

Dr.-Ing. Joachim Kretz

# Anschlüsse nach DIN EN 1993-1-8

## Teil 3: Grundlagen zu Anschlüssen mit H- und I-Querschnitten / Kenngrößen Rotationssteifigkeit und Rotationskapazität

Mit den Bemessungsregeln für Verbindungen (Komponentenmethode) ermöglicht der Eurocode 3 Teil 1-8 die Nachweiseführung für Rahmensysteme mit verformbaren Anschlüssen, mit Ausnutzung plastischer Reserven sowie die Möglichkeit der Momentenumlagerung. Bisher ausgeschlossene Verbindungen, wie teiltragfähige und verformbare Verbindungen, erhöhen nun die Anschlussvielfalt. Die Einbeziehung der Momenten-Rotations-Charakteristik (Steifigkeit) in die Systemberechnung ermöglicht dabei eine wirtschaftliche Minimierung der Querschnitte. Infolge der Klassifizierung kann das Trag- und Verformungsverhalten realitätsnah abgebildet werden.



Grundlage der Komponentenmethode ist die Betrachtung eines Anschlusses als das Zusammenwirken einzelner Grundkomponenten. Der EC 3 enthält jedoch nur Komponenten für Anschlüsse mit zwei Schrauben in einer Reihe. Mit den Regeln des EC 3 sind aber die häufig ausgeführten Anschlüsse mit vier Schrauben in einer Reihe nicht nachweisbar. Es besteht jedoch die Möglichkeit weitere Grundkomponenten hinzuzufügen, wenn deren Kenngrößen mit Versuchen oder durch numerische Verfahren, die an Versuchen kalibriert sind, bestimmt werden.

In dem nachfolgenden Beitrag, dem Teil 3 der Fachartikel zur Komponentenmethode, werden die Kenngrößen „Rotations-

steifigkeit und Rotationskapazität“ der wesentlichen Grundkomponenten von Anschlüssen mit H- oder I-Querschnitten vorgestellt. Die Erweiterung der Komponentenmethode auf vier Schrauben in einer Reihe wird in dem Folgeartikel näher beschrieben. Wegen der Komplexität des Themas können im Rahmen dieses Artikels nur die wesentlichen Grundlagen und Berechnungsformeln angegeben und erläutert werden. Die Bestimmungsgleichungen der Grundkomponenten von zweireihigen momententragfähigen Stirnplattenverbindungen sind jedoch in DIN EN 1993-1-8 vollständig abgedruckt. Zur weiteren Vertiefung wird auf den zugrunde liegenden Teil 1-8 des EC 3 sowie auf die weiterführende Literatur verwiesen ([3] - [9], ..).

# 1 Einleitung

## 1.1 Kenngrößen – Momenten-Rotations-Charakteristik

Die Charakteristik eines Anschlusses ist im allgemeinen ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem einwirkenden Moment  $M_{j,Ed}$  und der relativen Verdrehung  $\phi_{Ed}$ . Im statischen Modell wird ein Anschluss durch eine Rotationsfeder dargestellt, die die verbundenen Bauteile im Kreuzungspunkt der Schwerlinien verbindet. Wie bereits in Teil 1 [10] näher beschrieben, liefert die Momenten-Rotations-Charakteristik die drei wesentlichen Kenngrößen:

- Momenten Tragfähigkeit
- Rotationssteifigkeit
- Rotationskapazität

Die Momenten-Rotations-Charakteristik eines Anschlusses hängt von den Kenngrößen seiner Grundkomponenten ab, die Tabelle 6.1 des EC 3 [1] zu entnehmen sind.

## 1.2 Allgemeines / Klassifizierung

Über die Ermittlung der Rotationssteifigkeit eines Anschlusses erfolgt der Nachweis, ob ein Anschluss starr, verformbar oder gelenkig einzustufen ist. Bei einem starren Anschluss sind die Anschlussrotationen derart klein, dass sie keinen Einfluss auf die Tragwerksberechnung haben. Ist die Anfangssteifigkeit  $S_{j,ini}$  größer als die in Bild 1 angegebene Grenzkurve 1, gilt der Anschluss als starr.

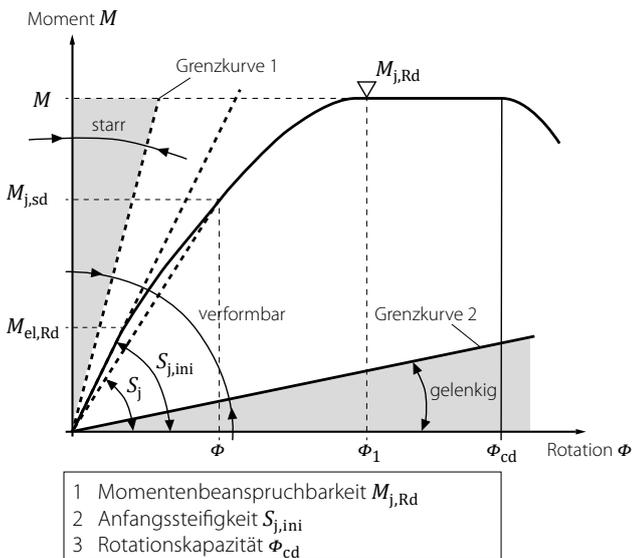
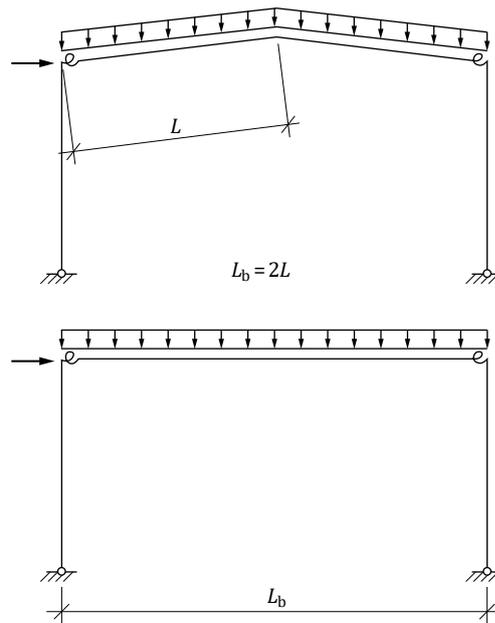


Bild 1. Anschlussklassifizierung

Die Grenzkurven ermitteln sich aus der Steifigkeit des angeschlossenen Trägerquerschnitts bezogen auf die Trägerlänge als Maß für die Steifigkeit des Tragsystems. Dabei wird zwischen ausgesteiften und nicht ausgesteiften Rahmentragwerken unterschieden. Zusatzverformungen aus den Anschlussverdrehungen führen zu höheren Beanspruchungen (des Trägers) infolge von Theorie II. Ordnungseffekten.

Die Grenzwerte zur Klassifizierung der Anschlüsse sind in Bild 2 dargestellt.



### Träger-Stützen-Anschlüsse bei verschieblichen Rahmen:

- gelenkiger Anschluss:  $S_{j,ini} \leq 0,5 El_b / L_b$
- nachgiebiger Anschluss:  $0,5 El_b / L_b < S_{j,ini} < 25 El_b / L_b$
- starrer Anschluss:  $S_{j,ini} \geq 25 El_b / L_b$

### Träger-Stützen-Anschlüsse bei unverschieblichen Rahmen:

- gelenkiger Anschluss:  $S_{j,ini} \leq 0,5 El_b / L_b$
- nachgiebiger Anschluss:  $0,5 El_b / L_b < S_{j,ini} < 8 El_b / L_b$
- starrer Anschluss:  $S_{j,ini} \geq 8 El_b / L_b$

### Trägerstöße:

- gelenkiger Anschluss:  $S_{j,ini} \leq 0,5 El_b / L_b$
- nachgiebiger Anschluss:  $0,5 El_b / L_b < S_{j,ini} < 25 El_b / L_b$
- starrer Anschluss:  $S_{j,ini} \geq 25 El_b / L_b$

$S_{j,ini}$	Anfangssteifigkeit
$E$	Elastizitätsmodul
$I_b$	Trägheitsmoment des Trägers
$L_b$	Trägerlänge

Bild 2. Anschlussklassifizierung nach der Rotationssteifigkeit

## 2 Rotationssteifigkeit von Stützen-Riegel Verbindungen

### 2.1 Prinzipielle Vorgehensweise / Grundmodell

Dem Prinzip der Komponentenmethode folgend wird die Momenten-Rotationskurve für den Anschluss aus den Kraft-Verformungskurven der einzelnen Grundkomponenten ermittelt. Damit eine realistische Steifigkeitsberechnung erfolgen kann, ist zunächst die Bestimmung aller Einzelsteifigkeiten des Anschlusses notwendig. Die Steifigkeitskoeffizienten für die einzelnen Grundkomponenten sind der Tabelle 6.11 [1] zu entnehmen. Die Verformungen der Schweißnähte, die als starre Verbindungen angenommen werden, sind derart klein, dass sie bei der Berechnung der Rotationssteifigkeit vernachlässigt werden können.

Für geschraubte Anschlüsse mit Stirnblechverbindungen sind die Grundkomponenten zur Berechnung der Rotationssteifigkeit in Tabelle 6.10 [1] angegeben. In einem ersten Schritt werden die im Anschluss wirkenden Grundkomponenten bestimmt. Im Anschluss wird dann für jede Grundkomponente aus der zugehörigen Kraft-Verformungskurve eine für den elastischen Bereich geltende Wegfeder und daraus ein repräsentativer Steifigkeitskoeffizient  $k_i$  aus Tabelle 6.11 [1] bestimmt, mit dem das Verformungsverhalten in Form einer Feder beschreibbar ist.

Die allgemeine Kraft-Verformungsbeziehung der Wegfeder lautet:

$$F_i = k_i \cdot E \cdot \delta_i$$

mit

$F_i$	Beanspruchung der Wegfeder $i$
$k_i$	Steifigkeit der Wegfeder $i$
$E$	$E$ -Modul
$\delta_i$	Verformung der Wegfeder $i$ unter der Beanspruchung $F_i$

Die einzelnen Wegfedern werden im nächsten Schritt zu einem Gesamtfedermodell zusammengesetzt, mit dem die Momenten-Rotations-Charakteristik des Anschlusses und damit die Rotationssteifigkeit bestimmt werden kann.

Der EC 3-1-8 stellt ein Federmodell zur rechnerischen Erfassung der Anschlusssteifigkeit bereit. Für nicht ausgesteifte Stirnplattenverbindungen mit zwei oder mehr Schrauben-

reihen im Zugbereich wird das nach EC 3-1-8 [1] anzusetzende Federmodell beispielhaft erläutert.

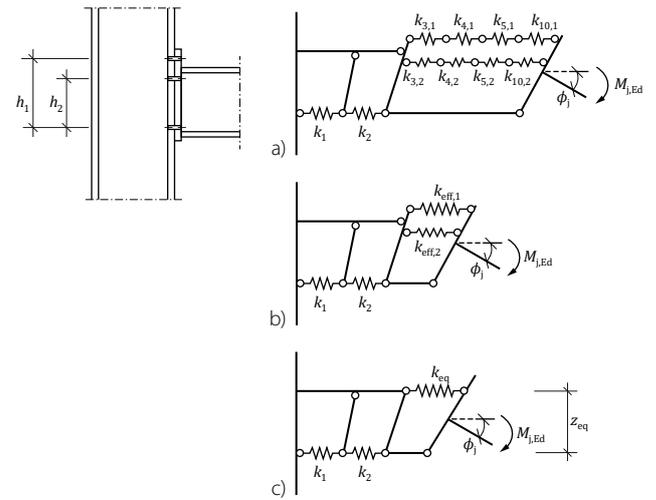


Bild 3. Federmodell eines unausgesteiften Stirnplattenanschlusses mit zwei Schrauben in der Zugzone nach [1, 3]

Bei dieser Anschlusscharakteristik sind die Verformungen der Grundkomponenten Stützenstegfeld mit Schubbeanspruchung (1), Stützensteg mit Querdruckbeanspruchung (2), Stützensteg mit Querkzugbeanspruchung (3), Stützenflansch mit Biegebeanspruchung (4), Stirnblech mit Biegebeanspruchung (5) sowie die Schrauben mit Zugbeanspruchung (10) maßgebend. Wie bereits zuvor erwähnt, werden die Verformungen der Schweißnähte (starre Verbindung) nicht betrachtet.

Die mb AEC Software GmbH ist ein etabliertes Unternehmen der Bausoftwarebranche mit Sitz am Technologiestandort Kaiserslautern. Architekten und Ingenieure entwickeln gemeinsam mit Software-Spezialisten komplette Software-Lösungen für CAD, Positionsstatik und Finite Elemente. Tragwerksplaner und Architekten aus dem gesamten Bundesgebiet und deutschsprachigen Ausland schätzen uns als kompetenten Softwarehersteller im Bereich Bauwesen.



Nach einem kontinuierlichen Wachstum in den letzten Jahren expandieren wir weiter und suchen dazu motivierte und qualifizierte Mitarbeiter/-innen für den Bereich:

## Entwicklung

### Ihr Profil:

- Abgeschlossenes Studium im Bereich Informatik, Bauingenieurwesen oder Mathematik
- Softwareentwicklung ist Ihre Passion
- Sie verfügen über Erfahrung mit C++ sowie den Standardbibliotheken und Frameworks
- Sie besitzen idealerweise erste praktische Erfahrungen in agiler Softwareentwicklung
- Sie sind davon begeistert, Neues zu probieren und zu kreieren und im Team weiterzuentwickeln

### Ihre Aufgabe:

Sie arbeiten in der Entwicklung der mb AEC Software GmbH. Gemeinsam mit Ihren Kollegen entwickeln Sie weltweit eingesetzte komplexe Softwarelösungen. Sie implementieren mit modernen Frameworks und Bibliotheken im C++ Umfeld, wissen, wie Sie effizient Werkzeuge für Ihre Aufgaben einsetzen und tragen aktiv dazu bei, dass Ihre Ideen und Lösungsvorschläge in unseren Entwicklungsalltag einfließen. Sie programmieren nicht nur, sondern begreifen Objektorientierung als Konzept und können die komplexen Anforderungen in modulare Architektur und robuste Software umsetzen. Die Entwicklung steht in ständigem Kontakt mit dem Produktmanagement und der Qualitätssicherung.

Neben einwandfreien Umgangsformen erwarten wir Leistungsbereitschaft, eigenverantwortliches Handeln und Teamfähigkeit. Freuen Sie sich auf ein spannendes Aufgabengebiet in einem aufstrebenden, innovativen Unternehmen. Es erwarten Sie ein offenes, von Teamgeist und Erfolgsorientierung geprägtes Arbeitsklima sowie ein auf langfristige Zusammenarbeit angelegter Arbeitsplatz mit attraktiven Konditionen. Auch als Berufseinsteiger sind Sie bei uns willkommen.

Ihre aussagekräftigen Bewerbungsunterlagen unter Angabe Ihrer Gehaltsvorstellung sowie eines möglichen Eintrittstermins richten Sie bitte an: mb AEC Software GmbH · Personalabteilung · Europaallee 14 · 67657 Kaiserslautern · personal@mbaec.de

Es wird angenommen, dass die Verformungen in den Achsen der Schraubenreihen proportional zu dem zugehörigen Abstand zum Druckpunkt sind. In jeder Schraubenreihe folgt die elastische Beanspruchung aus der Steifigkeit der zugehörigen Federn. Für jede Schraubenreihe  $r$  können die Federkennwerte, der in Reihe geschalteten Grundkomponenten 3, 4, 5 und 10 zu einer effektiven Feder  $k_{\text{eff},r}$  zusammengefasst werden.  $k_{\text{eff},r}$  ergibt sich dabei zu:

$$k_{\text{eff},r} = \frac{1}{\sum_r \frac{1}{k_{i,r}}}$$

Diese effektiven Federn können anschließend durch eine im Abstand  $z_{\text{eq}}$  zum Druckpunkt wirkende äquivalente Feder  $k_{\text{eq}}$  ersetzt werden. Daraus ergibt sich:

$$z_{\text{eq}} = \frac{\sum_r k_{\text{eff},r} \cdot h_r^2}{\sum_r k_{\text{eff},r} \cdot h_r}$$

und

$$k_{\text{eq}} = \frac{\sum_r k_{\text{eff},r} \cdot h_r}{z_{\text{eq}}}$$

Die Anfangssteifigkeit des Anschlusses ist definiert durch:

$$S_{j,\text{ini}} = \frac{M_j}{\phi_j} = \frac{F \cdot z}{\sum_i \frac{\delta_i}{z}} = \frac{F \cdot z^2}{E \cdot \sum_i \frac{1}{k_i}} = \frac{E \cdot z^2}{\sum_i \frac{1}{k_i}}$$

Dem Federmodell des EC 3-1-8 liegen nach [3] folgende Annahmen zugrunde:

1. Die inneren Schnittgrößen müssen mit dem äußeren Biegemoment im Gleichgewicht stehen.
2. Die Verformungen der einzelnen Grundkomponenten untereinander müssen verträglich sein. Dies wird durch die Annahme des Anschlusses an einen starren Träger gewährleistet.
3. Die Beanspruchbarkeit und die Verformbarkeit jeder Grundkomponente muss eingehalten werden.

Bei einer Momentenbeanspruchung  $M_{j,\text{Ed}} > 2/3 \cdot M_{j,\text{Rd}}$  liegt nichtlineares Verhalten in der Momenten-Rotations-Charakteristik mit einer Reduktion der Steifigkeit vor (Bild 4).

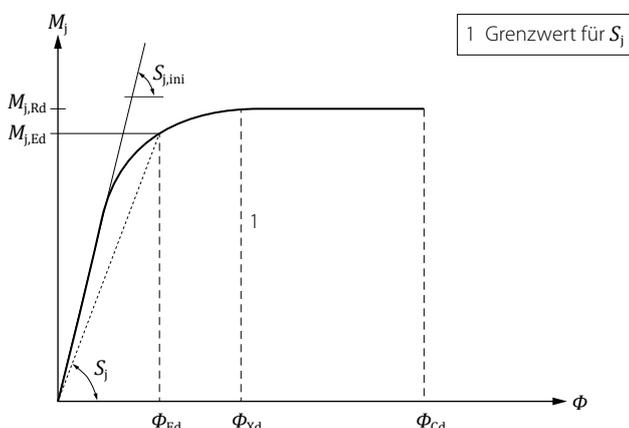


Bild 4. Momenten-Rotations-Charakteristik eines Anschlusses

In dem Berechnungsmodell wird weiter angenommen, dass bei Erreichen des Fließplateaus die Sekantensteifigkeit  $S_j$  aus der Anfangssteifigkeit mit einem konstanten Steifigkeitsverhältnis

$$\mu = \frac{S_{j,\text{ini}}}{S_j}$$

und daraus

$$S_j = \frac{1}{\mu} \cdot S_{j,\text{ini}} = \frac{E \cdot z^2}{\mu \cdot \sum_i \frac{1}{k_i}}$$

berechnet werden kann. Das Steifigkeitsverhältnis  $\mu$  folgt aus Versuchsauswertungen und Modellberechnungen und gilt bei Erreichen der vollplastischen Momententragfähigkeit  $M_{j,\text{Rd}}$ . Der nichtlineare Bereich zwischen  $2/3 \cdot M_{j,\text{Rd}}$  und  $M_{j,\text{Rd}}$  wird mit einer Interpolationsformel unter Verwendung des Formbeiwertes  $\psi$  berücksichtigt, der ein von dem Anschluss abhängiger Koeffizient ist und der nachfolgenden Tabelle entnommen werden kann.

Typ der Verbindung	$\psi$
Geschweißt	2,7
Geschraubtes Stirnblech	2,7
Geschraubte Flanschwinkel	3,1
Fußplattenverbindungen	2,7

Tabelle 1. Formbeiwerte nach [1]

Das Steifigkeitsverhältnis  $\mu$  ist für Biegebeanspruchungen  $M_{j,\text{Ed}} \leq 2/3 \cdot M_{j,\text{Rd}}$  mit 1.0 anzusetzen. Im nichtlinearen Bereich zwischen  $2/3 \cdot M_{j,\text{Rd}} \leq M_{j,\text{Ed}} \leq M_{j,\text{Rd}}$  ermittelt sich das Steifigkeitsverhältnis zu:

$$\mu = \frac{S_{j,\text{ini}}}{S_j} = \left( \frac{1,5 \cdot M_{j,\text{Ed}}}{M_{j,\text{Rd}}} \right)^\psi$$

## 2.2 Steifigkeitskoeffizienten für die Grundkomponenten

Die Steifigkeitskoeffizienten für die Grundkomponenten eines Anschlusses sind in Tabelle 6.11 [1] angegeben. Die wesentlichen Steifigkeitskoeffizienten  $k_i$  für die Federn der Grundkomponenten von geschraubten Stirnblechverbindungen werden nachfolgend kurz angegeben.

### 2.2.1 Stützenstegfeld auf Schub (Grundkomponente 1)

Es wird angenommen, dass die Schubspannungen  $\tau$  über die Ränder des Schubfeldelementes konstant sind. Das Schubfeldelement verformt sich zu einem Parallelogramm mit dem Schubwinkel  $\gamma$ . Die elastische Grundgleichung des Schubfeldelementes lautet:

$$\gamma = \frac{\delta}{z}$$

mit

$$V_{\text{wp}} = A_{\text{vc}} \cdot \tau \quad \text{und} \quad \tau = G \cdot \gamma \quad \text{folgt}$$

$$F = \frac{A_{\text{vc}} \cdot G \cdot \delta}{\beta \cdot z} \quad \text{mit} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{und} \quad \nu = 0.3$$

$$k_1 = \frac{A_{\text{vc}}}{2 \cdot (1+\nu) \cdot \beta \cdot z} \approx \frac{0.38 \cdot A_{\text{vc}}}{\beta \cdot z}$$



### 2.2.2 Stützensteg auf Zug oder Druck (Grundkomponenten 2 und 3)

Für den elastischen Bereich wurde von Jaspert eine Beziehung zwischen der Zug- bzw. Druckkraft  $F$ , die über den Stützenflansch in den unausgesteiften Stützensteg eingeleitet wird, und der Verformung des Stützensteges hergeleitet.

$$F = \frac{E \cdot t_{wc}}{d_c \cdot \xi \cdot \delta}$$

mit

$t_{wc}$	Dicke des Stützensteges
$d_c$	Höhe des Stützensteges
$\xi$	Koeffizient in Abhängigkeit des Steifigkeitsverhältnisses von Stützenflansch und Stützensteg
$\delta_i$	Verformung der Wegfeder $i$ unter der Beanspruchung $F_i$

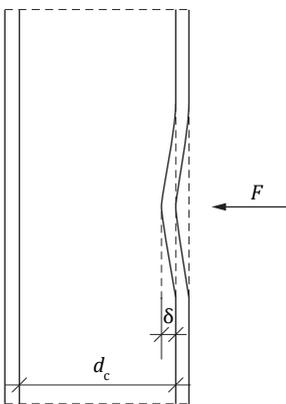


Bild 5. Stützensteg auf Zug oder Druck nach [1]

Durch die vereinfachende Annahme, dass bis zu einer Momentenbeanspruchung von  $2/3 \cdot M_{j,Rd}$  eine linearisierte Steifigkeit angenommen werden kann, ergibt sich die zugehörige Grenzbeanspruchung zu:

$$F_{el} = \frac{\xi \cdot t_{wc} \cdot E \cdot \delta}{d_c} = \xi \cdot t_{wc} \cdot E \cdot \varepsilon_{el} = \xi \cdot t_{wc} \cdot f_{y,wc}$$

Mit Hilfe der Gleichung (6.9 des EC 3-1-8) lässt sich die elastische Beanspruchbarkeit ermitteln zu:

$$F_{el} = \frac{2}{3} \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y,wc}$$

Durch Gleichsetzen der beiden Beanspruchbarkeiten  $F_{el}$  kann für den Ausdruck  $\xi$  im elastischen Bereich die Näherung  $\xi = 0.667 \cdot b_{eff,c,wc}$  abgeleitet werden.

Der Steifigkeitskoeffizient für ein auf Druck oder Zug beanspruchtes Stegblech ergibt sich dann zu:

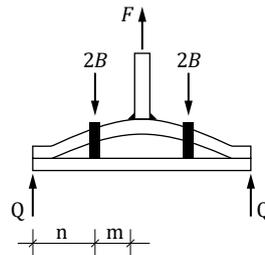
$$k_i = \frac{0.667 \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc}}{d_c} \approx \frac{0.7 \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc}}{d_c}$$

### 2.2.3 Platten auf Biegung und Schrauben auf Zug (Grundkomponenten 4, 5 und 10)

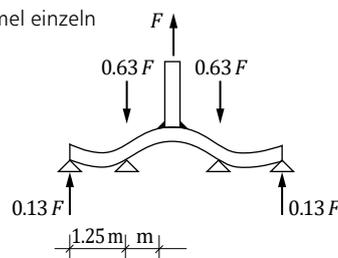
Unter der Annahme eines auf einer starren Unterlage gestützten T-Stummels werden die Beanspruchbarkeiten der Grundkomponenten Stützenflansch und Stirnplatte bestimmt. Dabei wird die wirksame Länge  $l_{eff}$  des T-Stummels zur Bestimmung der Beanspruchbarkeit so definiert, dass Versagensart und Grenzzugkraft mit der entsprechenden Komponente des Anschlusses übereinstimmen.

Für die Bestimmung der Steifigkeitskoeffizienten wird auf das T-Stummelmodell zurückgegriffen (Bild 6).

a) tatsächlich



b) T-Stummel einzeln



c) Schrauben einzeln

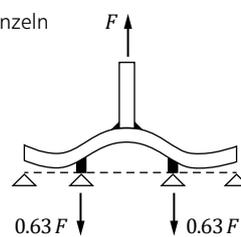


Bild 6. Elastische Verformung eines T-Stummels nach [1]

Um die gleiche Anfangssteifigkeit des T-Stummels und der entsprechenden Komponente im Anschluss zu erhalten, wird eine wirksame Länge  $l_{eff,ini}$  erforderlich. Die sich einstellenden elastischen Verformungen werden auf die einzelnen Komponenten in die Verformungsanteile aus Plattenbiegung und Schraubenverlängerung aufgeteilt. Zur Bestimmung der Steifigkeitskoeffizienten werden von Jaspert vereinfachte Werte angegeben. Aus dessen Untersuchungen abgeleitet, wird der Abstand des Druckpunktes der Abstützkräfte von den Schrauben mit  $n = 1.25 \cdot m$  angenommen.

#### Steifigkeitskoeffizient des T-Stummels:

Bei der biegebeanspruchten Stirnplatte kann die Steifigkeit mit dem Modell des T-Stummels (Ausnutzung der Symmetrie) nachgewiesen werden. Das zugrunde liegende statische Modell ist Bild 7 zu entnehmen.

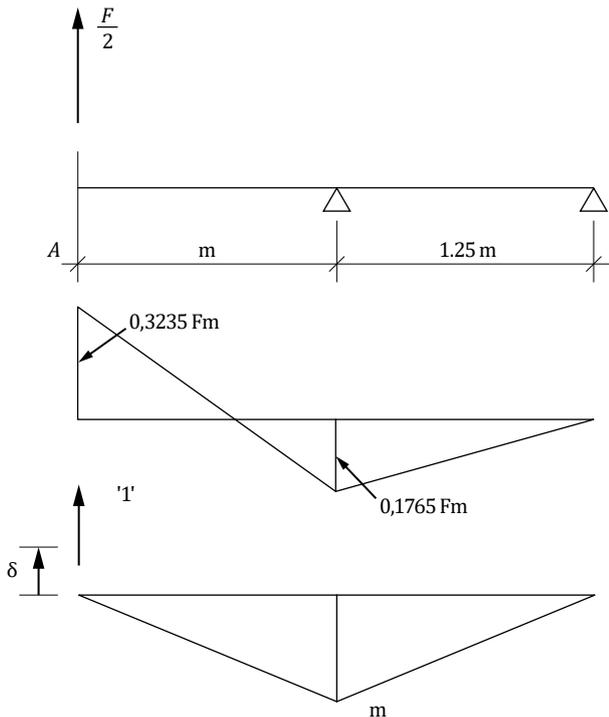


Bild 7. Statisches Modell eines T-Stummels

Die Verformung am Kraftangriffspunkt ermittelt sich aus der elastischen Schnittgrößenermittlung zu:

$$E \cdot I \cdot \delta = \frac{1}{6} \cdot (-0.3235 + 2 \cdot 0.1765) \cdot F \cdot m^2 + \frac{1}{3} \cdot 1.25 \cdot m \cdot 0.1765 \cdot F \cdot m^2 = 0.07846 \cdot F \cdot m^3$$

Das Umstellen der Gleichung nach F und unter Berücksichtigung des Trägheitsmomentes

$$I = \frac{1}{12} \cdot l_{eff,ini} \cdot t^3$$

folgt

$$F = \frac{1.0621 \cdot E \cdot \delta \cdot l_{eff,ini} \cdot t^3}{m^3}$$

und daraus

$$k_i \approx \frac{l_{eff,ini} \cdot t^3}{m^3}$$

Zur Bestimmung von  $l_{eff,ini}$  wird die maximale Momentenbeanspruchung am Übergang zum Ausrundungsradius mit dem plastischen Grenzmoment gleichgesetzt. Damit ist es möglich die zugehörige Kraft beim Eintreten des ersten plastischen Fließmomentes zu ermitteln. Im EC 3-1-8 wird das Verhältnis von elastischer zur plastischer Beanspruchbarkeit generell mit dem Faktor 1.5 berechnet. Die plastische Beanspruchbarkeit ergibt sich damit zu:

$$F_{Rd} = 1.5 \cdot F = \frac{1.159 \cdot t^2 \cdot l_{eff,ini} \cdot f_y}{m}$$

Bei vollständigem Fließen der Gurte (Versagensart 1 des T-Stummels) ergibt sich die Beanspruchbarkeit des T-Stummels mit:

$$F_{T,Rd,1} = \frac{t^2 \cdot l_{eff,1} \cdot f_y}{m}$$

Dabei ist  $l_{eff,1}$  die wirksame Länge des T-Stummels.

Durch Gleichsetzen der Tragfähigkeiten  $F_{Rd} = F_{T,Rd,1}$  ergibt sich die Steifigkeit des T-Stummels in Abhängigkeit der wirksamen Länge zu:

$$k_i = \frac{0.85 \cdot l_{eff} \cdot t^3}{m^3}$$

Dieser Wert wird in DIN EN 1993-1-8 vereinfachend angegeben mit:

$$k_i = \frac{0.90 \cdot l_{eff} \cdot t^3}{m^3}$$

### 2.2.4 Schrauben auf Zug (Grundkomponente 10)

In der Schraube steigt die Beanspruchung infolge der Abstützkräfte von  $0.50 \cdot F$  auf  $0.63 \cdot F$ . Die Schraubendehnung ermittelt sich zu:

$$\delta = \frac{0.63 \cdot F \cdot L_B}{E \cdot A}$$

mit

$L_B$  Dehnlänge der Schraube nach Bild 8

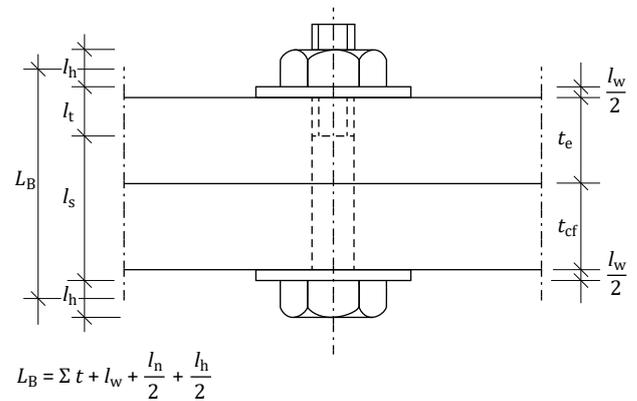


Bild 8. Schraubendehnlänge nach [1, 3]

Aus den Gleichungen für die Beanspruchung

$$0.63 \cdot F = E \cdot A \cdot \varepsilon = \frac{E \cdot A_s \cdot \delta}{L_B}$$

kann der Steifigkeitskoeffizient

$$k_i = \frac{1.587 \cdot A_s}{L_B} \approx \frac{1.60 \cdot A_s}{L_B}$$

bestimmt werden, der die Verformung einer Schraube auf Zug beschreibt, die sowohl für nicht vorgespannte als auch für vorgespannte Schrauben gilt.

### 2.2.5 Schrauben auf Abscheren und Lochleibung (Grundkomponenten 11 und 12)

Die Steifigkeitskoeffizienten wurden aus vielen Versuchen mit Schraubenverbindungen abgeleitet.

#### Schrauben auf Abscheren:

Für Schrauben auf Abscheren wurde der Steifigkeitskoeffizient abgeleitet zu:

$$k_i = \frac{16 \cdot n_b \cdot d^2 \cdot f_{ub}}{E \cdot d_{M16}}$$

mit

$n_b$  Anzahl der Schraubenreihen auf Schub  
 $d_{M16}$  Nenndurchmesser einer Schraube M16

#### Schrauben auf Lochleibung:

Der Steifigkeitskoeffizient für Schrauben auf Lochleibung beträgt:

$$k_i = \frac{25 \cdot n_b \cdot k_b \cdot k_t \cdot d \cdot f_u}{E}$$

mit

$k_b = k_{b1}$  jedoch  $k_b \leq k_{b2}$   
 $k_{b1} = 0.25 \cdot e_b/d + 0.50$  jedoch  $k_{b1} \leq 1.25$   
 $k_{b2} = 0.25 \cdot p_b/d + 0.375$  jedoch  $k_{b2} \leq 1.25$   
 $k_t = 1.50 \cdot t_j/d_{M16}$  jedoch  $k_t \leq 2.50$

wobei

$e_b$  Randabstand der Schraubenreihe in Krafrichtung  
 $f_u$  Zugfestigkeit des Stahls, der auf Lochleibung beansprucht ist  
 $p_b$  Abstand der Schraubenreihen in Krafrichtung  
 $t_j$  Dicke des auf Lochleibung beanspruchten Bleches

## 3 Rotationskapazität

### 3.1 Allgemeines

In Abhängigkeit von der Ausführung können momententragfähige Anschlüsse ein ausgeprägtes nichtlineares Momenten-Rotationsverhalten mit großen duktilen Rotationen zeigen (Bild 9a).

Das Rotationsverhalten ist gekennzeichnet durch einen anfänglich linearen Verlauf mit der Anfangssteifigkeit  $S_{j,ini}$ , dem ein ausgeprägtes plastisches Verhalten bis zum Erreichen der Momentenbeanspruchbarkeit folgt. Infolge der Materialverfestigung steigt die Beanspruchbarkeit bei weiterer Erhöhung der Beanspruchung an. Die Rotationen wachsen weiter an.

Eine begrenzte Duktilität und damit ein begrenztes Rotationsvermögen zeigen Anschlüsse, bei denen einzelne Komponenten die plastische Tragfähigkeit mit großen plastischen Verformungen erreichen und anschließend infolge von Instabilität versagen (Bild 9b).

Ein nichtduktiler Verhalten zeigen Anschlüsse, bei denen durch das frühzeitige Versagen einzelner Grundkomponenten nur eine begrenzte Momententragfähigkeit erreicht wird. Die zugehörige Momenten-Rotations-Charakteristik ist in Bild 9c dargestellt.

Über eine ausreichende Rotationskapazität müssen die Anschlüsse an den Stellen verfügen, an denen bei starr-plastischer Berechnung Gelenke auftreten können (Bild 10).

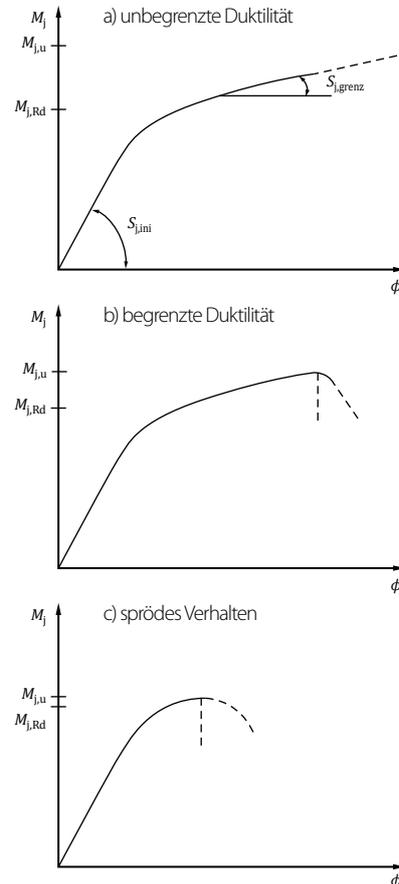


Bild 9. Momenten-Rotationskurven nach [3]

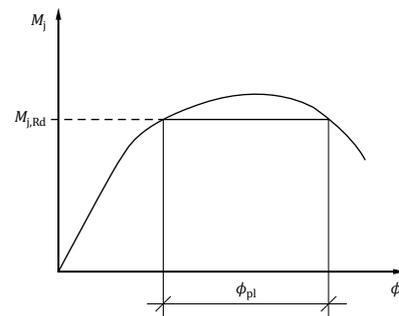


Bild 10. Plastische Rotationskapazität

### 3.2 Geschraubte Anschlüsse

Die Bestimmung der Rotationskapazität kann mit dem in Bild 11 dargestellten Ablaufdiagramm auf der Grundlage der DIN EN 1993-1-8 erfolgen. Sofern die Grundkomponenten eines geschraubten Anschlusses wie Stützensteg auf Schub (1), Biegung des Stützenflansches (4), Biegung der Stirnplatte (5) und/oder Biegung der Flanschwinkel (6) maßgebend werden, sind ausreichend duktile Verformungen möglich.



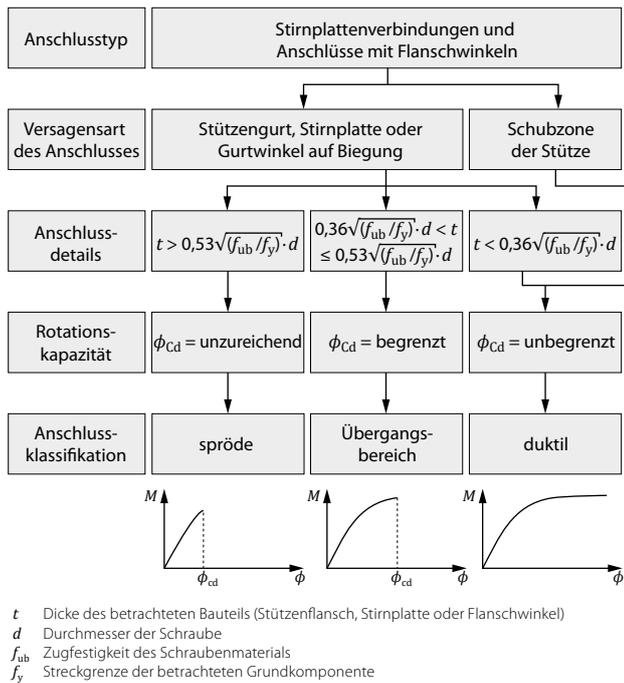


Bild 11. Bewertung der Rotationskapazität geschraubter Anschlüsse nach [3]

Von einer ausreichenden Rotationskapazität für eine starr-plastische Berechnung kann ausgegangen werden, wenn die Momentenbeanspruchbarkeit durch die Schubbeanspruchbarkeit des Stützensteiges bestimmt wird. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass sich eine plastische Schubverzerrung des Stützensteiges ohne Beulen einstellen kann. Dies ist dann der Fall, wenn die Grenzsclankheit nach 6.2.6.1 [1] eingehalten wird.

Bei einer Begrenzung der Momententragfähigkeit infolge der Grundkomponenten Biegebeanspruchbarkeit des Stützenflansches (4), der Stirnplatte (5) oder der Flanschwinkel (6) liegt eine ausreichende Rotationskapazität für eine starr-plastische Berechnung vor, wenn das Versagen durch ausgeprägte plastische Biegeverformungen der Plattenkomponenten erfolgt und nicht durch Schraubenversagen. Diese Versagensform kann erzeugt werden, indem die Grenzwerte für die verwendeten Blechdicken im Verhältnis zur Dicke der Schrauben eingehalten werden.

Sofern die Schrauben für das Versagen maßgebend werden, kann nicht von einer ausreichenden Rotationskapazität für eine starr-plastische Berechnung ausgegangen werden.

#### 4 Wirtschaftlichkeit der Anschlüsse / der Konstruktion

Durch eine gemeinsame Betrachtung von Material- und Fertigungskosten kann die Wirtschaftlichkeit eines Stahlbaus beurteilt werden. Ein Gesamtoptimum wird erreicht, wenn:

- eine möglichst hohe Ausnutzung der Bauteile erreicht wird. Dazu ist eine möglichst genaue Beschreibung des Bauteilverhaltens erforderlich.
- eine kostengünstige Fertigung und eine einfache Montage gewährleistet ist. Dazu sind die Anschlüsse entsprechend den Anforderungen anzupassen.

Vergleichsberechnungen von Weyand, Jaspart und Steenhuis, die in der Literatur [7] angegeben sind, haben gezeigt, dass ein gesamtheitliches Kostenminimum mit Anschlüssen erzielt wird, die signifikante Momente übertragen können, aber durch das Weglassen von Aussteifungen verformbar sind und nicht mehr als starr gelten können.

Mit dem im EC 3-1-8 angegebenen Nachweisverfahren für Anschlüsse, der Komponentenmethode, bietet sich die Möglichkeit der durchgängigen Betrachtung von gelenkigen über nachgiebige bis hin zu starren Anschlüssen.

Der Anwendungsbereich der teiltragfähigen und verformbaren Anschlüsse, der erst durch die Regelungen im EC 3-1-8 nachweisbar wurde, bietet die Möglichkeit der wirtschaftlichen Auslegung von Stahlkonstruktionen, wie dies in Bild 12 dargestellt ist.

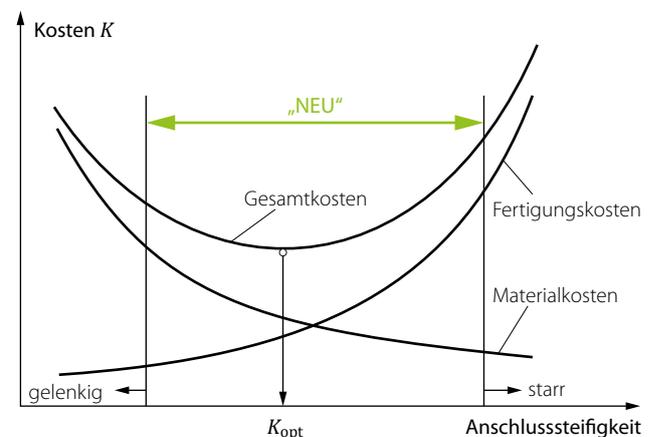


Bild 12. Kosten der Stahlkonstruktion in Abhängigkeit von der Anschlusssteifigkeit nach [5]

Für den entwerfenden Ingenieur bedeutet die Verwendung nachgiebiger Anschlüsse aber auch einen erhöhten Aufwand bei der Ermittlung der Schnittgrößen, da die Steifigkeit der Anschlüsse mittels einer Feder zu berücksichtigen sind. Dazu ist ein iterativer Nachweis-Prozess erforderlich.

#### 5 Anschlussbeispiele / nachgiebige Anschlüsse

Als Einführungsbeispiel wird ein verschiebliches Rahmensystem mit biegesteifen Rahmenecken betrachtet. Die Länge der Rahmenstiele beträgt 4 m, die Stützweite des Rahmenriegels ist 10 m. Als Profile der Rahmenstiele werden Walzprofile HEA 360 und als Riegelprofil ein HEA 400 ausgeführt. Die Profile sowie die Anschlusskomponenten besitzen die Materialgüte S 235.

Die Beanspruchung des Anschlusses soll betragen:

$$M_{y,Ed} = 167 \text{ kNm}$$

$$V_{z,Ed} = 302 \text{ kN}$$

### 5.1 Ausführung als typisierte Verbindung

In einer ersten Berechnung wird der Anschluss als typisierte Verbindung d. h. als momententragfähiger Stirnplattenanschluss IH 3.1 nach [12] nachgewiesen.

Als momententragfähiger Anschluss wird der Anschluss IH 3.1 A 40 20 gewählt. An den durch Stegsteifen ausgesteiften Stiel (HEA 360) wird mit einer überstehende Stirnplattenverbindung ein Riegelprofil HEA 400 angeschlossen (Bilder 13 und 14). Im Anschluss werden pro Reihe zwei Schrauben der Güte 10.9 ausgeführt.

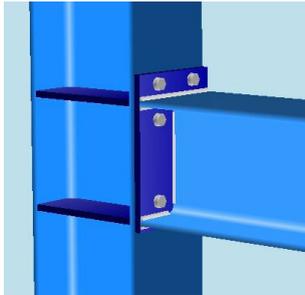


Bild 13. Momententragfähiger Anschluss IH 3.1 A 40 20 gemäß typisierter Verbindung

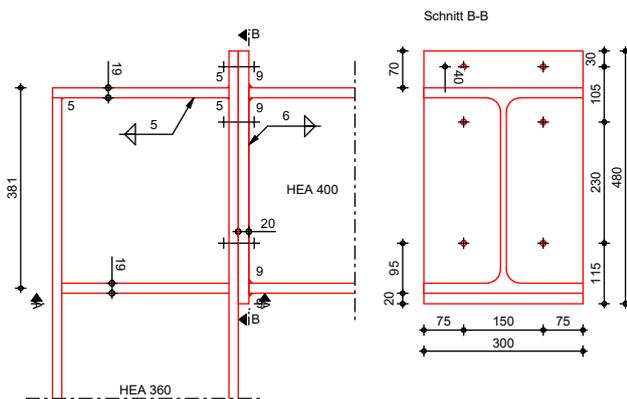


Bild 14. Anschlussdarstellung gemäß typisierter Verbindung IH 3.1 A 40 20 (Ansicht / Schnitt mit S680.de)

Die Berechnung nach der Komponentenmethode liefert nachfolgende Tragfähigkeits- und Steifigkeitswerte:

**Tragfähigkeit:**

$$M_{j,Rd} = 208.8 \text{ kNm} \geq 167.0 \text{ kNm}$$

$$M_{el,j,Rd} = 139.2 \text{ kNm}$$

$$V_{j,Rd} = 332.1 \text{ kNm} \geq 302.0 \text{ kNm}$$

**Steifigkeit:**

$$S_{j,ini} = 66.11 \cdot 10^3 \text{ kNm/rad}$$

$$S_j = 33.10 \cdot 10^3 \text{ kNm/rad}$$

**Klassifizierung:**

Unter Anwendung der Bestimmungsgleichungen für ein verschiebliches Rahmensystem nach Bild 2 erfolgt die Klassifizierung des Anschlusses:

Tragfähigkeit: teiltragfähig  
 Steifigkeit: starr

Als teiltragfähig wird der Anschluss deshalb klassifiziert, weil die Anschlusstragfähigkeit ( $M_{j,Rd} = 208.8 \text{ kNm}$ ) geringer als die plastische Tragfähigkeit des Riegelprofils ( $M_{c,Rd} = 490.8 \text{ kNm}$ ) ist.

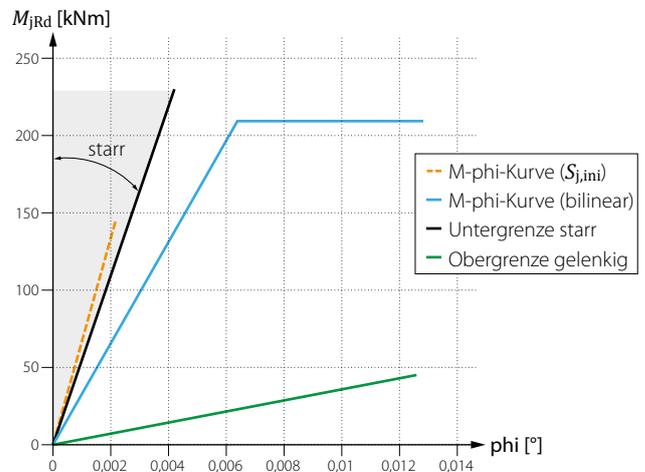


Bild 15. Momenten-Rotations-Charakteristik IH 3.1 A 40 20

Die Anfangssteifigkeit liegt innerhalb der Grenzlinie 1, also im Bereich der als starr definiert ist. Infolge der Klassifizierung als starrer Anschluss treten keine (genauer: sehr geringe) Rotationen im Anschluss auf, so dass keine weiteren Auswirkungen auf die Schnittgrößen im Rahmensystem untersucht werden müssen.

Der typisierte Anschluss IH 3.1 A 40 20 ist für die vorgegebene Beanspruchung ausreichend tragfähig und ausreichend steif. Die Herstellung des ausgesteiften biegesteifen Anschlusses ist jedoch wegen der Steifen recht kostenintensiv. In einer nächsten Berechnung wird deshalb eine Anschlussvariante ohne Steifen untersucht.

### 5.2 Ausführung als unausgesteifte Verbindung

In einer Variantenberechnung wird der unter 5.1 dargestellte, ausgesteifte Anschluss ohne Steifen nach der Komponentenmethode berechnet. Bild 16 zeigt die unausgesteifte Ausführung des Anschlusses.

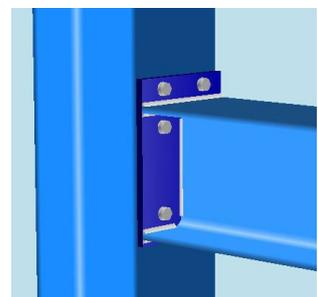


Bild 16. Verformbarer, unausgesteifter Anschluss

Die Berechnung nach der Komponentenmethode liefert nachfolgende Tragfähigkeits- und Steifigkeitswerte:

**Tragfähigkeit:**

$$M_{j,Rd} = 177.4 \text{ kNm} \geq 167.0 \text{ kNm}$$

$$M_{el,j,Rd} = 118.3 \text{ kNm}$$

$$V_{j,Rd} = 332.1 \text{ kNm} \geq 302.0 \text{ kNm}$$

**Steifigkeit:**

$$S_{j,ini} = 42.22 \cdot 10^3 \text{ kNm/rad}$$

$$S_j = 21.11 \cdot 10^3 \text{ kNm/rad}$$

**Klassifizierung:**

Unter Anwendung der Bestimmungsgleichungen für ein verschiebliches Rahmensystem nach Bild 2 erfolgt die Klassifizierung des Anschlusses:

Tragfähigkeit: teiltragfähig

Steifigkeit: verformbar

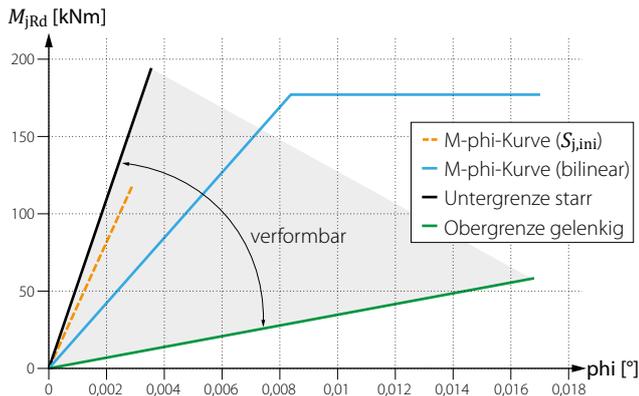


Bild 17. Momenten-Rotations-Charakteristik

Die Anfangssteifigkeit liegt außerhalb der Grenzlinie 1, also im Bereich der als verformbar definiert ist. Infolge der Klassifizierung als verformbarer Anschluss sind die Auswirkungen der Anschlussrotationen auf die Schnittgrößen (Umlagerungen) des Rahmensystems zu untersuchen.

Die Tragfähigkeit der unausgesteiften Anschlüsse ist ausreichend, um die Anschlussbeanspruchungen aufnehmen zu können. In einem weiteren Berechnungsschritt sind nun die Anschluss- und Systembeanspruchungen unter Berücksichtigung der Veränderungen aus der Nachgiebigkeit der Anschlüsse (Rotationsfeder) zu ermitteln und erneut mit den Tragfähigkeiten und Verformungen zu vergleichen. Dies ist ein iterativer Prozess.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im dritten Teil des Artikels zur Berechnung von momententragfähigen Anschlüssen nach DIN EN 1993-1-8 wurden die wesentlichen Grundlagen zu den Kenngrößen „Rotationssteifigkeit“ und „Rotationskapazität“ der einzelnen Grundkomponenten für geschraubte, momententragfähige Stützen-Riegel-Anschlüsse angegeben. Darüber hinaus wurde ein erstes Beispiel zur wirtschaftlichen Bemessung eines momententragfähigen Anschlusses unter Berücksichtigung der Momenten-Rotations-Charakteristik im Prinzip vorgestellt.

In der Fortführung der Fachartikel zur Komponentenmethode wird die Erweiterung der Komponentenmethode auf die Berechnung von Anschlüssen mit vier Schrauben in einer Reihe beschrieben. Darüber hinaus wird beispielhaft die Berechnung des Gesamtsystems (verschiebliche Rahmenkonstruktion) unter Berücksichtigung der Momenten-Rotations-Charakteristik durchgeführt.

Dr.-Ing. Joachim Kretz  
mb AEC Software GmbH  
mb-news@mbaec.de

## Normen und Literatur

- [1] DIN EN 1993-1-8:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Stahlbauten. Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005 + AC:2009.
- [2] DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.
- [3] Ungermann, D.; Puthli, R.; Ummenhofer, T.; Weynand, K.: Eurocode 3 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Band 2: Anschlüsse; DIN EN 1993-1-8 mit Nationalem Anhang Kommentar und Beispiele. Bauforumstahl e.V., Düsseldorf, August 2015.
- [4] AiF: Entwicklung eines Bemessungsmodells für geschraubte, momententragfähige Kopfplattenverbindungen mit 4 Schrauben in einer Schraubenreihe auf Grundlage der prEN 1993-1-8:2003. Bericht zum Forschungsvorhaben AiF-Nr. 15059, 2010.
- [5] Ungermann, D.; Schneider, S.: Momententragfähige Verbindungen nach DIN EN 1993-1-8 (EC3-1-3). In "Dresdner Stahlbaufachtagung", März 2014.
- [6] Wagenknecht, G.: Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3, Band 3 Komponentenmethode, 2. akt. Auflage, Beuth Verlag GmbH, März 2017.
- [7] Ungermann, D.; Weynand, K.; Jaspert, J.-P.; Schmidt, B.: Momententragfähige Anschlüsse mit und ohne Steifen. In "Stahlbau Kalender 2005", Ernst & Sohn, Berlin 2005.
- [8] Schwarzlos, A.: Erweiterung der Komponentenmethode nach EC 3-1-8 um die Interaktion der Schnittgrößen Biegemoment und Normalkraft. Dissertation TU Cottbus, 2005.
- [9] Schmidt, B.: Zum Tragverhalten von geschraubten momententragfähigen Stirnplattenverbindungen mit 4 Schrauben in jeder Schraubenreihe. Dissertation, TU Dortmund 2008.
- [10] Kretz, J.: Anschlüsse nach DIN EN 1993-1-8. Teil 1: Allgemeine Grundlagen zur Anschlussbemessung / Komponentenmethode. In mb-news 4/2017.
- [11] Kretz, J.: Anschlüsse nach DIN EN 1993-1-8. Teil 2: Allgemeine Grundlagen zur Anschlussbemessung / Komponentenmethode. In mb-news 5/2017.
- [12] Weynand, K.; Oeder, R.: Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau nach DIN EN 1993-1-8. Gesamtausgabe 2013. Stahlbau Verlags- und Service GmbH Düsseldorf 2013.