
Nachweis der Verdrehbarkeit von gelenkigen Anschlüssen

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science

im Studiengang Bauingenieurwesen

von

Henri Paul Gossens

10011644

Bearbeitungszeitraum:

September 2022 – Dezember 2022

Hochschule Ruhr West

Betreuung:

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Christian Ludwig

Zweitgutachterin: Larissa Schönfeld, M.Sc.



Aufgabenstellung für die Bachelorarbeit

für: Henri Gossens
Matr.-Nr.: 10011644

Nachweis der Verdrehbarkeit von gelenkigen Anschlüssen

Im Stahlhochbau kommen eine Vielzahl von gelenkigen Anschlüssen zum Einsatz. Dabei werden eine Reihe von Konstruktionsvarianten „gelenkähnliche“ Eigenschaften zugewiesen. Ein direkter Nachweis der ausreichenden Verdrehbarkeit fehlt jedoch in den meisten Fällen.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit ist in einem ersten Schritt eine einfache Übersicht über die typischen Beispiele für gelenkige Anschlüsse in der Literatur zu erstellen. Zusätzlich sollen vorhandene Nachweisbedingungen für eine Verdrehbarkeit zusammengefasst und auf die vorhandenen Beispiele angewendet werden. In einem zweiten Schritt, der den Hauptteil dieser Arbeit darstellt, sollen die Mechanismen der vorhandenen Nachweisbedingungen für die Verdrehbarkeit analysiert werden. Im Anschluss sind eigenständig vereinfachte Methoden zum Nachweis der Verdrehbarkeit für die typischen Konstruktionsvarianten im Stahlhochbau zu entwickeln.

Im Einzelnen sind folgende Fragen bzw. Aufgaben zu bearbeiten:

- Literaturrecherche und Auswertung
 - o Welche Beispielaufgaben von gelenkigen Anschlüssen in welcher Qualität/Vollständigkeit sind in der Literatur enthalten?
 - o Welche Nachweismethoden (Grenzen, Anwendbarkeit, Unterschiede) zum Nachweis der Verdrehbarkeit werden in der Literatur aufgeführt?
 - o Weisen die oben gesammelten Beispielaufgaben aus der Literatur ausreichende Gelenkeigenschaften auf?
- Analyse und Entwicklung (Hauptteil der Arbeit)
 - o Auf welchen Prinzipien bzw. Mechanismen (Herleitung!) beruhen die vorhanden Nachweismethoden der Verdrehbarkeit?
 - o Entwickeln Sie vereinfachte Methoden zum Nachweis der Verdrehbarkeit von typischen gelenkigen Anschlüssen (Stirplattenanschluss, Laschenanschluss, Fahnenblechanschluss, Doppelwinkelanschluss).

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung für die Bachelorarbeit	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Formelzeichenverzeichnis	VI
Selbstständigkeitserklärung	IX
1 Einleitung	1
2 Beispielaufgaben von gelenkigen Anschlüssen	2
2.1 Erläuterung zu den Kriterien	2
2.1.1 Kriterium 1: Nachweis der Verdrehbarkeit	2
2.1.2 Kriterium 2: Klassifizierung des Anschlusses	3
2.1.3 Kriterium 3: Ausreichende Systemangaben	3
2.1.4 Kriterium 4: Erläuterungen und Vollständigkeit	3
2.2 Bewertung der Beispielaufgaben	4
2.2.1 Anschluss mit Stirnplatte	5
2.2.2 Anschluss mit Fahnenblech	8
2.2.3 Anschluss mit Doppelwinkel	11
2.2.4 Auflagerung auf Knagge	13
2.2.5 Trägerstoß	15
2.2.6 Sonderbeispiele	17
2.3 Bewertungsübersicht der Beispielaufgaben	19
2.3.1 Beispielaufgaben 1 bis 12	19
2.3.2 Sonderbeispiele	22
3 Methoden zum Nachweis der Verdrehbarkeit von gelenkigen Anschlüssen	23
3.1 Rotationskapazität und Duktilität nach der ECCS	23
3.1.1 Anwendbarkeit und Unterschiede für gelenkige Anschlussvarianten	23
3.1.2 Ermittlung der erforderlichen Verdrehung ϕ_{erf} der gelenkigen Anschlüsse	29
3.1.3 Beispiele für die Anwendung der vorhandenen Nachweismethoden der Verdrehbarkeit	30
3.2 Klassifizierung von Anschlüssen	30
3.2.1 Klassifizierung nach der Steifigkeit	31
3.2.2 Klassifizierung nach der Tragfähigkeit	33

4	Überprüfung der Gelenkeigenschaften der Beispielaufgaben nach der ECCS	34
4.1	Angaben des statischen Systems	34
4.2	Ergebnisse für die Anwendung der Nachweismethoden nach der ECCS	35
5	Herleitung der Nachweismethoden der ECCS	38
5.1	Nachweis der ausreichenden Rotationskapazität	38
5.1.1	Allgemeine Voraussetzung für Anschlussvarianten	38
5.1.2	Rotationskapazität von Stirnplattenanschlüssen	39
5.1.3	Rotationskapazität von Fahnenblech- und Doppelwinkelanschlüssen	40
5.1.4	Herleitung der erforderlichen Verdrehung ϕ_{erf}	41
5.2	Nachweis der ausreichenden Duktilität	43
5.2.1	Tragfähigkeit der Schrauben	43
5.2.2	Tragfähigkeit der Schweißnähte	43
5.2.3	Plastische Lastumverteilung bei Fahnenblechanschlüssen	44
5.3	Nachweis des quasigelenkigen Stirnplattenanschlusses mit Kontakt am unteren Trägerflansch	46
6	Entwicklung von vereinfachten Nachweismethoden der Verdrehbarkeit	47
6.1	Stirnplattenanschluss	47
6.1.1	Duktilitätskriterien nach der ECCS	47
6.1.2	Tragfähigkeit nach der Komponentenmethode	48
6.1.3	Steifigkeit nach der Komponentenmethode	53
6.2	Fahnenblechanschluss	53
6.2.1	Duktilitätskriterien nach der ECCS	53
6.2.2	Vereinfachte Nachweismethode der Verdrehbarkeit	53
7	Zusammenfassung	56
7.1	Fazit	56
7.2	Ausblick	57
	Literaturverzeichnis	59
	Anlagenverzeichnis	61
	Anlagen	62

Abkürzungsverzeichnis

ECCS	European Convention for Constructional Steelwork
EFT	Einfeldträger

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1	Biegelinie eines gelenkigen EFT aus RSTAB8	29
Abbildung 3.2	Biegelinie eines beidseitig eingespannten EFT aus RSTAB8	30
Abbildung 3.3	Einteilung der Zonen nach der Steifigkeit, [3].....	31
Abbildung 3.4	Träger-Stützen-Anschluss mit überstehender Stirnplatte und frei geschnittenes Federmodell, [16].....	33
Abbildung 4.1	Gelenkiger EFT mit $L_b = 5,0$ m.....	34
Abbildung 4.2	Gelenkiger EFT mit $L_b = 10,0$ m.....	34
Abbildung 5.1	Geschätzte Druckfläche am unteren Teil eines Trägers mit Stirnplattenanschluss.....	38
Abbildung 5.2	Auswirkungen von einem Kontakt zwischen Trägerflansch und lastannehmenden Bauteil, nach [5, 6].....	39
Abbildung 5.3	Verdrehter Träger mit Stirnplattenanschluss, nach [5, 6]	39
Abbildung 5.4	Verdrehter Träger mit Fahnenblech- oder Doppelwinkelanschluss, nach [4, 5, 6]	40
Abbildung 5.5	Verdrehwinkel der Endauflager eines EFT, nach [1]	42
Abbildung 6.1	Varianten der Stützensaussteifung, nach [16]	48
Abbildung 6.2	Wirksame Breite $b_{eff,c,wc}$ für den Stützensteg mit Querdruckbeanspruchung (überstehende Stirnplatte), nach [16]	49
Abbildung 6.3	Wirksame Breite $b_{eff,c,wc,neu}$ für den Stützensteg mit Querdruckbeanspruchung (Stirnplatte ohne Kontakt mit den Trägerflanschen)	49
Abbildung 6.4	Stirnplattenanschluss (Stirnplatte ohne Kontakt mit den Trägerflanschen)	51
Abbildung 6.5	Effektive Breiten $b_{eff,1}$ und $b_{eff,2}$ des Trägersteges mit Druckbeanspruchung.....	51
Abbildung 6.6	Momententragfähigkeit eines Stirnplattenanschlusses mit einer Schraubenreihe im gezogenen Bereich	52
Abbildung 6.7	Vorhandene Verdrehbarkeit eines Fahnenblechanschlusses abhängig vom Nennlochspiel	54
Abbildung 6.8	Momententragfähigkeit eines Fahnenblechanschlusses	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Kriterien zur Bewertung der Beispielaufgaben.....	2
Tabelle 2.2	Bewertungsmerkmale für die Beispielaufgaben.....	4
Tabelle 2.3	Bsp. 1 - Stirnplattenanschluss (Träger-Träger).....	5
Tabelle 2.4	Bsp. 2 - Stirnplattenanschluss (Träger-Stütze).....	6
Tabelle 2.5	Bsp. 3 - Stirnplattenanschluss (Träger-Stütze).....	7
Tabelle 2.6	Bsp. 4 - Fahnenblechanschluss (Träger-Stütze).....	8
Tabelle 2.7	Bsp. 5 - Fahnenblechanschluss (Träger-Träger).....	9
Tabelle 2.8	Bsp. 6 - Fahnenblechanschluss (Träger-Stütze).....	10
Tabelle 2.9	Bsp. 7 - Doppelwinkelanschluss (Träger-Träger).....	11
Tabelle 2.10	Bsp. 8 - Doppelwinkelanschluss (Träger-Stütze).....	12
Tabelle 2.11	Bsp. 9 - Anschluss mit Auflagerknagge und Fahnenblech (Träger-Stütze)	13
Tabelle 2.12	Bsp. 10 - Anschluss mit Auflagerknagge und Stirnplatte (Träger-Stütze)	14
Tabelle 2.13	Bsp. 11 - Stegglaschenstoß (Träger-Träger).....	15
Tabelle 2.14	Bsp. 12 - Stirnplattenstoß (Träger-Träger).....	16
Tabelle 2.15	Sonderbsp. 1 - Stirnplattenanschluss mit Kontakt am unteren Trägerflansch (Träger-Träger).....	17
Tabelle 2.16	Sonderbsp. 2 - Typisierte Anschlüsse (Träger-Stütze).....	18
Tabelle 2.17	Kriterienauswertung einzelner Anschlusstypen.....	19
Tabelle 2.18	Kriterienauswertung aller Anschlusstypen.....	21
Tabelle 2.19	Kriterienauswertung der Sonderbeispielaufgaben.....	22
Tabelle 3.1	Rotationskapazität und Duktilität von Anschlüssen mit Stirnplatte, nach [5, 6].....	24
Tabelle 3.2	Rotationskapazität und Duktilität von Anschlüssen mit Fahnenblech, nach [4, 5, 6].....	25
Tabelle 3.3	Rotationskapazität und Duktilität von Anschlüssen mit Doppelwinkel, nach [4].....	27
Tabelle 3.4	Rotationskapazität und Duktilität von Trägerstößen, nach [4].....	28
Tabelle 3.5	Berechnung der Steifigkeitskoeffizienten für die Komponenten einer Träger-Stützen-Verbindung mit Stirnplatte, nach [3].....	32
Tabelle 4.1	Ergebnisse der Nachweise für die Beispielaufgaben mit Stirnplatte.....	36
Tabelle 4.2	Ergebnisse der Nachweise für die Beispielaufgaben mit Fahnenblech...36	
Tabelle 4.3	Ergebnisse der Nachweise für die Beispielaufgaben mit Doppelwinkel..37	
Tabelle 4.4	Ergebnisse der Nachweise für die Beispielaufgaben mit Trägerstoß.....37	
Tabelle 5.1	ϕ_{erf} für die häufigsten Belastungsbilder eines EFT, nach [5, 6].....	42
Tabelle 5.2	Vereinfachte Berechnung der volltragfähigen Schweißnahtdicken, nach [5, 6].....	44
Tabelle 6.1	Wirksame Längen l_{eff} für Stützenflansche (einzelne Schraubenreihe), nach [3].....	50
Tabelle 6.2	Nennlochspiel Δd in mm bei Schrauben und Bolzen, nach [8].....	54

Formelzeichenverzeichnis

Die Formelzeichen werden den Abschnitten zugeordnet, in denen sie als erstes auftreten.

Abschnitt 2:

L_b	Spannweite eines Trägers
$S_{j,ini}$	Anfangsrotationssteifigkeit
$V_{z,Ed}$	Bemessungswert der Querkraft
t_{fc} oder t_{cf}	Blechdicke des Stützenflansches
ϕ_{erf}	Erforderliche Verdrehung von einem Anschluss
ϕ_{vorh}	Vorhandene Verdrehung von einem Anschluss

Abschnitt 3:

A_s	Spannungsquerschnitt einer Schraube
A_{vc}	Schubfläche einer Stütze
E	Elastizitätsmodul
$F_{b,hor,Rd}$	Bemessungswert der horizontalen Lochleibungstragfähigkeit einer Schraube
$F_{b,ver,Rd}$	Bemessungswert der vertikalen Lochleibungstragfähigkeit einer Schraube
$F_{v,Rd}$	Bemessungswert der Abschertragfähigkeit einer Schraube
I_b	Flächenträgheitsmoment zweiter Ordnung eines Trägers
$M_{b,pl,Rd}$	Plastische Momententragfähigkeit eines Trägers
$M_{c,pl,Rd}$	Plastische Momententragfähigkeit einer Stütze
$M_{j,Rd}$	Bemessungswert der Momententragfähigkeit eines Anschlusses
$M_{pl,y,Rd}$	Plastische Momententragfähigkeit
$V_{Rd,i}$	Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit von Versagensart i
a	Schweißnahtdicke
$b_{eff,c,wc}$	Wirksame Breite des Stützensteges für Querdruck
$b_{eff,t,wc}$	Wirksame Breite des Stützensteges für Querkraft
d	Schraubendurchmesser
d_b	Höhe des Trägersteges zwischen den Ausrundungen
d_c	Höhe des Stützensteges zwischen den Ausrundungen
f_u	Zugfestigkeit der Stahlgüte
f_{ub}	Zugfestigkeit der Schraubengüte
f_y	Streckgrenze der Stahlgüte
g_h	Spaltbreite zwischen Träger und Stütze

h_b	Profilhöhe eines Trägers
h_e	Höhe zwischen den Unterkanten von Träger und Verbindungsmittel
h_p	Höhe des Verbindungsmittels (Stirn-/ Fahnenblech/ Doppelwinkel)
k_i	Steifigkeitskoeffizient i
l_{eff}	Wirksame Länge eines äquivalenten T-Stummels
m	Horizontaler Abstand bei T-Stummel (Lochachse bis Ausrundung/Naht)
n_x	Anzahl der vertikalen Schraubenreihen
r	Radius der Ausrundung eines Stahlprofils
t_f	Blechdicke eines Flansches
t_p	Blechdicke eines Verbindungsmittels (Stirn-/ Fahnenblech/ Doppelwinkel)
t_w	Blechdicke eines Steges
z	Abstand Schwerpunkt des Schraubenbildes zu Stützenflansch
β_w	Korrelationsbeiwert

Abschnitt 4:

p	Streckenlast
$a_{w,min}$	Erforderliche Schweißnahtdicke
γ	Teilsicherheitsbeiwert

Abschnitt 5:

$F_{t,Rd}$	Bemessungswert der Zugtragfähigkeit einer Schraube
P	Einzellast
φ_i, φ_k	Verdrehwinkel der Trägerenden eines gelenkigen EFT

Abschnitt 6:

A	Querschnittsfläche eines Stahlprofils
$F_{C,wb,Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit eines Trägersteges auf Druck
$F_{C,wc,Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit eines Stützensteges auf Querdruk
$F_{t,min}$	Bemessungswert der minimalen Zugtragfähigkeit
$F_{T,Rd}$	Bemessungswert der Zugtragfähigkeit eines äquivalenten T-Stummels
$F_{tr,Rd}$	Bemessungswert der wirksamen Zugtragfähigkeit einer Schraubenreihe r
$F_{t,wb,Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit eines Trägersteges auf Zug
$F_{t,wc,Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit eines Stützensteges auf Querdruk
$V_{wp,Rd}$	Plastische Schubtragfähigkeit des Stegfeldes einer Stütze

b	Breite eines Stahlprofils
$b_{eff,c,wb}$	Wirksame Breite des Trägersteges für Druck
$b_{eff,t,wb}$	Wirksame Breite des Trägersteges für Zug
Δd	Nennlochspiel
e	Horizontaler Randabstand bei T-Stummel (Lochachse bis Blechrand)
e_1	Vertikaler Randabstand bei T-Stummel (Lochachse bis Blechrand)
h_r	Hebelarm zwischen Druckpunkt und Zugkraft
k_{wc}	Abminderungsbeiwert
$l_{eff,cp}$	Wirksame Länge eines äquivalenten T-Stummels (kreisförmiges Muster)
$l_{eff,nc}$	Wirksame Länge eines äquivalenten T-Stummels (nicht kreisförmiges Muster)
ρ	Abminderungsbeiwert für Plattenbeulen
ω	Abminderungsbeiwert für Interaktionseffekte mit Schubbeanspruchung im Stützenstegfeld

Indizes zur Bauteilzuordnung:

b	Träger
c	Stütze
f	Flansch
p	Stirnblech / Fahnenblech / Doppelwinkel
w	Steg

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, sind kenntlich gemacht und diese Arbeit war in gleicher Fassung noch kein Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung.

Mülheim an der Ruhr, 19. Dezember 2022



Henri Paul Gossens

1 Einleitung

Die vorliegende Bachelorarbeit im Fachbereich Bauingenieurwesen beschäftigt sich mit der Verdrehbarkeit von gelenkigen Anschlüssen im Stahlhochbau. In der Praxis und Literatur des Stahlbaus treten verschiedene gelenkige Anschlusskonstruktionen in Erscheinung, die ohne ausreichende Nachweise als gelenkig bezeichnet werden. Ein Grund für die Annahme einer gelenkigen Verbindung ist, dass in der Literatur zu Anschlüssen im Stahlbau und in der DIN EN 1993-1-8: Bemessung von Anschlüssen [3] die Nachweise der Gelenkeigenschaften und somit der Verdrehbarkeit von vermeintlich gelenkigen Anschlüssen *nicht eindeutig anwendbar* sind. Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es zu ermitteln, ob verschiedene, vorgeblich gelenkige Anschlüsse, tatsächlich Gelenkeigenschaften aufzeigen. In einem weiteren Schritt werden vereinfachte Methoden entwickelt, um eine Verdrehbarkeit und Gelenkwirkung der Anschlussvarianten nachzuweisen.

Zunächst werden Beispielaufgaben aus Literaturquellen von verschiedenen Autoren zusammengestellt und im Hinblick auf die Qualität und Vollständigkeit ausgewertet. Dazu werden eigenständig Kriterien ausgewählt. Die Bewertung anhand der Kriterien erfolgt zuerst je einzeltem Beispiel, um anschließend in einem zweiten Schritt alle Beispielaufgaben zu vergleichen, sodass Vor- und Nachteile erkennbar sind. Die Beispiele umfassen Anschlüsse mit Stirnplatte, Fahnenblech, Doppelwinkel und Knaggen sowie Trägerstöße.

Ein weiterer Teil der Literaturrecherche ist die Erfassung der vorhandenen Nachweismethoden der Verdrehbarkeit von gelenkigen Anschlüssen im Stahlbau. Für die Erfassung liegen zwei Herausgaben der European Convention for Constructional Steelwork (ECCS) über die Ausführung von Anschlüssen im Stahl- und Verbundbau [5] und Konstruktionsempfehlungen von gelenkigen Stahlanschlüssen [6] vor. Zudem werden die Nachweise der Verdrehbarkeit aus diesen Veröffentlichungen in der Stahlbaufibel [4] aufgegriffen und erweitert. Die Unklarheiten und Anwendungsgrenzen der vorhandenen Methoden aus [4, 5, 6] werden hervorgehoben. Weiterhin wird die Klassifizierung von Anschlüssen nach [3] untersucht.

Die Literaturrecherche und Auswertung wird abgeschlossen, indem eine Überprüfung der ausreichenden Gelenkeigenschaften der zusammengestellten Beispielaufgaben erfolgt. Hierzu werden die vorhandenen Nachweismethoden der Verdrehbarkeit auf die jeweiligen Anschlusskonstruktionen angewendet.

Die Analyse der vorhandenen und die Entwicklung von vereinfachten Methoden zum Nachweis der ausreichenden Verdrehbarkeit von gelenkigen Anschlüssen bilden den Hauptteil dieser Bachelorarbeit. Die Untersuchung der Prinzipien und Mechanismen, auf denen die existierenden Nachweismethoden aufbauen, dient als Grundbaustein für die Entwicklung neuer vereinfachter Methoden, um ausreichende Gelenkeigenschaften und Verdrehbarkeit überprüfen zu können.

2 Beispielaufgaben von gelenkigen Anschlüssen

In den Literaturquellen zu Anschlusskonstruktionen im Stahlbau, die auf der DIN EN 1993-1-8 [3] basieren, wird zwischen volltragfähigen, teiltragfähigen und gelenkigen Anschlüssen unterschieden. Dieser Abschnitt bezieht sich auf die vorkommenden Beispielaufgaben zu den verschiedenen gelenkigen Anschlusstypen, die durch vier Kriterien bewertet werden. Im Anschluss wird die Bewertung zur Qualität und Vollständigkeit zusammengefasst. Die untersuchten Beispiele sind Verbindungen mit Stirnplatte, Fahnenblech, Doppelwinkeln, Auflagerknagge oder es handelt sich um Trägerstöße. Die Beispiele werden mit den zuvor erklärten Kriterien in Tabellenform aufgeführt, jedoch gibt es zwei Verbindungsvarianten, die gesondert betrachtet werden.

2.1 Erläuterung zu den Kriterien

Die gewählten Kriterien werden zunächst inhaltlich erklärt, sodass die Bewertung in den Tabellen der einzelnen Beispiele einfacher und übersichtlicher ablaufen kann. Die Kriterien basieren auf den Unterschieden sowie den Gemeinsamkeiten der in der Literatur aufgeführten Anschlussvarianten und deren Beispielaufgaben. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick der Kriterien zur Bewertung der Qualität und Vollständigkeit der in der Literatur vorkommenden Berechnungsbeispiele zu gelenkigen Anschlüssen.

Tabelle 2.1 Kriterien zur Bewertung der Beispielaufgaben

Kriterien
1. Nachweis der Verdrehbarkeit
2. Klassifizierung des Anschlusses
3. Ausreichende Systemangaben
4. Erläuterungen und Vollständigkeit

2.1.1 Kriterium 1: Nachweis der Verdrehbarkeit

Mit diesem Bewertungspunkt wird erfasst, ob der Nachweis der Verdrehbarkeit des gelenkigen Anschlusses geführt oder vernachlässigt wird. Letzteres ist oft der Fall, da die Anschlussvarianten in der Praxis häufig ohne weitere Nachweise als gelenkig angesehen werden, obwohl diese schon als tragfähig kategorisiert werden müssten. Sofern keine ausreichende Verdrehung nachgewiesen wird und somit eine Teileinspannung vorliegt, werden Kräfte und Spannungen in einzelnen Komponenten, wie zum Beispiel den Schrauben, auftreten. Diese Spannungen werden in der Berechnung der Verbindung nicht berücksichtigt. Dies kann dazu führen, dass zum Beispiel Schrauben einer gelenkig angenommenen Stirnplattenverbindung zu schwach dimensioniert wurden und bei einem Biegemoment, welches durch eine unberücksichtigte Tragfähigkeit entsteht, durch die Zugkräfte reißen würden. Die vorhandenen Methoden für die Nachweisführung der Verdrehbarkeit von gelenkigen Anschlüssen werden in Abschnitt 3 thematisiert.

2.1.2 Kriterium 2: Klassifizierung des Anschlusses

In [3] werden Anschlusskonstruktionen nach der Steifigkeit (gelenkig, verformbar, starr) und nach der Tragfähigkeit (gelenkig, teiltragfähig, volltragfähig) klassifiziert. Eine normgerechte Klassifizierung eines Anschlusses, wie auch der Nachweis der Verdrehbarkeit, werden in den meisten Praxisfällen vernachlässigt. Das zweite Kriterium der Bewertung von Beispielaufgaben zu gelenkigen Anschlüssen gibt somit an, ob eine Klassifizierung des Anschlusses durchgeführt wird. Die Bewertung wird für jegliche Anschlussvarianten entfallen, da in der Norm die Klassifizierung von Verbindungen auf ein Beispiel eines biegesteifen Anschlusses mit überstehender Stirnplatte beschränkt wird. Für die Klassifizierung von gelenkigen Verbindungen werden keine Musterbeispiele aufgeführt. Die Klassifizierung von Anschlüssen ist ein Teil der vorhandenen Nachweismethoden der Verdrehbarkeit in Abschnitt 3.

2.1.3 Kriterium 3: Ausreichende Systemangaben

Mit dem dritten Kriterium wird die Angabe der vorliegenden Systeminformationen bewertet. Hierzu zählt die Angabe des statischen Systems, dessen Länge und die Art der Belastung. Diese drei Angaben sind notwendig, um die erforderliche Verdrehbarkeit ϕ_{erf} zu ermitteln, welche in [5, 6] aufgeführt wird. Die Länge des statischen Systems bzw. die Spannweite des Trägers L_b ist zudem unerlässlich für die Anschlussklassifizierung durch die Anfangsrotationssteifigkeit $S_{j,ini}$, welche in Kriterium 2 miteinfließt.

2.1.4 Kriterium 4: Erläuterungen und Vollständigkeit

Das vierte Kriterium bezieht sich auf die grundsätzliche Vollständigkeit und Verständlichkeit, der in der Literatur aufgeführten Beispielaufgaben. Eine gute und vollständige Übersicht wird hier durch die Angabe eines Koordinatensystems und der angenommenen Lage des Gelenks sowie durch die Anzahl der Schnitte des Anschlussbildes definiert. Die Anschlusskonstruktion sollte durch einen Längs- und einen Querschnitt dargestellt werden, sodass alle Schrauben- und Randabstände eindeutig gekennzeichnet sind. Die konstruktiven Informationen der Verbindung, wie die zuvor genannten Schrauben- und Randabstände und deren Nachweise der Abstandsbedingungen, aber auch die Schraubengrößen, Schraubenfestigkeitsklassen, Werkstoffe und Profilkennzeichnungen, sollten dokumentiert sein. Durch die Vollständigkeit dieser Konstruktionsinformationen können die notwendigen Nachweise für alle Anschlusskomponenten geführt werden. Der Nachweis der Verdrehbarkeit wird mit dem ersten Kriterium gesondert betrachtet.

Zudem sind angefügte Erklärungen zur Berechnung der Nachweise und der verwendeten Formeln hilfreich. Eine Kennzeichnung der Lasteinleitung, d.h. der Punkt, wo im Fall einer gelenkigen Verbindung die Querkraft $V_{z,Ed}$ angesetzt wird, unterstützt die Verständlichkeit des Beispiels, da die zu führenden Nachweise eindeutiger sind.

2.2 Bewertung der Beispielaufgaben

Die Berechnungsbeispiele der verschiedenen Anschlusstypen wurden nach den unterschiedlichen Qualitäten und Autoren ausgewählt, sodass ein großes Spektrum aufgezeigt wird. Die Kriterien zu der Qualität und Vollständigkeit der Beispielaufgaben von gelenkigen Anschlüssen werden in tabellarischer Form durch die drei folgenden charakteristischen Merkmale gewertet:

Tabelle 2.2 Bewertungsmerkmale für die Beispielaufgaben

Charakteristisches Merkmal	Bewertung
+	Das Kriterium ist erfüllt
o	Das Kriterium ist zum Teil erfüllt
-	Das Kriterium ist nicht erfüllt

Zu jeder Tabelle eines Beispiels folgt ein kurzer Kommentar zur Bewertung der jeweiligen Kriterien. Für eine übersichtlichere Lesbarkeit werden ein Beispiel und der zugehörige Kommentar pro Seite dargelegt.

2.2.1 Anschluss mit Stirnplatte

Bei einem Stirnplattenanschluss wird ein Blech an das Ende des lastabgebenden Trägers geschweißt und mit Schrauben an das lastannahmende Bauteil angeschlossen, welches eine Stütze oder ein weiterer Träger sein kann. Bei letzterer Variante kann ein Teil des lastabgebenden Trägers ausgeklinkt werden, sofern dies aus Platzgründen notwendig ist (s. Bsp. 1).

Tabelle 2.3 Bsp. 1 - Stirnplattenanschluss (Träger-Träger)

Literatur: [14]	
Kriterium	Bewertung
1. Nachweis der Verdrehbarkeit	○
2. Klassifizierung des Anschlusses	entfällt
3. Ausreichende Systemangaben	-
4. Erläuterungen und Vollständigkeit	+
Legende	+ : erfüllt ○ : teils erfüllt - : nicht erfüllt

Kommentar zu Beispiel 1:

Im ersten Beispiel der Anschlüsse mit Stirnplatte wird die vorhandene Rotationskapazität bzw. Verdrehbarkeit ϕ_{vorh} der Konstruktion berechnet, aber nicht die erforderliche Rotationskapazität ϕ_{erf} , die die Verbindung aufweisen muss. In die Berechnung von ϕ_{erf} fließt die Belastung und Länge des statischen Systems mit ein, welches in diesem Beispiel nicht aufgeführt ist. Dennoch ist die Beispielaufgabe übersichtlich und vollständig dargestellt und zu jedem Berechnungsschritt sind die Formeln sowie Erläuterungen und Literaturquellen angegeben.

Tabelle 2.4 Bsp. 2 - Stirnplattenanschluss (Träger-Stütze)

Literatur: [6]

V = 200 kN
 Stirnplatte:
 BL 10 * 200 * 230
 S235
 6 Schrauben:
 M20 - 8.8

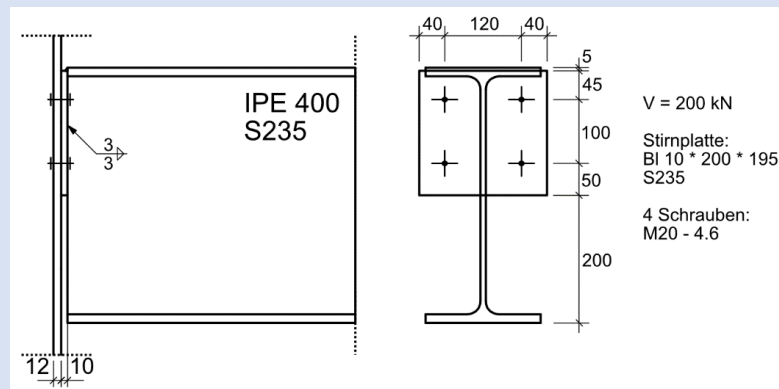
Kriterium	Bewertung
1. Nachweis der Verdrehbarkeit	○
2. Klassifizierung des Anschlusses	entfällt
3. Ausreichende Systemangaben	-
4. Erläuterungen und Vollständigkeit	○
Legende	+: erfüllt ○: teils erfüllt -: nicht erfüllt

Kommentar zu Beispiel 2:

Auch in diesem Beispiel wird der Nachweis der Verdrehbarkeit nicht vollständig geführt und als erfüllt angenommen, da nur das Anschlussdetail, aber nicht das statische System und die Belastung dargestellt werden. Die Stirnplattenverbindung ist verständlich und vollständig dokumentiert, jedoch sind die Erklärungen zu den Berechnungen in vorherigen Kapiteln aufgeführt, sodass die Übersichtlichkeit beeinträchtigt wird.

Tabelle 2.5 Bsp. 3 - Stirnplattenanschluss (Träger-Stütze)

Literatur: [7]



Kriterium		Bewertung
1. Nachweis der Verdrehbarkeit		○
2. Klassifizierung des Anschlusses		entfällt
3. Ausreichende Systemangaben		-
4. Erläuterungen und Vollständigkeit		○
Legende	+: erfüllt	○: teils erfüllt
		-: nicht erfüllt

Kommentar zu Beispiel 3:

Für dieses Beispiel werden lediglich die Nachweise zur Tragfähigkeit der Schrauben, Stirnplatte und Schweißnaht geführt. Die Verdrehbarkeit des Anschlusses wird nicht nachgewiesen. Es handelt sich jedoch bei dem Beispiel um eine Stirnplattenverbindung der typisierten Anschlüsse im Stahlhochbau nach DIN EN 1993-1-8 [18], die nach den Empfehlungen aus [5, 6] konstruiert wurden und somit eine ausreichende Verdrehbarkeit berücksichtigt wird. Außerdem wird nur das Anschlussdetail dargestellt und das restliche statische System wird vernachlässigt. Das Detail beinhaltet alle notwendigen konstruktiven Angaben zum Träger, allerdings wird kein Profilquerschnitt für die Stütze angegeben, sondern nur die Flanschdicke. Die Beispielaufgabe wird nicht durch Formeln und angefügte Erläuterungen zur Berechnung unterstützt.

2.2.2 Anschluss mit Fahnenblech

Bei einem Fahnenblechanschluss wird ein Blech an das lastannehmende Bauteil (Stütze oder Träger) geschweißt und über eine Schraubenverbindung an den Steg des lastabgebenden Trägers angeschlossen. Bei Verbindungen zwischen zwei Trägern kann der lastabgebende Träger ausgeklinkt werden, sofern dies nötig ist (s. Bsp. 5). Das Fahnenblech ist nur auf einer Seite des Trägers angebracht.

Tabelle 2.6 Bsp. 4 - Fahnenblechanschluss (Träger-Stütze)

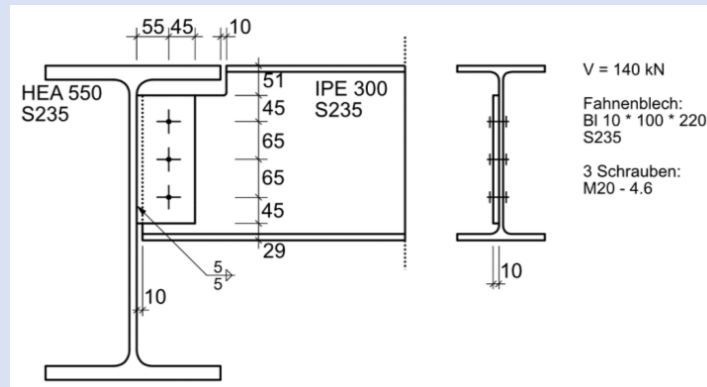
Literatur: [11]	
<p style="text-align: center;"> $V = 163,1 \text{ kN}$ Fahnenblech: Bl 10 * 110 * 280 S355 2 Schrauben: M20 - 10.9 </p>	
Kriterium	Bewertung
1. Nachweis der Verdrehbarkeit	○
2. Klassifizierung des Anschlusses	entfällt
3. Ausreichende Systemangaben	+
4. Erläuterungen und Vollständigkeit	+
Legende	+ : erfüllt ○: teils erfüllt -: nicht erfüllt

Kommentar zu Beispiel 4:

In diesem Beispiel wird die Verdrehbarkeit nach [5, 6] nachgewiesen, da auch das statische System und eine Lastzusammenstellung, in der die aufliegende Stahlbetondecke mit inbegriffen ist, aufgeführt sind. Die Kriterien für eine plastische Lastumverteilung nach 6.3.4 aus [6] werden vereinfacht berücksichtigt. Dennoch wird die Tragfähigkeit der Schweißnaht falsch nachgewiesen. Die Geometrie des Schraubenbildes wird überprüft und die konstruktiven Werte, wie auch die Lage des theoretischen Gelenks sind übersichtlich dargestellt. Die Berechnungen beinhalten alle notwendigen Formeln sowie Verweise auf deren Literaturquellen.

Tabelle 2.7 Bsp. 5 - Fahnenblechanschluss (Träger-Träger)

Literatur: [4]



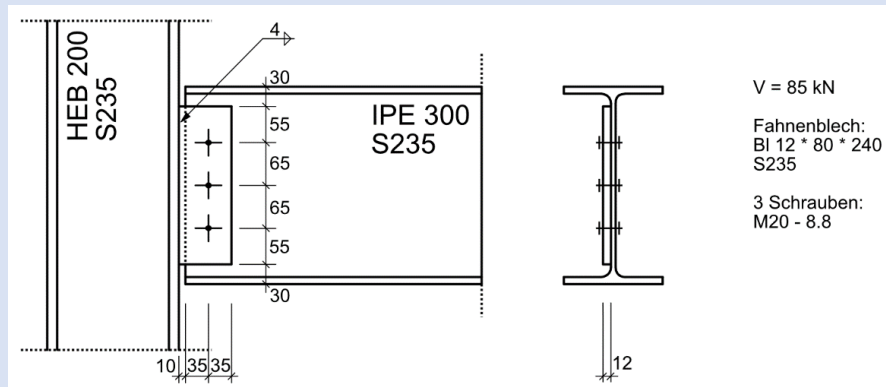
Kriterium		Bewertung
1. Nachweis der Verdrehbarkeit		○
2. Klassifizierung des Anschlusses		entfällt
3. Ausreichende Systemangaben		+
4. Erläuterungen und Vollständigkeit		○
Legende	+: erfüllt	○: teils erfüllt
		-: nicht erfüllt

Kommentar zu Beispiel 5:

Dieses Beispiel eines Fahnenblechanschlusses weist ebenfalls einen vollständigen Nachweis der Verdrehbarkeit auf, welcher möglich ist, da das statische System und dessen Belastung mitangegeben sind. Es werden hier die Kriterien für eine plastische Umverteilung der Schnittgrößen vernachlässigt. Die Maßvorgaben für die Schraubenlöcher und die Kehlnaht sind aufgeführt, jedoch fehlen die Formeln für die Tragfähigkeitsnachweise. Am Seitenrand wird auf die Literaturstellen der Nachweise verwiesen, allerdings fehlen auch dort Erläuterungen zu den Berechnungen.

Tabelle 2.8 Bsp. 6 - Fahnenblechanschluss (Träger-Stütze)

Literatur: [10]



Kriterium		Bewertung
1. Nachweis der Verdrehbarkeit		-
2. Klassifizierung des Anschlusses		entfällt
3. Ausreichende Systemangaben		-
4. Erläuterungen und Vollständigkeit		○
Legende	+: erfüllt	○: teils erfüllt
		-: nicht erfüllt

Kommentar zu Beispiel 6:

In diesem Beispiel wird die Verdrehbarkeit nach [5, 6] nicht überprüft. Weder ein statisches System noch die Belastung sind angegeben, sodass die erforderliche Verdrehung ϕ_{erf} nicht berechnet werden kann. Zudem sind die Rechenschritte ohne Formeln und Erläuterungen aufgeführt, sodass das Verständnis der Beispielaufgabe erschwert wird. In der Darstellung des Anschlussdetails sind alle notwendigen konstruktiven Kennwerte zu finden sowie die Lage des theoretischen Gelenks der Verbindung.

2.2.3 Anschluss mit Doppelwinkel

Ein Doppelwinkelanschluss kann wie ein Stirnplatten- oder Fahnenblechanschluss zwischen einem Träger und einer Stütze oder zwei Trägern ausgeführt werden. Dabei werden zwei gleichschenklige oder ungleichschenklige Winkel an den Steg des lastabgebenden Trägers und an den Steg oder Flansch des lastannehmenden Bauteils angeschraubt. Auch bei dieser Anschlusskonstruktion sind Ausklinkungen möglich.

Tabelle 2.9 Bsp. 7 - Doppelwinkelanschluss (Träger-Träger)

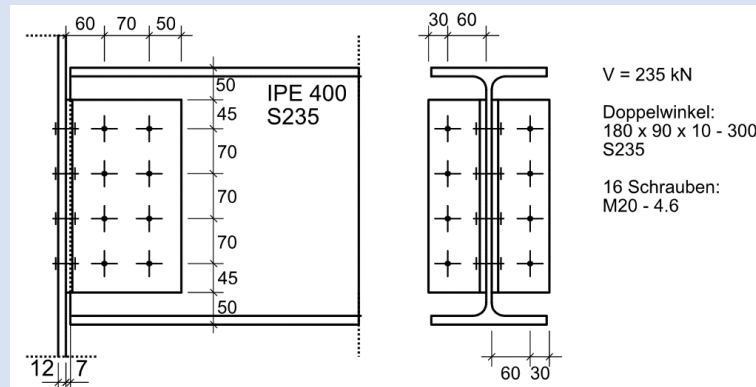
Literatur: [15]			
Kriterium			Bewertung
1. Nachweis der Verdrehbarkeit			○
2. Klassifizierung des Anschlusses			entfällt
3. Ausreichende Systemangaben			-
4. Erläuterungen und Vollständigkeit			○
Legende	+ : erfüllt	○ : teils erfüllt	- : nicht erfüllt

Kommentar zu Beispiel 7:

Das siebte Beispiel führt keinen Nachweis der Verdrehbarkeit des Anschlusses auf. Es handelt sich jedoch bei dem Beispiel um einen typisierten Doppelwinkelanschluss aus [18], der nach den Empfehlungen aus [5, 6] konstruiert wurde und somit eine ausreichende Verdrehbarkeit berücksichtigt wird. Die konstruktiven Voraussetzungen für die Schrauben sind angegeben, allerdings gibt es keine Informationen zu den statischen Systemangaben. Die Beispielaufgabe ist übersichtlich und umfangreich dargestellt, dennoch fehlen Erläuterungen zu den Berechnungsschritten, um das Verständnis zu erleichtern.

Tabelle 2.10 Bsp. 8 - Doppelwinkelanschluss (Träger-Stütze)

Literatur: [7]



Kriterium		Bewertung
1. Nachweis der Verdrehbarkeit		○
2. Klassifizierung des Anschlusses		entfällt
3. Ausreichende Systemangaben		-
4. Erläuterungen und Vollständigkeit		○
Legende	+ : erfüllt	○ : teils erfüllt
		- : nicht erfüllt

Kommentar zu Beispiel 8:

In diesem Beispiel wird der Anschluss mit einem ungleichschenkligen Winkel ausgeführt und in der Darstellung werden alle konstruktiven Maße des Trägers und der Verbindung angegeben. Die Stütze wird nur mit der Flanschdicke t_{fc} gekennzeichnet, sodass diese nicht nachgewiesen werden kann. Die Formeln sowie die Erläuterungen zu den Berechnungsschritten der Beispielaufgabe werden in den vorherigen Kapiteln aufgeführt. Die Nachweise zur Verdrehbarkeit des gelenkigen Anschlusses werden vernachlässigt wie auch das statische System. Der Anschluss basiert ebenfalls auf den typisierten Varianten, sodass trotz nicht geführtem Nachweis einer ausreichenden Verdrehung, dieser in [18] berücksichtigt wird.

2.2.4 Auflagerung auf Knagge

Bei dieser Anschlussvariante wird ein lastabgebender Träger mit einer lastannehmen- den Stütze verbunden. An die Stütze wird ein Stahlklotz, die sogenannte Knagge, ge- schweißt, auf dem der Träger aufgelagert wird. Die Lagesicherheit wird durch einen Stirnplatten- oder Fahnenblechanschluss am oberen Teil des Trägerstegs gewährleis- tet.

Tabelle 2.11 Bsp. 9 - Anschluss mit Auflagerknagge und Fahnenblech (Träger-Stütze)

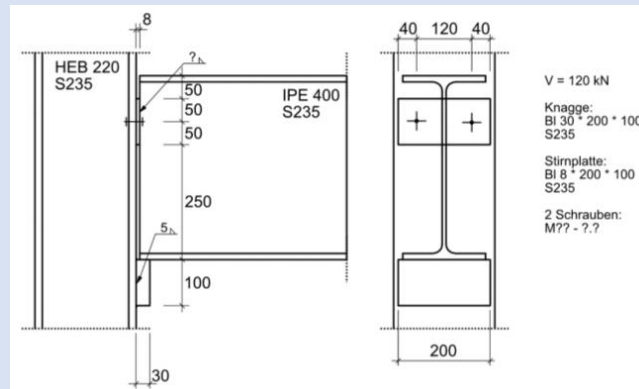
Literatur: [10]			
Kriterium			Bewertung
1. Nachweis der Verdrehbarkeit			entfällt
2. Klassifizierung des Anschlusses			entfällt
3. Ausreichende Systemangaben			-
4. Erläuterungen und Vollständigkeit			○
Legende	+: erfüllt	○: teils erfüllt	-: nicht erfüllt

Kommentar zu Beispiel 9:

Der Nachweis der Verdrehbarkeit von Knaggenanschlüssen wird nicht in der Literatur aufgeführt. Eine erforderliche Verdrehung kann zugleich, durch die fehlenden Angaben zum statischen System, nicht ermittelt werden. Zudem ist die Nachweisführung unvollständig und die Berechnungen sind ohne Formeln aufgeführt. Die Formeln lassen sich in anderen Literaturabschnitten finden, auf die in der Beispielaufgabe verwiesen wird. Dennoch ist das Beispiel übersichtlich gestaltet und die Kraftermittlung und Nachweisführung wird durch Erklärungen begleitet. Die horizontale Lage der Schraube ist nicht angegeben, da diese nur zur Lagesicherung dient und nicht in den Nachweis der Tragfähigkeit miteinfließt.

Tabelle 2.12 Bsp. 10 - Anschluss mit Auflagerknagge und Stirnplatte (Träger-Stütze)

Literatur: [7]



Kriterium	Bewertung
1. Nachweis der Verdrehbarkeit	entfällt
2. Klassifizierung des Anschlusses	entfällt
3. Ausreichende Systemangaben	-
4. Erläuterungen und Vollständigkeit	○
Legende	+: erfüllt ○: teils erfüllt -: nicht erfüllt

Kommentar zu Beispiel 10:

In diesem Beispiel eines Anschlusses mit Auflagerknagge wird die Lagesicherheit durch eine angeschweißte Stirnplatte konstruiert und nicht durch ein Fahnenblech (s. Bsp. 9). Die Abmessungen und Angaben zu den Blechen und Profilen sind vollständig, jedoch fehlen die Informationen zu den Schrauben und der Schweißnaht der Stirnplatte, da diese nicht bemessungsrelevant sind. Wie auch bei den Beispielen des Stirnplatten- und Doppelwinkelanschlusses aus Stahlbau nach EC3 [7] sind die Formeln und Erläuterungen nicht enthalten und es wird auf die vorherigen Kapitel verwiesen. Das statische System ist nicht angegeben und ein Nachweis der Verdrehbarkeit kann für Anschlüsse mit Auflagerknagge nicht geführt werden, sodass hier die Bewertung entfällt.

2.2.5 Trägerstoß

Bei einem gelenkigen Stoß werden zwei Träger über den Steg miteinander verbunden. Eine zusätzliche Verbindung der oberen und unteren Gurte der beiden Träger mit Laschen würden den Stoß als biegesteif kennzeichnen. Der Anschluss kann mit zwei Laschen (s. Bsp. 11) oder mit zwei Stirnplatten (s. Bsp. 12) konstruiert werden.

Tabelle 2.13 Bsp. 11 - Steglaschenstoß (Träger-Träger)

Literatur: [10]	
Kriterium	Bewertung
1. Nachweis der Verdrehbarkeit	-
2. Klassifizierung des Anschlusses	entfällt
3. Ausreichende Systemangaben	-
4. Erläuterungen und Vollständigkeit	○
Legende	+: erfüllt ○: teils erfüllt -: nicht erfüllt

Kommentar zu Beispiel 11:

Für die Verbindung von zwei Trägern mit einem Steglaschenstoß sind in [4] passende Nachweise für die Verdrehbarkeit angegeben, die für dieses Beispiel allerdings nicht geführt werden. In der Beispielaufgabe wird zudem nur das Detail des Anschlusses dargestellt und die ausreichenden Systemangaben werden vernachlässigt. Dennoch ist das Beispiel übersichtlich gestaltet und die Kraftermittlung und Nachweisführung wird durch Erklärungen begleitet. Jedoch sind die Formeln der einzelnen Berechnungsschritte nicht dokumentiert.

Tabelle 2.14 Bsp. 12 - Stirnplattenstoß (Träger-Träger)

Literatur: [10]			
Kriterium			Bewertung
1. Nachweis der Verdrehbarkeit			-
2. Klassifizierung des Anschlusses			entfällt
3. Ausreichende Systemangaben			-
4. Erläuterungen und Vollständigkeit			○
Legende	+ : erfüllt	○ : teils erfüllt	- : nicht erfüllt

Kommentar zu Beispiel 12:

Auch für einen Trägerstoß mit zwei angeschweißten Stirnplatten liegt in [4] ein Nachweis für die Verdrehbarkeit vor, welcher hier nicht angewendet wird. Die konstruktiven Angaben der Verbindung sind vollständig und die Beispielaufgabe ist übersichtlich dargestellt. Zusätzlich sind die geführten Nachweise erläutert, jedoch fehlen bei diesen die Formeln für die Schrauben auf Abscheren und Lochleibung.

2.2.6 Sonderbeispiele

Im Folgenden werden zwei Beispiele gesondert betrachtet, da sich diese von den trivialen Aufgaben mit Anschlussdetails in gewissen Punkten unterscheiden. Die Bewertung erfolgt dennoch anhand der gleichen vier Kriterien. Bei den Sonderbeispielen handelt es sich um einen quasigelenkigen Stirnplattenanschluss mit Kontakt am unteren Trägerflansch [17] und um die typisierten Anschlüsse [18]

Tabelle 2.15 Sonderbsp. 1 - Stirnplattenanschluss mit Kontakt am unteren Trägerflansch (Träger-Träger)

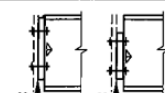
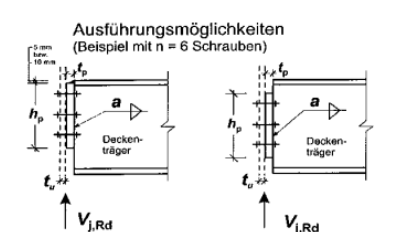
Literatur: [17]			
Kriterium		Bewertung	
1. Nachweis der Verdrehbarkeit		+	
2. Klassifizierung des Anschlusses		+	
3. Ausreichende Systemangaben		+	
4. Erläuterungen und Vollständigkeit		○	
Legende	+ : erfüllt	○ : teils erfüllt	- : nicht erfüllt

Kommentar zu Sonderbeispiel 1:

In dem ersten Sonderbeispiel wird ein normalerweise verformbarer Stirnplattenanschluss als quasigelenkig mit einem vereinfachten Bemessungsverfahren berechnet. Die Verdrehbarkeit der Verbindung wird durch das Fließen der Stirnplatte infolge Modus 1 des T-Stummel-Verfahrens nachgewiesen. Zudem wird der Anschluss über die Momententragfähigkeit klassifiziert wie auch über die Angabe der Anfangsrotationssteifigkeit. Des Weiteren sind das System und die Belastung angegeben sowie Erläuterungen und Gleichungen für eine ordentliche Nachweisführung. Es fehlen lediglich Angaben zu Literaturstellen einiger Formeln.

Tabelle 2.16 Sonderbsp. 2 - Typisierte Anschlüsse (Träger-Stütze)

Literatur: [18]

Gelenkige I-Trägeranschlüsse mit angeschweißter Stirnplatte		IS												
Tragfähigkeit		4.6 / 10.9												
<p>Ausführungsmöglichkeiten (Beispiel mit n = 6 Schrauben)</p> 		<p>$V_{j,Rd}$: Anschlusstragfähigkeit n : Gesamtanzahl der Schrauben t_u : Erforderliche Dicke des lastannehmenden Bauteils (Stütze/Unterz.) a : Dicke der Doppelkehlnaht am Trägersteg</p> <p>h_p : Stirnplattenhöhe t_p : Stirnplattendicke Schraubenfestigkeitsklasse 4.6: $t_p = 10$ mm Schraubenfestigkeitsklasse 10.9: M16 und M20 $t_p = 10$ mm M24 $t_p = 12$ mm</p> <p>Maßgebende Versagensformen (Abkürzungen):</p> <table border="0"> <tr> <td>Betroffenes Bauteil</td> <td>Ursache</td> </tr> <tr> <td>B : Träger</td> <td>b : Lochleibung</td> </tr> <tr> <td>BT : Schraube</td> <td>s : Schub bzw. Abscheren</td> </tr> <tr> <td>EP : Stirnplatte</td> <td>bd : Biegung</td> </tr> <tr> <td></td> <td>st : Scherbruch</td> </tr> </table> <p><small>¹⁾ Nicht in S235 bzw. ²⁾ nicht in S355 in zweiseitiger Konfiguration einsetzbar; in einseitiger Konfiguration ist Anforderung gem. Erläuterungen zu erfüllen</small></p>	Betroffenes Bauteil	Ursache	B : Träger	b : Lochleibung	BT : Schraube	s : Schub bzw. Abscheren	EP : Stirnplatte	bd : Biegung		st : Scherbruch		
Betroffenes Bauteil	Ursache													
B : Träger	b : Lochleibung													
BT : Schraube	s : Schub bzw. Abscheren													
EP : Stirnplatte	bd : Biegung													
	st : Scherbruch													
Abmessungen und Tragfähigkeiten														
Nr	Abmessungen				S 235				S 355					
	Trägerprofil	Schraube	n	h_p mm	Code	$V_{j,Rd}$ kN	t_u mm	a mm	Vers.-form	$V_{j,Rd}$ kN	t_u mm	a mm	Vers.-form	
124	IPE 400	M 20	4.6	8	290	IS 20 8 ^{1) 2)}	338,4	3,6	4,0	B s	386,0	3,0	5,0	BT s
125			4.6	2	100	IS 24 2 ²⁾	116,7	3,4	4,0	B s	139,0	3,6	5,0	BT s
126		M 24	10.9	2	150	ISH 24 2	175,0	5,1	4,0	B s	264,4	5,6	5,0	B s
127			4.6	4	180	IS 24 4 ²⁾	210,0	3,9	4,0	B s	277,9	3,8	5,0	BT s
128		M 24	10.9	4	300	ISH 24 4	350,0	5,1	4,0	B s	528,8	5,6	5,0	B s
129			4.6	6	260	IS 24 6 ²⁾	303,4	3,8	4,0	B s	416,9	3,8	5,0	BT s
130		M 24	10.9	8	340	IS 24 8 ²⁾	396,7	3,7	4,0	B s	555,9	3,8	5,0	BT s

Kriterium	Bewertung
1. Nachweis der Verdrehbarkeit	O
2. Klassifizierung des Anschlusses	entfällt
3. Ausreichende Systemangaben	-
4. Erläuterungen und Vollständigkeit	O

Legende	+ : erfüllt	O : teils erfüllt	- : nicht erfüllt
---------	--------------------	--------------------------	--------------------------

Kommentar zu Sonderbeispiel 2:

In den Tragfähigkeitstabellen sind typisierte Varianten für gelenkige Stirnplatten- und Doppelwinkelanschlüsse abhängig vom Querkraftwiderstand aufgeführt. In einem Vordokument zu den Tabellen werden die Berechnungsgrundlagen dargelegt. Da die Tragfähigkeiten nach den Konstruktionsempfehlungen aus [5, 6] berechnet werden, ist eine ausreichende Verdrehbarkeit mitberücksichtigt. Zudem werden die geführten Nachweise angegeben. Jedoch fehlen zu diesen, wie auch zu dem Nachweis der Verdrehbarkeit, die Angaben der Berechnungen. Diese werden im Hintergrund geführt und die Querkrafttragfähigkeit kann aus der Tabelle entnommen werden. Somit sind auch keine statischen Systeme und die dazugehörigen Belastungen vorhanden.

2.3 Bewertungsübersicht der Beispielaufgaben

In einer Bewertungsübersicht zu den aufgeführten Beispielaufgaben der verschiedenen Literaturquellen sollen die erfüllten Kriterien wie auch die Defizite aufgezeigt werden. Die Auswertung der Beispiele 1 bis 12 findet separat von den Sonderbeispielen statt.

2.3.1 Beispielaufgaben 1 bis 12

Die Auswertung der Kriterien der Beispielaufgaben 1 bis 12 erfolgt zunächst über die Anzahl der Bewertungspunkte nach Anschlusstyp (s. Tabelle 2.17). In einem zweiten Schritt wird ein gesamter Überblick über die Bewertung der Beispiele geschaffen (s. Tabelle 2.18).

Tabelle 2.17 Kriterienauswertung einzelner Anschlusstypen

Kriterium		Stirnplatte	Fahnenblech	Winkel	Knagge	Stoß
1. Nachweis der Verdrehbarkeit	+	0	0	0	entfällt	0
	0	3	2	2		0
	-	0	1	0		2
2. Klassifizierung des Anschlusses	+	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
	0					
	-					
3. Ausreichende Systemangaben	+	0	2	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	-	3	1	2	2	2
4. Erläuterungen und Vollständigkeit	+	1	1	0	0	0
	0	2	2	2	2	2
	-	0	0	0	0	0

In der Zusammenstellung der Bewertung der Kriterien fällt auf, dass ein vollständiger Nachweis für eine ausreichende Verdrehbarkeit für keinen Anschlusstyp geführt wird. Zudem gilt der Nachweis bei einem der Stirnplatten- und den zwei Doppelwinkelanschlüssen nur als teilweise erfüllt, da die Verbindungsvarianten typisiert sind. Die typisierten Anschlüsse aus [18] sind nach [5, 6] konstruiert, sodass eine ausreichende Verdrehung berücksichtigt wird. Für die drei Anschlüsse wird jedoch keine vorhandene Verdrehung in dem Beispiel berechnet.

Für zwei weitere Stirnplatten- und zwei Fahnenblechanschlüsse gilt das Kriterium als teilweise erfüllt, denn für diese beiden Anschlusstypen sind in [5, 6] ausführliche Berechnungsmethoden angegeben, die für die vier Beispiele genutzt werden. Für die zwei

Stirnplattenanschlüsse wird nur die vorhandene und nicht die erforderliche Verdrehung berechnet. Auch ohne Nachrechnung wird hier der Nachweis der Verdrehbarkeit als erfüllt erfasst. Für die zwei Fahnenblechanschlüsse werden die vorhandene und die erforderliche Verdrehung gegenübergestellt, allerdings fehlt hier ein vollständiger Nachweis der plastischen Lastumverteilung (s. Tabelle 3.2).

Ein Nachweis für einen Trägerstoß ist in [5, 6] hingegen nicht enthalten, sodass dementsprechend keine erforderliche Verdrehung berechnet wird. In [4] werden die Methoden für Anschlüsse mit Stirnplatte und Fahnenblech für einen Stirnplatten- und Laschenstoß abgeleitet, sodass eine Nachweisführung möglich wäre. *Obwohl ein Knaggenanschluss in der Praxis einem „ideellen“ Gelenk am nächsten kommen sollte, wird in der Literatur hierzu kein Verdrehungsnachweis aufgeführt, sodass eine Bewertung entfällt.*

Nach Norm können gelenkige Anschlüsse, über Voraussetzungen für die Tragfähigkeit und Steifigkeit, klassifiziert werden. Auf diese Klassifizierung wird in sämtlichen Beispielaufgaben verzichtet, da die Berechnungsgrundlagen für diesen Nachweis nicht eindeutig vorliegen. In [3] wird ausschließlich ein tragfähiger Anschluss mit überstehender Stirnplatte behandelt. *Die Anschlüsse der Beispielaufgaben werden abhängig von der konstruktiven Ausbildung sowie den Bedingungen, dass kein Druckpunkt vorliegt und bei Stirnplattenanschlüssen dünne Bleche verwendet werden, als gelenkig angenommen.*

Ausreichende Systemangaben und eine Belastung sind ebenfalls kaum Bestandteil der Beispiele der Literatur. Somit wird dies lediglich für zwei Beispiele der Anschlüsse mit Fahnenblech angegeben. Für die Berechnung der Querkrafttragfähigkeit eines Anschlusses sind nicht mehr als die Werkstoff- und Geometriewerte des Details notwendig. Für einen vollständigen Nachweis der Verdrehbarkeit wird die erforderliche Verdrehung ϕ_{erf} benötigt, welche mithilfe der Länge des statischen Systems und dessen Belastung berechnet werden kann (s. Tabelle 5.1). Demnach sind die zwei Beispiele der Fahnenblechanschlüsse zugleich die einzigen, die eine erforderliche Verdrehung nachweisen.

Die Vollständigkeit der Beispiele wird, im Vergleich zu den vorherigen Kriterien, vorteilhaft bewertet. In jeder Aufgabe werden ausreichende Geometrie- und Werkstoffangaben für einen Nachweis der Querkrafttragfähigkeit gemacht. Außerdem reichen diese Angaben aus, um die vorhandene Verdrehung ϕ_{vorh} für die einzelnen Anschlussdetails zu berechnen, abgesehen von den Knaggenauflagern, da hier keine Gleichungen vorliegen. Der Großteil dieses Bewertungspunktes wird jedoch mit „teils erfüllt“ bewertet, da Erläuterungen und die Gleichungen der Tragfähigkeitsnachweise ausbleiben.

Tabelle 2.18 Kriterienauswertung aller Anschlusstypen

	+	0	-	entfällt
1. Nachweis der Verdrehbarkeit	0	7	3	2
2. Klassifizierung des Anschlusses	0	0	0	12
3. Ausreichende Systemangaben	2	0	10	0
4. Erläuterungen und Vollständigkeit	2	10	0	0

In der Gesamtübersicht der Anzahl der einzelnen Bewertungspunkte fällt deutlich auf, dass den aufgeführten Beispielaufgaben die Klassifizierung der Anschlüsse und die ausreichenden Systemangaben fehlen. Diese werden oft vernachlässigt, da für die Klassifizierung eine Annahme getroffen wird und ein statisches System mit Belastung für den Tragfähigkeitsnachweis der Verbindung nicht notwendig ist, solange Einzelwerte für die Schnittgrößen angegeben sind. Für die Berechnung der erforderlichen Verdrehung ϕ_{erf} ist das statische System jedoch unerlässlich.

Ein vollständiger Nachweis der Verdrehbarkeit mit einer Gegenüberstellung der vorhandenen und der erforderlichen Verdrehung wird nur in zwei Beispielen geführt. Dies sind wiederum die beiden Aufgaben, bei denen auch ausreichende Systemangaben vorliegen. In zwei weiteren Beispielen wird die vorhandene Verdrehung ϕ_{vorh} berechnet und ohne Nachrechnung als ausreichend betrachtet. Bei den drei Beispielen, die auf die typisierten Anschlüsse aus [18] zurückgreifen, wird ebenfalls keine ausreichende Verdrehung nachgewiesen. Dennoch sind in der Erstellung der Tragfähigkeitstabellen der typisierten Verbindungen die Nachweismethoden der Verdrehbarkeit aus [5, 6] berücksichtigt, sodass hier die Bewertung als „teils erfüllt“ angesehen wird.

Der ausschlaggebende Punkt ist die Annahme eines gelenkigen Anschlusses durch den Großteil von Autoren der Literatur aus dem Stahlhochbau. Hier wird die Anschlusskonstruktion weder als gelenkig klassifiziert noch wird ein Nachweis einer ausreichenden Verdrehbarkeit geführt, da die Verbindung über die geometrischen Randbedingungen als gelenkig bestimmt wird. Der Fokus liegt demnach auf den Tragfähigkeitsnachweisen, die infolge einer Querkraftbelastung geführt werden müssen. Sofern ein Anschluss ohne eine Nachweisführung als gelenkig klassifiziert wird - in der Realität verhält sich dieser aber schon als verformbar - werden ungeplante Biegemomente auftreten. Daraus ergeben sich zusätzliche Nachweise der Tragfähigkeit wie zum Beispiel Schrauben mit Zugbeanspruchung, die durch eine fehlerhafte Annahme der Klassifizierung, vernachlässigt werden.

2.3.2 Sonderbeispiele

Im Folgenden wird die Bewertung der zwei Sonderbeispiele zusammengefasst. Dabei handelt es sich um eine vereinfachte Berechnungsmethode für einen quasigelenkigen Stirnplattenanschluss mit Kontakt am unteren Trägerflansch und um die typisierten Anschlüsse nach Eurocode 3 Teil 1-8.

Tabelle 2.19 Kriterienauswertung der Sonderbeispielaufgaben

	+	0	-	entfällt
1. Nachweis der Verdrehbarkeit	1	1	0	0
2. Klassifizierung des Anschlusses	1	0	0	1
3. Ausreichende Systemangaben	1	0	1	0
4. Erläuterungen und Vollständigkeit	0	2	0	0

In der Beispielaufgabe des quasigelenkigen Stirnplattenanschlusses mit einem Druckpunkt am unteren Trägerflansch wird der Anschluss über die Tragfähigkeit und die Anfangssteifigkeit klassifiziert. Damit ist dies das einzige Beispiel, bei dem eine gelenkige Klassifizierung bestätigt wird. Diese Klassifizierung ist aufgrund der teiltragfähigen Eigenschaften des Anschlusses möglich. Gleichzeitig wird die einzige vollständige Kontrolle einer ausreichenden Verdrehbarkeit geführt, wobei es sich um eine gesonderte Nachweismethode handelt und nicht um die Empfehlungen aus [5, 6].

In den Tragfähigkeitstabellen der typisierten Verbindungsvarianten werden weder die Klassifizierungen der Anschlüsse noch die Informationen zu einem möglichen statischen System angegeben. In der Konstruktion der Stirnplatten- und Winkelanschlüsse werden die Empfehlungen aus [5, 6] berücksichtigt, sodass der Nachweis der Verdrehbarkeit als teils erfüllt gilt.

3 Methoden zum Nachweis der Verdrehbarkeit von gelenkigen Anschlüssen

Nach DIN EN 1993-1-8 müssen gelenkige Verbindungen die auftretenden Gelenkverdrehungen infolge von Beanspruchungen ausführen können. Die Norm gibt hierzu jedoch keine Formeln oder weitere Berechnungsgrundlagen an, um eine Überprüfung der erforderlichen Verdrehbarkeit der Verbindungen zu führen. In der Praxis müssen Ansätze eigenständig erarbeitet werden, die eine Verdrehbarkeit des gelenkigen Anschlusses nachweisen können, jedoch wird oft auf diesen Schritt und eine Klassifizierung verzichtet. [3]

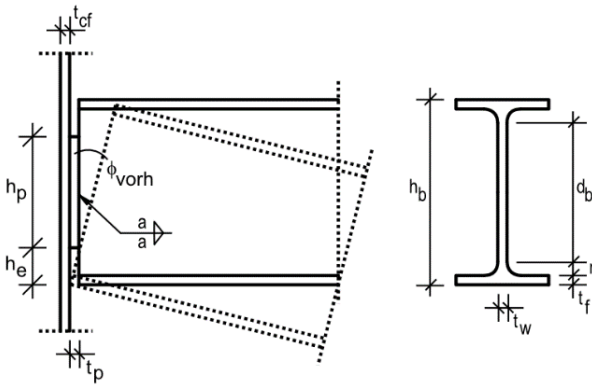
3.1 Rotationskapazität und Duktilität nach der ECCS

In den beiden Veröffentlichungen der ECCS über die Konstruktion von gelenkigen Anschlüssen [5, 6] werden Methoden zum Nachweis der Verdrehbarkeit aufgeführt, die nicht Inhalt des Eurocodes 3 Teil 1-8 [3] sind. Eine ausreichende Verdrehung wird über die Rotationskapazität und die Duktilität des Anschlusses bestimmt. Die vorliegenden Voraussetzungen gelten als Konstruktionsempfehlungen und werden auf Stirnplatten- und Fahnenblechanschlüsse begrenzt. Auf diese Methoden wird in den Beispielaufgaben, die eine Verdrehung des Anschlusses berücksichtigen, hingewiesen. Zudem werden in [4] die Nachweismethoden aus [5, 6] so abgeleitet, dass diese für Doppelwinkelanschlüsse, Stirnplattenstöße und Laschenstöße anwendbar sind. Die Verdrehbarkeit von Knaggenanschlüssen kann nicht mithilfe von Methoden aus der Literatur bestätigt werden.

3.1.1 Anwendbarkeit und Unterschiede für gelenkige Anschlussvarianten

Die Grenzen, Anwendbarkeit und Unterschiede der Nachweise der Verdrehbarkeit ergeben sich aus den gelenkigen Anschlussvarianten mit Stirnplatte, Fahnenblech, Doppelwinkel oder Laschen. Die Gleichungen setzen sich aus geometrischen Verhältnissen und der Anordnung des Schraubenbildes zusammen. Im Folgenden werden die vorhandenen Nachweise den anwendbaren Anschlusskonstruktionen in tabellarischer Form zugeordnet. Eine Herleitung der Mechanismen erfolgt in Abschnitt 5. [5, 6]

Tabelle 3.1 Rotationskapazität und Duktilität von Anschlüssen mit Stirnplatte, nach [5, 6]

Stirnplattenanschluss	
	
Rotationskapazität [5, 6]	(1) $h_p \leq d_b$ mit $d_b = h_b - 2 * t_f - 2 * r$ (2) $\phi_{vorh} = \frac{t_p}{h_e}$ (3) ϕ_{erf} nach Tab. 5.1 (4) $\phi_{vorh} > \phi_{erf}$
Duktilität [5, 6]	<p style="background-color: #D9E1F2; margin: 0; padding: 2px;">Schraube</p> $\frac{d}{t_p} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{yp}}{f_{ub}}}$ gilt für die Stirnplatte $\frac{d}{t_{cf}} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{ycf}}{f_{ub}}}$ gilt für den Stützenflansch $\frac{d}{t_w} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{yw}}{f_{ub}}}$ gilt für den Stützensteg Mindestens ein Duktilitätskriterium muss erfüllt sein <p style="background-color: #D9E1F2; margin: 0; padding: 2px;">Doppelkehlnaht</p> $a \geq \frac{\beta_w}{\sqrt{2}} * \frac{f_y}{f_u} * \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} * t_w$ Vereinfacht: S235: $a \geq 0,46 * t_w$ S355: $a \geq 0,55 * t_w$

Auf Grundlage der vorliegenden Nachweismethoden ergeben sich *Unklarheiten über die Begrenzung der Schraubenanzahl pro Stirnplattenanschluss und über die Obergrenzen von geometrischen Größen und Bauteildicken*. Somit sind keine Grenzen für die Komponentendicken wie z. B. die Stirnplattendicke t_p , die Schweißnahtdicke a oder den Schraubendurchmesser d vorhanden. Sind diese Werte zu groß, könnte sich ein teiltragfähiger oder volltragfähiger Anschluss ergeben, obwohl die Nachweisführung aufgeht. Zudem wird *kein maximales Höhenverhältnis zwischen der Stirnplatte und dem Träger angegeben und weiterhin ist es unschlüssig, ob ein Kontakt der Stirnplatte mit einem der Trägerflansche möglich ist*. Die Stirnplattenhöhe h_p muss lediglich kleiner sein als die reine Steghöhe d_b .

Tabelle 3.2 Rotationskapazität und Duktilität von Anschlüssen mit Fahnenblech, nach [4, 5, 6]

Fahnenblechanschluss	
Rotationskapazität [5, 6]	<ol style="list-style-type: none"> (1) $h_p \leq d_b$ mit $d_b = h_b - 2 * t_f - 2 * r$ (2) $\phi_{vorh} = \infty$, wenn: $z > \sqrt{(z - g_h)^2 + \left(\frac{h_p}{2} + h_e\right)^2}$ ansonsten: $\phi_{vorh} = \arcsin\left(\frac{z}{\sqrt{(z - g_h)^2 + \left(\frac{h_p}{2} + h_e\right)^2}}\right) - \arctan\left(\frac{z - g_h}{\frac{h_p}{2} + h_e}\right)$ (3) ϕ_{erf} nach Tab. 5.1 (4) $\phi_{vorh} > \phi_{erf}$
Duktilität [4, 5, 6]	<p style="background-color: #d9e1f2; padding: 2px;">Schraube</p> $\frac{d}{t_p} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{yp}}{f_{ub}}}$ <p style="text-align: right;">gilt für das Fahnenblech</p> $\frac{d}{t_w} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{yw}}{f_{ub}}}$ <p style="text-align: right;">gilt für den Trägersteg</p> <p>Mindestens ein Duktilitätskriterium muss erfüllt sein</p> <p style="background-color: #d9e1f2; padding: 2px;">Doppelkehlnaht</p> $a \geq \frac{\beta_w}{\sqrt{2}} * \frac{f_y}{f_u} * \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} * t_p$ <p>Vereinfacht:</p> <p>S235: $a \geq 0,46 * t_p$</p> <p>S355: $a \geq 0,55 * t_p$</p>

Tabelle 3.2 Rotationskapazität und Duktilität von Anschlüssen mit Fahnenblech (Fortsetzung), nach [4, 5, 6]

	Plastische Lastumverteilung der Schnittgrößen
Duktilität [4, 5, 6]	(1) $\min(V_{Rd1}; V_{Rd7}) > V_{Rd}$
	(2.1) für eine vertikale Schraubenreihe ($n_x = 1$): <ul style="list-style-type: none"> • für den Trägersteg: $F_{b,hor,Rd} \leq \min(F_{v,Rd}; V_{Rd7} * \beta)$ • für das Fahnenblech: $F_{b,hor,Rd} \leq \min(F_{v,Rd}; V_{Rd7} * \beta)$ → eine der zwei Voraussetzungen muss erfüllt sein
	(2.2) für zwei vertikale Schraubenreihen ($n_x = 2$): <ul style="list-style-type: none"> • für den Trägersteg: $\max\left(\frac{1}{F_{v,Rd}^2} * (\alpha^2 + \beta^2); \frac{1}{V_{Rd7}^2}\right) \leq \left(\frac{\alpha}{F_{b,ver,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\beta}{F_{b,hor,Rd}}\right)^2$ • für das Fahnenblech: $\max\left(\frac{1}{F_{v,Rd}^2} * (\alpha^2 + \beta^2); \frac{1}{V_{Rd7}^2}\right) \leq \left(\frac{\alpha}{F_{b,ver,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\beta}{F_{b,hor,Rd}}\right)^2$ • generell: $V_{Rd6} \leq \min\left(\frac{2}{3 * \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} * F_{v,Rd}; \frac{2}{3} * V_{Rd7}\right)$ → eine der drei Voraussetzungen muss erfüllt sein
	(3) $V_{Rd1} > \min(V_{Rd2}; V_{Rd8})$ Die Formeln für V_{Rd1} bis V_{Rd11} sind in [5, 6] enthalten

Die grundlegenden Unklarheiten der vorhandenen Nachweismethoden zur Verdrehbarkeit, die bereits für den Stirnplattenanschluss aufgelistet wurden, sind auf andere Anschlussvarianten übertragbar. Somit sind auch für einen gelenkigen Anschluss mit Fahnenblech *keine Obergrenzen für die geometrischen Werte definiert*. Die maximale Schraubenanzahl wie auch eine Angabe der Randbedingungen für das Höhenverhältnis zwischen dem Fahnenblech und dem angeschlossenen Träger sind weiterhin unklar. Bei einem Fahnenblechanschluss kommt hinzu, dass *keine Angaben über die maximalen Längen von der Spaltbreite g_h und z (Abstand der Schraubenachse zum Stützenflansch) vorliegen*. Daher ist die maximale Länge des Fahnenbleches unklar. Ist diese zu groß, kann ein Stabilitätsversagen des Bleches maßgebend werden, welches in der Nachweismethode nicht berücksichtigt wird.

Tabelle 3.3 Rotationskapazität und Duktilität von Anschlüssen mit Doppelwinkel, nach [4]

Doppelwinkelanschluss	
Rotationskapazität [4]	<ol style="list-style-type: none"> (1) $h_p \leq d_b$ mit $d_b = h_b - 2 * t_f - 2 * r$ (2) $\phi_{vorh} = \infty$, wenn: $z > \sqrt{(z - g_h)^2 + \left(\frac{h_p}{2} + h_e\right)^2}$ ansonsten: $\phi_{vorh} = \arcsin\left(\frac{z}{\sqrt{(z - g_h)^2 + \left(\frac{h_p}{2} + h_e\right)^2}}\right) - \arctan\left(\frac{z - g_h}{\frac{h_p}{2} + h_e}\right)$ (3) ϕ_{erf} nach Tab. 5.1 (4) $\phi_{vorh} > \phi_{erf}$
Duktilität [4]	<p>Schraube</p> $\frac{d}{t_p} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{yp}}{f_{ub}}}$ <p style="text-align: right;">gilt für den Winkelschenkel</p> $\frac{d}{t_w} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{yw}}{f_{ub}}}$ <p style="text-align: right;">gilt für den Trägersteg</p> $\frac{d}{t_{cf}} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{ycf}}{f_{ub}}}$ <p style="text-align: right;">gilt für den Stützenflansch</p> <p>Mindestens ein Duktilitätskriterium muss erfüllt sein</p>

Auch bei einem Doppelwinkelanschluss sind die Grenzen der geometrischen Größen unbekannt. Die Unklarheiten lassen sich von der Anschlussvariante mit Stirnplatte übertragen wie auch von dem Fahnenblechanschluss für die Begrenzung von g_h und z . Zudem wird in keiner Literatur aufgeführt, ob für einen Doppelwinkelanschluss eine plastische Lastumverteilung notwendig ist und eine duktile Versagensart eintreten muss. Zusätzlich wird die Wahl der Winkelprofile nicht eingeschränkt, sodass es unschlüssig ist, ob hier eine Begrenzung der Schenkellängen und -dicken sinnvoll ist.

Tabelle 3.4 Rotationskapazität und Duktilität von Trägerstößen, nach [4]

Trägerstoß	
Rotationskapazität [4]	Stirnplattenstoß (einseitig betrachtet)
	<p>(1) $h_p \leq d_b$ mit $d_b = h_b - 2 * t_f - 2 * r$</p> <p>(2) $\phi_{vorh} = \frac{t_p}{h_e}$</p> <p>(3) ϕ_{erf} nur für Endauflager eines EFT in Tab. 5.1</p>
Rotationskapazität [4]	Laschenstoß (einseitig betrachtet)
	<p>(1) $h_p \leq d_b$ mit $d_b = h_b - 2 * t_f - 2 * r$</p> <p>(2) $\phi_{vorh} = \infty$, wenn: $z > \sqrt{(z - g_h)^2 + \left(\frac{h_p}{2} + h_e\right)^2}$ ansonsten: $\phi_{vorh} = \arcsin\left(\frac{z}{\sqrt{(z - g_h)^2 + \left(\frac{h_p}{2} + h_e\right)^2}}\right) - \arctan\left(\frac{z - g_h}{\frac{h_p}{2} + h_e}\right)$ </p> <p>(3) ϕ_{erf} nur für Endauflager eines EFT in Tab. 5.1</p>
Duktilität [4]	Stirnplattenstoß
	<p>$\frac{d}{t_p} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{yp}}{f_{ub}}}$ gilt für die Stirnplatte</p> <p>Doppelkehlnaht: $a \geq \frac{\beta_w}{\sqrt{2}} * \frac{f_y}{f_u} * \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} * t_w$ Vereinfacht: S235: $a \geq 0,46 * t_w$ S355: $a \geq 0,55 * t_w$ </p>
Duktilität [4]	Laschenstoß
	<p>$\frac{d}{t_p} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{yp}}{f_{ub}}}$ gilt für die Lasche</p> <p>$\frac{d}{t_w} \geq 2,8 \sqrt{\frac{f_{yw}}{f_{ub}}}$ gilt für den Trägersteg</p> <p>Mindestens ein Duktilitätskriterium muss erfüllt sein</p>

Die fehlenden Grenzkriterien für die Nachweisführung der ausreichenden Rotationskapazität und Duktilität können für einen Stirnplattenstoß von einem gelenkigen Träger-Stützen-Anschluss mit Stirnplatte übertragen werden. Für einen Laschenstoß gelten die Unklarheiten, die ebenfalls für einen gelenkigen Fahnenblech- und Doppelwinkelanschluss zutreffen. *Für die beiden Varianten des Trägerstoßes kommt hinzu, dass der größtmögliche Abstand zwischen den beiden Trägerenden nicht eindeutig definiert ist.* Somit ist die Stirnplattendicke t_p , die Länge und der horizontale Schraubenabstand der Laschen nicht begrenzt. *Zudem ist eine Berechnung der erforderlichen Verdrehung ϕ_{erf} innerhalb des Systemfeldes nach Tabelle 5.1 nicht möglich.*

Die vorhandenen Nachweismethoden für die Verdrehbarkeit der gelenkigen Anschlussvarianten sind in der Literatur auf Träger-Stützen-Anschlüsse beschränkt, wobei der Träger an den Stützenflansch angeschlossen wird. Somit wird die Stütze, die für den Nachweis als unverformbar angenommen wird, um die starke y-Achse beansprucht. *Auf eine Träger-Stützen-Verbindung mit Anschluss an den Stützensteg oder eine Träger-Träger-Verbindung wird nicht eingegangen.* Für die Überprüfung der Gelenkeigenschaften der Beispiele (s. Abschnitt 4) wird angenommen, dass die Nachweismethode für einen Anschluss zweier Träger identisch ist, wie für einen Träger-Stützen-Anschluss. [5, 6]

3.1.2 Ermittlung der erforderlichen Verdrehung ϕ_{erf} der gelenkigen Anschlüsse

Der Nachweis der Rotationskapazität gilt als erfüllt, sofern die vorhandene Verdrehung ϕ_{vorh} größer ist als die erforderliche Verdrehung ϕ_{erf} , wie es in den vorherigen Tabellen 3.1 bis 3.4 aufgeführt ist. Die zwei folgenden Abbildungen sollen die Bedeutung der erforderlichen Verdrehung von gelenkigen Anschlüssen kenntlich machen. Dabei handelt es sich um einen Einfeldträger (EFT) mit gelenkiger Auflagerung und um einen Einfeldträger, der beidseitig eingespannt ist. Die Systeme sind in dem Statikprogramm Dlubal RSTAB8 unabhängig von der Auflagerung mit den gleichen Randbedingungen und Lastannahmen eingegeben.

Abbildung 3.1 stellt die Biegelinie eines gelenkigen Einfeldträgers dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Trägerenden an den Auflagern verdrehen. Diese Verdrehung muss von den Anschlüssen aufgenommen werden. Es dürfen keine Komponenten in der Verbindung entstehen, die Biegemomente erzeugen, wie zum Beispiel der Trägerflansch auf Druck.

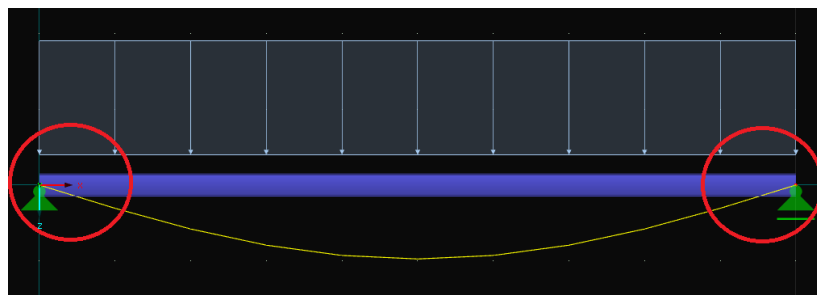


Abbildung 3.1 Biegelinie eines gelenkigen EFT aus RSTAB8

In Abbildung 3.2 ist zu erkennen, dass sich die Biegelinie eines Einfeldträgers mit beidseitiger Einspannung relativ gerade am Auflager verhält und die Verdrehung quasi gleich Null ist. Somit wird keine erforderliche Verdrehung ϕ_{erf} berechnet. Zudem fällt die geringere Durchbiegung in Feldmitte im Vergleich zu dem gelenkigen System auf.

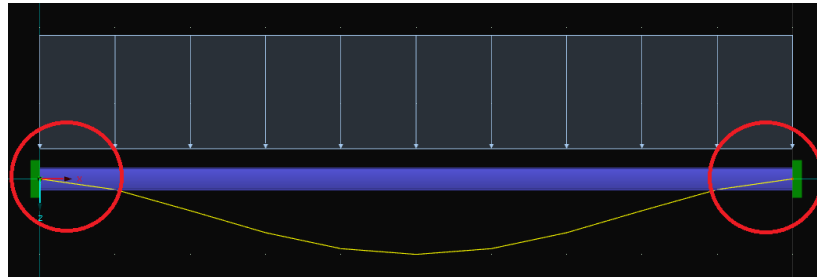


Abbildung 3.2 Biegelinie eines beidseitig eingespannten EFT aus RSTAB8

3.1.3 Beispiele für die Anwendung der vorhandenen Nachweismethoden der Verdrehbarkeit

Die vorhandenen Methoden zum Nachweis der Verdrehbarkeit werden in [3] nicht aufgeführt, jedoch greifen einige Autoren und Literaturen darauf zurück. In Abschnitt 2 sind Beispielaufgaben aufgelistet, bei denen eine vorhandene Verdrehung berechnet wird, sowie die typisierten Anschlüsse nach DIN EN 1993-1-8 [18]. Die Tragfähigkeitstabellen für gelenkige Stirnplatten- und Doppelwinkelanschlüsse aus [18] sind nach den Empfehlungen aus [5, 6] konstruiert.

In dem Statikprogramm RSTAB der Firma Dlubal ist das Zusatzmodul „JOINTS“ integriert, womit sich gelenkige und biegesteife Verbindungen nachweisen lassen. Bei der Berechnung der gelenkigen Anschlüsse wird auf die Konstruktionsempfehlungen des ECCS aus [5, 6] verwiesen. Für Beispiel 2 ist in Anhang 3 ein Auszug des Ausdruckprotokolls von RSTAB JOINTS aufgeführt.

3.2 Klassifizierung von Anschlüssen

In Eurocode 3 Teil 1-8 werden Anschlüsse durch gegebene Voraussetzungen in biegesteife, verformbare und gelenkige Kategorien klassifiziert. Diese Einteilung erfolgt über die Steifigkeit und die Tragfähigkeit der jeweiligen Anschlüsse. Allgemein müssen bei gelenkigen Anschlüssen die auftretenden Schnittgrößen übertragen und die Gelenkverdrehungen ausgeführt werden. Zudem dürfen keine größeren Momente erzeugt werden. In dem Zusatzmodul „JOINTS“ in RSTAB werden zwar die Nachweise der Verdrehbarkeit berücksichtigt, jedoch werden die gelenkigen Anschlüsse nicht als diese klassifiziert. [3]

3.2.1 Klassifizierung nach der Steifigkeit

Für die Klassifizierung eines Anschlusses über seine Steifigkeit wird dieser mit Grenzkriterien in die Zonen starr (Zone 1), verformbar (Zone 2) und gelenkig (Zone 3) eingeordnet. Die Kategorisierung erfolgt durch den Vergleich der Anfangsrotationssteifigkeit $S_{j,ini}$ mit dem Verhältnis zwischen Biegesteifigkeit EI_b und der Spannweite L_b des Trägers. Die Grenzkriterien lauten wie folgt: [3]

- Zone 1: starr, wenn $S_{j,ini} \geq K_b * E * I_b / L_b$ (3.1)

- Zone 2: verformbar, wenn weder Kriterien aus Zone 1 noch aus Zone 2 zutreffen

- Zone 3: gelenkig, wenn $S_{j,ini} \leq 0,5 * E * I_b / L_b$ (3.2)

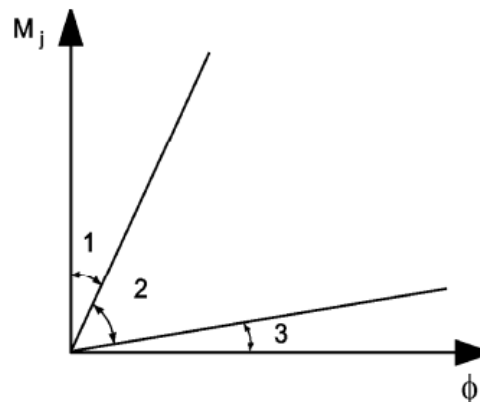


Abbildung 3.3 Einteilung der Zonen nach der Steifigkeit, [3]

Für die Berechnung der Anfangsrotationssteifigkeit $S_{j,ini}$ werden zuvor die einzelnen Steifigkeitskoeffizienten k_i ermittelt. Diese ergeben sich aus den vorkommenden Komponenten des Träger-Stützen-Anschlusses mit geschraubter Stirnplattenverbindung, der im Eurocode 3 Teil 1-8 wie auch in der Literatur von Wagenknecht zur Komponentenmethode [16] als generelles Anwendungsbeispiel vorliegt. Die Anfangsrotationssteifigkeit wird mit folgender Gleichung berechnet: [3]

$$S_{j,ini} = E * z^2 / (\sum_i 1/k_i) \quad (3.3)$$

Die Gleichungen für die Steifigkeitskoeffizienten einer Träger-Stützen-Verbindung mit Stirnblech können Tabelle 3.5 entnommen werden. Aufgrund der Steifigkeit ihrer Komponenten werden die Koeffizienten k_7 und k_8 als unendlich groß angenommen und fließen nicht mit in die Berechnung ein. Für eine Träger-Träger-Verbindung, die bei gelenkigen Anschlüssen vorkommen kann, liegen keine derartigen Berechnungsgrundlagen vor. [3]

Tabelle 3.5 Berechnung der Steifigkeitskoeffizienten für die Komponenten einer Träger-Stützen-Verbindung mit Stirnplatte, nach [3]

Anschlusskomponente	Steifigkeitskoeffizient k_i
Stützenstegfeld mit Schubbeanspruchung	$k_1 = \frac{0,38 * A_{vc}}{\beta * z}$ $k_1 = \infty$ (wenn ausgesteift)
Stützensteg mit Querdruckbeanspruchung	$k_2 = \frac{0,7 * b_{eff,c,wc} * t_{wc}}{d_c}$ $k_2 = \infty$ (wenn ausgesteift)
Stützensteg mit Querkzugbeanspruchung	$k_3 = \frac{0,7 * b_{eff,t,wc} * t_{wc}}{d_c}$ $k_3 = \infty$ (bei ausgesteifter geschweißter Verbindung)
Stützenflansch mit Biegebeanspruchung (für eine Schraubenreihe mit Zug)	$k_4 = \frac{0,9 * l_{eff} * t_{fc}^3}{m^3}$
Stirnblech mit Biegebeanspruchung (für eine Schraubenreihe mit Zug)	$k_5 = \frac{0,9 * l_{eff} * t_p^3}{m^3}$
Träger- oder Stützenflansch und -steg mit Druckbeanspruchung	$k_7 = \infty$
Trägersteg mit Zugbeanspruchung	$k_8 = \infty$
Schrauben mit Zugbeanspruchung	$k_{10} = 1,6 * \frac{A_s}{L_b}$

Für die Anwendbarkeit wird die Berechnung der Anfangsrotationssteifigkeit sowohl in [3] wie auch in [16] auf eine Träger-Stützen-Verbindung mit überstehender Stirnplatte beschränkt (s. Abbildung 3.4). Somit wird die Klassifizierung nach der Steifigkeit auf starre und verformbare Anschlüsse begrenzt. Ein Beispiel für die Berechnung der Rotationssteifigkeit eines gelenkigen Anschlusses liegt nicht vor.

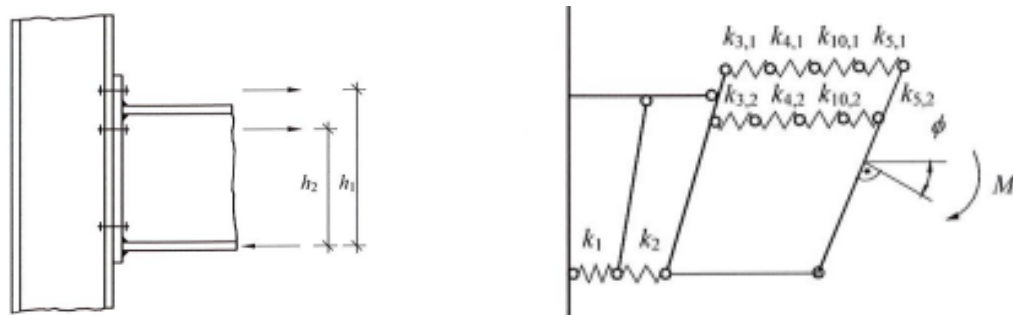


Abbildung 3.4 Träger-Stützen-Anschluss mit überstehender Stirnplatte und frei geschnittenes Federmodell, [16]

3.2.2 Klassifizierung nach der Tragfähigkeit

In einem zweiten Schritt wird ein Anschluss nach seiner Tragfähigkeit als volltragfähig, teiltragfähig oder gelenkig klassifiziert. Die Einordnung erfolgt über den Vergleich der Momententragfähigkeit $M_{j,Rd}$ des Anschlusses mit der Momententragfähigkeit $M_{pl,y,Rd}$ des angeschlossenen Bauteils. Die Voraussetzungen für die Klassifizierung sind wie folgt definiert: [3]

- volltragfähig: a) Stützenkopf
 - entweder: $M_{j,Rd} \geq M_{b,pl,Rd}$ (3.4)
 - oder: $M_{j,Rd} \geq M_{c,pl,Rd}$ (3.5)
- b) zwischen zwei Geschossen
 - entweder: $M_{j,Rd} \geq M_{b,pl,Rd}$ (3.6)
 - oder: $M_{j,Rd} \geq 2 * M_{c,pl,Rd}$ (3.7)
- teiltragfähig: die Voraussetzungen für eine volltragfähige und eine gelenkige Klassifizierung sind nicht erfüllt
- gelenkig: für einen Träger-Stützen-Anschluss
 - entweder: $M_{j,Rd} \leq 0,25 * M_{b,pl,Rd}$ (3.8)
 - oder: $M_{j,Rd} \leq 0,25 * M_{c,pl,Rd}$ (3.9)

Die Berechnung der Momententragfähigkeit $M_{j,Rd}$ lässt sich mit der Komponentenmethode durchführen. Die Anwendung in der Literatur wird, wie auch bei der Ermittlung der Steifigkeit, auf einen Anschluss mit überstehender Stirnplatte beschränkt. *Somit wird die Klassifizierung eines Anschlusses auch nach der Tragfähigkeit auf voll- und teiltragfähige Verbindungen eingeschränkt.* [3, 16]

4 Überprüfung der Gelenkeigenschaften der Beispielaufgaben nach der ECCS

Im Folgenden werden die in Abschnitt 3 vorhandenen Nachweisbedingungen für eine ausreichende Verdrehbarkeit auf die zusammengefassten Beispiele aus Abschnitt 2 angewandt. Dabei wird überprüft, ob die Anschlüsse in den gesammelten Beispielaufgaben die erforderlichen Gelenkeigenschaften aufweisen. Die gelenkigen Voraussetzungen werden nach der Stahlbaufibel [4] und den konstruktiven Empfehlungen der ECCS aus [5, 6] kontrolliert, wie in den Tabellen 3.1 bis 3.4 aufgeführt. Ausreichende Gelenkeigenschaften können nach den Anschlussklassifizierungen aus [3] nicht bestätigt werden, da diese auf starre und verformbare Anschlüsse beschränkt sind. Die Sonderbeispiele werden hier nicht berücksichtigt.

Zunächst werden die Nachweise der Rotationskapazität und Duktilität für die jeweiligen Anschlussdetails geführt. Die Tabellen 4.1 bis 4.4 geben einen Überblick, welche einzelnen Voraussetzungen erfüllt werden und bei welchen Anschlüssen die Nachweise nicht aufgehen. Zudem werden die Ergebnisse mit einer RSTAB-Eingabe im Zusatzmodul „JOINTS“ verglichen.

4.1 Angaben des statischen Systems

Für den vollständigen Nachweis der Rotationskapazität wird ein statisches System zur Berechnung von ϕ_{erf} benötigt, welches für die vorliegenden 12 Beispielaufgaben nur bei 2 Beispielen vorliegt. Daher wird im Folgenden beschrieben, wie die fehlenden statischen Systeme und Belastungen gewählt werden. Für die unvollständigen Beispielaufgaben wird die erforderliche Verdrehung ϕ_{erf} jeweils an zwei Ersatzsystemen berechnet. Dabei handelt es sich um die folgenden zwei statischen Systeme:

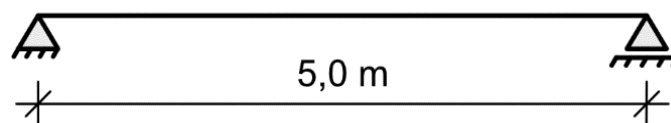


Abbildung 4.1 Gelenkiger EFT mit $L_b = 5,0$ m

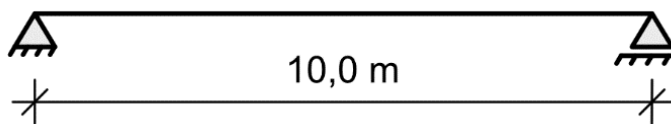


Abbildung 4.2 Gelenkiger EFT mit $L_b = 10,0$ m

In den Beispielaufgaben wird zudem ausschließlich die Querkraft $V_{z,Ed}$ angegeben, da diese für den Tragfähigkeitsnachweis ausreicht. In die Ermittlung der erforderlichen Rotationskapazität geht die Belastung mit ein, sodass diese rückwirkend über die Querkraft und Systemlänge berechnet werden muss. Dabei wird angenommen, dass die Querkraft $V_{z,Ed}$ durch eine *ständige Streckenlast* entsteht. Somit ergibt sich für die anzusetzende Streckenlast p die Gleichung (4.2), die aus der Gleichung (4.1) hergeleitet wird.

$$V_{z,Ed} = 1,35 * p * L_b / 2 \quad (4.1)$$

$$p = 2 * (V_{z,Ed} / 1,35) / L_b \quad (4.2)$$

In [5, 6] werden Formeln für die erforderliche Verdrehung ϕ_{erf} für verschiedene Belastungsbilder eines Einfeldträgers angegeben (s. Tabelle 5.1). Die folgende Gleichung wird für einen gelenkigen Einfeldträger mit konstanter Streckenlast verwendet.

$$\phi_{erf} = \pm (\gamma * p * L_b^3) / (24 * E * I_b) \quad (4.3)$$

Die erforderliche Verdrehung für einen Trägerstoß kann nicht berechnet werden, da sich dieser im Systemfeld befindet und nicht an einer Auflagerung. Für diesen Fall liegen keine Gleichungen vor.

4.2 Ergebnisse für die Anwendung der Nachweismethoden nach der ECCS

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der handschriftlichen Nachweisführungen der Rotationskapazität und Duktilität nach der ECCS dargestellt. Die Handrechnungen der gesammelten Beispiele sind in den Anlagen 1 bis 11 aufgeführt. Zur Übersichtlichkeit werden die Ergebnisse nach den jeweiligen Anschlussvarianten zusammengestellt. Die Anschlüsse weisen ausreichende Gelenkeigenschaften auf, sofern alle Voraussetzungen erfüllt sind. Die Knaggenanschlüsse (Bsp. 9 und 10) können nicht als gelenkig bestätigt werden, da keine Nachweismethoden vorliegen, sodass die Ergebnistabellen entfallen.

Die aufgeführten Ergebnisse werden jeweils mit den RSTAB-Eingaben der Anschlusskonstruktionen im Zusatzmodul „JOINTS“ verglichen. In dem Modul werden die Nachweise für ausreichende Rotationskapazität, Schweißnahtdicke und Duktilität der Schrauben geführt. Dazu werden die entsprechenden Gleichungswerte angegeben, jedoch keine weitere Berechnung. Die Ergebnisse für die vorhandene Verdrehung ϕ_{vorh} und die erforderliche Schweißnahtdicke $a_{w,min}$ werden aufgeführt und die einzelnen Nachweise werden mit „OK“ und „Nicht OK“ ausgewertet. Trägerstöße können mit dem Programm nicht eingegeben werden. Zudem ist die „JOINTS“-Eingabe von Anschlüssen mit Auflagerknagge auf die Lagesicherung mit Stirnplatte begrenzt, wobei diese einen Kontakt mit dem oberen Flansch des Trägers haben muss. Somit können die Beispiele 9 und 10 nicht in RSTAB verglichen werden, da in den Beispielen entweder die Stirnplatte keinen Kontakt mit dem oberen Trägerflansch hat oder die Lagesicherung durch ein Fahnenblech konstruiert wird.

Tabelle 4.1 Ergebnisse der Nachweise für die Beispielaufgaben mit Stirnplatte

Beispiel	Rotationskapazität		Duktilität	
			Schraube	Naht
1	$L_b = 5,0$ m	☑	☑	☑
	$L_b = 10,0$ m	☑		
2	$L_b = 5,0$ m	☑	☑	☑
	$L_b = 10,0$ m	☑		
3	$L_b = 5,0$ m	☑	☒	☒
	$L_b = 10,0$ m	☑		
Legende		☑: Nachweis erbracht	☒: Nachweis nicht erbracht	

Die Beispiele 1 und 2 weisen nach den Nachweismethoden der ECCS ausreichende Gelenkeigenschaften auf. Die Ergebnisse der „JOINTS“-Eingabe stimmen mit den Handrechnungen überein und sind für das zweite Beispiel in Anhang 3 anhand von einem Auszug des Ausdruckprotokolls aufgeführt. Obwohl es sich bei dem dritten Beispiel um einen typisierten Stirnplattenanschluss handelt, sind die Duktilitätskriterien nicht erfüllt.

Tabelle 4.2 Ergebnisse der Nachweise für die Beispielaufgaben mit Fahnenblech

Beispiel	Rotationskapazität		Duktilität		
			Schraube	Naht	Plastische Lastumverteilung
4	☑		☑	☒	☑
5	☑		☑	☑	☒
6	$L_b = 5,0$ m	☑	☑	☒	☑
	$L_b = 10,0$ m	☑			
Legende		☑: Nachweis erbracht	☒: Nachweis nicht erbracht		

In den Beispielen 4 und 6 ist die Dicke der Schweißnaht zu gering dimensioniert, so dass der Nachweis als nicht erbracht gilt. Für das Beispiel 5 geht der Nachweis der plastischen Lastumverteilung nicht auf, da die Festigkeitsklasse der Schraube zu klein gewählt ist. Die vorhandenen Ergebnisse entsprechen der „JOINTS“-Ausgabe, jedoch wird für das vierte Beispiel keine Berechnung ausgeführt, da die Schraubenabstände zu groß sind. Die Nachweise der Schraubenduktilität und der plastischen Lastumverteilung sind nicht Bestandteil der Berechnung von Fahnenblechanschlüssen in „JOINTS“.

Tabelle 4.3 Ergebnisse der Nachweise für die Beispielaufgaben mit Doppelwinkel

Beispiel	Rotationskapazität		Duktilität	
			Schraube	
7	$L_b = 5,0 \text{ m}$	☑	☑	
	$L_b = 10,0 \text{ m}$	☑		
8	$L_b = 5,0 \text{ m}$	☑	☑	
	$L_b = 10,0 \text{ m}$	☒		
Legende		☑: Nachweis erbracht	☒: Nachweis nicht erbracht	

In Beispiel 8 ist bei einer Systemlänge von $L_b = 10,0 \text{ m}$ die erforderliche Verdrehung ϕ_{erf} größer als die vorhandene Verdrehung ϕ_{vorh} , sodass der Nachweis der Rotationskapazität nicht erfüllt ist. Die erforderliche Schraubenduktilität in diesem Beispiel ist in „JOINTS“ nicht erreicht, da nur die maximale Blechdicke betrachtet wird und nicht alle Dicken der Anschlusskomponenten.

Tabelle 4.4 Ergebnisse der Nachweise für die Beispielaufgaben mit Trägerstoß

Beispiel	Rotationskapazität	Duktilität	
		Schraube	Naht
11	entfällt	☑	entfällt
12	entfällt	☒	☒
Legende		☑: Nachweis erbracht	☒: Nachweis nicht erbracht

Der Nachweis der Rotationskapazität für die Trägerstöße entfällt, da die erforderliche Verdrehung ϕ_{erf} für Knoten innerhalb eines statischen Systemfeldes nicht definiert ist. Die vorhandene Verdrehung ϕ_{vorh} kann unabhängig berechnet werden. Da es sich bei Beispiel 11 um einen Laschenstoß handelt, entfällt dort der Nachweis der Schweißnaht. Die Schrauben und die Schweißnahtdicke sind in Beispiel 12 zu gering dimensioniert, sodass die entsprechenden Nachweise nicht erbracht werden.

5 Herleitung der Nachweismethoden der ECCS

Im folgenden Abschnitt werden die Prinzipien und Mechanismen der vorhandenen Nachweismethoden der ECCS hergeleitet. Es wird zwischen dem Nachweis der ausreichenden Rotationskapazität und der ausreichenden Anschlussduktilität unterschieden. Zudem wird auf die Grundlagen der Nachweise des quasigelenkigen Stirnplattenanschlusses, der in Sonderbeispiel 1 aufgeführt wird, eingegangen. [5, 6]

5.1 Nachweis der ausreichenden Rotationskapazität

Der Nachweis einer ausreichenden Rotationskapazität basiert auf dem grundlegenden Prinzip, einen Kontakt zwischen dem unteren Trägerflansch und dem lastannehmenden Bauteil zu vermeiden. Der beschriebene Kontakt wirkt als Druckpunkt, sodass eine Momententragfähigkeit des Anschlusses entsteht. Um dies zu verhindern, müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt werden, wobei die vorhandene Verdrehbarkeit der Verbindung der erforderlichen Verdrehbarkeit gegenübergestellt wird. Die Bedingungen unterscheiden sich durch die verschiedenen Anschlussvarianten. [5, 6]

5.1.1 Allgemeine Voraussetzung für Anschlussvarianten

Im Allgemeinen gilt für gelenkige Anschlusskonstruktionen den Kontakt zwischen dem unteren Trägerflansch und dem lastannehmenden Bauteil zu vermeiden, da andernfalls eine große Druckfläche entsteht und somit die Beanspruchung der Verbindung durch ein Biegemoment stark ansteigt (s. Abbildung 5.1). Demnach sollen die möglichen Verbindungsmittel - Stirnplatte, Fahnenblech, Doppelwinkel und Laschen - weder an dem Trägerflansch noch an dem Trägerradius anliegen, da so der oben beschriebene Kontakt entstehen würde. Daraus ergibt sich folgende Voraussetzung: [5, 6]

$$h_p \leq d_b \text{ mit } d_b = h_b - 2 * t_f - 2 * r \quad (5.1)$$

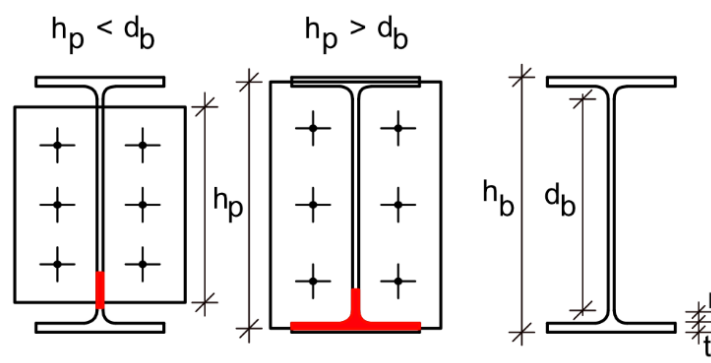


Abbildung 5.1 Geschätzte Druckfläche am unteren Teil eines Trägers mit Stirnplattenanschluss

Sofern Gleichung (5.1) nicht eingehalten wird, bilden sich an der Kontaktfläche Druckkräfte, die durch Zug- oder Abscherkräfte in den Schrauben ausgeglichen werden, woraus ein bemessungsrelevantes Biegemoment entsteht (s. Abbildung 5.2). Auch bei erfüllter Voraussetzung bildet sich eine Druckfläche, die jedoch aus dem Kontakt zwi-

schen reinem Steg und Stirnplatte entsteht und somit vergleichsweise gering bleibt. [5, 6]

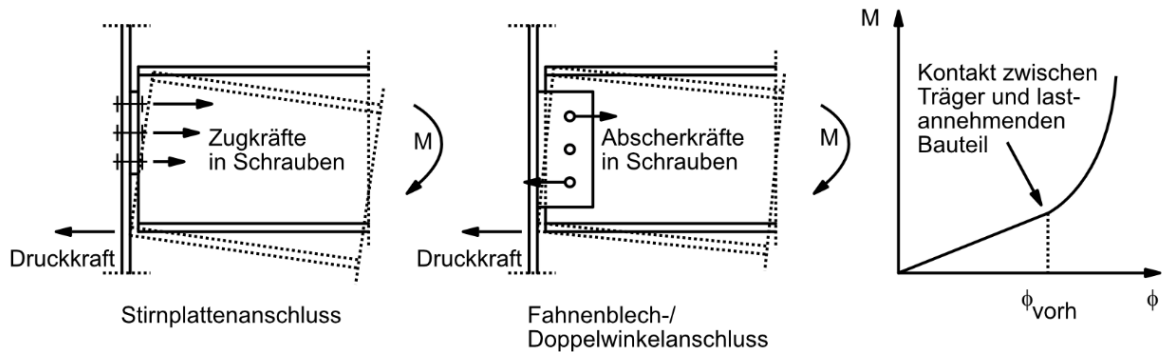


Abbildung 5.2 Auswirkungen von einem Kontakt zwischen Trägerflansch und lastannehmen Bauteil, nach [5, 6]

5.1.2 Rotationskapazität von Stirnplattenanschlüssen

Für die Berechnung der vorhandenen Rotationskapazität eines Stirnplattenanschlusses werden die zwei nachfolgenden Annahmen getroffen, sodass die Formeln der Nachweismethode angewendet werden können: [5, 6]

- Das lastannehmen Bauteil (Stütze oder Träger) bleibt unverformt
- Der Drehpunkt liegt an der Unterkante der Stirnplatte

Mit diesen beiden Annahmen lässt sich folgende Gleichung aufstellen: [5, 6]

$$\phi_{vorh} = t_p/h_e \quad (5.2)$$

Die Gleichung für ϕ_{vorh} ergibt sich aus dem trigonometrischen Verhältnis der Stirnplattendicke t_p und dem Abstand h_e zwischen den Unterkanten der Stirnplatte und dem Trägerflansch. Der Winkel stellt sich ein, sobald ein Kontakt zwischen dem unteren Trägerflansch und dem lastannehmen Bauteil entsteht. Somit ist ϕ_{vorh} der maximale Winkel, der auftreten darf, bevor ein Druckpunkt am Träger entsteht und eine Momententragfähigkeit erzeugt wird. Abbildung 5.3 stellt die geometrischen Kenngrößen der Verbindung dar sowie den Drehpunkt des Trägers und den Kontakt zwischen Trägerflansch und lastannehmen Bauteil. [5, 6]

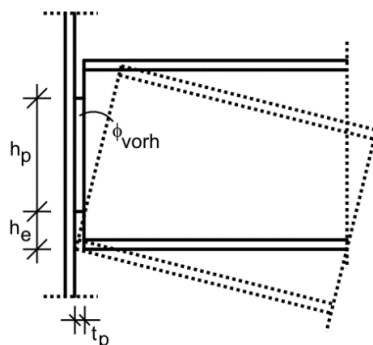


Abbildung 5.3 Verdrehter Träger mit Stirnplattenanschluss, nach [5, 6]

Die vorhandene Rotationskapazität ϕ_{vorh} nach Gleichung (5.2) muss größer sein als die erforderliche Rotationskapazität ϕ_{erf} (s. Tabelle 5.1). Die Anforderungen an die Rotationskapazität eines gelenkigen Anschlusses mit Stirnplatte werden mit der folgenden Formel abgeschlossen: [5, 6]

$$\phi_{vorh} > \phi_{erf} \quad (5.3)$$

Aufgrund der Anschlusskomponenten kann die Nachweismethode der Rotationskapazität zudem auf Trägerstöße mit Stirnplatte angewendet werden. [4]

5.1.3 Rotationskapazität von Fahnenblech- und Doppelwinkelanschlüssen

Die Berechnung der Rotationskapazität von Anschlüssen mit Fahnenblech oder Doppelwinkel basiert auf den gleichen Prinzipien, auf denen der Stirnplattenanschluss beruht. Ein Kontakt zwischen unterem Trägerflansch und lastannehmenden Bauteil soll vermieden werden, sodass durch den Druckpunkt keine Momententragfähigkeit entsteht. Aufgrund der Anordnung des Schraubenbildes ändert sich jedoch der Mechanismus zur Bestimmung der vorhandenen Verdrehung, da diese von anderen Geometriewerten abgeleitet wird. [4, 5, 6]

Für die Berechnung der vorhandenen Rotationskapazität eines Fahnenblech- und Doppelwinkelanschlusses werden die zwei nachfolgenden Annahmen getroffen, sodass die Formeln der Nachweismethode angewendet werden können: [4, 5, 6]

- Das lastannehmende Bauteil und das Fahnenblech bzw. der Doppelwinkel bleiben unverformt
- Der Drehpunkt liegt im Schwerpunkt des Schraubenbildes

Die beiden Annahmen sind in Abbildung 5.4 dargestellt sowie die geometrischen Größen, die für die Gleichungen (5.5) und (5.6) von Bedeutung sind.

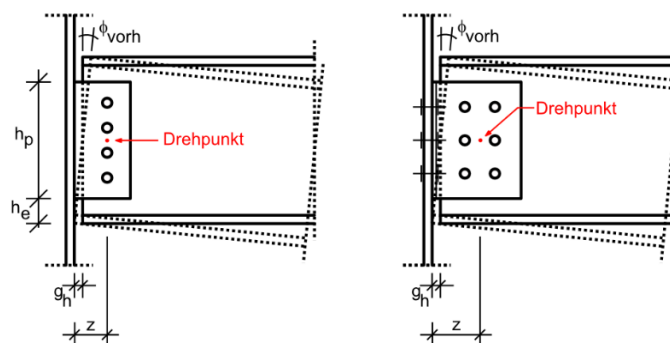


Abbildung 5.4 Verdrehter Träger mit Fahnenblech- oder Doppelwinkelanschluss, nach [4, 5, 6]

Auf dieser Grundlage kann eine weitere Annahme getroffen werden: [4, 5, 6]

$$\phi_{vorh} = \omega \quad (5.4)$$

wenn zugleich gilt:

$$z > \sqrt{(z - g_h)^2 + \left(\frac{h_p}{2} + h_e\right)^2} \quad (5.5)$$

In diesem Fall gilt das Kriterium als erfüllt und die vorhandene Rotationskapazität ϕ_{vorh} muss nicht mit der erforderlichen Rotationskapazität ϕ_{erf} gegenübergestellt werden. Ansonsten wird die vorhandene Rotationskapazität wie folgt für einen Fahnenblech- und Doppelwinkelanschluss berechnet: [4, 5, 6]

$$\phi_{vorh} = \arcsin\left(\frac{z}{\sqrt{(z - g_h)^2 + \left(\frac{h_p}{2} + h_e\right)^2}}\right) - \arctan\left(\frac{z - g_h}{\frac{h_p}{2} + h_e}\right) \quad (5.6)$$

Gleichung (5.6) basiert ebenfalls auf trigonometrischen Verhältnissen. Die vorhandene Rotationskapazität ϕ_{vorh} nach dieser Gleichung muss größer sein als die erforderliche Rotationskapazität ϕ_{erf} . Die Anforderungen an die Rotationskapazität eines gelenkigen Anschlusses mit Fahnenblech oder Doppelwinkel werden mit der folgenden Formel abgeschlossen: [4, 5, 6]

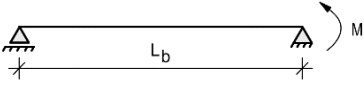
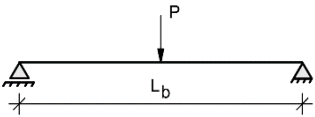
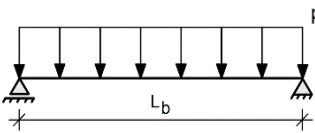
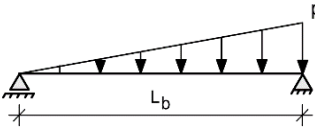
$$\phi_{vorh} > \phi_{erf} \quad (5.7)$$

Aufgrund der Anschlusskomponenten kann die Nachweismethode der Rotationskapazität zudem auf Trägerstöße mit Laschen angewendet werden. [4]

5.1.4 Herleitung der erforderlichen Verdrehung ϕ_{erf}

In die Berechnung der erforderlichen Verdrehung ϕ_{erf} fließen die Länge des statischen Systems, die Belastung und die Biegesteifigkeit EI_b des Trägers mit ein. Die Berechnung der erforderlichen Verdrehung ϕ_{erf} wird mithilfe der Gleichungen für die Verdrehwinkel φ_i und φ_k der Trägerenden eines gelenkigen Einfeldträgers aus dem Kapitel Baustatik in den Schneider Bautabellen [1] hergeleitet. Die Anwendung der Formeln ist unabhängig von der Konstruktionsvariante des Anschlusses. In Tabelle 5.1 sind Gleichungen für die in der Praxis am häufigsten vorkommenden Belastungsarten angegeben. Aus [1] lassen sich weitere erforderliche Verdrehungen für unübliche Belastungen ableiten.

Tabelle 5.1 ϕ_{erf} für die häufigsten Belastungsbilder eines EFT, nach [5, 6]

Belastungsbild	M_{max}	ϕ_{erf}
	M	$\phi_{li} = \frac{\gamma * M * L_b}{6 * E * I_b}$ $\phi_{re} = -\frac{\gamma * M * L_b}{3 * E * I_b}$
	$\frac{P * L_b}{4}$	$\pm \frac{\gamma * P * L_b^2}{16 * E * I_b}$
	$\frac{p * L_b^2}{8}$	$\pm \frac{\gamma * p * L_b^3}{24 * E * I_b}$
	$\frac{2 * P * L_b}{9 * \sqrt{3}}$ mit: $P = p * \frac{L_b}{2}$	$\phi_{li} = \frac{7 * \gamma * P * L_b^2}{180 * E * I_b}$ $\phi_{re} = -\frac{8 * \gamma * P * L_b^2}{180 * E * I_b}$

In Abbildung 5.5 sind die Verdrehwinkel ϕ_i und ϕ_k der Endauflager des Einfeldträgers gekennzeichnet, die mit den Gleichungen aus Tabelle 5.1 für ausgewählte Belastungen berechnet werden können.



Abbildung 5.5 Verdrehwinkel der Endauflager eines EFT, nach [1]

5.2 Nachweis der ausreichenden Duktilität

Der Nachweis einer ausreichenden Duktilität basiert auf dem grundlegenden Prinzip, eine spröde Versagensart auszuschließen. Dazu werden die Schrauben und Schweißnähte untersucht. Für einen Fahnenblechanschluss muss die plastische Lastumverteilung der Schnittgrößen überprüft werden, sodass eine duktile Versagensart eintritt (s. 5.2.3). [5, 6]

5.2.1 Tragfähigkeit der Schrauben

Mit dem Duktilitätskriterium für die Schrauben einer gelenkigen Verbindung werden diese so dimensioniert, dass ein vorzeitiges Schraubenversagen vermieden wird. Demnach sollen die angeschlossenen Verbindungskomponenten verformt werden, bevor die maximale Tragfähigkeit der Schrauben erreicht ist und diese infolge von Abscherkräften spröde versagen. Die Stahlbaufibel [4] bestätigt, dass die Kriterien auf sämtliche Verbindungskomponenten der gelenkigen Anschlüsse mit Stirnplatte, Fahnenblech und Winkel sowie der Trägerstöße anwendbar sind. Die folgenden Formeln sind der Gleichung (6.32) aus [3] gleichgestellt, jedoch hier anders aufgelöst. [4, 5, 6]

- für die Stirnplatte, Fahnenblech oder Winkelschenkel:

$$d/t_p \geq 2,8 * \sqrt{f_{yp}/f_{ub}} \quad (5.8)$$

- für den Trägersteg (für Fahnenblech- und Doppelwinkelanschluss):

$$d/t_w \geq 2,8 * \sqrt{f_{yw}/f_{ub}} \quad (5.9)$$

- für den Flansch der lastannehmenden Stütze:

$$d/t_{cf} \geq 2,8 * \sqrt{f_{ycf}/f_{ub}} \quad (5.10)$$

- für den Steg des lastannehmenden Bauteils (Stütze oder Träger):

$$d/t_w \geq 2,8 * \sqrt{f_{yw}/f_{ub}} \quad (5.11)$$

Um eine ausreichende Duktilität des Anschlusses zu gewährleisten, muss mindestens eine der Voraussetzungen erfüllt sein. Gleichung (5.9) gilt für Anschlüsse mit Fahnenblech oder Doppelwinkel, da diese mit einer Schraubverbindung an den lastabgebenden Träger anschließen. Bei den Gleichungen (5.10) und (5.11) wird unterschieden, ob der lastabgebende Träger an den Flansch oder Steg des lastannehmenden Bauteils angeschlossen wird. Bei einem Stirnplattenanschluss ergibt sich durch das Duktilitätskriterium eine Abminderung der Grenzzugkraft $F_{t,Rd}$ der Schrauben um 50%, während die Grenzabscherkraft $F_{v,Rd}$ auf 80% reduziert wird. [5, 6]

5.2.2 Tragfähigkeit der Schweißnähte

Durch das zweite Kriterium für den Nachweis der ausreichenden Duktilität werden die Schweißnähte dimensioniert, sodass ein vorzeitiges sprödes Versagen ausgeschlossen wird. Dazu müssen die Kehlnähte mit voller Tragfähigkeit konstruiert werden, damit diese tragfähiger sind als die schwächste Verbindungskomponente in einem Anschluss. Somit treten Verformungen in den Komponenten auf anstatt in den Schweißnähten, die ein sehr geringes Verformungsvermögen besitzen und bei zu geringer Di-

mensionierung spröde versagen würden. Der Nachweis wird den Anschlussvarianten mit Stirnplatte und Fahnenblech zugeordnet, da hier die Bleche mit einer Kehlnaht angeschweißt werden. Die folgende Voraussetzung für die Schweißnahtdicke ergibt sich aus dem richtungsbezogenen Verfahren: [3, 5, 6]

$$a \geq \beta_w / \sqrt{2} * f_y / f_u * \gamma_{M2} / \gamma_{M0} * t \quad (5.12)$$

Eine genaue Herleitung von Gleichung (5.12) ist in Kapitel 4 in [5] aufgeführt. Vereinfacht können die minimalen Schweißnahtdicken für die Stahlgüten S235, S275 und S355 durch Einsetzen der gegebenen Parameter berechnet werden. Die vereinfachte Berechnung ist ausschließlich von der Blechdicke der anzuschließenden Komponente abhängig. [5, 6]

Tabelle 5.2 Vereinfachte Berechnung der volltragfähigen Schweißnahtdicken, nach [5, 6]

Stahlgüte	f_y	f_u	β_w	Volltragfähigkeit Doppelkehlnaht
	N/mm^2	N/mm^2		
S235	235	360	0,80	$a \geq 0,46 * t$
S275	275	430	0,85	$a \geq 0,48 * t$
S355	355	510	0,90	$a \geq 0,55 * t$

5.2.3 Plastische Lastumverteilung bei Fahnenblechanschlüssen

Das Grundprinzip der plastischen Lastumverteilung der Schnittgrößen ist, dass die spröden Versagensarten von dem Querkraftwiderstand V_{Rd} ausgeschlossen werden. Dazu müssen die Bedingungen (1) bis (3) erfüllt sein. [5, 6]

- (1) Der Querkraftwiderstand V_{Rd} des Fahnenblechanschlusses muss ein duktiler Versagensmodus sein, sodass Abscheren der Schrauben V_{Rd1} und Knicken des Fahnenbleches V_{Rd7} nicht als gesamter Widerstand eintreten, da diese als nicht-duktil gelten. Somit kann die Voraussetzung (1) wie folgt aufgestellt werden: [5, 6]

$$\min(V_{Rd1}; V_{Rd7}) > V_{Rd} \quad (5.13)$$

- (2) Die zweite Voraussetzung ist ein duktiler Verhalten der Anschlusskomponente, die sich bei einfachem Lastzustand streckt. Demnach müssen nach [5, 6] die folgenden Voraussetzungen zutreffen.

Für eine vertikale Schraubenreihe ($n_x = 1$) muss eine der zwei Bedingungen erfüllt sein:

- für den Trägersteg:

$$F_{b,hor,Rd} \leq \min(F_{v,Rd}; V_{Rd7} * \beta) \quad (5.14)$$

- für das Fahnenblech:

$$F_{b,hor,Rd} \leq \min(F_{v,Rd}; V_{Rd7} * \beta) \quad (5.15)$$

Für zwei vertikale Schraubenreihen ($n_x = 2$) muss eine der drei Bedingungen erfüllt sein:

- für den Trägersteg:

$$\max\left(\frac{1}{F_{v,Rd}^2} * (\alpha^2 + \beta^2); \frac{1}{V_{Rd7}^2}\right) \leq \left(\frac{\alpha}{F_{b,ver,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\beta}{F_{b,hor,Rd}}\right)^2 \quad (5.16)$$

- für das Fahnenblech:

$$\max\left(\frac{1}{F_{v,Rd}^2} * (\alpha^2 + \beta^2); \frac{1}{V_{Rd7}^2}\right) \leq \left(\frac{\alpha}{F_{b,ver,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\beta}{F_{b,hor,Rd}}\right)^2 \quad (5.17)$$

- generell:

$$V_{Rd6} \leq \min\left(\frac{2}{3 * \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} * F_{v,Rd}; \frac{2}{3} * V_{Rd7}\right) \quad (5.18)$$

- (3) Sofern $V_{Rd} = \min(V_{Rd3}; V_{Rd4}; V_{Rd5}; V_{Rd6}; V_{Rd9}; V_{Rd10}; V_{Rd11})$ vorliegt, muss die folgende Voraussetzung für den gesamten Duktilitätsnachweis eingehalten werden: [5, 6]

$$V_{Rd1} > \min(V_{Rd2}; V_{Rd8}) \quad (5.19)$$

Die Nummerierungen und Bezeichnungen der Widerstände und Werte werden für das Verständnis und einen nachvollziehbaren Vergleich aus [5, 6] übernommen. Die Formeln für die einzelnen Widerstände sind in 6.3.3 aus [6] aufgeführt.

5.3 Nachweis des quasigelenkigen Stirnplattenanschlusses mit Kontakt am unteren Trägerflansch

In der Ausgabe von März 2019 der Fachzeitschrift „Konstruktiver Ingenieurbau“ hat Prof. Dr.-Ing. Gerd Wagenknecht einen Artikel über die Berechnung eines quasigelenkigen Anschlusses mit Kontakt am unteren Trägerflansch veröffentlicht. Die Empfehlungen für die Konstruktion von gelenkigen Stirnplattenanschlüssen aus [5, 6] sehen diesen Kontakt, der zu einem Druckbereich am Trägerflansch führt, nicht vor, da der Nachweis für einen verformbaren Anschluss zu führen wäre. Die Stirnplatten in den Beispielen 1 bis 3 sind nicht an den unteren Trägerflansch angeschweißt. [17]

In dem Artikel wird ein vereinfachtes Bemessungsverfahren für teiltragfähige Stahlknoten nach L. Rölle vorgestellt, welches auf der Fließgelenktheorie basiert. Nach dieser Theorie entsteht ein Fließgelenk in dem Anschluss mit dünnen Stirnplatten und ein Versagen des Trägers tritt erst auf, wenn dieser selbst durchplastiziert ist und ein weiteres Fließgelenk bildet. Das Sonderbeispiel zeigt, dass ein normalerweise als verformbar klassifizierter Stirnplattenanschluss mit dem vereinfachten Bemessungsverfahren als quasigelenkiger Anschluss nachgewiesen werden kann. In dem Beispiel wird das Duktilitätskriterium aus [5, 6] mit der Komponentenmethode aus [3] verknüpft. [17]

Eine ausreichende Rotationskapazität des Anschlusses ist gegeben bei Versagen durch plastische Biegeverformung der Stirnplatte. Diese Versagensart stellt sich bei Modus 1 nach [3] ein und führt zu einem Fließgelenk in der Verbindung. In dem Artikel sind Werte für die Wanddicke t_p , den Schraubendurchmesser d , die Schraubengüte und den Werkstoff angegeben, um den Modus 1 zu erreichen. Zudem muss die Lage der Schrauben beachtet werden, da diese in die Berechnung der Momententragfähigkeit einfließen. Nach [3] ist eine Voraussetzung, den Modus 1 zu erreichen, die folgende Gleichung: [17]

$$d/t_p \geq 2,8 * \sqrt{f_{yp}/f_{ub}} \quad (5.20)$$

Sofern es sich bei der geschraubten Verbindung mit Stirnplatte um einen Träger-Stützen-Anschluss handelt, muss zusätzlich das anschließende Verhältnis der Bauteildicken eingehalten werden, sodass bei der Berechnung die Komponenten der Stütze nicht maßgebend sind: [17]

$$t_p/t_{fc} \leq 0,9 \quad (5.21)$$

Die Momententragfähigkeit kann für den Anschluss mit der Komponentenmethode ermittelt werden, da der untere Trägerflansch einen Kontakt mit der Stirnplatte aufweist und somit die Eigenschaften eines verformbaren bzw. biegesteifen Anschlusses besitzt. Da die Momententragfähigkeit $M_{j,Rd}$ kleiner als 25% von $M_{ply,Rd}$ des Trägers ist, wird der Anschluss als gelenkig klassifiziert. [17]

6 Entwicklung von vereinfachten Nachweismethoden der Verdrehbarkeit

Im folgenden Kapitel werden vereinfachte Methoden vorgestellt, um die ausreichende Verdrehbarkeit und Gelenkeigenschaft eines Anschlusses nachzuweisen. Aufgrund der Unklarheiten, die sich aus den vorhandenen Nachweismethoden ergeben, werden diese für die neue Entwicklung von Nachweisen teilweise übernommen und an die Anschlusskomponenten angepasst.

6.1 Stirnplattenanschluss

Der Nachweis der Verdrehbarkeit eines Stirnplattenanschlusses wird intensiver betrachtet, da in Eurocode 3 Teil 1-8 [3] die Komponentenmethode auf einen Anschluss mit überstehender Stirnplatte angewendet wird. Folgend werden einzelne Komponenten abgewandelt, um diese auf einen „gelenkigen“ Stirnplattenanschluss beziehen zu können. Zudem wird eine sinnvolle Anwendung der vorhandenen Duktilitätskriterien beurteilt.

6.1.1 Duktilitätskriterien nach der ECCS

Die Kriterien für eine ausreichende Tragfähigkeit der Schrauben und der Schweißnähte eines Stirnplattenanschlusses werden aus [5, 6] übernommen. Diese dienen als Vor-dimensionierung der beiden Anschlusskomponenten und vermeiden zugleich ein sprödes Versagen der Verbindungsmittel. Somit müssen die Gleichungen (6.1) und (6.2) beachtet werden:

$$d/t_p \geq 2,8 * \sqrt{f_{yp}/f_{ub}} \quad (6.1)$$

$$a \geq \beta_w/\sqrt{2} * f_y/f_u * \gamma_{M2}/\gamma_{M0} * t_w \quad (6.2)$$

In Kapitel 9 aus dem Stahlbau Kalender 2018 [11] werden Kriterien für die duktile Ausbildung von Stahlanschlüssen aufgelistet. Unter anderem ist das Verhältnis zwischen den Stahlgüten des Baustahls und der Schrauben ausschlaggebend.

Der Nachweis der ausreichenden Rotationskapazität nach der ECCS wird in der neuen Nachweisentwicklung nicht berücksichtigt, da die lastannehmende Stütze als unverformbar angenommen wird und der Nachweis einen Druckpunkt am unteren Trägerflansch vermeiden soll. Die Stütztragfähigkeit wie auch die Bildung eines Druckpunktes fließen in die neue Nachweisentwicklung mit ein, die auf der Komponentenmethode aus [3] basiert.

6.1.2 Tragfähigkeit nach der Komponentenmethode

Überstehende Stirnplattenanschlüsse können nach [3] über die Tragfähigkeit klassifiziert werden. Da für „gelenkig“ ausgebildete Anschlüsse mit Stirnplatte keine konkrete Berechnung der Momententragfähigkeit $M_{j,Rd}$ vorliegt, müssen die Berechnungen der einzelnen Anschlusskomponenten – 1 bis 5, 7 und 8 – angepasst werden. Die neue Entwicklung bezieht sich auf einen Stirnplattenanschluss mit zwei Schraubenreihen, wobei eine Reihe auf Zug beansprucht wird. Die neue Nachweismethode kann erweitert werden, sofern mehr als eine Schraubenreihe im Zugbereich vorliegen sollte.

Stützensaussteifung:

In die Berechnung der Tragfähigkeitskomponenten fließt die Aussteifung der Stütze mit ein. In [16] wird zwischen den Varianten a) und b) aus Abbildung 6.1 unterschieden. Bei Anschlüssen nach Variante c) ist das Stützenende im Zugbereich durch ein angeschweißtes Blech ausgesteift und der Druckbereich wird nicht ausgesteift. Dies beeinflusst die jeweiligen Komponenten des Zug- und Druckbereiches.

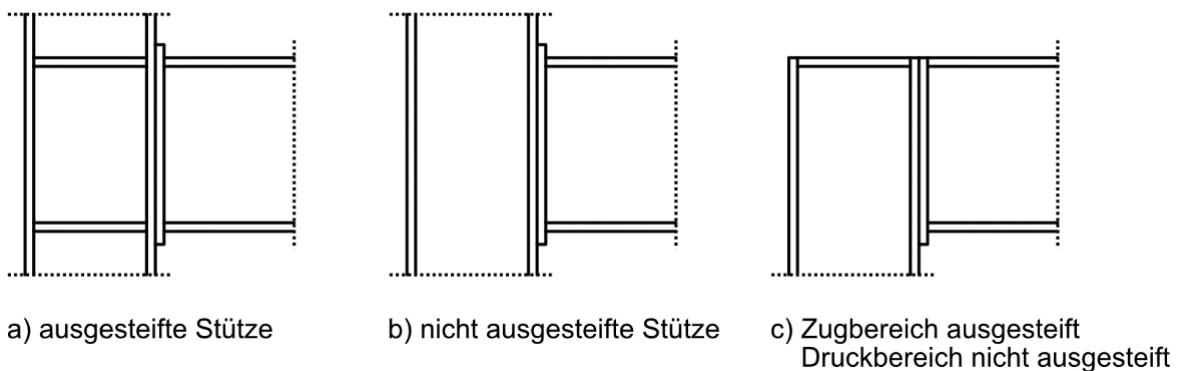


Abbildung 6.1 Varianten der Stützensaussteifung, nach [16]

Komponente 1: Stützenstegfeld mit Schubbeanspruchung

Die Schubtragfähigkeit des Stützenstegfeldes wird durch Gleichung (6.4) berechnet und kann für einen gelenkigen Stirnplattenanschluss übernommen werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Stütze nach Variante b) oder c) aus Abbildung 6.1 konstruiert wird und keine zusätzlichen Bleche zur Verstärkung des Steges an diesen angeschweißt werden.

$$A_{vc} = A - 2 * b * t_f + (t_w + 2 * r) * t_f \quad (6.3)$$

$$V_{wp,Rd} = 0,9 * f_{y,wc} * A_{vc} / (\sqrt{3} * \gamma_{M0}) \quad (6.4)$$

Komponente 2: Stützensteg mit Querdruckbeanspruchung

Die Tragfähigkeit infolge Querdruck eines nicht ausgesteiften Stützensteges lässt sich mit Gleichung (6.5) berechnen. Die dazugehörige wirksame Breite $b_{eff,c,wc}$ ist für eine geschraubte Verbindung mit überstehender Stirnplatte mit Gleichung (6.6) zu ermitteln. [3]

$$F_{c,wc,Rd} = \omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc} / \gamma_{M0} \leq \omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc} / \gamma_{M1} \quad (6.5)$$

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + r_c) + 2t_p \quad (6.6)$$

Die Werte für ω , k_{wc} und ρ sind nach [3] zu bestimmen. Die einfließenden Abmessungen für Gleichung (6.6) können Abbildung 6.2 entnommen werden.

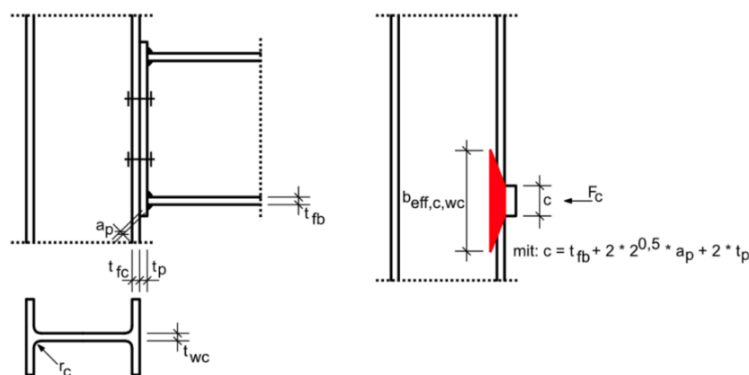


Abbildung 6.2 Wirksame Breite $b_{eff,c,wc}$ für den Stützensteg mit Querdruckbeanspruchung (überstehende Stirnplatte), nach [16]

Da die überstehende Stirnplatte am unteren Trägerflansch bei gelenkigen Stirnplattenanschlüssen in der Regel nicht vorhanden ist und somit die Lastausbreitungsfläche verringert wird (s. Abbildung 6.3), muss die Berechnung der effektiven Breite angepasst werden. Somit ergibt sich die folgende Gleichung:

$$b_{eff,c,wc,neu} = 5 * (t_{fc} + r_c) \quad (6.7)$$

Mit dieser effektiven Breite kann wiederum die Tragfähigkeit des Stützensteges infolge Querdruck nach Gleichung (6.5) berechnet werden.

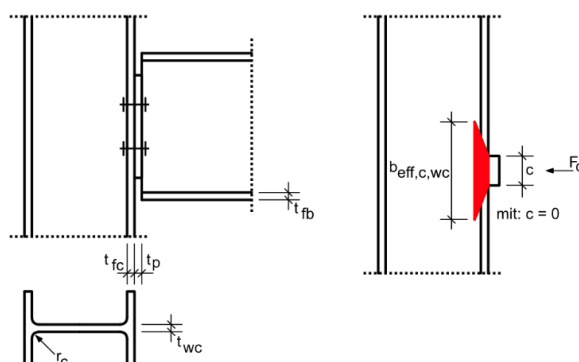


Abbildung 6.3 Wirksame Breite $b_{eff,c,wc,neu}$ für den Stützensteg mit Querdruckbeanspruchung (Stirnplatte ohne Kontakt mit den Trägerflanschen)

Komponente 3: Stützensteg mit Querkzugbeanspruchung

Die Tragfähigkeit infolge Querkzug eines nicht ausgesteiften Stützensteges lässt sich mit Gleichung (6.8) berechnen. Die dazugehörige wirksame Breite $b_{eff,t,wc}$ ergibt sich aus der kleinsten effektiven Länge des T-Stummels für den Stützenflansch (Komponente 4). [3]

$$F_{t,wc,Rd} = \omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc} / \gamma_{M0} \quad (6.8)$$

$$b_{eff,t,wc} = \min(l_{eff,cp}; l_{eff,nc}) \quad (6.9)$$

Die vergrößerte Tragfähigkeit durch Stegsteifen kann nach [3] berücksichtigt werden.

Komponente 4: Stützenflansch mit Biegung

Für die Berechnung der effektiven Längen $l_{eff,cp}$ und $l_{eff,nc}$ des T-Stummels für den Stützenflansch wird zwischen einem ausgesteiften und nicht ausgesteiften Stützenflansch unterschieden. Für einen gelenkigen Stirnplattenanschluss mit einer Schraubenreihe, die auf Zug belastet wird, ergeben sich die effektiven Längen nach Tabelle 6.1.

Tabelle 6.1 Wirksame Längen l_{eff} für Stützenflansche (einzelne Schraubenreihe), nach [3]

Stützenflansch	Lage der Schraubenreihe	$l_{eff,cp}$	$l_{eff,nc}$
Nicht ausgesteift	Äußere Schraubenreihe am Ende mit Rand	Der kleinste Wert von: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	Der kleinste Wert von: $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$
ausgesteift	Innere Schraubenreihe neben einer Steife	$2\pi m$	αm

Die Abmessungen können Eurocode 3 Teil 1-8 entnommen werden. Die Zugtragfähigkeit $F_{T,Rd}$ des Stützenflansches mit Biegung wird durch das T-Stummel-Verfahren berechnet. [3]

Komponente 5: Stirnblech mit Biegung

Für die wirksamen Längen für Stirnbleche wird in [3] die Schraubenlage „Äußere Schraubenreihe am Ende mit Rand“ nicht betrachtet, da die Längen auf einen Anschluss mit überstehender Stirnplatte angewendet werden. Somit werden die effektiven Längen für einen Stirnplattenanschluss nach Abbildung 6.4, bei dem die Stirnplatte keinen Kontakt mit den Trägerflanschen aufweist, aus Tabelle 6.1 für einen nicht aussteiften Stützenflansch abgeleitet.

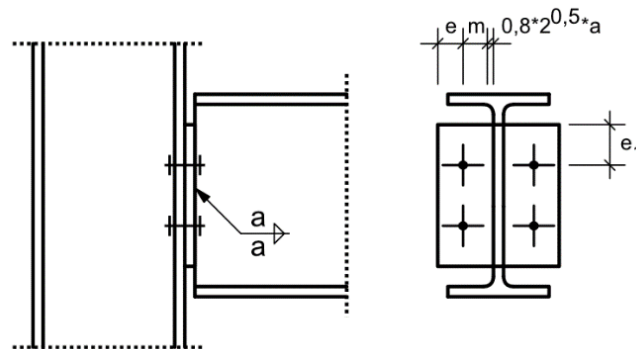


Abbildung 6.4 Stirnplattenanschluss (Stirnplatte ohne Kontakt mit den Trägerflanschen)

Die Zugtragfähigkeit $F_{T,Rd}$ des Stirnbleches mit Biegung wird durch das T-Stummel-Verfahren berechnet. Die Stirnblechkomponente wird als maßgebende Zugtragfähigkeit des gelenkigen Stirnplattenanschlusses erwartet. [3]

Komponente 7: Trägerflansch und -steg mit Druckbeanspruchung

Die Komponente „Trägerflansch und -steg mit Druckbeanspruchung“ kann nicht aus [3] übernommen werden, da der Trägerflansch bei gelenkigen Stirnplattenverbindungen vorwiegend keinen Druckpunkt ausbildet. Der Druckpunkt des Anschlusses in Abbildung 6.5 wird an der Unterkante der Stirnplatte lokalisiert. Aus dem Kräftepaar der Zug- und Druckkraft wird die maßgebende Punktlast im Druckbereich des Trägers bestimmt, siehe Gleichung (6.10) und (6.11).

$$F_{t,min} = \min(F_{T,Rd}; F_{t,wb,Rd}) = F_{c,wb,Rd} \quad (6.10)$$

$$F_{c,wb,Rd} = b_{eff,c,wb} * t_{wb} * f_{y,Rd} / \gamma_{M0} = F_{t,min} \quad (6.11)$$

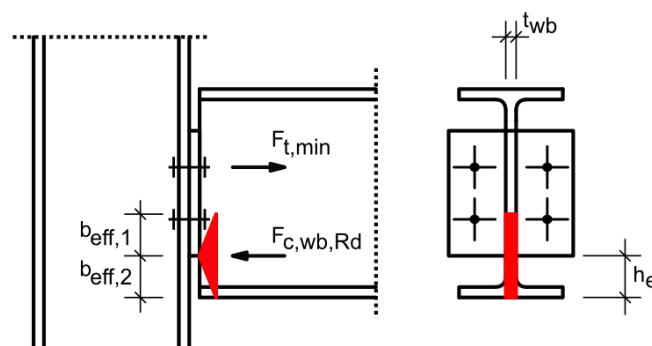


Abbildung 6.5 Effektive Breiten $b_{eff,1}$ und $b_{eff,2}$ des Trägersteges mit Druckbeanspruchung

Gleichung (6.11) wird aufgelöst, sodass die effektive Breite $b_{eff,c,wb}$ im Druckbereich durch die minimale Zugtragfähigkeit $F_{t,min}$ der oberen Schraubenreihe bestimmt wird. Dabei wird die Lastausbreitung durch die Unterkante des Trägers begrenzt (s. Gleichung (6.14)).

$$b_{eff,c,wb} = F_{t,min} * \gamma_{M0} / (t_{wb} * f_{y,Rd}) \quad (6.12)$$

$$b_{eff,c,wb} = b_{eff,1} + b_{eff,2} \quad (6.13)$$

$$b_{eff,2} \leq h_e \quad (6.14)$$

Die Gleichungen (6.10) bis (6.14) basieren auf der Grundlage, dass die minimale Zugtragfähigkeit in der Stirnplattenkomponente erwartet wird.

Komponente 8: Trägersteg mit Zugbeanspruchung

Die Berechnung des Trägersteges mit Zugbeanspruchung wird aus [3] übernommen. Die effektive Breite $b_{eff,t,wb}$ ergibt sich aus dem neuen Berechnungsansatz der minimalen wirksamen Länge des Stirnbleches mit Biegung (s. Komponente 5).

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * f_{y,wb} / \gamma_{M0} \quad (6.15)$$

$$b_{eff,t,wb} = \min (l_{eff,cp}; l_{eff,nc}) \quad (6.16)$$

Klassifizierung des Stirnplattenanschlusses:

Der Anschluss mit Stirnplatte wird über das Verhältnis seiner Momententragfähigkeit $M_{j,Rd}$ zu der maßgebenden Momententragfähigkeit $M_{pl,y,Rd}$ der anschließenden Bauteile klassifiziert. Die Tragfähigkeit des Anschlusses in Abbildung 6.6 mit einer Schraubenreihe im Zugbereich kann durch Gleichung (6.17) berechnet werden. [3]

$$M_{j,Rd} = h_r * F_{tr,Rd} \quad (6.17)$$

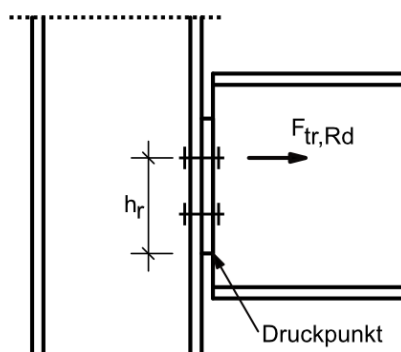


Abbildung 6.6 Momententragfähigkeit eines Stirnplattenanschlusses mit einer Schraubenreihe im gezogenen Bereich

Der Stirnplattenanschluss wird als gelenkig klassifiziert, sofern folgende Voraussetzung eingehalten wird: [3]

$$M_{j,Rd} \leq 0,25 * M_{pl,y,Rd} \quad (6.18)$$

6.1.3 Steifigkeit nach der Komponentenmethode

Auf Grundlage des neuen Berechnungsansatzes der Komponentenmethode aus Abschnitt 6.1.2, können die Steifigkeitskoeffizienten k_i nach Tabelle 3.5 bestimmt werden. Dazu werden die effektiven Längen und Breiten mit den neu entwickelten Ansätzen berechnet und in die Gleichungen der zugehörigen Steifigkeitskoeffizienten eingesetzt. *Somit ist die neue Berechnung der Anfangsrotationssteifigkeit $S_{j,ini}$ abhängig von der Abwandlung der Tragfähigkeitskomponenten.* [3]

6.2 Fahnenblechanschluss

Der Nachweis der Verdrehbarkeit eines Fahnenblechanschlusses liegt nicht nach Eurocode 3 Teil 1-8 [3] vor, da die Komponentenmethode ausschließlich auf einen Anschluss mit überstehender Stirnplatte angewendet wird. Im Folgenden wird eine vereinfachte Nachweismethode der ausreichenden Verdrehbarkeit für Anschlüsse mit Fahnenblech hergeleitet. Zudem wird eine sinnvolle Anwendung der vorhandenen Duktilitätskriterien beurteilt.

6.2.1 Duktilitätskriterien nach der ECCS

Die Kriterien für eine ausreichende Tragfähigkeit der Schrauben und der Schweißnähte eines Fahnenblechanschlusses werden aus [4, 5, 6] übernommen. Diese dienen als Vordimensionierung der beiden Anschlusskomponenten und vermeiden zugleich ein sprödes Versagen der Verbindungsmittel. Somit müssen die Schrauben eine der folgenden Voraussetzungen erfüllen:

$$d/t_p \geq 2,8 * \sqrt{f_{yp}/f_{ub}} \quad (\text{für das Fahnenblech}) \quad (6.19)$$

$$d/t_w \geq 2,8 * \sqrt{f_{yw}/f_{ub}} \quad (\text{für den Trägersteg}) \quad (6.20)$$

Die Schweißnaht ist mit voller Tragfähigkeit konstruiert, wenn Gleichung (6.21) beachtet wird.

$$a \geq \beta_w / \sqrt{2} * f_y / f_u * \gamma_{M2} / \gamma_{M0} * t_w \quad (6.21)$$

Eine spröde Versagensart wird ausgeschlossen, sofern die Anforderungen für eine plastische Lastumverteilung der Schnittgrößen eingehalten sind, die in Tabelle 3.2 definiert sind.

6.2.2 Vereinfachte Nachweismethode der Verdrehbarkeit

Der Nachweis der ausreichenden Rotationskapazität nach der ECCS wird in der neuen Nachweisentwicklung nicht berücksichtigt. Die vereinfachte Nachweismethode der Verdrehbarkeit wird über das Nennlochspiel Δd und die Endtangentialverdrehung des Trägers hergeleitet. Ein Druckwiderstand in den Schraubenlöchern, der vor einem Kontakt des Trägerflansches mit der Stütze entsteht, wird durch die vorhandene Nachweismethode nicht beachtet. Das Grundprinzip der vorhandenen und erforderlichen Verdrehung bleibt dennoch bestehen.

Abbildung 6.7 stellt einen verdrehten Träger dar mit nicht maßstabsgetreuer horizontaler Verschiebung der oberen und unteren Schraubenreihe. Die Schrauben können sich jeweils um die Hälfte des Lochspiels seitlich verschieben. Somit ergibt sich eine vorhandene Verdrehung um den Schwerpunkt des Schraubenbildes. Das vertikale Lochspiel fließt nicht in die Entwicklung des Nachweises der Verdrehbarkeit mit ein.

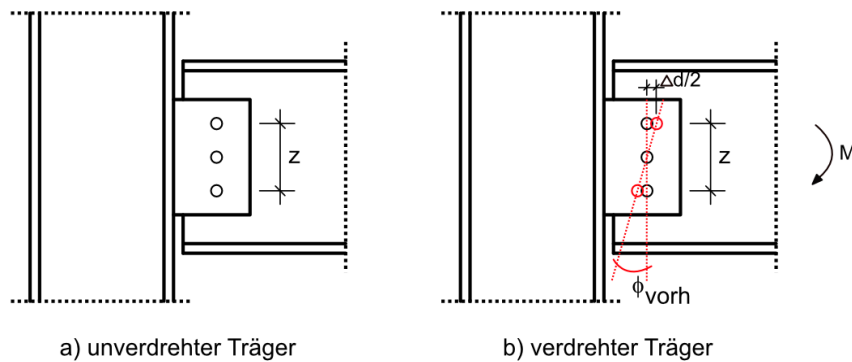


Abbildung 6.7 Vorhandene Verdrehbarkeit eines Fahnenblechanschlusses abhängig vom Nennlochspiel

Aus Abbildung 6.7 ergibt sich die folgende Gleichung für die vorhandene Verdrehung ϕ_{vorh} bei horizontal verschobenen Schrauben:

$$\phi_{vorh} = 0,5\Delta d / 0,5z = \Delta d / z \quad (6.22)$$

Für eine ausreichende Verdrehbarkeit des Fahnenblechanschlusses muss Gleichung (6.23) erfüllt sein, die aus [4, 5, 6] übernommen wird.

$$\phi_{vorh} > \phi_{erf} \quad (6.23)$$

Die Werte für die erforderliche Verdrehung ϕ_{erf} von häufigen Belastungsarten können mithilfe von Tabelle 5.1 berechnet werden. Das Nennlochspiel Δd kann für verschiedene Schraubendurchmesser und Locharten aus Tabelle 6.2 entnommen werden.

Tabelle 6.2 Nennlochspiel Δd in mm bei Schrauben und Bolzen, nach [8]

Nenn Durchmesser d der Schraube oder des Bolzens (mm)	12, 14	16, 18, 20, 22	24	27 und größer
Normale runde Löcher	1	2	2	3
Übergroße runde Löcher	3	4	6	8
Kurze Langlöcher (in der Länge)	4	6	8	10
Lange Langlöcher (in der Länge)	1,5 * d			

Ein Ansatz für die Berechnung der Momententragfähigkeit eines Anschlusses mit Fahnenblech ergibt sich aus den Schraubenwiderständen (s. Abbildung 6.8). Dazu wird zwischen dem minimalen Widerstand der Schrauben durch Abscheren und horizontaler Lochleibung unterschieden, siehe Gleichung (6.24). Der Hebelarm z ist gleich gesetzt mit dem Abstand der äußeren Schraubenreihen. Bei mehr als drei horizontalen Schraubenreihen können die Hebelarme jeweils angepasst werden.

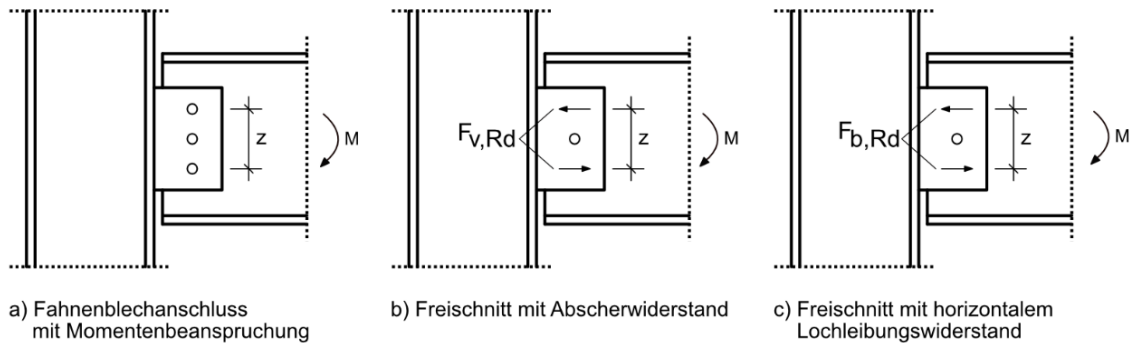


Abbildung 6.8 Momententragfähigkeit eines Fahnenblechanschlusses

Die folgenden Gleichungen sind angepasst auf einen Fahnenblechanschluss nach Abbildung 6.8.

$$F_{Rd} = \min (F_{v,Rd}; F_{b,Rd}) \quad (6.24)$$

$$M_{j,Rd} = F_{Rd} * z \quad (6.25)$$

Ein Anschluss mit Fahnenblech kann ebenfalls als gelenkig klassifiziert werden, sofern Gleichung (6.26) eingehalten ist. [3]

$$M_{j,Rd} \leq 0,25 * M_{pl,y,Rd} \quad (6.26)$$

Aufgrund der konstruktiven Gemeinsamkeiten können die Duktilitätskriterien für die Schrauben und der vereinfachte Nachweis der Verdrehbarkeit von einem Fahnenblechanschluss für einen Anschluss mit Doppelwinkeln und einen Laschenstoß abgeleitet werden.

7 Zusammenfassung

Diese Bachelorarbeit schließt mit einem Fazit der einzelnen Abschnittsinhalte ab und einem Ausblick auf Ansätze, die die Nachweismethoden der Verdrehbarkeit von gelenkigen Anschlüssen weiterverfolgen und in die Praxis miteinbeziehen.

7.1 Fazit

Aus der Bewertung der zusammengestellten Beispielaufgaben mithilfe der ausgewählten Kriterien ist deutlich erkennbar, dass ein Nachweis einer ausreichenden Verdrehbarkeit der Anschlüsse so gut wie nie geführt wird. Eine generelle Klassifizierung eines gelenkigen Anschlusses wird von dem Großteil der Autoren der Literatur aus dem Stahlhochbau ebenfalls nicht berücksichtigt. Auf diese Nachweise wird verzichtet, da sie nicht eindeutig anwendbar sind und durch gelenkähnliche Eigenschaften der Anschlusskomponenten eine Gelenkwirkung auf der sicheren Seite angenommen wird. Somit wird zudem eine Entwicklung von normgerechten Nachweismethoden der Gelenkeigenschaften als nicht notwendig erachtet.

In den Beispielen werden größtenteils nur die Anschlussdetails mit einer Querkraftbelastung dargestellt, die auf ihre Tragfähigkeit untersucht werden. Die Detailvollständigkeit reicht aus, um die vorhandene Verdrehung ϕ_{vorh} zu berechnen und eine ausreichende Duktilität nachzuweisen. Jedoch kann die erforderliche Verdrehbarkeit ϕ_{erf} nicht ermittelt werden, da ein statisches System nicht in die Aufgaben integriert wird. Der verdrehte Zustand der gelenkigen Anschlüsse wird nicht erfasst, da die meisten Autoren die Nachweismethoden der ECCS als nicht relevant betrachten oder diese nicht beachtet werden.

Eine Anwendung der Konstruktionsempfehlungen der ECCS ist insofern problematisch, da teilweise nicht praxisbezogene Annahmen getroffen werden, wie zum Beispiel eine unverformbare Stütze als lastannehmendes Bauteil. Zudem werden nur Träger-Stützen-Anschlüsse berücksichtigt und keine Träger-Träger-Anschlüsse, die jedoch ebenfalls häufig in der Praxis vorkommen. Ein lastannehmender Träger wird um seine schwache Achse beansprucht und diesen Träger als unverformbar anzunehmen, würde auf der unsicheren Seite liegen. Da die konstruktiven Grenzen – wie die Schraubenzahl oder die Höhenverhältnisse der einzelnen Anschlusskomponenten – keine Berücksichtigung in dem Modell finden, entstehen viele Unklarheiten für die Nachweise der ECCS. Zudem sind die Vorgaben für einen Nachweis der Verdrehbarkeit von Doppelwinkelanschlüssen unschlüssig, da dieser in [5, 6] nicht vertieft wird.

Die Anschlussklassifizierung nach [3] ist auf einen starren und biegetragfähigen Anschluss mit überstehender Stirnplatte begrenzt. Durch eine Abwandlung der einzelnen Komponenten können gelenkige Stirnplattenanschlüsse ebenfalls klassifiziert werden. Die Klassifizierung von Anschlüssen mit Fahnenblech, Doppelwinkeln und Knaggen sowie von Trägerstößen wird jedoch nicht erwähnt und ein Ingenieur muss eigene Ansätze für eine gelenkige Klassifizierung finden.

In der Herleitung der vorhandenen Nachweismethoden der ECCS wurde festgestellt, dass mithilfe der Gleichungen ein Druckpunkt am unteren Trägerflansch mit dem lastannehmenden Bauteil vermieden wird. In diesem Ansatz wird der Druckpunkt, der durch Kontakt von der Stirnplatte und dem Trägersteg oder von den Schrauben und dem Fahnenblech entsteht, nicht berücksichtigt. Der vereinfachte Nachweis von Wagenknecht [17] widerlegt die Annahme, dass ein Anschluss ausschließlich ohne Kontakt des unteren Trägerflansches mit den Verbindungsmitteln als Gelenk wirken kann. In diesem Sonderbeispiel wird der Anschluss mit einem Kontakt zwischen Stirnplatte und unterem Trägerflansch als gelenkig klassifiziert und das Duktilitätskriterium für das Stirnblech wird beachtet.

Durch die Abwandlung der Komponenten eines Stirnplattenanschlusses kann eine normgerechte Gelenkklassifizierung nach der Tragfähigkeit und Steifigkeit durchgeführt werden. Für Fahnenblech- und Doppelwinkelanschlüsse liegen keine ausreichenden Komponenten vor, die angepasst werden können, sodass eine vereinfachte Methode zum Nachweis der Verdrehbarkeit über das Nennlochspiel entwickelt wurde. Das Duktilitätskriterium der ECCS, das in [3] ebenfalls definiert ist, wird in den neuen Nachweismethoden für Anschlüsse mit Stirnplatte, Fahnenblech, Doppelwinkeln oder Laschen mitberücksichtigt.

7.2 Ausblick

Mit dieser Bachelorarbeit wird ein Überblick über mögliche Ansätze für die Weiterentwicklung der vereinfachten Nachweismethoden und baupraktischen Untersuchungen verschafft. Für die Erstellung der Tragfähigkeitstabellen von typisierten Anschlüssen [18] wird das Duktilitätskriterium für die Stirnplatte beachtet. Ergänzend wäre die gelenkige Klassifizierung mit der abgewandelten Komponentenmethode sinnvoll, da hierzu nur die jeweiligen Anschlusskomponenten einfließen und kein statisches System. Der Nachweis der Verdrehbarkeit nach der ECCS abhängig von einem statischen System und dessen Belastung würde nicht dem Zweck und Umfang der Tragfähigkeitstabellen entsprechen.

Zudem müssen die Komponenten des lastannehmenden Trägers bei einer Träger-Träger-Verbindung weiter untersucht werden. Auch die abgewandelte Komponentenmethode einer Stirnplattenverbindung ist ausschließlich auf einen Träger-Stützen-Anschluss begrenzt und die Komponenten der Stütze sind nicht auf einen weiteren Träger anwendbar. Die Lastausbreitung im Trägersteg ($b_{eff,c,wb}$) sollte ebenfalls in weitere Forschungsansätze übernommen werden, da der Druckpunkt bei dieser Anschlussvariante an der Unterkante der Stirnplatte angenommen wird. In der Realität wird dieser jedoch minimal höher liegen, sodass die vorhandene Druckfläche in der Stirnplatte größer wird. Dies beeinflusst wiederum die Lastausbreitung im Trägersteg.

Die vorhandenen Empfehlungen für die Konstruktion von gelenkigen Anschlüssen können auf der Grundlage der vereinfachten Nachweismethoden durch Parameterstudien und praktische Versuche erweitert werden. Zudem ist eine Zusammenstellung von baupraktischen Untersuchungen zu Gelenkannahmen und gelenkigen Anschlusseigenschaften sinnvoll. Da in der Praxis viele Ausführungsformen der Anschlüsse auf

Annahmen der Gelenke basieren, können hier mögliche Schadensfälle der Tragwerke beurteilt werden. Darauf werden Analysen zur Wirtschaftlichkeit der Anschlusskonstruktionen aufbauen, die auf Über- oder Unterbemessung der Verbindungen schlussfolgern. Durch Empfehlungen, die auf der Anschlussbemessung nach den vereinfachten Methoden aus Abschnitt 6 basieren, können wirtschaftlichere Konstruktionen berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Andrej Albert, Klaus-Jürgen Schneider (†), Alfons Goris (2020): *Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen* (24. Auflage), Reguvis Fachmedien, Köln
- [2] Deutsches Institut für Normung e.V. (2010): *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, DIN EN 1993-1-1:2010-12
- [3] Deutsches Institut für Normung e.V. (2010): *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*, DIN EN 1993-1-8:2010-12
- [4] Prof. Dr.-Ing. Ulrich Engelmann (2014): *Stahlbaufibel - Bemessung, Nachweise und Beispiele nach Tragwerksteilen der Stabwerke* (2. Auflage), Beuth Verlag, Berlin
- [5] Jean-Pierre Jaspart, Dr.-Ing. Klaus Weynand (2016): *Design of Joints in Steel and Composite Structures*, Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [6] Jean-Pierre Jaspart, J. F. Démonceau, S. Renkin, M. L. Guillaume (2009): *European Recommendations for the Design of Simple Joints in Steel Structures* (1. Auflage), ECCS - European Convention for Constructional Steelwork
- [7] Prof. Dipl.-Ing. Eduard Kahlmeyer (†), Prof. Dr.-Ing. Kerstin Hebestreit, Prof. Dr.-Ing. Werner Vogt (2015): *Stahlbau nach EC3 - Bemessung und Konstruktion: Träger - Stützen - Verbindungen* (7. Auflage), Bundesanzeiger Verlag, Köln
- [8] Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Kindmann, Prof. Dr.-Ing. Matthias Kraus, Dipl.-Ing. Hans Joachim Niebuhr (2017): *STAHLBAU KOMPAKT - Bemessungshilfen, Profiltabellen* (4. Auflage), Verlag Stahleisen, Düsseldorf
- [9] Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Kindmann, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Krüger (2013): *Stahlbau - Teil 1: Grundlagen* (5. Auflage), Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [10] Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Kindmann, Prof. Dr.-Ing. Michael Stracke (2012): *Verbindungen im Stahl- und Verbundbau* (3. Auflage), Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [11] Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann (2018): *Stahlbau Kalender 2018 - Verbundbau - Fertigung* (20. Jahrgang), Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [12] Prof. Dr.-Ing. Christian Ludwig (2021): *Skript zur Vorlesung Stahlbau I*, Stand 03.2021
- [13] Prof. Dr.-Ing. Christian Ludwig (2021): *Skript zur Vorlesung Stahlbau II*, Stand 09.2021

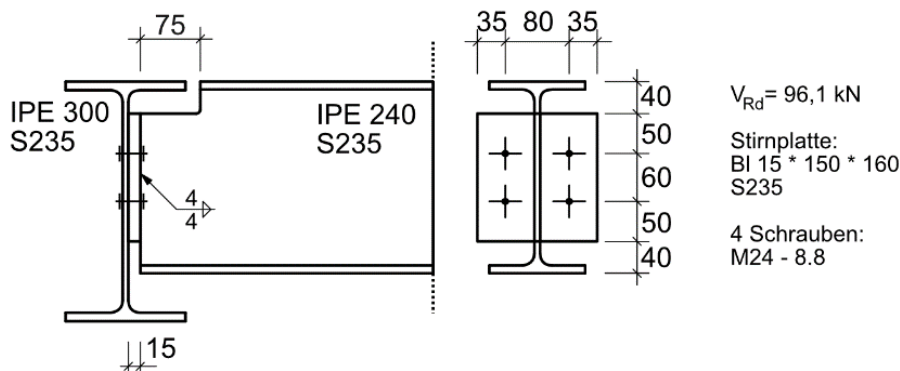
- [14] Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann, Prof. Dr. Ram Puthli, Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer, Dr.-Ing. Klaus Weynand (2015): *Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Band 2: Anschlüsse* (1. Auflage), Beuth Verlag, Berlin mit Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [15] Prof. Dr.-Ing. Gerd Wagenknecht (2011): *Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3, Band 2 – Verbindungen und Konstruktionen* (3. Auflage), Beuth Verlag, Berlin
- [16] Prof. Dr.-Ing. Gerd Wagenknecht (2014): *Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3, Band 3 – Komponentenmethode*, Beuth Verlag, Berlin
- [17] Prof. Dr.-Ing. Gerd Wagenknecht (2019): *Stahlbau - Quasigelenkiger Stirnplattenanschluss mit Kontakt am unteren Trägerflansch* (Konstruktiver Ingenieurbau 03.2019), S. 15-22, Reguvis Fachmedien, Köln
- [18] Dr.-Ing. Klaus Weynand, Dipl.-Ing. Ralf Oerder (2013): *Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau nach DIN EN 1993-1-8*, Stahlbau Verlags- und Service GmbH, Düsseldorf

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Bsp. 1 - Stirnplattenanschluss (Träger-Träger).....	62
Anlage 2: Bsp. 2 - Stirnplattenanschluss (Träger-Stütze)	63
Anlage 3: Auszug des Ausdruckprotokolls von RSTAB JOINTS von Bsp. 2	64
Anlage 4: Bsp. 3 - Stirnplattenanschluss (Träger-Stütze)	65
Anlage 5: Bsp. 4 - Fahnenblechanschluss (Träger-Stütze).....	66
Anlage 6: Bsp. 5 - Fahnenblechanschluss (Träger-Träger)	68
Anlage 7: Bsp. 6 - Fahnenblechanschluss (Träger-Stütze).....	70
Anlage 8: Bsp. 7 - Doppelwinkelanschluss (Träger-Träger).....	72
Anlage 9: Bsp. 8 - Doppelwinkelanschluss (Träger-Stütze)	73
Anlage 10: Bsp. 11 - Steglaschenstoß (Träger-Träger)	74
Anlage 11: Bsp. 12 - Stirnplattenstoß (Träger-Träger).....	75

Anlagen

Anlage 1: Bsp. 1 - Stirnplattenanschluss (Träger-Träger)



Rotationskapazität nach [5, 6]:

$$(1) \quad h_p = 160 \text{ mm}; \quad d_b = 240 - 2 * 9,8 - 2 * 15 = 190,4 \text{ mm}$$

$$h_p = 160 \text{ mm} \leq d_b = 190,4 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$(2) \quad t_p = 15 \text{ mm}; \quad h_e = 40 \text{ mm}$$

$$\phi_{vorh} = 15/40 = 0,375 \text{ rad}$$

$$(3) \quad \phi_{erf} \text{ mit eigenem System: (a) } L_b = 5,0 \text{ m und (b) } L_b = 10,0 \text{ m}$$

$$V_{Rd} = 96,1 \text{ kN (Wahl: } V_{z,Ed} = 90 \text{ kN)}$$

$$(a) \quad p = 2 * (90/1,35)/5,0 = 26,7 \text{ kN/m}$$

$$\phi_{erf} = 1,35 * 26,7/100 * 500^3 / (24 * 21000 * 3892) = 0,023 \text{ rad}$$

$$(b) \quad p = 2 * (90/1,35)/10,0 = 13,4 \text{ kN/m}$$

$$\phi_{erf} = 1,35 * 13,4/100 * 1000^3 / (24 * 21000 * 3892) = 0,092 \text{ rad}$$

$$(4) \quad (a) \quad \phi_{vorh} = 0,375 \text{ rad} > \phi_{erf} = 0,023 \text{ rad} \quad \checkmark$$

$$(b) \quad \phi_{vorh} = 0,375 \text{ rad} > \phi_{erf} = 0,092 \text{ rad} \quad \checkmark$$

Duktilität nach [5, 6]:

- Schraube:

$$d = 24 \text{ mm}; \quad t_p = 15 \text{ mm}; \quad t_w = 7,1 \text{ mm}; \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2; \quad f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$$

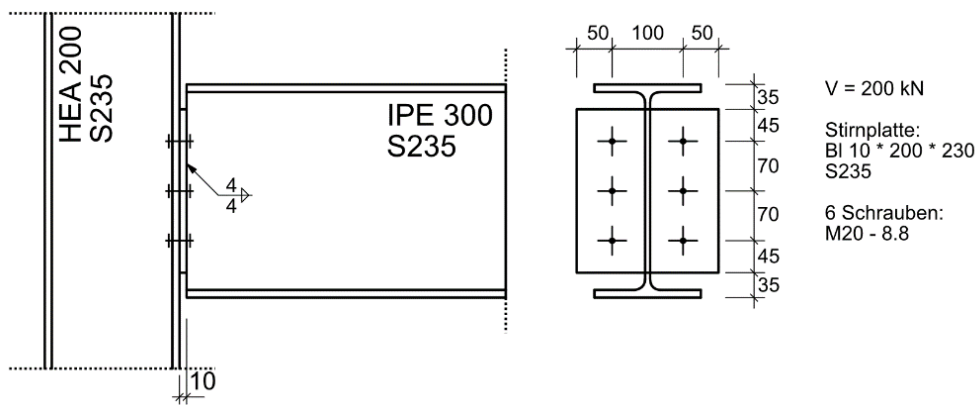
$$d/t_p = 24/15 = 1,6 \geq 2,8 * \sqrt{235/800} = 1,52 \quad \checkmark$$

$$d/t_w = 24/7,1 = 3,4 \geq 2,8 * \sqrt{235/800} = 1,52 \quad \checkmark$$

- Schweißnaht:

$$a = 4 \text{ mm} \geq 0,46 * 6,2 = 2,86 \text{ mm} \quad \checkmark$$

Anlage 2: Bsp. 2 - Stirnplattenanschluss (Träger-Stütze)



Rotationskapazität nach [5, 6]:

(1) $h_p = 230 \text{ mm}; d_b = 300 - 2 * 10,7 - 2 * 15 = 248,6 \text{ mm}$

$h_p = 230 \text{ mm} \leq d_b = 248,6 \text{ mm} \quad \checkmark$

(2) $t_p = 10 \text{ mm}; h_e = 35 \text{ mm}$

$\phi_{vorh} = 10/35 = 0,286 \text{ rad}$

(3) ϕ_{erf} mit eigenem System: (a) $L_b = 5,0 \text{ m}$ und (b) $L_b = 10,0 \text{ m}$

$V_{z,Ed} = 200 \text{ kN}$

(a) $p = 2 * (200/1,35)/5,0 = 60,0 \text{ kN/m}$

$\phi_{erf} = 1,35 * 60,0/100 * 500^3 / (24 * 21000 * 8356) = 0,024 \text{ rad}$

(b) $p = 2 * (200/1,35)/10,0 = 30,0 \text{ kN/m}$

$\phi_{erf} = 1,35 * 30,0/100 * 1000^3 / (24 * 21000 * 8356) = 0,096 \text{ rad}$

(4) (a) $\phi_{vorh} = 0,286 \text{ rad} > \phi_{erf} = 0,024 \text{ rad} \quad \checkmark$

(b) $\phi_{vorh} = 0,286 \text{ rad} > \phi_{erf} = 0,096 \text{ rad} \quad \checkmark$

Duktilität nach [5, 6]:

- Schraube:

$d = 20 \text{ mm}; t_p = 10 \text{ mm}; t_{cf} = 10 \text{ mm}; f_y = 235 \text{ N/mm}^2; f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$

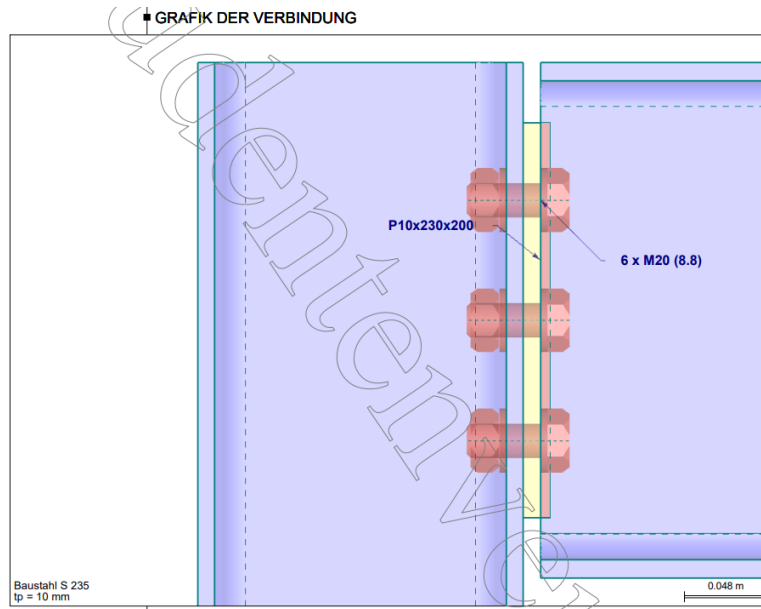
$d/t_p = 20/10 = 2,0 \geq 2,8 * \sqrt{235/800} = 1,52 \quad \checkmark$

$d/t_{cf} = 20/10 = 2,0 \geq 2,8 * \sqrt{235/800} = 1,52 \quad \checkmark$

- Schweißnaht:

$a = 4 \text{ mm} \geq 0,46 * 7,1 = 3,27 \text{ mm} \quad \checkmark$

Anlage 3: Auszug des Ausdruckprotokolls von RSTAB JOINTS von Bsp. 2



1.3 BELASTUNG

Knoten Nr.	Belastung	Stab	Normalkraft N [kN]	Querkraft V_y [kN]	Querkraft V_z [kN]	Moment M_y [kNm]	Moment M_z [kNm]
1	1 -	Träger	0	-	200	-	-

1.4 GEOMETRIE-DETAILS

Bauteil	Zeichen	Wert	Einh.
Stütze			
Querschnitt		HE-A 200	
Material		Baustahl S 235	
Träger			
Querschnitt		IPE 300	
Material		Baustahl S 235	
Verbindungsgeometrie, Spalt			
Anschluss an Flansch/Steg		Stützenflansch 1	
Spalt zwischen Träger und Stütze	g	10	mm
Verbindungselement			
Material		Baustahl S 235	
Vertikale Lage		Mitte des Trägerstegs	
Abstand von Trägeroberkante	p_{con}	35	mm
Höhe der Stirnplatte	h_{st}	230	mm

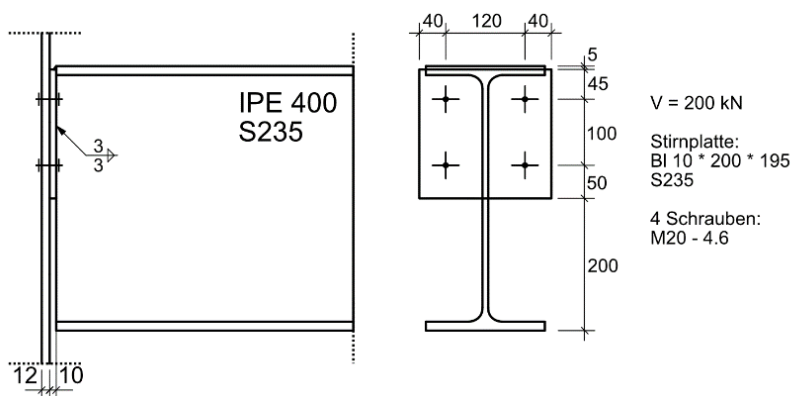
1.4 GEOMETRIE-DETAILS

Bauteil	Zeichen	Wert	Einh.
Breite der Stirnplatte	b_{st}	200	mm
Dicke der Stirnplatte	t_{st}	10	mm
Schrauben an der Stütze			
Gewinde in Scherfuge		Ja	
Normales Lochspiel		Ja	
Horizontal-symmetrische Anordnung		Ja	
Vertikal-symmetrische Anordnung		Ja	
Schraubendurchmesser		M20	
Schraubenfestigkeitsklasse		8.8	
Lochdurchmesser	d_0	22	mm
Horizontale Schraubenreihen	n_h	3	
Vertikale Schraubenreihen	n_v	2	
Vertikaler Randabstand	e_1	45	mm
Vertikaler Schraubenabstand	p_1	70	mm
Vertikaler Randabstand	e'_1	45	mm
Horizontaler Randabstand	e_2	50	mm
Horizontaler Schraubenabstand	p_2	100	mm
Horizontaler Schraubenabstand	p_2	0	mm
Horizontaler Randabstand	e'_2	50	mm
Schweißnähte			
Dicke der Stiegnäht	a_{sw}	4	mm
Ausklümmungen			
Anordnung der Ausklümmung		Keine	

2.1 ZUSAMMENFASSUNG DER NACHWEISE

Knoten	Maßgebender Lastfall		Nachweis Verhältnis	Nachweisformel
	1	2		
Anforderungen an gelenkige Verbindung	1	OK	3220	Zulässige Verdrehung in gelenkiger Verbindung
	1	OK	3230	Nachweis der Duktilität der Verbindung
	1	OK	3321	Vermeidung von vorzeitigem Nahtversagen am Träger
Tragfähigkeit der Schraubengruppe an der Stütze	1	$0.35 \leq 1$	5901	Einzelne Schraube - Abscheren
	1	$0.44 \leq 1$	5911	Schubtragfähigkeit der Schraubengruppe
Tragfähigkeit des Trägers	1	$0.90 \leq 1$	5051	Trägersteg unter Schub
Tragfähigkeit der Stirnplatte	1	$0.34 \leq 1$	5009	Lochleibung einzelne Schraube
	1	$0.34 \leq 1$	5034	Stirnplatte unter Schub - Lochleibung Schraubengruppe
	1	$0.41 \leq 1$	5030	Stirnplatte unter Schub - Bruttoquerschnitt
	1	$0.37 \leq 1$	5031	Stirnplatte unter Schub - Nettoquerschnitt
	1	$0.35 \leq 1$	5032	Stirnplatte unter Schub - Blockversagen
Tragfähigkeit der Stütze	1	$0.22 \leq 1$	5033	Stirnplatte unter Biegung - in Ebene
	1	$0.29 \leq 1$	5009	Lochleibung einzelne Schraube
1	$0.29 \leq 1$	5034	Querkrafteinleitung in Stütze - Lochleibung	

Anlage 4: Bsp. 3 - Stirnplattenanschluss (Träger-Stütze)



Rotationskapazität nach [5, 6]:

(1) $h_p = 195 \text{ mm}; d_b = 400 - 2 * 13,5 - 2 * 21 = 331 \text{ mm}$

$h_p = 195 \text{ mm} \leq d_b = 331 \text{ mm}$ ✓

(2) $t_p = 10 \text{ mm}; h_e = 200 \text{ mm}$

$\phi_{vorh} = 10/200 = 0,05 \text{ rad}$

(3) ϕ_{erf} mit eigenem System: (a) $L_b = 5,0 \text{ m}$ und (b) $L_b = 10,0 \text{ m}$

$V_{z,Ed} = 200 \text{ kN}$

(a) $p = 2 * (200/1,35)/5,0 = 60,0 \text{ kN/m}$

$\phi_{erf} = 1,35 * 60,0/100 * 500^3 / (24 * 21000 * 23128) = 0,009 \text{ rad}$

(b) $p = 2 * (200/1,35)/10,0 = 30,0 \text{ kN/m}$

$\phi_{erf} = 1,35 * 30,0/100 * 1000^3 / (24 * 21000 * 23128) = 0,035 \text{ rad}$

(4) (a) $\phi_{vorh} = 0,05 \text{ rad} > \phi_{erf} = 0,009 \text{ rad}$ ✓

(b) $\phi_{vorh} = 0,05 \text{ rad} > \phi_{erf} = 0,035 \text{ rad}$ ✓

Duktilität nach [5, 6]:

- Schraube:

$d = 20 \text{ mm}; t_p = 10 \text{ mm}; t_{cf} = 12 \text{ mm}; f_y = 235 \text{ N/mm}^2; f_{ub} = 400 \text{ N/mm}^2$

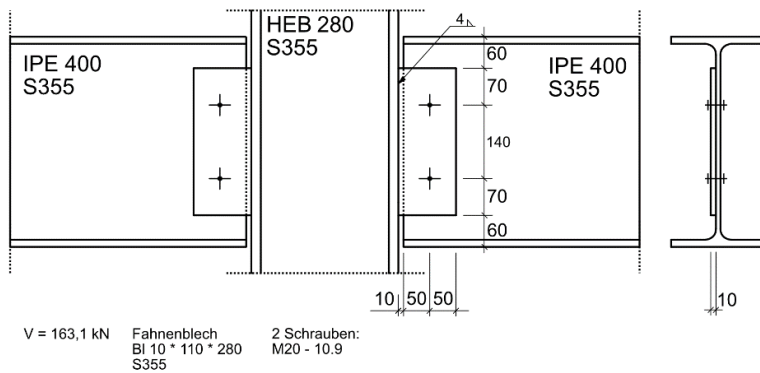
$d/t_p = 20/10 = 2,0 \geq 2,8 * \sqrt{235/400} = 2,15$ ✗

$d/t_{cf} = 20/12 = 1,7 \geq 2,8 * \sqrt{235/400} = 2,15$ ✗

- Schweißnaht:

$a = 3 \text{ mm} \geq 0,46 * 8,6 = 3,96 \text{ mm}$ ✗

Anlage 5: Bsp. 4 - Fahnenblechanschluss (Träger-Stütze)



Rotationskapazität nach [5, 6]:

(1) $h_p = 280 \text{ mm}; d_b = 400 - 2 * 13,5 - 2 * 21 = 331 \text{ mm}$

$h_p = 280 \text{ mm} \leq d_b = 331 \text{ mm}$ ✓

(2) $z = 60 \text{ mm}; g_h = 10 \text{ mm}; h_e = 60 \text{ mm}$

$z = 60 \text{ mm} > \sqrt{(60 - 10)^2 + (280/2 + 60)^2} = 206,2 \text{ mm}$ ✗

$\phi_{vorh} = \arcsin(60/\sqrt{(60 - 10)^2 + (280/2 + 60)^2})$

$-\arctan((60 - 10)/(280/2 + 60)) = 0,05 \text{ rad}$

(3) $p_d = 8,46 \text{ kN/m}; L_b = 16,0 \text{ m}$

$\phi_{erf} = 8,46/100 * 1600^3/(24 * 21000 * 23128) = 0,03 \text{ rad}$

(4) $\phi_{vorh} = 0,05 \text{ rad} > \phi_{erf} = 0,03 \text{ rad}$ ✓

Duktilität nach [4, 5, 6]:

- Schraube:

$d = 20 \text{ mm}; t_p = 10 \text{ mm}; t_w = 8,6 \text{ mm}; f_y = 355 \text{ N/mm}^2; f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$

$d/t_p = 20/10 = 2,0 \geq 2,8 * \sqrt{355/1000} = 1,7$ ✓

$d/t_w = 20/8,6 = 2,3 \geq 2,8 * \sqrt{355/1000} = 1,7$ ✓

- Schweißnaht:

$a = 4 \text{ mm} \geq 0,55 * 10 = 5,5 \text{ mm}$ ✗

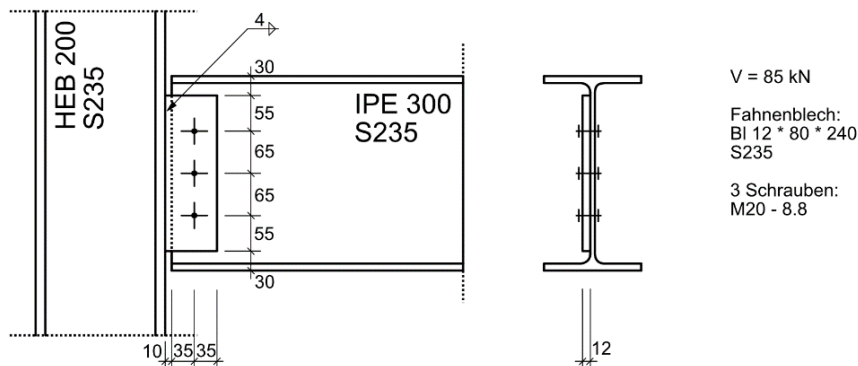
Plastische Lastumverteilung nach [5, 6]:

- 1) $F_{v,Rd} = 150,7 \text{ kN}; n = 2; n_2 = 1$
 $V_{Rd1} = 2 * 150,7 / \sqrt{1 + (6 * 60 / (3 * 140))^2} = 228,8 \text{ kN}$
 - 2) $p_1 = 140 \text{ mm}; e_1 = 70 \text{ mm}; e_2 = 50 \text{ mm}$
 $\alpha = 0; \beta = 6 * 60 / (140 * 2 * (2 + 1)) = 3/7$
 $F_{b,hor,Rd} = 1,361 * 1,0 * 110 = 149,7 \text{ kN}$
 $F_{b,ver,Rd} = 1,361 * 1,0 * 144 = 196,0 \text{ kN}$
 $V_{Rd,2} = 1 / \sqrt{((1/2)/196,0)^2 + ((3/7)/149,7)^2} = 260,8 \text{ kN}$
 - 3) $V_{Rd,3} = 28,0 * 1,0 / 1,27 * 35,5 / \sqrt{3} = 448,3 \text{ kN}$
 - 4) $A_{v,net} = 1,0 * (28,0 - 2 * 2,2) = 23,6 \text{ cm}^2$
 $V_{Rd,4} = 23,6 * 49 / (\sqrt{3} * 1,25) = 534,1 \text{ kN}$
 - 5) $A_{nt} = 1,0 * (5,0 - 2,2/2) = 3,9 \text{ cm}^2$
 $A_{nv} = 1,0 * (28 - 7,0 - (2 - 0,5) * 2,2) = 17,7 \text{ cm}^2$
 $V_{Rd,5} = 0,5 * 49 * 3,9 / 1,25 + 1 / \sqrt{3} * 35,5 * 17,7 / 1,0 = 439,2 \text{ kN}$
 - 6) $h_p = 280 \text{ mm} \geq 2,73 * 60 = 163,8 \text{ mm}$
 $V_{Rd,6} = \infty$
 - 7) $z_p = z = 60 \text{ mm} \leq t_p / 0,15 = 10 / 0,15 = 66,7 \text{ mm}$
 $V_{Rd,7} = V_{Rd,6} = \infty$
 - 8) $F_{b,hor,Rd} = 1,361 * 0,86 * 110 = 128,8 \text{ kN}$
 $F_{b,ver,Rd} = 1,361 * 0,86 * 144 = 168,5 \text{ kN}$
 $V_{Rd,8} = 1 / \sqrt{((1/2)/168,5)^2 + ((3/7)/128,8)^2} = 224,3 \text{ kN}$
 - 9) $A_{b,v} = 0,86 * 40 = 34,4 \text{ cm}^2$ (vereinfacht)
 $V_{Rd,9} = 34,4 * 35,5 / \sqrt{3} = 705,1 \text{ kN}$
 - 10) $A_{b,v,net} = 34,4 - 2 * 2,2 * 0,86 = 30,6 \text{ cm}^2$
 $V_{Rd,10} = 30,6 * 49 / (\sqrt{3} * 1,25) = 692,5 \text{ kN}$
 - 11) $A_{nt} = 0,86 * (5,0 - 2,2/2) = 3,35 \text{ cm}^2$
 $A_{nv} = 0,86 * (13 + (2 - 1) * 14 - (2 - 0,5) * 2,2) = 20,4 \text{ cm}^2$
 $V_{Rd,11} = 0,5 * 49 * 3,35 / 1,25 + 1 / \sqrt{3} * 35,5 * 20,4 / 1,0 = 483,8 \text{ kN}$
-
- (1) $V_{Rd} = V_{Rd,8} = 224,3 \text{ kN} < \min(228,8; \infty) = 228,8 \text{ kN}$ ✓
 - (2) $F_{b,hor,Rd} = 149,7 \text{ kN} \leq \min(150,7; \infty) = 150,7 \text{ kN}$ ✓
 - (3) $V_{Rd,1} = 228,8 \text{ kN} > \min(260,8; 224,3) = 224,3 \text{ kN}$ ✓

Plastische Lastumverteilung nach [5, 6]:

- 1) $F_{v,Rd} = 60,3 \text{ kN}; n = 3; n_2 = 1$
 $V_{Rd1} = 3 * 60,3 / \sqrt{1 + (6 * 55 / (4 * 65))^2} = 112,0 \text{ kN}$
 - 2) $p_1 = 65 \text{ mm}; e_1 = 45 \text{ mm}; e_2 = 45 \text{ mm}$
 $\alpha = 0; \beta = 6 * 55 / (65 * 3 * (3 + 1)) = 11/26$
 $F_{b,hor,Rd} = 1,0 * 1,0 * 98,2 = 98,2 \text{ kN}$
 $F_{b,ver,Rd} = 1,0 * 1,0 * 98,2 = 98,2 \text{ kN}$
 $V_{Rd,2} = 1 / \sqrt{((1/3)/98,2)^2 + ((11/26)/98,2)^2} = 182,3 \text{ kN}$
 - 3) $V_{Rd,3} = 22,0 * 1,0 / 1,27 * 23,5 / \sqrt{3} = 235,0 \text{ kN}$
 - 4) $A_{v,net} = 1,0 * (22,0 - 3 * 2,2) = 15,4 \text{ cm}^2$
 $V_{Rd,4} = 15,4 * 36 / (\sqrt{3} * 1,25) = 256,1 \text{ kN}$
 - 5) $A_{nt} = 1,0 * (4,5 - 2,2/2) = 3,4 \text{ cm}^2$
 $A_{nv} = 1,0 * (22 - 4,5 - (3 - 0,5) * 2,2) = 12,0 \text{ cm}^2$
 $V_{Rd,5} = 0,5 * 36 * 3,4 / 1,25 + 1 / \sqrt{3} * 23,5 * 12,0 / 1,0 = 211,8 \text{ kN}$
 - 6) $h_p = 220 \text{ mm} \geq 2,73 * 55 = 150,2 \text{ mm}$
 $V_{Rd,6} = \infty$
 - 7) $z_p = z = 55 \text{ mm} \leq t_p / 0,15 = 10 / 0,15 = 66,7 \text{ mm}$
 $V_{Rd,7} = V_{Rd,6} = \infty$
 - 8) $F_{b,hor,Rd} = 1,0 * 0,71 * 98,2 = 69,7 \text{ kN}$
 $F_{b,ver,Rd} = 1,0 * 0,71 * 98,2 = 69,7 \text{ kN}$
 $V_{Rd,8} = 1 / \sqrt{((1/3)/69,7)^2 + ((11/26)/69,7)^2} = 129,4 \text{ kN}$
 - 9) $A_{b,v} = 0,71 * (30 - 5,1) = 17,7 \text{ cm}^2$ (vereinfacht)
 $V_{Rd,9} = 17,7 * 23,5 / \sqrt{3} = 240,1 \text{ kN}$
 - 10) $A_{b,v,net} = 17,7 - 3 * 2,2 * 0,71 = 13,0 \text{ cm}^2$
 $V_{Rd,10} = 13,0 * 36 / (\sqrt{3} * 1,25) = 216,2 \text{ kN}$
 - 11) $A_{nt} = 0,71 * (4,5 - 2,2/2) = 2,41 \text{ cm}^2$
 $A_{nv} = 0,71 * (4,5 + (3 - 1) * 6,5 - (3 - 0,5) * 2,2) = 8,52 \text{ cm}^2$
 $V_{Rd,11} = 0,5 * 36 * 2,41 / 1,25 + 1 / \sqrt{3} * 23,5 * 8,52 / 1,0 = 150,3 \text{ kN}$
- (1) $V_{Rd} = V_{Rd,1} = 112,0 \text{ kN} < \min(112,0; \infty) = 112,0 \text{ kN}$ ☒
 - (2) $F_{b,hor,Rd} = 69,7 \text{ kN} \leq \min(60,3; \infty) = 60,3 \text{ kN}$ ☒
 - (3) $V_{Rd,1} = 112,0 \text{ kN} > \min(182,3; 129,4) = 129,4 \text{ kN}$ ☒

Anlage 7: Bsp. 6 - Fahnenblechanschluss (Träger-Stütze)



Rotationskapazität nach [5, 6]:

(1) $h_p = 240 \text{ mm}; d_b = 300 - 2 * 10,7 - 2 * 15 = 248,6 \text{ mm}$

$h_p = 240 \text{ mm} \leq d_b = 248,6 \text{ mm}$ ✓

(2) $z = 45 \text{ mm}; g_h = 10 \text{ mm}; h_e = 30 \text{ mm}$

$z = 45 \text{ mm} > \sqrt{(45 - 10)^2 + (240/2 + 30)^2} = 154 \text{ mm}$ ✗

$\phi_{vorh} = \arcsin(45 / \sqrt{(45 - 10)^2 + (240/2 + 30)^2})$

$-\arctan((45 - 10) / (240/2 + 30)) = 0,067 \text{ rad}$

(3) ϕ_{erf} mit eigenem System: (a) $L_b = 5,0 \text{ m}$ und (b) $L_b = 10,0 \text{ m}$

$V_{z,Ed} = 85 \text{ kN}$

(a) $p = 2 * (85/1,35) / 5,0 = 25,2 \text{ kN/m}$

$\phi_{erf} = 1,35 * 25,2 / 100 * 500^3 / (24 * 21000 * 8356) = 0,01 \text{ rad}$

(b) $p = 2 * (85/1,35) / 10,0 = 12,6 \text{ kN/m}$

$\phi_{erf} = 1,35 * 12,6 / 100 * 1000^3 / (24 * 21000 * 8356) = 0,04 \text{ rad}$

(4) (a) $\phi_{vorh} = 0,067 \text{ rad} > \phi_{erf} = 0,01 \text{ rad}$ ✓

(b) $\phi_{vorh} = 0,067 \text{ rad} > \phi_{erf} = 0,04 \text{ rad}$ ✓

Duktilität nach [4, 5, 6]:

- Schraube:

$d = 20 \text{ mm}; t_p = 12 \text{ mm}; t_w = 7,1 \text{ mm}; f_y = 235 \text{ N/mm}^2; f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$

$d/t_p = 20/12 = 1,67 \geq 2,8 * \sqrt{235/800} = 1,52$ ✓

$d/t_w = 20/7,1 = 2,8 \geq 2,8 * \sqrt{235/800} = 1,52$ ✓

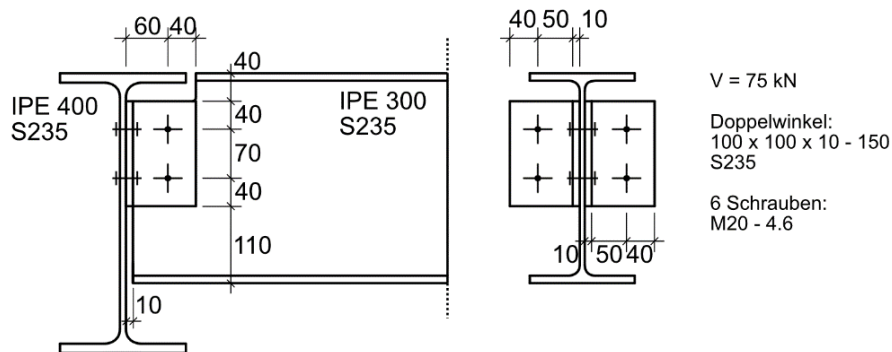
- Schweißnaht:

$a = 4 \text{ mm} \geq 0,46 * 12 = 5,52 \text{ mm}$ ✗

Plastische Lastumverteilung nach [5, 6]:

- 1) $F_{v,Rd} = 120,6 \text{ kN}; n = 3; n_2 = 1$
 $V_{Rd1} = 3 * 120,6 / \sqrt{1 + (6 * 45 / (4 * 65))^2} = 174,1 \text{ kN}$
 - 2) $p_1 = 65 \text{ mm}; e_1 = 55 \text{ mm}; e_2 = 35 \text{ mm}$
 $\alpha = 0; \beta = 6 * 45 / (65 * 3 * (3 + 1)) = 9/26$
 $F_{b,hor,Rd} = 1,0 * 1,2 * 76,4 = 91,7 \text{ kN}$
 $F_{b,ver,Rd} = 1,0 * 1,2 * 106 = 127,2 \text{ kN}$
 $V_{Rd,2} = 1 / \sqrt{((1/3)/127,2)^2 + ((9/26)/91,7)^2} = 217,6 \text{ kN}$
 - 3) $V_{Rd,3} = 24,0 * 1,2 / 1,27 * 23,5 / \sqrt{3} = 307,7 \text{ kN}$
 - 4) $A_{v,net} = 1,2 * (24,0 - 3 * 2,2) = 20,9 \text{ cm}^2$
 $V_{Rd,4} = 20,9 * 36 / (\sqrt{3} * 1,25) = 347,5 \text{ kN}$
 - 5) $A_{nt} = 1,2 * (3,5 - 2,2/2) = 2,9 \text{ cm}^2$
 $A_{nv} = 1,2 * (24 - 5,5 - (3 - 0,5) * 2,2) = 15,6 \text{ cm}^2$
 $V_{Rd,5} = 0,5 * 36 * 2,9 / 1,25 + 1 / \sqrt{3} * 23,5 * 15,6 / 1,0 = 253,1 \text{ kN}$
 - 6) $h_p = 240 \text{ mm} \geq 2,73 * 45 = 122,9 \text{ mm}$
 $V_{Rd,6} = \infty$
 - 7) $z_p = z = 45 \text{ mm} \leq t_p / 0,15 = 12 / 0,15 = 80 \text{ mm}$
 $V_{Rd,7} = V_{Rd,6} = \infty$
 - 8) $F_{b,hor,Rd} = 1,0 * 0,71 * 76,4 = 54,2 \text{ kN}$
 $F_{b,ver,Rd} = 1,0 * 0,71 * 106 = 75,3 \text{ kN}$
 $V_{Rd,8} = 1 / \sqrt{((1/3)/75,3)^2 + ((9/26)/54,2)^2} = 128,7 \text{ kN}$
 - 9) $A_{b,v} = 0,71 * 30 = 21,3 \text{ cm}^2$ (vereinfacht)
 $V_{Rd,9} = 21,3 * 23,5 / \sqrt{3} = 289,0 \text{ kN}$
 - 10) $A_{b,v,net} = 21,3 - 3 * 2,2 * 0,71 = 16,6 \text{ cm}^2$
 $V_{Rd,10} = 16,6 * 36 / (\sqrt{3} * 1,25) = 276,0 \text{ kN}$
 - 11) $A_{nt} = 0,71 * (3,5 - 2,2/2) = 1,7 \text{ cm}^2$
 $A_{nv} = 0,71 * (8,5 + (3 - 1) * 6,5 - (3 - 0,5) * 2,2) = 11,4 \text{ cm}^2$
 $V_{Rd,11} = 0,5 * 36 * 1,7 / 1,25 + 1 / \sqrt{3} * 23,5 * 11,4 / 1,0 = 178,7 \text{ kN}$
-
- (1) $V_{Rd} = V_{Rd,8} = 128,7 \text{ kN} < \min(174,1; \infty) = 174,1 \text{ kN} \checkmark$
 - (2) $F_{b,hor,Rd} = 54,2 \text{ kN} \leq \min(120,6; \infty) = 120,6 \text{ kN} \checkmark$
 - (3) $V_{Rd,1} = 174,1 > \min(217,6; 128,7) = 128,7 \text{ kN} \checkmark$

Anlage 8: Bsp. 7 - Doppelwinkelanschluss (Träger-Träger)



Rotationskapazität nach [4]:

(1) $h_p = 150 \text{ mm}; d_b = 300 - 2 * 10,7 - 2 * 15 = 248,6 \text{ mm}$

$h_p = 150 \text{ mm} \leq d_b = 248,6 \text{ mm}$ ✓

(2) $z = 60 \text{ mm}; g_h = 10 \text{ mm}; h_e = 110 \text{ mm}$

$z = 60 \text{ mm} > \sqrt{(60 - 10)^2 + (150/2 + 110)^2} = 191,6 \text{ mm}$ ✗

$\phi_{vorh} = \arcsin(60 / \sqrt{(60 - 10)^2 + (150/2 + 110)^2})$

$-\arctan((60 - 10) / (150/2 + 110)) = 0,055 \text{ rad}$

(3) ϕ_{erf} mit eigenem System: (a) $L_b = 5,0 \text{ m}$ und (b) $L_b = 10,0 \text{ m}$

$V_{z,Ed} = 75 \text{ kN}$

(a) $p = 2 * (75/1,35) / 5,0 = 22,2 \text{ kN/m}$

$\phi_{erf} = 1,35 * 22,2 / 100 * 500^3 / (24 * 21000 * 8356) = 0,009 \text{ rad}$

(b) $p = 2 * (75/1,35) / 10,0 = 11,1 \text{ kN/m}$

$\phi_{erf} = 1,35 * 11,1 / 100 * 1000^3 / (24 * 21000 * 8356) = 0,036 \text{ rad}$

(4) (a) $\phi_{vorh} = 0,055 \text{ rad} > \phi_{erf} = 0,009 \text{ rad}$ ✓

(b) $\phi_{vorh} = 0,055 \text{ rad} > \phi_{erf} = 0,036 \text{ rad}$ ✓

Duktilität nach [4]:

- Schraube:

$d = 20 \text{ mm}; t_p = 10 \text{ mm}; t_{w,IPE300} = 7,1 \text{ mm}; t_{w,IPE400} = 8,6 \text{ mm}$

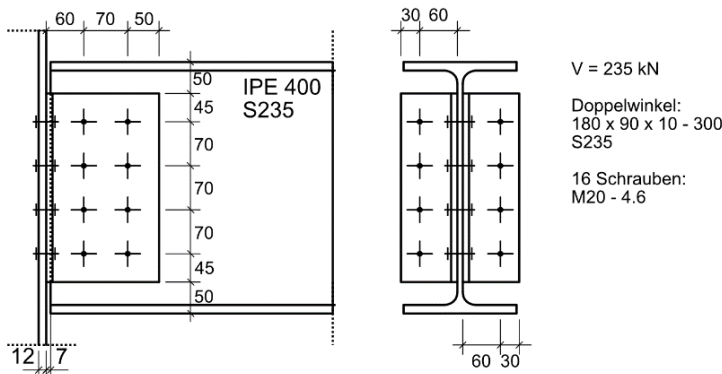
$f_y = 235 \text{ N/mm}^2; f_{ub} = 400 \text{ N/mm}^2$

$d/t_p = 20/10 = 2,0 \geq 2,8 * \sqrt{235/400} = 2,15$ ✗

$d/t_w = 20/7,1 = 2,8 \geq 2,8 * \sqrt{235/400} = 2,15$ ✓

$d/t_w = 20/8,6 = 2,3 \geq 2,8 * \sqrt{235/400} = 2,15$ ✓

Anlage 9: Bsp. 8 - Doppelwinkelanschluss (Träger-Stütze)



Rotationskapazität nach [4]:

(1) $h_p = 300 \text{ mm}; d_b = 400 - 2 * 13,5 - 2 * 21 = 331 \text{ mm}$

$h_p = 300 \text{ mm} \leq d_b = 331 \text{ mm}$ ✓

(2) $z = 95 \text{ mm}; g_h = 7 \text{ mm}; h_e = 50 \text{ mm}$

$z = 95 \text{ mm} > \sqrt{(95 - 7)^2 + (300/2 + 50)^2} = 218,5 \text{ mm}$ ✗

$\phi_{vorh} = \arcsin(95/\sqrt{(95 - 7)^2 + (300/2 + 50)^2})$

$-\arctan((95 - 7)/(300/2 + 50)) = 0,035 \text{ rad}$

(3) ϕ_{erf} mit eigenem System: (a) $L_b = 5,0 \text{ m}$ und (b) $L_b = 10,0 \text{ m}$

$V_{z,Ed} = 235 \text{ kN}$

(a) $p = 2 * (235/1,35)/5,0 = 69,6 \text{ kN/m}$

$\phi_{erf} = 1,35 * 69,6/100 * 500^3/(24 * 21000 * 23128) = 0,01 \text{ rad}$

(b) $p = 2 * (235/1,35)/10,0 = 34,8 \text{ kN/m}$

$\phi_{erf} = 1,35 * 34,8/100 * 1000^3/(24 * 21000 * 23128) = 0,04 \text{ rad}$

(4) (a) $\phi_{vorh} = 0,035 \text{ rad} > \phi_{erf} = 0,01 \text{ rad}$ ✓

(b) $\phi_{vorh} = 0,035 \text{ rad} > \phi_{erf} = 0,04 \text{ rad}$ ✗

Duktilität nach [4]:

- Schraube:

$d = 20 \text{ mm}; t_p = 10 \text{ mm}; t_w = 8,6 \text{ mm}; t_{cf} = 12 \text{ mm}$

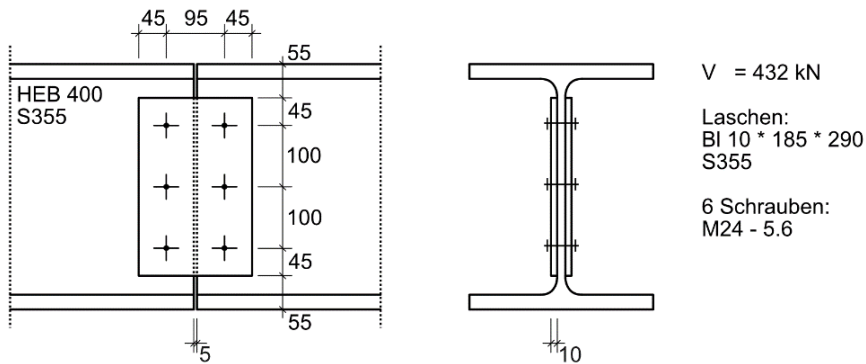
$f_y = 235 \text{ N/mm}^2; f_{ub} = 400 \text{ N/mm}^2$

$d/t_p = 20/10 = 2,0 \geq 2,8 * \sqrt{235/400} = 2,15$ ✗

$d/t_w = 20/8,6 = 2,3 \geq 2,8 * \sqrt{235/400} = 2,15$ ✓

$d/t_{cf} = 20/12 = 1,7 \geq 2,8 * \sqrt{235/400} = 2,15$ ✗

Anlage 10: Bsp. 11 - Steglaschenstoß (Träger-Träger)



Rotationskapazität nach [4]:

(1) $h_p = 290 \text{ mm}; d_b = 400 - 2 * 24 - 2 * 27 = 298 \text{ mm}$

$h_p = 290 \text{ mm} \leq d_b = 298 \text{ mm}$ ✓

(2) $z = 95/2 = 47,5 \text{ mm}; g_h = 2,5 \text{ mm}; h_e = 55 \text{ mm}$

$z = 47,5 \text{ mm} > \sqrt{(47,5 - 2,5)^2 + (290/2 + 55)^2} = 205 \text{ mm}$ ✗

$\phi_{vorh} = \arcsin(47,5 / \sqrt{(47,5 - 2,5)^2 + (290/2 + 55)^2})$
 $- \arctan((47,5 - 2,5) / (290/2 + 55)) = 0,013 \text{ rad}$

(3) ϕ_{erf} kann nicht berechnet werden

Duktilität nach [4]:

- Schraube:

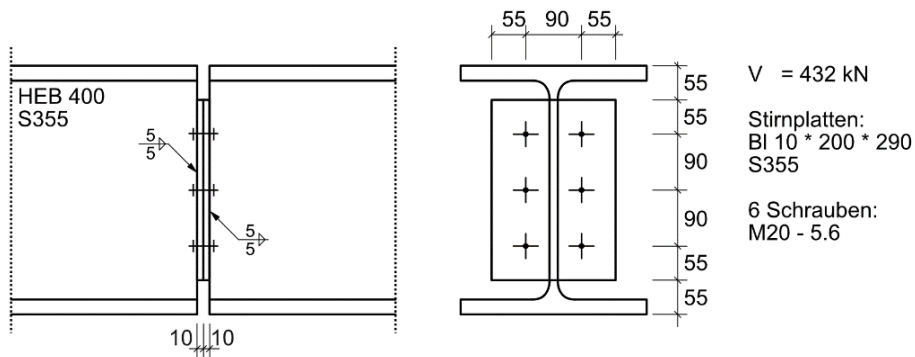
$d = 24 \text{ mm}; t_p = 10 \text{ mm}; t_w = 13,5 \text{ mm}$

$f_y = 355 \text{ N/mm}^2; f_{ub} = 500 \text{ N/mm}^2$

$d/t_p = 24/10 = 2,4 \geq 2,8 * \sqrt{355/500} = 2,36$ ✓

$d/t_w = 24/13,5 = 1,8 \geq 2,8 * \sqrt{355/500} = 2,36$ ✗

Anlage 11: Bsp. 12 - Stirnplattenstoß (Träger-Träger)



Rotationskapazität nach [4]:

(1) $h_p = 290 \text{ mm}; d_b = 400 - 2 * 24 - 2 * 27 = 298 \text{ mm}$

$h_p = 290 \text{ mm} \leq d_b = 298 \text{ mm}$ ✓

(2) $t_p = 10 \text{ mm}; h_e = 55 \text{ mm}$

$\phi_{vorh} = 10/55 = 0,182 \text{ rad}$

(3) ϕ_{erf} kann nicht berechnet werden

Duktilität nach [4]:

- Schraube:

$d = 20 \text{ mm}; t_p = 10 \text{ mm}; f_y = 355 \text{ N/mm}^2; f_{ub} = 500 \text{ N/mm}^2$

$d/t_p = 20/10 = 2,0 \geq 2,8 * \sqrt{355/500} = 2,36$ ✗

- Schweißnaht:

$a = 5 \text{ mm} \geq 0,55 * 13,5 = 7,4 \text{ mm}$ ✗