese Feststellung gilt für alle untersuchten Schnitte (bei Stützensteg ohne Stützennormalkraft). Daher wird für die gesamte Verbindung für diese Punkte ein gleichartiges Verhalten angenommen.

Die Interaktion zwischen Biegemoment und Normalkraft im Bereich des Grenzmomentes ($\mu \geq 1,0$) ist teils möglich (Trägerquerschnitt, Stützensteg mit Stützennormalkraft), teils nicht (Kopfplatte, Stützensteg mit und ohne Stützennormalkraft). Es kann also nicht ausgeschlossen werden, dass für eine Verbindung die Interaktionskurve mit Werten von $\mu \geq 1,0$ ausfällt.

Für die Bereiche $\mu < 1,0$ und $v < \pm 1,0$ wurde für alle untersuchten Schnitte bzw. Komponenten eine Abweichung von der linearen Interaktionskurve, die dem Vergleich diente, festgestellt. Die Interaktionsbeziehung zwischen Biegemoment und Normalkraft ist für die einzelnen Schnitte somit nichtlinear und wird daher auch für eine komplexe Rahmenverbindung als nichtlinear vermutet.

6 Anwendung und Erweiterung der Komponentenmethode

6.1 Hintergrund

Innerhalb dieses Abschnittes wird die Komponentenmethode nach EC 3-1.8 angewendet und für die Normalkrafttragfähigkeit sowie die Interaktion zwischen den beiden Schnittgrößen Normalkraft (aus dem angeschlossenen Trägerquerschnitt) und Biegemoment vorrangig für symmetrische Verbindungen weiterentwickelt. Bei symmetrischen Verbindungen (vorrangig Träger-Träger-Verbindungen) ergeben sich die maximalen Normalkrafttragfähigkeiten für Zug- und Druck bei $M_{y,sd} = 0$ kNm. Es werden jedoch auch Hinweise zur Handhabung der unsymmetrischen Verbindungen gegeben. Die maximalen Normalkrafttragfähigkeiten, welche nicht den Grenznormalkräften ($M_{y,sd} = 0$ kNm) entsprechen, ergeben sich hier nur bei gleichzeitig auftretendem Biegemoment ($M_{y,sd} \neq 0$ kNm).

Nachweise zum Verbindungsmittel selbst, wie Abscheren oder Lochleibung bei geschraubten Verbindungen oder Beanspruchung der Schweißnaht auf Zug und Schub, werden innerhalb dieser Arbeit nicht explizit angesprochen, sind aber stets bei der Berechnung einer Verbindung durchzuführen.

Hinsichtlich der Schnittgrößen bleibt der Anwendungsbereich auf den ebenen Fall beschränkt. Dies bedeutet, dass die Schnittgrößen M_x = Torsionsmoment, M_z = Biegung um die z-Achse (senkrecht zur Rahmenebene) und V_y = Querkraft in z-Richtung (senkrecht zur Rahmenebene) im folgenden ausgeschlossen werden.

6.2 Beanspruchung durch eine Normalkraft

6.2.1 Vorgehen

Für die Berechnung der Tragfähigkeit einer Verbindung bei Beanspruchung durch eine Normalkraft – Druck oder Zug – wird die Verbindung in zu betrachtende Schnitte unterteilt. Diese Schnitte sind Ebenen, die parallel zur Kopfplattenebene gewählt werden. Sie werden eingeführt, da bei Normalkraftbeanspruchung von einer gleichmäßigen Beanspruchung über den gesamten Verbindungsquerschnitt hinsichtlich Dehnungs- und Spannungsverteilung ausgegangen wird. Bei einer Momentenbeanspruchung hingegen wird die Beanspruchung sich entsprechend der Abstände (Hebelarme) vom Schwerpunkt oder von einem festgelegten Drehpunkt innerhalb der Verbindung bei einer elastischen Betrachtung linear verteilen. Beim Übergang zum plastischen Bereich bilden sich, wie in Bild 6.1 zu sehen, ebenfalls Spannungsblöcke, also konstante Spannungsverteilungen, aus. Allerdings ergeben sich bei

reiner Momentenbeanspruchung Kräftepaare aus Zug- und Druckkraft, welche die Komponenten unterschiedlich beanspruchen.

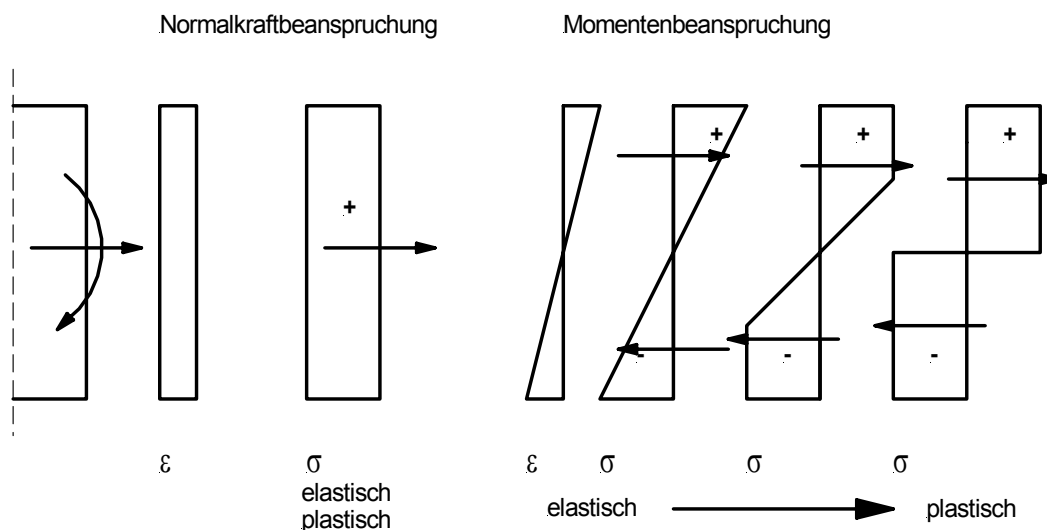


Bild 6.1: Dehnungs-, Spannungs- und Kräfteverteilungen im Vergleich

Die Anzahl der zu untersuchenden Schnitte richtet sich nach der Verbindungsconfiguration. Die Minimalzahl beträgt für symmetrische Träger-Träger-Verbindungen zwei, bei geschraubten Träger-Stützen-Verbindungen oder unsymmetrischen Träger-Träger-Verbindungen sind vier Schnitte zu untersuchen. Für geschweißte Träger-Stützen-Verbindungen, bei denen der Trägerquerschnitt direkt an den Stützenflansch über Schweißnähte angeschlossen wird, sind 3 Schnitte zu untersuchen. Die definierten Schnitte sind

- | | | |
|-------|---|-------------------------------------|
| (I) | Schnitt durch den gesamten Trägerquerschnitt (bei unsymmetrischen Träger-Träger-Verbindungen jeweils beide angeschlossene Träger) | SCHNITT I
(links/rechts) |
| (II) | Schnitt durch die Kopfplatte (bei unterschiedlichen Kopfplattendicken jeweils 2 zu untersuchende Schnitte) | SCHNITT II
(links/rechts) |
| (III) | Schnitt durch den Stützenflansch
(Träger-Stützen-Verbindungen) | SCHNITT III |
| (IV) | Schnitt durch den Stützensteg.
(Träger-Stützen-Verbindungen) | SCHNITT IV |

In Bild 6.2 sind die definierten Schnitte für eine Träger-Stützen-Verbindung dargestellt.

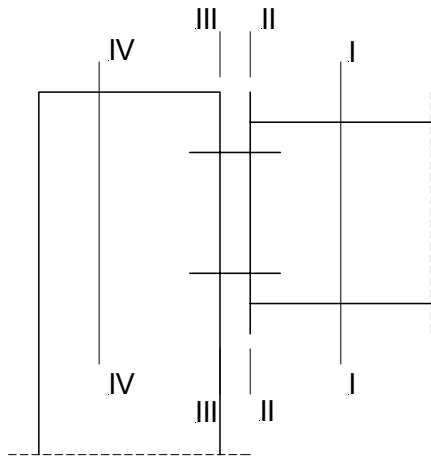


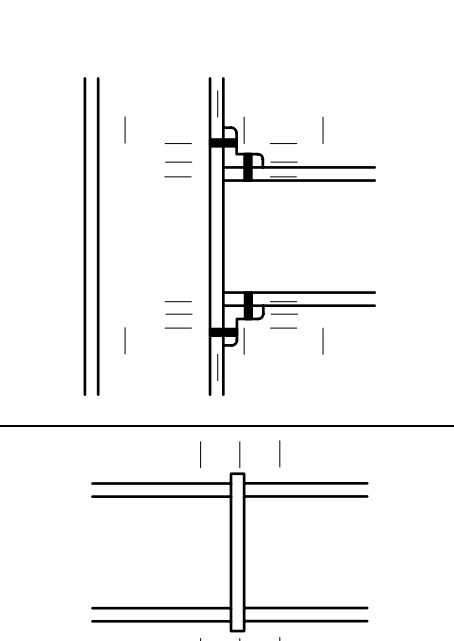
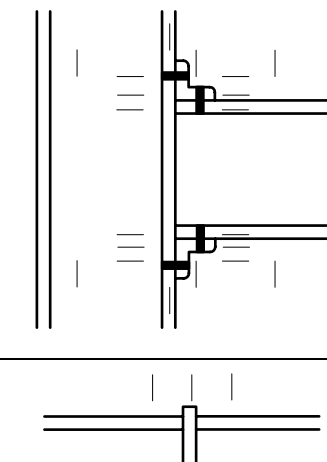
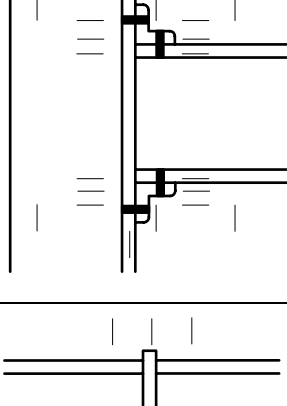
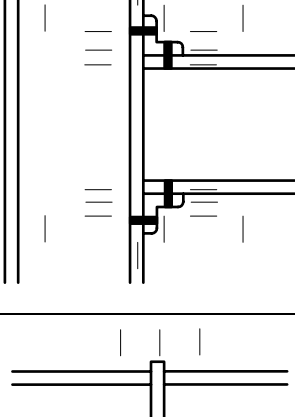
Bild 6.2: Schnitte für die Berechnung der Normalkrafttragfähigkeit bei Träger-Stützen-Verbindungen

Die Tabelle 6.1 enthält verschiedene geschraubte und geschweißte Verbindungen, die auch nach EC 3-1.8 berechnet werden können. Für diese Verbindungen ist die Anzahl der zu untersuchenden Schnitte bei Normalkraftbeanspruchung angegeben.

Verbindungen nach Zeile 4 der Tabelle 6.1 wurden innerhalb der Arbeit nicht untersucht, da nach Auffassung der Verfasserin diese Art von Verbindungskonfiguration nicht üblich ist.

Tabelle 6.1: Schnitte bei verschiedenen Verbindungen

1		geschraubte Träger-Träger-Verbindung symmetrisch: 2 Schnitte unsymmetrisch: 4 Schnitte
2		einseitige geschraubte Träger-Stützen-Verbindung mit Kopfplatte Kopfplatte: bündig/überstehend 4 Schnitte

3		<p>zweiseitige geschraubte Träger-Stützen-Verbindung 7 Schnitte Aufteilung in 2 Verbindungen mit jeweils 4 Schnitten, wobei Schnitt IV für beide Verbindungen gleich ist</p>
4		<p>geschraubte Träger-Stützen-Verbindung mit Flanschaschen Schnitte: 4 Schnitte senkrecht 3 Schnitt waagrecht, wenn symmetrischer Aufbau (hinsichtlich Flanschaschen) 6 Schnitte waagrecht, wenn unsymmetrischer Aufbau Verbindung ist <u>nicht</u> in der Untersuchung enthalten!</p>
5		<p>geschweißte Träger-Träger-Verbindung mit Kopfplatte symmetrisch: 2 Schnitte unsymmetrisch: 3 Schnitte</p>
6		<p>geschweißte Träger-Stützen-Verbindung 3 Schnitte</p>

Innerhalb dieser zu untersuchenden Schnitte sind analog zum eigentlichen Komponentenmodell des EC 3-1.8 entsprechende Komponenten definiert. Schnitt I setzt sich aus den einzelnen Querschnittsteilen „Flansche“ und „Steg“ des Trägers zusammen. Der Schnitt II liegt in der Kopfplattenebene und wird entsprechend unterschiedlich für Druck- und Zugbeanspruchung betrachtet. Bei einer Druckbeanspruchung wird die Tragfähigkeit des Schnittes nur durch Komponente „Kopfplatte“ bestimmt. Die Schrauben sind Elemente zur Zug- oder Querkraftübertragung und entfallen bei Druckbeanspruchung als Tragelemente. Bei der Berechnung der Druckkrafttragfähigkeit haben sie somit keinen Anteil. Im Fall einer

Zugbeanspruchung ergibt sich die Tragfähigkeit des Schnittes II aus der Anwendung des T-Stoß-Modells, das aus der Kopfplatte und den Schrauben gebildet wird. Der Schnitt III, der für Träger-Stützen-Verbindungen zu betrachten ist, ist analog zum Schnitt II nur in der Stützenflanschebene im Bereich der Verbindung definiert. Bei diesem Schnitt ist die stützenseitige Gestaltung der Verbindung hinsichtlich Verstärkungen oder Aussteifungen zu beachten. Schnitt IV entspricht der Komponente „Stützenstegblech“. Es werden bei der Berechnung der Tragfähigkeit bei Normalkraftbeanspruchung der Verbindung über den Trägerquerschnitt (nicht zu verwechseln mit einer gleichzeitigen Beanspruchung des Verbindungsbereiches durch eine Stützennormalkraft) somit zuerst die einzelnen definierten Komponenten (siehe Abschnitt 6.2.2 und 6.2.3) berechnet. Aus den Tragfähigkeiten der einzelnen Komponenten ergibt sich die Tragfähigkeit der untersuchten Verbindung in den maximal vier (unterschiedlich) definierten Schnitten. Zur Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit der Verbindung werden die Tragfähigkeiten der Schnitte miteinander verglichen und die kleinste Tragfähigkeit ist dann nach Gleichung (6.1) bzw. Gleichung (6.2) maßgebend für die gesamte Verbindung.

- Träger-Träger-Verbindungen

$$F_{C/T.Rd} = \min \begin{pmatrix} F_{C/T.I} \\ F_{C/T.II} \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

- Träger-Stützen-Verbindungen

$$F_{C/T.Rd} = \min \begin{pmatrix} F_{C/T.I} \\ F_{C/T.II} \\ F_{C/T.III} \\ F_{C/T.IV} \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

$F_{C.Rd}$	...	Tragfähigkeit einer Verbindung unter Druckbeanspruchung
$F_{T.Rd}$	...	Tragfähigkeit einer Verbindung unter Zugbeanspruchung
$F_{C/T.I} \dots F_{C/T.IV}$	...	Tragfähigkeit des Schnittes I ... IV, unter Druck- bzw. Zugbeanspruchung

In Bild 6.3 wird der Ablauf der Berechnung der Normalkrafttragfähigkeit – Druck- (ROT) oder Zugnormalkraft (BLAU) – über die definierten Schnitte gezeigt. Die dazugehörigen Gleichungen und Festlegungen werden in Abschnitt 6.2.2 für Druck und Abschnitt 6.2.3 für Zug gegeben.

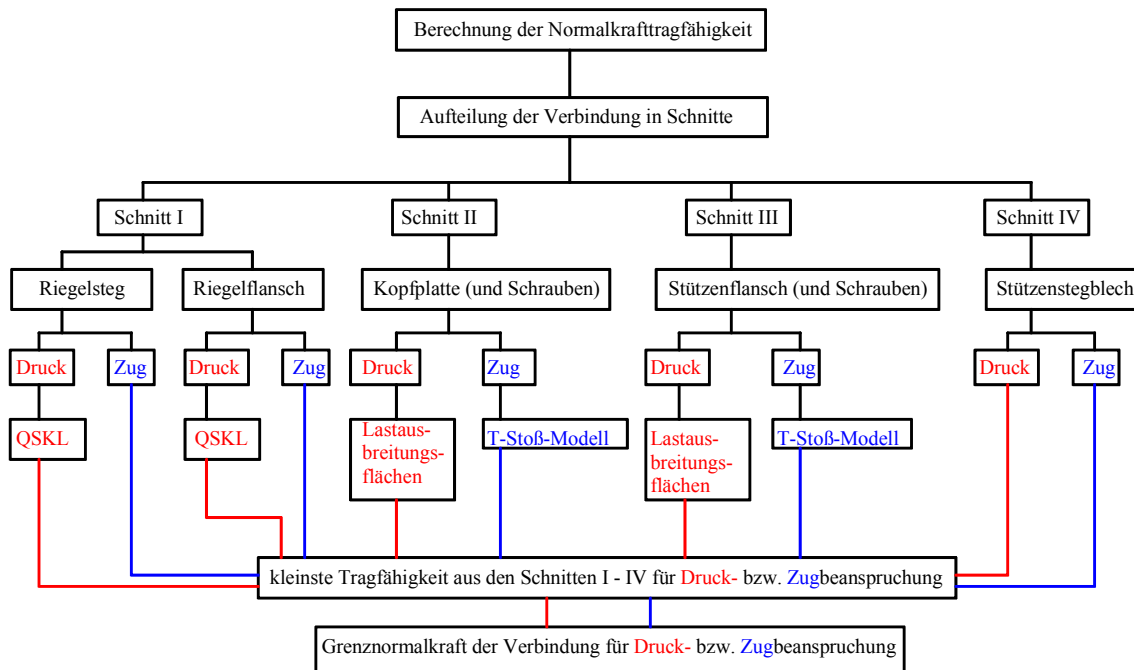


Bild 6.3: Ablauf der Berechnung der Normalkrafttragfähigkeit

Nachfolgend soll die Aufspaltung der Verbindung in die einzelnen Schnitte ausführlich erläutert werden. Das Zusammenwirken der Komponenten eines Schnittes kann anhand eines Federmodells am Beispiel des Schnittes I nach Bild 6.4 erklärt werden. Bei Beanspruchung allein durch eine Normalkraft (zentrische Beanspruchung) treten im gesamten Querschnitt gleiche Dehnungen ε auf. Daraus resultieren gemäß dem Hooke'schen Gesetz ebenso konstante Spannungen über den gesamten Querschnitt.

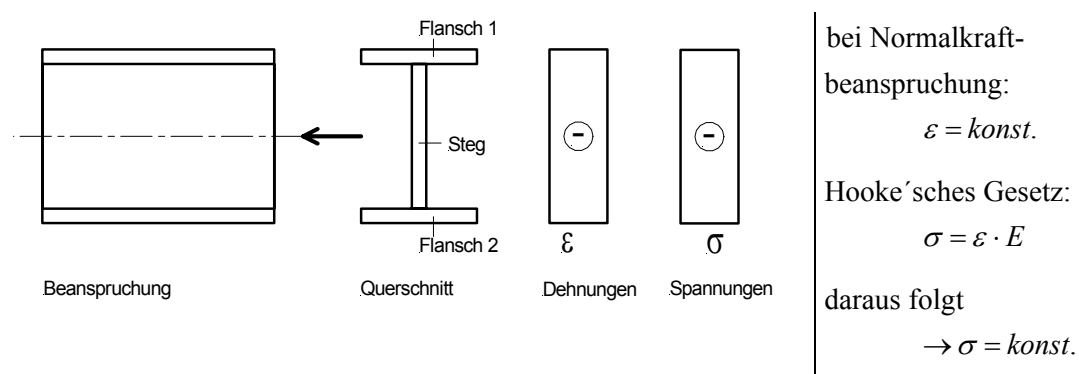


Bild 6.4: Schnitt I durch den Träger bei Normalkraftbeanspruchung

Es treten also gleiche Verformungen und damit gleiche Wege im jeweiligen Schnitt bei dieser Art von Beanspruchung auf. Nach Bild 6.5 kann daher im zu betrachtenden Schnitt eine Parallelschaltung der Federsteifigkeiten, welche stellvertretend für die einzelnen Komponenten stehen, angenommen werden.

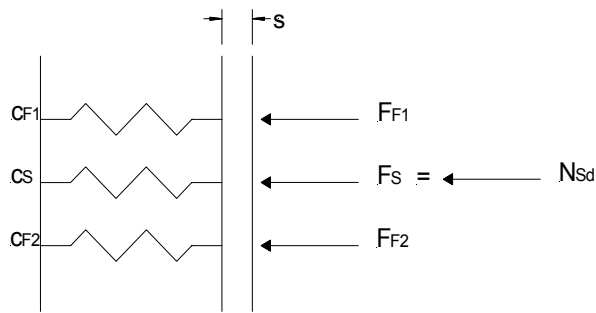


Bild 6.5: Federmodell für Schnitt I

Die angreifende Normalkraft splittet sich auf die einzelnen Komponenten, die dem jeweiligen Schnitt zugehörig sind, auf und zwar so, dass gleiche Wege s , aber unterschiedliche Kräfte F entsprechend den vorhandenen Steifigkeiten c auftreten. Es gilt bei gleichem Material ($E = \text{konstant}$) für die Komponenten:

$$s = \text{konstant}$$

$$\rightarrow \varepsilon = \text{konstant}$$

$$\rightarrow \sigma = \text{konstant}$$

Über den Zusammenhang $\sigma = F / A$ und der jeweiligen Querschnittsfläche der Komponente $A \neq \text{konstant}$ ergibt sich $\rightarrow F \neq \text{konstant}$.

Die Steifigkeit des Schnittes, in dem Fall des Schnittes I durch den Träger, ergibt sich dann nach Gleichung (6.3) aus der Summe der Komponentensteifigkeiten:

$$c_b = c_{F1} + c_S + c_{F2} \quad (6.3)$$

mit

c_b	...	Federsteifigkeit des Trägerschnittes
c_{F1}, c_{F2}	...	Federsteifigkeiten der beiden Flansche
c_S	...	Federsteifigkeit des Trägersteges

Es kann somit jeder Schnitt durch eine resultierende Wegfeder repräsentiert werden. Sind im Schnitt mehrere Komponenten vorhanden, dann werden deren unterschiedliche Steifigkeiten über Parallelschaltung zu einer resultierenden Wegfeder für den gesamten Schnitt zusammengefasst.

Das Zusammenwirken der einzelnen Schnitte innerhalb der Verbindung kann ebenfalls durch ein Federmodell erklärt werden. Es liegen die unterschiedlichen Steifigkeiten (Wegfedern) in den einzelnen Schnitten, resultierend aus den Komponenten im jeweiligen Schnitt vor. Im Komponentenmodell nach EC 3-1.8 wird für die Berechnung der Tragfähigkeit bzw. der Steifigkeit einer Schraubenreihe die Reihenschaltung genutzt. Die Tragfähigkeit ist dabei begrenzt durch die kleinste Tragfähigkeit einer Komponente aus allen Komponenten dieser Schraubenreihe. Es wird hier die Analogie genutzt und somit die Reihenschaltung für die Berechnung der Tragfähigkeit der gesamten Verbindung bei alleiniger Normalkraftbeanspruchung ebenfalls zugrunde gelegt. Die Tragfähigkeit der Verbindung bei Druck- oder Zugkraftbeanspruchung ist somit begrenzt durch die kleinste Tragfähigkeit eines Schnittes und nicht unbedingt durch die Tragfähigkeit einer einzelnen Komponente.

Das Kennzeichen der Reihenschaltung im Vergleich zur Parallelschaltung ist, dass hier die Kraft konstant ist und die Wege entsprechend der Steifigkeiten unterschiedlich groß sind. In Bild 6.6 bis Bild 6.8 sind die Federmodelle für unterschiedliche Verbindungskonfigurationen dargestellt.

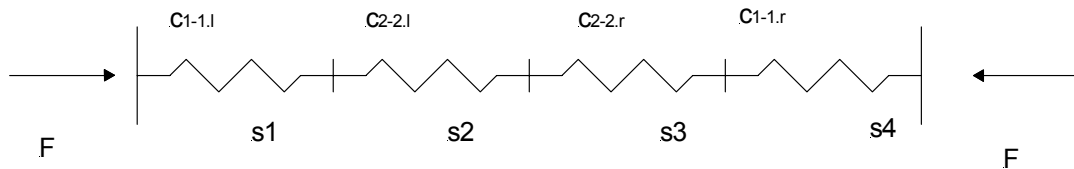


Bild 6.6: Reihenschaltung bei einer unsymmetrischen Träger-Träger-Verbindung

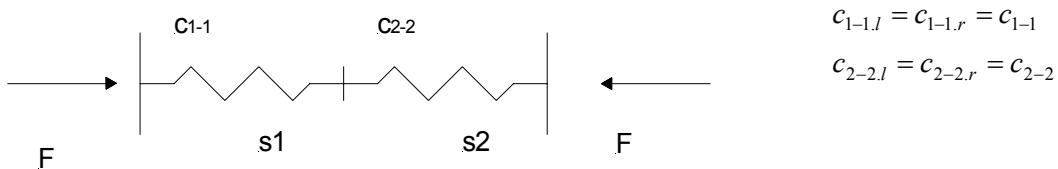


Bild 6.7: Reihenschaltung bei einer symmetrischen Träger-Träger-Verbindung

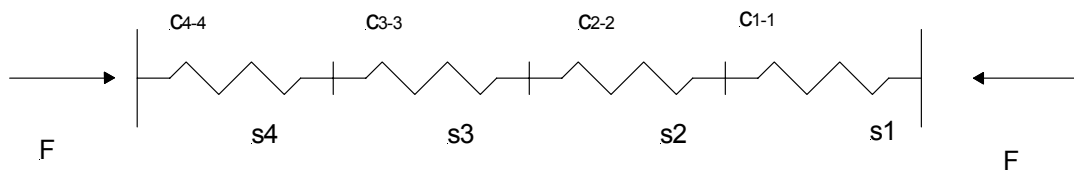


Bild 6.8: Reihenschaltung bei einer Träger-Stützen-Verbindung

Die Steifigkeit einer Verbindung bei Normkraftbeanspruchung nach Gleichung (6.4) ist somit eine Translationssteifigkeit und keine Rotationssteifigkeit.

$$S_{j,N} = \frac{F}{\Delta l} = \left[\frac{kN}{mm} \right] \quad (6.4)$$

$S_{j,N}$	...	Translationssteifigkeit
F	...	angreifende Kraft, z. B. Normkraft
Δl	...	Verformung infolge der angreifenden Kraft

Aus diesen unterschiedlichen Steifigkeiten – Translationssteifigkeit bei Normalkraftbeanspruchung und Rotationssteifigkeit bei Momentenbeanspruchung – resultieren unterschiedliche Ansätze für die Berechnung der Tragfähigkeiten der einzelnen Komponenten und der Tragfähigkeit der gesamten Verbindung.

Bei kombinierter Beanspruchung durch Normalkraft und Biegemoment treten Verschiebungen und Rotationen gleichzeitig auf. Daher ist bei einer kombinierten Beanspruchung auch eine kombinierte Steifigkeit aus Rotations- und Translationssteifigkeit entsprechend der Beanspruchung anzunehmen. Auf diese Kombination von Rotations- und Translationssteifigkeit sowie die Berechnung der Translationssteifigkeit wird innerhalb der Arbeit nicht eingegangen.

In den folgenden Abschnitten werden die definierten Komponenten bzw. Schnitte hinsichtlich Druck- und Zugbeanspruchung beschrieben.

6.2.2 Druckkraft

Bei Beanspruchung von Querschnitten oder Querschnittsteilen durch eine Druckkraft ist zu beachten, dass lokale Instabilitäten auftreten können. Bei schlanken Profilen (Querschnittsklasse 4) ist die Berechnung dann mit den wirksamen Querschnittswerten durchzuführen. Im Folgenden werden die Schnitte und die zu den jeweiligen Schnitten gehörenden Komponenten für die Beanspruchung durch eine Normaldruckkraft beschrieben.

(I) Schnitt durch den Träger

a) Flanschquerschnitte

Die Tragfähigkeit des Flansches wird über die Querschnittsfläche und die Streckgrenze nach Gleichung (6.5) berechnet. Die Querschnittsfläche nach Gleichung (6.6) richtet sich dabei nach der Querschnittsklasse, die abhängig ist von der Schlankheit des Querschnittsteiles sowie von der verwendeten Stahlsorte.

$$F_{C,flb,Rd} = A_{fl} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (6.5)$$

mit

$$A_{fl} = \frac{A_b - A_w}{2} \quad (6.6)$$

$F_{C,flb,Rd}$... Tragfähigkeit eines Trägerflansches unter
Druckbeanspruchung

A_{fl}	...	Querschnittsfläche eines Flansches je nach Querschnittsklasse
A_b	...	Querschnittsfläche des gesamten Trägers je nach Querschnittsklasse
A_w	...	Querschnittsfläche des Steges je nach Querschnittsklasse, siehe auch Gl. (6.8)
f_{yk} / γ_{M0}	...	Bemessungswert der Streckgrenze

b) Stegquerschnitt

Die Tragfähigkeit des Steges ergibt sich nach Gleichung (6.7) aus der Querschnittsfläche A_w sowie der Streckgrenze.

$$F_{C.wb.Rd} = A_w \cdot \rho_w \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (6.7)$$

Bei der Berechnung der Querschnittsfläche des Steges ist entsprechend EC 3-1-1, Abschnitt 5.4.6 bzw. Gleichung (6.8) in Walz- und Schweißprofile zu unterscheiden.

$$A_w = \begin{array}{l} A_b - 2 \cdot b_{flb} \cdot t_{flb} + (t_{wb} + 2 \cdot r_b) \cdot t_{flb} \\ t_{wb} \cdot h_{wb} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Walzprofil} \\ \text{Schweißprofil} \end{array} \quad (6.8)$$

$F_{C.wb.Rd}$	...	Tragfähigkeit des Trägersteges unter Druckbeanspruchung
ω_1	...	Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung von Schubeinflüssen
b_{flb}	...	Breite des Trägerflansches
t_{flb}	...	Dicke des Trägerflansches
t_{wb}	...	Dicke des Trägersteges
h_{wb}	...	Höhe des Trägersteges
r_b	...	Walzradius des Trägerprofils

Zur Berücksichtigung einer möglichen vorhandenen Querkraft, die den Trägerquerschnitt beansprucht, wird der Steg, der zur Aufnahme und Abtragung von Querkraften herangezogen wird, mit dem Faktor ρ_w reduziert. Zur Aufteilung der Schnittgrößen auf

die einzelnen Querschnittsteile wird auf EC 3-1.8, Abschnitt 2.5 verwiesen. Nach Gleichung (6.9) wird der Faktor ρ_w für $V_{Sd} > 0,5 \cdot V_{pl.Rd}$ berechnet. Bei kleineren Querkraften ergibt sich der Faktor ρ_w zu 1. Eine Reduktion der Stegfläche und damit der Tragfähigkeit des Steges unter Druckbeanspruchung ist nach Kapitel 5.2.2 dieser Arbeit notwendig. Es wird Bild 5.9 verwiesen.

$$\rho_w = \left(\frac{2 \cdot V_{z.Sd}}{V_{pl.z.Rd}} - 1 \right)^2 \quad (6.9)$$

Die Tragfähigkeit des Trägerquerschnittes bzw. des Schnittes I unter Druckbeanspruchung ergibt damit aus Gleichung (6.10).

$$F_{C.I} = F_{C.b.Rd} = F_{C.flb.Rd} \cdot 2 + F_{C.wb.Rd} \quad (6.10)$$

$F_{C.b.Rd}$... Tragfähigkeit des Trägerquerschnittes unter Druckbeanspruchung

(II) Schnitt durch die Kopfplatte

Bei der Berechnung der Tragfähigkeit der Kopfplatte unter Druckbeanspruchung wird nicht von der gesamten Querschnittsfläche der Kopfplatte ausgegangen. Es werden vielmehr Lastausbreitungsflächen berechnet und für die Tragfähigkeit angesetzt. Die effektiven Flächen ergeben sich über einen entsprechenden Lastausbreitungswinkel. Dieser kann zwischen 45° (elastisch) und 30° (plastisch) angenommen werden. Die nachfolgenden Gleichungen und Bilder sind für eine Lastausbreitung unter 45° ausgelegt. Eine Lastausbreitung über die Schweißnähte wird dabei auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt. Bei der Kraftübertragung durch Kontaktpressung werden die Schweißnähte wie die Schrauben auch somit nur als Elemente zur Lagesicherung und nicht zur Kraftübertragung angesehen.

Die gesamte Lastausbreitungsfläche ergibt sich nach Gleichung (6.11). Sie setzt sich zusammen aus der Lastausbreitung der Druckkraft über den oberen und unteren Flansch sowie über den Steg.

$$A_{ef.p} = A_{ef.1} + A_{ef.2} + A_{ef.3} \quad (6.11)$$

$A_{ef.p}$	...	gesamte Lastausbreitungsfläche in der Kopfplatte unter Druckbeanspruchung
$A_{ef.1}$	...	Lastausbreitungsfläche des oberen Flansches in der Kopfplatte unter Druckbeanspruchung
$A_{ef.2}$	...	Lastausbreitungsfläche des unteren Flansches in der Kopfplatte unter Druckbeanspruchung
$A_{ef.3}$	...	Lastausbreitungsfläche des Steges in der Kopfplatte unter Druckbeanspruchung

Bei der Berechnung der Lastausbreitungsflächen der Flansche mit den Gleichungen (6.12) und (6.13) ist darauf zu achten, ob eine vollständige Lastausbreitung geometrisch möglich ist. In den Gleichungen (6.14) und (6.15) wird durch die Fallunterscheidungen auf diese Problematik eingegangen.

$$A_{ef.1} = h_{ef.fl.o} \cdot b_{ef.fl.o} \quad (6.12)$$

$$A_{ef.2} = h_{ef.fl.u} \cdot b_{ef.fl.u} \quad (6.13)$$

mit

$$h_{ef.fl.o/u} = \min \begin{cases} t_{flb.o/u} + 2 \cdot t_p \\ t_{flb.o/u} + t_p + \ddot{u}_{o/u} \end{cases} \quad \text{falls } \ddot{u}_{o/u} < t_p \quad (6.14)$$

und

$$b_{ef.fl.o/u} = \min \begin{cases} b_p + 2 \cdot t_p \\ b_p \end{cases} \quad \text{falls seitliche Überstände} > t_p \quad (6.15)$$

$h_{ef.fl.o/u}$	...	Höhe der Lastausbreitung durch den oberen/unteren Flansch
$b_{ef.fl.o/u}$	...	Breite der Lastausbreitung durch den oberen/unteren Flansch
$t_{flb.o/u}$	...	Dicke des oberen/unteren Flansches
t_p	...	Dicke der Kopfplatte
$\ddot{u}_{o/u}$	...	oberer/unterer Überstand der Kopfplatte

b_p ... Breite der Kopfplatte

Die Lastausbreitungsfläche infolge der Druckkraft aus dem Steg des Trägers wird zur Wahrung der Kompatibilität zwischen den einzelnen Komponenten und Schnitten ebenfalls mit dem Faktor ρ_w abgemindert und nach Gleichung (6.16) berechnet.

$$A_{ef.3} = h_{steg} \cdot t_{ef.w} \cdot \rho_w \quad (6.16)$$

mit

$$t_{ef.w} = t_{wb} + 2 \cdot t_p \quad (6.17)$$

h_{steg} ... Breite (Höhe) des Trägersteges
 $= h_1$ für Walzprofile, nach den Profiltafeln
 $= h_w$ für Schweißprofile

$t_{ef.w}$... Breite der Lastausbreitung durch Steg

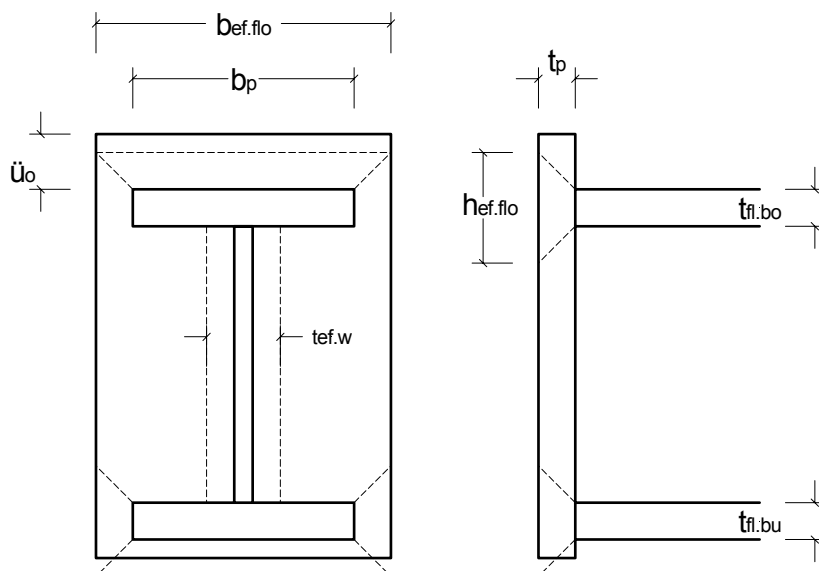


Bild 6.9: Lastausbreitungsflächen im Schnitt II

Die Tragfähigkeit der Kopfplatte bzw. die Tragfähigkeit des Schnittes II unter Druckbeanspruchung ergibt sich aus Gleichung (6.18).

$$F_{C.II} = F_{C.p.Rd} = A_{ef.p} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (6.18)$$

$F_{C.p.Rd}$... Tragfähigkeit der Kopfplatte unter
Druckbeanspruchung

(III) Schnitt durch den verbindungsseitigen Stützenflansch

Beim Schnitt durch den Stützenflansch ist die Ausbildung der Verbindung zu berücksichtigen. Das heißt, es ist zu beachten, ob das Stützenstegblech ausgesteift ist oder nicht. Sind Steifen angeordnet, so werden diese ebenfalls mit einem entsprechenden Lastausbreitungswinkel in die Berechnung einbezogen. Ist das Stützenstegblech jedoch unausgesteift, dann wird die Lastausbreitung vom Trägerquerschnitt über die Kopfplatte (bei geschraubten Verbindungen) in den Stützenquerschnitt nur über den Stützensteg angenommen. Die Tragfähigkeit dieses Schnittes III berechnet sich wie folgt.

Die Lastausbreitungsfläche setzt sich nach Gleichung (6.19) zusammen aus der Lastausbreitungsfläche des Stützensteges und der Lastausbreitungsflächen der Steifen, falls Steifen vorhanden sind.

$$A_{ef.c} = A_{ef.wc} + A_{ef.st} \quad (6.19)$$

$A_{ef.c}$... gesamte Lastausbreitungsfläche im Stützenflansch unter
Druckbeanspruchung

$A_{ef.wc}$... Lastausbreitungsfläche des Steges im Stützenflansch
unter Druckbeanspruchung

$A_{ef.st}$... Lastausbreitungsfläche der Steifen im Stützenflansch
unter Druckbeanspruchung

Die Lastausbreitungsfläche des Stützensteges setzt sich nach den Gleichungen (6.20) bis (6.22) zusammen aus den Flächen infolge eines gewählten Lastausbreitungswinkels von 45° sowie der Dicke des Stützensteges selbst. Bei geschweißten Verbindungen wird der Stützenflansch einerseits vom Stützenquerschnitt und andererseits vom Trägerquerschnitt, da keine Kopfplatte angeordnet wird, beeinflusst. Daher ist bei geschweißten Verbindungen die kleinste effektive Breite der Lastausbreitung unter Einbeziehung des Trägerquerschnittes, das heißt der Dicke des Trägersteges, zu bestimmen. Die effektive Höhe der Lastausbreitungsfläche des Stützensteges richtet sich ebenfalls nach der Verbindungskonfiguration – geschweißt oder geschraubt. Bei geschweißten Verbindungen ist aus eben genannten Gründen und zur Wahrung der Kompatibilität zwischen den einzelnen Schnitten die Höhe des Trägerstegbleches mit dem Reduktionsfaktor ρ_w abzumindern.

$$A_{ef.wc} = h_{ef.wc} \cdot b_{ef.wc} \quad (6.20)$$

mit

$$b_{ef.wc} = \min \begin{cases} t_{wc} + 2 \cdot t_{flc} \\ b_{flc} \\ t_{wb} + 2 \cdot t_{flc} \end{cases} \quad \text{nur bei Schweißverbindungen} \quad (6.21)$$

und

$$h_{ef.wc} = \begin{cases} h_p & \text{geschraubte Verbindungen} \\ b_{wb} \cdot \omega_1 & \text{geschweißte Verbindungen} \end{cases} \quad (6.22)$$

$h_{ef.wc}$	...	Höhe der Lastausbreitung durch den Steg
$b_{ef.wc}$	...	Breite der Lastausbreitung durch den Steg
t_{wc}	...	Dicke des Stützensteges
t_{flc}	...	Dicke des verbindungsseitigen Stützenflansches
h_p	...	Höhe der Kopfplatte
b_{wb}	...	Höhe des Trägersteges

Die Lastausbreitungsfläche von angeordneten Steifen wird wie nachfolgend mit den Gleichungen (6.23) bis (6.25) berechnet. Bei der Berechnung der effektiven Breite der Lastausbreitungsfläche wird bereits berücksichtigt, dass Steifen auf beiden Seiten des Steges angeordnet werden.

$$A_{ef.st} = h_{ef.st} \cdot b_{ef.st} \quad (6.23)$$

mit

$$h_{ef.st} = \min \begin{cases} t_{st} + 2 \cdot t_{flc} \\ t_{st} + t_{flc} + \ddot{u} \end{cases} \quad \text{je nach Anordnung der Steife} \quad (6.24)$$

und

$$b_{ef.st} = \min \begin{cases} 2 \cdot b_{st} + 2 \cdot t_{flc} \\ b_c \end{cases} \quad (6.25)$$

$h_{ef.st}$...	Höhe der Lastausbreitung durch die Steifen
-------------	-----	--

$b_{ef.st}$	...	Breite der Lastausbreitung durch die Steifen
t_{st}	...	Dicke der Steifen
b_{st}	...	Breite der Steifen
b_c	...	Breite des Stützenprofils (Stützenflansch)

Die Tragfähigkeit des Stützenflansches bzw. die Tragfähigkeit des Schnittes III unter Druckbeanspruchung ergibt sich aus Gleichung (6.26).

$$F_{C.III} = F_{C.fl.c.Rd} = A_{ef.c} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (6.26)$$

$F_{C.fl.c.Rd}$... Tragfähigkeit des Stützenflansches unter Druckbeanspruchung

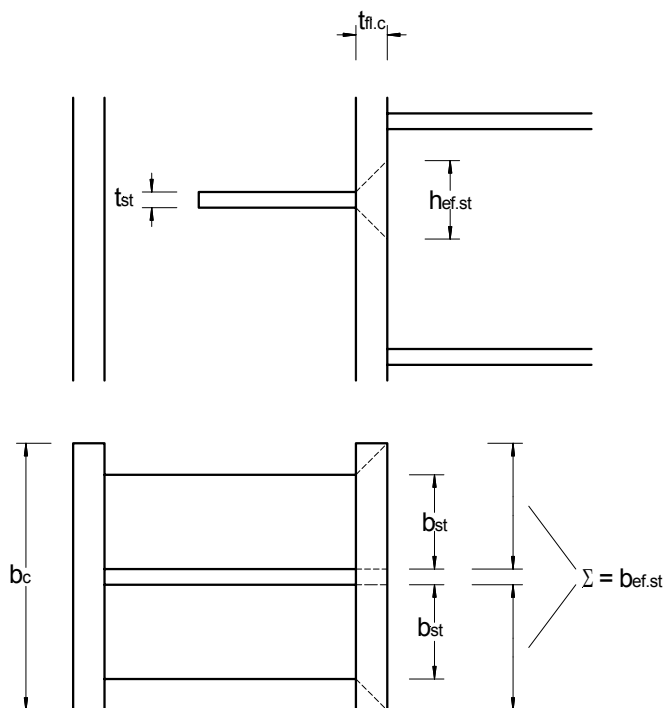


Bild 6.10: Lastausbreitungsflächen bei Steifen

(IV) Schnitt durch das Stützenstegblech

Beim Schnitt durch das Stützenstegblech ist einerseits die Verbindungsanordnung und andererseits die Lage der zu untersuchenden Verbindung im Rahmensystem zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Lage der Verbindung kann unterschieden werden in einen Rahmenknoten (durchgehende Stütze), dargestellt in Bild 6.11 und eine Rahmenecke, zu sehen in Bild 6.12. Dies ist bedeutend für die Ermittlung der effektiven Lasteintragungsbreite b_{eff} , die für Rahmenknoten nach Gleichung (6.27) bzw. für Rahmenecken nach Gleichung (6.28) berechnet werden kann.

- für Rahmenknoten

$$b_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} b_{eff.c.wc} \cdot 2 \\ h_b - t_{fl.b} + b_{eff.c.wc} \end{array} \right. \quad (6.27)$$

- für Rahmenecken

$$b_{eff} = b_{ef.o} + b_{eff.c.wc} \quad (6.28)$$

mit

$$b_{ef.o} = h_p - \ddot{u} - \frac{t_{fl.b}}{2} - \frac{b_{eff.c.wc}}{2} \quad (6.29)$$

und

$b_{eff.c.wc}$ Lastausbreitung nach EC 3-1.8, Gleichung 6.10 (geschweißte Verbindungen) bzw. Gleichung 6.11 (geschraubte Verbindungen)

b_{eff}	...	effektiven Lasteintragungsbreite
$b_{eff.c.wc}$	...	effektiven Lasteintragungsbreite des Stützensteges unter Druckbeanspruchung durch den druckbeanspruchten Trägerflansch bei Momentenbeanspruchung
$b_{ef.o}$	...	effektive Lasteintragungsbreite durch den Trägerquerschnitt ohne den druckbeanspruchten Trägerflansch bei Trägerbeanspruchung
h_b	...	Höhe des Trägerprofils

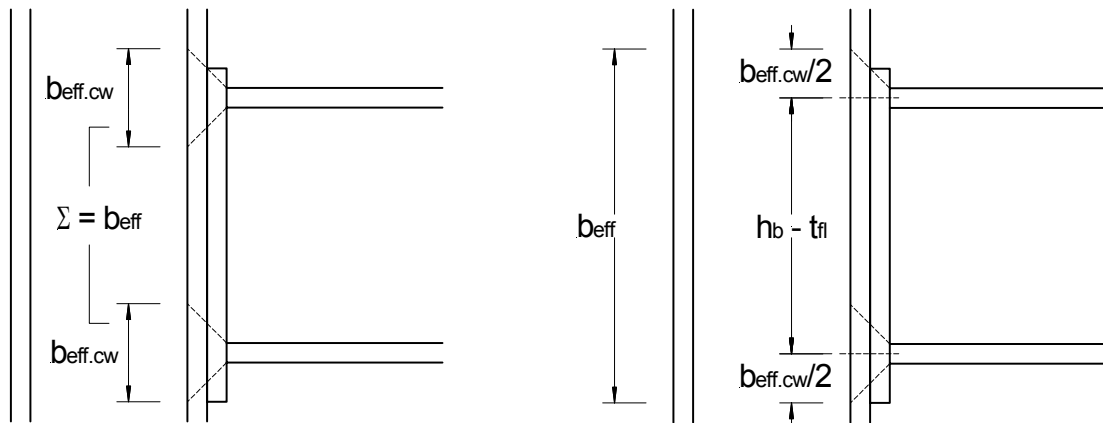


Bild 6.11: Effektive Lasteintragungsbreite bei Rahmenknoten (durchgehende Stütze)

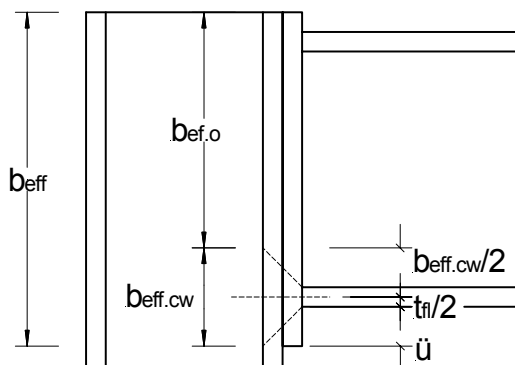


Bild 6.12: Effektive Lasteintragungsbreite bei Rahmenecken

Die weitere Berechnung des Stützenstegbleches wird unter Verwendung der entsprechenden effektiven Breite analog zum EC 3-1.8 durchgeführt. Dazu gehören die beiden Reduktionsfaktoren ρ und ω . Der Reduktionsfaktor ρ nach Gleichung (6.30) berücksichtigt die Schlankheit des Stützenstegbleches und damit die Möglichkeit des Versagens infolge Beulen unter Druckbeanspruchung. Bei einer Schlankheit $\bar{\lambda}_p > 0,72$ ist die Beanspruchbarkeit entsprechend abzumindern.

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,2}{\bar{\lambda}_p^2} \quad (6.30)$$

- | | | |
|-------------------|-----|--|
| ρ | ... | Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung lokaler Instabilitäten (Druckbeulen) |
| $\bar{\lambda}_p$ | ... | bezogener Schlankheitsgrad, nach EC 3-1.8, Gleichung 6.13c |

Der Reduktionsfaktor ω_1 nach Tabelle 6.3 des EC 3-1.8 mit der entsprechenden effektiven Breite berücksichtigt die Schubeinflüsse im Stützenstegblech. Die alleinige Tragfähigkeit des Stützenstegbleches berechnet sich somit nach Gleichung (6.31).

$$F_{C.wc.Rd} = \omega_1 \cdot k_{wc} \cdot b_{eff} \cdot \rho \cdot t_{wc} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (6.31)$$

$F_{C.wc.Rd}$... Tragfähigkeit des Stützenstegbleches unter Druckbeanspruchung

k_{wc} ... Faktor zur Berücksichtigung der Stützenlängskraft

Der Faktor k_{wc} ist entsprechend EC 3-1.8, Abschnitt 6.2.4.2 (2) anzunehmen.

Im Hinblick auf die Verbindungskonfiguration ist die Aussteifung angesprochen. Sind Steifen angeordnet, dann nehmen die Steifen einen Teil der Druckbeanspruchung auf und werden daher bei der Berechnung der Tragfähigkeit im Schnitt IV mit berücksichtigt, sofern diese Steifen über die gesamte Stützenstegblechbreite vorgesehen sind. Sind Steifen, wie in Bild 6.13b prinzipiell zu sehen, nur über eine bestimmte Breite vorhanden (Rippen), dann dienen diese Steifen hauptsächlich zur Reduzierung der Flanschbiegung bei Zugbeanspruchung, damit wiederum können Abstützkräfte verhindert und die Belastung der Schrauben verringert werden. Für eine wirksame Ableitung bzw. Weiterleitung der Druckkräfte ist die Anordnung von eingepassten Steifen nach Bild 6.13a notwendig.

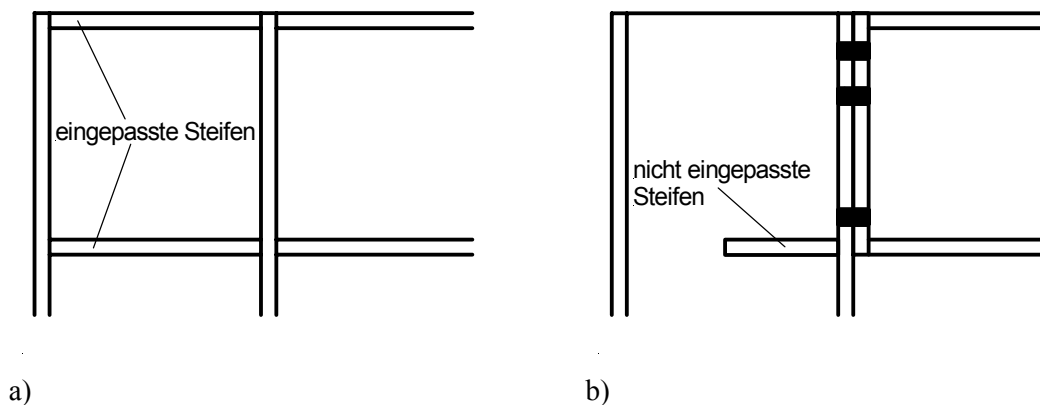


Bild 6.13: Eingepasste und nicht eingepasste Steifen

Bei der Berechnung der Tragfähigkeit der Steifen wird davon ausgegangen, dass die geometrischen Abmessungen so gewählt werden, dass ein Stabilitätsversagen jeglicher Art für die Steifen ausgeschlossen werden kann. Die alleinige Tragfähigkeit der Steifen berechnet sich wie folgt nach den Gleichungen (6.32) und (6.33).

$$F_{C.st.Rd} = A_{st} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (6.32)$$

mit

$$A_{st} = t_{st} \cdot b_{st} \cdot n_{st} \quad (6.33)$$

$F_{C.st.Rd}$	...	Tragfähigkeiten der Steifen unter Druckbeanspruchung
A_{st}	...	Querschnittsfläche aller Steifen
n_{st}	...	Anzahl der Steifen

Die Beanspruchbarkeit des Schnittes IV ergibt sich aus der Gleichung (6.34).

$$F_{C.IV} = F_{C.wc.Rd} + F_{C.st.Rd} \quad (6.34)$$

Bei der Aufstellung der Gleichungen wurde stets allgemein f_{yk} angegeben. Es wird darauf hingewiesen, dass bei der Verwendung verschiedener Stahlsorten innerhalb der Verbindung und bei geschweißten Profilen innerhalb eines Querschnittes für den entsprechenden Querschnittsteil die entsprechende Streckgrenze einzusetzen ist.

Werden schlanke Profile verwendet, also Profile, die der Querschnittsklasse 4 zuzuordnen sind, müssen die Querschnittswerte unter Druckbeanspruchung bestimmt werden. Es müssen die effektiven Querschnittswerte unter Berücksichtigung von lokalen Instabilitäten berechnet werden. Die dabei ermittelten Abminderungsfaktoren ρ für die einzelnen Querschnittsteile sind in der Berechnung der Normalkraftbeanspruchung der Verbindung zum Beispiel bei den Querschnittsflächen mit einzubeziehen. Diese effektiven Querschnittswerte sind bei allen Werten, zum Beispiel bei A_{vc} , weiter zu berücksichtigen.

Die berechnete Normalkrafttragfähigkeit der Verbindung aus dem kleinsten Wert der Tragfähigkeiten der einzelnen Schnitte wird nach Gleichung (6.35) begrenzt durch die Normalkrafttragfähigkeit der angeschlossenen Bauteile.

$$F_{C.Rd} = \min(F_I \dots F_{IV}) \leq \begin{matrix} N_{C.b.Rd} \\ N_{C.c.Rd} \end{matrix} \quad (6.35)$$

$N_{C.b.Rd}$...	Tragfähigkeit des Stützenprofils unter Druckbeanspruchung
--------------	-----	---

$N_{C.c.Rd}$... Tragfähigkeit des Trägerprofils unter
Druckbeanspruchung

Die Begrenzung der Tragfähigkeit nach Gleichung (6.35) ist vor allem bei ausgesteiften Verbindungen zu prüfen, da durch die Aussteifung des Stützenstegbleches die Normalkrafttragfähigkeit bei Druckbeanspruchung erheblich vergrößert wird. Durch die Begrenzung wird eine Überbeanspruchung der Verbindung vermieden.

6.2.3 Zugkraft

Bei Beanspruchung von Querschnitten oder Querschnittsteilen durch eine Zugkraft ist eine Einordnung in Querschnittsklassen nicht notwendig, da keine lokalen Instabilitäten auftreten. Es kann somit für alle Profile, auch sehr schlanke, mit den vorhandenen (nicht abgeminderten) Querschnittswerten gerechnet werden. Im Folgenden werden die Schnitte und die zu den jeweiligen Schnitten gehörenden Komponenten für die Beanspruchung durch eine Zugnormalkraft beschrieben.

- (I) Schnitt durch den Träger
 - a) Flanschquerschnitte

Die Grenzzugkraft des Flanschquerschnittes ergibt sich nach Gleichung (6.38) aus dem Minimum der plastischen Grenzzugkraft des Bruttoquerschnitts durch Anwendung der Gleichung (6.6) des EC 3-1-1 bzw. Gleichung (6.36) und der plastischen Grenzzugkraft des Nettoquerschnitts durch Anwendung der Gleichung (6.7) des EC 3-1-1 bzw. Gleichung (6.37). Zwischen Netto- und Bruttoquerschnitt wird unterschieden, wenn im kritischen Schnitt Löcher (für Verbindungsmittel) oder Ausschnitte vorliegen. Sind in den Flanschquerschnitten keine Löcher oder Ausschnitte enthalten, muss nur die Gleichung (6.6) des EC 3-1-1 für die Berechnung der Grenzzugkraft des Flanschquerschnittes herangezogen werden, da sich für die Stahlsorten S235 und S355 der kleinere Wert stets nach dieser Gleichung ergibt.

Gleichung (6.6) des EC 3-1-1

$$N_{pl.Rd} = \frac{A \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (6.36)$$

Gleichung (6.7) des EC 3-1-1

$$N_{u.Rd} = \frac{A_{net} \cdot f_{uk}}{\gamma_{M2}} \quad (6.37)$$

$$F_{T.flb.Rd} = \min \begin{cases} N_{pl.Rd} = \frac{A_{fl} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} \\ N_{u.Rd} = \frac{A_{net.fl} \cdot f_{uk}}{\gamma_{M2}} \end{cases} \quad (6.38)$$

$F_{T.flb.Rd}$	...	Tragfähigkeit eines Flansches unter Zugbeanspruchung
$A_{net.fl}$	...	Nettoquerschnittsfläche eines Flansches (Abzug von Löchern oder Ausschnitten)
γ_{M2}	...	Teilsicherheitsfaktor für das Versagen auf Zug von Nettoquerschnitten
		= 1,25

b) Stegquerschnitt

Die Tragfähigkeit des Steges ergibt sich nach Gleichung (6.39) aus der Querschnittsfläche A_w und der Streckgrenze.

$$F_{T.wb.Rd} = A_w \cdot \rho_w \cdot \frac{f_{yk}}{\lambda_{M0}} \quad (6.39)$$

$F_{T.wb.Rd}$...	Tragfähigkeit des Trägersteges unter Zugbeanspruchung
---------------	-----	---

Bei der Berechnung der Querschnittsfläche des Steges ist entsprechend EC 3-1-1, Abschnitt 5.4.6 wieder in Schweiß- und Walzprofile zu unterscheiden, siehe auch Gleichung (6.8). Die Berücksichtigung der Beeinflussung der Tragfähigkeit durch eine Querkraft wird über die Gleichung (6.9) vorgenommen.

Die Tragfähigkeit des Trägerquerschnittes bzw. des Schnittes I unter Zugbeanspruchung kann damit nach Gleichung (6.40) berechnet werden.

$$F_{T.I} = F_{T.b.Rd} = F_{T.wb.Rd} + F_{T.flb.Rd} \quad (6.40)$$

$F_{T,I}$	...	Tragfähigkeit des Schnittes I unter Zugbeanspruchung
$F_{T,b,Rd}$	...	Tragfähigkeit des Trägerquerschnittes unter Zugbeanspruchung

(II) Schnitt durch die Kopfplatte

Bei der Berechnung der Tragfähigkeit der Kopfplatte unter Zugbeanspruchung sind die Verbindungsmittel Schrauben als Zugkraftübertragungselemente mit einzubeziehen. Es wird das T-Stoß-Modell nach EC 3-1.8 übernommen und angewendet.

Zunächst sind die effektiven Längen für die zu betrachtenden T-Stöße unter Anwendung der Tabelle 6.6 des EC 3-1.8 zu berechnen. Dabei sind alle Schraubenreihen einzubeziehen, da alle Schraubenreihen bei einer zentrischen Zugkraftbeanspruchung gleichzeitig beansprucht werden. Es ist zu differenzieren zwischen individuellem Versagen und Gruppenversagen (Versagen mehrerer Schraubenreihen gemeinsam). Die T-Stoß-Untersuchung wird mit den Gleichungen (2.1) bis (2.4) durchgeführt. Die Tragfähigkeit des gesamten Schnittes ergibt sich dann aus dem Minimum von individuellem Versagen und Gruppenversagen. Dabei werden die Tragfähigkeiten der Schraubenreihen aus individuellem Versagen summiert. Zusätzlich werden die Tragfähigkeiten der Schraubenreihen aus individuellem Versagen und Gruppenversagen miteinander kombiniert, sofern dies möglich ist. Zur Erläuterung von Gleichung (6.41) sollen hierbei Bild 6.14 und Bild 6.15 sowie Tabelle 6.2 dienen.

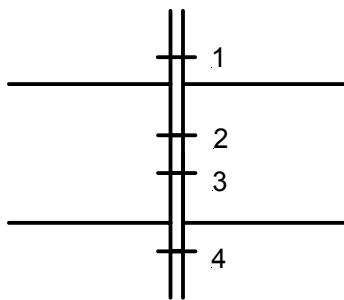


Bild 6.14: Verbindung mit überstehender Kopfplatte und 4 Schraubenreihen

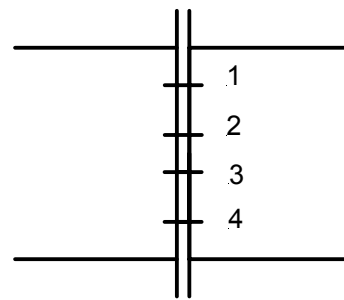


Bild 6.15: Verbindung mit bündiger Kopfplatte und 4 Schraubenreihen

Tabelle 6.2: Zu untersuchende T-Stöße

	Verbindung nach Bild 6.14 - kopfplattenseitig	Verbindung nach Bild 6.15 – kopfplattenseitig
T-Stöße individuell	Reihe 1 Reihe 2 Reihe 3 Reihe 4	Reihe 1 Reihe 2 Reihe 3 Reihe 4
T-Stöße Gruppen	Reihe 2 und 3	Reihe 1 und 2 Reihe 2 und 3 Reihe 1, 2 und 3 Reihe 1, 2, 3 und 4 Reihe 2, 3 und 4 Reihe 3 und 4
T-Stöße kombiniert	Summe aus Reihe 1 und 4 individuell und Gruppe aus Reihe 2 und 3	Summe aus Gruppe aus Reihe 1 und 2 sowie Reihe 3 und 4 individuell Summe aus Gruppe aus Reihe 2 und 3 sowie Reihe 1 und 4 individuell Summe aus Gruppe aus Reihe 1, 2 und 3 sowie Reihe 4 individuell Summe aus Gruppe aus Reihe 2, 3 und 4 sowie Reihe 1 individuell Summe aus Gruppe aus Reihe 3 und 4 sowie Reihe 1 und 2 individuell

$$F_{T.II} = F_{T.ep.Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \sum F_{TS.ind} \\ F_{TS.komb} = \sum F_{TS.gr} + \sum F_{TS.ind} \end{array} \right. \quad (6.41)$$

$F_{T.II}$... Tragfähigkeit des Schnittes II unter Zugbeanspruchung

$F_{T.ep.Rd}$... Tragfähigkeit der Kopfplatte unter Zugbeanspruchung

$F_{TS.gr}$... Tragfähigkeit der T-Stöße – Gruppenversagen (Summe)

$F_{TS.ind}$... Tragfähigkeit der T-Stöße – individuelles Versagen
(Summe)

$F_{TS.komb}$... Tragfähigkeit der T-Stöße – kombiniert aus
Gruppenversagen und individuellem Versagen

(III) Schnitt durch den verbindungsseitigen Stützenflansch

Bei der Betrachtung des Schnittes durch den Stützenflansch ist zu unterscheiden in geschraubte und geschweißte Verbindungen. Für die geschraubten Verbindungen wird die Tragfähigkeit im Schnitt III nach Gleichung (6.45) analog zum Schnitt II durchgeführt. Bei der Berechnung der effektiven Länge ist darauf zu achten, ob der Stützenflansch unausgesteift (Anwendung von Tabelle 6.4 des EC 3-1.8) oder ausgesteift (Anwendung von Tabelle 6.5 des EC 3-1.8) ist. Hinsichtlich der Aussteifung durch hinterlegte Bleche (backing plates) zur Erhöhung der Tragfähigkeit wird darauf hingewiesen, dass das plastische Moment für Versagensmodus 1 entsprechend zu berechnen ist (siehe EC 3-1.8, Tabelle 6.2). Auf die Berechnung der Versagensmodi 2 und 3 hat die Aussteifung durch hinterlegte Bleche keinen Einfluss.

Bei geschweißten Verbindungen wird die Berechnung des Schnittes III gemäß EC 3-1.8 nach den folgenden Gleichungen (6.42) bis (6.44) durchgeführt.

$$F_{T.fc.Rd} = b_{eff.b.fc} \cdot t_{flc} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (6.42)$$

mit

$$b_{eff.b.fc} = t_{wc} + 2 \cdot s + 7 \cdot k \cdot t_{flc} \geq \frac{f_{y.wb}}{f_{u.wb}} \cdot b_{wb} \quad (6.43)$$

und

$$k = \frac{t_{flc}}{t_{wb}} \cdot \frac{f_{y.wb}}{f_{u.wb}} \leq 1 \quad (6.44)$$

$F_{T.fc.Rd}$	...	Tragfähigkeit Stützenflansches unter Zugbeanspruchung bei geschweißten Verbindungen
$b_{eff.b.fc}$	...	effektive Lasteintragungsbreite (Bezeichnung nach EC 3-1.8, Gleichung 6.20)
s	$= r$	gewalzte Profile
	$= \sqrt{2} \cdot a$	geschweißte Profile
$f_{y.wb}$	...	Streckgrenze des Trägersteges
$f_{u.wb}$	...	Zugfestigkeit des Trägersteges

- für geschraubte Verbindungen

$$F_{T.III} = F_{T.flc.Rd} = \min \begin{cases} F_{TS.gr} \\ F_{TS.ind} \\ F_{TS.komb} \end{cases} \quad (6.45)$$

- für geschweißte Verbindungen

$$F_{T.III} = F_{T.fc.Rd} \quad (6.46)$$

(IV) Schnitt durch das Stützenstegblech

Die Berechnung des Stützensteges unter Zugbeanspruchung wird unter Anpassung der effektiven Lasteinleitungsbreite b_{eff} nach EC 3-1.8 durchgeführt. Da eine zentrische Zugkraft über den gesamten Querschnitt gleichmäßig angreift, wird die effektive Breite auf die maximale Verbindungshöhe nach Gleichung (6.47) festgelegt.

$$b_{eff.t.wc} = \begin{cases} h_p & \text{geschraubte Verbindungen} \\ h_b & \text{geschweißte Verbindungen} \end{cases} \quad (6.47)$$

Schubeinflüsse im Stützenstegblech werden durch den Reduktionsfaktor ω_1 nach Gleichung (6.9) berücksichtigt. Die alleinige Tragfähigkeit des Stützenstegbleches unter Zugbeanspruchung ergibt sich nach Gleichung (6.48).

$$F_{T.IV} = F_{T.wc.Rd} = \omega_1 \cdot b_{eff.t.wc} \cdot t_{wc} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (6.48)$$

Hinsichtlich der Verwendung der Streckgrenze f_{yk} wird auf den Abschnitt 6.2.2 verwiesen.

Die berechnete Normalkrafttragfähigkeit der Verbindung bei alleiniger Zugbeanspruchung ergibt sich nach Gleichung (6.49) aus dem kleinsten Wert der Tragfähigkeiten der einzelnen Schnitte und wird begrenzt durch die Normalkrafttragfähigkeit der angeschlossenen Bauteile bei Zugbeanspruchung.

$$F_{T.Rd} = \min(F_{T.I} \dots F_{T.IV}) \leq \begin{matrix} N_{T.b.Rd} \\ N_{T.c.Rd} \end{matrix} \quad (6.49)$$

6.3 Beanspruchung durch Biegemoment und Normalkraft

Wird eine Verbindung durch eine Normalkraft – Druck- oder Zugkraft – und ein Biegemoment beansprucht, dann ist für den Nachweis der Verbindung eine Interaktionskurve bzw. eine Interaktionsbeziehung notwendig. Für die Berechnung der Interaktionskurve werden bestimmte Regeln, das heißt Interaktionsbeziehungen zwischen den beiden Schnittgrößen nötig.

In Abschnitt 3 wurden die bisher aufgestellten bzw. anzuwendenden Interaktionsbeziehungen beschrieben und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile beleuchtet. Die Interaktionsbeziehung nach [Pas-02] kann dabei ohne Unsicherheiten, aber mit eventueller Unwirtschaftlichkeit angewendet werden. Die Anwendung der Interaktionsbeziehung nach EC 3-1.8 hingegen beinhaltet nach Auffassung der Verfasserin Unsicherheiten und teilweise Überschätzung der Tragfähigkeit. Da jedoch diese Interaktionsbeziehung in einer Norm bzw. in einem Entwurf zur Norm enthalten ist, im Gegensatz zum Vorschlag [Pas-02], wird im nachfolgenden Bezug auf die bisher festgeschriebenen Regeln des EC 3-1.8 genommen.

Ein Problem bei der Berechnung der Interaktionskurve ist das Festlegen ausgewählter Punkte zur Aufstellung der Interaktionsbeziehung. Für jedes Moment kleiner als das plastische Grenzmoment der Verbindung ist die Verteilung der inneren Kräfte praktisch unbekannt. Bei der Aufstellung der Momenten-Rotations-Charakteristik wird ein elastisches Grenzmoment der Verbindung in Abhängigkeit vom plastischen Grenzmoment festgelegt (Bild 6.16).

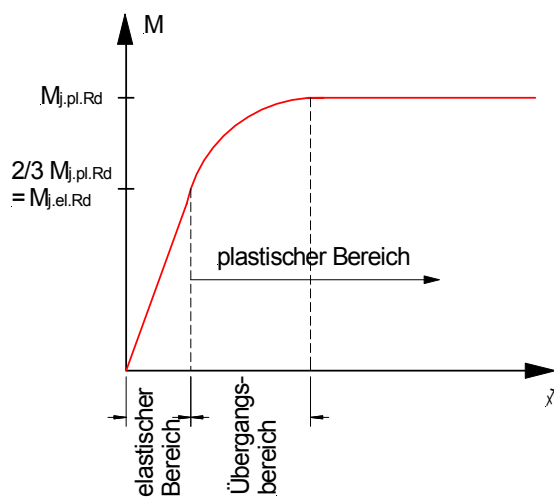


Bild 6.16: Momenten-Rotations-Charakteristik

Das elastische Grenzmoment ist dabei durch Gleichung (6.50) definiert bei

$$M_{j,el.Rd} = \frac{2}{3} \cdot M_{j,pl.Rd} \quad (6.50)$$

Im elastischen Bereich zwischen 0 und $2/3 M_{j,pl,Rd}$ sind die inneren Kräfte abhängig von der Dehnung. Die Berechnung ist aber aufgrund unterschiedlicher Materialien (Grundwerkstoffe von Träger und Stütze sowie Verbindungsmittel Schrauben oder Schweißnähte) schwierig. Im plastischen Bereich zwischen $2/3$ und $1,0 M_{j,pl,Rd}$ ist die Verteilung der inneren Kräfte unbekannt, da keine Randbedingungen vorhanden sind. Die Berechnung der Interaktionskurve ist daher nur an bestimmten – definierten – Punkten möglich. Ein definierter Punkt (definiert hinsichtlich der Ordinate) liegt bei $2/3 M_{j,pl,Rd}$. Bei $M_{j,el,Rd}$ muss eine elastische Verteilung der inneren Kräfte gemäß den Verformungen der Verbindung vorliegen und gleichzeitig ist die Definition des Fließkriteriums gegeben. Für folgende Punkte nach Bild 6.17 und Tabelle 6.3 sind demnach die inneren Kräfte bekannt und können für die Berechnung der Interaktionskurve genutzt werden.

Tabelle 6.3: Diskrete Punkte zur Aufstellung der Interaktionskurve

	Moment	Normalkraft
Punkt 1	$M_{j,pl,Rd}$	0
Punkt 2	0	$F_{T,Rd}$
Punkt 3	0	$F_{C,Rd}$
Punkt 4	$M_{j,pl,Rd}$	$F(M_{j,pl,Rd})_{T,Rd}$
Punkt 5	$M_{j,pl,Rd}$	$F(M_{j,pl,Rd})_{C,Rd}$
Punkt 6	$M_{j,el,Rd}$	$F(M_{j,el,Rd})_{T,Rd}$
Punkt 7	$M_{j,el,Rd}$	$F(M_{j,el,Rd})_{C,Rd}$

Im Folgenden wird die Berechnung der einzelnen Punkte vorgestellt und erläutert. Voraussetzungen für die Berechnung von Interaktionspunkten ist nach Steenhuis [Ste-94] zum einen das Gleichgewicht zwischen den inneren und äußeren Kräften und zum anderen, dass die Einzeltragfähigkeiten der Komponenten nicht überschritten werden. Bei der Beschreibung der Berechnung der Interaktionspunkte 4 bis 7 werden diese Voraussetzungen stets überprüft.

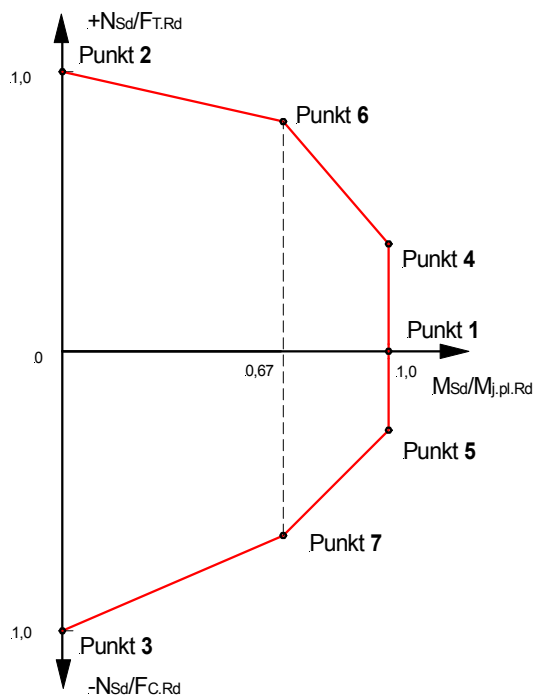


Bild 6.17: Interaktionskurve mit ausgewählten Punkten

· Punkt 1

In Punkt 1 ist das Grenzmoment der Verbindung $M_{j,pl,Rd}$ zu berechnen. Dies geschieht mit den Regeln des EC 3-1.8. Die Normalkrafttragfähigkeit ist Null.

· Punkte 2 und 3

In Punkt 2 ist die Grenzzugnormalkraft der Verbindung $F_{j,T,Rd}$ zu berechnen. In Abschnitt 6.2.3 ist ein Berechnungsvorschlag enthalten. In Punkt 3 ist die Grenzdrucknormalkrafttragfähigkeit der Verbindung $F_{j,C,Rd}$ zu berechnen. In Abschnitt 6.2.2 werden dazu Berechnungsvorschriften gegeben. An beiden Punkten 2 und 3 ist die Momententragfähigkeit der Verbindung gleich Null.

· Punkte 4 und 5

Allgemein ist zu diesen beiden Punkten zu sagen, dass eine Koordinate schon bekannt ist. Die Koordinate ist durch die Berechnung des Punktes 1 und somit durch die Berechnung des Grenzmomentes der Verbindung gegeben. Die zweite Koordinate wird im Folgenden beschrieben. Punkt 4 und 5 sind durch die Verbindungskonfiguration miteinander verknüpft. Bei der Berechnung des Grenzmomentes gibt es eine Komponente, welche für das Versagen der Verbindung maßgebend ist. Diese Komponente kann entweder dem Schub- (nur bei Träger-Stützen-Verbindungen), Zug- oder Druckbereich zugeordnet werden.

Nach Auffassung der Verfasserin kann bei einer für das Grenzmoment maßgebenden Zugkomponente keine weitere zusätzliche Zugnormalkraft von der Verbindung aufgenommen werden. Das heißt, ist eine Zugkomponente maßgebend für das Grenzmoment, dann muss zur Aufnahme einer Zugkraft und eines Momentes, das aufzunehmende Moment kleiner sein als das Grenzmoment. Das heißt aber auch, dass zusätzlich zum Grenzmoment keine Zugnormalkraft aufgenommen werden kann, ohne dass die Einzeltragfähigkeit dieser maßgebenden Komponente überschritten wird. In diesem Fall wäre der Punkt 4 beschreibbar durch die beiden Koordinaten $M = M_{j,pl,Rd}$ und $N = 0$. Im Umkehrschluss gilt das gleiche bei einer maßgebenden Druckkomponente für den Punkt 5. Man kann also feststellen, dass die Interaktionskurve für eine Verbindung in den meisten Fällen unsymmetrisch im Druck- und Zugbereich verlaufen wird.

Für den Fall, dass die maßgebende Komponente bei der Berechnung des Grenzmomentes dem Schubbereich zuzuordnen ist, konkret Stützenstegblech unter Schubbeanspruchung, wird auf die Ausführungen zur Berechnung der Punkte 4 und 5 bei Träger-Stützen-Verbindungen verwiesen. Bild 6.18 stellt einen Flussplan zur Beschreibung der Berechnung der Punkte 4 und 5 dar.

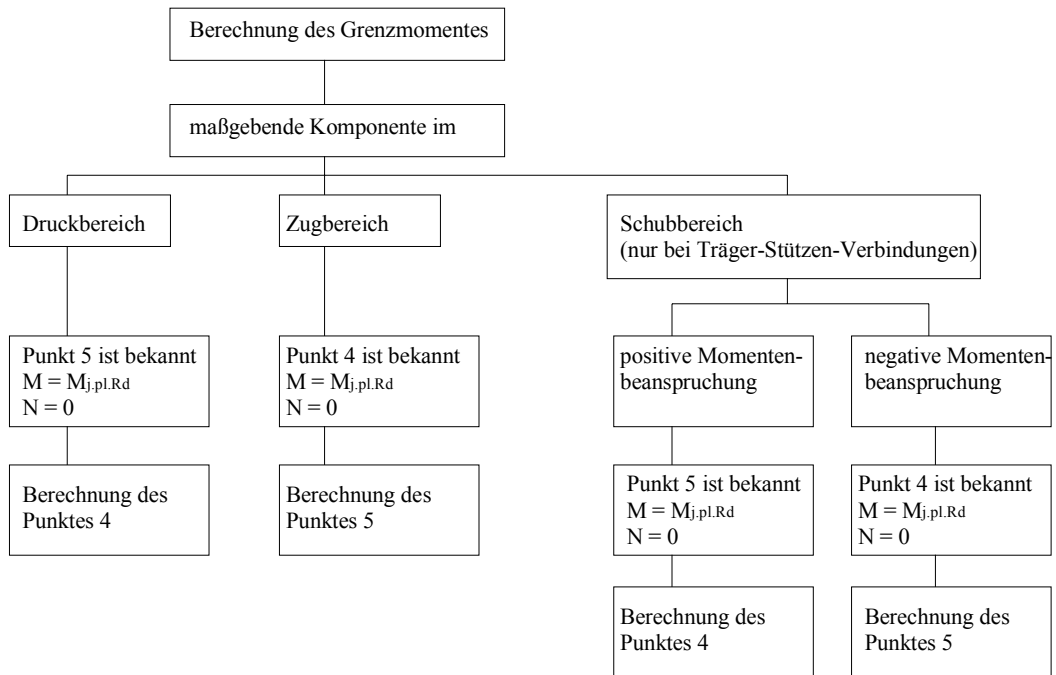


Bild 6.18: Zur Berechnung von Punkt 4 und 5 der Interaktionskurve

Bei der Beschreibung der Berechnung der zweiten Koordinate der Punkte 4 und 5 wird mit den Träger-Träger-Verbindungen begonnen. Zum einen weil die Träger-Träger-Verbindungen die wenigsten, aber grundlegende Komponenten enthalten, zum anderen weil die Berechnung gleichzeitig auch ein Teil der Berechnung von Träger-Stützen-Verbindungen darstellt.

Begonnen wird mit den Ausführungen zur Berechnung des Punktes 5 (Druckbereich). Diese Wahl wurde getroffen, da bei den untersuchten Verbindungen stets eine Zugkomponente bei der Berechnung des Grenzmomentes maßgebend und somit der Punkt 4 mit $N = 0$ kN gekennzeichnet war. Bei der Berechnung des Grenzmomentes war eine Zugkomponente maßgebend. Daraus ergibt sich, dass der Punkt 5 berechnet werden muss. Bei Träger-Träger-Verbindungen gibt es nach Gleichung (6.51) nur eine Druckkomponente – Trägerflansch und zugehöriger Trägersteganteil auf Druck – und steht daher für die Berechnung zur Verfügung.

für Träger-Träger-Verbindungen

$$F_{C.ma\beta} = F_{c.fb.Rd} \quad (6.51)$$

Bei Träger-Stützen-Verbindungen können nach Gleichung (6.52) zwei Komponenten dem Druckbereich zugeordnet werden. Neben dem schon bei den Träger-Träger-Verbindungen erwähnten Trägerflansch mit zugehörigem Trägersteganteil ist es die Komponente Stützenstegblech.

für Träger – Stützen-Verbindungen

$$F_{C.ma\beta} = \min \begin{cases} F_{c.fb.Rd} \\ F_{c.wc.Rd} \end{cases} \quad (6.52)$$

$F_{C.ma\beta}$... maßgebende Komponente, die dem Druckbereich zugeordnet werden kann

Das Grenzmoment kann hinsichtlich seiner Momentenwirkung auch durch ein Kräftepaar – Druck- (F_D) und Zugkraft (F_Z) – beschrieben werden.



Bild 6.19: Zerlegung des Momentes in ein Kräftepaar

Bei der Berechnung des Grenzmomentes war die Zugkomponente maßgebend, somit ergibt sich für das Kräftepaar (F_D , F_Z), dass die beiden Kräfte gleich der Zugkomponente sind, da dies die maximal aufnehmbare Kraft ist. Der Hebelarm z ergibt sich nach Gleichung (6.53) durch die entsprechend maßgebende Komponente und kann der Berechnung des Grenzmomentes entnommen werden.

$$z = \frac{M_{j.pl.Rd}}{F_{ma\beta}} \quad (6.53)$$

z ... Hebelarm der maßgebenden Komponente bzw. Abstand zwischen den beiden Kräften F_D und F_Z

$F_{ma\beta}$... maßgebende Komponententragfähigkeit bei der Berechnung des Grenzmomentes

F_D, F_Z ... Kräfte des Kräftepaares zur Beschreibung des Grenzmomentes

Indize: D = Druck, Z = Zug

Wenn mehrere Schraubenreihen im Zugbereich angeordnet sind, dann tritt das Problem auf, dass mehrere Kräfte und somit mehrere unterschiedliche Hebelarme vorhanden sind. Die Lösung findet sich hierfür in der Anwendung der Gesetzmäßigkeiten der Parallelschaltung. Es wird ein äquivalenter Hebelarm nach Gleichung (6.54) berechnet.

$$z_{eq} = \frac{\sum F_i \cdot h_i^2}{\sum F_i \cdot h_i} \quad (6.54)$$

Der äquivalente Hebelarm wird in Gleichung (6.55) benutzt zur Berechnung einer äquivalenten Kraft aus dem Grenzmoment. Das heißt, das vorhandene Grenzmoment wird über den äquivalenten Hebelarm wieder in ein Kräftepaar zerlegt, das in der weiteren Berechnung angewendet wird.

$$F_{eq} = \frac{M_{j.pl.Rd}}{z_{eq}} = -F_D = F_Z \quad (6.55)$$

z_{eq}	...	äquivalenter Hebelarm bei mehreren Schraubenreihen im Zugbereich
F_{eq}	...	äquivalente Kraft aus mehreren Schraubenreihenkräften bei mehreren Schraubenreihen im Zugbereich
F_i	...	maßgebende Kraft der Schraubenreihe i
h_i	...	Hebelarm bzw. Abstand zum Druckzentrum der Schraubenreihe i

Da die maßgebende Komponente eine Komponente des Zugbereiches war, ist somit die Druckkomponente durch die Kraft F_D des Kräftepaars noch nicht voll beansprucht. Die maßgebende Druckkomponente kann somit noch weiter belastet werden. Es ergibt sich eine Differenzkraft nach Gleichung (6.56).

$$F_{\Delta.c} = F_{C.ma\beta} - F_D \quad (6.56)$$

$F_{\Delta.c}$...	Differenzkraft zwischen maßgebender Druckkomponente (nicht maßgebende Komponente bei Berechnung des Grenzmomentes) und Druckkraft des Kräftepaars
----------------	-----	---

Da die Druckkraft des Kräftepaars im Druckbereich wirkt, beansprucht auch die Differenzkraft den Druckbereich. Nach DIN 18800-1 bzw. EC 3-1 wird bei der Schnittgrößenaufteilung die Normalkraft auf die beiden Flansche aufgeteilt. Dies

bedeutet, dass eine gleiche Differenzkraft auch im Zugbereich wirken muss. Die Normalkraft zusätzlich zum Grenzmoment $-F(M_{j,pl.Rd})_{C,Rd}$ ergibt sich somit für Träger-Träger-Verbindungen aus Gleichung (6.57)

$$F(M_{j,pl.Rd})_{C,Rd} = 2 \cdot F_{\Delta,c} \quad (6.57)$$

bzw. für Träger-Stützen-Verbindungen aus Gleichung (6.58)

$$N_{1,C} = 2 \cdot F_{\Delta,c} \quad (6.58)$$

$F(M_{j,pl.Rd})_{C,Rd}$... Normalkrafttragfähigkeit am Punkt 5

$N_{1,C}$... mögliche zusätzliche Normalkraft am Punkt 5 durch Betrachtung von Zug- und Druckkomponenten

Zur Überprüfung der Einhaltung der Einzeltragfähigkeiten kann Bild 6.20 herangezogen werden. Der Druckbereich (bei Träger-Träger-Verbindungen und positiver Momentenbeanspruchung oben liegend) wird durch die Nutzung der maßgebenden Druckkomponente aus der Berechnung des Grenzmomentes hinsichtlich einer Überbeanspruchung begrenzt. Der Zugbereich, beansprucht durch die maßgebende Zugkomponente aus der Berechnung des Grenzmomentes und der zusätzlichen Differenzkraft – hier eine Druckkraft – wird ebenfalls nicht überbeansprucht, da die Druckdifferenzkraft die Zugkraft verringert. Das Gleichgewicht der äußeren und inneren Kräfte bleibt ebenfalls gewahrt, wie in Bild 6.20 ersichtlich ist.

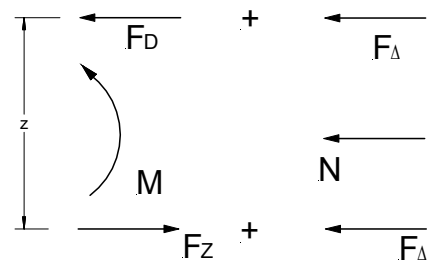


Bild 6.20: Aufteilung der Schnittgrößen am Punkt 5

War bei der Berechnung des Grenzmomentes eine Druckkomponente maßgebend, dann ergibt sich, dass der Punkt 4 berechnet werden muss. Es muss nach Gleichung (6.59) aus den vorhandenen Zugkomponenten der Träger-Träger-Verbindung – Kopfplatte und Trägersteg – die Komponente mit der kleinsten Einzeltragfähigkeit herausgesucht werden.

für Träger-Träger-Verbindungen

$$F_{T,maß} = \min \begin{cases} F_{t,ep.Rd} \\ F_{t,wb.Rd} \end{cases} \quad (6.59)$$

Bei den Träger-Stützen-Verbindungen kommen nach Gleichung (6.60) zusätzlich die beiden Komponenten Stützenflansch und Stützenstegblech hinzu.

für Träger-Stützen-Verbindungen

$$F_{T.ma\beta} = \min \begin{cases} F_{t.ep.Rd} \\ F_{t.wb.Rd} \\ F_{t.fc.Rd} \\ F_{t.wc.Rd} \end{cases} \quad (6.60)$$

Das Grenzmoment wird wiederum in ein Kräftepaar F_D und F_Z zerlegt, wobei die beiden Kräfte nun gleich der Druckkomponente sind. Da die maßgebende Komponente bei der Berechnung des Grenzmomentes eine Komponente des Druckbereiches war, ist somit nun die Zugkraft F_Z des äquivalenten Kräftepaares, das aus dem Grenzmoment gebildet wurde, noch nicht voll beansprucht. Die maßgebende Zugkomponente mit der kleinsten Zugtragfähigkeit kann daher noch weiter belastet werden. Es ergibt sich nach Gleichung (6.61) wieder eine Differenzkraft, nun aber eine Zugkraft.

$$F_{\Delta,t} = F_{T.ma\beta} - F_Z \quad (6.61)$$

- $F_{\Delta,t}$... Differenzkraft zwischen maßgebender Zugkomponente (nicht maßgebende Komponente bei Berechnung des Grenzmomentes) und Zugkraft des Kräftepaares
- $F_{T.ma\beta}$... maßgebende Zugkomponente, siehe (6.59) bzw. (6.60)

Die Normalkraft zusätzlich zum Grenzmoment – $F_{(M_{j.pl.Rd})_{T.Rd}}$ – ergibt sich analog zum Punkt 5 für Träger-Träger-Verbindungen aus Gleichung (6.62)

$$F_{(M_{j.pl.Rd})_{T.Rd}} = 2 \cdot F_{\Delta,t} \quad (6.62)$$

bzw. für Träger-Stützen-Verbindungen aus Gleichung (6.63)

$$N_{1,T} = 2 \cdot F_{\Delta,t} \quad (6.63)$$

- $F_{(M_{j.pl.Rd})_{T.Rd}}$... Normalkrafttragfähigkeit am Punkt 4
- $N_{1,T}$... mögliche zusätzliche Normalkraft am Punkt 4 durch Betrachtung von Zug- und Druckkomponenten

Hinsichtlich der Erfüllung der Voraussetzungen wird auf die Ausführungen zu Punkt 5 verwiesen.

Wie schon erwähnt und auch bereits ersichtlich, stellen die Ausführungen zu den Berechnungen der Punkte 4 und 5 bei Träger-Träger-Verbindungen einen Teil der Berechnungen der Punkte 4 und 5 bei Träger-Stützen-Verbindungen dar. Bei den Träger-Stützen-Verbindungen kommen weitere Komponenten hinzu. Augenmerk wird dabei vor allem auf die Komponente „Stützensteg unter Schubbeanspruchung“ gelegt. Um Aussagen zu dieser Komponente machen zu können, ist es zunächst wichtig zu wissen, wie sich die Beanspruchung des Stützenstegbleches berechnen lässt. In Bild 6.21 sind dazu die Bezeichnungen nach EC 3-1.8 enthalten. Es können bei der äußeren Beanspruchung drei Fälle unterschieden werden. Der erste Fall entspricht der vollständigen Abbildung in Bild 6.21 und stellt somit einen zweiseitigen Rahmenknoten dar. Die Beanspruchung des Stützenstegbleches ergibt sich nach Gleichung (6.64) und entspricht der Gleichung 5.3 des EC 3-1.8.

$$V_{wp.Sd} = \frac{(M_{b1.Sd} - M_{b2.Sd})}{z} - \frac{(V_{c1.Sd} - V_{c2.Sd})}{2} \quad (6.64)$$

Der zweite Fall entspricht der Abbildung von Bild 6.21 unter Anwendung der roten Schnittlinie. Es ergibt dann ein einseitiger Rahmenknoten. Die Gleichung (6.64) kann reduziert werden zu Gleichung (6.65)

$$V_{wp.Sd} = \frac{(M_{b1.Sd})}{z} - \frac{(V_{c1.Sd} - V_{c2.Sd})}{2} \quad (6.65)$$

Der dritte Fall entspricht einer Rahmenecke und ergibt sich in Bild 6.21 unter Anwendung sowohl der roten als auch der blauen Schnittlinie. Die Beanspruchung des Stützenstegbleches kann berechnet werden mit Gleichung (6.66)

$$V_{wp.Sd} = \frac{(M_{b1.Sd})}{z} - \frac{(V_{c1.Sd})}{2} \quad (6.66)$$

$V_{wp.Sd}$	...	resultierende Schubkraft im Stegblech
$M_{b1.Sd}$	...	Biegemoment des rechtsseitig angeschlossenen Trägers
$M_{b2.Sd}$	...	Biegemoment des linksseitig angeschlossenen Trägers
$V_{c1.Sd}$	...	Querkraft der Stütze unterhalb der Verbindung
$V_{c2.Sd}$	...	Querkraft der Stütze oberhalb der Verbindung
z	...	Hebelarm bzw. Höhe des beanspruchten Stützenstegbleches bei mehreren Schraubenreihen: äquivalenter Hebelarm nach Gleichung (6.54)

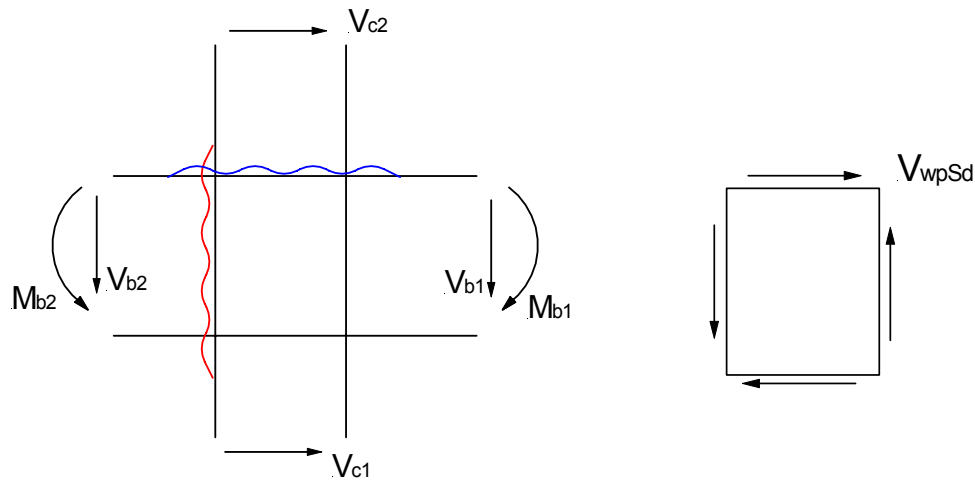


Bild 6.21: Zur Beanspruchung des Stützenstegbleches

In den Gleichungen (6.64) bis (6.66) fehlt aber eine entscheidende Schnittgröße im Hinblick auf das vorliegende Thema. Kindmann gibt in [Kin-03] für eine ausgesteifte Rahmenecke nach Bild 6.22 unter Anwendung des Modells der Schnittgrößenaufteilung die Beanspruchung des Stützenstegbleches nach den Gleichungen (6.67) bis (6.70) wie folgt an

$$R_o = -\frac{M_d}{h_R} + \frac{N_d}{2} \quad (6.67)$$

$$R_u = -\frac{M_d}{h_R} - \frac{N_d}{2} + V_c \quad (6.68)$$

$$R_r = -\frac{M_c}{h_S} - \frac{N_c}{2} - V_d \quad (6.69)$$

$$R_l = -\frac{M_c}{h_S} + \frac{N_c}{2} \quad (6.70)$$

R_o, R_u, R_r, R_l	...	Beanspruchung des Stützenstegbleches an der jeweiligen Seite des Stegbleches
M_d, N_d, V_d	...	äußere Beanspruchungen durch den angeschlossenen Träger
M_c, N_c, V_c	...	äußere Beanspruchungen durch die Stütze
h_S	...	Breite des Stützenstegbleches
h_R	...	Höhe des Stützenstegbleches bzw. des Trägerstegbleches

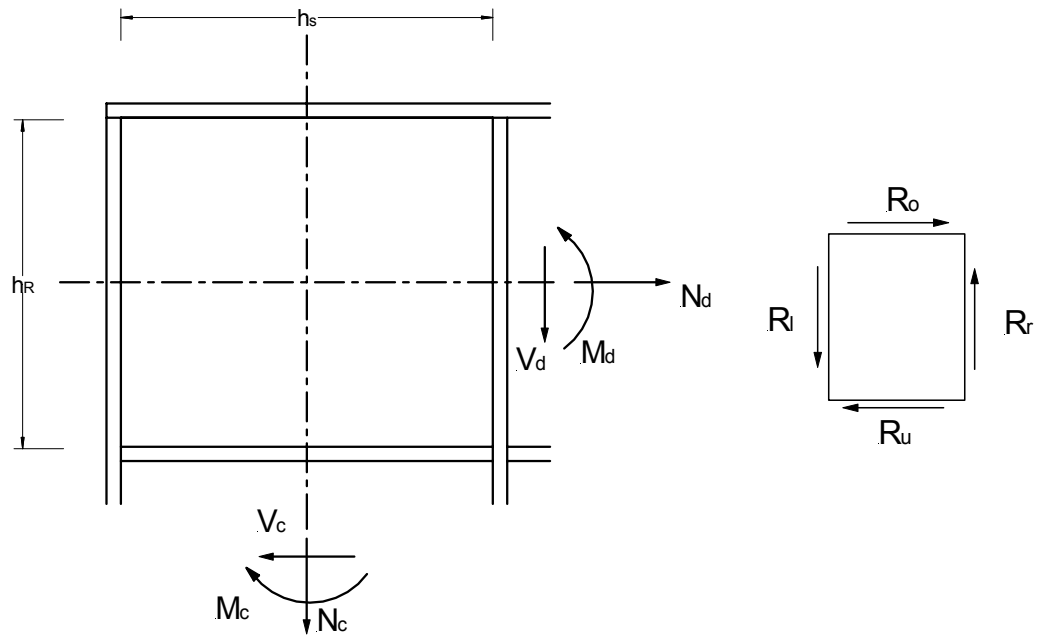


Bild 6.22: Ausgesteifte Rahmenecke

Davon ausgehend, dass das Stützenstegblech durch konstante Schubspannungen beansprucht wird, ergibt sich folgende Gleichung (6.71)

$$\tau = \frac{R_o}{h_s \cdot t} = \frac{R_u}{h_s \cdot t} = \frac{R_r}{h_R \cdot t} = \frac{R_l}{h_R \cdot t} \quad (6.71)$$

τ ... Schubspannung im Stegblech

t ... Dicke des Stegbleches

Für die weiteren Betrachtungen wird nur die Kraft R_o herangezogen, da sich diese nur aus den beiden Schnittgrößen des angeschlossenen Trägers zusammensetzt und keine Schnittgrößen des Stützenquerschnittes benötigt. Nach Gleichung (6.71) sind alle vier Randschubkräfte R_o , R_u , R_r und R_l gleich groß, so dass diese vereinfachte Betrachtungsweise möglich ist.

In Bild 6.23 wird gezeigt, welche Größen der Gleichung (6.67) bekannt (rote Umrahmung) und wie diese definiert sind. Bei ausgesteiften Rahmenecken bzw. Rahmenknoten wird die Größe h_R entsprechend der Aussteifung angesetzt. Bei unausgesteiften Rahmenecken bzw. Rahmenknoten wird für h_R bei gewalzten Profilen die Höhe h_1 und bei geschweißten Profilen die Höhe h_{wb} auf der sicheren Seite

$$R_o = -\frac{M_d}{h_R} + \frac{N_d}{2}$$

Bild 6.23: Beanspruchung des Stützenstegbleches

liegend angesetzt. Die zusätzliche Normalkraft ist die gesuchte Größe (blaue Umrahmung). Durch Umstellung der Gleichung kann diese berechnet werden. Als Grenzkriterium wird die mögliche Schubbeanspruchung $V_{wp,Rd}$ aus der Berechnung des Grenzmomentes herangezogen.

Die Gleichung (6.67) gilt für positive Momenten- und Normalkraftbeanspruchung nach der üblichen Schnittgrößendefinition, so wie diese auch in Bild 6.22 zu sehen ist. Der erste Term der Gleichung (6.67) wird als konstant angesehen. Bei negativer Momentenbeanspruchung ist dieser Term dann positiv, im Gegensatz dazu bei positiver Momentenbeanspruchung negativ. Es wird davon ausgegangen, dass der Momentenanteil die Beanspruchbarkeit der Schubkomponente vollständig ausnutzt. Der zweite Term ist entsprechend der Normalkraft entweder positiv (Zugkraft) oder negativ (Druckkraft). Die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen sind in Tabelle 6.4 erfasst. Bei beispielsweise für Rahmenecken typisch negativer Momentenbeanspruchung wird der Momentenanteil (erster Term) positiv und die Beanspruchbarkeit der Schubkomponente durch den Momentenanteil vollständig ausgenutzt. Ein weiterer zusätzlicher positiver Anteil (zweiter Term) durch eine Zugkraft ist somit nicht möglich und daher auch keine Interaktion. Hingegen kann ein negativer Anteil durch eine Druckkraft aufgenommen werden, da die Anteile einander entgegenwirken. Interaktion ist somit möglich.

Tabelle 6.4: Interaktionsbetrachtungen über das schubbeanspruchte Stützenstegblech

	negative Momentenbeanspruchung	positive Momentenbeanspruchung
zusätzliche Zugkraft	$R_o = V_{wp,Rd} = \oplus + \oplus$ → keine Interaktion möglich	$R_o = V_{wp,Rd} = \ominus + \oplus$ → Interaktion möglich
zusätzliche Druckkraft	$R_o = V_{wp,Rd} = \oplus + \ominus$ → Interaktion möglich	$R_o = V_{wp,Rd} = \ominus + \ominus$ → keine Interaktion möglich

Für Träger-Stützen-Verbindungen ergibt sich somit eine weitere Gleichung, die Gleichung (6.72) zur Berechnung einer möglichen Normalkraft am Punkt 4 bzw. 5 über die Betrachtung der schubbeanspruchten Komponente Stützenstegblech. Es wird aufgrund der oben genannten Schlussfolgerungen explizit darauf hingewiesen, dass die Größen in diese Gleichung vorzeichenbehaftet einzusetzen sind.

$$N_{2,C/T} = \left(R_o + \frac{M_d}{h_R} \right) \cdot 2 \quad (6.72)$$

$N_{2,C/T}$... mögliche Normalkraft am Punkt 4 bzw. 5 durch
Betrachtung der Schubkomponenten

Bei Träger-Stützen-Verbindungen ergibt sich somit die zusätzliche Normalkraft zum Grenzmoment im Punkt 4 oder 5 aus der Betrachtung der Druck- bzw. Zugkomponenten N_1 und der Schubkomponente N_2 . Die kleinere der beiden sich aus diesen Betrachtungen ergebenden Kräfte ist nach Gleichung (6.73) maßgebend.

$$F(M_{j,pl.Rd})_{C/T,Rd} = \min \begin{cases} N_{1,C/T} \\ N_{2,C/T} \end{cases} \quad (6.73)$$

Anhand der Ausführungen ist teilweise schon erkennbar, dass für bestimmte Konstellationen sowohl bei Punkt 4 als auch bei Punkt 5 keine zusätzliche Normalkraft, also $N = 0$, möglich ist. Folgende Fälle sind dafür zu benennen:

- Träger-Stützen-Verbindungen: Die maßgebende Komponente bei der Berechnung des Grenzmomentes (negatives Moment) kann dem Schubbereich zugeordnet werden. Bei einer für Träger-Stützen-Verbindung typischen negativen Momentenbeanspruchung kann keine zusätzliche Zugkraft aufgenommen werden, da sonst die Schubtragfähigkeit für das Stützenschublech überschritten wird.
- Verbindungen mit mehreren Schraubenreihen im Zugbereich: Wenn die maßgebenden Komponenten bei der Berechnung des Grenzmomentes für die einzelnen Schraubenreihen unterschiedlichen Beanspruchungsbereichen zugeordnet sind.
- Alle Verbindungen: Zwei Komponenten aus verschiedenen Beanspruchungsbereichen sind gleich groß.

Die vorgestellte Berechnungsweise bezieht ein überkritisches Tragverhalten dünnwandiger Profile nicht mit ein. Bei Querschnitten der Querschnittsklasse 4 liegen bei Druckbeanspruchung durch den möglichen lokalen Stabilitätsverlust (Beulen) geringere Querschnittswerte (effektive Querschnittswerte) vor als bei Zugbeanspruchung. Es wird darauf hingewiesen, dass die Abminderungsfaktoren ρ für die Stege und Flansche berechnet wurden unter der Annahme alleiniger Druckbeanspruchung. Dies bedeutet maximale Abminderung. Gleichzeitig ergeben sich dadurch die auf der sicheren Seite liegend minimalsten Querschnittswerte. Am Punkt 4 bzw. 5 liegt aber keine maximale und alleinige Druckbeanspruchung vor. Im Hinblick auf eine sehr aufwendige Berechnung der effektiven Querschnittswerte bei kombinierter Beanspruchung wurden und werden weiterhin die maximalen Abminderungsfaktoren genutzt.

Bei der Berechnung der Normalkraft in den Punkten 4 und 5 wurde von der Einteilung der Verbindung in Schnitte nach Kapitel 6.2 abgewichen. Dies war einerseits durch die Beschreibung der Punkte mit $M_{j,pl.Rd}$ und andererseits durch den Berechnungsalgorithmus des Komponentenmodelles für das Grenzmoment notwendig.

· Punkte 6 und 7

Bei diesen beiden Punkten 6 und 7 ist wie bei den vorherigen zu bestimmenden Interaktionspunkten 4 und 5 eine Koordinate bekannt. Diese Koordinate wird durch die Momenten-Rotations-Charakteristik sowie Gleichung (6.76) festgelegt.

$$M_{6/7} = M_{j,el.Rd} = \frac{2}{3} \cdot M_{j,pl.Rd} \quad (6.74)$$

$M_{6/7}$	...	Momentenordinate im Punkt 6 bzw. 7
$M_{j,el.Rd}$	...	elastisches Grenzmoment der Verbindung, siehe Bild 6.16 und Gleichung (6.50)
$M_{j,pl.Rd}$	...	plastisches Grenzmoment der Verbindung, nach EC 3-1.8

Für die Bestimmung der zweiten Koordinate werden einerseits die definierten Schnitte betrachtet und andererseits zwischen Zug- (Punkt 6) und Druckbeanspruchung (Punkt 7) unterschieden.

An den beiden Punkten 6 und 7 wird davon ausgegangen, dass aufgrund der Definition der Momentenordinate elastisches Verhalten vorliegt und der Querschnitt im Gegensatz bei plastischer Tragfähigkeit nur teilweise ausgenutzt wird. Elastische Schnittgrößen sind dadurch gekennzeichnet, dass die Streckgrenze in der maximal belasteten Faser gerade

erreicht wird. Daraus folgt, dass in allen anderen Fasern, welche geringer beansprucht werden, die Spannung kleiner als die Streckgrenze, also die Fließspannung, sein muss. Die Definition von $M_{j,el.Rd}$ einer Verbindung ist jedoch weitestgehend unabhängig von dieser Darstellung. Dies liegt zum einen daran, dass die Berechnung eines zusammengesetzten Querschnittes (nicht Verbundquerschnittes) mit unterschiedlichen Werkstoffen und deren Verformungsverhalten relativ schwierig ist. Es ist daher im Folgenden zu prüfen, in wie weit die Streckgrenze, also das Fließkriterium durch das elastische Grenzmoment in den einzelnen Schnitten ausgenutzt wird. Die „Restquerschnitt“ kann dann für die Aufnahme einer Normalkraft zusätzlich zum elastischen Grenzmoment genutzt werden. Im nachfolgenden werden die einzelnen Schnitte daraufhin untersucht.

· Schnitt I

Beim Schnitt durch den angeschlossenen Träger ist die Einhaltung des Fließkriteriums durch die Berechnung der Spannung in der maßgebenden Faser des Querschnittes und dem Vergleich der Streckgrenze einfach. Es werden die bekannten Gleichungen des EC 3 bzw. der DIN 18800-1 genutzt.

Die Grenzspannung ist nach Gleichung (6.77) gleich der Streckgrenze.

$$\sigma \leq \sigma_{Rd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (6.75)$$

σ ... vorhandene Normalspannung
 σ_{Rd} ... Grenznormalspannung

Die vorhandene Spannung ergibt sich mit Gleichung (6.78) aus den vorliegenden Beanspruchungen und Querschnittswerten.

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I_y} \cdot z \quad (6.76)$$

In die Gleichung (6.76) werden die bekannten Größen betragsmäßig eingesetzt. Die Umstellung ergibt die Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt I für den Punkt 6 bzw. 7 nach Gleichung (6.79).

$$N_{I(6/7)} = \left(\sigma - \frac{M}{I_y} \cdot z \right) \cdot A = \left(\frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} - \frac{2/3 \cdot M_{j,pl.Rd}}{I_{y,I}} \cdot z_I \right) \cdot A_I \quad (6.77)$$

$N_{I(6/7)}$	...	Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt I an den Punkten 6 bzw. 7
$I_{y,I}$	...	Trägheitsmoment des Querschnitts im Schnitt I = Trägheitsmoment des Trägerquerschnitts
z_I	...	Abstand zur maximal beanspruchtesten Faser im Schnitt I
A_I	...	Querschnittsfläche des Querschnitts im Schnitt I = Querschnittsfläche des Trägerquerschnitts

Als Bedingung für die Anwendung dieser Gleichungen wird vorausgesetzt, dass kein Vergleichsspannungsnachweis in diesem Schnitt I zu führen ist. Das heißt, die vorhandenen Schubspannungen dürfen nach Gleichung (6.80) maximal 50 % der Grenzs Schubspannungen betragen, ohne dass eine Abminderung der Beanspruchbarkeit des Querschnittes nach Element (747) in DIN 18800 vorgenommen werden muss.

$$\frac{\tau}{\tau_{Rd}} \leq 0,5 \quad (6.78)$$

$$\tau_{Rd} \quad \dots \quad \text{Grenzs Schubspannung}$$

$$= \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}}$$

· Schnitt II

Im Schnitt II wird die Kopfplatte untersucht. Für diesen Schnitt ist zwischen Zug- und Druckbeanspruchung durch die Normalkraft zu unterscheiden. Während bei Druckbeanspruchung die Verbindungselemente Schrauben keinen Traganteil leisten, müssen unter Zugbeanspruchung die Schrauben innerhalb dieses Schnittes mit berücksichtigt werden.

In diesem Schnitt können bei Druckbeanspruchung die Gleichungen von Schnitt I unter Berücksichtigung der entsprechenden Querschnittskennwerte der Kopfplatte angewendet werden. Dies bedeutet gleichzeitig, dass keine rechnerische Überprüfung notwendig wird, sofern die gleichen Werkstoffe für den Träger und die Kopfplatte verwendet wurden, da das Trägheitsmoment und auch die Querschnittsfläche der Kopfplatte größer sind als für den Trägerquerschnitt. Wird für die Kopfplatte ein Werkstoff geringerer Festigkeit als für den Trägerquerschnitt

verwendet, dann ist aufgrund einer geringeren Grenzspannung die rechnerische Überprüfung nach Gleichung (6.81) notwendig.

$$N_{II(7)} = \left(\sigma - \frac{M}{I_y} \cdot z \right) \cdot A = \left(\frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} - \frac{2/3 \cdot M_{j.pl.Rd}}{I_{y,II}} \cdot z_{II} \right) \cdot A_{II} \quad (6.79)$$

$N_{II(7)}$	...	Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt II am Punkt 7
$I_{y,II}$	...	Trägheitsmoment des Querschnitts im Schnitt II = Trägheitsmoment der Kopfplatte
z_{II}	...	Abstand zur maximal beanspruchtesten Faser im Schnitt II
A_{II}	...	Querschnittsfläche des Querschnitts im Schnitt II = Querschnittsfläche der Kopfplatte

Aufgrund des komplexen Problems eines geschraubten Anschlusses ist es nicht möglich die inneren Kräfte genau zu erfassen. Daher wurde ein vereinfachtes Berechnungsverfahren für die rechnerische Abschätzung der Kräfte und Spannungen im Schnitt II bei Zugbeanspruchung (= Punkt 6) verwendet [Pet-88], [Schi-69].

Von den in [Pet-88] und [Schi-69] vorgestellten Verfahren wurde das Verfahren für geschraubte Anschlüsse ohne Druckgurt gewählt. Diese Wahl wurde getroffen, da die überwiegende Anzahl der gewählten Verbindungskonfigurationen keine Aussteifung im Druckbereich des Stützenstegbleches in Form von Fortführung des Trägerdruckflansches beinhalteten und daher der Druckbereich stützensseitig nicht eindeutig festgelegt ist. Dieses Verfahren ist außerdem am elastischen Verhalten einer Verbindung mit hochfesten, vorgespannten Schrauben orientiert und wird deshalb hier zur Berechnung der elastischen Tragfähigkeit im Schnitt II und auch im Schnitt III angewendet. Es wird mit der Berechnung eines Ersatzquerschnittes sowohl für die Zugseite als auch für die Druckseite begonnen. Dabei werden die Schraubenflächen auf der Zugseite nach Gleichung (6.82) in ein äquivalentes Blech umgerechnet.

$$b_Z = m_V \cdot \frac{A_{sch}}{e_V} \quad (6.80)$$

b_Z	...	äquivalente Blechdicke der Zugseite
m_V	...	Anzahl der vertikalen Schraubenreihen

- A_{sch} ... Schaftquerschnittsfläche einer Schraube
 e_v ... vertikaler Abstand der Schraubenreihen

Sind mehrere Schraubenreihen in unterschiedlichen Abständen $e_{v,i}$ im Zugbereich angeordnet, wie in Bild 6.24a, dann ist ein Mittelwert aus den einzelnen Schraubenreihenabständen zu bilden.

Auf der Druckseite wird ebenfalls eine äquivalente Blechdicke angesetzt. Dabei wird in Gleichung (6.83) die Stegdicke des angeschlossenen Profils genutzt.

$$b_D = 2 \cdot s \quad (6.81)$$

- b_D ... äquivalente Blechdicke der Druckseite
 s ... Stegdicke des angeschlossenen Profils

In Bild 6.24b ist der berechnete Ersatzquerschnitt dargestellt.

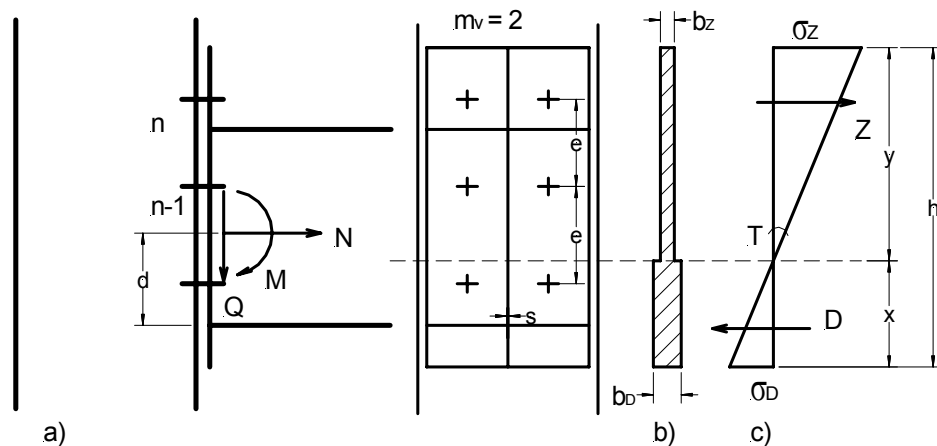


Bild 6.24: Verfahren nach Schineis: Ersatzquerschnitt und Spannungsverteilung

Unter der Bedingung, dass ein geradliniger Spannungsverlauf vorhanden sein muss, da die Berechnung im elastischen Bereich stattfindet, können die entsprechenden Zug- und Druckkräfte gleichungsmäßig durch Gleichung (6.84) und (6.85) benannt werden. Die in Bild 6.24c dargestellten Zonenhöhen x und y und auch die beiden Randspannungen σ_Z und σ_D sind dabei noch unbekannte Größen.

$$Z = \frac{1}{2} \cdot b_Z \cdot y \cdot \sigma_Z \quad (6.82)$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot b_D \cdot x \cdot \sigma_D \quad (6.83)$$

Z	...	Zugkraft
D	...	Druckkraft
y	...	Höhe der Zugzone
x	...	Höhe der Druckzone
σ_Z	...	Randzugspannung
σ_D	...	Randdruckspannung

Des Weiteren wird die Größe T als Neigung des Spannungsverlaufes durch Gleichung (6.86) definiert.

$$T = \frac{\sigma_Z}{y} = \frac{\sigma_D}{x} \quad (6.84)$$

Über die beiden Gleichgewichtsbedingungen $\Sigma N = 0$ (Gleichung (6.85)) und $\Sigma M = 0$ (Gleichung (6.86)) sowie über die sich aus diesen beiden Gleichgewichten ergebenden Beschreibungen von T mit den Gleichungen (6.87) und (6.88), folgt in Gleichung (6.89) eine kubische Bestimmungsgleichung.

$$\Sigma N = 0: N = Z - D = \frac{T}{2} \cdot (b_Z \cdot y^2 - b_D \cdot x^2) \quad (6.85)$$

$$\Sigma M = 0: M + N \cdot (d - x) = Z \cdot \frac{2}{3} \cdot y + D \cdot \frac{2}{3} \cdot x = \frac{T}{3} \cdot (b_Z \cdot y^3 + b_D \cdot x^3) \quad (6.86)$$

$$T = \frac{2 \cdot N}{(b_Z \cdot y^2 - b_D \cdot x^2)} \quad (6.87)$$

$$T = \frac{3 \cdot (M + N \cdot d) - 3 \cdot N \cdot x}{(b_Z \cdot y^3 + b_D \cdot x^3)} \quad (6.88)$$

$$a \cdot \xi^3 + b \cdot \xi^2 + c \cdot \xi + d = 0 \quad (6.89)$$

Wobei weitere Parameter durch die Gleichungen (6.90) und (6.91) beschrieben werden.

$$h = x + y \quad (6.90)$$

$$x = \xi \cdot h \quad (6.91)$$

h	...	Höhe der Verbindung (Höhe der Kopfplatte)
d	...	Abstand der Normalkraft vom Druckrand
ξ	...	bezogene Druckzonenhöhe

Um diese kubische Gleichung iterativ lösen zu können, wird diese weiter umgeformt und umgestellt. Es werden für eine Vereinfachung folgende Substitutionen nach den Gleichungen (6.94) bis (6.104) benötigt:

$$\alpha = (M + N \cdot d) \cdot \frac{b_Z}{h} \quad (6.92)$$

$$\beta = (M + N \cdot d) \cdot \frac{b_D}{h} \quad (6.93)$$

$$\gamma = N \cdot b_Z \quad (6.94)$$

$$\delta = N \cdot b_D \quad (6.95)$$

$$a = \delta - \gamma \quad (6.96)$$

$$b = 3 \cdot \alpha - 3 \cdot \beta \quad (6.97)$$

$$c = 3 \cdot \gamma - 6 \cdot \alpha \quad (6.98)$$

$$d = 3 \cdot \alpha - 2 \cdot \gamma \quad (6.99)$$

$$A = -\frac{d}{c} \quad (6.100)$$

$$B = -\frac{a}{c} \quad (6.101)$$

$$C = -\frac{b}{c} \quad (6.102)$$

Daraus ergibt sich eine neue kubische Gleichung (6.105).

$$A + B \cdot \xi^3 + C \cdot \xi^2 - \xi = 0 \quad (6.103)$$

Mit dieser Gleichung (6.103) kann gearbeitet werden. Linksseitig wird ein geschätzter Wert für ξ eingesetzt. Ein Anfangswert für die Iteration sollte zwischen 0,3 und 0,4 liegen. Durch mehrere Iterationsschritte ergibt sich ein genauer Wert für ξ und damit auch für x und y .

Im vorliegenden Fall, wo es darum geht, die mögliche zusätzliche Normalkraft am Punkt 6 für eine Verbindung zu finden, gestaltet sich das Problem etwas umfangreicher und die Berechnung dementsprechend aufwendiger. Zusätzlich zu den Iterationsschritten zur Ermittlung der bezogenen Druckzonenhöhe ξ muss nun noch die Normalkraft schrittweise vorgegeben werden. In Tabelle 6.5 geschah dies durch das Verhältnis v , das die Normalkraft am Punkt 6 bezogen auf die Grenzzugtragfähigkeit der Verbindung darstellt. Anhand der Werte konnten verschiedene Beziehungen und Diagramme aufgestellt und ermittelt werden. In der Tabelle 6.5 ist gelb markiert die maximale Schraubenkraft, die das Erreichen der maximal möglichen Normalkraft zusätzlich zum elastischen Grenzmoment der Verbindung kennzeichnet.

Tabelle 6.5: Zwischenergebnisse bei der Berechnung der Normalkraft im Punkt 6 am Beispiel der Verbindung A

					$N_{pl,Rd} = 700,16 \text{ kN}$		
v	ξ	σ_z	σ_D	σ_{zn}	Z_n	T	N_6
$N_6/N_{pl,Rd}$	x/h	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ² * mm]	[kN]
0,1	0,39	624,86	403,00	344,53	108,18	4,67	70,02
0,2	0,36	632,70	356,12	363,03	113,99	4,49	140,03
0,3	0,33	626,26	305,96	372,02	116,81	4,24	210,05
0,4	0,29	608,43	256,15	372,64	117,01	3,93	280,06
0,5	0,26	582,64	209,35	366,64	115,13	3,60	350,08
0,6	0,23	552,12	167,16	355,95	111,77	3,27	420,10
0,7	0,20	519,48	130,24	342,28	107,48	2,95	490,11

In Bild 6.25 ist die mathematische Beziehung zwischen der angreifenden Normalkraft und der daraus entstehenden Druckzonenhöhe dargestellt. Für jede Verbindung ergibt sich dabei entsprechend der geometrischen und werkstofflichen Vorgaben eine andere lineare Beziehung zwischen diesen beiden Größen.

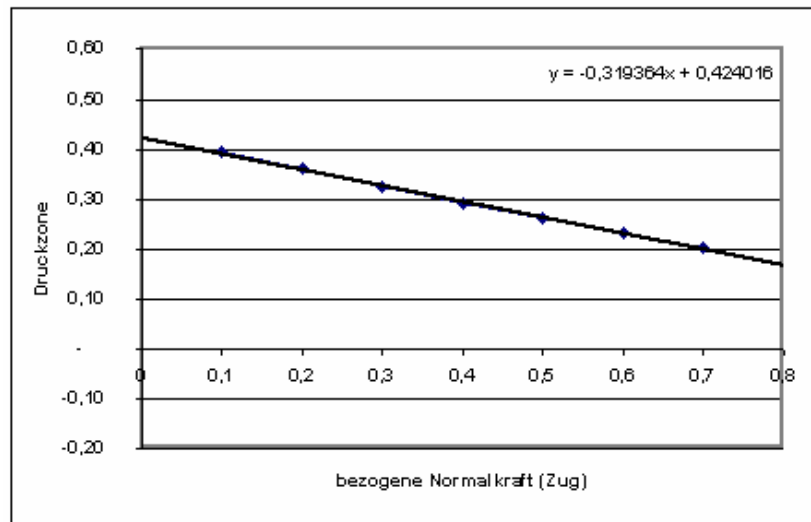


Bild 6.25: Beziehung zwischen Normalkraft und Druckzonenhöhe (Verbindung A)

In Bild 6.26 sind dargestellt die Beziehungen zwischen der vorgegebenen bezogenen Normalkraft und den daraus entstehenden Zug- und Druckspannungen sowie der Schraubenkraft. Wenn die Schraubenkraft ihr Maximum erreicht hat und die Normalkraft trotzdem weiter ansteigt, dann geht das Verhalten von elastisch zu plastisch über und es finden Umlagerungen im Querschnitt, besser im äquivalenten Ersatzquerschnitt, statt. Daher wird nach diesem Diagramm (Bild 6.26) und mit Hilfe der Wertetabelle (Tabelle 6.5) die maximal mögliche Normalkraft zusätzlich zu dem vorhandenen Moment am Punkt 6 über die maximale Schraubenkraft festgelegt. Es sind daher einerseits stets genügend viele Iterationen für die bezogene Druckzonenhöhe durchzuführen sowie die maximale Schraubenkraft durch

genügend genaue Festlegung des Verhältnisses v zu finden. Eine Berechnung mit einem Kalkulationsprogramm bietet sich an.

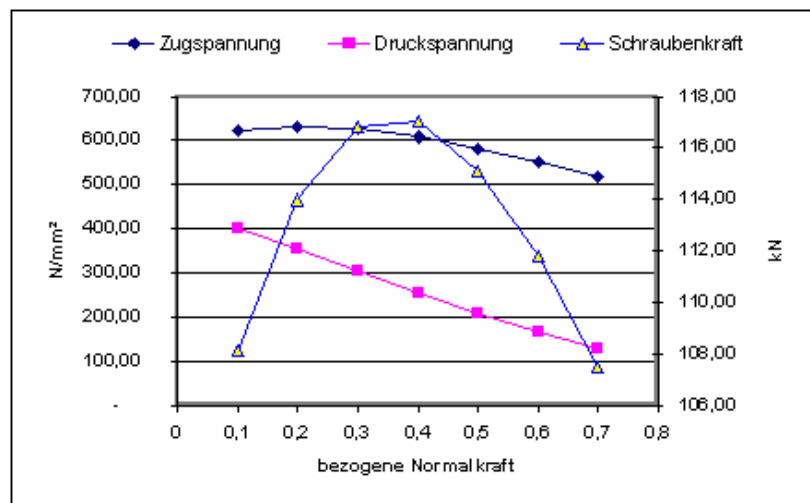


Bild 6.26: Beziehungen zwischen Normalkraft, Zug- und Druckspannung sowie Schraubkraft

Die Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt II am Punkt 6 ergibt sich nach Gleichung (6.106).

$$N_{II(6)} = v_{II} (Z_{n,max}) \cdot F_{T,Rd} \quad (6.104)$$

$N_{II(6)}$... Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt II am Punkt 6

v_{II} ... bezogene Normalkraft im Schnitt II

$Z_{n,max}$... maximale Schraubkraft

· Schnitt III

Der Schnitt III ist analog zu behandeln wie der Schnitt II. Es wird in Zug- und Druckbeanspruchung unterschieden. Unter Verwendung der entsprechenden Querschnittswerte ergeben sich die möglichen Normalkräfte $N_{III(6/7)}$ nach den Gleichung (6.107) und (6.108).

$$N_{III(6)} = v_{III} (Z_{n,max}) \cdot F_{T,Rd} \quad (6.105)$$

$$N_{III(7)} = \left(\sigma - \frac{M}{I_y} \cdot z \right) \cdot A = \left(\frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} - \frac{2/3 \cdot M_{j.pl.Rd}}{I_{y,III}} \cdot z_{III} \right) \cdot A_{III} \quad (6.106)$$

$N_{III(6)}$	...	Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt III am Punkt 6
v_{III}	...	bezogene Normalkraft im Schnitt III
$N_{III(7)}$	...	Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt III am Punkt 7
$I_{y,III}$	...	Trägheitsmoment des Querschnitts im Schnitt III = Trägheitsmoment des Stützenflansches (innerhalb der Höhe der Kopfplatte)
z_{III}	...	Abstand zur maximal beanspruchtesten Faser im Schnitt III
A_{III}	...	Querschnittsfläche des Querschnitts im Schnitt III = Querschnittsfläche des Stützenflansches (innerhalb der Höhe der Kopfplatte)

· Schnitt IV

Der reale Spannungszustand im Blech einer Rahmenecke ist nur durch Scheibentheorie bestimmbar [Stü-71] oder durch die Methode der finiten Elemente erfassbar.

Nach [Pet-88] werden die Schubspannungen im Eckblech als konstant angenommen. Es wird daher wieder die Gleichung (6.71) zur Bestimmung der Normalkraft im Schnitt IV herangezogen. Zur Einhaltung der Voraussetzung des elastischen Verhaltens werden einerseits die Schubspannungen auf die Grenzscherbspannungen τ_{Rd} begrenzt und andererseits sind die Grenzwerte für die b/t -Verhältnisse am Stützenstegblech nach Tabelle 6.6 einzuhalten.

Tabelle 6.6: Grenzwerte für b/t nach [Kin-03]

$h_R \geq h_S$ $\alpha = \frac{h_R}{h_S}$ $\frac{b}{t} = \frac{h_S}{t_S}$			
$h_R < h_S$ $\alpha = \frac{h_S}{h_R}$ $\frac{b}{t} = \frac{h_R}{t_S}$			
S235	$b/t \leq 95$	$\alpha = 1$	
	$b/t \leq 71$	$\alpha \rightarrow \infty$	
S355	$b/t \leq 77$	$\alpha = 1$	
	$b/t \leq 58$	$\alpha \rightarrow \infty$	

Gleichung (6.109) gibt die Beanspruchung des Stützenstegbleches an.

$$\tau = \frac{R_o}{h_s \cdot t} \quad (6.107)$$

Gleichung (6.110) beschreibt die Beanspruchbarkeit des Stützenstegbleches.

$$\tau \leq \tau_{Rd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \quad (6.108)$$

h_s ... Breite des Stützenstegbleches

t ... Dicke des Stützenstegbleches

Unter Verwendung von Gleichung (6.67) und Umstellen der beiden vorangegangenen Gleichungen kann die Normalkraft an den Punkten 6 bzw. 7 durch die Gleichung (6.111) bzw. (6.112) berechnet werden.

$$N_{IV(6)} = 2 \cdot \left(\tau_{Rd} \cdot h_s \cdot t_s - \frac{M_{j.el.Rd}}{h_R} \right) \quad (6.109)$$

$$N_{IV(7)} = 2 \cdot \left(\frac{M_{j.el.Rd}}{h_R} - \tau_{Rd} \cdot h_s \cdot t_s \right) \quad (6.110)$$

$N_{IV(6)}$... Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt IV am Punkt 6

$N_{IV(7)}$... Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt IV am Punkt 7

Voraussetzung für diese beiden Gleichungen ist die Annahme eines negativen Momentes, das bei Träger-Stützen-Verbindungen im Allgemeinen vorhanden ist. Das Moment wird dann betragsmäßig eingesetzt.

Für Träger-Träger-Verbindungen ergibt sich die zusätzliche Normalkraft in den Punkten 6 und 7 aus der Betrachtung der beiden Schnitte I und II nach Gleichung (6.113) bei Zugbeanspruchung bzw. (6.114) bei Druckbeanspruchung.

$$F(M_{j.el.Rd})_{T.Rd} = \min \begin{cases} N_{I(6)} \\ N_{II(6)} \end{cases} \quad (6.111)$$

$$F(M_{j.el.Rd})_{C.Rd} = \min \begin{cases} N_{I(7)} \\ N_{II(7)} \end{cases} \quad (6.112)$$

Bei den Träger-Stützen-Verbindungen erweitert sich nach den Gleichungen (6.115) und (6.116) die Anzahl der zu betrachtenden Schnitte für die Berechnung der zusätzlichen Normalkraft in den Punkten 6 und 7.

$$F(M_{j.el.Rd})_{T.Rd} = \min \begin{cases} N_{I(6)} \\ N_{II(6)} \\ N_{III(6)} \\ N_{IV(6)} \end{cases} \quad (6.113)$$

$$F(M_{j.el.Rd})_{C.Rd} = \min \begin{cases} N_{I(7)} \\ N_{II(7)} \\ N_{III(7)} \\ N_{IV(7)} \end{cases} \quad (6.114)$$

$F(M_{j.el.Rd})_{T.Rd}$... Normalkrafttragfähigkeit am Punkt 6

$F(M_{j.el.Rd})_{C.Rd}$... Normalkrafttragfähigkeit am Punkt 7

6.4 Weitere Hinweise zur Anwendung

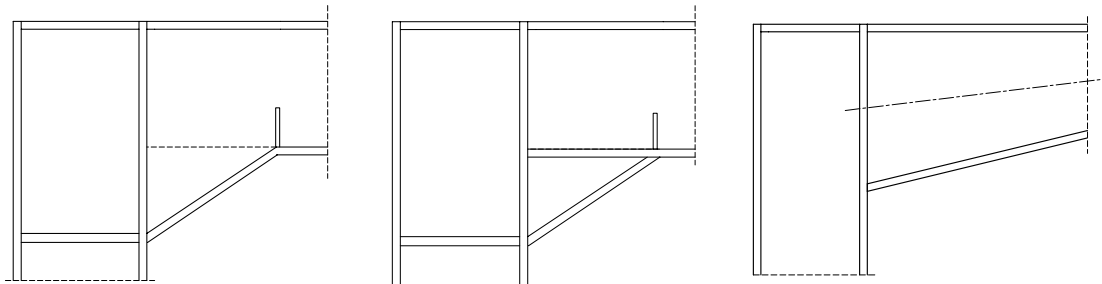
6.4.1 Allgemeines

Im Folgenden sollen weitere Hinweise und ergänzende Bemerkungen zur Anwendung der vorgeschlagenen Erweiterung der Komponentenmethode nach EC 3-1.8 gegeben werden.

6.4.2 Geneigte Träger- und Stützenachsen

Geneigte Träger- und Stützenachsen findet man vor allem bei über die Systemlänge veränderlichen Querschnitten. Dazu gehört beispielsweise auch die Anordnung von Vouten bei Träger- und/oder Stützenquerschnitten.

Vouten dienen zur Verringerung der Schubbeanspruchung im Stützenstegblech, indem der Trägerquerschnitt am Ende aufgeweitet wird. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten, in Bild 6.27 sind nur einige wenige gezeigt. Durch die Aufweitung der Trägerhöhe wird der Hebelarm für das Trägermoment vergrößert und die Schubspannungen im Blech gleichzeitig verringert. Die Tragfähigkeit des Schnittes IV kann dadurch entscheidend erhöht werden.



Abtrennen des Flansches vom
Steg
Einsetzen eines keilförmigen
Blech
Randverstärkung = Flansch
anschweißen
Walzprofile

Anschweißen einer Schräge
durch ein dreieckiges Blech
Randverstärkung = Flansch
anschweißen

kontinuierliche
Querschnittshöhenveränderung

Schweißprofile

Bild 6.27: Ausführungsvarianten bei Vouten

Es wird darauf hingewiesen, dass an Knickstellen des Gurtes stets Rippen anzuordnen sind, um die an diesen Stellen auftretenden Umlenkkräfte aufzunehmen und abzutragen. Werden keine Rippen angeordnet, dann kommt es an diesen Stellen zu erhöhter Beanspruchung und Biegung der Flanschbleche.

Die auf die schräge Schwereachse des zusammengesetzten Querschnittes bezogenen Kräfte müssen in entsprechende Kräfte im Anschnitt der Verbindung umgerechnet werden, da für den Nachweis der Verbindung nicht die Knotenschnittgrößen verwendet werden sollen, sondern die Schnittgrößen in den Anschnitten. Die Anschnitte werden dabei als senkrecht zu den Stabachsen liegend angenommen [Kin-03]. In Bild 6.28 sind die Beziehungen für die Schnittgrößen entsprechend dargestellt.

Nach [Wal-03] können Vouten eine Erhöhung der Grenzmomenten Tragfähigkeit von bis zu 40 % bewirken.

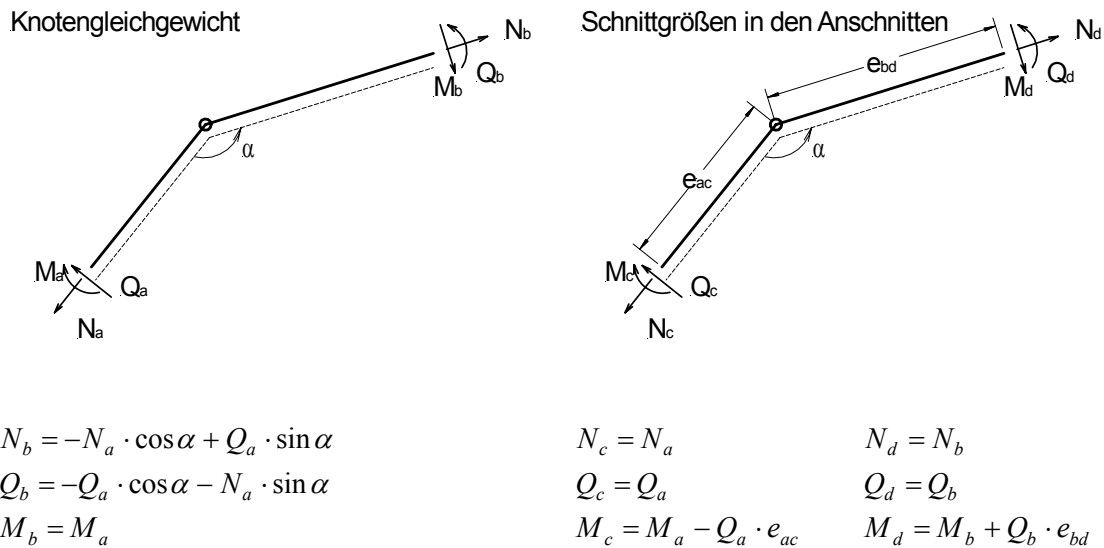
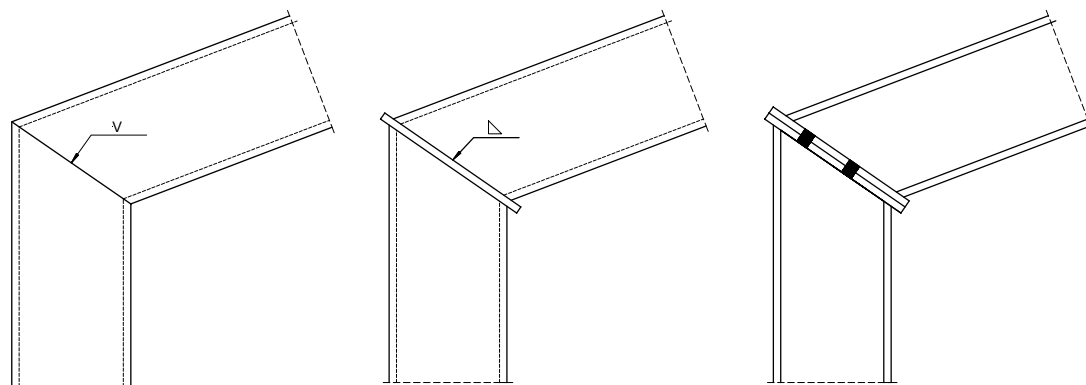


Bild 6.28: Transformationsbeziehungen für die Schnittgrößen in Rahmenecken und Knicken nach [Kin-03]

6.4.3 Verbindung von Träger und Stütze durch einen Gehrungsschnitt

Träger und Stützen werden bei geringer Beanspruchung auch durch Stöße über einen Gehrungsschnitt miteinander verbunden. Diese Stöße können bei geschweißter Ausführung mit und ohne Zwischenblech gefertigt werden (Bild 6.29). Bei geschraubten Verbindungen werden im Allgemeinen zwei Kopfplatten angewendet (Bild 6.29). Vorteil dieser Verbindungskonfiguration ist die Vermeidung von Eckverstärkungen.



geschweißt ohne Zwischenblech

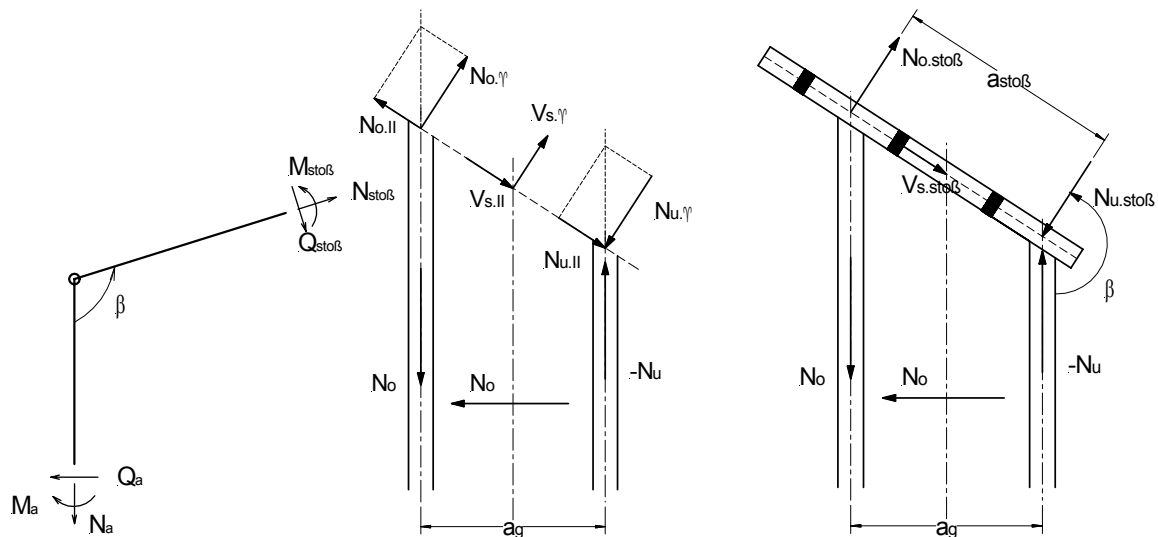
geschweißt mit Zwischenblech

geschraubt mit Kopfplatten

Bild 6.29: Ausführungsvarianten bei Stößen durch Gehrungsschnitt

Träger-Träger-Verbindungen entsprechen prinzipiell ebenfalls Stößen durch einen Gehrungsschnitt. Die in der Arbeit untersuchten Träger-Träger-Verbindungen nach Anhang A hatten dabei einen Öffnungswinkel von $\alpha = 180^\circ$.

In Bild 6.30 sind für die verschiedenen Nachweise, welche für eine Rahmenecke zu führen sind, die entsprechenden Schnittgrößen dargestellt. Ausgehend von den Schnittgrößen im Schrägschnitt können einerseits die Teilschnittgrößen in der Stütze und in den Schweißnähten berechnet. Damit werden die vorhandenen Schweißnähte nachgewiesen. Andererseits können die Beanspruchungen einer geschraubten Verbindung ermittelt und damit der Nachweis der geschraubten Kopfplattenverbindung erbracht werden.



$$N_{stoß} = -N_a \cdot \cos \beta + Q_a \cdot \sin \beta$$

$$Q_{stoß} = -Q_a \cdot \cos \beta - N_a \cdot \sin \beta$$

$$M_{stoß} = M_a$$

$$N_o = \frac{N_a}{2} - \frac{M_a}{a_g}$$

$$N_u = \frac{N_a}{2} + \frac{M_a}{a_g}$$

$$Q_s = Q_a$$

$$N_{o.stoß} = -N_o \cdot \cos \beta + \frac{Q_s}{2} \cdot \sin \beta$$

$$N_{o.stoß} = \frac{N_{stoß}}{2} - \frac{M_{stoß}}{a_{stoß}}$$

$$N_{u.stoß} = -N_u \cdot \cos \beta + \frac{Q_s}{2} \cdot \sin \beta$$

$$N_{u.stoß} = \frac{N_{stoß}}{2} + \frac{M_{stoß}}{a_{stoß}}$$

$$Q_{s.stoß} = -Q_s \cdot \cos \beta - N_a \cdot \sin \beta$$

$$Q_{s.stoß} = Q_{stoß}$$

Schnittgrößen im
Schrägschnitt (Stoß)

Teilschnittgrößen in der Stütze
und in den Schweißnähten

Beanspruchung der geschraubten
Stirnplattenverbindung

Bild 6.30: Teilschnittgrößen im Gehrungsschnitt einer Rahmenecke nach [Kin-03]

Wie Verbindungen als Stöße durch Gehrungsschnitt berechnet werden, ist in den vorangegangenen Ausführungen enthalten. Bei geschweißten Stößen sind die Verbindungen analog zu den Angaben für geschweißte Träger-Stützen-Verbindungen unter Beachtung der entsprechenden Schnittgrößen zu berechnen. Bei geschraubten Stößen können die Verbindungen als Träger-Träger-Verbindungen wiederum mit den entsprechenden Schnittgrößen behandelt werden.

6.4.4 Weitere Aussteifungsmöglichkeiten

Eine Möglichkeit der Erhöhung der Tragfähigkeit der Komponenten Kopfplatte und Stützenflansch auf Biegung bzw. des Schnittes II oder III sind hinterlegte Bleche. Hinterlegte Bleche (so genannte backing plates) haben dabei nur Einfluss auf die Erhöhung des plastischen Momentes im Versagensmodus 1 eines T-Stoßes, da das Gurtblech im Bereich der Schrauben und nicht im Steganschnitt vorhanden ist. Der Versagensmodus 1 beinhaltet das komplette Fließen der Flanschbleche eines T-Stoßes und tritt bei relativ dünnen Blechen auf, während beim Versagensmodus 2 Fließgelenke nur im Steganschnitt der Gurtbleche kombiniert mit dem Erreichen der Zugtragfähigkeit der Schrauben auftreten. Werden hinterlegte Bleche in einer Verbindung vorgesehen, dann sind diese bei der Berechnung der plastischen Momente für den Versagensmodus 1 stets zu berücksichtigen.

Zusätzliche Stegbleche, ein- oder zweiseitig angeordnet, können zur Verstärkung von Rahmeneckblechen angeordnet werden, wenn die Tragfähigkeit im Schnitt IV maßgebend für die Verbindung wird und zu gering ist. Die Berechnungen sind dann mit der entsprechenden „verstärkten“ Stegblechdicke durchzuführen. Das zusätzliche Stegblech muss, wie in Bild 6.32 dargestellt, zur Aufnahme der Randschubflüsse möglichst weit nach außen ausgeführt werden.

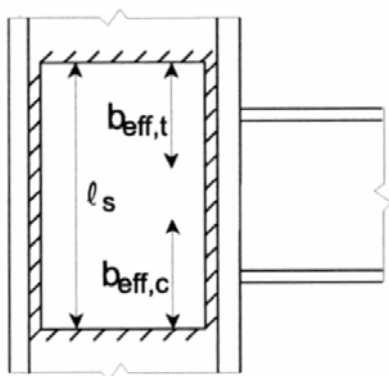


Bild 6.31: Zusätzliches Stegblech zur Verstärkung

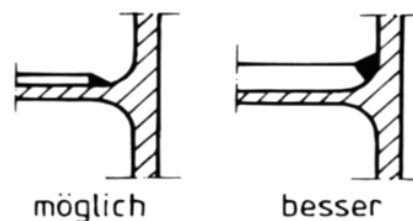
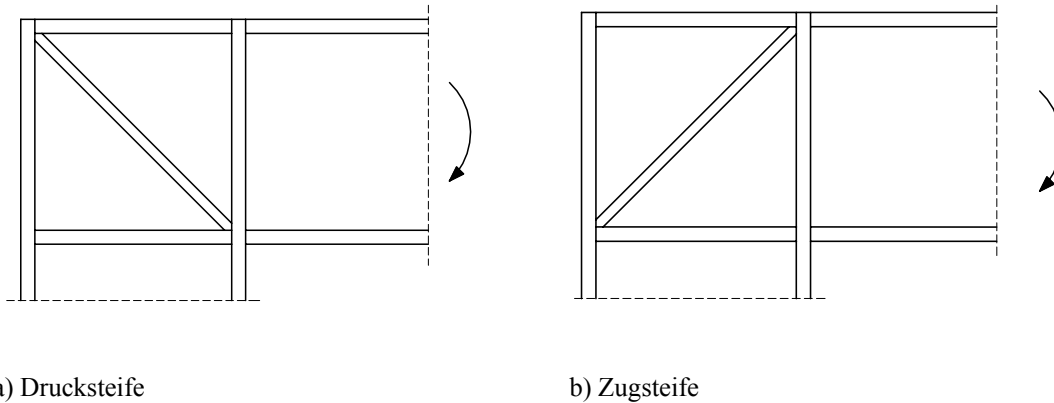


Bild 6.32: Ausführungsvarianten der Längsschweißnähte für das Anschweißen zusätzlicher Stegbleche nach [Thi-97]

Eine andere Möglichkeit zur Erhöhung der Tragfähigkeit im Schnitt IV ist die Anordnung von Diagonalsteifen, dargestellt in Bild 6.33. Die Diagonalsteifen, zur Verhinderung des Schubbeulens, können einerseits als Druck- und andererseits als Zugsteife angeordnet werden. Schnittgrößenanteile, die über die maximal mögliche Schubbeanspruchung des Eckbleches hinausgehen, werden dann der Diagonalsteife entsprechend zugeordnet. Im Schnitt IV kann somit für die Berechnung der Tragfähigkeit wieder eine Parallelschaltung der einzelnen Teilkomponenten im Schnitt herangezogen werden. Bei Drucksteifen ist die Stabilität zu prüfen.



a) Drucksteife

b) Zugsteife

Bild 6.33: Diagonalsteifen zur Verstärkung des Eckbleches

Steifen in Verlängerung der Trägerflansche oder in bestimmten Abständen zwischen den Schraubenreihen verringern die Blechbiegung und damit die Abstützkräfte, die die Schrauben zusätzlich beanspruchen, sofern Abstützkräfte in einer Verbindung auftreten. Abstützkräfte entstehen, wenn sich nicht kreisförmige Fließlinienmuster (non circular patterns) ausbilden und bei der Berechnung der effektiven Längen der T-Stöße maßgebend sind.

Steifen in Verlängerung des Druckflansches des Trägers dienen zur Erhöhung der Drucktragfähigkeit des Stützenstegbleches durch Erhöhung der Steifigkeit des Lasteinleitungsbereiches. Solche Einleitungssteifen verhindern das Beulen infolge Druckbeanspruchung.

Die rechnerische Berücksichtigung von Steifen innerhalb der einzelnen Schnitte ist bei den jeweiligen Schnitten entsprechend ausgeführt.

6.4.5 Schlanke Profile

Im EC 3-1.8 sind schlanke Profile insbesondere bei der Berechnung der Schubtragfähigkeit des Stützenstegbleches ausgeschlossen, in dem die Schlankheit durch Gleichung (6.115) begrenzt wird.

$$d_{wc}/t_w \leq 69 \cdot \varepsilon \quad (6.115)$$

mit

d_{wc}	Breite des Stützenstegbleches
t_w	Dicke des Stützenstegbleches
ε	Faktor zur Berücksichtigung der Werkstofffestigkeit

$$= \sqrt{\frac{235}{f_{yk}}}$$

Die vorgeschlagenen Gleichungen schließen schlanke Profile nicht explizit aus. Es werden die effektiven Querschnittswerte bei Profilen, die der Querschnittsklasse 4 zugeordnet werden müssen, berücksichtigt. Andererseits werden Tragreserven durch Einbeziehung des überkritischen Tragverhaltens, beispielsweise der Ausbildung von Zugfeldern in der Rahmenecke, nicht mit angerechnet. Eine zusätzliche Überprüfung durch die Methode der finiten Elemente ist daher eventuell sinnvoll.

Bei der Berechnung von Drucktragfähigkeiten sollten jedoch stets die effektiven Querschnittswerte genutzt werden. Bei der Berechnung des effektiven Querschnittes sollte durch Annahme alleiniger Druckbeanspruchung die maximale Abminderung des Querschnittes durch den entsprechenden Abminderungsfaktor erzielt und in der gesamten Berechnung beibehalten werden.

7 Auswertung und Anwendung

7.1 Auswertung und Vergleich der Ergebnisse

Die *Untersuchungen mit der Methode der finiten Elemente dienen zur Untermauerung der Ergebnisse* der Berechnungen nach dem in Kapitel 6 vorgestellten Vorschlag zur Erweiterung der Komponentenmethode. Die Erweiterung umfasst einerseits die Ausführungen zur Berechnung der Normalkrafttragfähigkeit, wobei in Druck- und Zugkraftbeanspruchung unterschieden wird. Andererseits wird die Komponentenmethode auf der Basis der vorgeschlagenen Gleichungen zur Normalkrafttragfähigkeit um die Regeln zur Erstellung einer Interaktionsbeziehung zwischen den Schnittgrößen Biegemoment und Normalkraft, wobei wiederum zwischen Druck- und Zugkraftbeanspruchung differenziert wird, ergänzt.

Die Untersuchungen mit der Methode der finiten Elemente wurden an den Verbindungen A bis P durchgeführt. In Kapitel 4 und Anhang A sind die gewählten Verbindungen beschrieben. Hinsichtlich der Modellierung dieser Verbindungen wird ebenfalls auf Kapitel 4 verwiesen.

Alle anderen Verbindungen (siehe auch Anhang B), die nach dem Vorschlag in Kapitel 6 berechnet wurden, sind nicht mit Hilfe der FEM untersucht worden. Diese Verbindungen dienten hinsichtlich bestimmter Eigenschaften und Besonderheiten ausschließlich zur Findung des Berechnungsalgorithmus'.

Die nach den Vorschlägen berechneten Ergebnisse sollten dabei, um einer Bestätigung zu dienen, mindestens den FE-Ergebnissen genügen. Aufgrund von Vereinfachungen, Begrenzungen und zur einfacheren Handhabbarkeit getroffenen Annahmen bei den „Handrechnungen“ werden bestimmte Begebenheiten nicht berücksichtigt bzw. können nicht erfasst und daher nicht berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu mechanischen Modellen, wie das Komponentenmodell, werden bei FE-Berechnungen Verfestigungen durch den Ansatz eines nichtlinearen Materialgesetzes sowie Membraneffekte mit erfasst und führen damit zu einer größeren Traglast.

Die Ergebnisse der Finiten-Elemente-Berechnungen werden einerseits mit einer linearen Interaktionsbeziehung zwischen Biegemoment und Normalkraft verglichen und andererseits dem Vorschlag nach Kapitel 6 gegenübergestellt. Bei den Vergleichen wird unterschieden in die quantitativen und in die normierten Interaktionsbeziehungen. Zum Vergleich der beiden Interaktionsbeziehungen gehört auch die quantitative Auswertung der Punkte 1 (Grenzmoment), 2 (Grenzzugkraft) und 3 (Grenzdruckkraft). Dabei werden die Ergebnisse nach Kapitel 6.1.1 und 6.1.2 sowie aus der Anwendung des Komponentenmodells für das Grenztragmoment der Verbindung den Resultaten der FE-Berechnungen gegenübergestellt. In der Tabelle 7.1 sind unter der Rubrik „Handrechnung“ die Werte aus der Anwendung des Komponentenmodells und der vorgeschlagenen Erweiterung aufgeführt. Für die Berechnung der Grenzdruckkraft ist bei den Träger-Stützen-Verbindungen zwischen Rahmenecken und Rahmenknoten (siehe auch

Abschnitt 6.2.2) zu unterscheiden. Der Vergleich dann wird mit den Werten für Rahmenecken geführt, da die FE-Modelle als Rahmenecken ausgeführt wurden. Die zweite große Spalte enthält die Ergebnisse aus der Anwendung der FEM. In der dritten großen Spalte werden die Werte einander gegenübergestellt. Ein Wert mindestens gleich oder größer „1“ bedeutet, dass die Werte der „Handrechnung“ durch die Anwendung der Methode der finiten Elemente bestätigt wurden. Gleichzeitig ist ersichtlich, dass dieser Vergleich zum Teil sehr unterschiedliche Ergebnisse liefert. Im Mittel jedoch ergibt sich für alle drei Punkte eine um etwa 30 % höhere Tragfähigkeit der Verbindungen bei der Nutzung der FEM im Vergleich zum Komponentemodell (Grenztragemoment) bzw. zur vorgeschlagenen Erweiterung (Grenznormalkräfte). Es werden alle Ergebnisse durch die FEM bestätigt.

Tabelle 7.1: Auswertung der quantitativen Ergebnisse der Punkte 1 bis 3

Verbindung	Handrechnung			FE-Berechnung			CHECK		
	Grenzmoment M_{Rd} in kNm	Grenzdruckkraft $F_{C,Rd}$ in kN ¹⁾	Grenzzugkraft $F_{T,Rd}$ in kN	M	N_{Druck}	N_{Zug}	M/M_{Rd}	$N_{Druck}/F_{C,Rd}$	$N_{Zug}/F_{T,Rd}$
A	51,887	-832,076	700,16	53,9	-842,38	878,735	1,04	1,01	1,26
B	38,793	-693,814	605,933	47,03	-744,335	753,685	1,21	1,07	1,24
C	32,849	-551,933	456	36,64	-562,84	539,22	1,12	1,02	1,18
D	51,887	-649,505 -620,38	554,426	52,263	-794,16	650,47	1,01	1,28	1,17
E	40,099	-482,345 -491,894	472,968	56,023	-775,65	525,74	1,40	1,58	1,11
F	38,793	-645,668 -612,315	534,544	46,709	-746,74	629,49	1,20	1,22	1,18
G	5,201	-121,709 -123,231	83,589	12,274	-169,86	93,37	2,36	1,38	1,12
H	32,849	-374,073 -359,949	328,482	41,22	-488,52	521,11	1,25	1,36	1,59
I	28,923	-337,393 -315,555	275,403	36,78	-508,9	410,29	1,27	1,61	1,49
K	32,147	-410,103 -419,568	396,71	46,48	-664,22	754,06	1,45	1,58	1,90
L	34,874	-551,933	463,486	44,61	-566,21	545,69	1,28	1,03	1,18
M	24,814	-280,451 -280,065	248,245	34,34	-431,3	347,37	1,38	1,54	1,40
N	9,23	-255,56	217,94	12,34	-258,41	259,54	1,34	1,01	1,19
O	8,475	-184,236 -176,076	144,345	13,099	-242,3	147,04	1,55	1,38	1,02
P	24,314	-280,937 -279,419	248,245	26,76	-472,78	428,78	1,10	1,69	1,73

¹⁾ oberer Wert Rahmenknoten Mittelwert 1,33 1,32 1,32
unterer Wert Rahmenecke

In Bild 7.1 werden zur Erläuterung der nachfolgenden Tabellen die einzelnen auszuwertenden Bereiche der Interaktionskurve beschrieben. Dabei wurde die prinzipielle Interaktionskurve nach Bild 7.1 den Ergebnissen der Berechnungen nach dem Vorschlag in Kapitel 6 angepasst, in dem der Tatsache, dass der Punkt 4 bei keiner der Verbindungen A bis P zu ermitteln war, Rechnung getragen wurde. In den Tabellen selbst ist dieser Bereich der Interaktionskurve zur Vollständigkeit enthalten, musste jedoch nicht bewertet werden. Die Interaktionskurve wird einerseits in Zug- und Druckbereich in Bezug auf die Wirkung der Normalkraft unterteilt.

Andererseits wird die Kurve in weitere Bereiche zwischen den explizit zu berechnenden Punkten aufgesplittet.

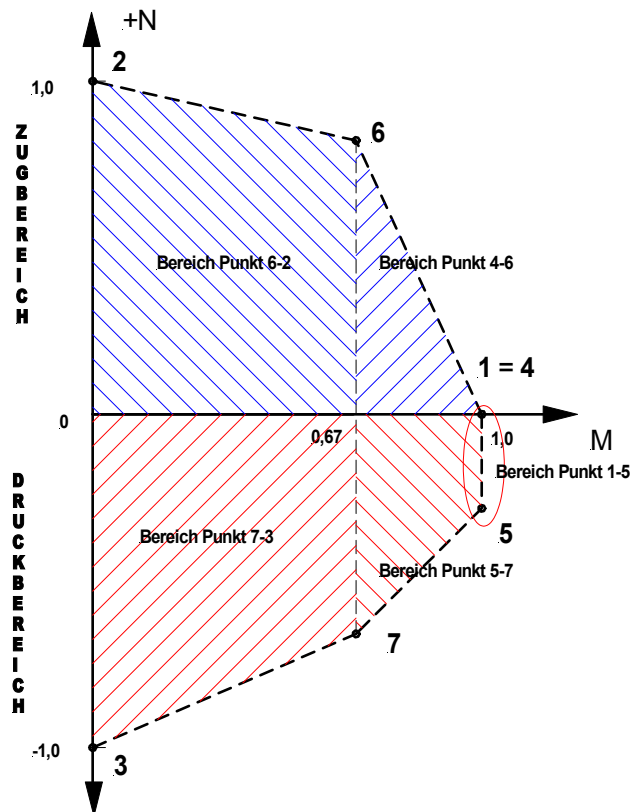


Bild 7.1: Erläuterungen zu den Tabellen 7.2 bis 7.4

In Tabelle 7.2 ist die Auswertung für die Interaktionskurven aus der FE-Berechnung im Vergleich zu einer linearen Interaktionsbeziehung enthalten. In diesem Fall steht die Auswertung sowohl für die quantitativen Interaktionskurven, das heißt mit den exakten Werten, als auch für die normierten Interaktionskurven, da für die linearen Beziehungen jeweils die gleichen Bezugswerte wie für die Erstellung der FE-Kurven bei der Normierung der Diagramme genutzt wurden. Bei dieser Auswertung der Interaktionskurven aus der FE-Berechnung geht es hauptsächlich um die Beschreibung des Aussehens der Interaktionskurve im Vergleich zu einer linearen Beziehung. In der Legende zur Tabelle 7.2 sind die Erläuterungen zu den verwendeten Symbolen enthalten. In Bild 7.2 sind die im Folgenden verwendeten Beschreibungen zur besseren Erläuterung entsprechend bildlich dargestellt.

Bei einer Kurve, welche durch Ergebnisse, die wesentlich größer als die lineare Interaktionsbeziehung sind, dargestellt durch das Symbol „>“, gebildet wird, erhält man eine konvexe, das heißt bauchige, Interaktionskurve. Im Gegensatz dazu ergibt sich eine konkave Interaktionskurve bei Ergebnissen, die sich an die lineare Interaktionskurve annähern.

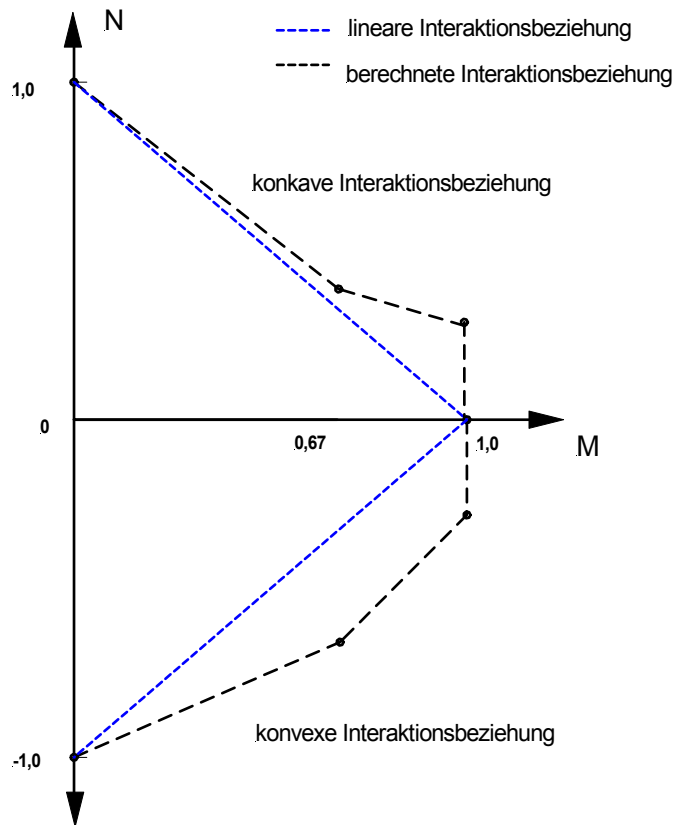


Bild 7.2: Beschreibung der Interaktionskurven

Ergebnisse, die mindestens gleich oder größer der linearen Interaktionsbeziehung sind, bestätigen die Interaktionsvorschläge nach [Pas-02]. Bei konvexen Interaktionsbeziehungen kann die lineare normierte Interaktion unter Duldung von Unwirtschaftlichkeiten, aber als unterste Grenze von Interaktionsbeziehungen auf der sicheren Seite liegend, genutzt werden.

Ein Grund für das Auftreten von konkavem Interaktionsverhalten wird im Aufbau der Interaktionskurve selbst gesehen. Die Punkte 1 bis 3 sowie die Punkte 4 und 5 stellen plastische Grenzbemessungszustände dar. Die beiden Punkte 6 und 7 hingegen werden aufgrund der Momentenordinate dem elastischen Grenzbemessungszustand zugeordnet. Im Zug- und im Druckbereich durchläuft also die Interaktionskurve, ausgehend vom plastischen Grenzmoment am Punkt 1 bzw. 4 oder 5, einen Bereich, der nicht der plastischen Bemessung zugeordnet werden kann. Dieser Bereich ist gekennzeichnet durch die Punkte 6 bzw. 7. Danach allerdings wird wieder zur plastischen Bemessung übergegangen mit Erreichen der plastischen Grenzzug- oder Grenzdruckkraft am Punkt 2 bzw. 3. Allerdings kann bei nicht zusammengesetzten Querschnitten bei der Betrachtung der Grenznormalkraft nicht unterschieden werden zwischen elastisch und plastisch. Das heißt, die Grenznormalkraft eines nicht zusammengesetzten Querschnittes kann sowohl der elastischen als auch der plastischen Bemessung zugeordnet werden. Im Fall der Verbindungen, wo zusammengesetzte Querschnitte (nicht zu verwechseln mit Verbundquerschnitten) beispielsweise im Schnitt II und III auftreten, entspricht nach

Ansicht der Verfasserin die elastische Grenzzugkraft keineswegs der plastischen Grenzzugkraft. Bei der Betrachtung der Grenzdruckkraft unter Ausschluss von Stabilitätsversagen hingegen kann bei den Verbindungen wie bei einem nicht zusammengesetzten Querschnitt von einer Grenzkraft, die sowohl elastisch als auch plastisch ist, ausgegangen werden. Das heißt, aufgrund von gleichmäßigen Stauchungen über den gesamten Querschnitt sowohl im elastischen als auch im plastischen Bereich bei alleiniger Belastung durch eine Normalkraft, gibt es für den Querschnitt keine plastischen Reserven und somit ist die elastische Grenzdruckkraft gleich der plastischen Grenzdruckkraft unter der Voraussetzung, dass vorzeitiges Stabilitätsversagen ausgeschlossen werden kann. Im Punkt 6 und 7 wurde sich jedoch aufgrund der Definition der Momentenordinate für die elastische Grenzdruckkraft und damit für eine elastische Bemessung entschieden. Damit treten einerseits Differenzen in diesem Bereich zwischen den Ergebnissen der Handrechnung und den Ergebnissen der FE-Berechnung auf, da alle Interaktionskurven mit nichtlinearem Materialverhalten berechnet wurden. Andererseits ist diese elastische Bemessung mit einer größeren Sicherheit versehen, da keine Querschnitts- und Systemreserven verbraucht werden.

Tabelle 7.2: Auswertung der Interaktionskurven - Vergleich FE-Berechnung und lineare Beziehung

Verbindung	Vergleich FE und lineare Interaktionsbeziehung					
	Zugbereich Punkt 1-4	Punkt 4-6	Punkt 6-2	Druckbereich Punkt 1-5	Punkt 5-7	Punkt 7-3
A	>	>	>	>	>	>
B	>	>	>	>	>	=
C	>	>	>	>	>	>
D	>	>	>	>	>	>
E	>	>	>	>	>	>
F	>	>	>	>	>	>
G	>	>	>	>	>	>
H	>	>	>	>	>	>
I	>	>	>	>	>	>
K	>	>	>	>	>	>
L	>	>	>	>	>	>
M	>	>	>	>	>	>
N	>	>	>	>	>	>
O	>	>	>	>	>	>
P	>	+/-	>	>	>	>
> oder =		14	15	15	15	15
%		93,3	100,0	100,0	100,0	100,0
%		96,7		100,0		
%		98,3				

Legende: > FE-Wert bzw. FE-Kurve ist größer als Werte der linearen Interaktionsbeziehung
 < FE-Wert bzw. FE-Kurve ist kleiner als Werte der linearen Interaktionsbeziehung
 = beide Ergebnisse sind gleich
 +/- Überschneidung beider Kurven

Beim Vergleich der Ergebnisse aus der FE-Berechnung mit der linearen Interaktionsbeziehung nach Tabelle 7.2 kann festgestellt werden, dass alle Werte der FE-Berechnung im Druckbereich

größer sind. Im Zugbereich ergibt sich nur für eine Verbindung eine geringfügige Überschneidung, alle anderen Werte sind ebenfalls größer als bei einer linearen Interaktionsbeziehung. Es kann somit festgehalten werden, dass der überwiegende Teil der Verbindungen konvexes Interaktionsverhalten aufweist.

Bild 7.3 zeigt am Beispiel der Träger-Stützen-Verbindung D die quantitativen und normierten Interaktionsbeziehungen aus der FE-Berechnung im Vergleich zu einer linearen Interaktionsbeziehung. Wie diese Diagramme aufgestellt wurden, ist in Kapitel 4.2.3 ausführlich beschrieben. Die Interaktionsdiagramme der anderen Verbindungen sind im Anhang D zu finden. In Bild 7.3a und b entspricht die dicke rote Linie der Interaktionskurve, die nach dem Vorschlag in Kapitel 6 berechnet wurde, welche hier jedoch noch nicht von Bedeutung ist. Die kurz gestrichelte blaue Linie stellt die linearen Interaktionsbeziehungen dar, wobei sich die Punkte 1 bis 3 auf die Ergebnisse der FE-Untersuchung beziehen. Die lang gestrichelte schwarze Linie, hier benannt als Umhüllende, beschreibt die Ergebnisse der FE-Berechnungen. Bei den normierten Interaktionsdiagrammen (Bild 7.3b) wurde zusätzlich zum Vergleich die Interaktionsbeziehung nach EC 3-1.8 aufgenommen und durch die grüne gestrichelt punktierte Linie wiedergegeben.

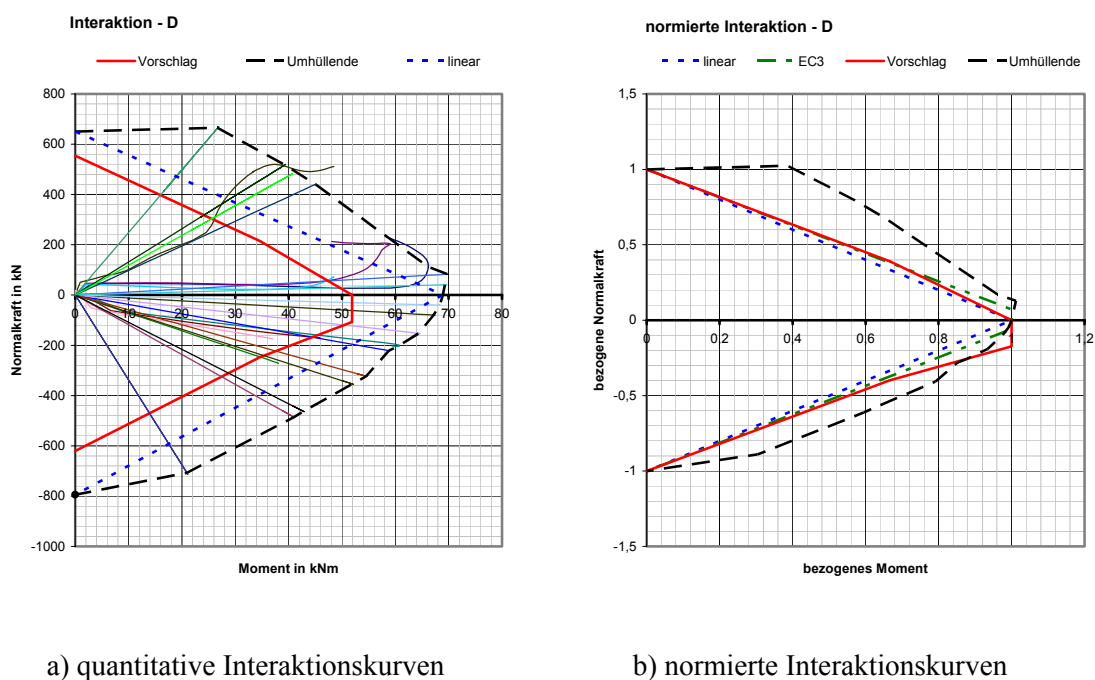


Bild 7.3: Vergleich der Interaktionskurven nach Tabelle 7.2 am Beispiel der Verbindung D

Bei der Auswertung der Berechnungen nach Tabelle 7.3 werden die exakten Werte der FE-Berechnung und des vorgeschlagenen Berechnungsalgorithmus' miteinander verglichen. Daraus ergibt sich bei Werten aus der FE-Berechnung, welche gleich oder größer als die

Ergebnisse des vorgeschlagenen Berechnungsalgorithmus', dass dieser Algorithmus mit den dazugehörigen Gleichungen bestätigt wird. Bei einer Überschneidung der Kurven kann der vorgeschlagenen Berechnungsweise zumindest in Teilen zugestimmt werden. Nach den Ausführungen in Tabelle 7.3 werden im Zugbereich alle Ergebnisse, welche nach Kapitel 6 berechnet wurden, durch die FE-Untersuchung bestätigt. Im Druckbereich weist eine der Verbindungen Überschneidungen der beiden Interaktionskurven nach dem Vorschlag bzw. der FE-Untersuchung auf. Bei Betrachtung des gesamten Druckbereiches ergibt sich somit eine Bestätigung des Bemessungsvorschlages von 95,6 % bzw. bei Betrachtung der gesamten Interaktionsbeziehung eine Bestätigung von 97,8 %. Der Algorithmus kann als nachgewiesen angesehen werden.

Tabelle 7.3: Auswertung der quantitativen Interaktionskurven - Vergleich FE-Berechnung und vorgeschlagene Interaktionsbeziehung nach Kapitel 6.2

Verbindung	Vergleich FE und vorgeschlagene Interaktionsbeziehung					
	Zugbereich Punkt 1-4	Punkt 4-6	Punkt 6-2	Druckbereich Punkt 1-5	Punkt 5-7	Punkt 7-3
A		>	>	>	>	>
B		>	>	>	>	>
C		>	>	+/- <	+/-	>
D		>	>	>	>	>
E		>	>	>	>	>
F		>	>	>	>	>
G		>	>	>	>	>
H		>	>	>	>	>
I		>	>	>	>	>
K		>	>	>	>	>
L		>	>	>	>	>
M		>	>	>	>	>
N		>	>	>	>	>
O		>	>	>	>	>
P		>	>	>	>	>
> oder =		15	15	14	14	15
%		100,0	100,0	93,3	93,3	100,0
%		100,0		95,6		
%		97,8				

Legende:

- > FE-Wert bzw. FE-Kurve ist größer als Werte der vorgeschlagenen Interaktionsbeziehung
- < FE-Wert bzw. FE-Kurve ist kleiner als Werte der vorgeschlagenen Interaktionsbeziehung
- = beide Ergebnisse sind gleich
- +/- Überschneidung beider Kurven

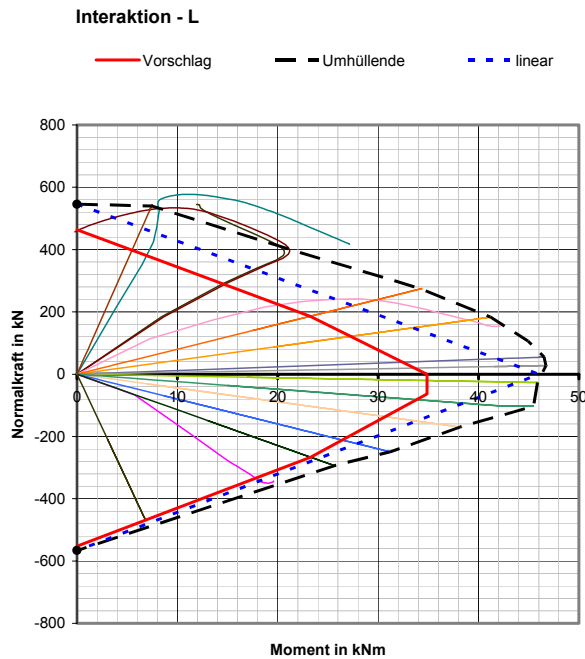


Bild 7.4: Vergleich der Interaktionskurven nach Tabelle 7.3 am Beispiel der Verbindung L

Diese Ergebnisse bestätigen einerseits die Annahmen und Vereinbarungen, welche innerhalb des Vorschlages getroffen wurden und andererseits auch die Aussagen, beispielsweise in [Wey-97] oder [Maq-98], dass die Tragfähigkeiten in Handrechnungsmodellen stets unterschätzt werden aufgrund der Vernachlässigung von Werkstoffverfestigungen und Membraneffekten, die sich innerhalb des Modells ausbilden können.

Die Tabelle 7.4 enthält die Auswertung der normierten Interaktionskurven und vergleicht die Ergebnisse aus der FE-Berechnung mit der Berechnung nach dem Vorschlag von Kapitel 6. Da die beiden normierten Interaktionsbeziehungen verschiedene Bezugswerte besitzen, unterscheidet sich hier die Auswertung der normierten von den quantitativen Interaktionsbeziehungen. Während bei der quantitativen Auswertung die exakten Werte begutachtet wurden, wird bei der Auswertung der normierten Kurven das Interaktionsverhalten an sich bewertet.

Wie in Tabelle 7.4 ersichtlich ist, wurde im Zugbereich mit 93,3 % eine gute Übereinstimmung der Kurven und damit des Interaktionsverhaltens erzielt. Im Druckbereich hingegen unterscheiden sich die Kurven stärker. Es kann im gesamten Druckbereich nur eine Übereinstimmung bzw. Bestätigung von 44,4 % erreicht werden. Für die gesamte Interaktionskurve ergibt sich somit eine Validierung der Ergebnisse des Vorschlages durch die FE-Berechnungen von 68,9 %.

Tabelle 7.4: Auswertung der normierten Interaktionskurven - Vergleich FE-Berechnung und vorgeschlagene Interaktionsbeziehung nach Kapitel 6.2

Verbindung	Vergleich FE und vorgeschlagene Interaktionsbeziehung					
	Zugbereich Punkt 1-4	Punkt 4-6	Punkt 6-2	Druckbereich Punkt 1-5	Punkt 5-7	Punkt 7-3
A	>	>	=	<	<	<
B	> =	> =	+/-	<	<	<
C	>	>	>	<	<	=
D	>	>	>	>	+/-	<
E	>	>	>	<	+/- =	>
F	>	>	>	>	>	+/- =
G	>	>	>	>	>	>
H	>	>	>	<	+/-	>
I	>	>	>	>	>	>
K	>	>	>	<	<	+/-
L	>	>	>	=	+/-	<
M	>	>	>	>	>	>
N	>	>	>	>	>	<
O	>	>	>	>	+/- >	+/- >
P	>	+/-	=	+/-	+/-	>
Auswertung der einzelnen Bereiche						
Anzahl der Verbindungen	> oder =	14	14	8	5	7
proz. Anteil je Abschnitt	%	93,3	93,3	53,3	33,3	46,7
proz. Anteil je Bereich	%	93,3		44,4		
gesamte Int.-Kurve	%	68,89				
Anzahl der Verbindungen	+/-	1	1	1	6	3
proz. Anteil je Abschnitt	%	6,7	6,7	6,7	40,0	20,0
proz. Anteil je Bereich	%	6,7		22,2		
Anzahl der Verbindungen	<	0	0	6	4	5
proz. Anteil je Abschnitt	%	0,0	0,0	40,0	26,7	33,3
proz. Anteil je Bereich	%	0,0		33,3		

Legende:

>	FE-Wert bzw. FE-Kurve ist größer als Werte der vorgeschlagenen Interaktionsbeziehung
<	FE-Wert bzw. FE-Kurve ist kleiner als Werte der vorgeschlagenen Interaktionsbeziehung
=	beide Ergebnisse sind gleich
+/-	Überschneidung beider Kurven
> oder =	Bestätigung der Interaktionskurve
+/-	teilweise Bestätigung der Interaktionskurve
<	keine Bestätigung der Interaktionskurve

In Bild 7.5 wird am Beispiel der Träger-Stützen-Verbindung H der Vergleich der normierten Interaktionsbeziehungen aus FE-Berechnung und vorgeschlagenen Berechnungsalgorithmus' gezeigt. Die beiden normierten Kurven für die lineare Interaktionsbeziehung sowie der Berechnung nach der Interaktionsbeziehung des EC 3-1.8 sind nur der Vollständigkeit halber hier mit angegeben. Die Diagramme für die anderen Verbindungen sind im Anhang D enthalten. Bei der Verbindung H ist beispielsweise für den Bereich zwischen Punkt 1 und Punkt 5 keine Übereinstimmung im Interaktionsverhalten festzustellen. Im Bereich zwischen den Punkten 5 und 7 überschneiden sich beide Kurven und im Bereich von Punkt 7 bis zu Punkt 3 kann das Interaktionsverhalten durch die FE-Berechnung als bestätigt angesehen werden.

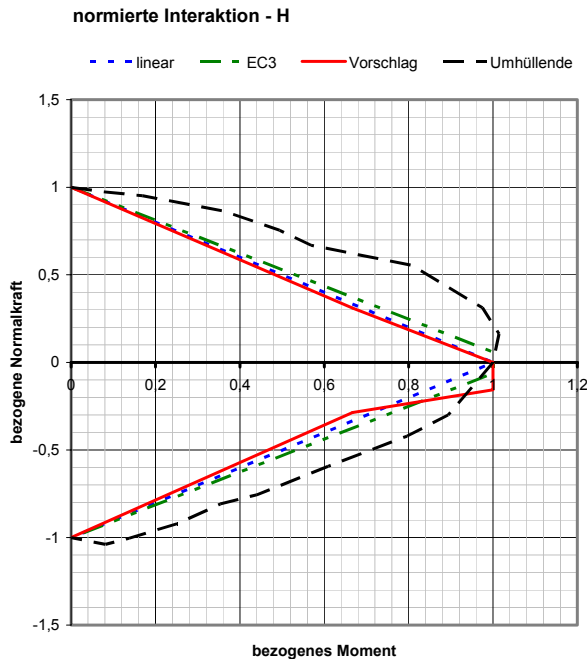


Bild 7.5: Vergleich der Interaktionskurven nach Tabelle 7.4 am Beispiel der Verbindung H

Da die exakten Werte aus der Berechnung nach Kapitel 6 durch die FE-Untersuchungen stets bestätigt werden konnten und die normierten Kurven eine Bestätigung des Interaktionsverhaltens von insgesamt 68,9 % aufweisen, werden die getroffenen Annahmen innerhalb des vorgestellten Bemessungsalgorithmus' als gültig und damit nachgewiesen angesehen. Außerdem ist beim Vergleich zu bedenken, dass die Interaktionskurve bei der „Handrechnung“ nur an ausgewählten Punkten berechnet werden kann, wobei hingegen bei der FE-Berechnung beliebig viele M-N-Verhältnisse untersucht werden konnten.

Wie an den gezeigten Verbindungen in den Bildern 7.3 bis 7.5 auch zu sehen ist, kann die Interaktionsbeziehung nach dem vorgeschlagenen Bemessungsmodell konvexes und konkaves Verhalten aufweisen. Die Verbindung D in Bild 7.3 beinhaltet beide Verhaltensmuster. Im Zugbereich ist die Interaktionskurve konvex und im Druckbereich konkav. Die Verbindung L hingegen weist, wie in Bild 7.4 zu sehen ist, in beiden Bereichen konvexes Interaktionsverhalten auf. Die Verbindung H hingegen steht als Beispiel für eine Verbindung mit konkaven Interaktionsverhalten sowohl im Zug- als auch im Druckbereich. Dieses unterschiedliche und nicht vorhersagbare Interaktionsverhalten der Verbindungen macht es notwendig, die gesamte Kurve unter Berechnung der 7 festgelegten Punkte aufzustellen.

Bei der Betrachtung aller mit der Erweiterung der Komponentenmethode berechneten Verbindungen nach Anhang A und Anhang B tritt allgemein konvexes Interaktionsverhalten häufiger auf als konkaves Interaktionsverhalten. In Tabelle 7.5 sind die Anteile für den Zugbereich und Druckbereich hinsichtlich des Interaktionsverhaltens aufgeschlüsselt. Eine

Aussage dazu, wann welches Interaktionsverhalten auftritt, kann nicht getroffen werden. Bei der relativ kleinen Anzahl der berechneten Verbindungen zeichnete sich keine Tendenz ab.

Tabelle 7.5: Betrachtung des Interaktionsverhaltens

	Zugbereich		Druckbereich		gesamte Interaktionskurve	
konvex	20	55,6 %	27	75 %	47	65,3 %
konkav	16	44,4 %	9	25 %	25	34,7 %
Summe	36	100 %	36	100 %	$2 \times 36 = 72$	100 %

7.2 Anwendung der Erweiterung der Komponentenmethode

Zur Darstellung der Anwendung der vorgestellten Erweiterung der Komponentenmethode wird ein leicht modifizierter Rahmen eines vormals berechneten Projektes genutzt. In Bild 7.6 ist der abgewandelte Rahmen abgebildet. Es wird die linke obere Rahmenecke betrachtet.

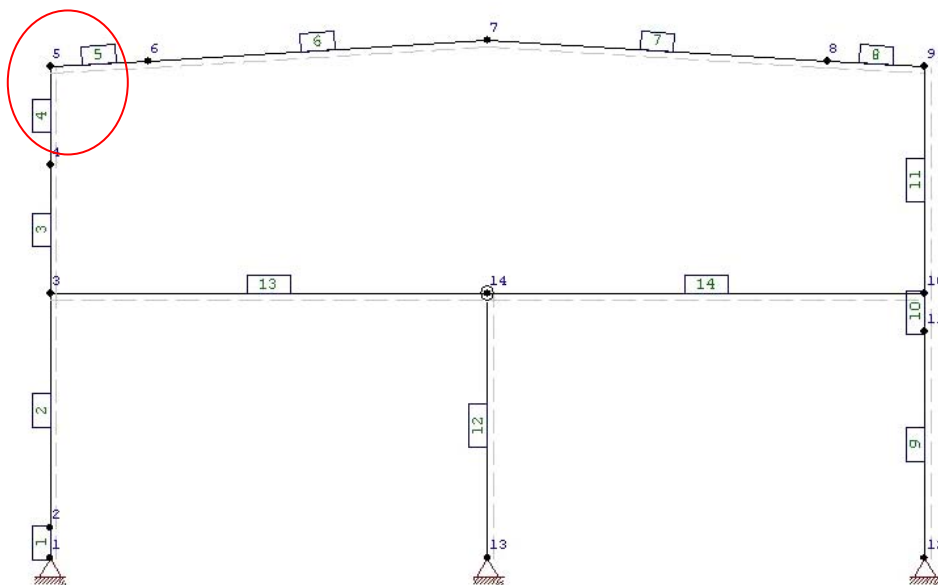


Bild 7.6: Anwendungsbeispiel

Innerhalb des Systems wurden verschiedene Querschnitte und das Material geändert, so dass am Knoten 5 die Träger-Stützen-Verbindung, welche in dieser Rahmenecke auftritt, durch die in Anhang A beschriebene und in Bild 7.7 dargestellte Verbindung E realisiert werden kann.

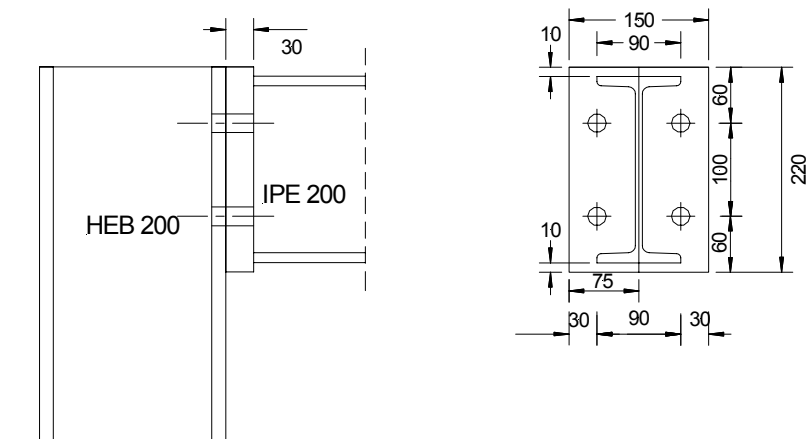


Bild 7.7: Verbindung E

Der Trägerquerschnitt ist ein IPE 200, der Stützenquerschnitt ein HEB 200. Für beide Profile wurde S355 als Werkstoff gewählt.

Die Lastannahmen wurden aus dem Projekt entnommen und sind in Anhang E entsprechend aufgelistet. Die Systemberechnung wurde mit dem Programm Friedrich und Lochner durchgeführt. Die Ergebnisse der vier Lastfälle und aus der min/max Überlagerung enthält ebenfalls der Anhang E.

In Tabelle 7.6 sind die Ergebnisse der Systemberechnung für den Knoten 5 entsprechend aufgeführt. Da der Träger des betrachteten Anschlusses geneigt ist ($\alpha = 3,52^\circ$), müssen die Schnittgrößen nach Abschnitt 6.3.1, Bild 6.35 entsprechend umgerechnet werden. Die für den Nachweis notwendigen Schnittgrößen sind mit dem Indize d versehen. Wie zu sehen ist, muss im vorliegenden Fall nur das Biegemoment entsprechend berechnet werden. Dafür wird die Gleichung (7.1) verwendet.

$$M_d = M + Q \cdot e_{bd} \quad (7.1)$$

Die Exzentrizität beträgt im betrachteten Fall 115 mm. Die Größen sind vorzeichenbehaftet in die Gleichung einzusetzen.

Die Verbindung E ist hinsichtlich der Schraubenanordnung eine symmetrische Verbindung und kann daher für beide Momentenrichtungen genutzt werden. Die Interaktionskurve ist daher auch für beide Momentenrichtungen gleichermaßen gültig. Aufgrund dessen wird innerhalb der Tabelle der Betrag des Schnittmomentes angegeben und die Nachweise werden entsprechend mit dem Betrag des Schnittmomentes geführt.

Die Berechnung der normierten Größen μ und ν wurde durch den Bezug auf die Grenzschnittgrößen der Verbindung durchgeführt. Für den Druckbereich wird dabei auf den Betrag der Grenzschnittgröße Bezug genommen.

$$\mu = \frac{|M_d|}{M_{j.pl.Rd}} \quad (7.2)$$

$$\nu = \frac{N_d}{F_{T.Rd}} \text{ bzw. } \nu = \frac{N_d}{F_{C.Rd}} \quad (7.3)$$

Tabelle 7.6: Ergebnisse der Systemberechnung

Lastfälle	N = N _d	Q = Q _d	M	M _d	|M _d|	μ	ν
Eigenlast	8,08	-22,67	-14,92	-37,475	37,475	0,935	0,017
Wind	-7,01	3,77	24,24	24,67	24,67	0,615	-0,014
Schnee	19,15	-18,11	-27,86	-25,57	25,57	0,638	0,040
Verkehr	-0,043	-6,89	0,68	-0,11	0,11	0,003	0,000
min/max Überlagerung	-43,72	19,87	-27,86	-25,57	25,57	0,638	-0,089

In Bild 7.8 ist die quantitative Interaktionskurve der Verbindung dargestellt. Zusätzlich wurden in das Interaktionsdiagramm die Wertepaare $|M_d|$, N_d für die vier Lastfälle und die min/max Überlagerung eingetragen. Analog dazu wird in Bild 7.9 die normierte Interaktionskurve mit den entsprechenden Wertepaaren μ , ν dargestellt.

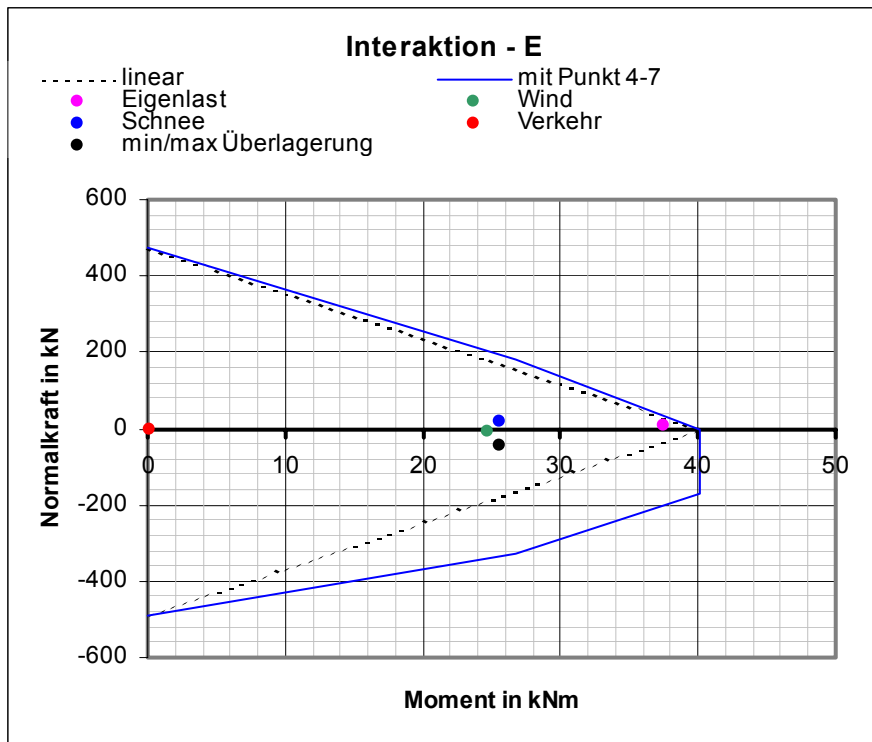


Bild 7.8: Quantitative Interaktionskurve mit Nachweispunkten

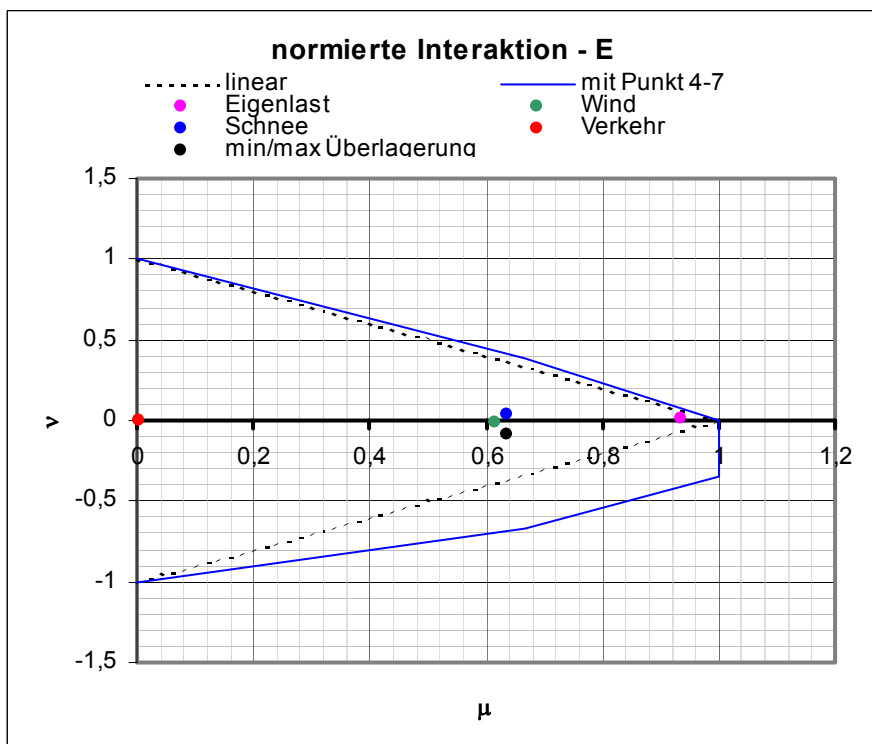


Bild 7.9: Normierte Interaktionskurve mit Nachweispunkten

Wie in beiden Bildern zu sehen ist, konnten alle Wertepaare innerhalb der Interaktionskurve eingetragen werden. Das heißt, die Verbindung konnte für alle Lastfälle und die min/max Überlagerung hinsichtlich der Schnittgrößen Biegemoment und Normalkraft nachgewiesen werden. Im Anschluss daran sind weitere Nachweise für die Verbindung durchzuführen. Dazu gehören beispielsweise Nachweise der Querkraft, wie Abscheren und Lochleibung der Schrauben.

8 Zusammenfassung, Bewertung

Die vorliegende Arbeit beinhaltet einen Vorschlag zur Erweiterung der Komponentenmethode des EC 3-1.8. Im Vorfeld wird dazu auf der einen Seite das Komponentenmodell vorgestellt und auf der anderen Seite die bisherigen Interaktionsbeziehungen näher erläutert.

Die Erweiterung der Komponentenmethode bezieht sich vorrangig auf symmetrische Verbindungen und umfasst zum einen *Regeln und Gleichungen zur Berechnung der Grenznormalkrafttragfähigkeit*. Gemeint ist dabei die Beanspruchung der Verbindung durch eine Normalkraft aus dem angeschlossenen Träger bei einem Biegemoment $M_{y,Ed} = 0$ kNm. Bei der Normalkrafttragfähigkeit muss während der Berechnung zwischen einer Druckkraft und einer Zugkraft unterschieden werden. Zum anderen wird die Komponentenmethode auf der Basis der Gleichungen zur Berechnung der Grenznormalkraft erweitert um Regeln und Gleichungen zur *Bestimmung der Interaktionsbeziehung zwischen Moment und Normalkraft*. Es wird dabei wiederum unterschieden in Druck- und Zugbeanspruchung durch die Normalkraft. Im Unterschied zum Komponentenmodell, wo die Verbindung in einzelne Komponenten aufgesplittet wird, werden nun für die Erweiterung für bestimmte Punkte der Interaktionskurve, aufgrund des Wirkens der Beanspruchung einer Normalkraft, Schnitte definiert, welche zur Berechnung herangezogen werden.

Um die Ergebnisse der „Handrechnung“ zu untermauern, wurden Berechnungen mit der Finiten Elemente Methode durchgeführt. Dabei wurden einerseits einzelne Komponenten, welche maßgebenden Einfluss auf die Verbindung haben, untersucht und hinsichtlich des Interaktionsverhaltens analysiert. Andererseits wurden 15 Verbindungen, 10 Träger-Stützen-Verbindungen und 5 Träger-Träger-Verbindungen, mit finiten Elementen modelliert und den entsprechenden Beanspruchungen unterzogen. Die Ergebnisse der *FE-Untersuchung* dienen dabei nicht zur Bestimmung von Faktoren in den vorgeschlagenen Gleichungen, sondern nur der *Bestätigung des Berechnungsalgorithmus*.

Wenn es um die Bewertung des vorgeschlagenen Berechnungsalgorithmus' für die Interaktionsbeziehung geht, ist zuerst die Bewertungsbasis festzulegen. In Kapitel 3 wurden zwei weitere Interaktionsbeziehungen vorgestellt, eine nach der Norm EC 3-1.8 und die andere nach [Pas-02]. Die Interaktionsbeziehung nach EC 3-1.8 lässt dabei größere Verhältnisse zwischen Moment und Normalkraft in beiden Bereichen – Zug und Druck – zu als die Interaktionsbeziehung nach [Pas-02]. Nach den Ausführungen in Kapitel 3 beinhaltet dies jedoch auch Unsicherheiten in der Bemessung. Daher wird für den Vergleich bzw. für die Bewertung der Ergebnisse auf die lineare Interaktionsbeziehung nach [Pas-02] zurückgegriffen.

In Kapitel 7 wurde im Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Berechnungen festgestellt, dass die Interaktionskurven konkaves und/oder konvexes Aussehen aufweisen können. Diese Beschreibung konvex oder konkav bezieht sich dabei auf eine lineare Interaktionsbeziehung zwischen den Punkten 1 (Grenzmoment) und 2 (Grenzzugkraft) bzw. den Punkten 1 und 3

(Grenzdruckkraft). Aufgrund der Auswertung wird festgelegt, dass *stets die volle Interaktionskurve berechnet* werden muss.

Im Vergleich zu den bisherigen Interaktionsregeln, welche teilweise ohne mechanischen Hintergrund festgelegt wurden, basiert dieser vorgeschlagene Berechnungsalgorithmus für symmetrische Verbindungen auf bereits vorhandenen und damit gültigen Modellen und Annahmen. Im Gegensatz zum EC 3-1.8 bezieht sich die normierte Interaktionskurve auf die berechneten Grenztragfähigkeiten der Verbindung und ist damit letztendlich in der *Berechnung unabhängig von anderen Grenztragfähigkeiten*.

Weitere Untersuchungen zur Interaktion der Schnittgrößen Biegemoment und Normalkraft sind für unsymmetrische Verbindungen (Träger-Stützen-Verbindungen) erforderlich. Bei diesen Verbindungen ergeben sich Normalkrafttragfähigkeiten, welche die Grenznormalkräfte, welche bei $M_{y,sd} = 0$ kNm berechnet werden, übersteigen. Für diese unsymmetrischen Interaktionsbeziehungen, die aus experimentellen Untersuchungen [Sil-00] bekannt sind, müssen gültige Modelle und Annahmen zur Berechnung auf der Grundlage des Komponentenmodells aufgestellt werden.

Die Erweiterung der Komponentenmethode um die Interaktionsbeziehung zwischen Biegemoment und Normalkraft umfasst vorrangig Gleichungen für Profile der Querschnittsklassen 1-3. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und um den vorgeschlagenen Algorithmus auch für Anwender von Profilen der Querschnittsklasse 4 zu eröffnen, sind weitere Untersuchungen mit schlanken Profilen auf der Grundlage der hier gewonnenen Aussagen wünschenswert. Außer der Beachtung der effektiven Querschnittswerte bei Druckbeanspruchung sollte Augenmerk auf überkritisches Tragverhalten gelegt werden, um die Wirtschaftlichkeit schlanker Profile ausnutzen zu können.

In Abschnitt 6.1 wurde anhand von Federmodellen die Notwendigkeit der zu betrachtenden Schnitte erläutert. Außer einer Kombination der Schnittgrößen ist demnach auch eine Kombination der Steifigkeiten – Translationssteifigkeit bei Normalkraftbeanspruchung und Rotationssteifigkeit bei Momentenbeanspruchung – bei gleichzeitigem Auftreten beider Schnittgrößen notwendig. Die Steifigkeit einer Verbindung dient unter anderem der Beschreibung der Nachgiebigkeit und Klassifizierung. Für die Ermittlung einer kombinierten Steifigkeit und das Bereitstellen entsprechender Gleichungen zur Berechnung dieser sind jedoch Versuche und weitere Untersuchungen notwendig. Überlegungen zu den Klassifizierungen wären dann ebenfalls erforderlich.

Formelzeichen

Kapitel 2

			Bezugsquelle:
			EC 3-1.8
$B_{t.Rd}$	...	Grenzzugkraft einer Schraube	Table 3.4
$F_{t.1.Rd}$	...	Schraubenreihenkraft im Versagensmodus 1	Table 6.2
$F_{t.2.Rd}$	...	Schraubenreihenkraft im Versagensmodus 2	Table 6.2
$F_{t.3.Rd}$	...	Schraubenreihenkraft im Versagensmodus 3	Table 6.2
$F_{t.fc.Rd}$	...	Tragfähigkeit der Komponente Stützenflansch und Schrauben unter Zugbeanspruchung	6.2.4.4
$F_{t.ep.Rd}$	...	Tragfähigkeit der Komponente Kopfplatte und Schrauben unter Zugbeanspruchung	6.2.4.5
$F_{t.wc.Rd}$	...	Tragfähigkeit der Komponente Stützensteg unter Zugbeanspruchung	6.2.4.3 Gleichung (6.15)
$F_{c.wc.Rd}$	...	Tragfähigkeit der Komponente Stützensteg unter Druckbeanspruchung	6.2.4.2 Gleichung (6.9)
$F_{c.fb.Rd}$	...	Tragfähigkeit der Komponente Trägerflansch und dazugehöriger Trägersteganteil unter Druckbeanspruchung	6.2.4.7 Gleichung (6.21)
$F_{t.wb.Rd}$	...	Tragfähigkeit der Komponente Trägersteg unter Zugbeanspruchung	6.2.4.8 Gleichung (6.22)
$V_{wp.Rd}$	...	Tragfähigkeit der Komponente Stützensteg unter Schubbeanspruchung	6.2.4.1 Gleichung (6.7)
$M_{pl.1.Rd}$	...	plastisches Moment des Flanschbleches im Versagensmodus 1	Table 6.2
$M_{pl.2.Rd}$	...	plastisches Moment des Flanschbleches im Versagensmodus 2	Table 6.2
$M_{b.Rd}$	...	Momententragfähigkeit des angeschlossenen Trägers	
$M_{j.Rd}$	...	Momententragfähigkeit der Verbindung	6.2.5.2 Gleichung (6.24)

M_{Rd}	...	hier: Momententragsfähigkeit der angeschlossenen Bauteile	
E	...	Elastizitätsmodul	
f_{yk}	...	Streckgrenze	
$S_{j.ini}$	...	Anfangssteifigkeit der Verbindung	6.3.1 Gleichung (6.26)
S_{system}	...	Systemsteifigkeit	
γ_{M0}	...	Teilsicherheitsfaktor	
ε	...	Faktor zur Berücksichtigung der Werkstofffestigkeit	
ω	...	Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung von Schubeinflüssen	Table 6.3
ρ	...	Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung von lokalem Beulen	Gleichung (6.13a), (6.13b)
b_{eff}	...	effektive Lasteintragsbreite (effektive Länge des T-Stoßes)	Gleichung (6.16)
d	...	hier: Breite des Stützenstegbleches	
h_b	...	Profilhöhe des angeschlossenen Trägers	
l_{sp}	...	Spannweite des Rahmens	
m	...	Abstand Anschnitt Steg - Schraubenachse	Table 6.2
n	...	Abstand Blechrand - Schraubenachse	Table 6.2
t_{wc}	...	Dicke des Stützenstegbleches	
t_w	...	hier: Dicke des Stützenstegbleches	
t_{fb}	...	Dicke der Flansche des angeschlossenen Trägers	
t_{wb}	...	Dicke des Trägersteges	
A_{vc}	...	Schubfläche des Stützenquerschnitts	
I_b	...	Trägheitsmoment des angeschlossenen Trägers	

Kapitel 3

Bezugsquelle:
EC 3-1.8

ν, ν_b	...	bezogene Normalkrafttragfähigkeit	
$N_{Sd}, N_{j.Sd}$	...	Normalkraftbeanspruchung (der Verbindung)	
$N_{b.pl.Rd}, N_{b.Rd}$	...	(plastische) Normalkraftbeanspruchbarkeit des angeschlossenen Trägers	
μ	...	bezogene Momententragfähigkeit	
$M_{Sd}, M_{j.Sd}$	...	Momentenbeanspruchung (der Verbindung)	
$M_{j.pl.Rd},$ $M_{j.Rd}$	...	(plastische) Momentenbeanspruchbarkeit der Verbindung	6.2.5.2 Gleichung (6.24)
$N_{j.pl.Rd}, N_{j.Rd}$	...	(plastische) Normalkraftbeanspruchbarkeit der Verbindung	
$V_{pl.y.d}, V_{pl.z.d}$	...	plastische Querkrafttragfähigkeit des Querschnitts	
V_y, V_z	...	Querkraftbeanspruchung	
$M_{pl.y.d},$ $M_{pl.z.d}$	...	plastische Biegemomententragfähigkeit des Querschnitts	
M_y, M_z	...	Biegemomentenbeanspruchung	
$N_{pl.d}$	...	plastische Normalkrafttragfähigkeit des Querschnitts	
N	...	Normalkraftbeanspruchung	

Kapitel 4

σ_{ini}	...	Initialspannung (Vorspannung)
F_{vor}	...	Vorspannkraft
A_{Sp}	...	Spannungsquerschnitt
γ_{Mb}	...	Teilsicherheitsbeiwert für Verbindungsmittel
k	...	Kalibrierungsfaktor
$M_{Rd.Versuch}$	...	Momententragfähigkeit, ermittelt im Versuch

$M_{Rd,FE}$	...	Momententragfähigkeit, ermittelt durch FEM
μ	...	bezogene Momententragfähigkeit
M	...	Momententragfähigkeit bei gleichzeitig wirkender Normalkraft
$M_{Rd}, M_{i,j,Rd}$	...	Grenzmomententragfähigkeit der Verbindung
ν	...	bezogene Normalkrafttragfähigkeit
N	...	Normalkrafttragfähigkeit bei gleichzeitig wirkendem Moment
$N_{Rd}, N_{i,j,Rd}$	...	Grenznormalkrafttragfähigkeit

Kapitel 5

$M_{N,Rd}$	...	Grenzmoment des Rechteckquerschnittes unter Berücksichtigung der Normalkraft-Interaktion
$M_{y,N,Rd}$	...	Grenzmoment des I-Querschnittes unter Berücksichtigung der Normalkraft-Interaktion bei Biegung um die y-Achse
$M_{pl,Rd}$	...	Grenzmoment des Rechteckquerschnittes
$M_{pl,y,Rd}$	...	Grenzmoment des I-Querschnittes bei Biegung um die y-Achse
N_{Sd}	...	Normalkraftbeanspruchung
$N_{pl,Rd}$	...	Grenznormalkraft des Querschnittes
$N_{pl,w,Rd}$	...	Grenznormalkraft des Steges
n	...	Verhältnis von Normalkraftbeanspruchung zu Normalkraftbeanspruchbarkeit
a	...	Verhältnis von Stegfläche zu Gesamtquerschnittsfläche
A	...	Gesamtquerschnittsfläche
A_{Steg}	...	Stegfläche

Kapitel 6

D	...	Druckkraft
F	...	angreifende Kraft, z. B. Normalkraft
$F_{C.Rd}$	...	Tragfähigkeit einer Verbindung unter Druckbeanspruchung
$F_{C/T.I} \dots$	...	Tragfähigkeit des Schnittes I ... IV, unter Druck- bzw. Zugbeanspruchung
$F_{C/T.IV}$		
$F_{C.flb.Rd}$	...	Tragfähigkeit eines Trägerflansches unter Druckbeanspruchung
$F_{C.wb.Rd}$	...	Tragfähigkeit des Trägersteges unter Druckbeanspruchung
$F_{C.b.Rd}$	...	Tragfähigkeit des Trägerquerschnittes unter Druckbeanspruchung
$F_{C.p.Rd}$	...	Tragfähigkeit der Kopfplatte unter Druckbeanspruchung
$F_{C.fl.c.Rd}$	...	Tragfähigkeit des Stützenflansches unter Druckbeanspruchung
$F_{C.wc.Rd}$	...	Tragfähigkeit des Stützenstegbleches unter Druckbeanspruchung
$F_{C.st.Rd}$	...	Tragfähigkeiten der Steifen unter Druckbeanspruchung
$F_{C.maß}$	...	maßgebende Komponente, welche dem Druckbereich zugeordnet werden kann
F_D, F_Z	...	Kräfte des Kräftepaars zur Beschreibung des Grenzmomentes Indize: D = Druck, Z = Zug
F_{eq}	...	äquivalente Kraft aus mehreren Schraubenreihenkräften bei mehreren Schraubenreihen im Zugbereich
F_i	...	maßgebende Kraft der Schraubenreihe i
$F_{maß}$	...	maßgebende Komponententragfähigkeit bei der Berechnung des Grenzmomentes

$F_{T.Rd}$	...	Tragfähigkeit einer Verbindung unter Zugbeanspruchung
$F_{T.flb.Rd}$	...	Tragfähigkeit eines Flansches unter Zugbeanspruchung
$F_{T.wb.Rd}$	...	Tragfähigkeit des Trägersteges unter Zugbeanspruchung
$F_{T.I}$	...	Tragfähigkeit des Schnittes I unter Zugbeanspruchung
$F_{T.b.Rd}$	...	Tragfähigkeit des Trägerquerschnittes unter Zugbeanspruchung
$F_{T.II}$	...	Tragfähigkeit des Schnittes II unter Zugbeanspruchung
$F_{T.ep.Rd}$	...	Tragfähigkeit der Kopfplatte unter Zugbeanspruchung
$F_{TS.gr}$	...	Tragfähigkeit der T-Stöße – Gruppenversagen (Summe)
$F_{TS.ind}$	...	Tragfähigkeit der T-Stöße – individuelles Versagen (Summe)
$F_{TS.komb}$	...	Tragfähigkeit der T-Stöße – kombiniert aus Gruppenversagen und individuellem Versagen
$F_{T.fc.Rd}$	...	Tragfähigkeit Stützenflansches unter Zugbeanspruchung bei geschweißten Verbindungen
$F_{T.maß}$	...	maßgebende Zugkomponente
$F_{\Delta.c}$	...	Differenzkraft zwischen maßgebender Druckkomponente (nicht maßgebende Komponente bei Berechnung des Grenzmomentes) und Druckkraft des Kräftepaars
$F_{\Delta.t}$	...	Differenzkraft zwischen maßgebender Zugkomponente (nicht maßgebende Komponente bei Berechnung des Grenzmomentes) und Zugkraft des Kräftepaars
$F(M_{j.pl.Rd})_{T.Rd}$	...	Normalkrafttragfähigkeit am Punkt 4
$F(M_{j.pl.Rd})_{C.Rd}$	...	Normalkrafttragfähigkeit am Punkt 5
$F(M_{j.el.Rd})_{T.Rd}$	...	Normalkrafttragfähigkeit am Punkt 6

$F(M_{j.el.Rd})_{C.Rd}$	...	Normalkrafttragfähigkeit am Punkt 7
$N_{C.b.Rd}$	...	Tragfähigkeit des Stützenprofils unter Druckbeanspruchung
$N_{C.c.Rd}$	...	Tragfähigkeit des Trägerprofils unter Druckbeanspruchung
$N_{1.C}$	...	mögliche zusätzliche Normalkraft am Punkt 5 durch Betrachtung von Zug- und Druckkomponenten
$N_{1.T}$	...	mögliche zusätzliche Normalkraft am Punkt 4 durch Betrachtung von Zug- und Druckkomponenten
$N_{2.C/T}$	...	mögliche Normalkraft am Punkt 4 bzw. 5 durch Betrachtung der Schubkomponenten
$N_{I(6/7)}$	...	Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt I an den Punkten 6 bzw. 7
$N_{II(6)}$	...	Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt II am Punkt 6
$N_{II(7)}$	...	Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt II am Punkt 7
$N_{III(6)}$	...	Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt III am Punkt 6
$N_{III(7)}$	...	Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt III am Punkt 7
$N_{IV(6)}$	...	Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt IV am Punkt 6
$N_{IV(7)}$	...	Normalkrafttragfähigkeit im Schnitt IV am Punkt 7
R_o, R_u, R_r, R_l	...	Beanspruchung des Stützenstegbleches an der jeweiligen Seite des Stegbleches
$V_{wp.Sd}$	...	resultierende Schubkraft im Stegblech
$V_{c1.Sd}$	...	Querkraft der Stütze unterhalb der Verbindung
$V_{c2.Sd}$	...	Querkraft der Stütze oberhalb der Verbindung
$Z_{n,max}$	...	maximale Schraubenkraft
Z	...	Zugkraft
v_{II}	...	bezogene Normalkraft im Schnitt II
v_{III}	...	bezogene Normalkraft im Schnitt III

$M_{6/7}$	...	Momentenordinate im Punkt 6 bzw. 7
$M_{j.el.Rd}$	...	elastisches Grenzmoment der Verbindung
$M_{j.pl.Rd}$	...	plastisches Grenzmoment der Verbindung
$M_{b1.Sd}$	...	Biegemoment des rechtsseitig angeschlossenen Trägers
$M_{b2.Sd}$	...	Biegemoment des linksseitig angeschlossenen Trägers
M_d, N_d, V_d	...	äußere Beanspruchungen durch den angeschlossenen Träger
M_c, N_c, V_c	...	äußere Beanspruchungen durch die Stütze
c_b	...	Federsteifigkeit des Trägerschnittes
c_{F1}, c_{F2}	...	Federsteifigkeiten der beiden Flansche
c_S	...	Federsteifigkeit des Trägersteges
$S_{j.N}$	...	Translationssteifigkeit
Δl	...	Verformung infolge der angreifenden Kraft
b_c	...	Breite des Stützenprofils (Stützenflansch)
b_D	...	äquivalente Blechdicke der Druckseite
b_{eff}	...	effektiven Lasteintragungsbreite
$b_{eff.c.wc}$	...	effektiven Lasteintragungsbreite des Stützensteges unter Druckbeanspruchung durch den druckbeanspruchten Trägerflansch bei Momentenbeanspruchung
$b_{eff.b.fc}$	...	effektive Lasteintragungsbreite
$b_{eff.wb}$	...	effektive Breite (Höhe) des Trägersteges
$b_{ef.fl.o/u}$	...	Breite der Lastausbreitung durch den oberen/unteren Flansch
$b_{ef.wc}$	...	Breite der Lastausbreitung durch den Steg
$b_{ef.st}$	...	Breite der Lastausbreitung durch die Steifen

$b_{ef.o}$	...	effektive Lasteintragungsbreite durch den Trägerquerschnitt ohne den druckbeanspruchten Trägerflansch bei Trägerbeanspruchung
b_{flb}	...	Breite des Trägerflansches
b_p	...	Breite der Kopfplatte
b_{st}	...	Breite der Steifen
b_{wb}	...	Höhe des Trägersteges
b_z	...	äquivalente Blechdicke der Zugseite
d_{wc}, d	...	Breite des Stützenstegbleches
e_v	...	vertikaler Abstand der Schraubenreihen
h	...	Höhe der Verbindung (Höhe der Kopfplatte)
$h_{ef.wc}$	...	Höhe der Lastausbreitung durch den Steg
$h_{ef.fl.o/u}$	...	Höhe der Lastausbreitung durch den oberen/unteren Flansch
$h_{ef.st}$	...	Höhe der Lastausbreitung durch die Steifen
h_i	...	Hebelarm bzw. Abstand zum Druckzentrum der Schraubenreihe i
h_p	...	Höhe der Kopfplatte
h_R	...	Höhe des Stützenstegbleches bzw. des Trägerstegbleches
h_s, h_S	...	Breite des Stützenstegbleches
h_{steg}, h_{wb}	...	Breite (Höhe) des Trägersteges
m_V	...	Anzahl der vertikalen Schraubenreihen
r_b	...	Walzradius des Trägerprofils
s	...	Stegdicke des angeschlossenen Profils
$t_{ef.w}$	...	Breite der Lastausbreitung durch Steg
t_{flb}	...	Dicke des Trägerflansches

$t_{fb.o/u}$	...	Dicke des oberen/unteren Flansches
t_{flc}	...	Dicke des verbindungsseitigen Stützenflansches
t_p	...	Dicke der Kopfplatte
t_w, t, t_{wc}	...	Dicke des Stützenstegbleches
t_{wb}	...	Dicke des Trägersteges
t_{st}	...	Dicke der Steifen
$\ddot{u}_{o/u}$	...	oberer/unterer Überstand der Kopfplatte
x	...	Höhe der Druckzone
y	...	Höhe der Zugzone
z	...	Hebelarm der maßgebenden Komponente bzw. Abstand zwischen den beiden Kräften F_D und F_Z
z_{eq}	...	äquivalenter Hebelarm bei mehreren Schraubenreihen im Zugbereich
z_I	...	Abstand zur maximal beanspruchtesten Faser im Schnitt I
z_{II}	...	Abstand zur maximal beanspruchtesten Faser im Schnitt II
z_{III}	...	Abstand zur maximal beanspruchtesten Faser im Schnitt III
ξ	...	bezogene Druckzonenhöhe
A_b	...	Querschnittsfläche des gesamten Trägers je nach Querschnittsklasse
$A_{ef.p}$	...	gesamte Lastausbreitungsfläche in der Kopfplatte unter Druckbeanspruchung
$A_{ef.1}$	...	Lastausbreitungsfläche des oberen Flansches in der Kopfplatte unter Druckbeanspruchung
$A_{ef.2}$	...	Lastausbreitungsfläche des unteren Flansches in der Kopfplatte unter Druckbeanspruchung
$A_{ef.3}$	...	Lastausbreitungsfläche des Steges in der Kopfplatte unter Druckbeanspruchung

Bezugsquelle:
EC 3-1.8

$A_{ef.c}$	...	gesamte Lastausbreitungsfläche im Stützenflansch unter Druckbeanspruchung
$A_{ef.wc}$	...	Lastausbreitungsfläche des Steges im Stützenflansch unter Druckbeanspruchung
$A_{ef.st}$	...	Lastausbreitungsfläche der Steifen im Stützenflansch unter Druckbeanspruchung
A_{st}	...	Querschnittsfläche aller Steifen
A_{fl}	...	Querschnittsfläche eines Flansches
$A_{net.fl}$	...	Nettoquerschnittsfläche eines Flansches (Abzug von Löchern oder Ausschnitten)
A_{sch}	...	Schaftquerschnittsfläche einer Schraube
A_I	...	Querschnittsfläche des Querschnitts im Schnitt I = Querschnittsfläche des Trägerquerschnitts
A_{II}	...	Querschnittsfläche des Querschnitts im Schnitt II = Querschnittsfläche der Kopfplatte
A_{III}	...	Querschnittsfläche des Querschnitts im Schnitt III = Querschnittsfläche des Stützenflansches (innerhalb der Höhe der Kopfplatte)
$I_{y.I}$	...	Trägheitsmoment des Querschnitts im Schnitt I = Trägheitsmoment des Trägerquerschnitts
$I_{y.II}$	...	Trägheitsmoment des Querschnitts im Schnitt II = Trägheitsmoment der Kopfplatte
$I_{y.III}$	...	Trägheitsmoment des Querschnitts im Schnitt III = Trägheitsmoment des Stützenflansches (innerhalb der Höhe der Kopfplatte)
n_{st}	...	Anzahl der Steifen
ω_1	...	Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung von Schubeinflüssen

Table 6.3

ρ	...	Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung lokaler Instabilitäten (Druckbeulen)	Gleichung (6.13a), (6.13b)
$\bar{\lambda}_p$	...	bezogener Schlankheitsgrad	Gleichung (6.13c)
k_{wc}	...	Faktor zur Berücksichtigung der Stützenlängskraft	Gleichung (6.14)
γ_{M2}	...	Teilsicherheitsfaktor für das Versagen auf Zug von Nettoquerschnitten = 1,25	
ε	...	Faktor zur Berücksichtigung der Werkstofffestigkeit	
$f_{y.wb}$	...	Streckgrenze des Trägersteges	
$f_{u.wb}$	...	Zugfestigkeit des Trägersteges	
f_{yk}/γ_{M0}	...	Bemessungswert der Streckgrenze	
σ	...	vorhandene Normalspannung	
σ_D	...	Randdruckspannung	
σ_{Rd}	...	Grenznormalspannung	
σ_Z	...	Randzugspannung	
τ	...	Schubspannung im Stegblech	
τ_{Rd}	...	Grenzschubspannung	

Literaturverzeichnis

- [ABA-00] **ABAQUS** User's Manuel, Vol. I bis III, Version 5.8, Hibitt, Karlson & Sorensen Inc., 2000
- [Bur-97] **Bursi, O. S., Jaspert, J.-P.:** Bench-mark for Finite Element Modelling of bolted steel connections, Journal of Construction Steel Research, Vol. 43 (1997), S. 17-42, 1997
- [CISM 00] Semi-rigid joints in structural steelworks, CISM, No. 419, Springer-Verlag, 2000
- Part I: **Ivanyi, M.:** "Semi-rigid Connections in Steel Frames"
- Part II: **Jaspert, J.-P.:** "Integration of the joint actual behaviour into the frame analysis and design process"
- Part III: **Kuhlmann, U., Kühnemund, F.:** "Procedures to verify rotation capacity"
- Part IV: **Wald, F.:** "Column base modelling"
- Part V: **Baniotopoulos, C. C.:** "Numerical Simulation: Principles, Methods and Models"
- [DASt 01] / **DStV/DASt:** Typisierte Verbindungen im Stahlhochbau, Stahlbau-Verlags
[DASt 84] GmbH, Köln, 1984 (neu bearbeitete Auflage 2001)
- [Fae-98] **Faella, C., Piluso, V., Rizzano, G.:** "Experimental analysis of bolted connections: Snug versus preloaded bolts", Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No. 7, July 1998
- [Höß-92] **Höß, P.:** Optimierung von Stockwerkrahmen aus Stahl mit biegesteifen und biegeweichen Rahmenknoten. Dissertation. November 1992, Uni Karlsruhe
- [Jas-97] **Jaspert, J.-P.:** Recent Advances in the field of steel joints. Column bases and further configurations for beam-to-column joints and beam splices, Department MSM, University of Liege, 1997
- [Jas-99] **Jaspert, J.-P.:** Recent Advances in the field of structural steel joints and their representation in the building frame analysis and design process. European Commission, Brüssel, 1999
- [Jas-99a] **Jaspert, J.-P., Braham, M., Cerfontaine, V.:** Strength of joints subjected to combined action of bending moments and axial forces. Proceedings Volume 2, S. 465-468, EUROSTEEL, Prag, 1999

- [Kin-03] **Kindmann, R., Stracke, M.:** Verbindungen im Stahl- und Verbundbau, Ernst und Sohn Verlag, 2003
- [Ku-01] **Kuhlmann, U., Kühnemund, F.:** Komponente „Stützensteg auf Druck“ – Traglast unter Berücksichtigung einer Stützennormalkraft, Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Valtinat, TU Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Stahlbau und Holzbau, September 2001, S. 291-300
- [Len-87] **Lener, G.:** “Design of space steel frames with non-linear joint behaviour with regard to normal force-interaction”, Institute of Steel and Timber Construction, University Innsbruck, 1987
- [Maq-98] **Maquoi, R., Chabrolin, B.:** Frame design including joint behaviour. Final report, European Communities, Luxembourg, 1998
- [N 1] **Eurocode 3 – ENV 1993-1-1:** „Design of steel structures Part 1.1: General rules and rules for buildings”, CEN, Brussels, February 1992
- [N 2] **Eurocode 3 – New Revised Annex J:** Joints in Building Frames, ENV 1993-1-1, 1994
- [N 3] **Eurocode 3, Teil 1-8:** „Berechnung und Bemessung von Anschlüssen“, prEN 1993-1-8, Februar 2004
- [N 4] **DIN 18800 – Teil 1:** „Stahlbauten – Bemessung und Konstruktion“, November 1990
- [N5] **DIN 18800 – Teil 7 :** „Stahlbauten – Ausführung und Herstellerqualifikation“, September 2002
- [Pas-02] **Pasternak, H., Schwarzlos, A.:** M-N-Interaktion bei nachgiebigen Verbindungen für Eurocode 3. Abschlußbericht, DIBt, Feb. 2002
- [Pas-98] **Pasternak, H., Katula, L., Kocker, R.:** Zur Berechnung geschraubter Verbindungen nach Eurocode 3, Annex J, BBIT-Tagungsunterlagen, 1998
- [Pet-88] **Petersen, C.:** Stahlbau, 2. verbesserte Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 1988
- [S 1] **CoP – Software**
- [Schi-69] **Schineis, M.:** Vereinfachte Berechnung geschraubter Rahmenecken, Bauingenieur 44 (1969), S.439-449
- [Schw-00] **Schwarzlos, A.:** “Untersuchung des Einflusses der Vorspannung auf T-Stöße”, KTB, Bauingenieur 5/2000, S. 231-233
- [Sil-00] **Silva, L. S., Coelho, A. G.:** A analytical evaluation of the response of steel joints under bending and axial force. Computers & Structures, vol. 79 (2000), S. 873-881

- [Sok-02] **Sokol, Z., Wald, F., Delabre, V., Muzeau, J. P., Svarc, M.:** Design of end plate joints subject to moment and normal force, Eurosteel 2002, Proceedings Volume II, S. 1219-1228
- [Ste-94] **Steenhuis, M., Dol, C., van Gorp, L.:** Computerised calculation of force distributions in bolted end-plate connections according to EC 3. Journal of Constructional Steel Research, vol. 31, no. 1, 1994, pp. 135-144
- [Stü-71] **Stüssi, F.:** Grundlagen des Stahlbaus, 2. neubearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1971
- [Thi-97] **Thiele, A., Lohse, W.:** Stahlbau, Teil 2, B. G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, 1997
- [Tsc-99a] **Tschernernegg, F. F., Angerer, Th., Frischhut, M.:** Bemessungshilfen für nachgiebige Stahlknoten mit Stirnplattenanschlüssen, Stahlbau-Kalender 1999, Kapitel 5, S. 457-514, Verlag Ernst & Sohn
- [Vay-00] **Vayas, I.:** Interaktion der plastischen Grenzschnittgrößen doppelt-symmetrischer I-Querschnitte, Stahlbau 69 (2000), Heft 9, S. 693-706
- [Wal-03] **Wald, F. (Editor):** Design of structural connections to Eurocode 3 – Frequently asked questions, Building Research Establishment Ltd., Watford, 2003
- [Wan-97] **Wanzek, T.:** Zu Theorie, Numerik und Versuchen verformbarer Anschlusskonstruktionen. Universität der Bundeswehr München, Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau 97/7
Dissertation
- [Wey-01] **ECCS:** Column bases. Internet-Dokument
Klaus Weynand, RWTH Aachen
Eccs Tc10 // Cost C1 Document
Column Bases In Steel Building Frames
<http://www.bwk.tue.nl/bko/research/ArchEng/eccstc10/baseplates.pdf>
- [Wey-95] **Weynand, K., Jaspert, J.-P., Steenhuis, M.:** The stiffness model of revised Annex J to Eurocode 3. Connections in Steel Structures III: Behaviour, Strength and Design. The 3rd Int. Workshop on Connections in Steel Structures, Trento, Italy, 1995
- [Wey-97] **Weynand, K., Feldmann, M., Sedlacek, G.:** Nachgiebige Anschlüsse im Stahlbau: Modell nach Eurocode 3, Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen. Stahlbau 66 (1997), Heft 11, S. 770-781, Ernst & Sohn Verlag

- [Zoe-74] **Zoetemeijer, P.:** A design method for the tension side of statically loaded, bolted beam to column connections, Heron, Volume 20, No. 1, Delft, Netherlands, 1974
- [Zoe-83] **Zoetemeijer, P.:** Samenvatting van het onderzoek op geboude balkkolom verbindingen – Summary of the research on bolted beam-to-column connections. TH Delft. 1983

Weiterführende Literatur

- [Ahm-97] **Ahmed, B., Nethercot, D.:** Prediction of initial stiffness and available rotation capacity of major axis composite flush endplate connections, JCSR, Vol. 41, Nr. 1 (1997), S. 31-60
- [Bel-01] **Belica, A.:** Fixed column bases in Astron structures, Konferenz in Espoo, Finnland
auch: Eingespannte Auflager im Rahmenleichtbau. Bauingenieur 76 (2001), S. 198-202
- [Bra-98] **Braham, M., Cerfontaine, F., Jaspert, J. P.:** Wirtschaftliche Ausführung von Verbindungen geschweisster Vollwandträger nach EC 3. Festschrift Joachim Lindner, März 1998, pp. 77-86
- [Bur-97a] **Bursi, O., Jaspert, J. P.:** Calibration of a finite element model for isolated bolted end plate steel connections. Journal of construction Steel Research, Vol. 44, No. 3, S. 225-262, 1997
- [Cer-02] **Cerfontaine, F., Jaspert, J. P.:** Analytical study of the interaction between bending and axial force in bolted joints, Eurosteel 2002, Proceedings Volume II, S. 997-1006
- [Dur-00] **Duricove, A., Rovnak, M., Ivanco, V.:** Effect of endplate joint constructional arrangement on its rigidity. 19. Ceska a Slovenska medzinarodna Konferencia, 2000
- [Erm-91] **Ermopoulos, I., Vayas, I.:** Zum Nachweis von Rahmentragwerken mit verformbaren Knoten, Stahlbau 60 (1991), S. 326-332
- [Fae-00] **Faella, C., Piluso, V., Rizzano, G.:** Plastic deformation capacity of bolted t-stubs: Theoretical analysis and testing, in F. Mazzolani (ed.) Moment resisting connections of steel building frames in seismic areas, E & FN SPON, 2000, S. 147-164

- [Fae-00a] **Faella, C., Piluso, V., Rizzano, G.:** Structural steel semirigid connections, Theory Design and Software, CRC Press, 2000
- [Fel-95] **Feldmann, M., Sedlacek, G., Weynand, K.:** Safety considerations of Anhang J of EC 3. Hintergrundbericht zum Eurocode 3: Teil 1.1, Annex J. The 3rd Int. Workshop on Connections in Steel Structures, Trento, Italy, 1995
- [Fel-99] **Feldmann, M., Kong, B.-S.:** Träger-Stützenanschlüsse aus S460 und S355 – Versuche und Finite-Elemente-Untersuchungen. Stahlbau 68 (1999), Heft 3, S. 204-211, Ernst & Sohn Verlag
- [Geb-97] **Gebbeken, N., Wanzek, T., Petersen, C.:** Semi-rigid connections T-Stub Modelle – Versuchsbericht – Report on experimental investigations. Universität der Bundeswehr München, Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau 97/2 deutsch und englisch
- [Gio-00] **Gioncu, V., Mateescu, G., Petcu, D., Anastasiadi, A.:** Prediction of available ductility by means of local plastic mechanism method, in F. Mazzolani (ed.) Moment resisting connections of steel building frames in seismic areas, E & FN SPON, 2000, S. 95-146
- [Hed-92] **Hedekamp, A.:** Zur wirklichkeitsnahen Berechnung von Stirnplattenstößen des Stahlbaus unter schwingender Biegemomentenbeanspruchung. Dissertation, Hannover 1992
- [Hot-91] **Hotz, R.:** Bessere Ausnutzbarkeit von typisierten Verbindungen.
Teil 1 - Stahlbau 60 (1991), S. 235-239
Teil 2 - Stahlbau 61 (1992), S. 365-369
- [Hub-98] **Huber, G., Tschemmernegg, F.:** Modelling of beam-to-column joints, JCSR, Vol. 45, Nr. 2 (1998), S. 199-216
- [Kin-02] **Kindmann, R., Frickel, J.:** Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit, Ernst und Sohn Verlag, 2002
- [Kle-85] **Klein, H.:** Elastic-plastic moment-rotation behaviour of welded beam-to-column joints without stiffeners”, Institute of Steel and Timber Constructions, University Innsbruck, 1985
- [Lim-01] **Lima, L., Silva, L. S., Vellasco, P., Andrade, S.:** Experimental behaviour of flush endplate beam-to-column joints under bending and axial force. Meeting in Timisoara, October 2001
- [Maz-00] **Mazzolani, F. M.:** Seismic resistant steel structures, CISM, No. 420, Springer-Verlag, 2000

- [Pas-01] **Pasternak, H., Schwarzlos, A.:** Bemessung hallenbautypischer Verbindungen, DASt 03/2001, Stahlbau Verlags- und Service GmbH Düsseldorf, AiF-Projekt, 2001
- [Pas-93] **Pasternak, H.:** „Knee joints with thin webs. Carrying behaviour, local and global analysis. TU Budapest, Dept. of Steel structures, Technical Report, pp. 187-197, Budapest 1993
- [Pas-94] **Pasternak, H., Horvath, L., Katula, L.:** Approximation of the moment-rotation characteristic of knee joints with thin webs in single-storey buildings. 16th Czech and Slovak international conference, Bratislava, September 1994
- [Pas-99] **Pasternak, H., Katula, L., Kocker, R.:** Dürfen nachgiebige Verbindungen zyklisch beansprucht werden?
Pasternak, H., Katula, L.: Kranbahnkonsole-Stütze-Verbindungen für den leichten Kranbetrieb. Bauingenieur 74 (1999), Heft 10, S. 432-437
- [Scha-00] **Schaumann, P., Seidel, M.:** Zur Grenztragfähigkeit von Verbindungen mit planmäßig auf Zug beanspruchten Schrauben. Bauingenieur 75 (2000), S. 637-645. Springer-Verlag
- [Sche-91] **Scheer, J., Pasternak, H., Schween, T.:** Zum Tragverhalten ausgesteifter Rahmenecken mit schlanken Stegen, Stahlbau 60 (1991), Heft 2, S. 41-48, Ernst & Sohn Verlag
- [Sche-93] **Scheer, J., Pasternak, H., Schween, T.:** Experimental investigations of beam to column joints with slender webs under cyclic loading. Report No. 6137, Inst. für Stahlbau, TU Braunschweig 1993
- [Schi-67] **Schneis, M.:** Biegestäbe mit Federgelenken (geschraubte Rahmenecken, Stirnplattenstöße) und ihre Behandlung bei den Momentenausgleichsverfahren, Bauingenieur 42 (1967), S. 244-250
- [Schw-99] **Schwarzlos, A.:** „Analytische Untersuchungen des Einflusses der Vorspannung auf Kopfplattenverbindungen“, Diplomarbeit, BTU Cottbus, Lehrstuhl für Stahlbau, September 1999
- [Schwe-93] **Schween, T.:** Zum Last-Verformungsverhalten von stählernen Rahmenecken mit schlanken Stegblechen. Dissertation. TU Braunschweig, 1993
- [Sed-00] **Sedlacek, G.:** Plastische Bemessung von Stirnplatten-Anschlüssen mit 4 Schrauben in einer Reihe. Forschungsbericht 5/2000, DASt, Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH
- [Sed-95] **Sedlacek, G., Weynand, K.:** Untersuchungen zur Festlegung sicherer Regeln für die Bemessung von Tragwerken mit verformbaren Anschlüssen. Abschlußbericht, DIBt, 1995

-
- [Sil-00] **Silva, L. S., Coelho, A. G., Neto, E.:** Equivalent post-buckling models for the flexural behaviour of steel connections. *Comput Struct* 2000, 77:615-24
- [Sil-01] **Silva, L. S., Santiago, A., Real, P. V.:** Post limit stiffness and ductility of endplate beam-to-column steel joints, *Computers & Structures* 80 (2001), S. 515-531
- [Tsc-99] **Tschammernegg, F.:** Die Mischbauweise – eine Bautechnologie für die Zukunft, *Stahlbau* 68 (1999), S. 155-160
- [Vay-03] **Vayas, I., Zupanic, E., Beg, D.:** Rotationskapazität von Knoten in Rahmen aus Stahl – Verformbarkeit der Komponenten, *Bauing.* 78 (2003), Heft 1, S. 44-52
- [Vay-93] **Vayas, I., Briassoulis, D.:** Behaviour of thin-walled steel frame joints. *Constructional Steel Res.* 24 (1993) S. 105-119
- [Vay-94] **Vayas, I., Pasternak, H., Schween, T.:** Beanspruchbarkeit und Verformung von Rahmenecken mit schlanken Stegen. *Bauingenieur* 69 (1994), S. 311-317, Springer-Verlag
- [Wal-94] **Wald, F.:** COST 1, Semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections, proceedings of the second state of the art workshop, Prag, Oktober 1994
- [Wan-98] **Wanzek, T., Gebbeken, N.:** Versuche und numerische Berechnungen für geschraubte Kopfplattenanschlüsse. *Bauingenieur* 73 (1998), S. 512-519
- [Wey-02] **Weynand, K., Hüller, V., Schulte, U.:** Zur Bemessung typisierter Anschlüsse, www.psp-tech.de/publikationen.htm, 2002
- [Yee-86] **Yee, Y. I., Melcher, R. E.:** Moment-rotation curves for bolted connections, *Journal of Structural Engineering*, 112:3, 1986, 615-635

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1:	Rahmen nach [N 3]	1
Bild 1.2:	T-Stoß	2
Bild 1.3:	Komponentenmodell	3
Bild 2.4:	Komponentenmodell	6
Bild 2.5:	Beanspruchungsbereiche und Komponenten	7
Bild 2.6:	Stützenflansch und Schrauben unter Zugbeanspruchung	8
Bild 2.7:	Hinterlegte Platte	9
Bild 2.8:	Kopfplatte und Schrauben unter Zugbeanspruchung	9
Bild 2.9:	Stützensteg unter Zugbeanspruchung	10
Bild 2.10:	Stützensteg unter Druckbeanspruchung	10
Bild 2.11:	Stützensteg unter Schubbeanspruchung	11
Bild 2.12:	Trägerflansch und Trägersteganteil unter Druckbeanspruchung	11
Bild 2.13:	Trägersteg unter Zugbeanspruchung	12
Bild 2.14:	Grenzen für die Klassifizierung nach der Steifigkeit	13
Bild 2.15:	Grenzen für die Klassifizierung nach der Tragfähigkeit	13
Bild 2.16:	Klassifizierung nach der Rotationsfähigkeit	14
Bild 2.17:	System und Lasten	16
Bild 2.18:	Momentenverlauf bei gelenkigen Träger-Stützen-Verbindungen	16
Bild 2.19:	Momentenverlauf bei nachgiebigen Träger-Stützen-Verbindungen	16
Bild 2.20:	Momentenverlauf bei biegesteifen Träger-Stützen-Verbindungen	17
Bild 3.1:	Normalspannungsverteilungen an einem Querschnitt	19
Bild 3.2:	Interaktionsbeziehung bei zweiachsiger Biegung und Normalkraft nach DIN 18800-1, Elm. (757)	20
Bild 3.3:	Berücksichtigung der Normalkraft nach EC 3, Annex J	22
Bild 3.4:	Berücksichtigung der Normalkraft und Interaktion nach EC 3-1.8	23
Bild 3.5:	Interaktion nach DIBt-Vorschlag [Pas-02]	24
Bild 4.1:	Gruppe aus zwei Träger-Stützen-Verbindungen und einer Träger-Träger-Verbindung	28

Bild 4.2:	Ausdehnung der Verbindungsknoten	29
Bild 4.3:	Anwendung von drei- und viereckigen Schalenelementen bei der Modellierung der Kopfplatten	30
Bild 4.4:	Anwendung der Elemente nach Tabelle 4.2 bei Träger-Träger-Verbindungen	32
Bild 4.5:	Anwendung der Elemente nach Tabelle 4.2 bei Träger-Stützen-Verbindungen	32
Bild 4.6:	Verwendetes Koordinatensystem	33
Bild 4.7:	Momentenverlauf und mögliches Rahmensystem	34
Bild 4.8:	Interaktionsdiagramm mit Vorzeichenzuordnung	34
Bild 4.9:	Gewählte Schnittgrößendefinitionen	34
Bild 4.10:	Interaktionsdiagramm für Träger-Träger-Verbindungen	35
Bild 4.11:	Interaktionsdiagramm für Träger-Stützen-Verbindungen	35
Bild 4.12:	Spannungs-Dehnungslinie (Grundwerkstoff)	36
Bild 4.13:	Materialkennlinie für das Schraubenmaterial	36
Bild 4.14:	Schweißverbindung 108.015 und statisches System	38
Bild 4.15:	FE-Modell	38
Bild 4.16:	Vergleich der Momenten-Rotations-Charakteristiken	39
Bild 4.17:	Versagenszustand –Vergleichsspannung (von Mises) in N/mm^2	40
Bild 4.18:	Diagramm mit Schar von Interaktionskurven	41
Bild 4.19:	Diagramm mit aufgestellten Interaktionskurven	42
Bild 4.20:	Erläuterung zu Gleichung (4.4)	43
Bild 4.21:	Diagramm mit normierten Interaktionskurven	44
Bild 5.1:	Tragfähigkeiten der Komponenten einer Träger-Träger-Verbindung	45
Bild 5.2:	Tragfähigkeiten der Komponenten einer Träger-Stützen-Verbindung	46
Bild 5.3:	Steifigkeitskoeffizienten der Komponenten einer Träger-Träger-Verbindung	47
Bild 5.4:	Steifigkeitskoeffizienten der Komponenten einer Träger-Stützen-Verbindung	48
Bild 5.5:	Momenten-Rotations-Charakteristiken einzelner Komponenten nach [CISM 00]	49
Bild 5.6:	Einfluss einzelner Komponenten auf die Rotationskapazität der Verbindung nach [CISM 00]	49
	Fortsetzung Bild 5.6: Einfluss einzelner Komponenten auf die Rotationskapazität der Verbindung nach [CISM 00]	50

Bild 5.7:	Trägerquerschnitt mit Biegemoment und Normalkraft	51
Bild 5.8:	Interaktionskurven für verschiedene Trägerquerschnitte	53
Bild 5.9:	Struktogramm zur Interaktion mit Berücksichtigung des Querkrafteinflusses am Trägerquerschnitt	54
Bild 5.10:	Diagramm zur Interaktion mit Berücksichtigung des Querkrafteinflusses am Trägerquerschnitt (Berechnung entsprechend Struktogramm nach Bild 5.9)	55
Bild 5.11:	Kopfplatte und Schrauben mit Biegemoment und Normalkraft (Beispiel)	56
Bild 5.12:	Interaktionskurve für die Komponente Kopfplatte mit Schrauben	56
Bild 5.13:	Kopfplatte mit Biegemoment und Normalkraft	57
Bild 5.14:	Interaktionskurve für die Komponente Kopfplatte	58
Bild 5.15:	Komponente Stützensteg mit Stützennormalkraft, Biegemoment und Trägernormalkraft	59
Bild 5.16:	Interaktionskurven für Komponente Stützensteg ohne Stützennormalkraft	60
Bild 5.17:	Interaktionskurven für Komponente Stützensteg (IPE-Profil) mit Stützennormalkraft	61
Bild 5.18:	Interaktionskurven für Komponente Stützensteg (HEM-Profil) mit Stützennormalkraft	61
Bild 6.1:	Dehnungs-, Spannungs- und Kräfteverteilungen im Vergleich	64
Bild 6.2:	Schnitte für die Berechnung der Normalkrafttragfähigkeit bei Träger-Stützen-Verbindungen	65
Bild 6.3:	Ablauf der Berechnung der Normalkrafttragfähigkeit	68
Bild 6.4:	Schnitt I durch den Träger bei Normalkraftbeanspruchung	68
Bild 6.5:	Federmodell für Schnitt I	69
Bild 6.6:	Reihenschaltung bei einer unsymmetrischen Träger-Träger-Verbindung	70
Bild 6.7:	Reihenschaltung bei einer symmetrischen Träger-Träger-Verbindung	70
Bild 6.8:	Reihenschaltung bei einer Träger-Stützen-Verbindung	70
Bild 6.9:	Lastausbreitungsflächen im Schnitt II	75
Bild 6.10:	Lastausbreitungsflächen bei Steifen	78
Bild 6.11:	Effektive Lasteintragungsbreite bei Rahmenknoten (durchgehende Stütze)	80
Bild 6.12:	Effektive Lasteintragungsbreite bei Rahmenecken	80
Bild 6.13:	Eingepasste und nicht eingepasste Steifen	81

Bild 6.14:	Verbindung mit überstehender Kopfplatte und 4 Schraubenreihen	85
Bild 6.15:	Verbindung mit bündiger Kopfplatte und 4 Schraubenreihen	85
Bild 6.16:	Momenten-Rotations-Charakteristik	89
Bild 6.17:	Interaktionskurve mit ausgewählten Punkten	90
Bild 6.18:	Zur Berechnung von Punkt 4 und 5 der Interaktionskurve	92
Bild 6.19:	Zerlegung des Momentes in ein Kräftepaar	93
Bild 6.20:	Aufteilung der Schnittgrößen am Punkt 5	95
Bild 6.21:	Zur Beanspruchung des Stützenstegbleches	98
Bild 6.22:	Ausgesteifte Rahmenecke	99
Bild 6.23:	Beanspruchung des Stützenstegbleches	100
Bild 6.24:	Verfahren nach Schineis: Ersatzquerschnitt und Spannungsverteilung	106
Bild 6.25:	Beziehung zwischen Normalkraft und Druckzonenhöhe (Verbindung A)	110
Bild 6.26:	Beziehungen zwischen Normalkraft, Zug- und Druckspannung sowie Schraubenkraft	111
Bild 6.27:	Ausführungsvarianten bei Vouten	115
Bild 6.28:	Transformationsbeziehungen für die Schnittgrößen in Rahmenecken und Knicken nach [Kin-03]	116
Bild 6.29:	Ausführungsvarianten bei Stößen durch Gehrungsschnitt	116
Bild 6.30:	Teilschnittgrößen im Gehrungsschnitt einer Rahmenecke nach [Kin-03]	117
Bild 6.31:	Zusätzliches Stegblech zur Verstärkung	118
Bild 6.32:	Ausführungsvarianten der Längsschweißnähte für das Anschweißen zusätzlicher Stegbleche nach [Thi-97]	118
Bild 6.33:	Diagonalsteifen zur Verstärkung des Eckbleches	119
Bild 7.1:	Erläuterungen zu den Tabellen 7.2 bis 7.4	123
Bild 7.2:	Beschreibung der Interaktionskurven	124
Bild 7.3:	Vergleich der Interaktionskurven nach Tabelle 7.2 am Beispiel der Verbindung D	126
Bild 7.4:	Vergleich der Interaktionskurven nach Tabelle 7.3 am Beispiel der Verbindung L	128
Bild 7.5:	Vergleich der Interaktionskurven nach Tabelle 7.4 am Beispiel der Verbindung H	130
Bild 7.6:	Anwendungsbeispiel	131

Bild 7.7:	Verbindung E	132
Bild 7.8:	Quantitative Interaktionskurve mit Nachweispunkten	134
Bild 7.9:	Normierte Interaktionskurve mit Nachweispunkten	134

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Komponenten nach EC 3-1.8	7
Tabelle 2.2:	Einordnung nach der Steifigkeit	13
Tabelle 2.3:	Einordnung nach der Tragfähigkeit	14
Tabelle 2.4:	Einordnung nach der Rotationskapazität	14
Tabelle 2.5:	Vergleich der Ergebnisse	17
Tabelle 3.1:	Vergleich zur Beurteilung der Normalkraftbegrenzung nach [Pas-02]	25
Tabelle 4.1:	Untersuchte Verbindungen	28
Tabelle 4.2:	Verwendete Elemente	31
Tabelle 4.3:	Verwendete Materialkennwerte	36
Tabelle 4.4:	Angaben zur Vorspannung	37
Tabelle 4.5:	Vergleich – Kalibrierungsverbindung 108.015	39
Tabelle 5.1:	Abmessungen der Stegbleche	59
Tabelle 6.1:	Schnitte bei verschiedenen Verbindungen	65
Tabelle 6.2:	Zu untersuchende T-Stöße	86
Tabelle 6.3:	Diskrete Punkte zur Aufstellung der Interaktionskurve	90
Tabelle 6.4:	Interaktionsbetrachtungen über das schubbeanspruchte Stützenstegblech	100
Tabelle 6.5:	Zwischenergebnisse bei der Berechnung der Normalkraft im Punkt 6 am Beispiel der Verbindung A	110
Tabelle 6.6:	Grenzwerte für b/t nach [Kin-03]	112
Tabelle 7.1:	Auswertung der quantitativen Ergebnisse der Punkte 1 bis 3	122
Tabelle 7.2:	Auswertung der Interaktionskurven - Vergleich FE-Berechnung und lineare Beziehung	125
Tabelle 7.3:	Auswertung der quantitativen Interaktionskurven - Vergleich FE-Berechnung und vorgeschlagene Interaktionsbeziehung nach Kapitel 6.2	127

Tabelle 7.4:	Auswertung der normierten Interaktionskurven - Vergleich FE-Berechnung und vorgeschlagene Interaktionsbeziehung nach Kapitel 6.2	129
Tabelle 7.5:	Betrachtung des Interaktionsverhaltens	131
Tabelle 7.6:	Ergebnisse der Systemberechnung	133

Anhang

A Verbindungen – Querschnitte und Werkstoffe	1
B Weitere Verbindungen	10
C Zur Auswertung des Erweiterungsvorschlages	12
D Zur Auswertung der FE-Untersuchung	58
E Anwendungsbeispiel - Lastannahmen und Schnittgrößen	73

A Verbindungen – Querschnitte und Werkstoffe

Die Bezeichnungen der einzelnen Verbindungen ergaben sich aus der Reihenfolge der Bearbeitung, wurden später beibehalten und sind daher nicht logisch nachvollziehbar.

Alle Gruppen bestehen aus einer Träger-Träger-Verbindung (erste Verbindungsbezeichnung im Gruppennamen) sowie zwei Träger-Stützen-Verbindungen (zweite und dritte Verbindungsbezeichnung).

Die Verbindungen sind [DASt-01] aus dem Teil „Momententragfähige Träger-Stützenanschlüsse mit Stirnplatte (2 vertikale Schraubenreihen“ entnommen. Sie entsprechen dort aufgrund der bündigen Kopfplatte dem Typ IH 1.

Die Schweißnahtdicken sind in der Literatur entsprechend mit angegeben. Da diese im Hinblick auf die Untersuchung keine Rolle spielen, dass heißt die Schweißnähte werden im Grenzzustand der Tragfähigkeit nicht maßgebend, wird auf die Tabellen in [DASt-01] verwiesen.

A.1 Gruppe A-D-E

Tabelle A.1: Gruppe A-D-E

Verbindung	Verbindungsart	Riegelprofil	Werkstoff	Stützenprofil	Werkstoff	Schraubendurchmesser	Festigkeitsklasse
A	T-T	IPE 200	S355			M20	10.9
D	T-S	IPE 200	S355	HEM 140	S355	M20	10.9
E	T-S	IPE 200	S355	HEB 200	S355	M20	10.9

A.2 Gruppe B-F-K

Tabelle A.2: Gruppe B-F-K

Verbindung	Verbindungsart	Riegelprofil	Werkstoff	Stützenprofil	Werkstoff	Schraubendurchmesser	Festigkeitsklasse
B	T-T	IPE 180	S355			M20	10.9
F	T-S	IPE 180	S355	HEM 140	S355	M20	10.9
K	T-S	IPE 180	S355	HEB 180	S355	M20	10.9

A.3 Gruppe C-H-P

Tabelle A.3: Gruppe C-H-P

Verbindung	Verbindungsart	Riegelprofil	Werkstoff	Stützenprofil	Werkstoff	Schraubendurchmesser	Festigkeitsklasse
C	T-T	IPE 200	S235			M16	10.9
H	T-S	IPE 200	S235	HEM 120	S235	M16	10.9
P	T-S	IPE 200	S235	HEB 160	S235	M16	10.9

A.4 Gruppe N-G-O

Tabelle A.4: Gruppe N-G-O

Verbindung	Verbindungsart	Riegelprofil	Werkstoff	Stützenprofil	Werkstoff	Schraubendurchmesser	Festigkeitsklasse
N	T-T	IPE 120	S235			M16	8.8
G	T-S	IPE 120	S235	HEA 120	S235	M16	8.8
O	T-S	IPE 120	S235	IPE 240	S235	M16	8.8

A.5 Gruppe L-M-I

Tabelle A.5: Gruppe L-M-I

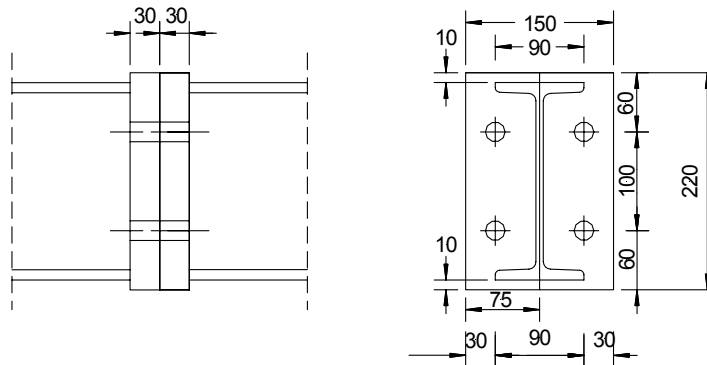
Verbindung	Verbindungsart	Riegelprofil	Werkstoff	Stützenprofil	Werkstoff	Schraubendurchmesser	Festigkeitsklasse
L	T-T	IPE 200	S235			M20	10.9
M	T-S	IPE 200	S235	HEB 160	S235	M20	10.9
I	T-S	IPE 200	S235	HEB 180	S235	M20	10.9

A.6 Weitere Abmessungen

Tabelle A.6: Kopfplattenabmessungen

Verbindung	Breite [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]
A	150	220	30
B	150	200	30
C	120	220	25
D	150	220	30
E	150	220	30
F	150	200	30
G	120	140	25
H	120	220	25
I	150	220	30
K	150	200	30
L	150	220	30
M	150	220	30
N	120	140	25
O	120	140	25
P	120	220	25
Mittelwert	138	200	28

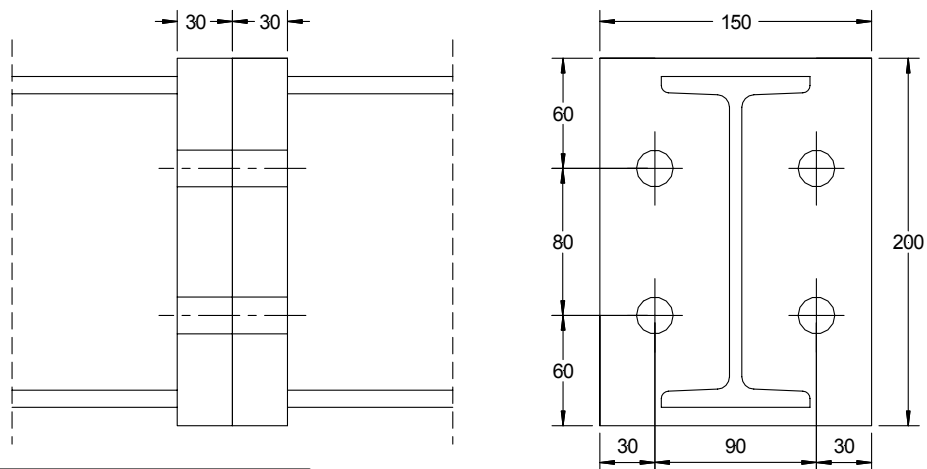
A.7 Zeichnerische Darstellung der untersuchten Verbindungen



Schrauben	
Größe:	M20
Festigkeit:	10.9
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 200
Stütze:	
Stahlsorte:	S355

Verbindungstyp:	Träger-Träger (Trägerstoß)
Verbindungsbezeichnung:	A

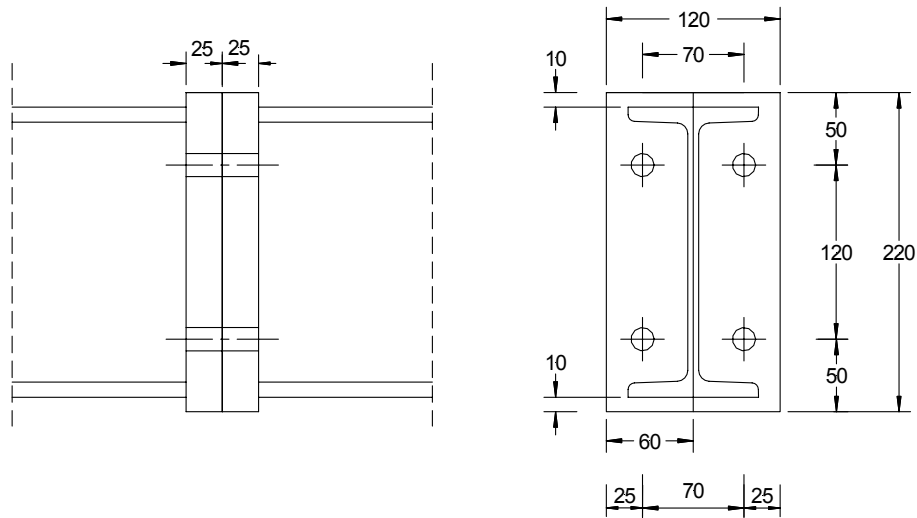
Bild A.1: Verbindung A



Schrauben	
Größe:	M20
Festigkeit:	10.9
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 180
Stütze:	
Stahlsorte:	S355

Verbindungstyp:	Träger-Träger (Trägerstoß)
Verbindungsbezeichnung:	B

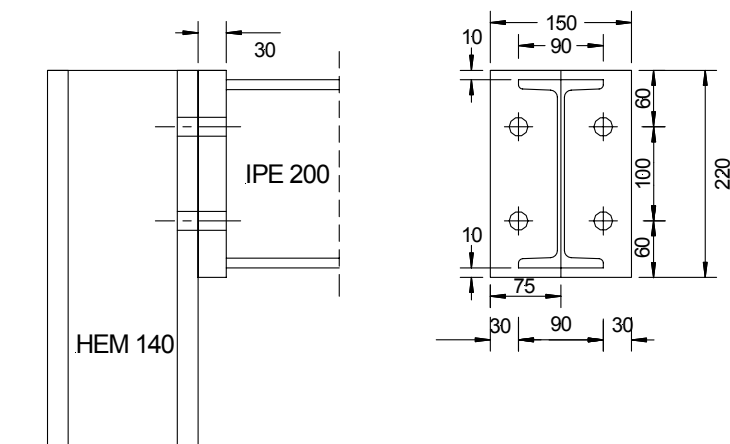
Bild A.2: Verbindung B



Schrauben	
Größe:	M16
Festigkeit:	10.9
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 200
Stütze:	
Stahlsorte:	S235

Verbindungstyp:	Träger-Träger (Trägerstoß)
Verbindungsbezeichnung:	C

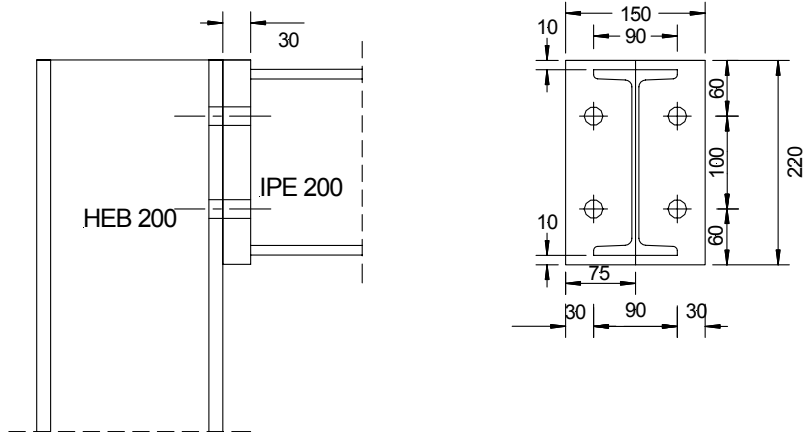
Bild A.3: Verbindung C



Schrauben	
Größe:	M20
Festigkeit:	10.9
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 200
Stütze:	HEM 140
Stahlsorte:	S355

Verbindungstyp:	Träger-Stütze
Verbindungsbezeichnung:	D

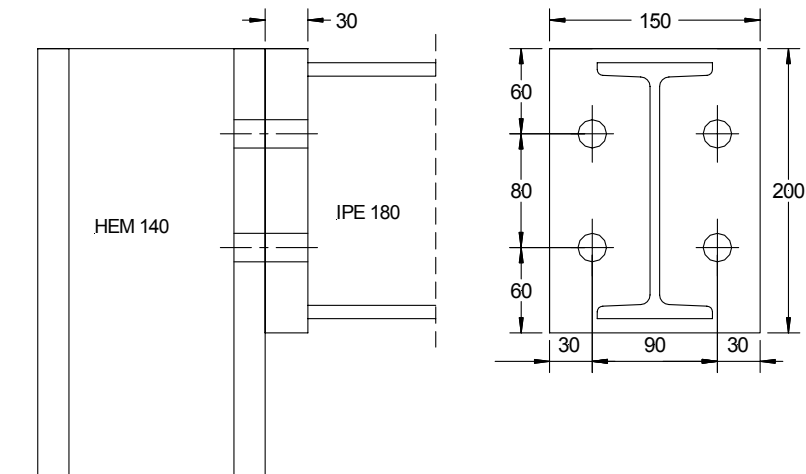
Bild A.4: Verbindung D



Schrauben	
Größe:	M20
Festigkeit:	10.9
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 200
Stütze:	HEB 200
Stahlsorte:	S355

Verbindungstyp:	Träger-Stütze
Verbindungsbezeichnung:	E

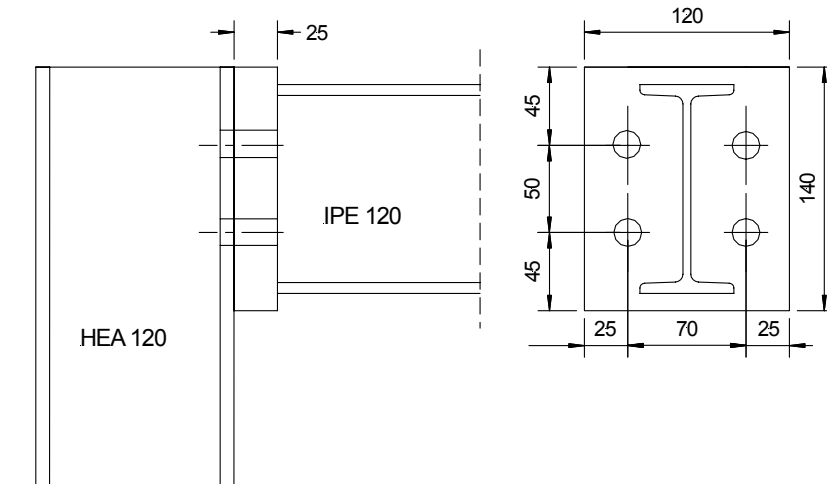
Bild A.5: Verbindung E



Schrauben	
Größe:	M20
Festigkeit:	10.9
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 180
Stütze:	HEM 140
Stahlsorte:	S355

Verbindungstyp:	Träger-Stütze
Verbindungsbezeichnung:	F

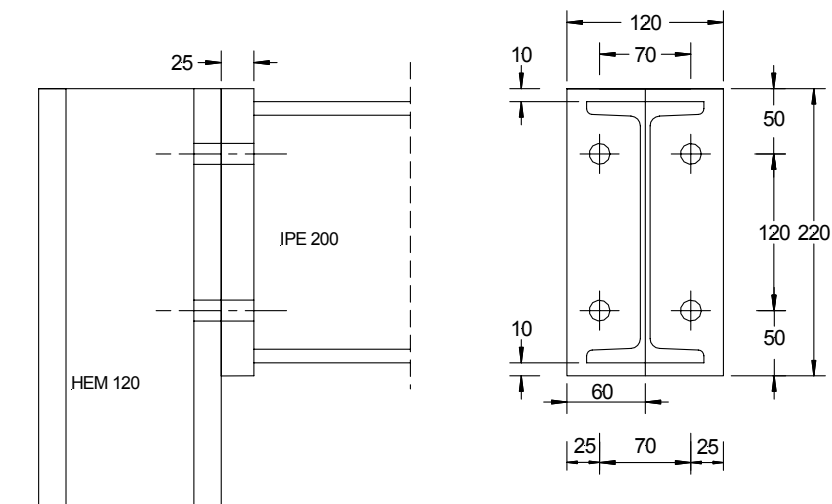
Bild A.6: Verbindung F



Schrauben	
Größe:	M16
Festigkeit:	8.8
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 120
Stütze:	HEA 120
Stahlsorte:	S235

Verbindungstyp: Träger-Stütze
Verbindungsbezeichnung: G

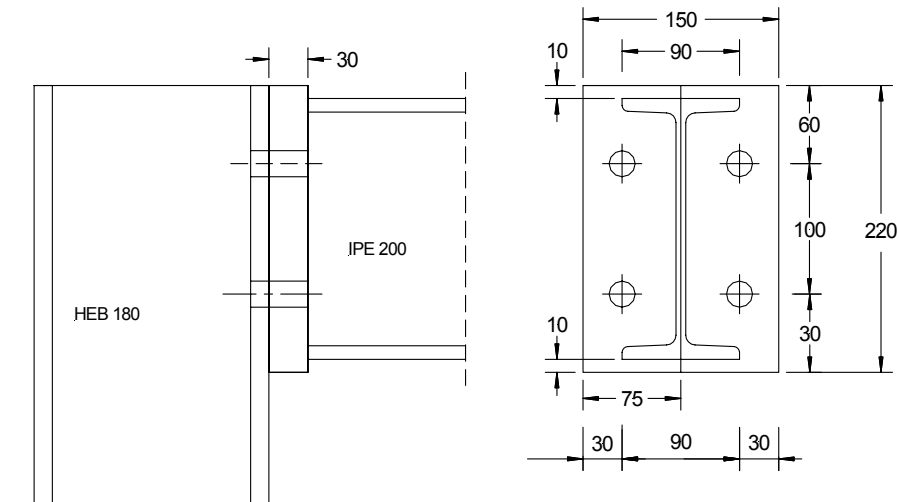
Bild A.7: Verbindung G



Schrauben	
Größe:	M16
Festigkeit:	10.9
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 200
Stütze:	HEM 120
Stahlsorte:	S235

Verbindungstyp: Träger-Stütze
Verbindungsbezeichnung: H

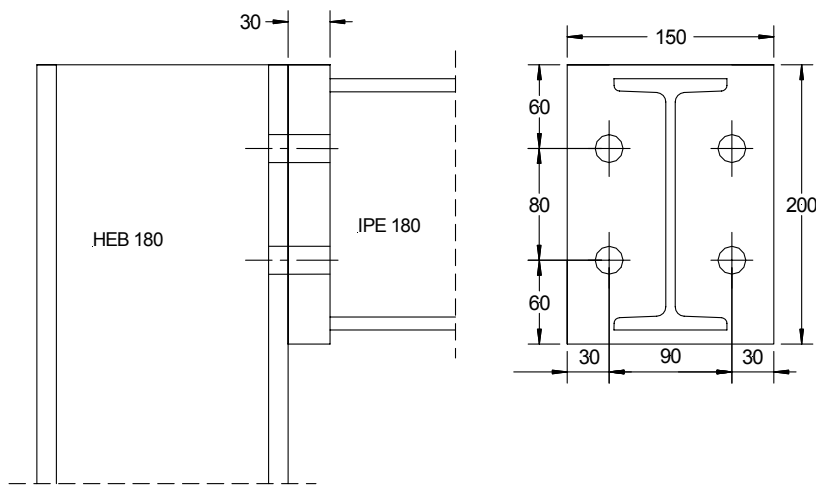
Bild A.8: Verbindung H



Schrauben	
Größe:	M16
Festigkeit:	8.8
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 120
Stütze:	HEB 180
Stahlsorte:	S235

Verbindungstyp: Träger-Stütze
Verbindungsbezeichnung: I

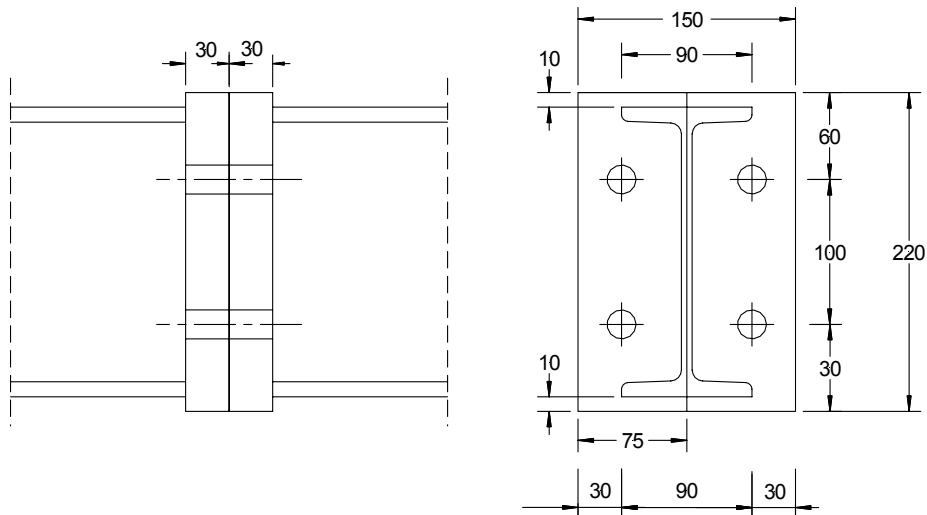
Bild A.9: Verbindung I



Schrauben	
Größe:	M20
Festigkeit:	10.9
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 180
Stütze:	HEB 180
Stahlsorte:	S355

Verbindungstyp: Träger-Stütze
Verbindungsbezeichnung: K

Bild A.10: Verbindung K



Schrauben	
Größe:	M20
Festigkeit:	10.9
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 200
Stütze:	
Stahlsorte:	S235

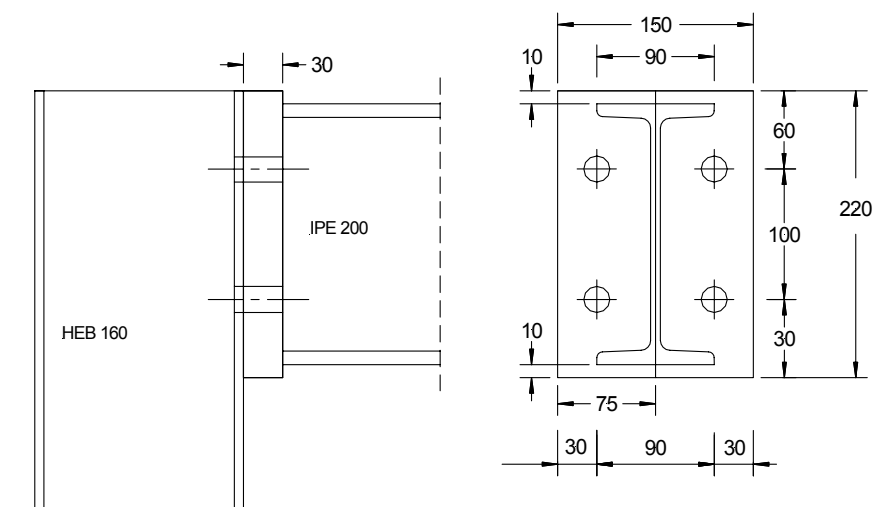
Verbindungstyp:

Träger-Träger (Trägerstoß)

Verbindungsbezeichnung:

L

Bild A.11: Verbindung L



Schrauben	
Größe:	M16
Festigkeit:	8.8
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 120
Stütze:	HEB 160
Stahlsorte:	S235

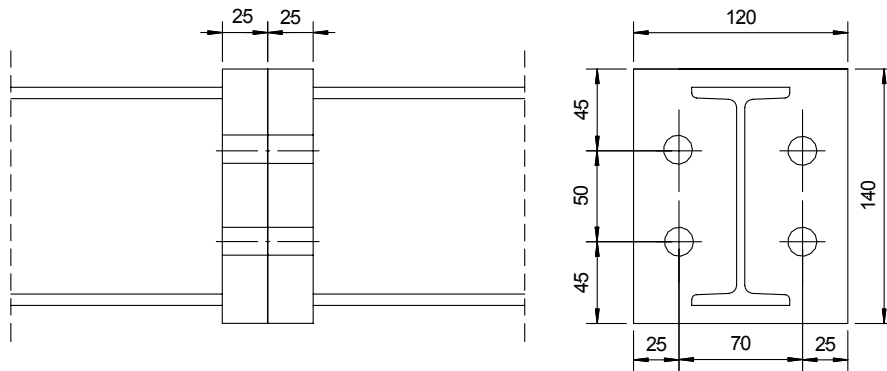
Verbindungstyp:

Träger-Stütze

Verbindungsbezeichnung:

M

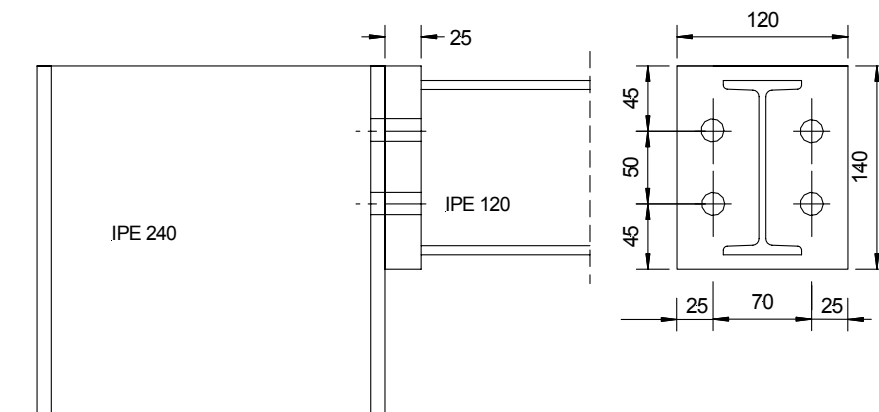
Bild A.12: Verbindung M



Schrauben	
Größe:	M16
Festigkeit:	8.8
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 120
Stütze:	
Stahlsorte:	S235

Verbindungstyp:	Träger-Träger (Trägerstoß)
Verbindungsbezeichnung:	N

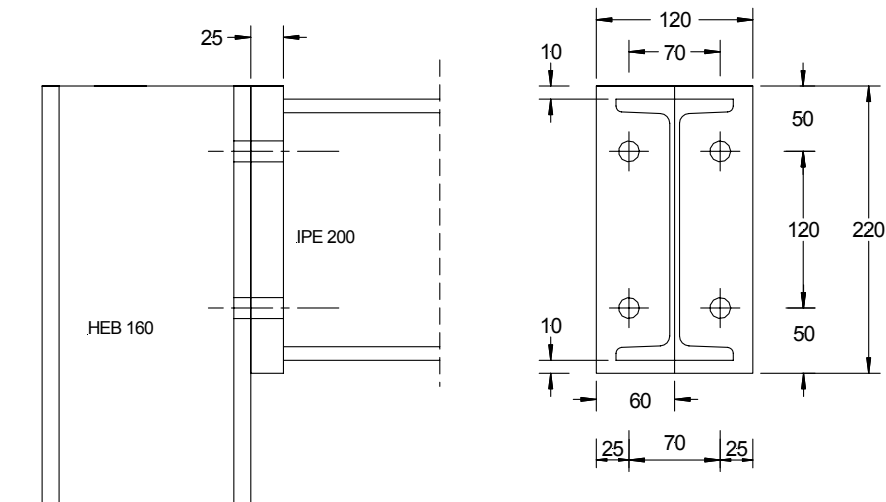
Bild A.13: Verbindung N



Schrauben	
Größe:	M16
Festigkeit:	8.8
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 120
Stütze:	IPE 240
Stahlsorte:	S235

Verbindungstyp:	Träger-Stütze
Verbindungsbezeichnung:	O

Bild A.14: Verbindung O



Schrauben	
Größe:	M16
Festigkeit:	10.9
Grundwerkstoff	
Riegel:	IPE 200
Stütze:	HEB 160
Stahlsorte:	S235

Verbindungstyp:	Träger-Stütze
Verbindungsbezeichnung:	P

Bild A.15: Verbindung P

B Weitere Verbindungen

In Kapitel 6 wird auf diesen Anhang hinsichtlich der Bezeichnungen weiterer Verbindungen verwiesen. Die Verbindungen lassen sich in verschiedene Gruppen hinsichtlich der Bezeichnung unterteilen (Tabelle B.1).

Tabelle B.1: Beschreibung der Verbindungen

Bezeichnung	Beschreibung der Verbindung	
TT 1 - 10	Träger-Träger-Verbindungen	
TS 1 - 6	Träger-Stützen-Verbindungen	
s-k	Schweißverbindungen	kompakte Profile
s-s		schlanke Profile
lener		Kalibrierungsverbindung, benannt nach dem Autor Lener [Len-87]
3Reihen	geschraubte Verbindungen	3 Schraubenreihen, bündige Kopfplatte
über		3 Schraubenreihen, über stehende Kopfplatte

Die Schweißverbindungen wurden wie die Verbindungen A-P nach Anhang A ebenfalls mit der Finiten-Elemente-Methode untersucht. Die anderen Verbindungen, alles geschraubte Verbindungen, wurden nur nach

dem vorgeschlagenen Bemessungsalgorithmus berechnet. Diese zusätzlichen Verbindungen dienen damit nur zur Findung bestimmter Grenzen, da dadurch eine größere Anzahl von Werten vorliegt. Andererseits unterscheiden sich die Verbindungen nach Anhang B durch verschiedene Merkmale von den Verbindungen nach Anhang A (Tabelle B.2).

Tabelle B.2: Unterscheidungsmerkmale

Merkmals der Verbindungen A-P	gegensätzliches Merkmal der Verbindungen nach Anhang B	zuordbare Verbindungen
kompakt	schlank	s-s TS 4-6 TT 2, 4, 9, 10
bündige Kopfplatte	überstehende Kopfplatte	TT 1-4 TS 2, 3
2 Schraubenreihen	3 Schraubenreihen	TT 3, 4 TS 2-6 3Reihen über
Schraubverbindung	Schweißverbindung	s-s s-k lener
unausgesteift	ausgesteift durch Zwickel hinterlegte Bleche, Steifen	TT 1-4 TT 9, 10 TS 4-6

C Zur Auswertung des Erweiterungsvorschlages

C.1 Interaktionsdiagramme der Verbindungen A - P

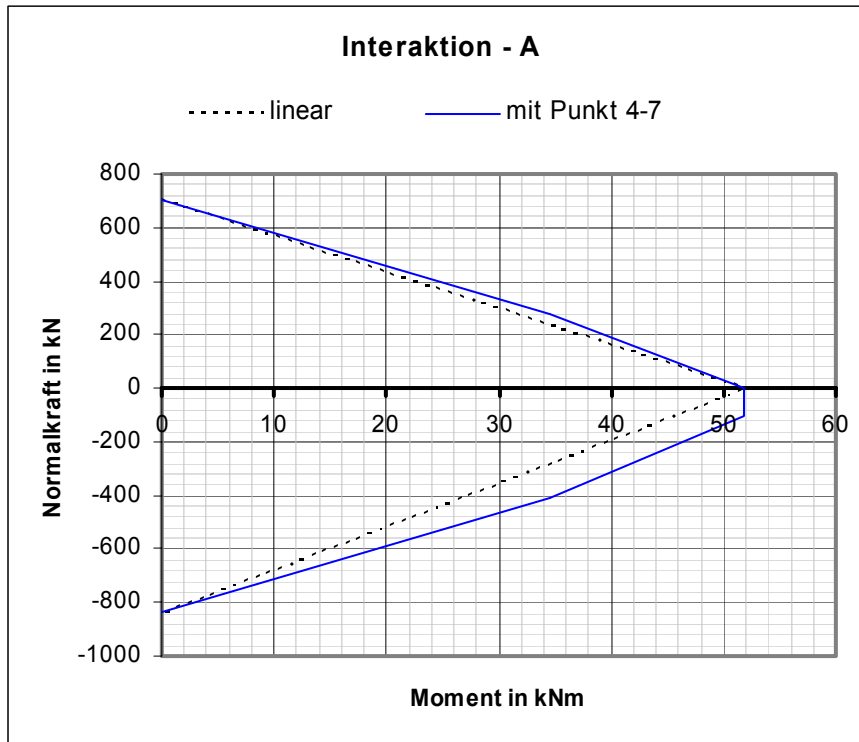


Bild C.1: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung A

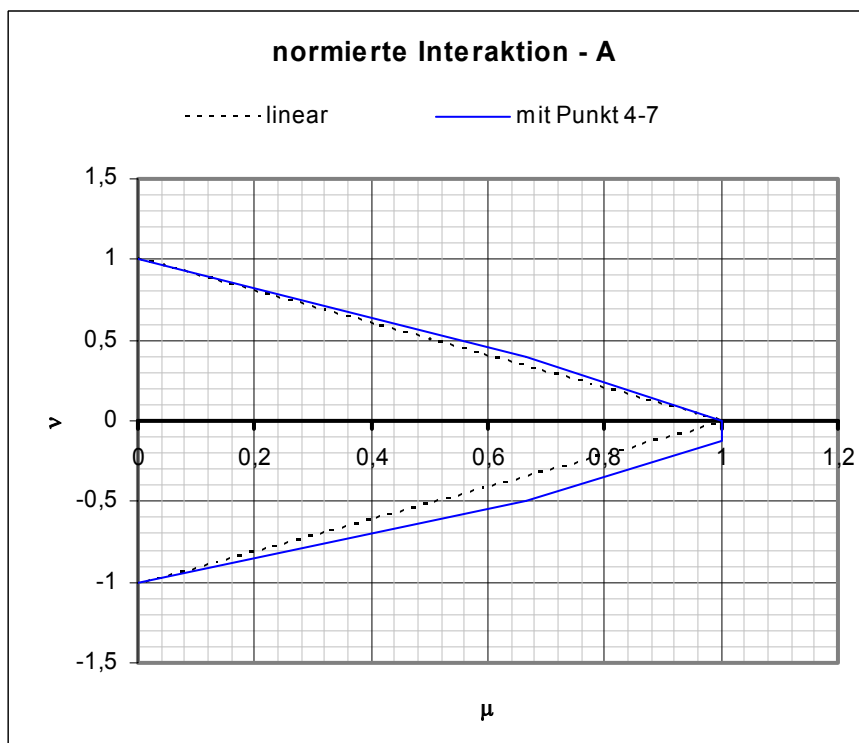


Bild C.2: Normierte Interaktionskurve - Verbindung A

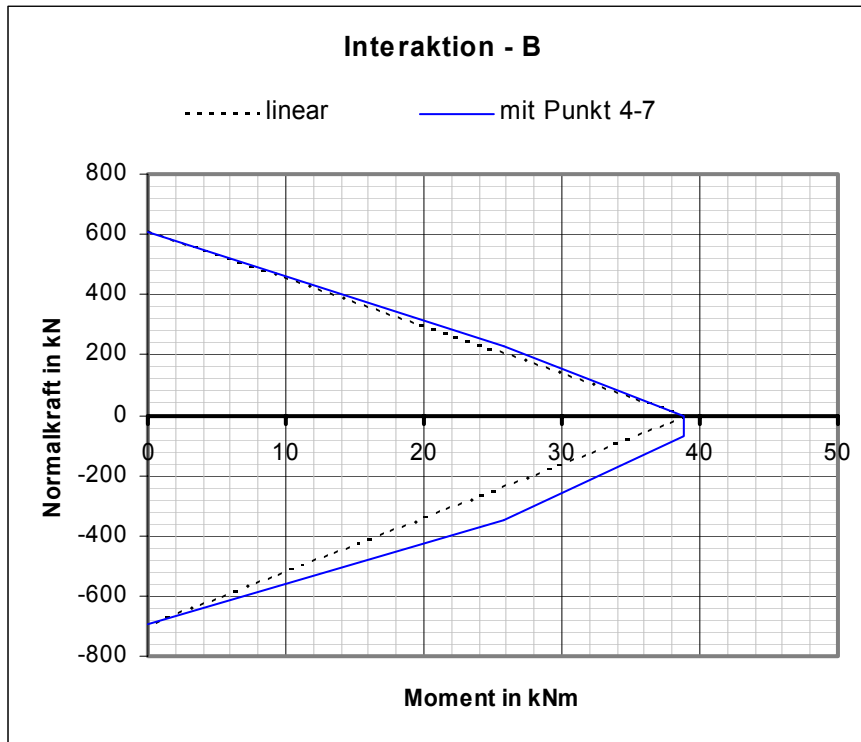


Bild C.3: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung B

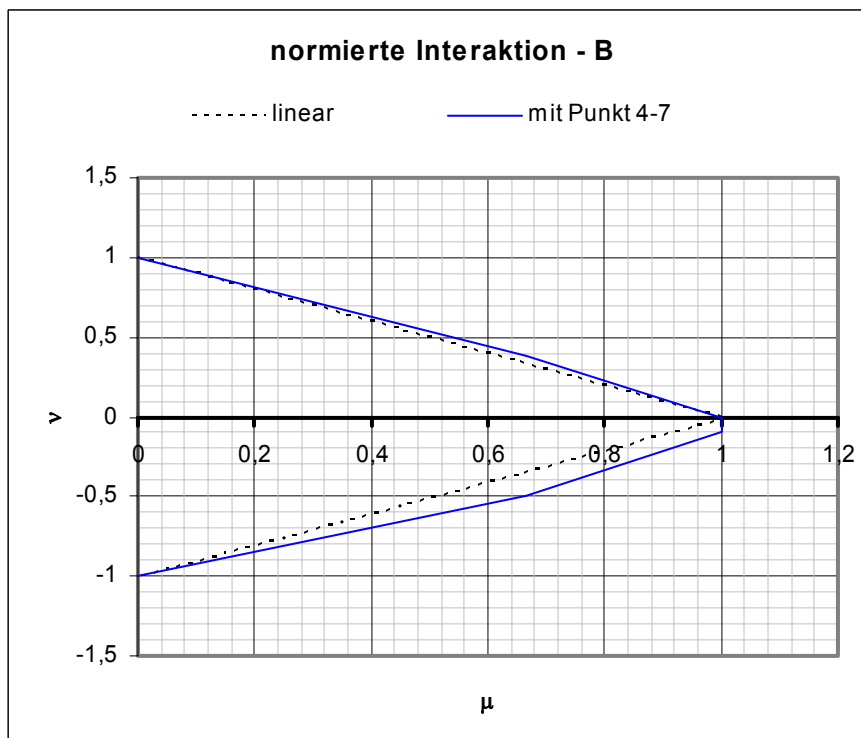


Bild C.4: Normierte Interaktionskurve - Verbindung B

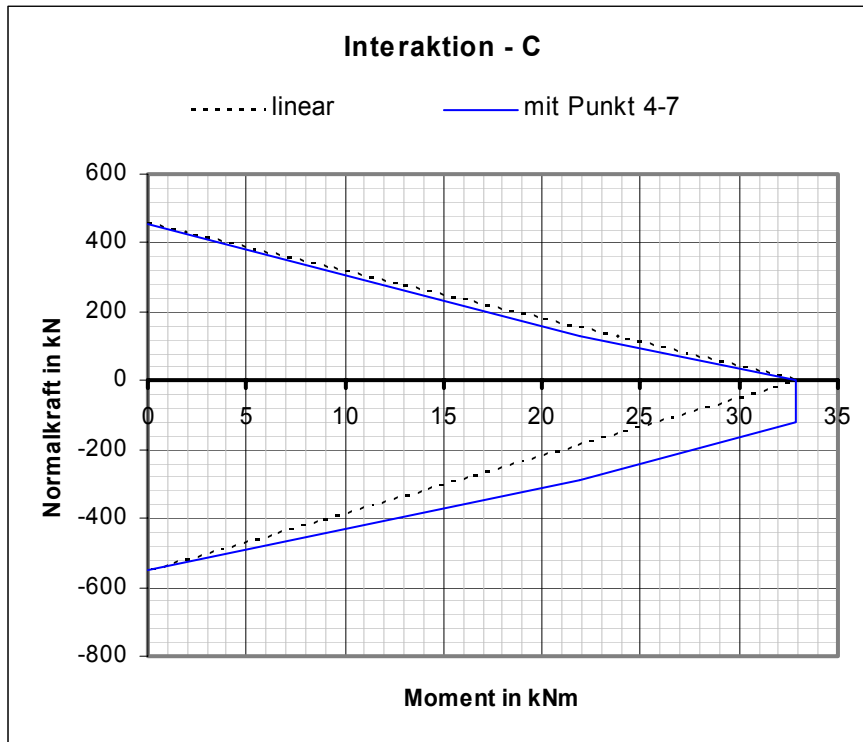


Bild C.5: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung C

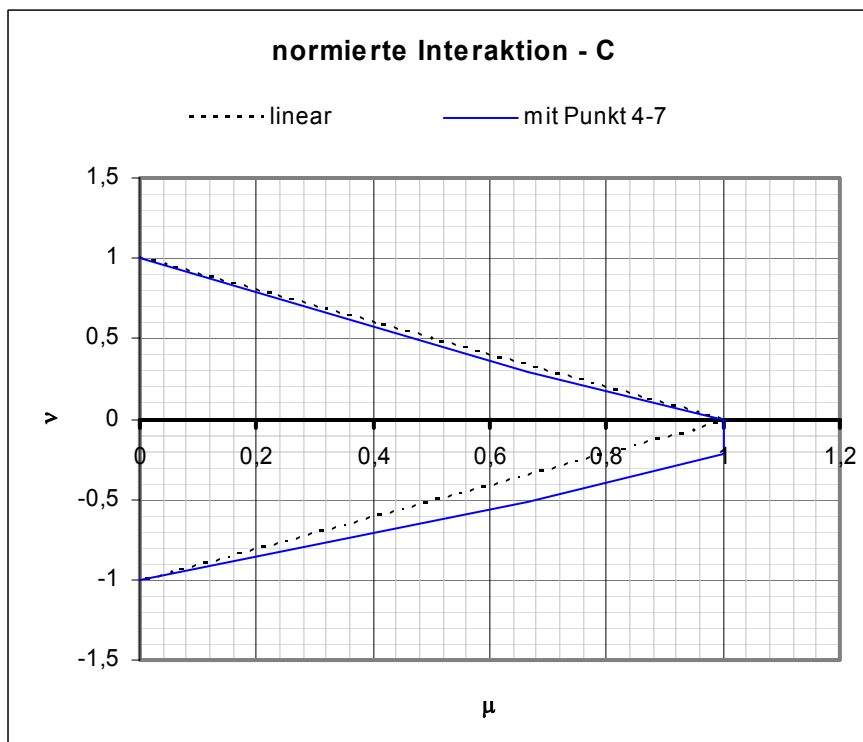


Bild C.6: Normierte Interaktionskurve - Verbindung C

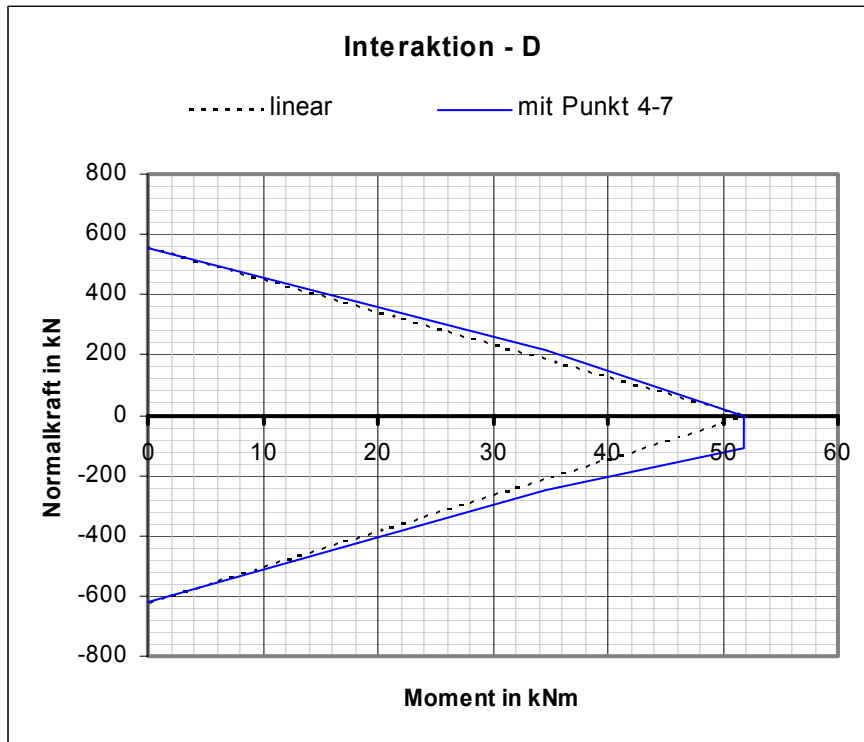


Bild C.7: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung D

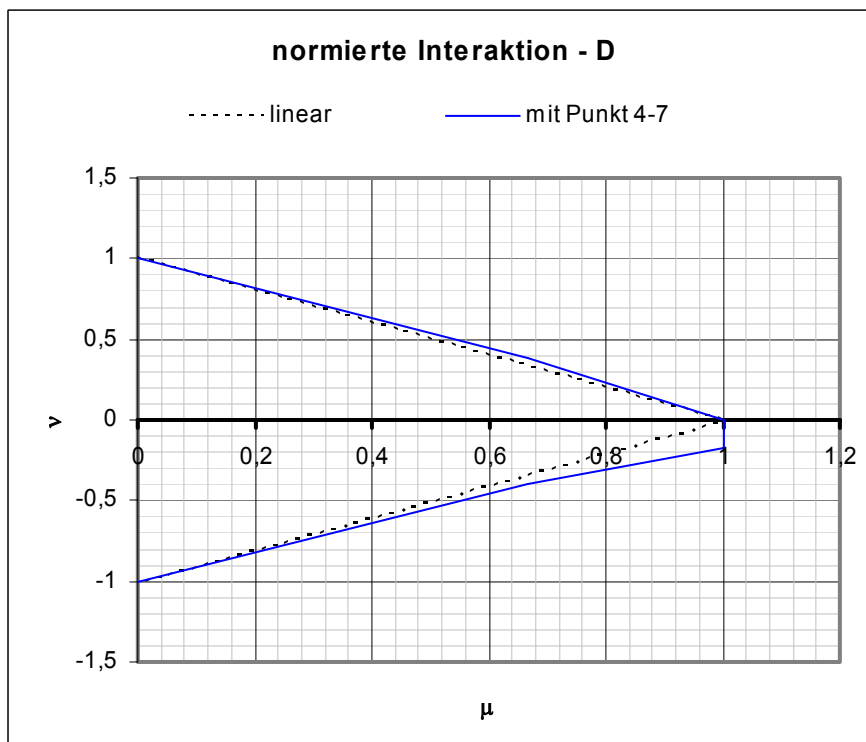


Bild C.8: Normierte Interaktionskurve - Verbindung D

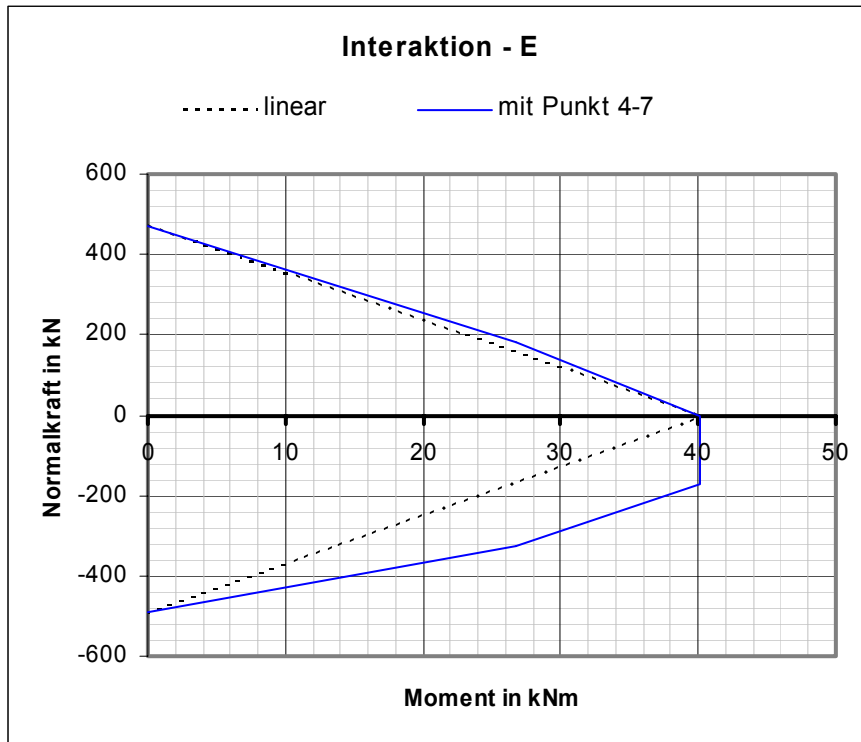


Bild C.9: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung E

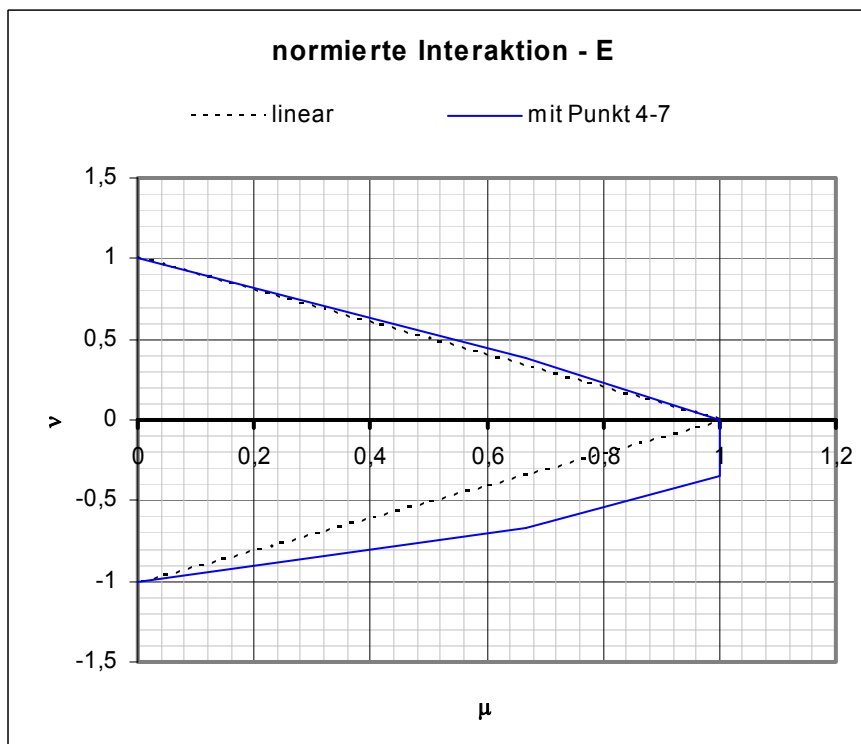


Bild C.10: Normierte Interaktionskurve - Verbindung E

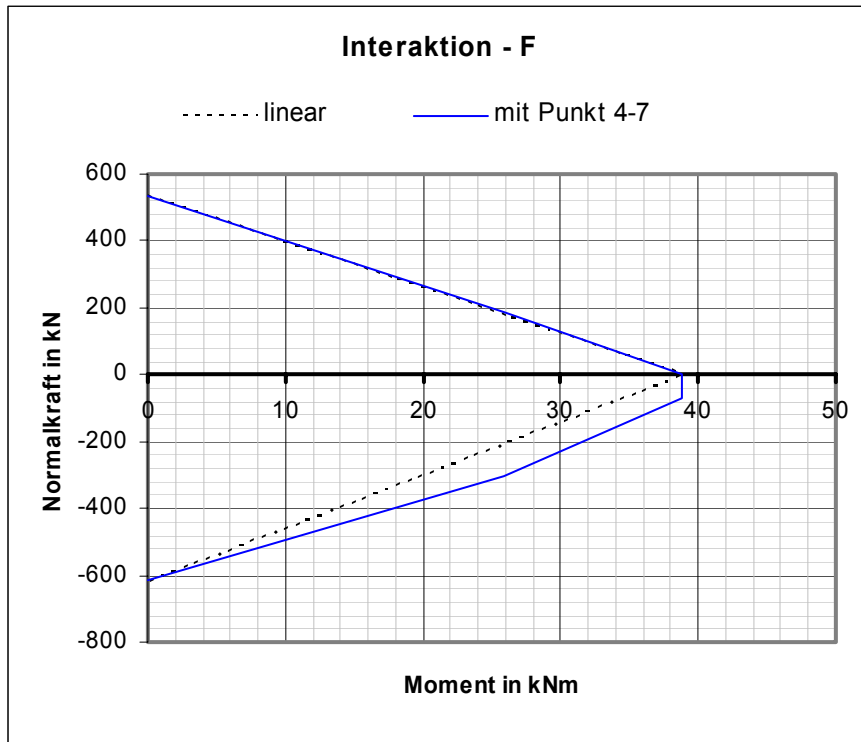


Bild C.11: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung F

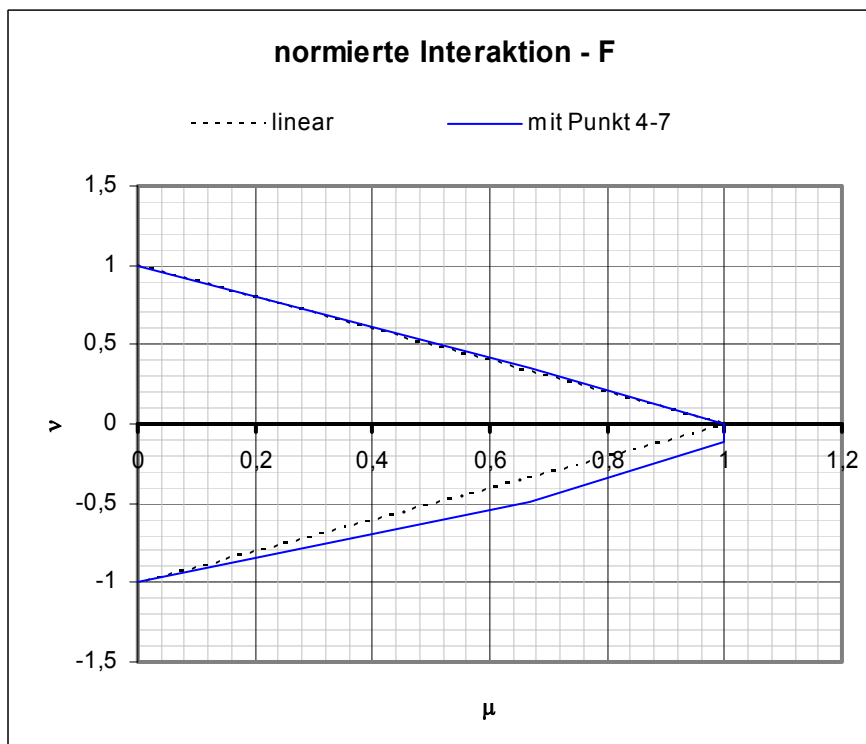


Bild C.12: Normierte Interaktionskurve - Verbindung F

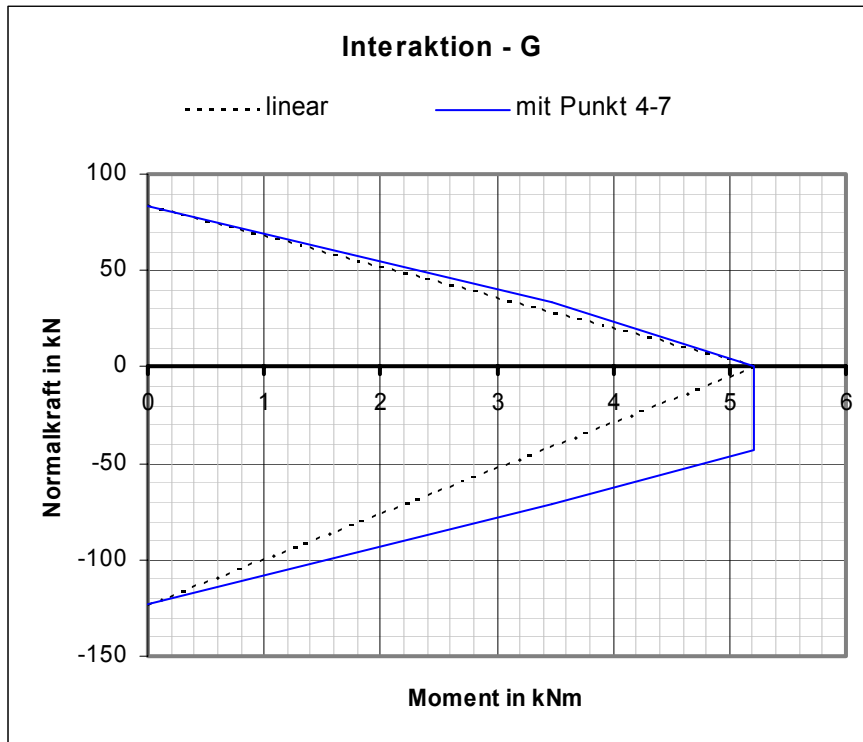


Bild C.13: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung G

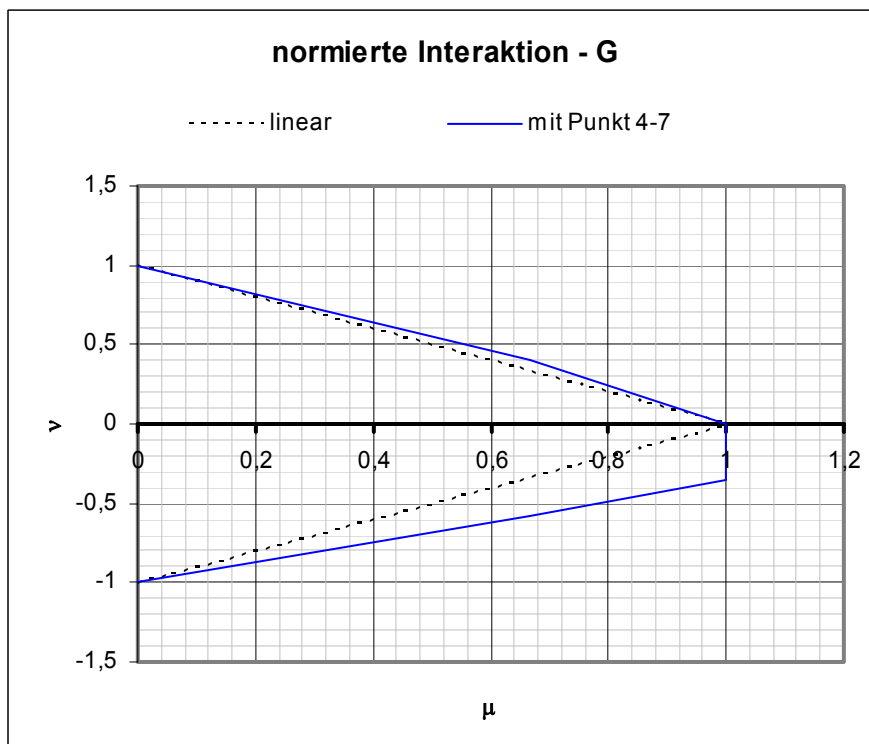


Bild C.14: Normierte Interaktionskurve - Verbindung G

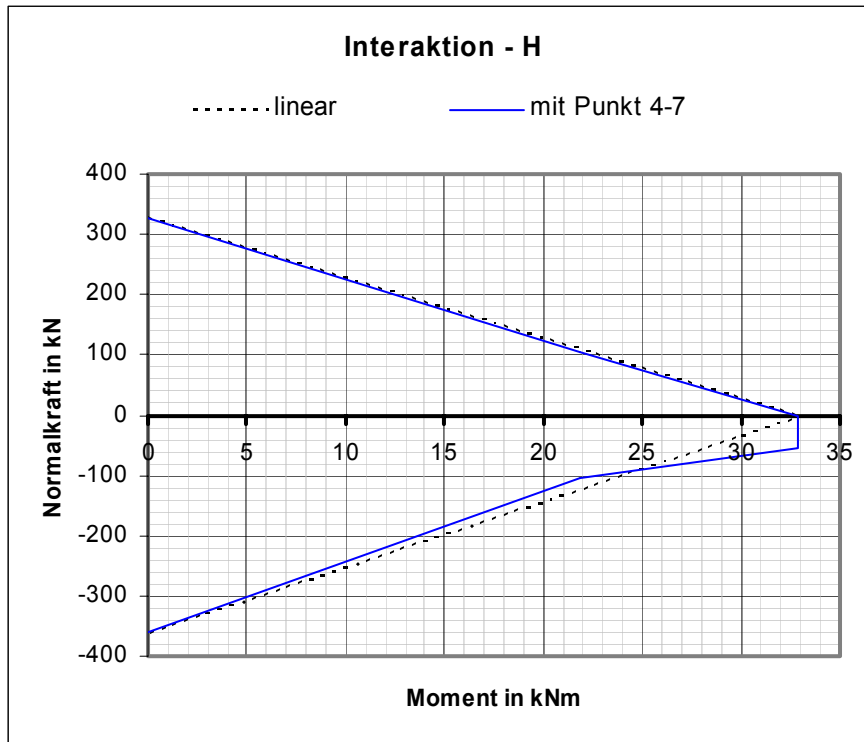


Bild C.15: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung H

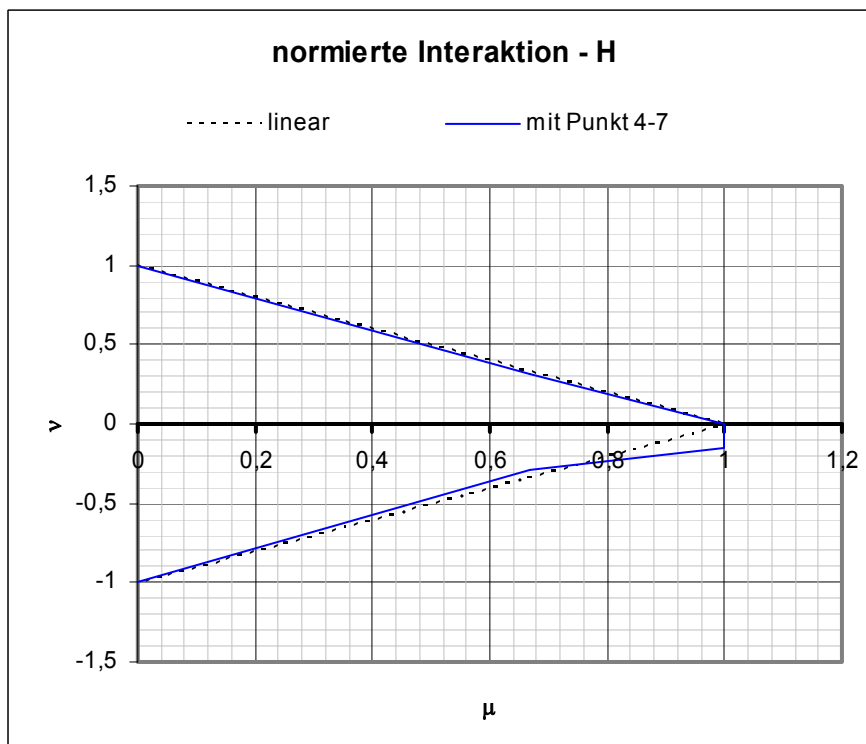


Bild C.16: Normierte Interaktionskurve - Verbindung H

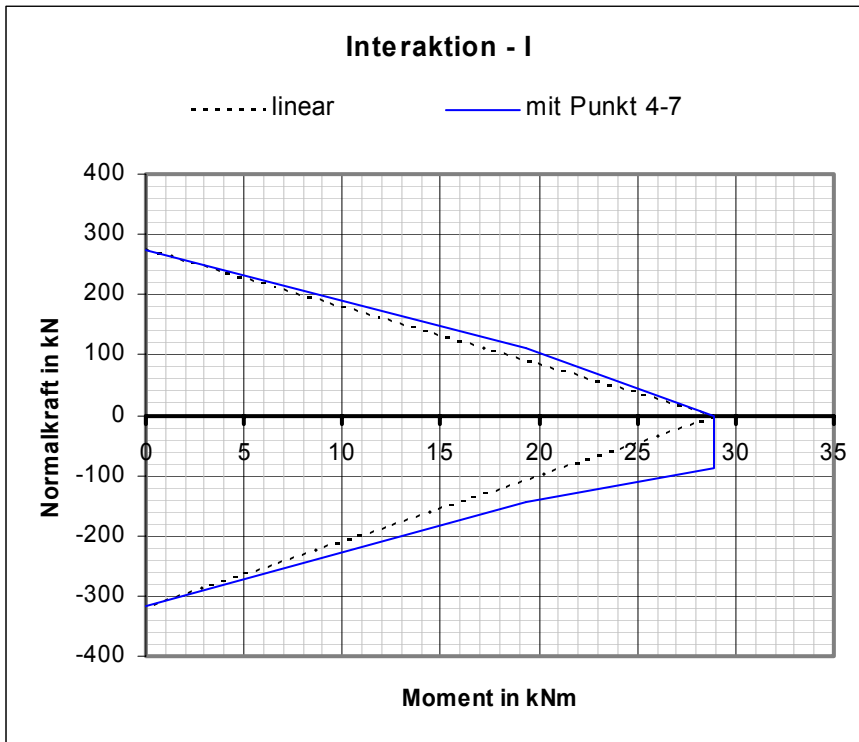


Bild C.17: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung I

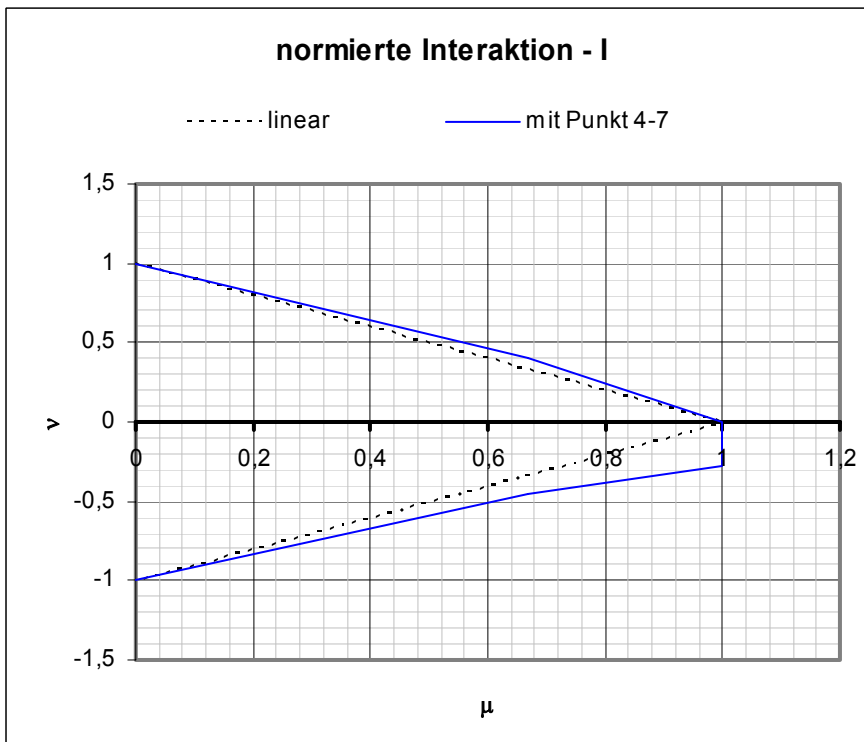


Bild C.18: Normierte Interaktionskurve - Verbindung I

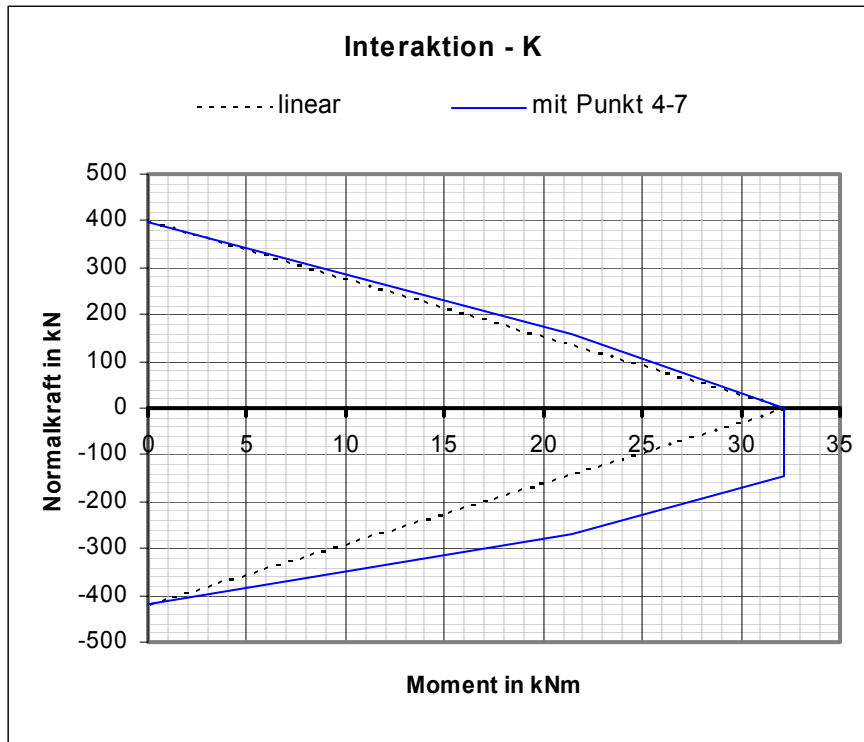


Bild C.19: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung K

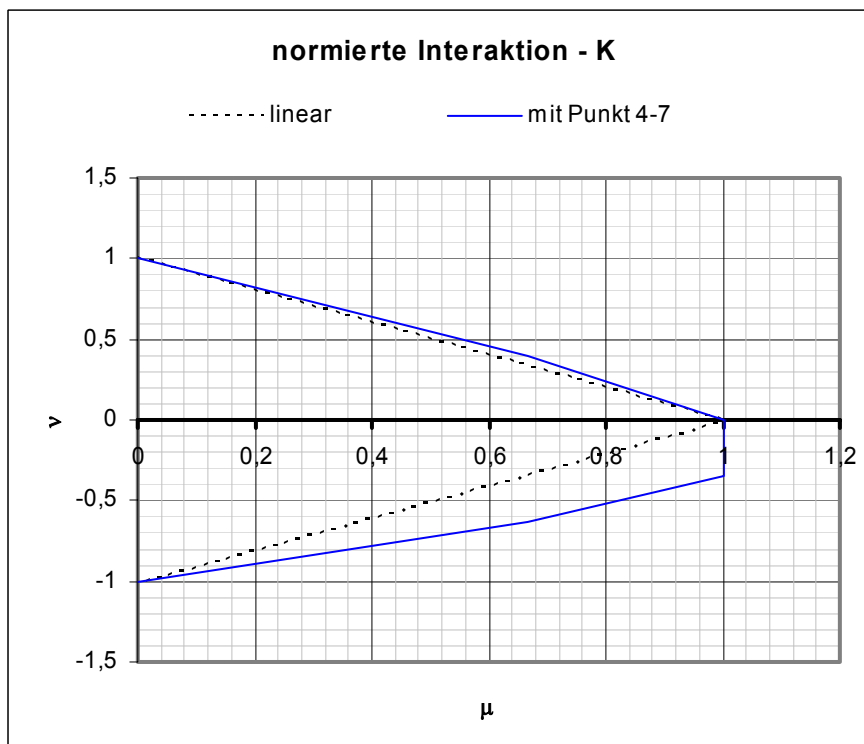


Bild C.20: Normierte Interaktionskurve - Verbindung K

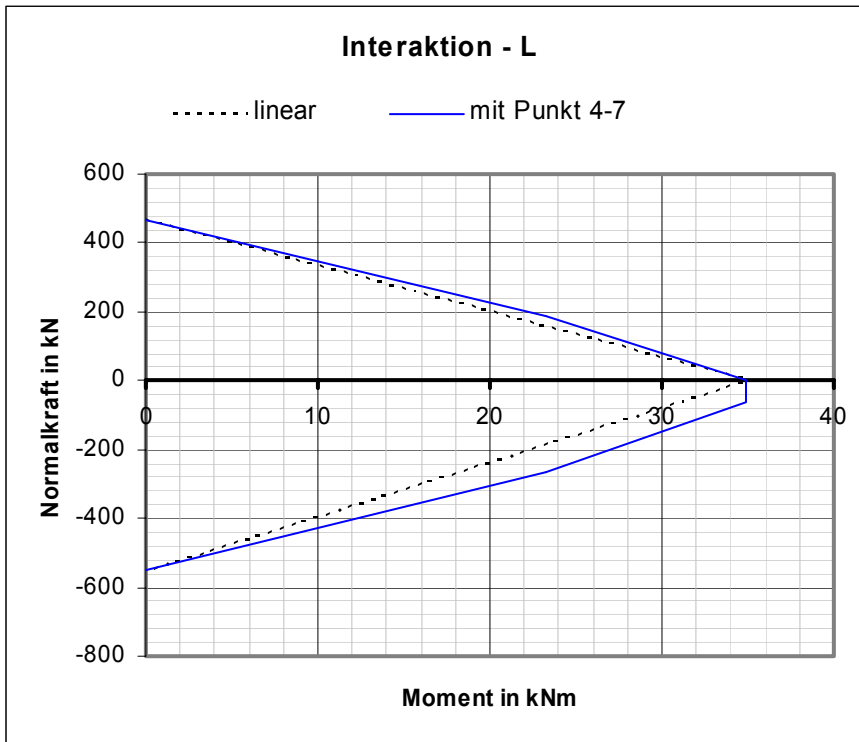


Bild C.21: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung L

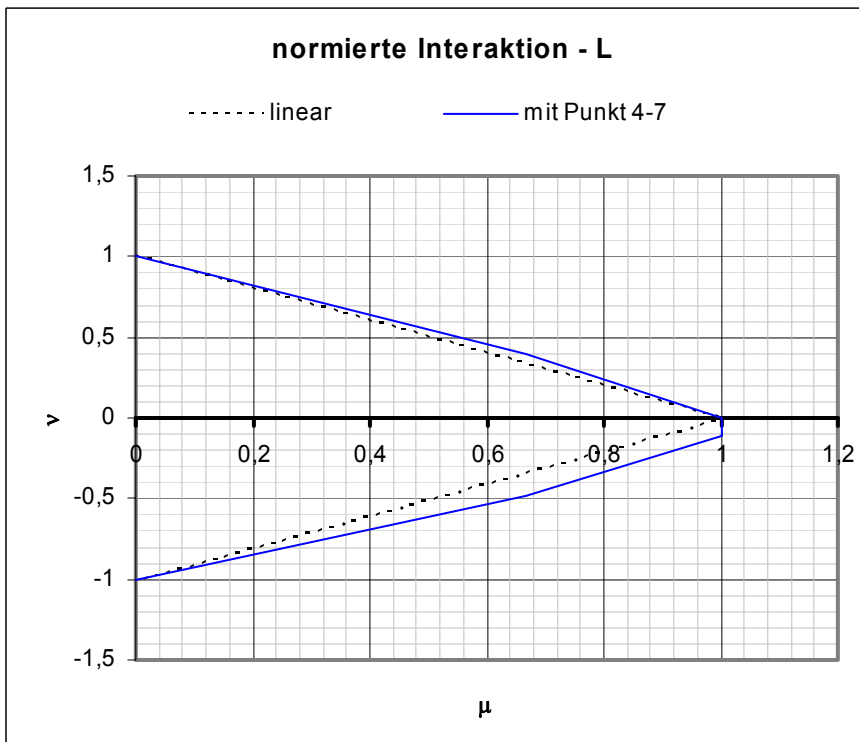


Bild C.22: Normierte Interaktionskurve - Verbindung L

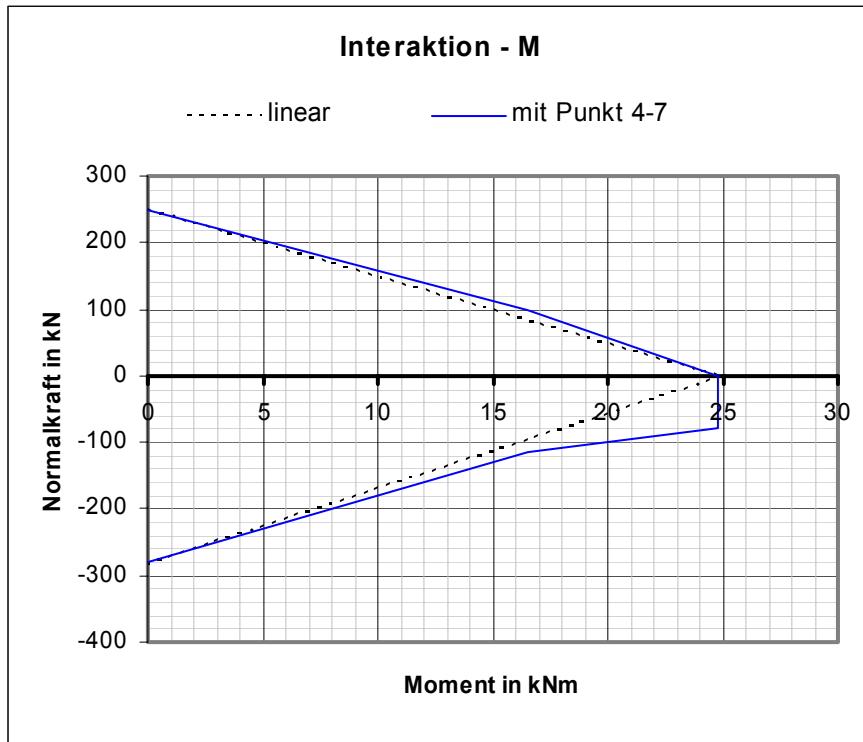


Bild C.23: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung M

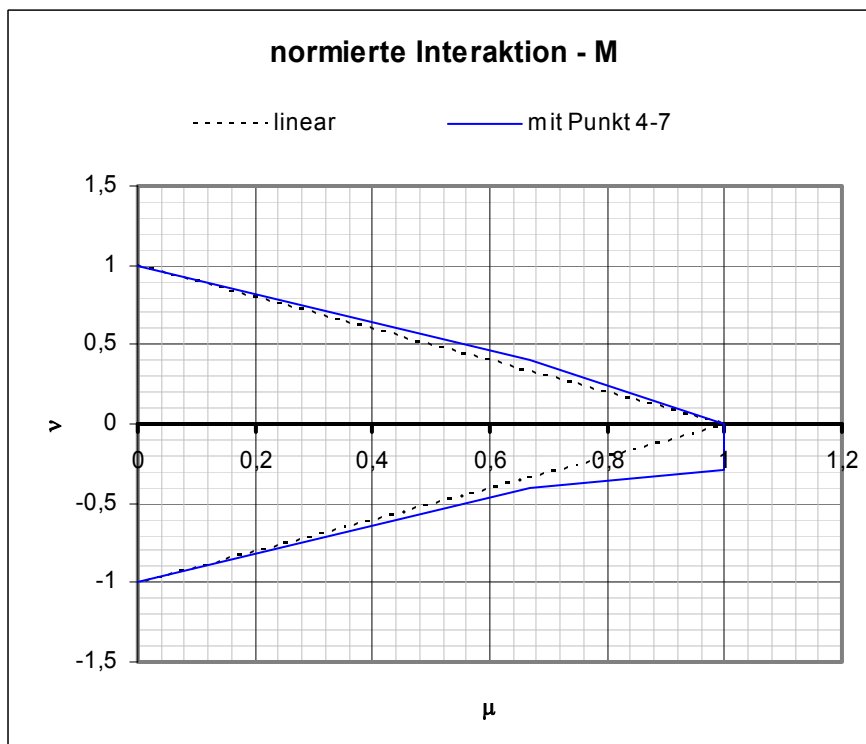


Bild C.24: Normierte Interaktionskurve - Verbindung M

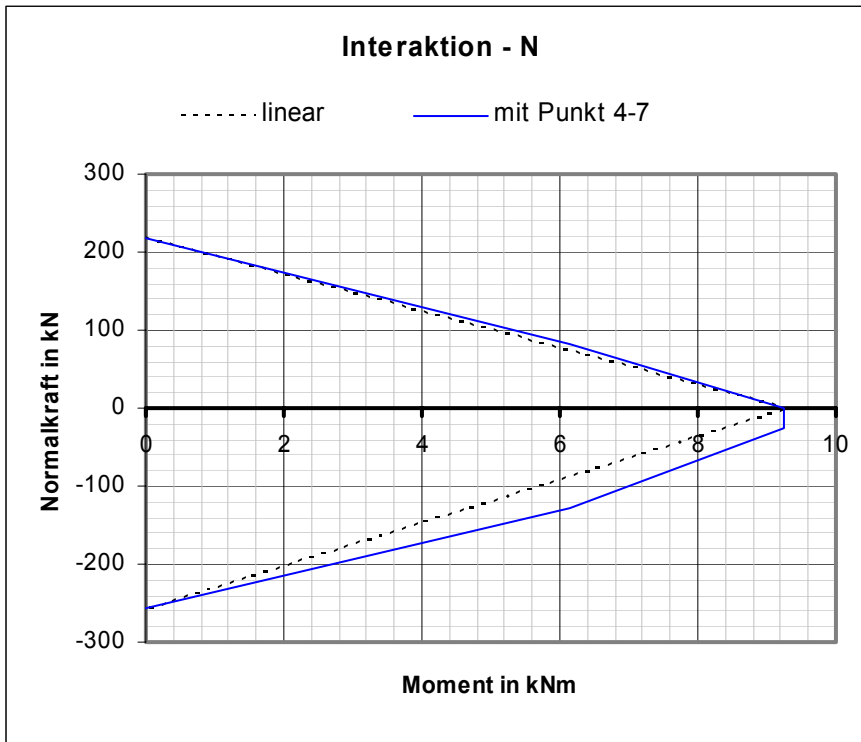


Bild C.25: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung N

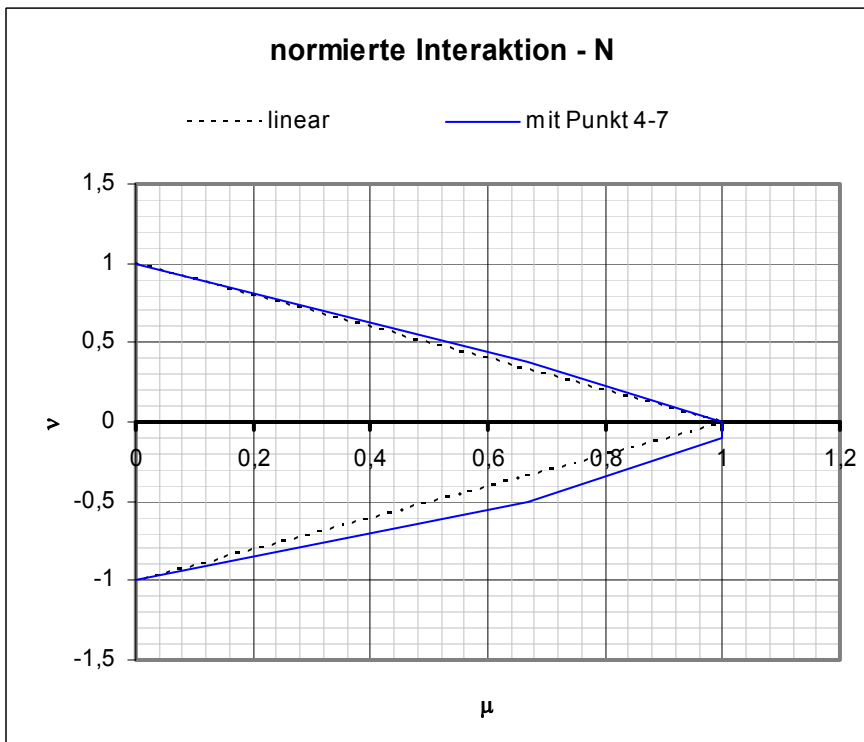


Bild C.26: Normierte Interaktionskurve - Verbindung N

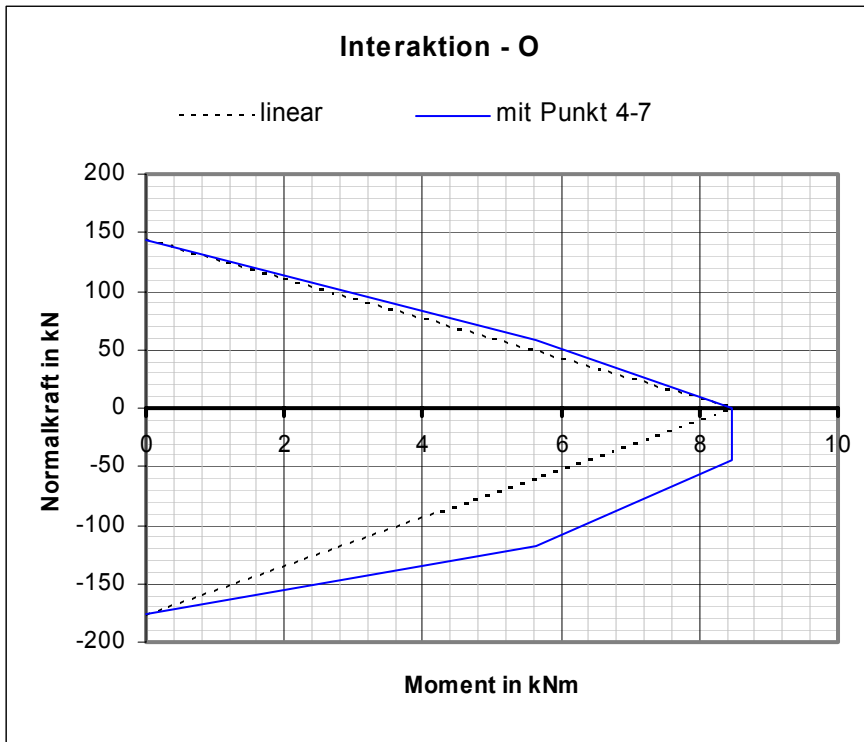


Bild C.27: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung O

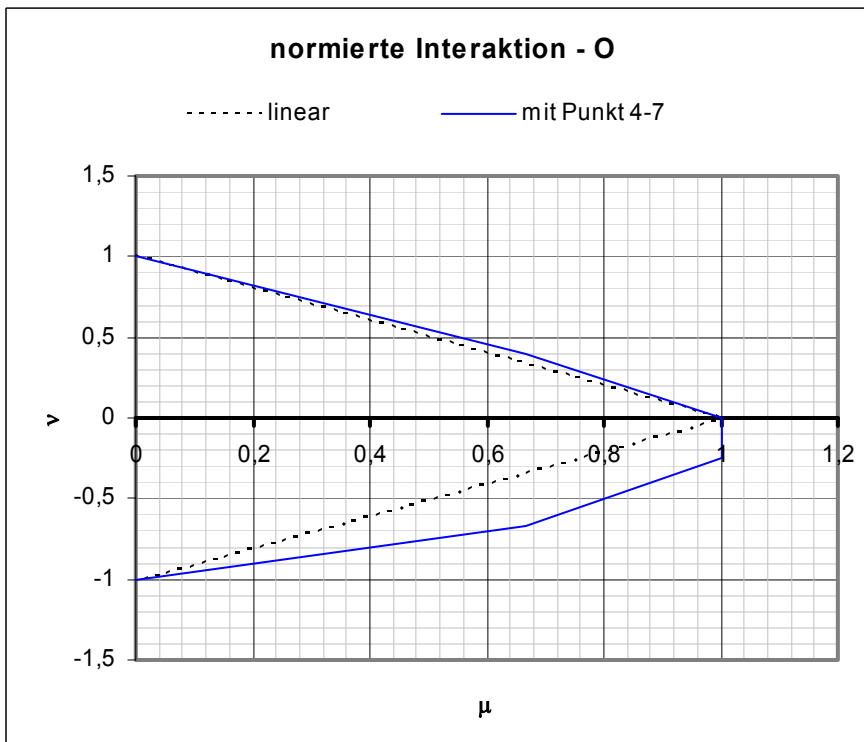


Bild C.28: Normierte Interaktionskurve - Verbindung O

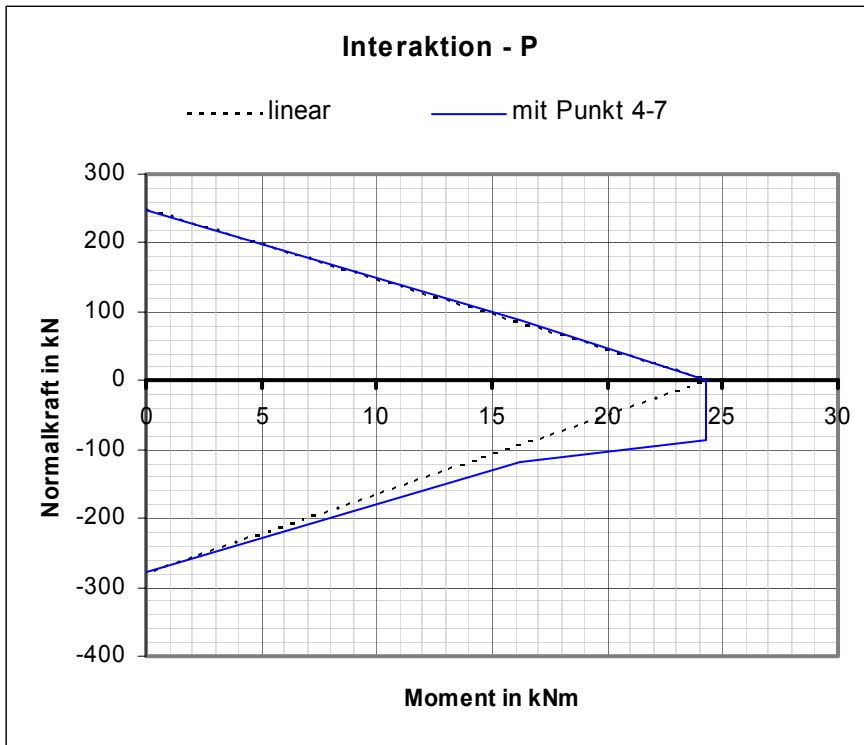


Bild C.29: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung P

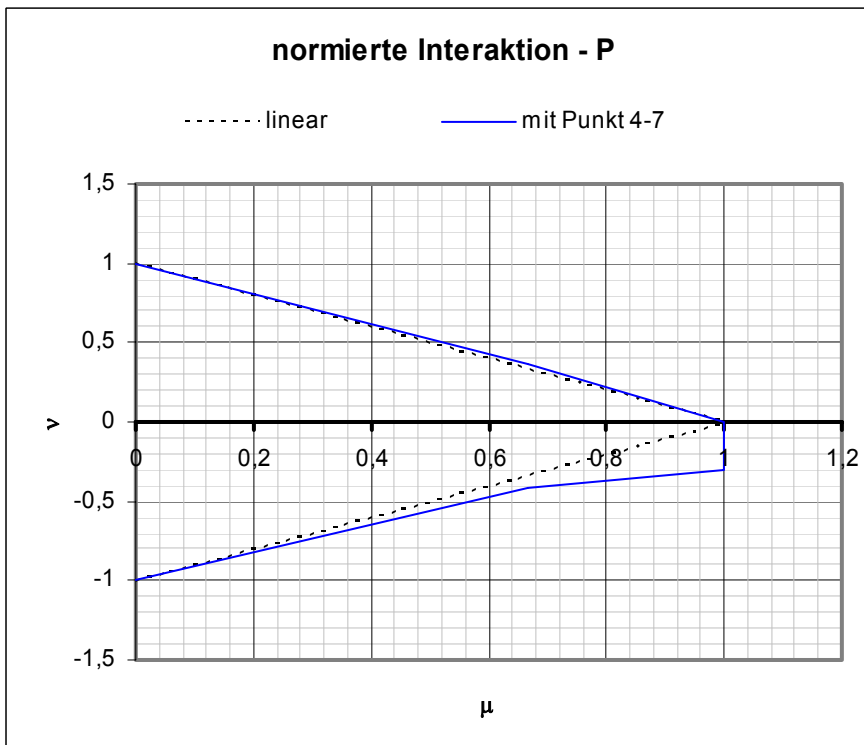


Bild C.30: Normierte Interaktionskurve - Verbindung P

C.2 Wertetabellen der Verbindungen A – P

Tabelle C.1: Interaktionspunkte - Verbindung A

M	N	Punkt
0	700,16	2
34,591	280,064	6
51,887	0	4
51,887	0	1
51,887	-107,426	5
34,591	-411,601	7
0	-832,076	3

Tabelle C.2: Interaktionspunkte - Verbindung B

M	N	Punkt
0	605,933	2
25,862	227,225	6
38,793	0	4
38,793	0	1
38,793	-69,468	5
25,862	-347,961	7
0	-693,814	3

Tabelle C.3: Interaktionspunkte - Verbindung C

M	N	Punkt
0	456	2
21,899	132,24	6
32,849	0	4
32,849	0	1
32,849	-120,636	5
21,899	-287,147	7
0	-551,933	3

Tabelle C.4: Interaktionspunkte - Verbindung D

M	N	Punkt
0	554,426	2
34,591	214,840	6
51,887	0	4
51,887	0	1
51,887	-107,426	5
34,591	-247,495	7
0	-620,38	3

Tabelle C.5: Interaktionspunkte - Verbindung E

M	N	Punkt
0	472,968	2
26,733	182,093	6
40,099	0	4
40,099	0	1
40,099	-172,163	5
26,733	-327,135	7
0	-491,894	3

Tabelle C.6: Interaktionspunkte - Verbindung F

M	N	Punkt
0	534,544	2
25,862	187,090	6
38,793	0	4
38,793	0	1
38,793	-69,468	5
25,862	-303,341	7
0	-612,315	3

Tabelle C.7: Interaktionspunkte - Verbindung G

M	N	Punkt
0	83,589	2
3,467	33,436	6
5,201	0	4
5,201	0	1
5,201	-43,131	5
3,467	-71,343	7
0	-123,231	3

Tabelle C.8: Interaktionspunkte - Verbindung H

M	N	Punkt
0	328,482	2
21,899	103,106	6
32,849	0	4
32,849	0	1
32,849	-56,261	5
21,899	-103,106	7
0	-359,949	3

Tabelle C.9: Interaktionspunkte - Verbindung I

M	N	Punkt
0	275,403	2
19,282	110,161	6
28,923	0	4
28,923	0	1
28,923	-86,661	5
19,282	-143,427	7
0	-315,555	3

Tabelle C.10: Interaktionspunkte - Verbindung K

M	N	Punkt
0	396,71	2
21,431	158,684	6
32,147	0	4
32,147	0	1
32,147	-146,849	5
21,431	-267,155	7
0	-419,568	3

Tabelle C.11: Interaktionspunkte - Verbindung L

M	N	Punkt
0	463,486	2
23,249	185,394	6
34,874	0	4
34,874	0	1
34,874	-63,908	5
23,249	-267,314	7
0	-551,933	3

Tabelle C.12: Interaktionspunkte - Verbindung M

M	N	Punkt
0	248,245	2
16,543	99,298	6
24,814	0	4
24,814	0	1
24,814	-79,512	5
16,543	-114,06	7
0	-280,065	3

Tabelle C.13: Interaktionspunkte - Verbindung N

M	N	Punkt
0	217,94	2
6,155	81,728	6
9,233	0	4
9,233	0	1
9,233	-25,236	5
6,155	-128,697	7
0	-255,56	3

Tabelle C.14: Interaktionspunkte - Verbindung O

M	N	Punkt
0	144,345	2
5,65	57,738	6
8,475	0	4
8,475	0	1
8,475	-43,752	5
5,65	-117,971	7
0	-176,076	3

Tabelle C.15: Interaktionspunkte - Verbindung P

M	N	Punkt
0	248,245	2
16,209	88,127	6
24,314	0	4
24,314	0	1
24,314	-85,802	5
16,209	-117,09	7
0	-279,419	3

C.3 Interaktionsdiagramme weiterer Träger-Träger-Verbindungen

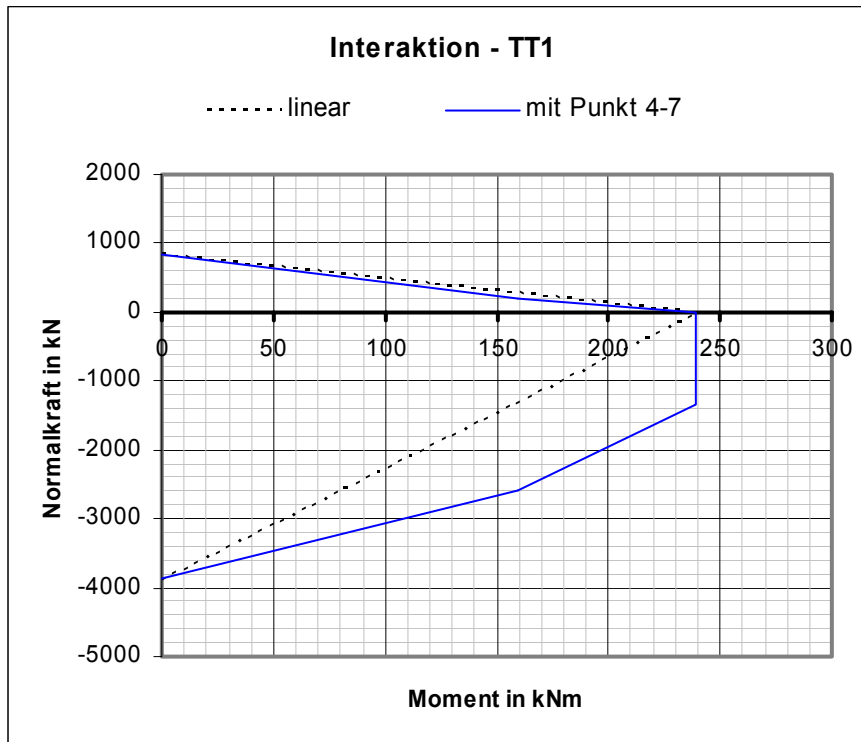


Bild C.31: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TT1

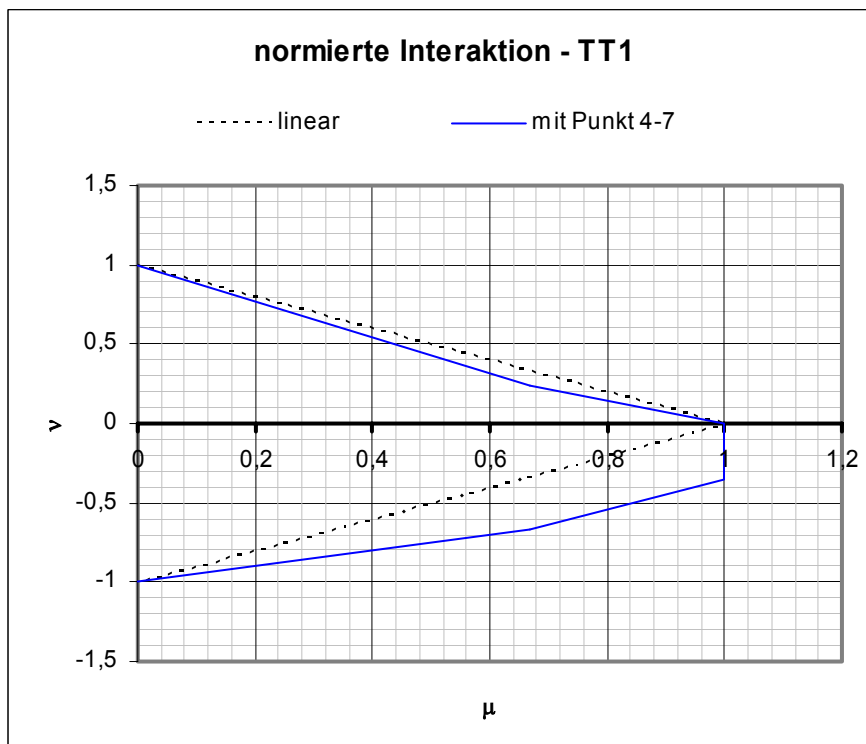


Bild C.32: Normierte Interaktionskurve – Verbindung TT1

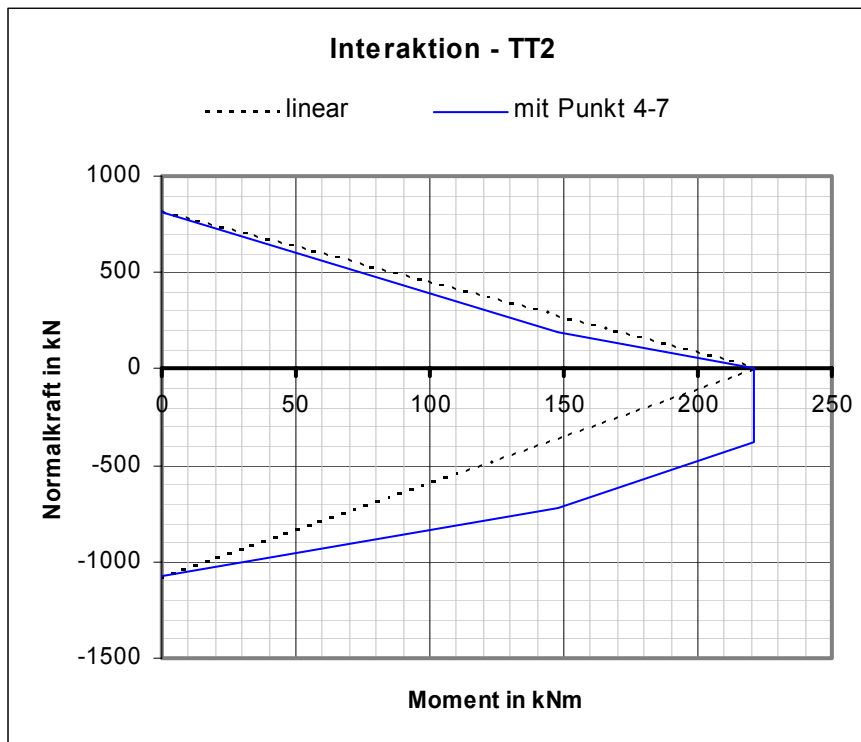


Bild C.33: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TT2

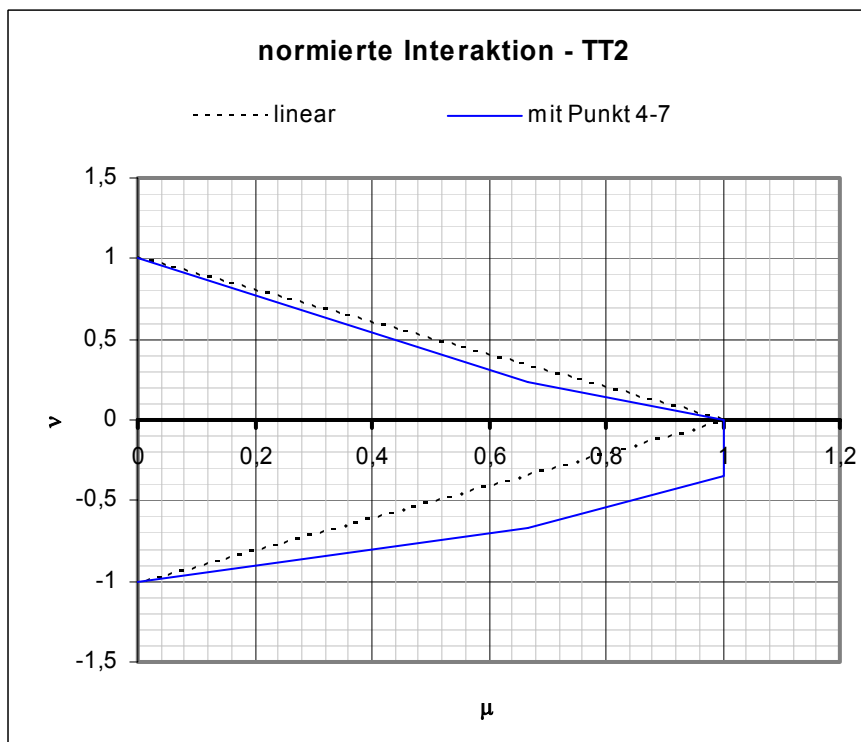


Bild C.34: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TT2

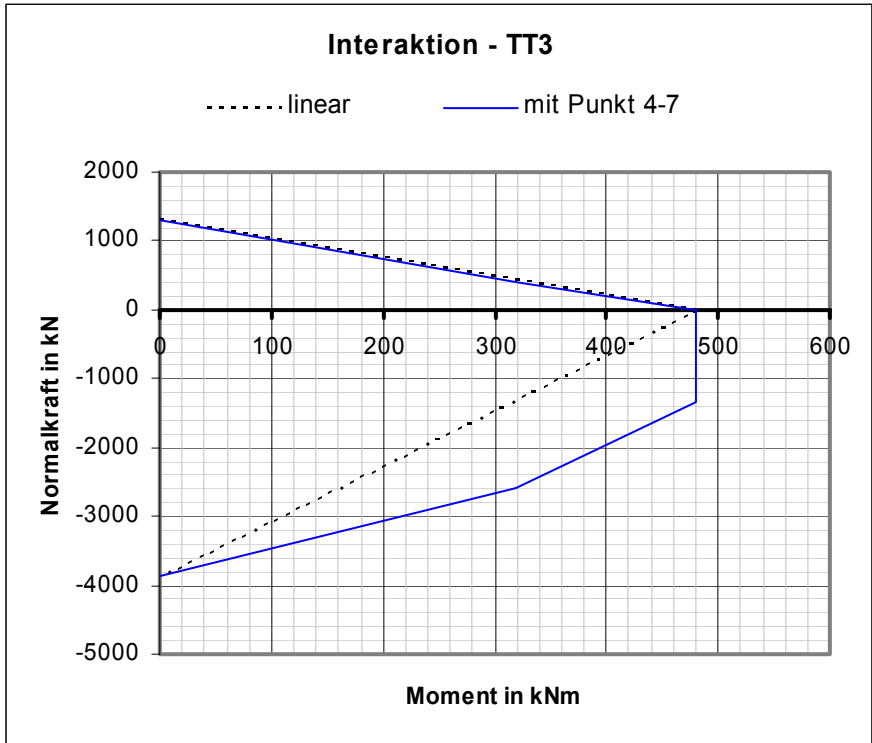


Bild C.35: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TT3

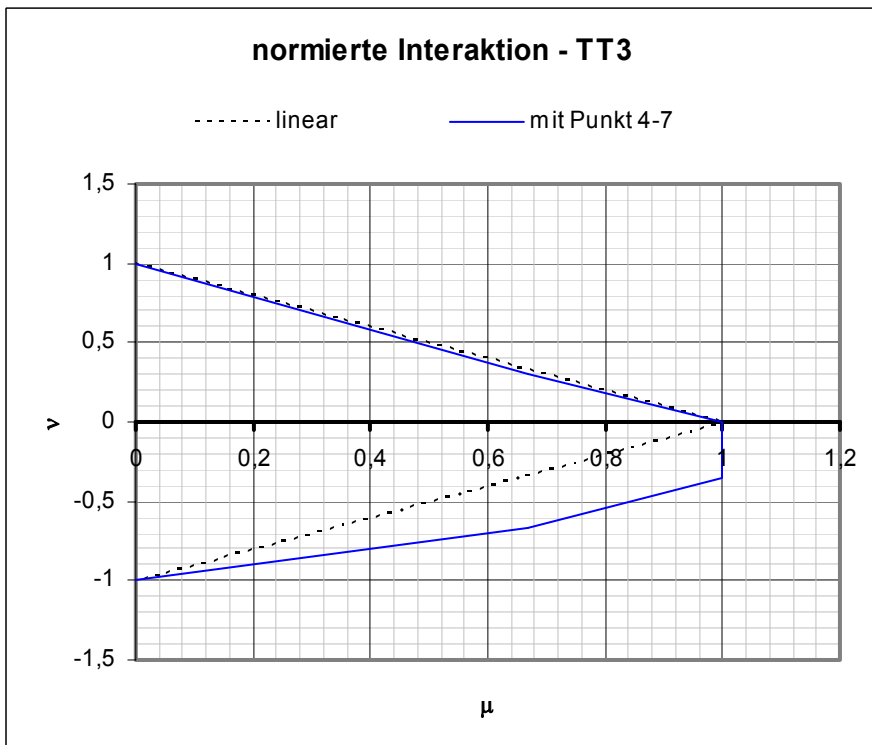


Bild C.36: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TT3

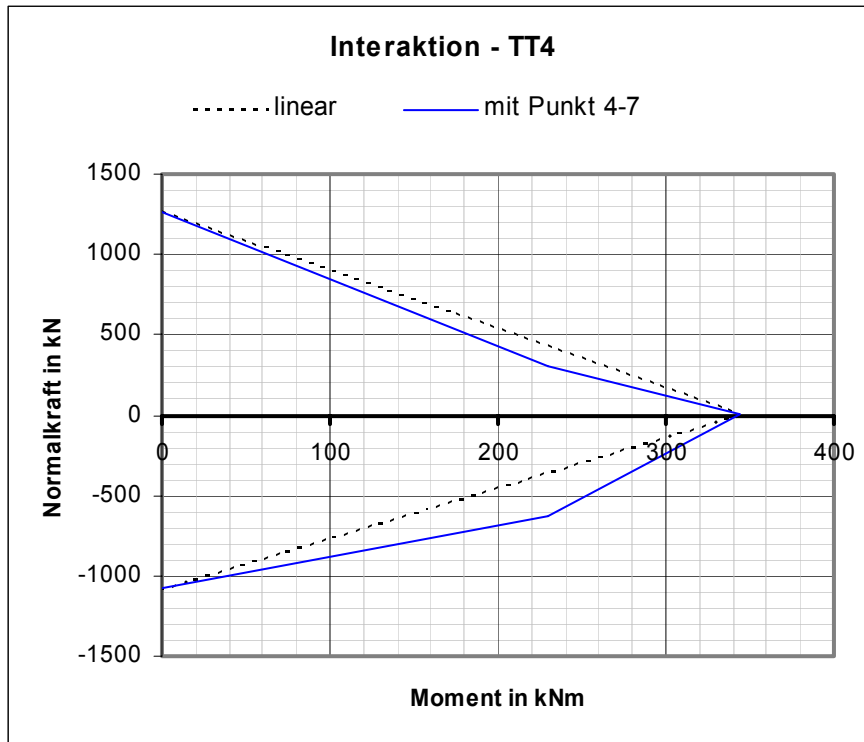


Bild C.37: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TT4

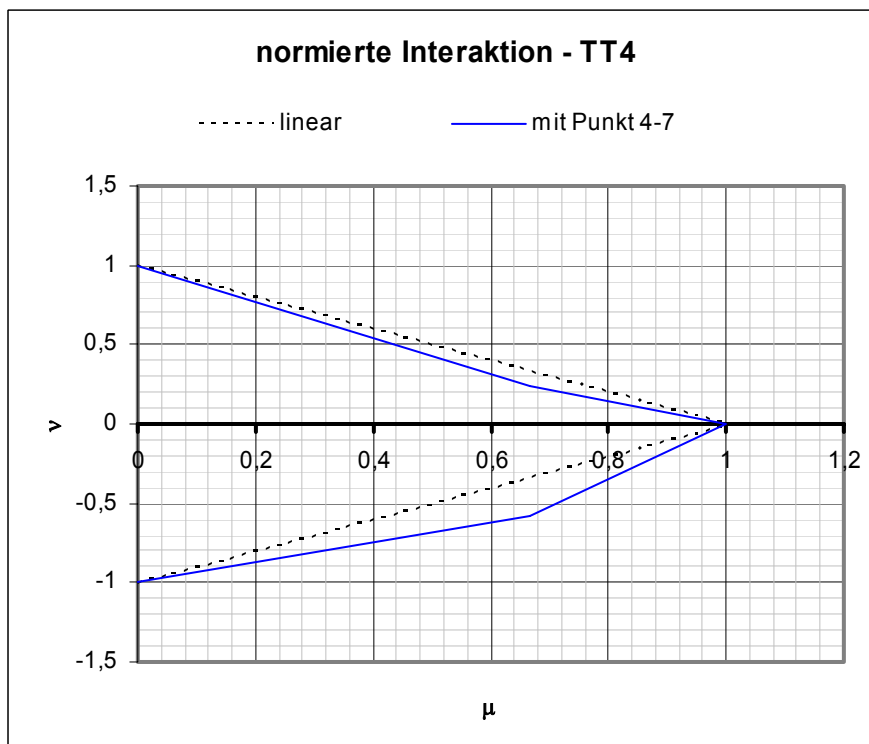


Bild C.38: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TT4

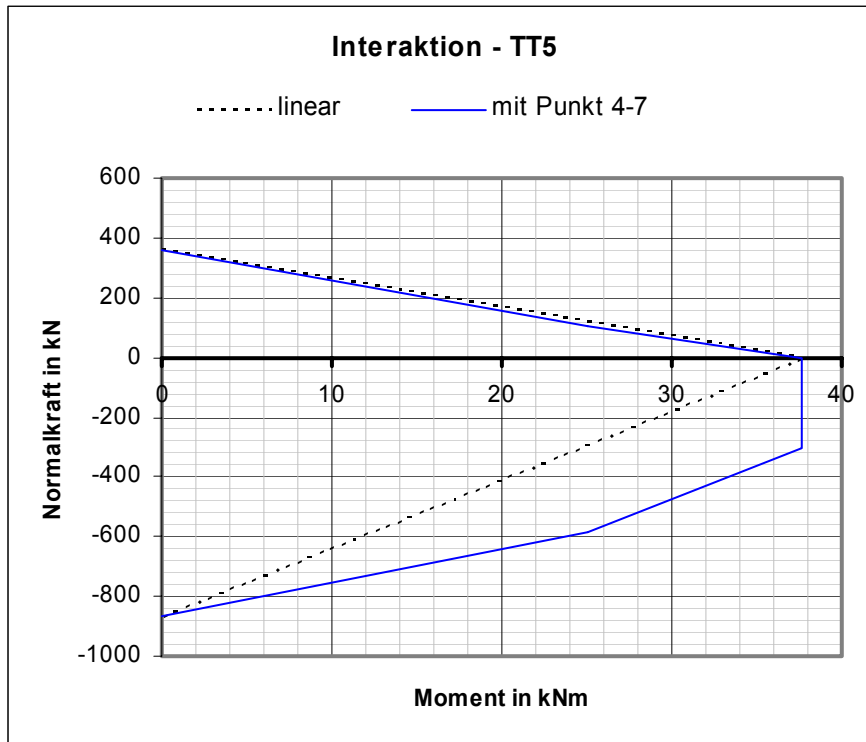


Bild C.39: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TT5

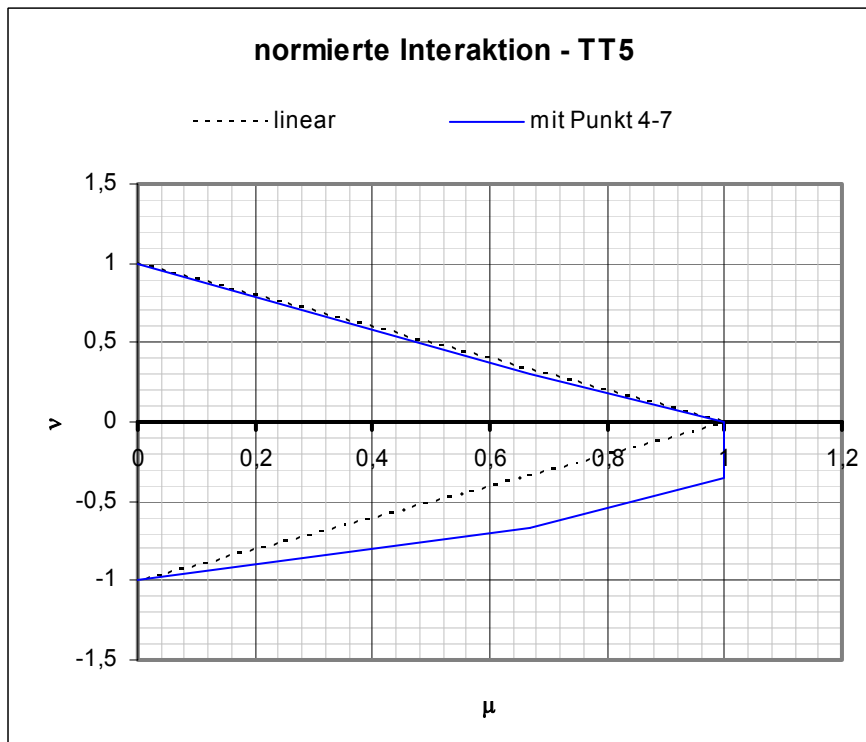


Bild C.40: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TT5

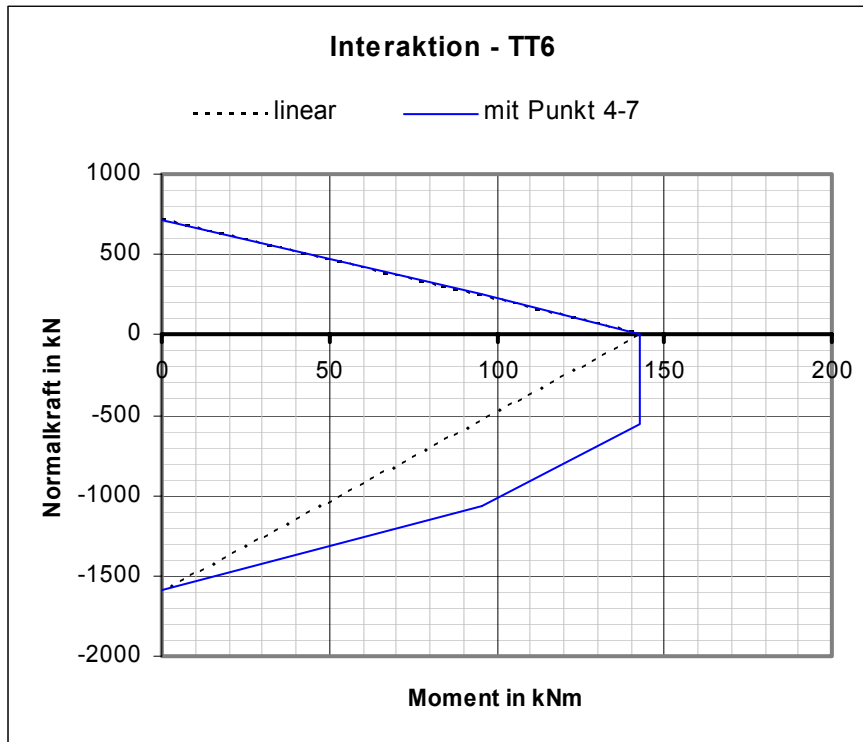


Bild C.41: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TT6

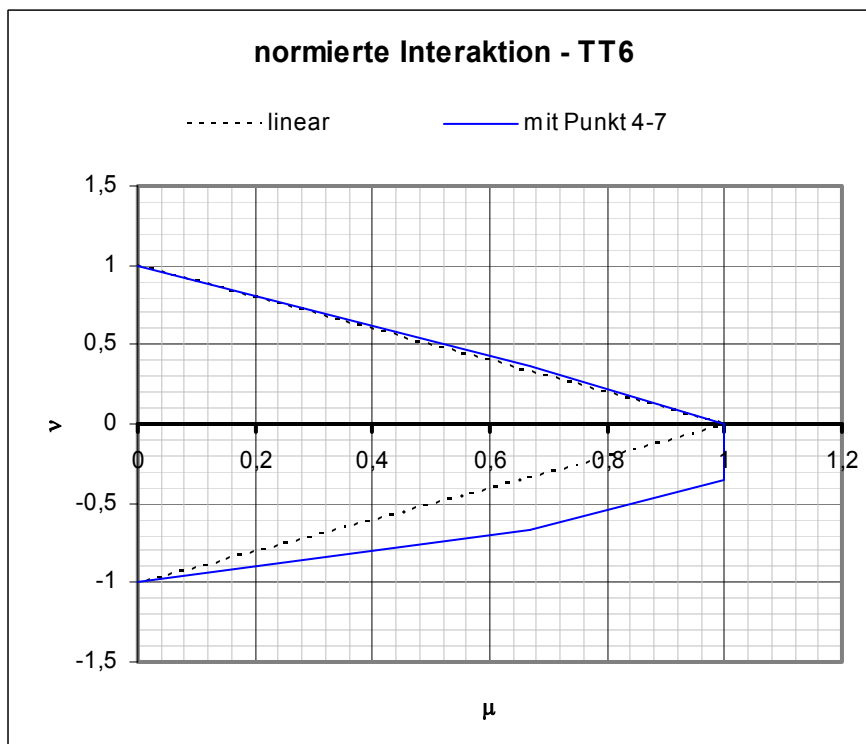


Bild C.42: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TT6

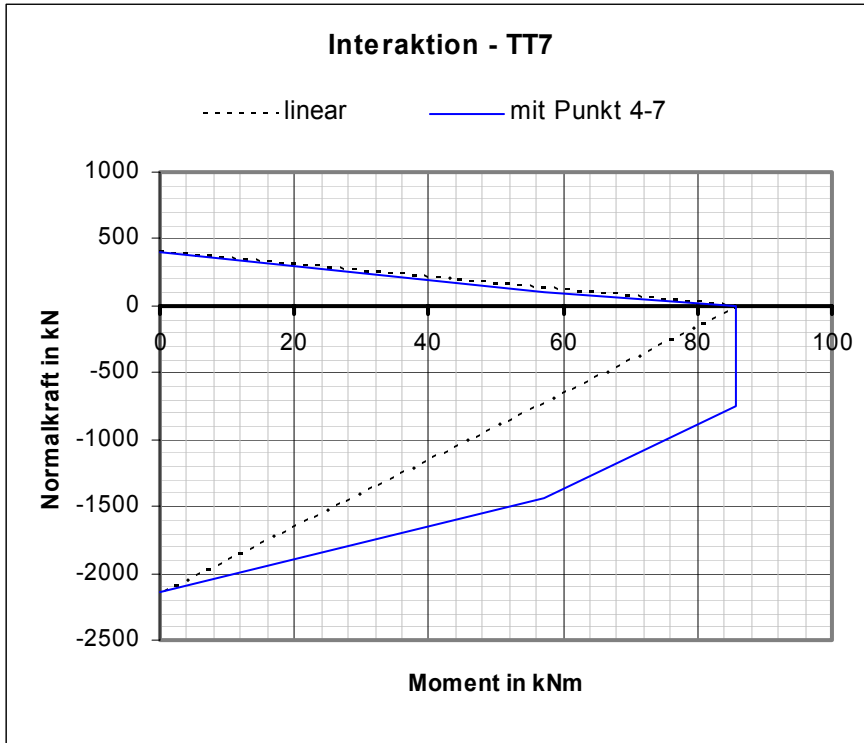


Bild C.43: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TT7

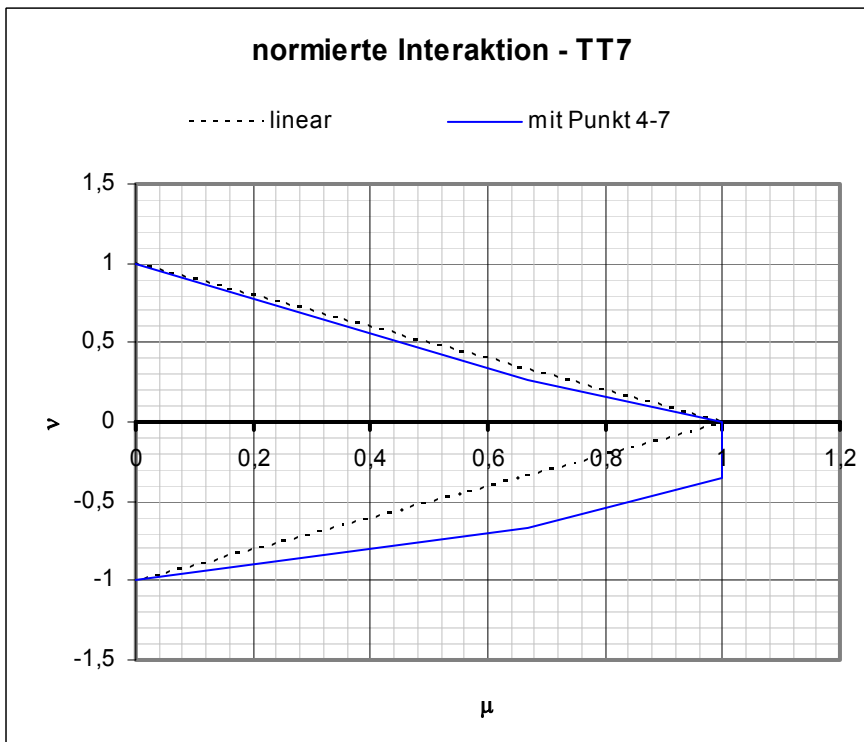


Bild C.44: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TT7

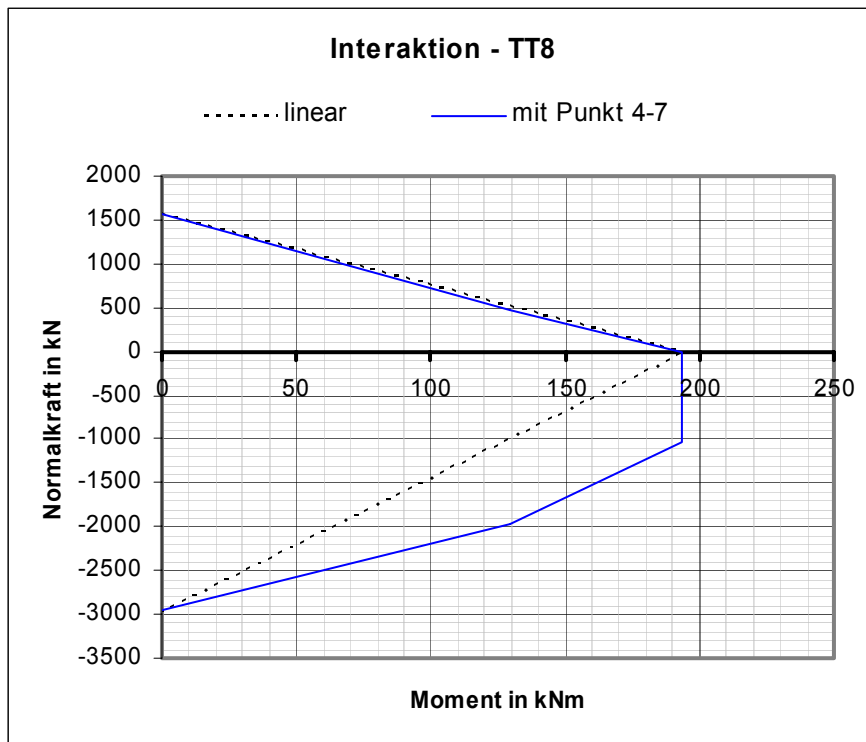


Bild C.45: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TT8

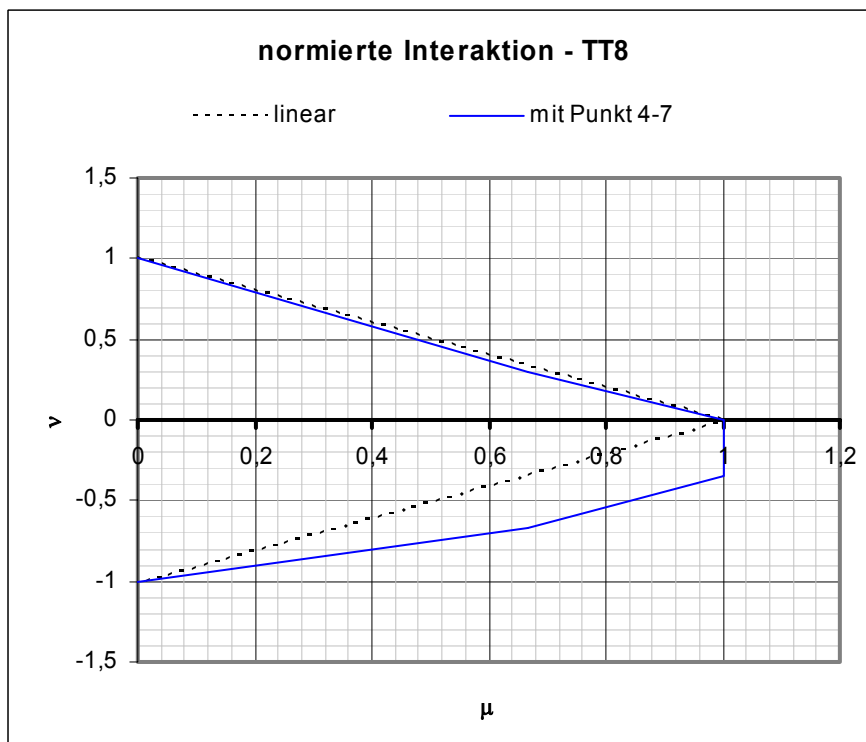


Bild C.46: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TT8

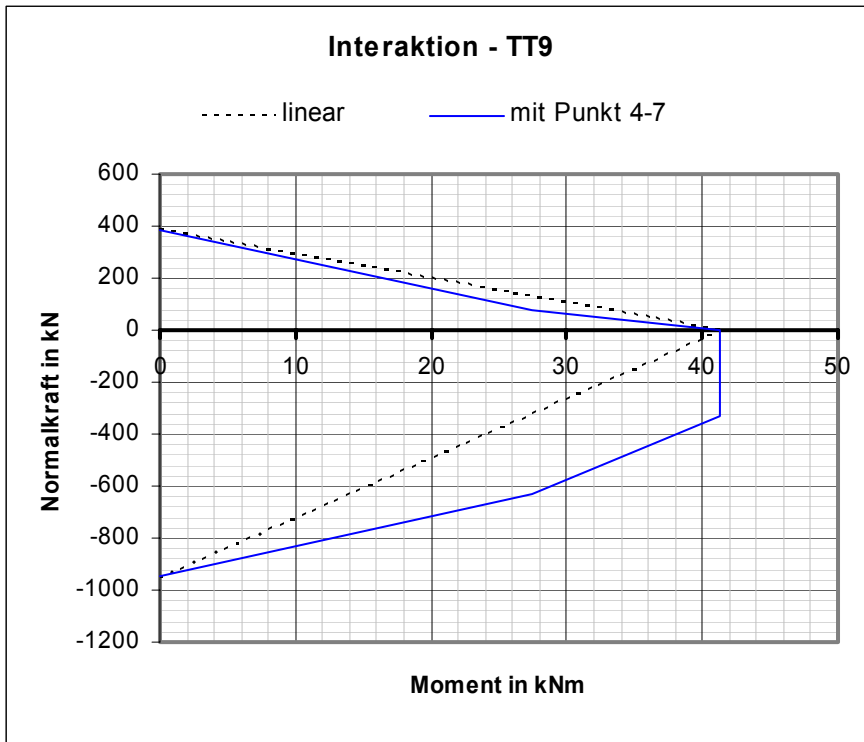


Bild C.47: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TT9

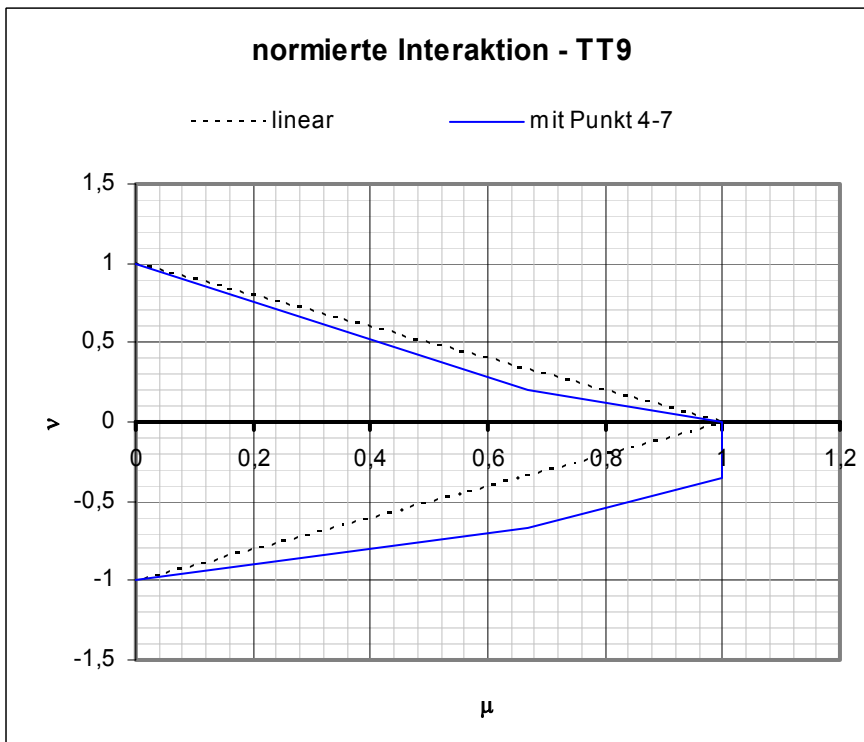


Bild C.48: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TT9

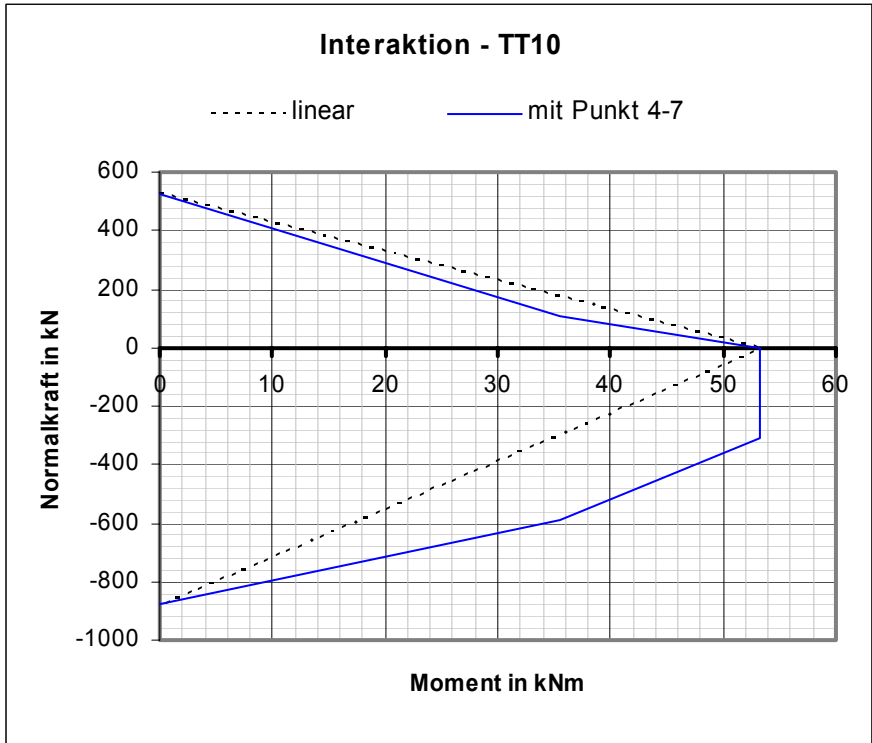


Bild C.49: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TT10

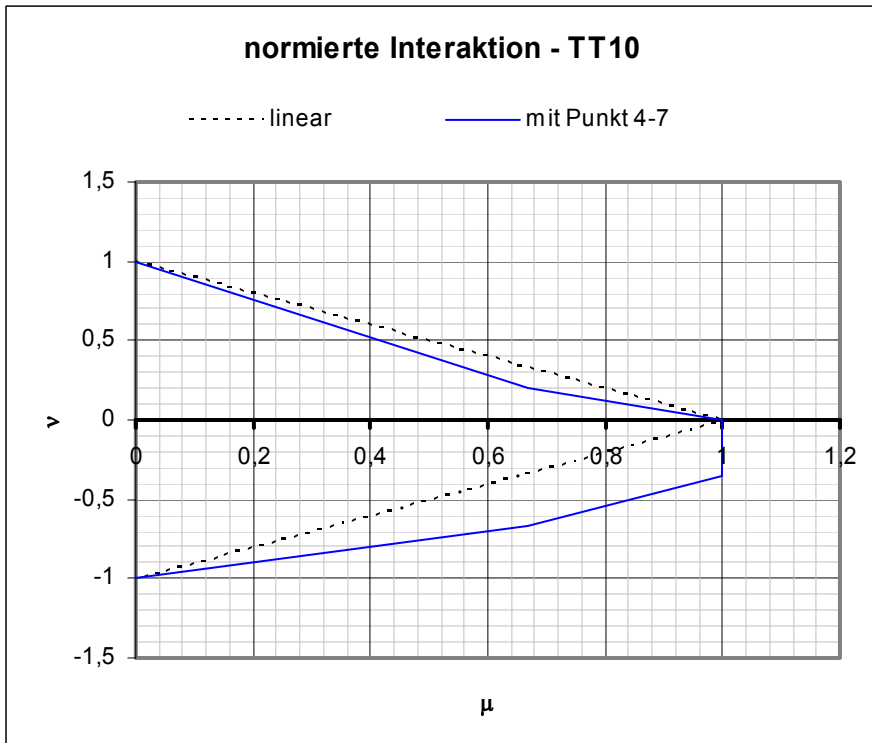


Bild C.50: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TT10

C.4 Wertetabellen weiterer Träger-Träger-Verbindungen

Tabelle C.16: Interaktionspunkte - Verbindung TT1

M	N	Punkt
0	833,238	2
159,566	198,936	6
239,349	0	4
239,349	0	1
239,349	-1349,173	5
159,566	-2582,703	7
0	-3854,78	3

Tabelle C.17: Interaktionspunkte - Verbindung TT2

M	N	Punkt
0	810,277	2
147,436	187,377	6
221,154	0	4
221,154	0	1
221,154	-376,520	5
147,436	-720,767	7
0	-1075,771	3

Tabelle C.18: Interaktionspunkte - Verbindung TT3

M	N	Punkt
0	1305,74	2
319,515	391,722	6
479,273	0	4
479,273	0	1
479,273	-1349,173	5
319,515	-2582,703	7
0	-3854,78	3

Tabelle C.19: Interaktionspunkte - Verbindung TT4

M	N	Punkt
0	1265,567	2
229,408	306,584	6
344,112	0	4
344,112	0	1
344,112	0	5
229,408	-627,698	7
0	-1075,771	3

Tabelle C.20: Interaktionspunkte - Verbindung TT5

M	N	Punkt
0	358,632	2
25,112	107,500	6
37,668	0	4
37,668	0	1
37,668	-303,87	5
25,112	-581,694	7
0	-868,2	3

Tabelle C.21: Interaktionspunkte - Verbindung TT6

M	N	Punkt
0	712	2
95,253	255,252	6
142,879	0	4
142,879	0	1
142,879	-555,055	5
95,253	-1062,534	7
0	-1585,872	3

Tabelle C.22: Interaktionspunkte - Verbindung TT7

M	N	Punkt
0	396,47	2
57,091	104,073	6
85,637	0	4
85,637	0	1
85,637	-751,215	5
57,091	-1438,040	7
0	-2146,328	3

Tabelle C.23: Interaktionspunkte - Verbindung TT8

M	N	Punkt
0	1568,91	2
129,216	470,673	6
193,824	0	4
193,824	0	1
193,824	-1030,506	5
129,216	-1972,683	7
0	-2944,303	3

Tabelle C.24: Interaktionspunkte - Verbindung TT9

M	N	Punkt
0	383,652	2
27,491	77,114	6
41,237	0	4
41,237	0	1
41,237	-330,800	5
27,491	-633,245	7
0	-945,142	3

Tabelle C.25: Interaktionspunkte - Verbindung TT10

M	N	Punkt
0	521,601	2
35,444	104,320	6
53,166	0	4
53,166	0	1
53,166	-307,484	5
35,444	-588,612	7
0	-878,526	3

C.5 Interaktionsdiagramme weiterer Träger-Stützen-Verbindungen

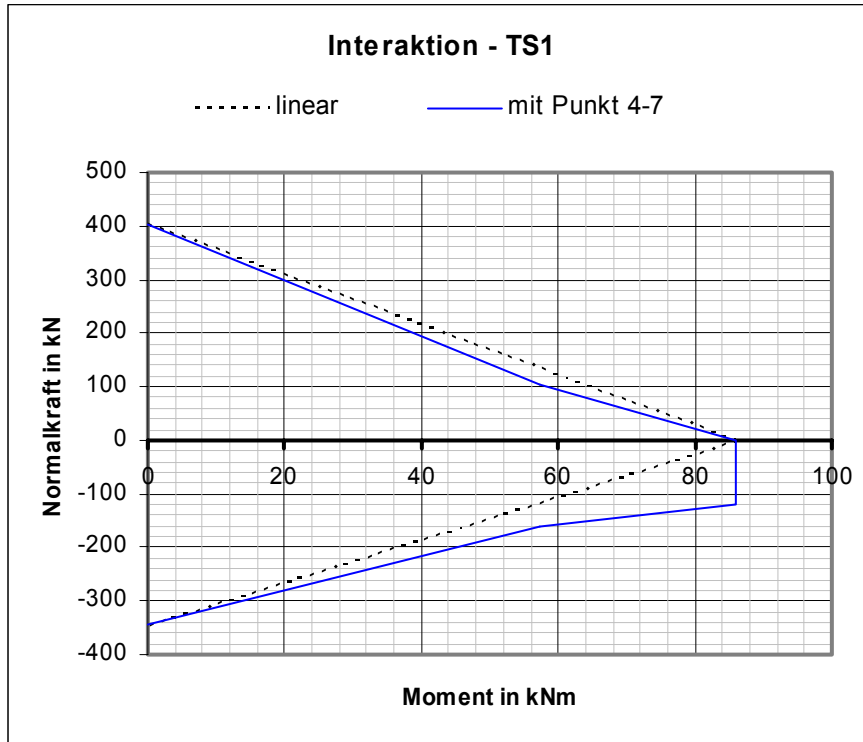


Bild C.51: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TS1

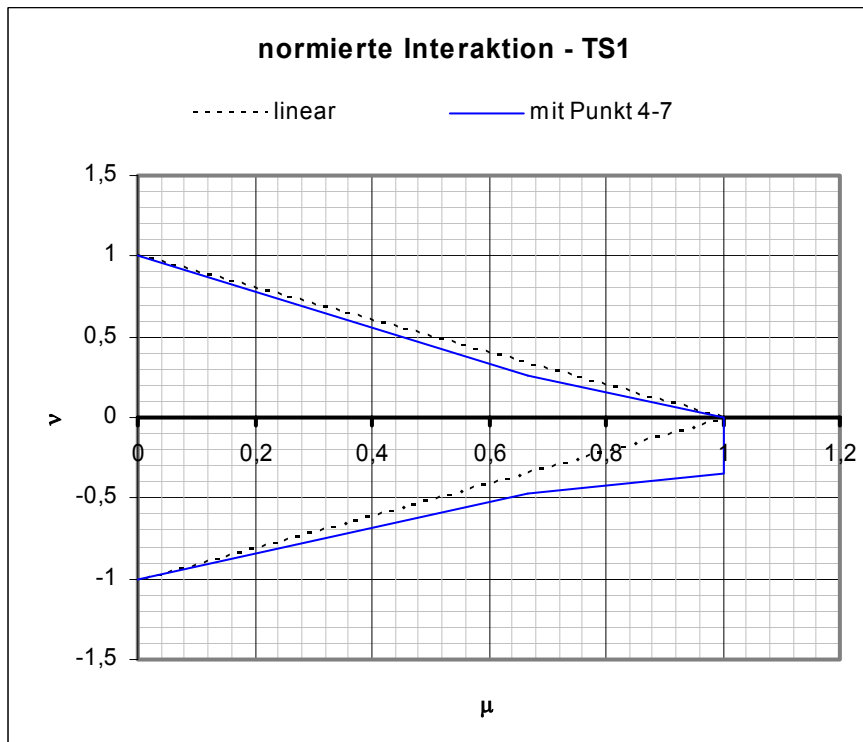


Bild C.52: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TS1

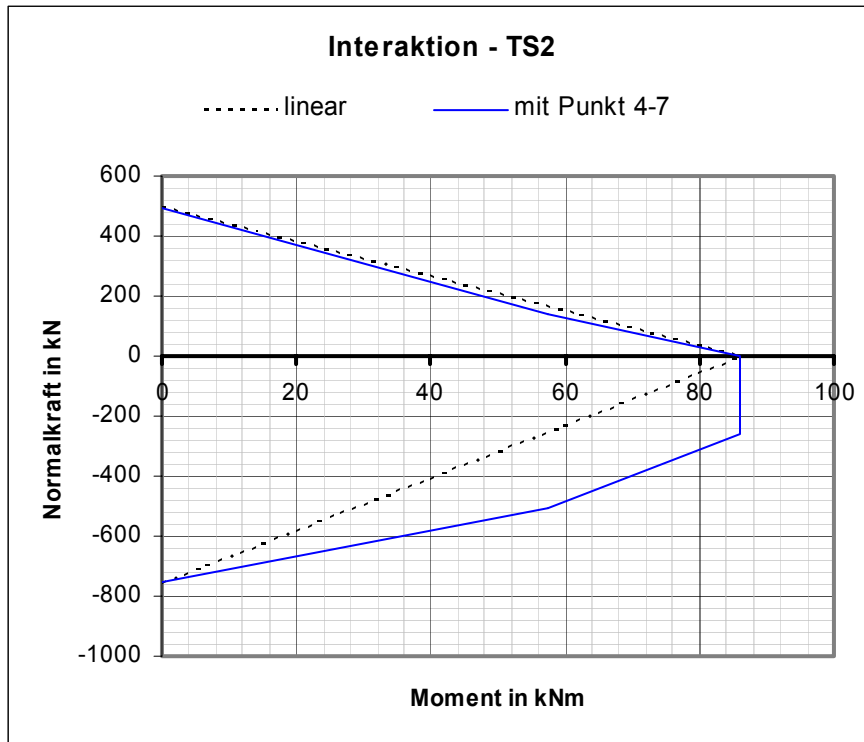


Bild C.53: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TS2

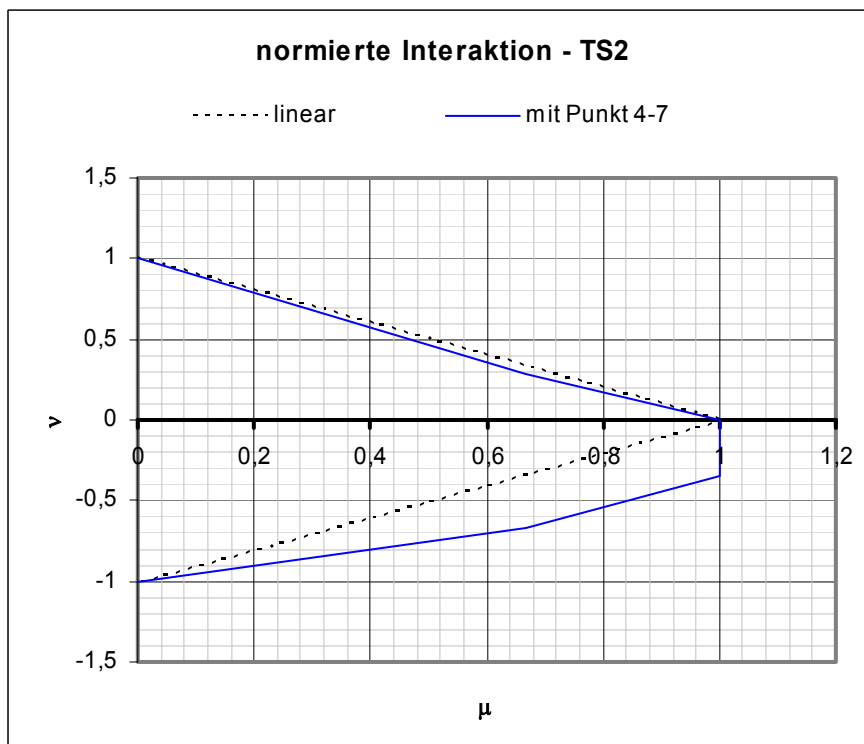


Bild C.54: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TS2

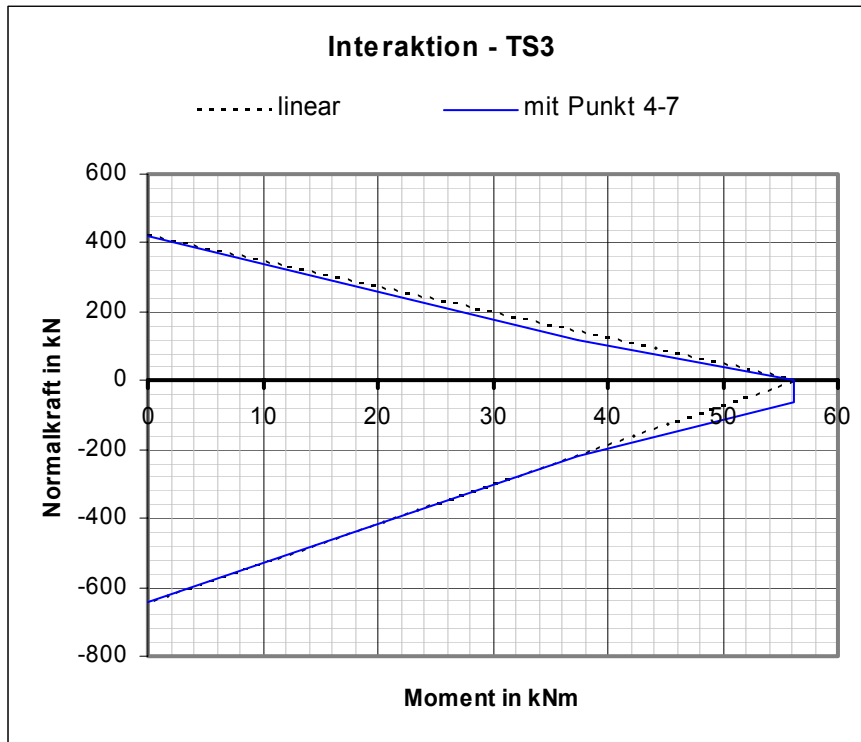


Bild C.55: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TS3

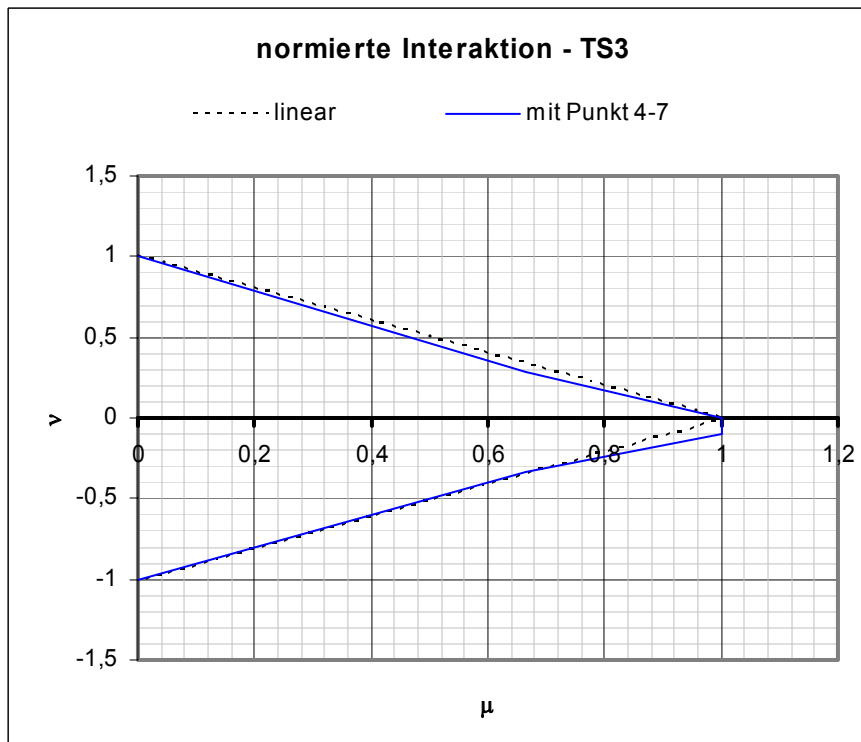


Bild C.56: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TS3

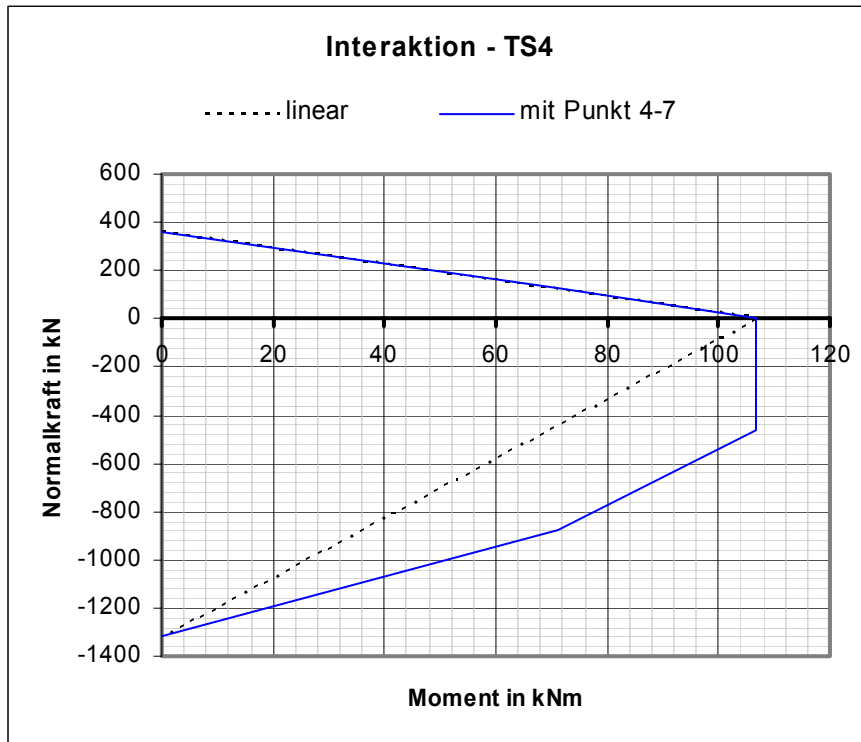


Bild C.57: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TS4

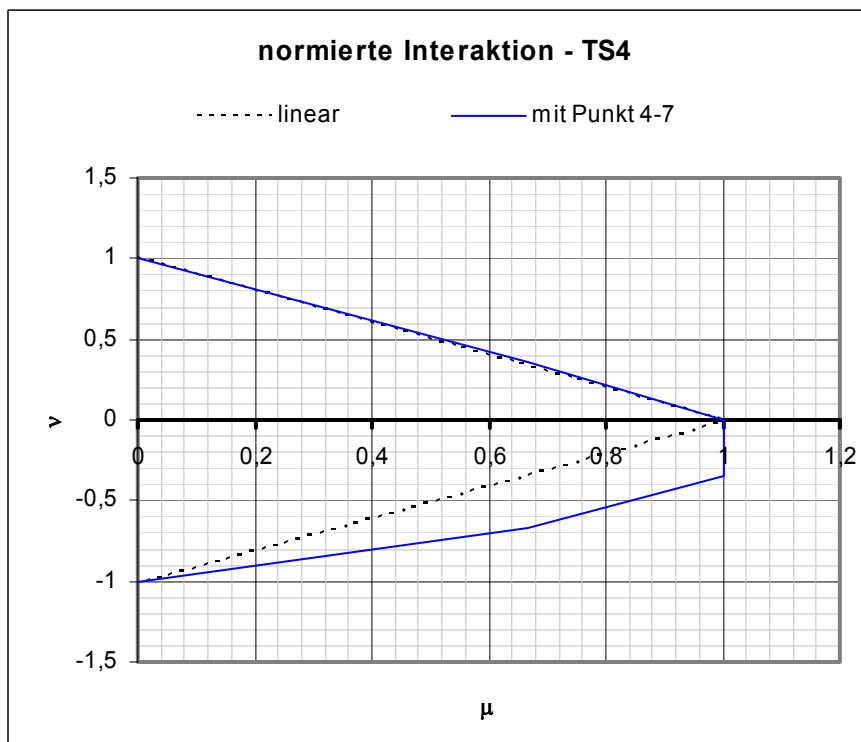


Bild C.58: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TS4

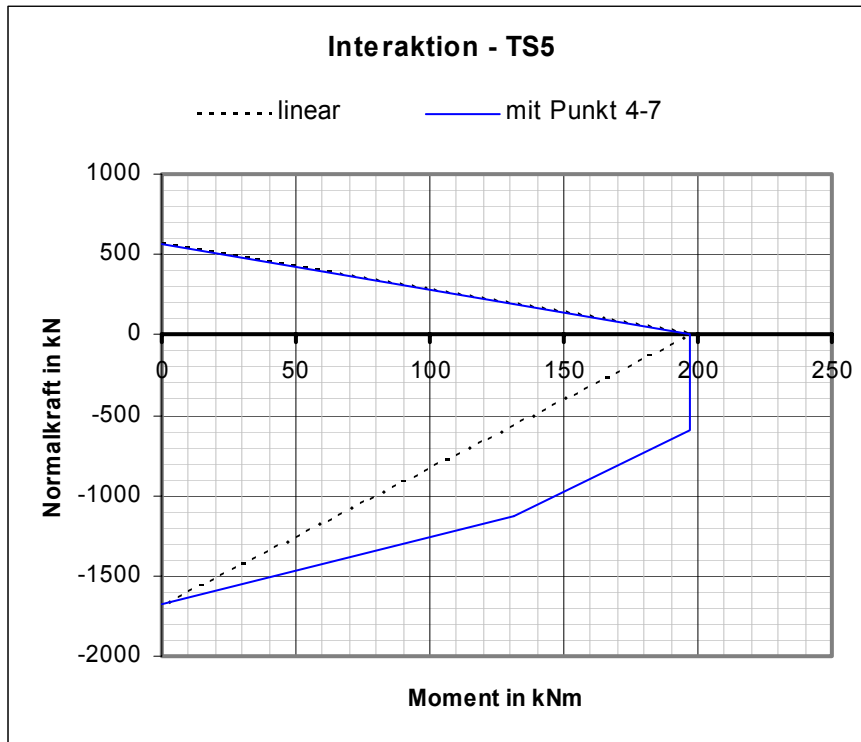


Bild C.59: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TS5

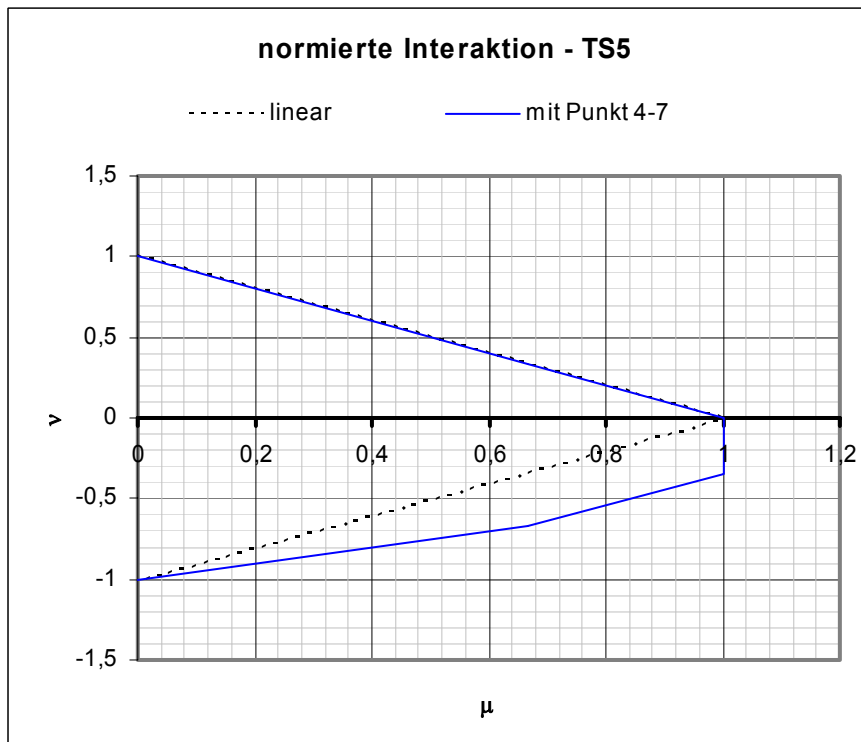


Bild C.60: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TS5

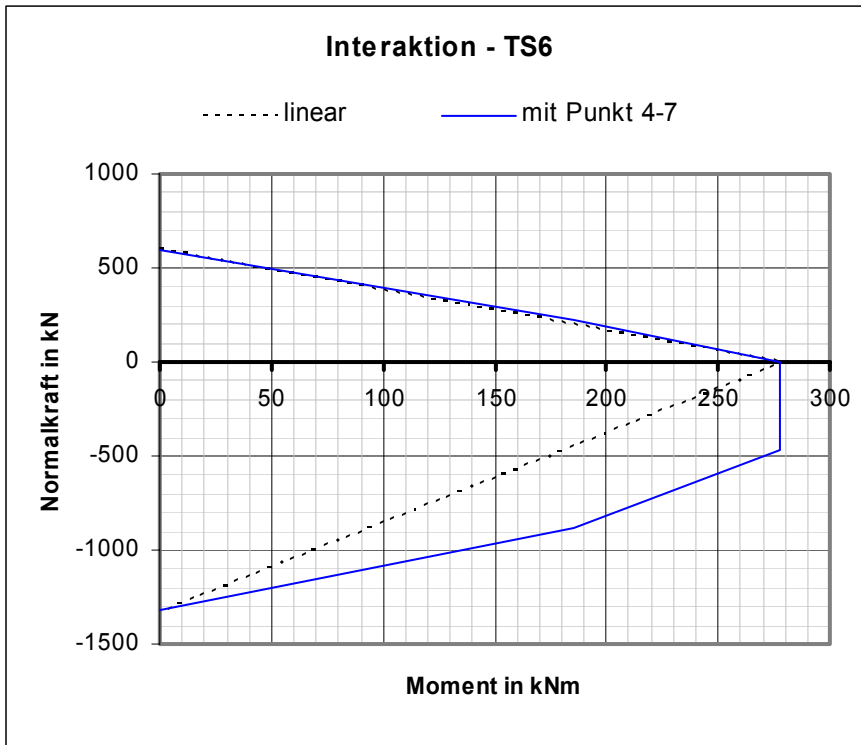


Bild C.61: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung TS6

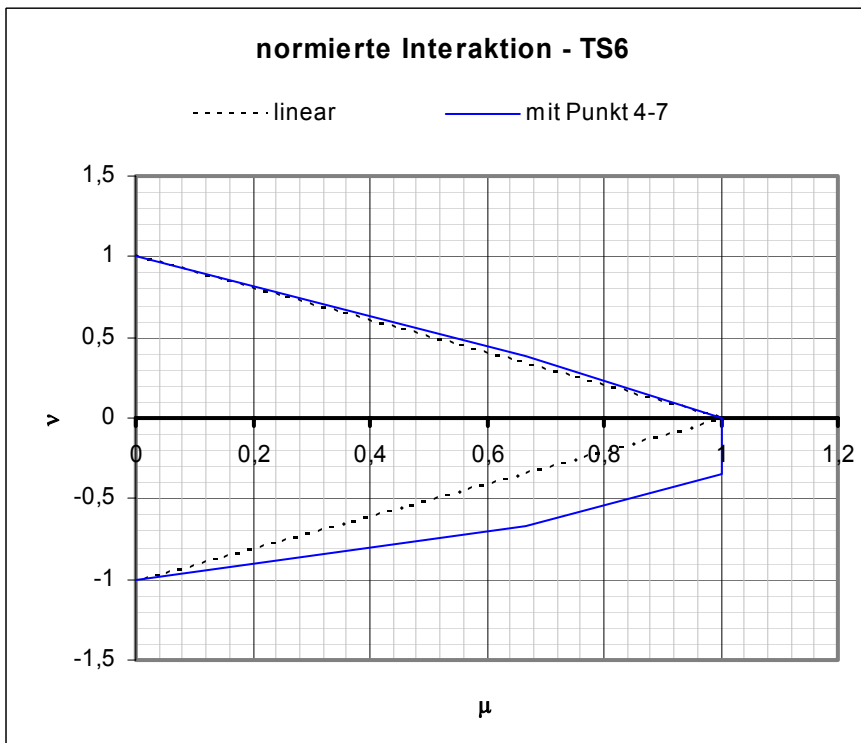


Bild C.62: Normierte Interaktionskurve - Verbindung TS6

C.6 Wertetabellen weiterer Träger-Stützen-Verbindungen

Tabelle C.26: Interaktionspunkte - Verbindung TS1

M	N	Punkt
0	402,79	2
57,331	102,711	6
85,996	0	4
85,996	0	1
85,996	-120,749	5
57,331	-161,087	7
0	-344,996	3

Tabelle C.27: Interaktionspunkte - Verbindung TS2

M	N	Punkt
0	490,692	2
57,438	137,394	6
86,157	0	4
86,157	0	1
86,157	-263,024	5
57,438	-503,504	7
0	-751,498	3

Tabelle C.28: Interaktionspunkte - Verbindung TS3

M	N	Punkt
0	421,321	2
37,463	118,813	6
56,194	0	4
56,194	0	1
56,194	-63,165	5
37,463	-217,016	7
0	-645,778	3

Tabelle C.29: Interaktionspunkte - Verbindung TS4

M	N	Punkt
0	357,92	2
71,12	127,062	6
106,68	0	4
106,68	0	1
106,68	-460,150	5
71,12	-876,875	7
0	-1314,715	3

Tabelle C.30: Interaktionspunkte - Verbindung TS5

M	N	Punkt
0	568,605	2
131,441	194,747	6
197,161	0	4
197,161	0	1
197,161	-588,525	5
131,441	-1126,606	7
0	-1681,501	3

Tabelle C.31: Interaktionspunkte - Verbindung TS6

M	N	Punkt
0	597,539	2
185,349	224,077	6
278,023	0	4
278,023	0	1
278,023	-463,559	5
185,349	-887,384	7
0	-1324,453	3

C.7 Interaktionsdiagramme weiterer Verbindungen

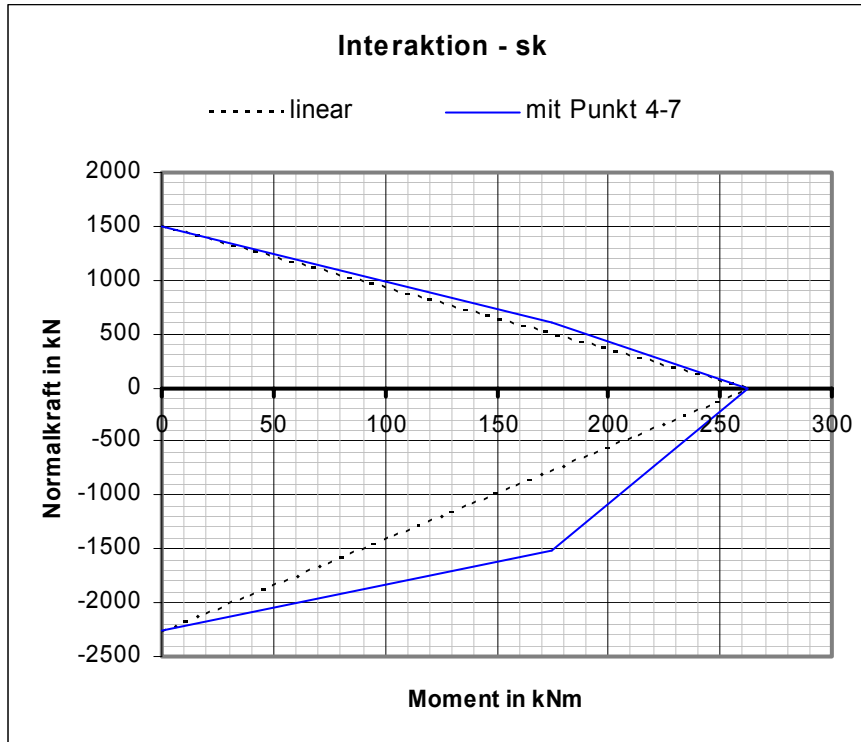


Bild C.63: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung S-K

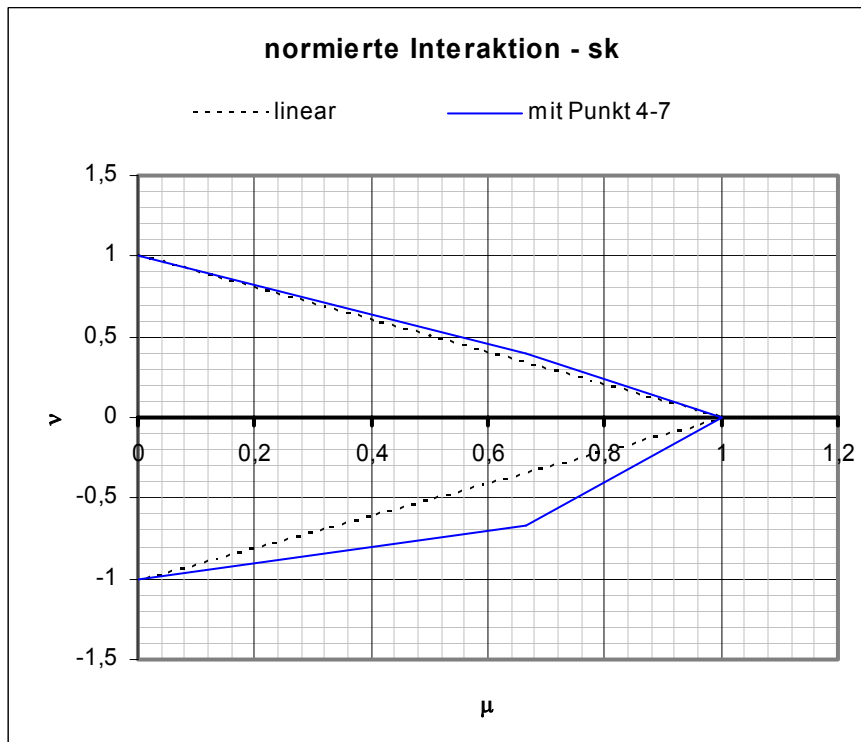


Bild C.64: Normierte Interaktionskurve - Verbindung S-K

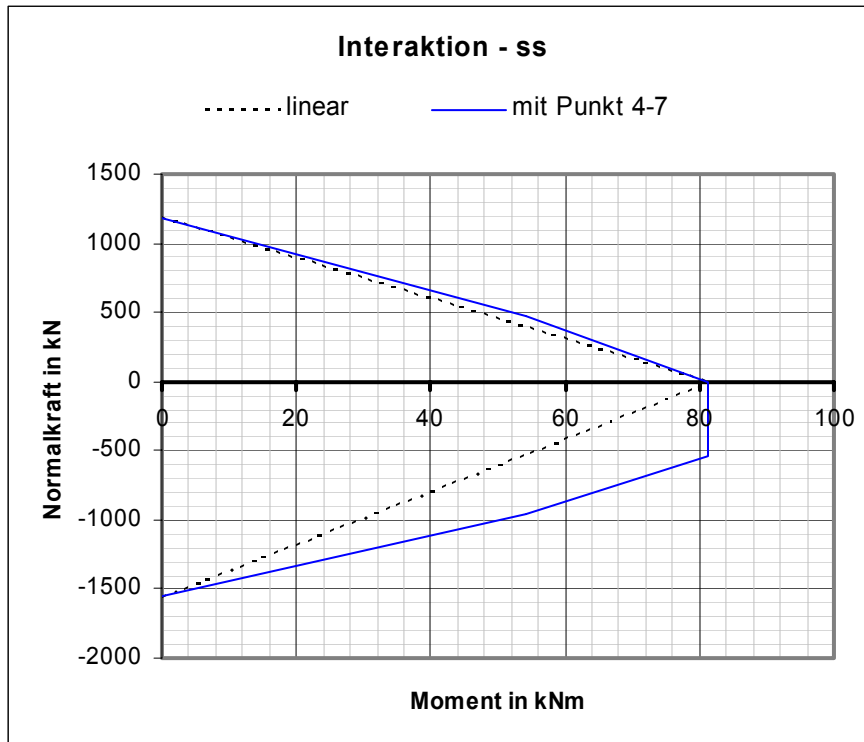


Bild C.65: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung S-S

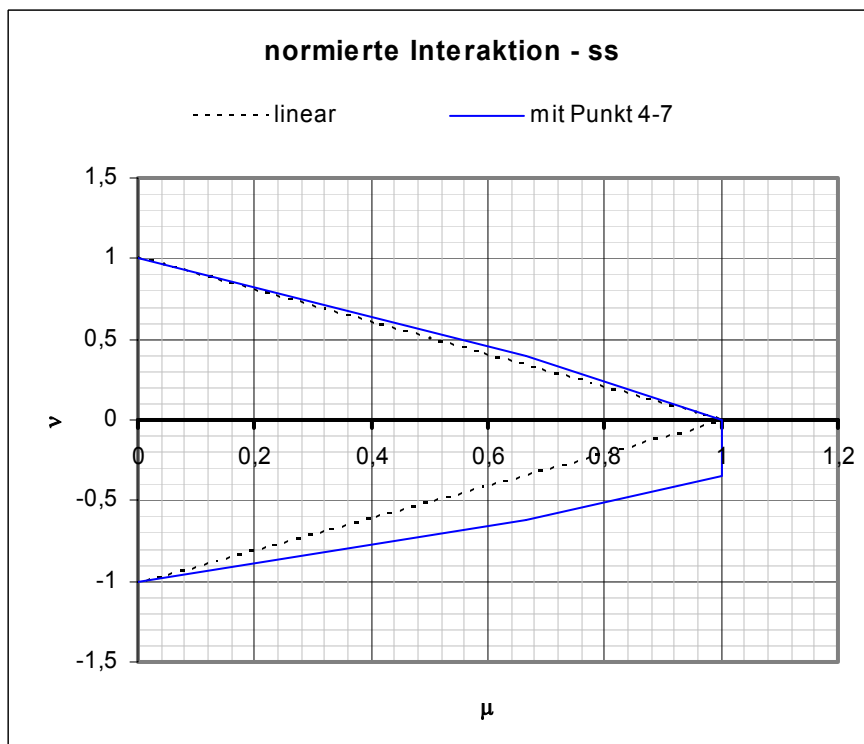


Bild C.66: Normierte Interaktionskurve - Verbindung S-S

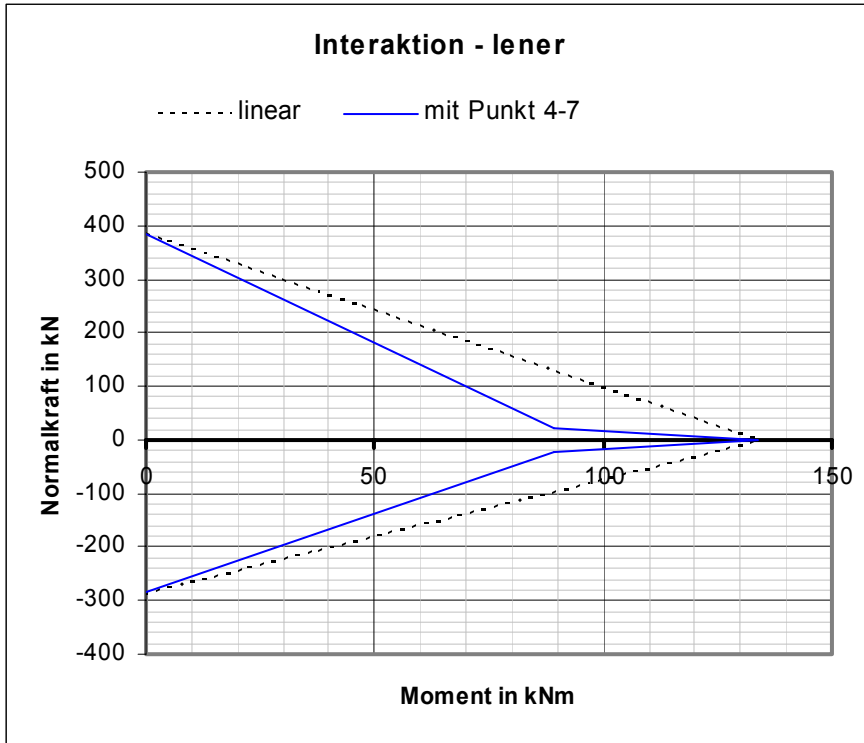


Bild C.67: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Kalibrierungsverbindung „Lener“

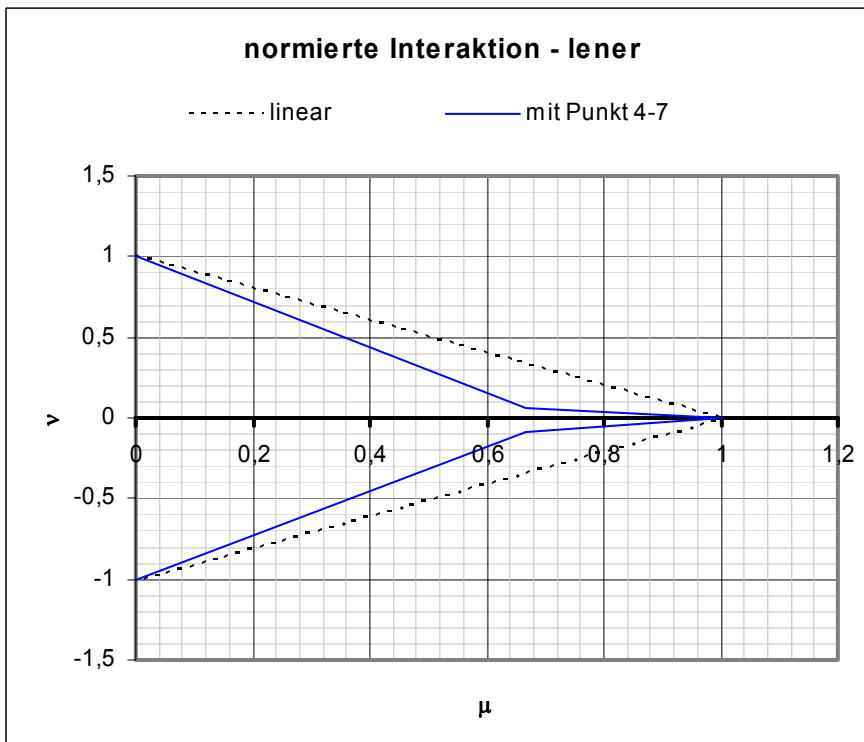


Bild C.68: Normierte Interaktionskurve - Kalibrierungsverbindung „Lener“

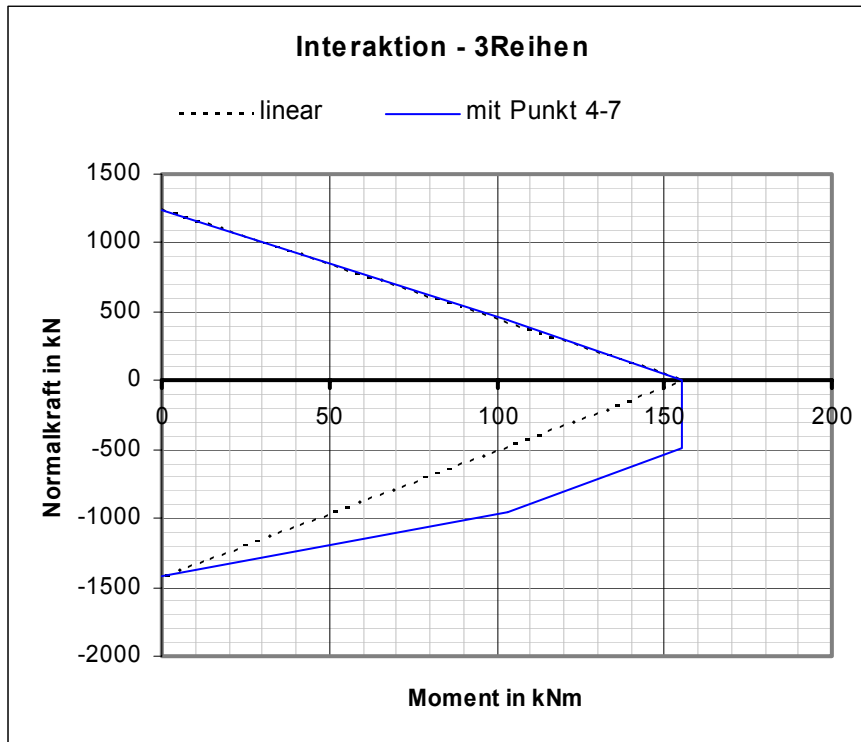


Bild C.69: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung „3 Reihen“

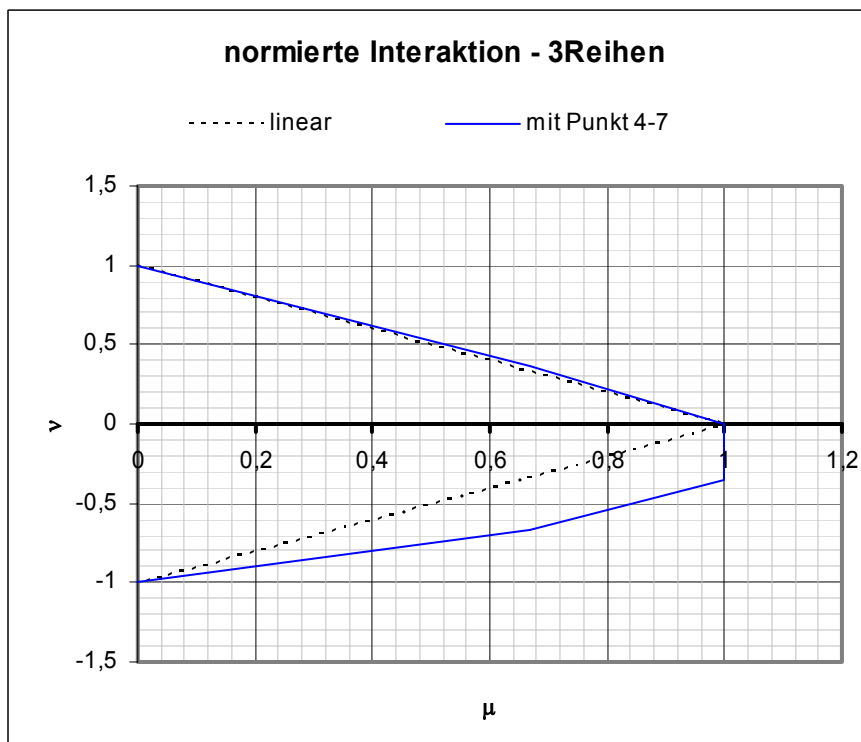


Bild C.70: Normierte Interaktionskurve - Verbindung „3 Reihen“

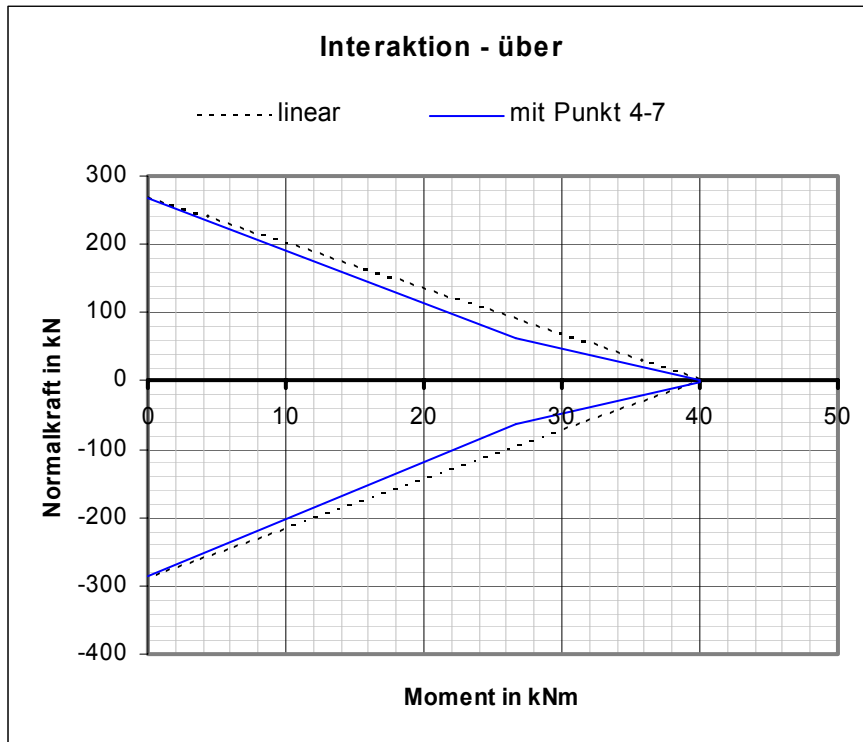


Bild C.71: Interaktionskurve nach Kapitel 6 - Verbindung „über“

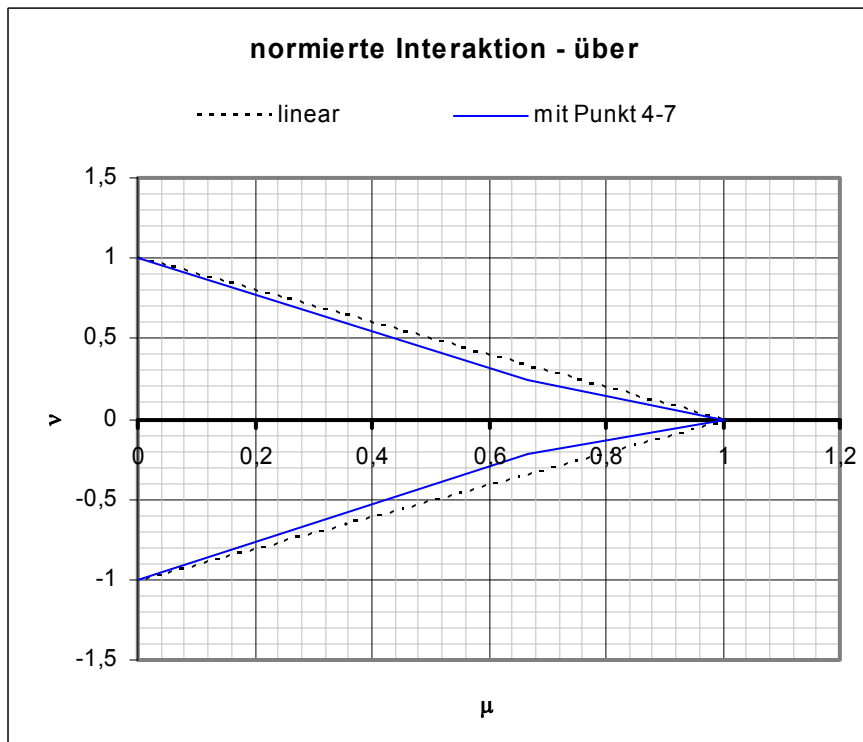


Bild C.72: Normierte Interaktionskurve - Verbindung „über“

C.8 Wertetabellen weiterer Verbindungen

Tabelle C.32: Interaktionspunkte - Verbindung S-K

M	N	Punkt
0	1501,434	2
174,864	600,574	6
262,296	0	4
262,296	0	1
262,296	0	5
174,864	-1517,277	7
0	-2264,593	3

Tabelle C.33: Interaktionspunkte - Verbindung S-S

M	N	Punkt
0	1182,821	2
54,186	473,128	6
81,279	0	4
81,279	0	1
81,279	-545,169	5
54,186	-961,055	7
0	-1557,626	3

Tabelle C.34: Interaktionspunkte – Kalibrierungsverbindung „Lener“

M	N	Punkt
0	384,036	2
89,343	23,482	6
134,015	0	4
134,015	0	1
134,015	0	5
89,343	-23,482	7
0	-285,269	3

Tabelle C.35: Interaktionspunkte - Verbindung „3 Reihen“

M	N	Punkt
0	1237,003	2
103,379	445,321	6
155,068	0	4
155,068	0	1
155,068	-495,820	5
103,379	-949,141	7
0	-1416,628	3

Tabelle C.36: Interaktionspunkte - Verbindung „über“

M	N	Punkt
0	266,988	2
26,697	62,963	6
40,045	0	4
40,045	0	1
40,045	-2,693	5
26,697	-62,963	7
0	-284,333	3

D Zur Auswertung der FE-Untersuchung

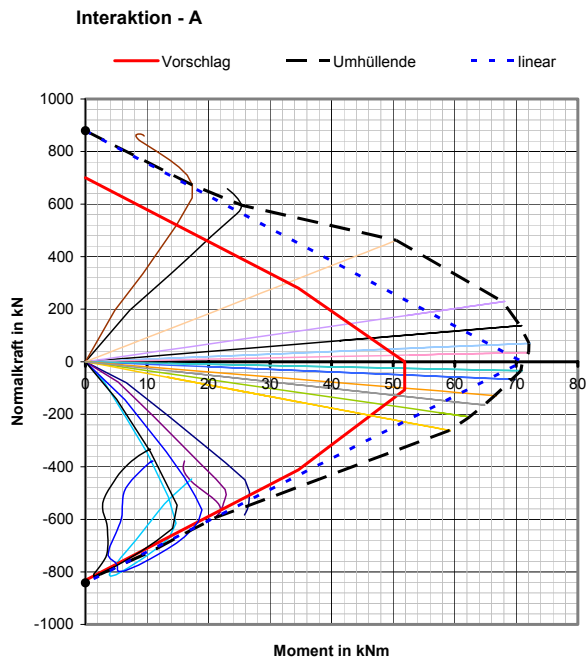


Bild D.1: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung A

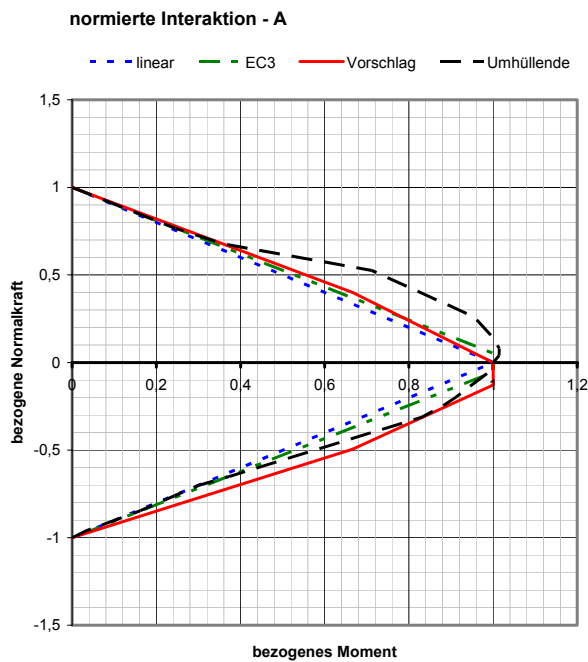


Bild D.2: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung A

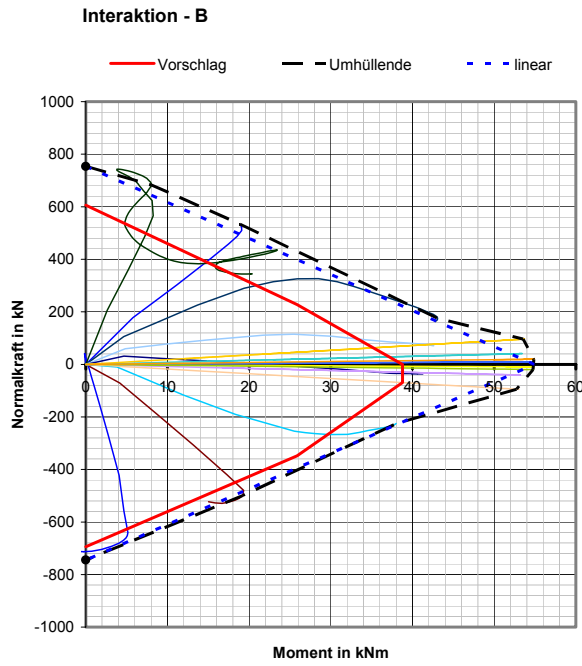


Bild D.3: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung B

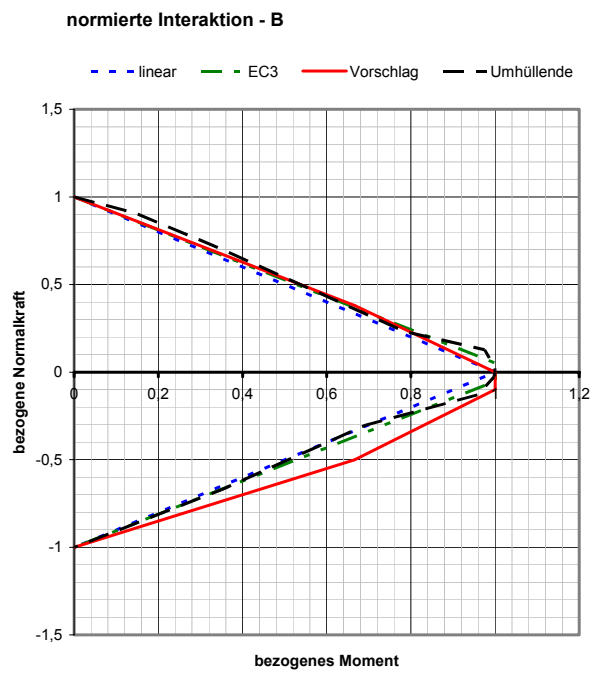


Bild D.4: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung B

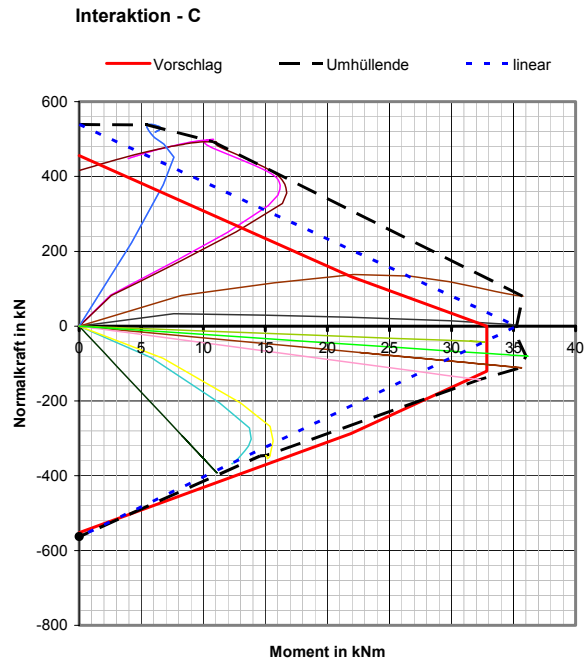


Bild D.5: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung C

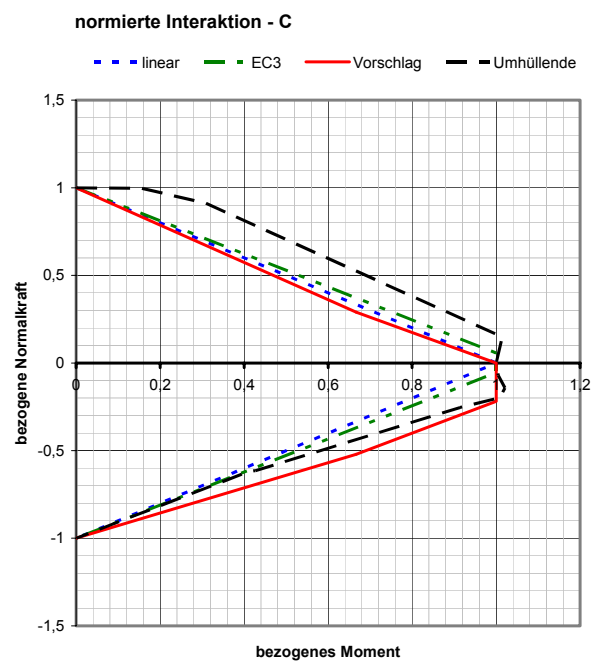


Bild D.6: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung C

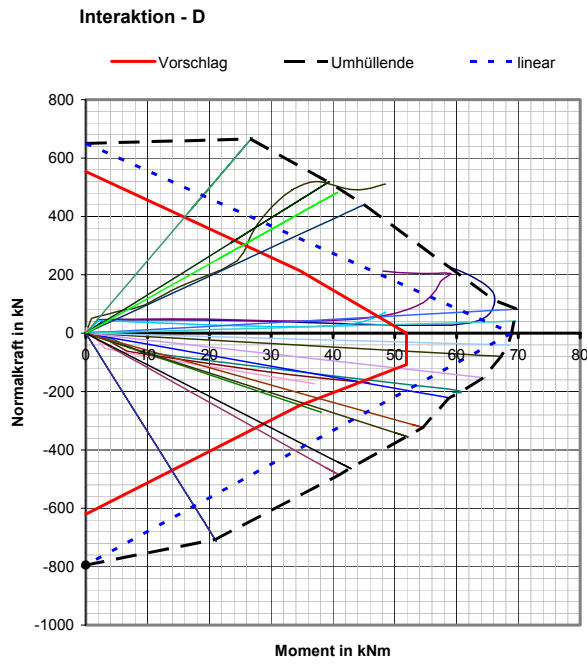


Bild D.7: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung D

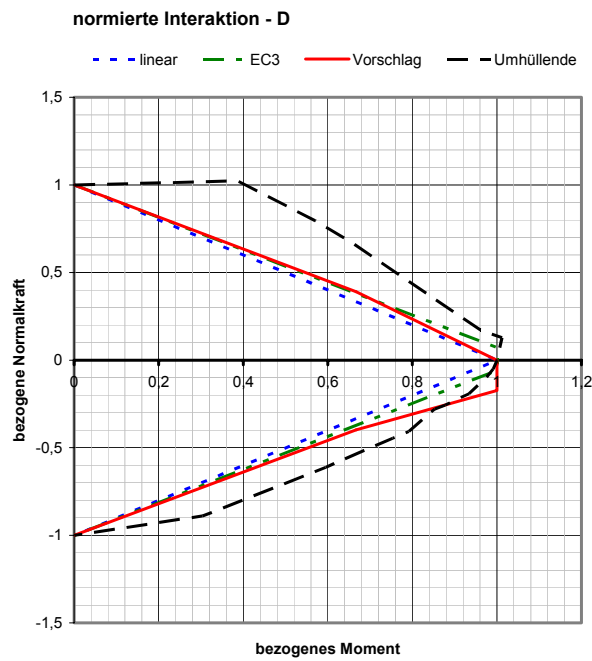


Bild D.8: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung D

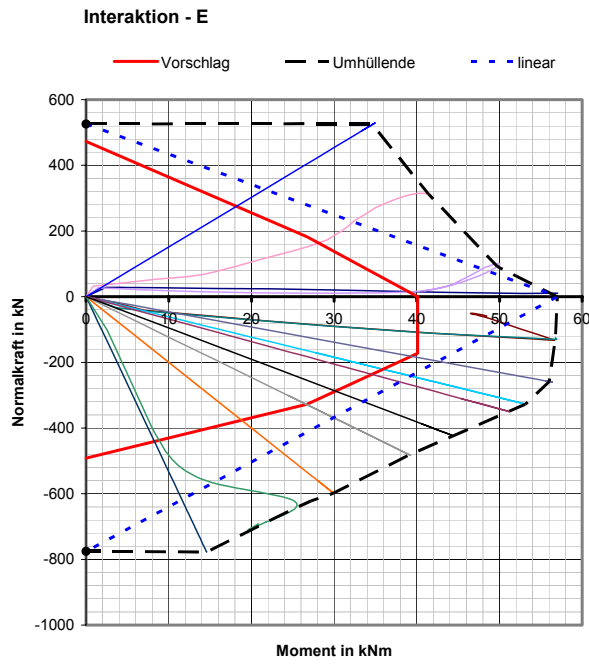


Bild D.9: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung E

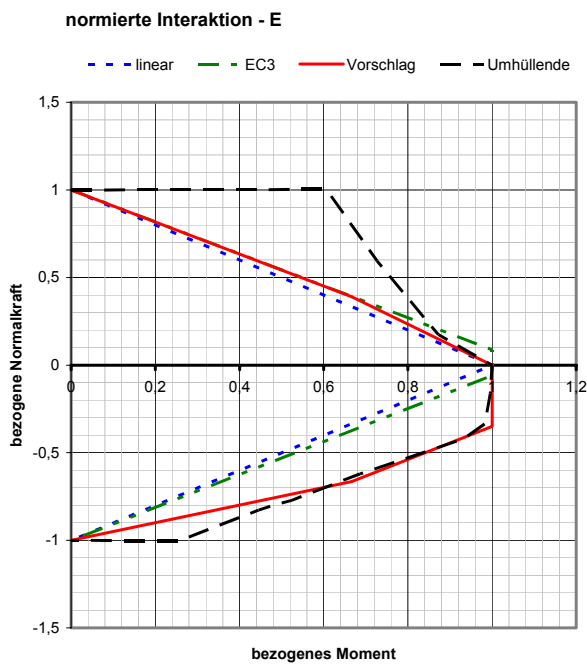


Bild D.10: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung E

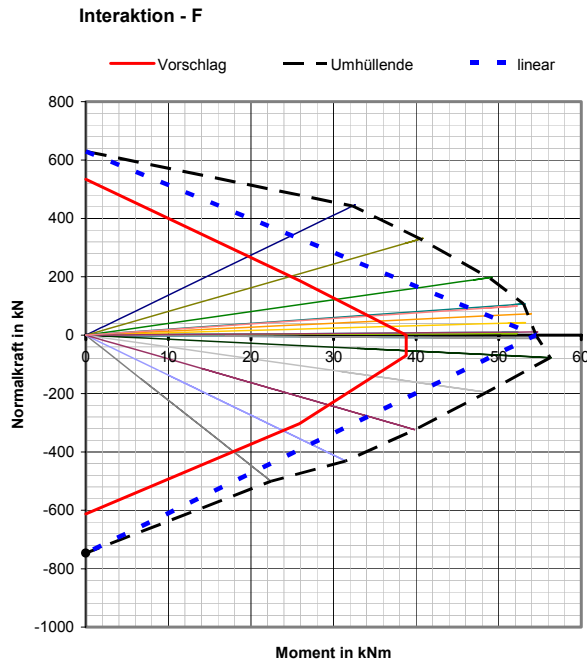


Bild D.11: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung F

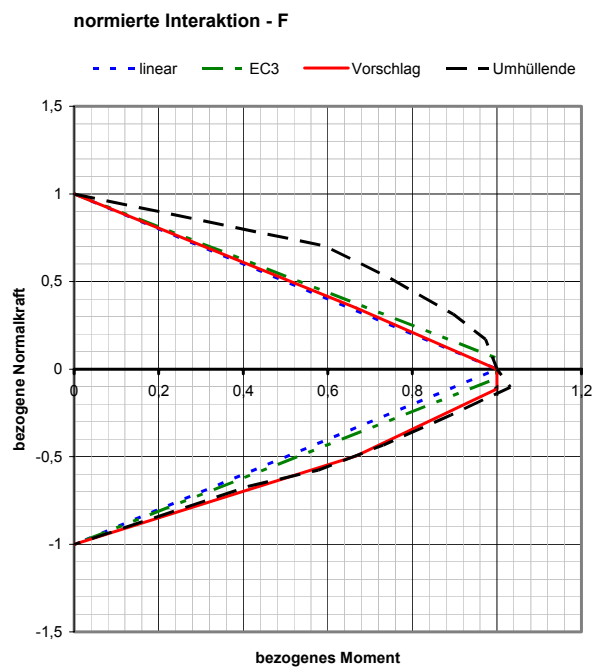


Bild D.12: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung F

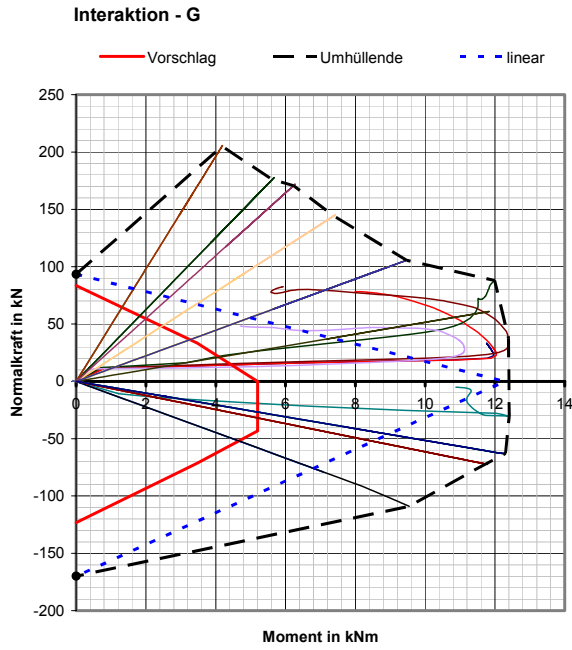


Bild D.13: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung G

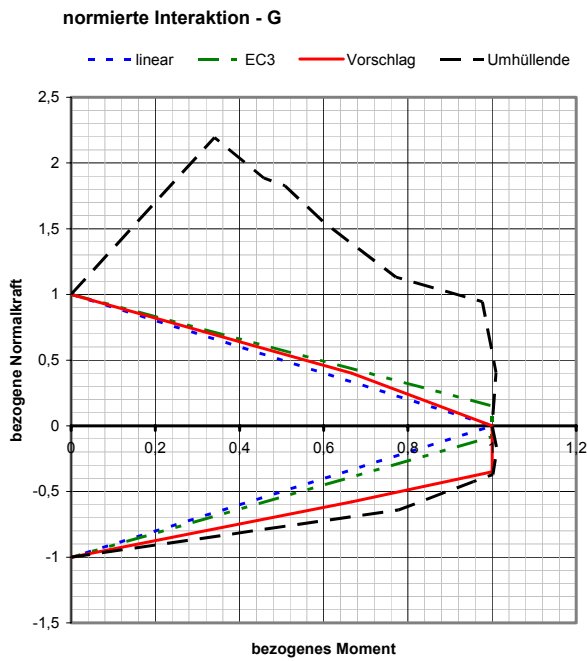


Bild D.14: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung G

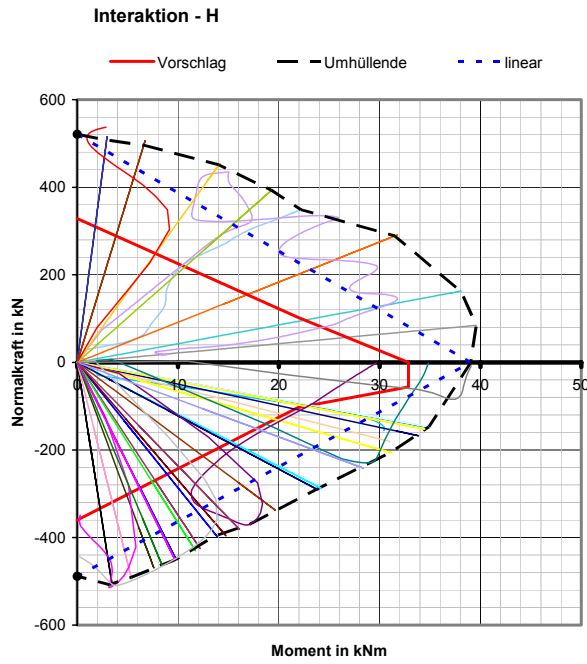


Bild D.15: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung H

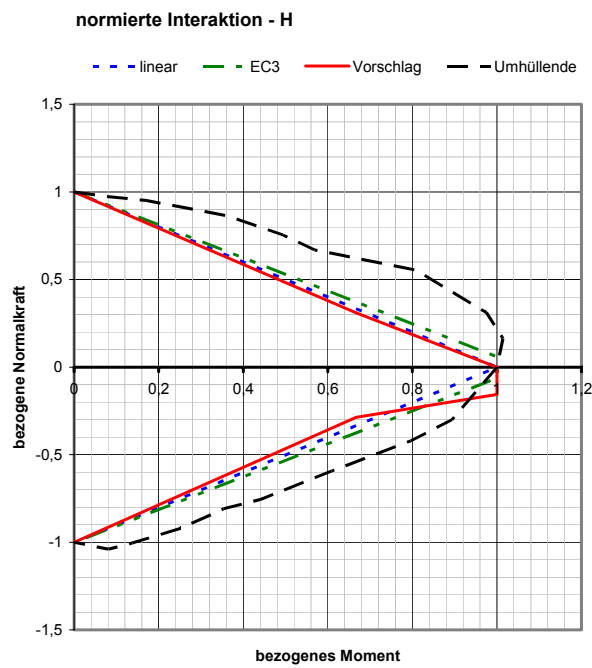


Bild D.16: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung H

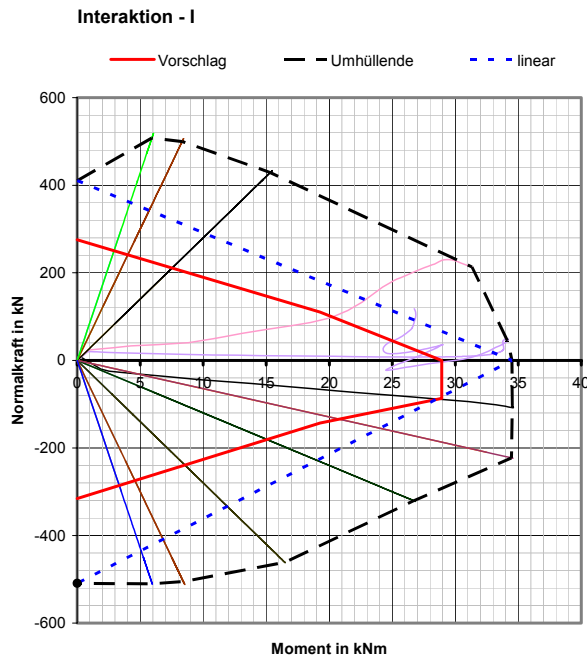


Bild D.17: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung I

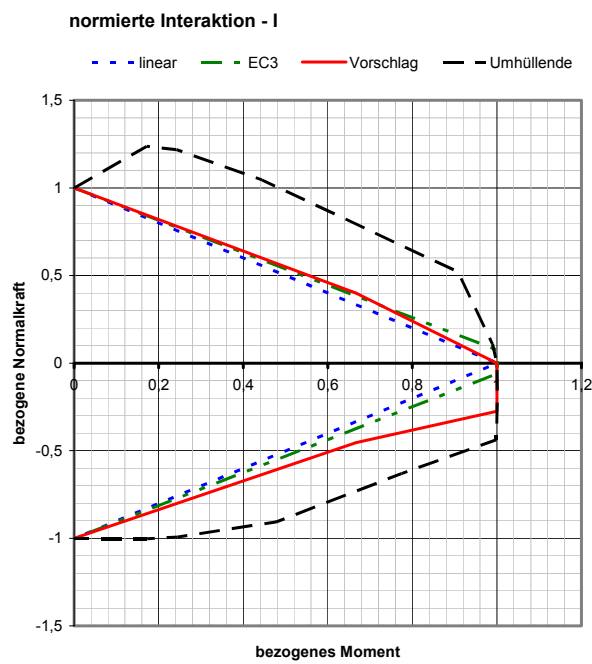


Bild D.18: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung I

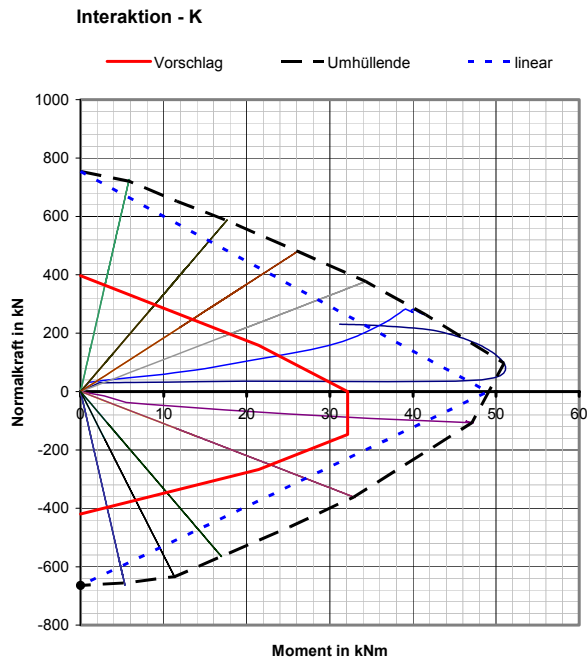


Bild D.19: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung K

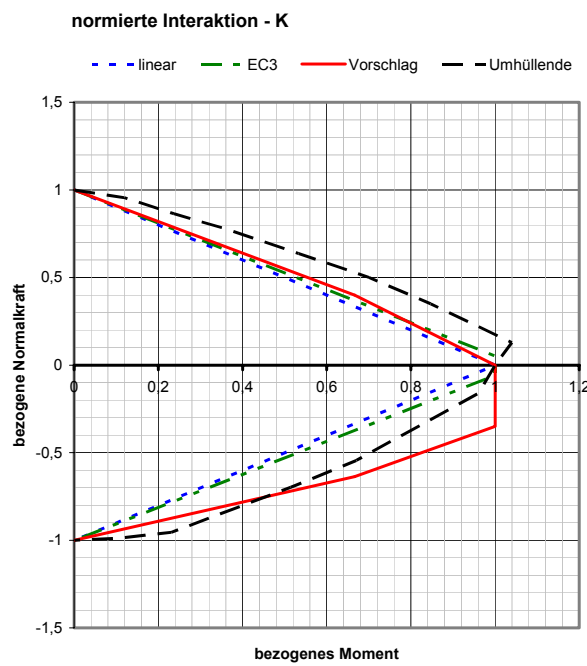


Bild D.20: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung K

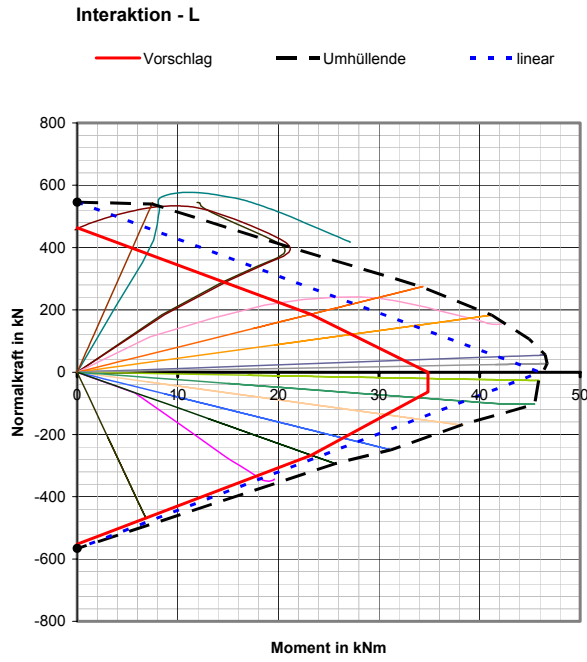


Bild D.21: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung L

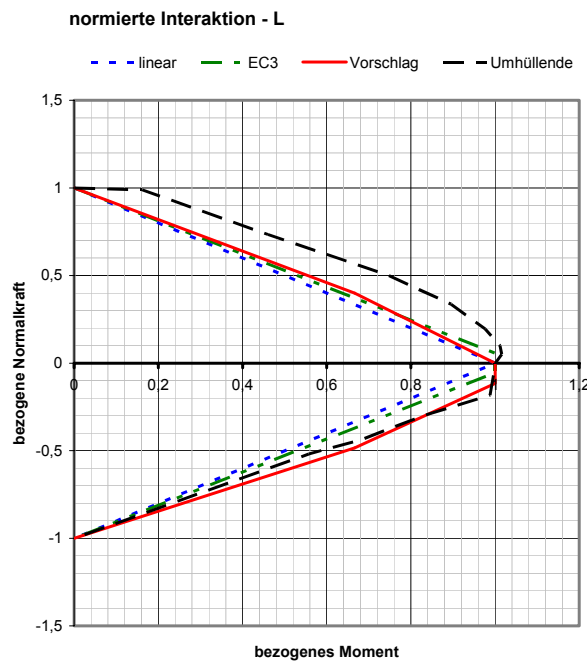


Bild D.22: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung L

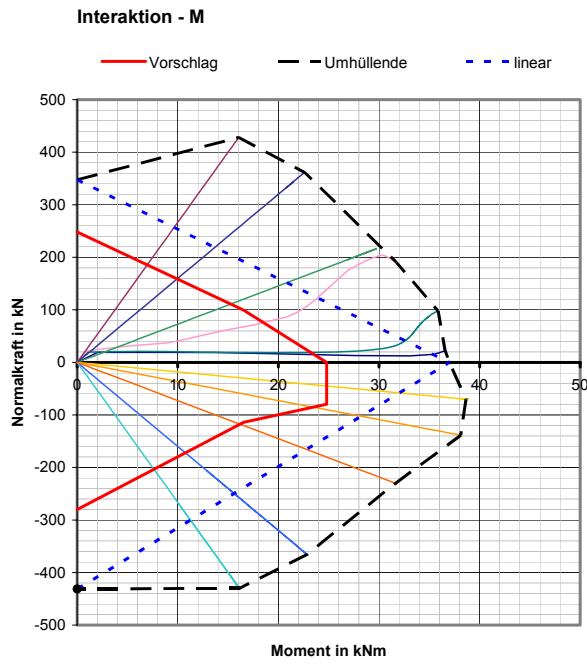


Bild D.23: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung M

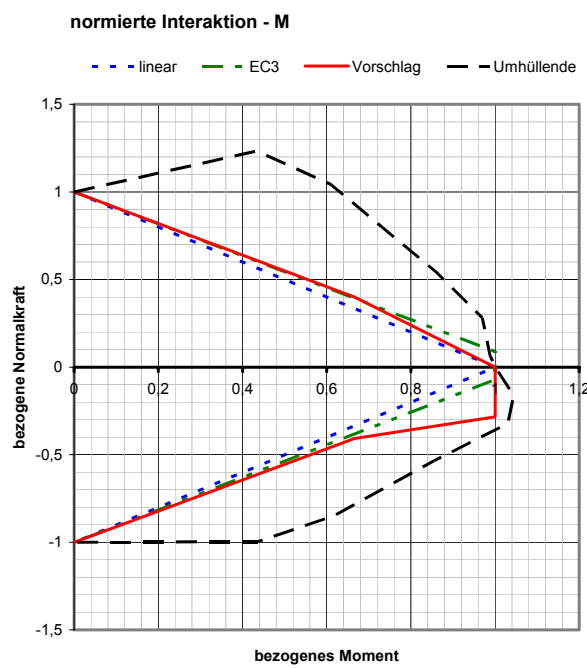


Bild D.24: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung M

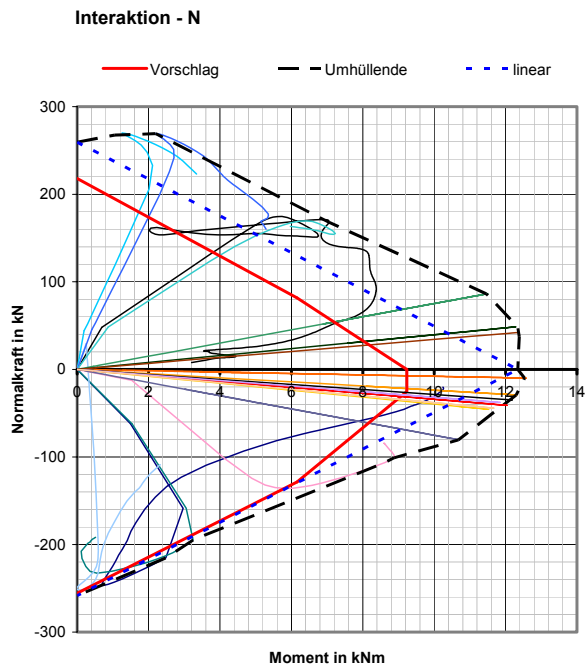


Bild D.25: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung N

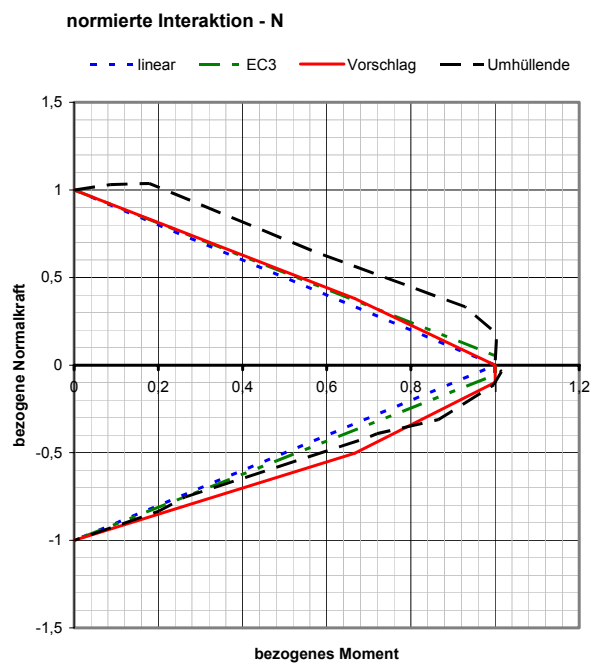


Bild D.26: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung N

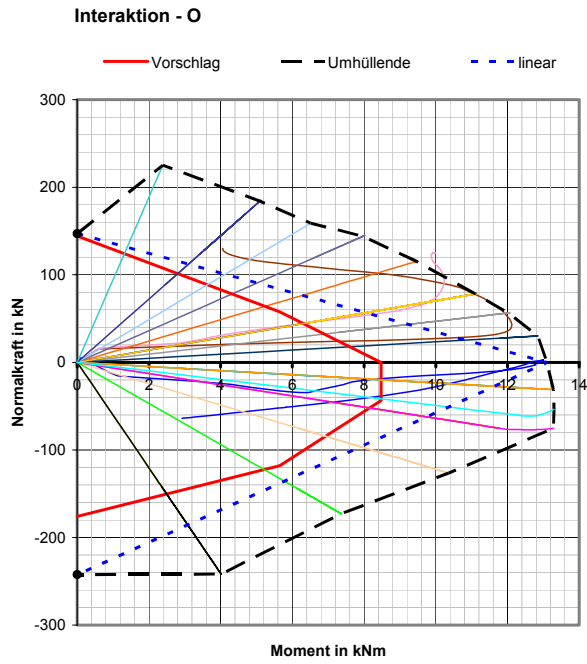


Bild D.27: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung O

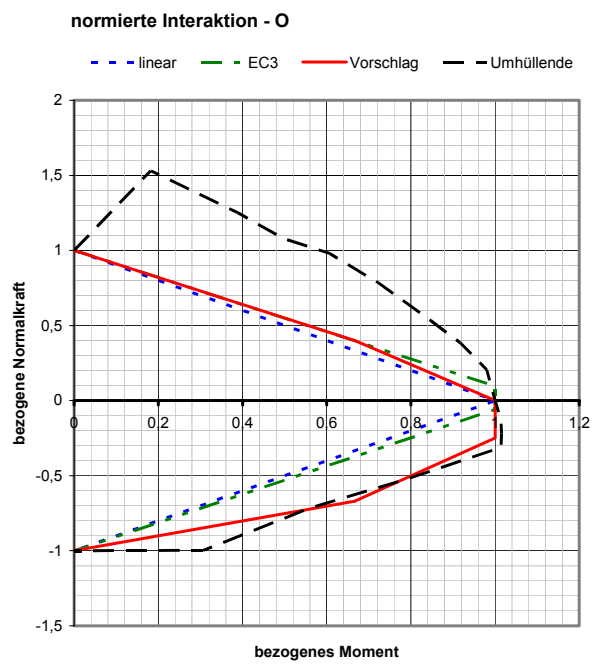


Bild D.28: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung O

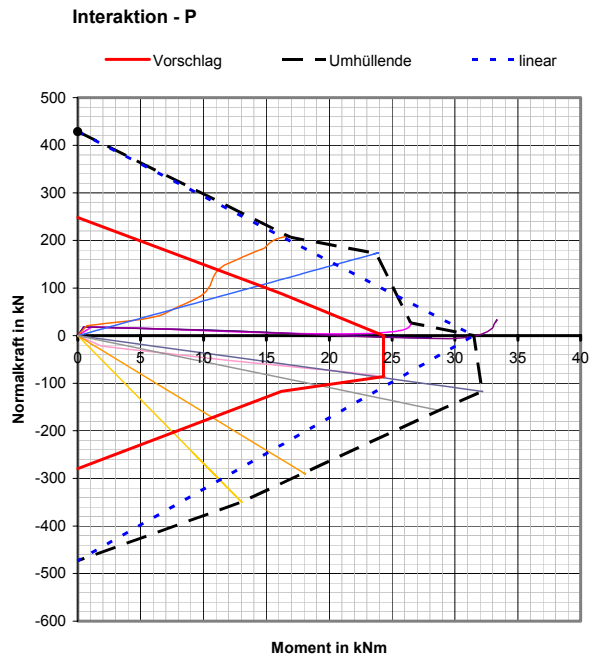


Bild D.29: Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung P

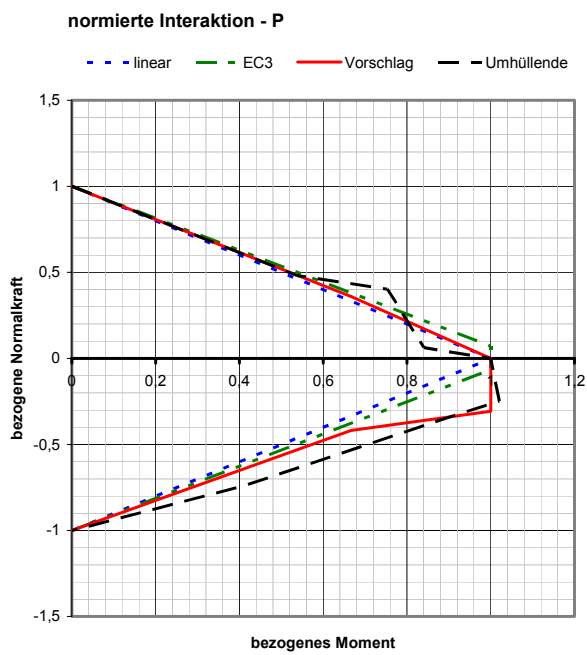


Bild D.30: Normierte Interaktionskurve nach Kapitel 4 - Verbindung P

E Anwendungsbeispiel - Lastannahmen und Schnittgrößen

Der Rahmen und die Lastannahmen wurden einem Praxisbeispiel entnommen.

In den folgenden Bildern sind die vier Lastfälle Eigengewicht, Schnee, Wind und Verkehr dargestellt.

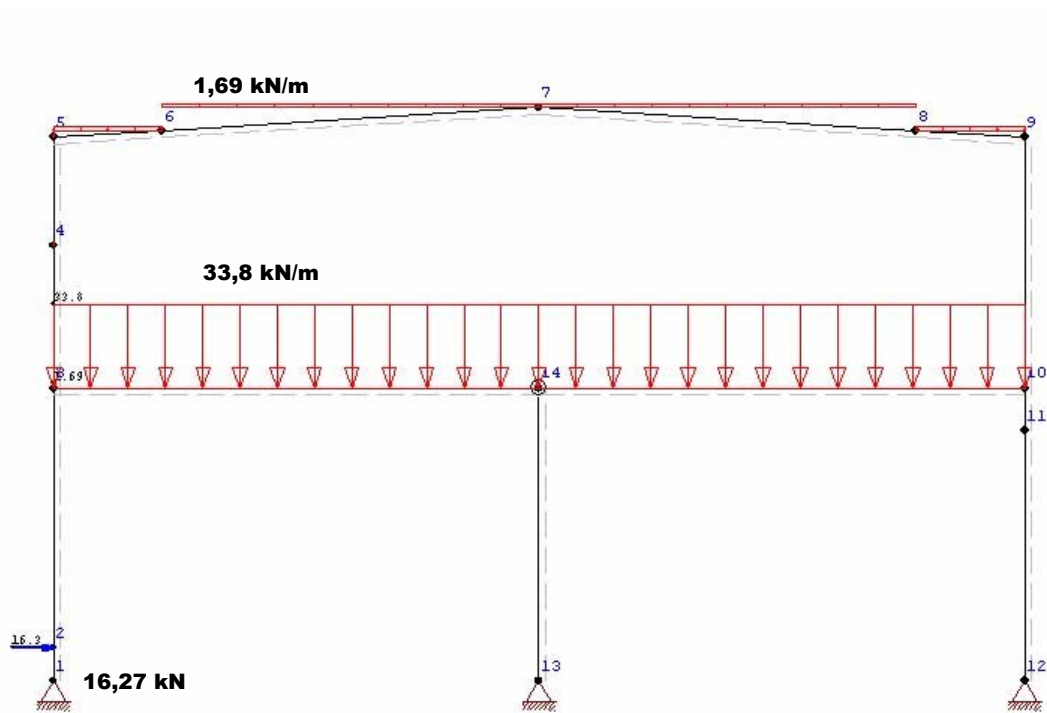


Bild F.1: Lastfall Eigengewicht

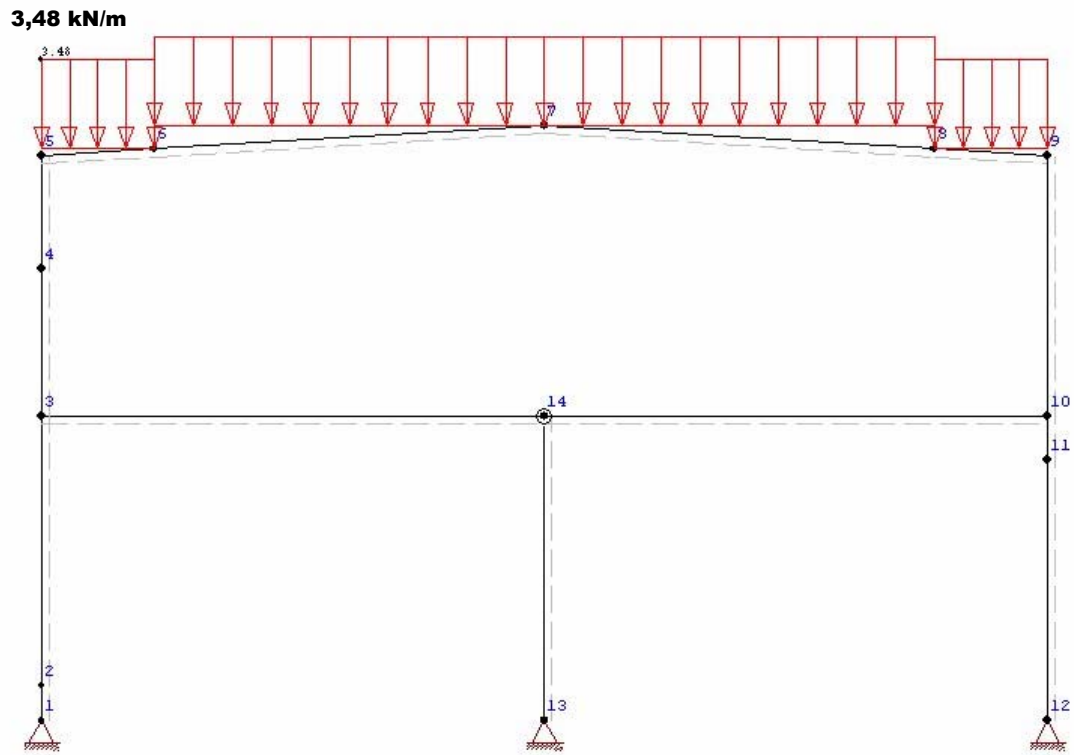


Bild F.2: Lastfall Schnee

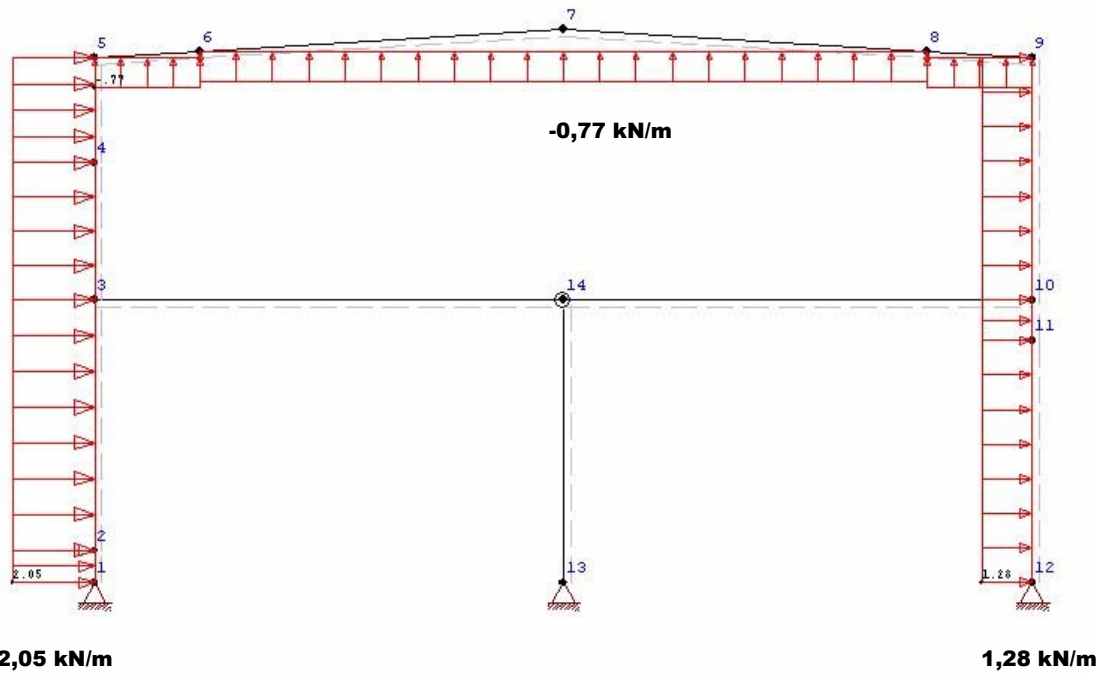


Bild F.3: Lastfall Wind

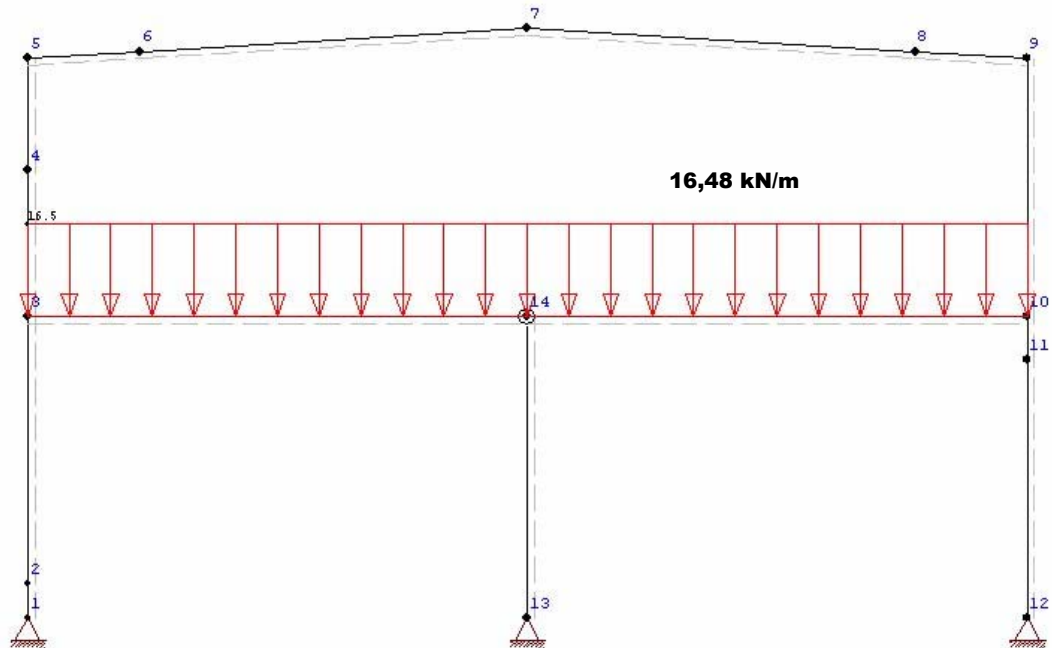


Bild F.4: Lastfall Verkehr

In den nachfolgenden Bildern sind Auszüge aus den Ergebnisdateien der Berechnung dargestellt.

SCHNITTGRÖSSEN			Th. 2.Ord. Lastfall 1 : Eigengewicht		
Stab Nr.	Q Nr.	Knoten Nr.	Q (kN)	N (kN)	M (kNm)
1	1	1	5.25	-104.74	.00
	1	2	5.25	-104.74	2.10
2	1	2	-11.02	-104.74	2.10
	1	3	-10.62	-104.74	-31.67
3	1	3	-22.09	-9.46	51.45
	1	4	-22.13	-9.46	13.85
4	1	4	-22.13	-9.46	13.85
	1	5	-22.13	-9.46	-14.92
5	1	5	8.08	-22.67	-14.92
	2	6	5.92	-22.54	-5.80
6	2	6	5.96	-22.53	-5.80
	2	7	-1.68	-22.07	3.93

Bild F.5: Ergebnis Lastfall Eigengewicht

SCHNITTGRÖSSEN Th. 2.Ord. Lastfall 2 : Schnee

Stab Nr.	Q Nr.	Knoten Nr.	Q (kN)	N (kN)	M (kNm)
1	1	1	2.89	-20.93	.00
	1	2	2.89	-20.93	1.16
2	1	2	2.89	-20.93	1.16
	1	3	2.86	-20.93	10.08
3	1	3	-16.92	-20.18	12.97
	1	4	-16.92	-20.18	-15.80
4	1	4	-16.92	-20.18	-15.80
	1	5	-16.86	-20.18	-37.76
5	1	5	19.15	-18.11	-37.76
	2	6	14.71	-17.83	-15.72
6	2	6	14.73	-17.81	-15.72
	2	7	-1.01	-16.87	15.44

Bild F.6: Ergebnis Lastfall Schnee

SCHNITTGRÖSSEN Th. 2.Ord. Lastfall 3 : Wind auf Seite

Stab Nr.	Q Nr.	Knoten Nr.	Q (kN)	N (kN)	M (kNm)
1	1	1	10.65	10.64	.00
	1	2	9.83	10.64	4.10
2	1	2	9.83	10.64	4.10
	1	3	3.52	10.64	24.79
3	1	3	9.41	7.21	5.19
	1	4	5.94	7.21	18.24
4	1	4	5.94	7.21	18.24
	1	5	3.29	7.21	24.24
5	1	5	-7.01	3.77	24.24
	2	6	-6.00	3.70	15.77
6	2	6	-6.00	3.69	15.77
	2	7	-2.53	3.49	-3.43

Bild F.7: Ergebnis Lastfall Wind

SCHNITTGRÖSSEN Th. 2.Ord. Lastfall 4 : Verkehr

Stab Nr.	Q Nr.	Knoten Nr.	Q (kN)	N (kN)	M (kNm)
	1	5	-6.90	.00	.68
5	1	5	-.43	-6.89	.68
	2	6	-.43	-6.89	.12
6	2	6	-.42	-6.89	.12
	2	7	-.41	-6.89	-1.76

Bild F.8: Ergebnis Lastfall Verkehr

SCHNITTGRÖSSEN * = max/min Werte

Stab Nr.	Knoten Nr.	N (kN)	Q (kN)	M (kNm)	zugehörige Lastfälle
5	5	-43.72*	19.87	-27.86	1 2 3 4
	5	-43.72*	19.87	-27.86	1 2 3 4
	5	-43.72	19.87*	-27.86	1 2 3 4
	5	-43.72	19.87*	-27.86	1 2 3 4
	5	-43.72	19.87	-27.86*	1 2 3 4
	5	-43.72	19.87	-27.86*	1 2 3 4

Bild F.9: Ergebnis min/max Überlagerung

Erweiterung der Komponentenmethode nach EC 3-1.8 um die Interaktion der Schnittgrößen Biegemoment und Normalkraft

Zusammenfassung der Dissertation

Anja Schwarzlos

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Erweiterung der Bemessungsregeln zu Verbindungen in Rahmensystemen auf der Grundlage der Komponentenmethode des Eurocode 3, Teil 1.8.

Es wird das Komponentenmodell vorgestellt, vorhandene Interaktionsregeln erläutert und hinsichtlich ihrer Anwendungsgrenzen bewertet.

Das Interaktionsverhalten von einzelnen maßgebenden Komponenten von Verbindungen sowie komplexen Verbindungen bei Beanspruchung durch Biegemoment und Normalkraft wird zusätzlich mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode im Vorfeld des Bemessungsvorschlages untersucht.

Der Erweiterungsvorschlag innerhalb dieser Arbeit umfasst für symmetrische Verbindungen die Berechnung der Normalkrafttragfähigkeit bei alleiniger Zug- und Druckbeanspruchung sowie die Berechnung der Interaktionskurve bei Beanspruchung der Verbindung durch Biegung und Normalkraft. Bei der Normalkraftbeanspruchung handelt es sich dabei um die Normalkrafteintragung in die Verbindung über den Trägerquerschnitt.

Die Bemessungsregeln basieren auf gültigen mechanischen Modellen und Annahmen und können ohne weitere Hilfsmittel angewendet werden.

Extension of the components method according to EC 3-1.8 by interaction of bending moment and axial force

Abstract

Anja Schwarzlos

The thesis deals with an extension of design rules for joints in frame systems based on the components method of Eurocode 3, chapter 1.8 .

Following a detailed introduction to the model of components, existing rules of interaction are explained on and evaluated with regard to limits of their application.

Additionally, the interactive behaviour of individual important components of joints and of complex joints is analysed for combined loading with bending moment and additional axial force. This is done with the help of the finite-element-method.

The present proposal for the extension of the component model for symmetrical joints comprises the calculation of axial force resistance with single tension and compression axial force loading as well as the calculation of interaction with combined bending moment and axial force loading. Axial forces are applied by the beam cross section.

The extended design rules are based on valid mechanical models and assumptions. Their application is possible without any additional software.