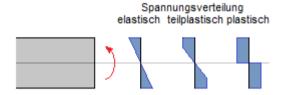
Berechnung vorgespannter Schraubverbindungen mit dem Programm 4H-EC3FS

Im Programm 4H-EC3FS – Stirnplattenstoß mit frei definierbarem Schraubenbild und beliebig berandeter Stirnplatte – können sowohl die Stirnplatte als auch die Schrauben elastisch oder plastisch berechnet werden. Ebenso kann die Vorspannung der Schrauben (i.A. Regelvorspannung) berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich die Fragestellung, inwieweit sich die Berechnungsmethode (elastisch-plastisch bzw. plastisch-plastisch) und die Schraubenvorspannung auf das Tragverhalten auswirken, und ob die Ergebnisse der Berechnung den Vorgaben des EC 3-1-8 entsprechen.

Im Folgenden wird das Vorgehen bei der plastischen Berechnung des Systems sowie die Problematik der Vorspannung erläutert und an Hand von Testrechnungen diskutiert.

Plastische Berechnung der Stirnplatte

Zunächst wird der Spannungsverlauf über die Dicke der Stirnplatte ermittelt. Überschreitet die vorhandene die zulässige Spannung, beginnt die Platte vom Rand her zu plastizieren, d.h. es wird ein neuer Gleichgewichtszustand gebildet, bei dem die Randspannung der zul. Spannung entspricht.



So entstehen Bereiche in der Stirnplatte, die elastisch, teilplastisch oder voll durchplastiziert sind. Obwohl bei Plastizierung keine Belastung mehr aufgenommen werden kann, wachsen die Dehnungen jedoch weiter an, bis auch sie ihren zulässigen Wert erreicht haben. Ist die maximale plastische Dehnung erreicht, versagt das System. Es kann keine Ausnutzung berechnet werden.

Die zulässige Spannung entspricht der ggf. abgeminderten Streckgrenze des Stahls $f_{y,pl} = f_{y,f} \cdot f_{yd,}$ eine Verfestigung bei zunehmender Dehnung ist n. EC 3-1-1 nicht erlaubt.

Die maximale plastische Dehnung des Materials wird n. EC 3-1-14 auf max $\varepsilon_{y,pl}$ = 5% festgelegt.

Vorspannung der Schrauben

Die Vorspannung einer Schraube bewirkt, dass die verbundenen Bleche bei Aufbringen einer äußeren Zugkraft zunächst den Kontakt halten und somit eine Verformung der Verbindung verhindern. Dies wird insbesondere bei dynamischer Belastung sowie verformungsempfindlichen Systemen genutzt.

Dabei ist darauf zu achten, dass die Tragfähigkeit der Schraube nicht überschritten wird. Im EC 3-1-8 ist die charakteristische Zugtragfähigkeit in Abhängigkeit der Festigkeitsklasse in Tab. 3.1 angegeben:

Tabelle 3.1 — Nennwerte der Streckgrenze f_{yb} und der Zugfestigkeit f_{ub} von Schrauben

Schraubenfestigkeitsklasse	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
$f_{ m yb}$ (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f _{ub} (N/mm²)	400	400	500	500	600	800	1000

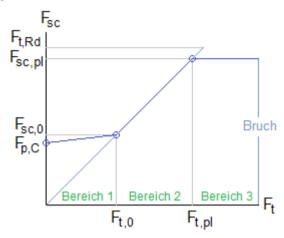
Bei Zugverbindungen wird nur die Zugfestigkeit fub der Schrauben betrachtet (EC 3-1-8, Tab. 3.4). Die Zugtragfähigkeit wird – bezogen auf das Nachweisniveau der Schrauben (EC 3-1-8, Tab. 2.1)

- berechnet mit
$$F_{t,Rd} = \frac{K_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

Die Vorspannung geht hingegen mit ihrem charakteristischen Wert $F_{p,C} \leq F_{tk} = k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s$ in die Berechnung ein.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Wagenknecht ("Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3", Band 2, 4. Auflage, S. 13ff) bzw. Lohse ("Stahlbau Teil 2", 20. Auflage, S. 297ff).

Dargestellt ist die Beziehung der inneren Schraubenkraft Fsc zur einwirkenden Zugkraft Ft.



Ohne Vorspannung entspricht die innere Schraubenkraft der einwirkenden Zugkraft, bis die Schraubentragfähigkeit F_{t,Rd} erreicht ist. Die Schraube kann keine weitere Kraft aufnehmen.

- Bei elastischer Schraubenberechnung ist die Tragfähigkeit erreicht.
- Bei plastischer Schraubenberechnung entspricht die plastische Schraubentragfähigkeit der ggf. abgeminderten Zugtragfähigkeit F_{sc,pl} = f_{t,f}·F_{t,Rd}. Bei Steigerung der Last kann diese Schraube keine weitere Kraft aufnehmen, die Schraubendehnung nimmt jedoch zu bis zum Erreichen der Grenzdehnung. Es erfolgt eine Lastumlagerung auf die Stirnplatte und noch nicht plastizierte Schrauben.

Bei plastischer Schraubenberechnung mit Vorspannung werden 3 Bereiche unterschieden:

- Im Bereich 1 ist die Vorspannung wirksam (keine Klaffung). Die Schraubenkraft steigt von F_{p,C} auf F_{sc,0} nur leicht an, da wegen der unterschiedlichen Steifigkeiten von Schraube und umgebendem Blechkörper der Blechzylinder einen Großteil der Belastung übernimmt bis die Zugkraft F_{t,0} erreicht ist. Die Vorspannkraft wird als äußere Kraft verstanden und geht mit ihrem charakteristischen Wert (s.o.) in die Beziehung ein. Näherungsweise wird für die Berechnung die Schraubenkraft gleich der Vorspannkraft gesetzt F_{sc,0} = F_{t,0} ≈ F_{p,C}.
- Im Bereich 2 ist die Vorspannung im Blechzylinder ist nicht mehr wirksam, d.h. die Verformungen des Stirnblechs nehmen zu (Klaffung). Die Schraube verhält sich linearelastisch bis die plastische Schraubentragfähigkeit erreicht ist. In diesem Bereich kann die Schraube eine zusätzliche Zugkraft von ΔFt, = Ft,pl – Ft,0 aufnehmen.
- Im Bereich 3 kann die Schraube keine weitere Kraft mehr aufnehmen. Sie plastiziert bis zum Versagen (Grenzdehnung erreicht). Die Grenzdehnung wird in Anlehnung an EC 3-1-14 auf 25% ihrer Bruchdehnung ϵ_{ub} festgelegt. Ist die Grenzdehnung überschritten, kommt es rechnerisch zum Bruch der Schraube. Damit ist sie unwirksam, d.h. die Tragfähigkeit des Systems muss ohne diese Schraube nachgewiesen werden.

Testrechnungen

Die Ergebnisse der folgenden Beispiele sollen die Zuverlässigkeit der Berechnungen mit dem Programm 4H-EC3FS im Hinblick auf die Norm EC 3-1-8 zeigen, damit auch nicht genormte Verbindungen vertrauenswürdige Ergebnisse liefern.

Es ist zu beachten, dass bei der Berechnung mit 4H-EC3FS nur die Stirnplatten-Schrauben-Interaktion berücksichtigt wird. Lokale Beanspruchungen des Trägerprofils, die sich aus der Verformung der Stirnplatte ergeben (z.B. der Schweißnähte, des Trägerdruckflanschs oder Trägerstegs), werden nicht berücksichtigt.

Die folgenden Beispiele sind dem DASt-Ringbuchs (2013) entnommen und mit dem veröffentlichten Grenzmoment belastet. Sie wurden für verschiedene Stirnplattendicken mit dem

Programm *4H*-EC3BT (Komponentenmethode n. EC 3-1-8) und *4H*-EC3FS (FE-Methode, elastisch-plastische und plastisch-plastische Berechnung der Stirnplatte, plastische Berechnungen mit $f_{t,f}$ = 1.0 und $f_{y,f}$ = 1.0) ausgewertet. Für die Beispiele wurde S235 verwendet.

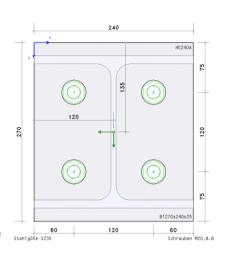
Die Ergebnisse der Komponentenmethode (*4H*-EC3BT) wurden nicht analysiert. Sie zeigen in einigen Fällen ein unplausibles Verhalten (bei geringerer Plattendicke eine geringere Tragfähigkeit) und enthalten ggf. die o.a. lokalen Effekte. Mit (*) werden die Ausnutzungen gekennzeichnet, bei denen die Schraubenkräfte nach EC3-1-8, 6.2.7.2(9) aus Linearisierung (ggf. unwirtschaftlich) gewonnen wurden.

Beispiel 1: Die Systemabmessungen entsprechen bei t_p = 25 mm der typisierten Verbindung Nr. 429 / M8.8 des DASt-Ringbuchs.

Das Beispiel ist mit dem Tragmoment des DASt-Ringbuchs M_{v.Ed} = 51,7 kNm belastet.

Ergebnis (kompakter Querschnitt mit 2 Schrauben je Reihe):

- → Die Vorspannung wirkt sich bei Zugschrauben günstig aus.
- \rightarrow Die Grenze der Tragfähigkeit bei t_p = 25 mm wird unterschätzt, wobei jedoch die Linearisierung (*) zu unwirtschaftlichen Ergebnissen führt.
- → Die plastische Berechnung aktiviert alle Reserven. Bei hoch ausgenutzten Verbindungen versagt das System, sodass keine Ausnutzung berechnet werden kann.



Ausnutzungen:

Plattendicke	4H-EC3BT	ohne Vorspannung	Vorspannung	plastisch
15 mm	107%	180%	177%	-
20 mm	100% (*)	104%	100%	100%
25 mm	100% (*)	85%	82%	71%
30 mm	100% (*)	79%	77%	71%
35 mm	100% (*)	75%	71%	71%

Erläuterung: Erste Spalte: Variation der Stirnplattendicke um die Referenzgröße (gelb unterlegt), zweite Spalte: maximale Ausnutzung der Berechnung mit 4H-EC3BT (* linearisiert), dritte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS ohne Vorspannung, vierte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS bei Ansatz der Regelvorspannkraft, fünfte Spalte: plastisch-plastische Berechnung mit Vorspannung.

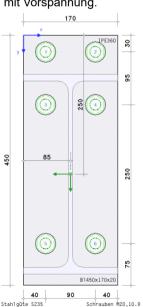
Beispiel 2: Die Systemabmessungen entsprechen bei t_p = 20 mm der typisierten Verbindung Nr. 104 / M10.9 des DASt-Ringbuchs.

Das Beispiel ist mit den Tragmomenten des DASt-Ringbuchs $M_{y,Ed}$ = -195,8 kNm / 110,8 kNm belastet.

Ergebnis (hoher Querschnitt mit 2 Schrauben je Reihe, 1 Reihe im Überstand):

- → Die Vorspannung wirkt sich bei Zugschrauben günstig aus.
- \rightarrow Die Grenze der Tragfähigkeit bei t_p = 20 mm wird bei elastischer FEM-Berechnung überschätzt.
- → Die plastische Berechnung aktiviert alle Reserven. Liegen die Zugschrauben im Bereich des oberen Flanschs (Überstand), versagt das System, da sich eine Fließkette ausbildet. Es kann keine Ausnutzung berechnet werden.





Plattendicke	4H-EC3BT	ohne Vorspannung	Vorspannung	plastisch
10 mm	207% / 182%	412% / 501%	382% / 474%	-/-
15 mm	118% / 122%	215% / 239%	194% / 230%	-/-
20 mm	100% / 100%	144% / 143%	126% / 141%	- / 100%
25 mm	90% / 102% (*)	114% / 100%	100% / 100%	- / 100%
30 mm	84% / 102% (*)	109% / 98%	95% / 100%	72% / 100%

Erläuterung: Erste Spalte: Variation der Stirnplattendicke um die Referenzgröße (gelb unterlegt), zweite Spalte: maximale Ausnutzung der Berechnung mit 4H-EC3BT (* linearisiert), dritte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS ohne Vorspannung, vierte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS bei Ansatz der Regelvorspannkraft, fünfte Spalte: plastisch-plastische Berechnung mit Vorspannung.

Beispiel 3: Die Systemabmessungen entsprechen bei t_p = 30 mm der typisierten Verbindung Nr. 458 / M10.9 des DASt-Ringbuchs.

Das Beispiel ist mit dem Tragmoment des DASt-Ringbuchs $M_{v,Ed}$ = 136,3 kNm belastet.

Die Vorgehendsweise zur Berechnung von vier Schrauben je Reihe ist im EC 3-1-8 nicht vorgeschrieben. Das DASt-Ringbuch verwendet hierzu das Verfahren aus dem Abschlussbericht des AIF-Forschungsprojekts 15059, das auch bei den Berechnungen mit dem Programm 4H-EC3BT angewandt wird.

Ergebnis (kompakter Querschnitt mit 4 Schrauben je Reihe):

- → Die Vorspannung wirkt sich nur wenig aus.
- \rightarrow Die Grenze der Tragfähigkeit bei t_p = 30 mm wird unterschätzt, wobei jedoch das Modell des AIF-Berichts ggf. unwirtschaftlich ist (zu sehr auf der sicheren Seite liegt).



HE300/

35

→ Die plastische Berechnung aktiviert alle Reserven. Bei sehr dünnen Platten versagen die Schrauben (Dehnung).

Ausnutzungen:

Plattendicke	4H-EC3BT	ohne Vorspannung	Vorspannung	plastisch
20 mm	137% (140%)	164%	153%	114% (D)
25 mm	114% (118%)	106%	102%	89%
30 mm	97% (100%)	82%	82%	75%
35 mm	85% (92%)	76%	74%	61%
40 mm	85% (92%)	73%	72%	61%

Erläuterung: Erste Spalte: Variation der Stirnplattendicke um die Referenzgröße (gelb unterlegt), zweite Spalte: maximale Ausnutzung der Berechnung mit 4H-EC3BT (DASt-Ergebnisse), dritte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS ohne Vorspannung, vierte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS bei Ansatz der Regelvorspannkraft, fünfte Spalte: plastisch-plastische Berechnung mit Vorspannung.

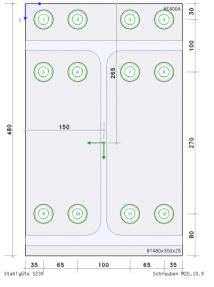
Beispiel 4: Die Systemabmessungen entsprechen bei t_p = 25 mm der typisierten Verbindung Nr. 496 / M10.9 des DASt-Ringbuchs.

Das Beispiel wurde mit den Tragmomenten des DASt-Ringbuchs $M_{v,Ed}$ = -393,2 / 158,0 kNm belastet.

Die Vorgehendsweise zur Berechnung von vier Schrauben je Reihe ist im EC3-1-8 nicht vorgeschrieben. Das DASt-Ringbuch verwendet hierzu das Verfahren aus dem Abschlussbericht des AIF-Forschungsprojekts 15059.

Ergebnis (hoher Querschnitt mit 4 Schrauben je Reihe, 1 Reihe im Überstand):

- → Die Vorspannung wirkt sich bei Zugschrauben günstig aus.
- → Die Grenze der Tragfähigkeit bei t_p = 25 mm wird bei Zugschrauben im Bereich des oberen Flanschs (Überstand) und einer Berechnung mit Vorspannung gut erfasst. Zur Berechnung mit Zugschrauben im Bereich des Unterflanschs s. Beispiel 3.
- → Die plastische Berechnung aktiviert alle Reserven. Liegen die Zugschrauben im Bereich des oberen Flanschs (Überstand), versagt bei dünneren Platten das System, da sich eine Fließkette ausbildet. Es kann keine Ausnutzung berechnet werden.



Ausnutzungen:

Plattendicke	4H-EC3BT		ohne Vorspann.	Vorspannung	plastisch
15 mm	144% / 142%	(146% / 145%)	235% / 235%	206% / 219%	-/-
20 mm	116% / 118%	(117% / 121%)	159% / 138%	136% / 128%	- / 89%
25 mm	99% / 96%	(100% / 100%)	123% / 90%	107% / 85%	- / 75%
30 mm	85% / 81%	(91% / 84%)	99% / 70%	91% / 69%	76% / 58%
35 mm	83% / 70%	(83% / 72%)	85% / 66%	82% / 64%	67% / 46%

Erläuterung: Erste Spalte: Variation der Stirnplattendicke um die Referenzgröße (gelb unterlegt), zweite Spalte: maximale Ausnutzung der Berechnung mit 4H-EC3BT (DASt-Ergebnisse), dritte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS ohne Vorspannung, vierte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS bei Ansatz der Regelvorspannkraft, fünfte Spalte: plastisch-plastische Berechnung mit Vorspannung.

Fazit

Aus den Vergleichen lassen sich folgende Erkenntnisse ziehen:

- ➢ Die Vorspannung wirkt sich zwar bei Zugschrauben günstig aus. Jedoch erhöht sie die Kontaktpressung im Druckbereich, das zum Versagen der Stirnplatte führen kann. Daher sollte die Vorspannung berücksichtigt werden.
- Die plastisch-plastische Berechnung der Stirnplatte sollte nur in Einzelfällen verwendet werden.
- Die Tragfähigkeiten der Referenzbeispiele aus dem DASt-Ringbuch werden mit dem Programm 4H-EC3FS hinreichend gut erfasst oder überschätzt. Daher liegen die Ergebnisse des Programms auf der sicheren Seite und können für die Berechnung von beliebigen Querschnittsformen herangezogen werden.
- ➤ Da die plastischen Berechnungsverfahren bis an die Grenze der Tragfähigkeit gehen, sollten die Auslastungsfaktoren für Stirnblech und Schrauben auf der sicheren Seite liegend reduziert werden.
- ➤ Lokale Beanspruchungen des Trägers aus der Verformung der Stirnplatte werden nicht erfasst. Daher sollten höhere Sicherheiten in der resultierenden Ausnutzung vorgesehen werden.

Voreinstellungen in 4H-EC3FS:

- die Stirnplatte wird elastisch-plastisch berechnet
- die Schrauben werden plastisch berechnet
- die Federsteifigkeit der Schrauben wird berechnet mit $c_f = E_{sc} A_s / L$
- die Vorspannung der Schrauben wird berücksichtigt
- der Auslastungsfaktor der Schrauben wird gesetzt auf $f_{t,f}$ = 0.95
- der Dehnungsfaktor der Schrauben beträgt $f_{t,\epsilon}$ = 0.25
- der Bettungsmodul der Stirnplatte wird berechnet mit $c_b = E_p / t_p$
- die Toleranzgrenze für nichtlineare Iterationen beträgt 5% bei maximal 50 Iterationsschritten

Autor: Dr.-Ing Christine Barlag, pcae GmbH am 19.3.2025