4H-EC3SA Schweißnahtanschluss
Detailinformationen

Seite erweitert September 2026 • Kontakt • Programmübersicht • Bestelltext

Infos auf dieser Seite **... als pdf**

- Anschlussparameter .....
- Schnittgrößen .....
- Schnittgrößenimport .....
- Schweißnahtnachweis EC 3 ...
- Querschnittsnachweis EC 3 ...
- Schweißnahtnachweis DIN .....
- Querschnittsnachweis DIN .....
- Theorie dünnwandiger Quer.
- Ergebnisse dünnw. Querschn.
- Ergebnisübersicht .....

Basisverbindungen

- Schweißverbindungen .....
- Stahlsorten .....
- Ausdrucksteuerung .....
- nationale EC-Anhänge .....

Anschlussparameter

Register 1 enthält Angaben zu den Anschluss- und Materialparametern

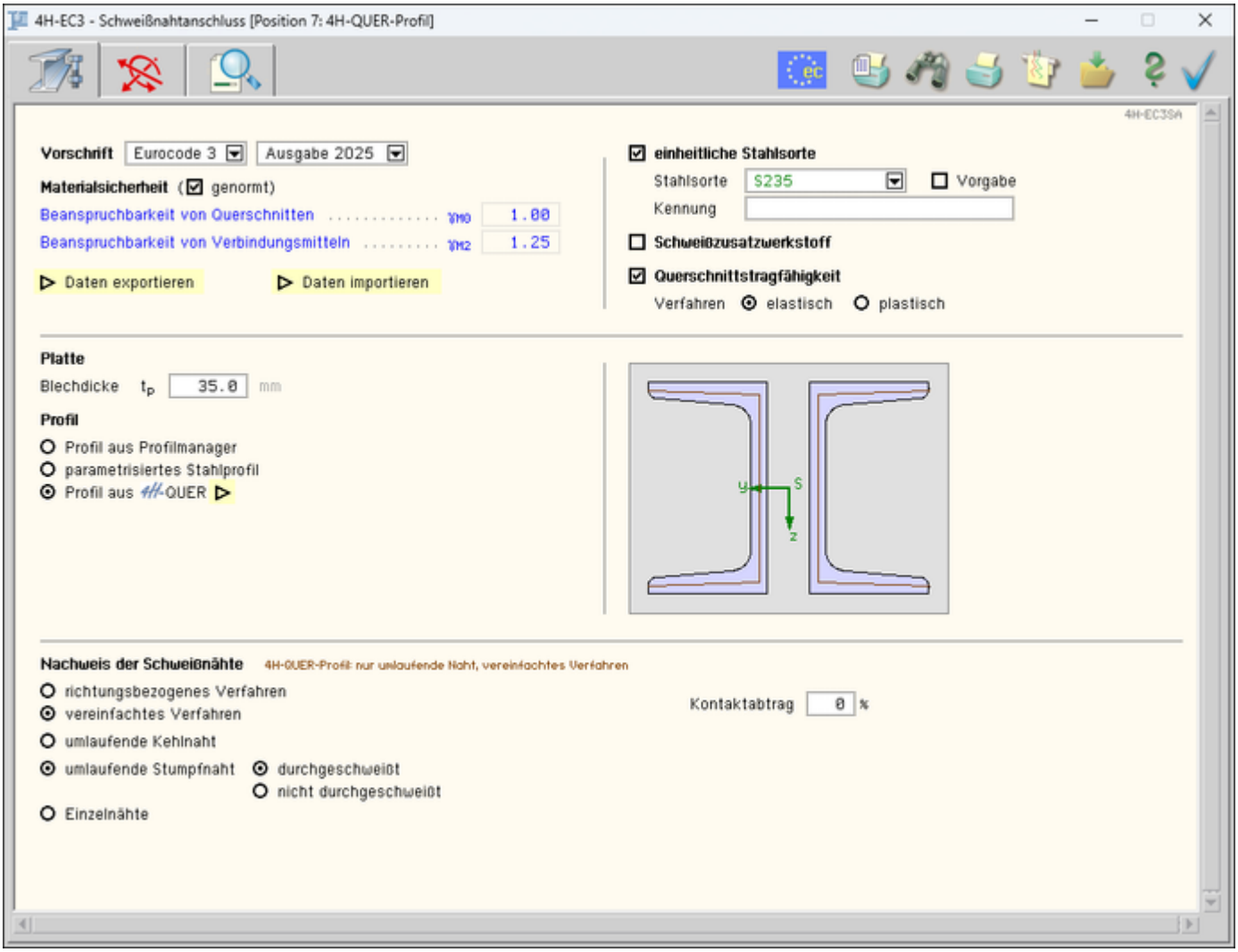


Bild vergrößern

Allgemeines

Das Programm *4H*-EC3SA berechnet den geschweißten Anschluss eines dünnwandigen Profils an eine Stahlplatte.

Es werden folgende Vorschriften beachtet (s. **Literatur**)

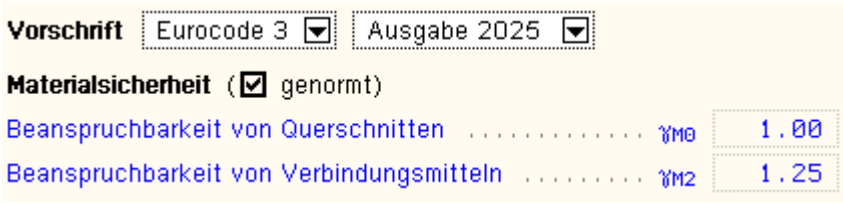
- EC 0 - Grundlagen der Tragwerksplanung
- EC 3-1-1 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
- EC 3-1-8 - Bemessung von Anschlüssen
- DIN 18800-1 - Stahlbauten

Die Vorschriften der DIN 18800, des EC 3-1-1 und EC 3-1-8 der ersten Generation (Ausg. 2010) sowie deren aktualisierte Fassungen (Ausg. 2025) sind im Programm hinterlegt.

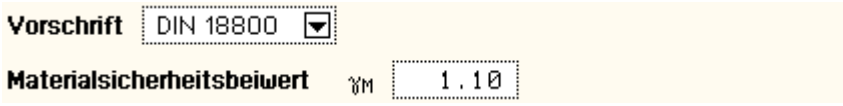
Der Nachweis kann nach Eurocode 3 (Ausgabe 2010 bzw. 2025) oder DIN 18800 (veraltet) erfolgen.

Dementsprechend sind die Materialsicherheitsbeiwerte zu belegen.

Nach EC 3 können die Sicherheitsbeiwerte entweder dem **nationalen Anhang** entnommen oder direkt vorgegeben werden.

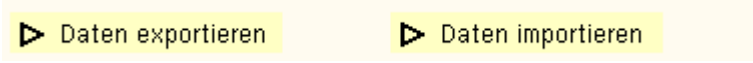


Nach DIN 18800 ist der Sicherheitsbeiwert in das Eigenschaftsblatt einzutragen.



Export / Import

Die Eingabedaten können über die Copy-Paste-Funktion von einem Bauteil in ein anderes derselben Programmfamilie (*4H*-EC3SA) übertragen werden.



Dazu ist der aktuelle Datenzustand im abgebenden Bauteil über den Button ***Daten exportieren*** in die Zwischenablage zu kopieren und anschließend über den Button ***Daten importieren*** in das aktuell geöffnete Bauteil aus der Zwischenablage zu übernehmen.

Material

Grundsätzlich kann jedem Verbindungselement ein eigenes Material zugeordnet werden.

Der Übersichtlichkeit halber kann an dieser Stelle eine einheitliche Stahlgüte für Profil und Platte gewählt werden.

Es werden die normalfesten Stähle S235, S275, S355, S420, S450/S460 sowie die hochfesten Stähle S500, S550, S620, S690 (nicht EC 3:2010) vorgehalten.

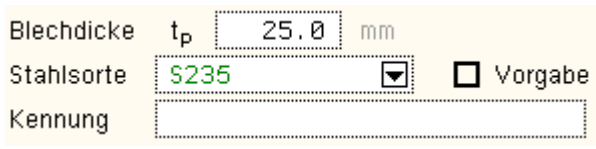
Werden hochfeste Bleche ($f_y \geq 460$ N/mm^2) verschweißt, darf der Schweißzusatzwerkstoff von geringerer Festigkeit sein; er wird hier festgelegt.

Da die Beschreibung der Stahlparameter für Verbindungen nach EC 3 programmübergreifend identisch ist, wird auf die allgemeine Beschreibung der **Stahlsorten** verwiesen.

Platte

Mit *Platte* wird das Bauteil bezeichnet, an das das Profil angeschweißt wird.

Lediglich die Plattendicke ist für den Nachweis von Relevanz.



Profil

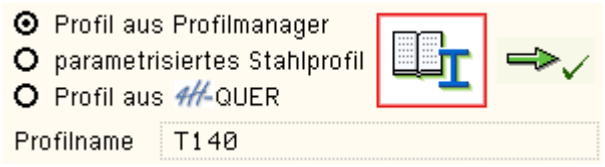
Der Querschnitt kann entweder über den **pcae**-eigenen Profilmanager in das Programm importiert oder als parametrisiertes Stahlprofil eingegeben werden.

Ist das **pcae**-Programm *4H*-QUER, Querschnittswerte, installiert, kann alternativ ein beliebiger Querschnitt erstellt und in das Programm *4H*-EC3SA geladen werden.

Das Profil wird maßstabsgetreu am Bildschirm dargestellt, wobei bei typisierten Profilen (Profilmanager) die Neigung von Flanschen oder Steg nicht berücksichtigt werden.

Um ein Profil aus dem Angebot des ***Profilmanagers*** zu wählen, ist der grün unterlegte Pfeil zu anzuklicken.

Das externe **pcae**-Programm wird aufgerufen und ein Profil kann aktiviert werden. Bei Verlassen des Profilmanagers werden die benötigten Daten übernommen und der Profilname protokolliert.



Die hinterlegten Profilparameter können am Bildschirm eingesehen werden, wenn auf ***parametrisiertes Stahlprofil*** umgeschaltet wird.

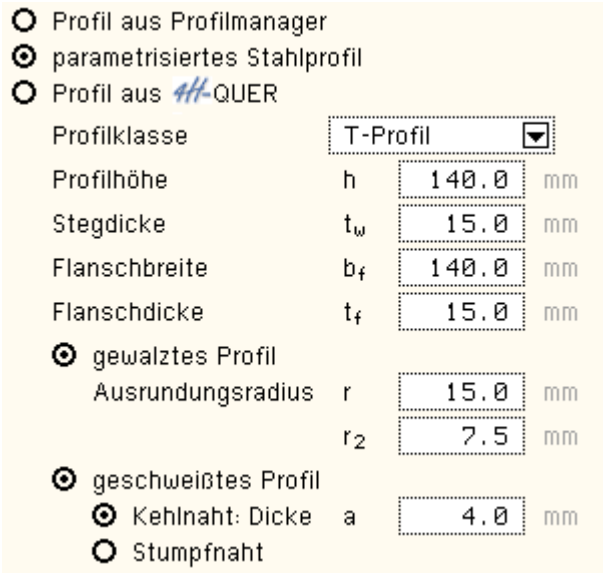
Zur Definition eines ***parametrisierten Stahlprofils*** ist zunächst die Profilklasse festzulegen.

In Abhängigkeit davon werden Profilhöhe, Stegdicke sowie ggf. Flanschbreiten und -dicken zur Eingabe angeboten.

Flanschneigungen werden nicht berücksichtigt.

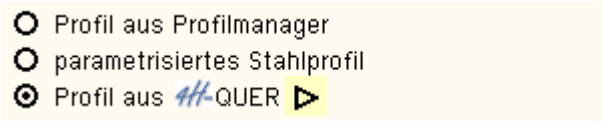
Bei gewalzten Profilen wird der Ausrundungsradius r zwischen Flansch und Steg bzw. r_2 an den äußeren Flanschrändern geometrisch berücksichtigt, während geschweißte Blechprofile mit Schweißnähten (Kehlnähte der Dicke a oder durchgeschweißte Stumpfnähte) zusammengefügt sind.

Diese Schweißnähte werden **nicht** nachgewiesen.



Ist das **pcae**-Programm ***4H*-QUER** installiert, wird eine entsprechende Eingabemöglichkeit angeboten.

Das externe Programm wird über den gelb unterlegten ***Aktions***-Button ▷ mit dieser Vorgabe aufgerufen.



In einer grafischen Oberfläche kann dort der Querschnitt konstruiert oder aus einer Bibliothek geladen und an das aufrufende Programm *4H*-EC3SA übergeben werden.

Der *4H*-QUER-Querschnitt muss den Programmvorgaben entsprechend dünnwandig sein.

Weitere Informationen zur Bedienung des Programms *4H*-QUER s. zugehöriges Handbuch.

4H-QUER-Profile können **nicht** nach DIN 18800 nachgewiesen werden.

Schweißnähte

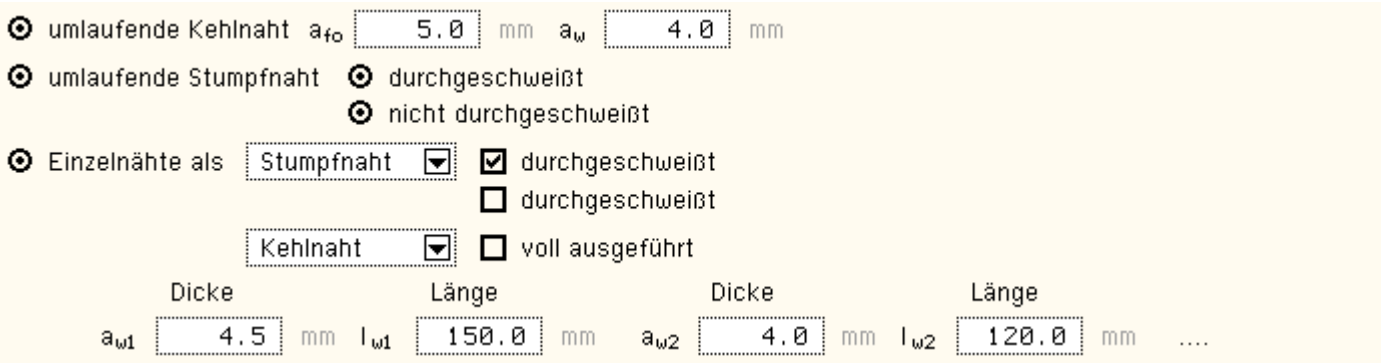
Die Schweißverbindung kann als umlaufende Naht oder mit Einzelnähten ausführt werden.

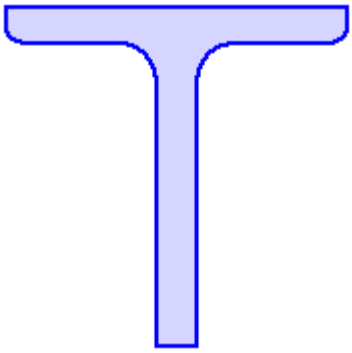
Es können Kehl- oder Stumpfnähte ausgewählt werden (nur EC 3).

Nicht durchgeschweißte Stumpfnähte werden wie Kehlnähte behandelt, wobei deren Nahtdicke a_w den Maximalwert von (t - 3 mm)/2 nicht überschreiten darf.

Am Bildschirm wird in einer maßstäblichen Grafik die Nahtart farblich gekennzeichnet (Kehlnaht blau, Stumpfnaht braun). Bei Einzelnähten wird zudem die Nummer der Naht angegeben.

Es besteht die Möglichkeit, den Anteil der Normalkraft, der über Druckkontakt abgetragen wird und demnach die Schweißnaht nicht belastet, zu bestimmen (nur EC 3).



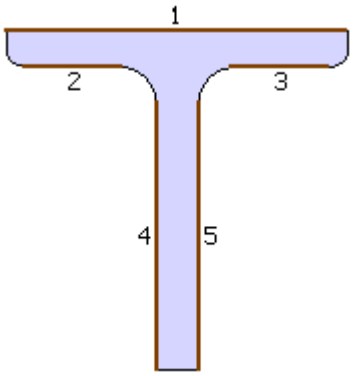


Die ***umlaufende Kehlnaht*** und ***nicht durchgeschweißte Stumpfnaht*** wird mit einer konstanten Nahtdicke a_w ausgeführt.

Bei typisierten und parametrisierten Profilen können die Nahtdicken umlaufender, nicht durchgeschweißter Nähte je Blech (Flansch, Steg, Schenkel) variieren (nur EC 3).

Die Dicke durchgeschweißter Nähte entspricht der Blechdicke.

Ist die Nahtdicke $a_w = 0$, wird keine Schweißnaht angesetzt.



Einzelnähte verlaufen grundsätzlich entlang der Flansch- bzw. Stegkanten, Rundungen sind ausgespart.

Für Kehlnähte gilt, dass sie entweder voll ausgeführt (d.h. rechnerisch in ihrer gesamten Länge angesetzt) oder mit Endkrater versehen sein können.

Die Nahtlänge kann vor der Berechnung überprüft und die Naht ggf. nicht wirksam werden (nur EC 3).

Für alle Nähte sind Nahtdicke a_w (nicht durchgeschweißte Stumpfnaht) und Nahtlänge l_w anzugeben.

Ist die Nahtdicke $a_w = 0$ oder die Nahlänge $l_w = 0$, wird keine Schweißnaht angesetzt.

Optional können Blech- und Nahtdicke überprüft werden (nur EC 3). Ist der Schalter deaktiviert, wird weder die Unter- noch die Überschreitung der zulässigen Grenzwerte von Blech- und Nahtdicke gemeldet.

Bei Änderung des Profiltyps (Profilmanager oder parametrisiert), bei Auswahl eines neuen Profils aus dem Profilmanager oder bei Bestimmung einer neuen Profilklasse des parametrisierten Stahlprofils werden die Nahtlängen mit Maximalwerten vorbelegt.

Die Schweißnahtdicken können über den Aktionsbutton ▷ mit der blau dargestellten Größe einheitlich belegt werden, wobei nur die Dicken 'vorhandener' Schweißnähte, d.h. Nähte mit $l_w > 0$ überschrieben werden.

Nachweise

Die Schweißnähte können mit dem *richtungsbezogenen* oder dem *vereinfachten Verfahren* (nur EC 3) nachgewiesen werden.

Optional wird auch die *Querschnittstragfähigkeit* ermittelt. Der Nachweis kann *elastisch* oder *plastisch* erfolgen.

Außerdem ist bei typisierten oder parametrisieren Profilen das Verfahren zur Aufteilung der Querkräfte auf die Schweißnähte festzulegen (nur EC 3).

Zur Beschreibung der Nachweise nach **EC 3**.

Zur Beschreibung der Nachweise nach **DIN 18800**.

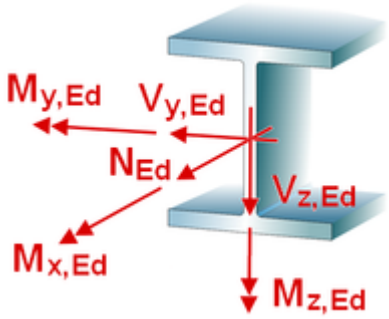
Schnittgrößen

das zweite Register beinhaltet die Masken zur Eingabe der Bemessungsschnittgrößen

Die Schnittgrößen werden als Bemessungsgrößen mit der Vorzeichendefinition

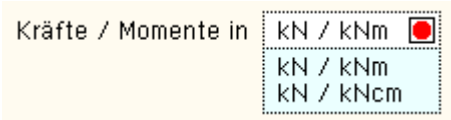
der Statik eingegeben, wobei das x,y,z-Koordinatensystem dem l,m,n-System der **pcae**-Tragwerksprogramme entspricht.

Es können bis zu 10.000 Schnittgrößenkombinationen eingegeben werden.



Bei Übernahme der Schnittgrößen aus einem Tragwerksprogramm ist zu beachten, dass sie sich auch bei unsymmetrischen Querschnitts-profilen (z.B. L-Profil) auf das Stab-Koordinatensystem und **nicht** auf das Hauptachsensystem (**pcae**-Bezeichnung: ξ,η,ζ) beziehen!

Die Schnittgrößen können wahlweise in folgenden Einheiten vorliegen



	N_{Ed} kN	$M_{y,Ed}$ kNm	$V_{z,Ed}$ kN	$M_{z,Ed}$ kNm	$V_{y,Ed}$ kN	$M_{x,Ed}$ kNm	Bezeichnung
	0.21	0.00	3.16	-0.60	-7.05	0.83	

Im Standardfall

- bewirken die Schnittgrößenkombinationen N,M_y,V_z eine Biegung um die starke Achse des Querschnitts
- bewirken die Schnittgrößenkombinationen N,M_z,V_y eine Biegung um die schwache Achse des Querschnitts
- wird das Torsionsmoment M_x nur für doppelt-symmetrische Querschnitte relevant

Schnittgrößen importieren

Detailnachweisprogramme zur Bemessung von Anschlüssen (Träger/Stütze, Träger/Träger), Fußpunkten (Stütze/Fundament) etc. benötigen Schnittgrößenkombinationen, die häufig von einem Tragwerksprogramm zur Verfügung gestellt werden.

Dabei handelt es sich i.d.R. um eine Vielzahl von Kombinationen, die im betrachteten Bemessungsschnitt des übergeordneten Tragwerkprogramms vorliegen und in das Anschlussprogramm übernommen werden sollen.

pcae stellt neben der 'per Hand'-Eingabe zwei verschiedene Mechanismen zur Verfügung, um Schnittgrößen in das vorliegende Programm zu integrieren.

- **Import aus einer Text-Datei**

  Die Schnittgrößenkombinationen können aus einer Text-Datei im ASCII-Format eingelesen werden.

  Die Datensätze müssen in der Text-Datei in einer bestimmten Form vorliegen; der entsprechende Hinweis wird bei Betätigen des ***Einlese***-Buttons gegeben.

  Anschließend wird der Dateiname einschl. Pfad der entsprechenden Datei abgefragt.

  Es werden sämtliche vorhandenen Datensätze eingelesen und in die Tabelle übernommen. Bereits bestehende Tabellenzeilen bleiben erhalten.

  Wenn keine Daten gelesen werden können, erfolgt eine entsprechende Meldung am Bildschirm.

- **Import aus einem *4H*-Programm**

  Voraussetzung zur Anwendung des DTE®-Import-Werkzeugs ist, dass sich ein **pcae**-Programm auf dem Rechner befindet, das Ergebnisdaten exportieren kann.

  Die statische Berechnung eines Bauteils beinhaltet i.A. die Modellbildung mit anschließender Berechnung des Tragsystems sowie nachfolgender Einzelnachweise von Detailpunkten.

  Bei der Beschreibung eines Details sind die zugehörenden Schnittgrößen aus den Berechnungsergebnissen des Tragsystems zu extrahieren und dem Detailnachweis zuzuführen.

In der *4H*-Programmorganisation gibt es hierzu verschiedene Vorgehensweisen

- zum einen können Tragwerks- und Detailprogramm fest miteinander verbunden sein, d.h. die Schnittgrößenübergabe erfolgt intern. Es sind i.A. keine weiteren Eingaben (z.B. Geometrie) notwendig, aber auch möglich (z.B. weitere Belastungen), die Programme bilden eine Einheit.

  Dies ist z.B. bei dem *4H*-Programm *Stütze mit Fundament* der Fall.

- zum anderen können Detailprogramme Schnittgrößen von in Tragwerksprogrammen speziell festgelegten Exportpunkten über ein zwischengeschaltetes Export/Import-Tool einlesen

  Das folgende Beispiel eines einfachen Rahmens erläutert diesen *4H*-Schnittgrößen-Export/Import.

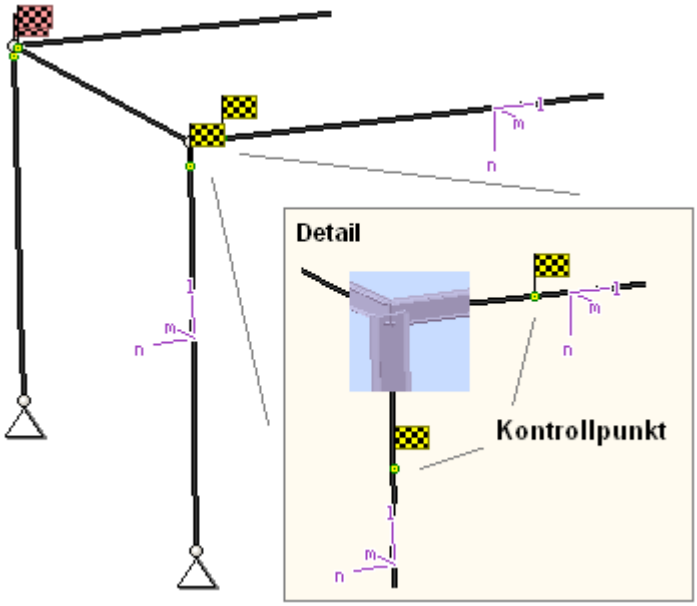
Zunächst sind im exportierenden *4H*-Programm (z.B. ***4H*-FRAP**) die Stellen zu kennzeichnen, deren Schnittgrößen beim nächsten Rechenlauf exportiert, d.h. für den Import bereitgestellt, werden sollen.

In diesem Beispiel sollen die Schnittgrößen für eine Querschnittsbemessung übergeben werden.

Dazu ist an der entsprechenden Stelle ein Kontrollpunkt zu setzen.

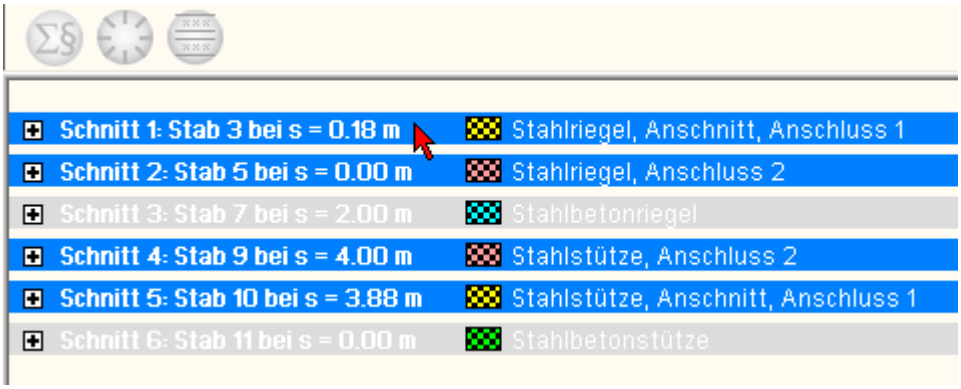
Ausführliche Informationen zum Export entnehmen Sie bitte dem DTE®-**Schnittgrößenexport**.

Nach einer Neuberechnung des Rahmens stehen die Exportschnittgrößen dem aufnehmenden *4H*-Programm (z.B. *4H*-BETON, *4H*-EC3SA, *4H*-EC3BT, *4H*-EC3RE, *4H*-EC3GT, *4H*-EC3TT etc.) zum Import zur Verfügung.



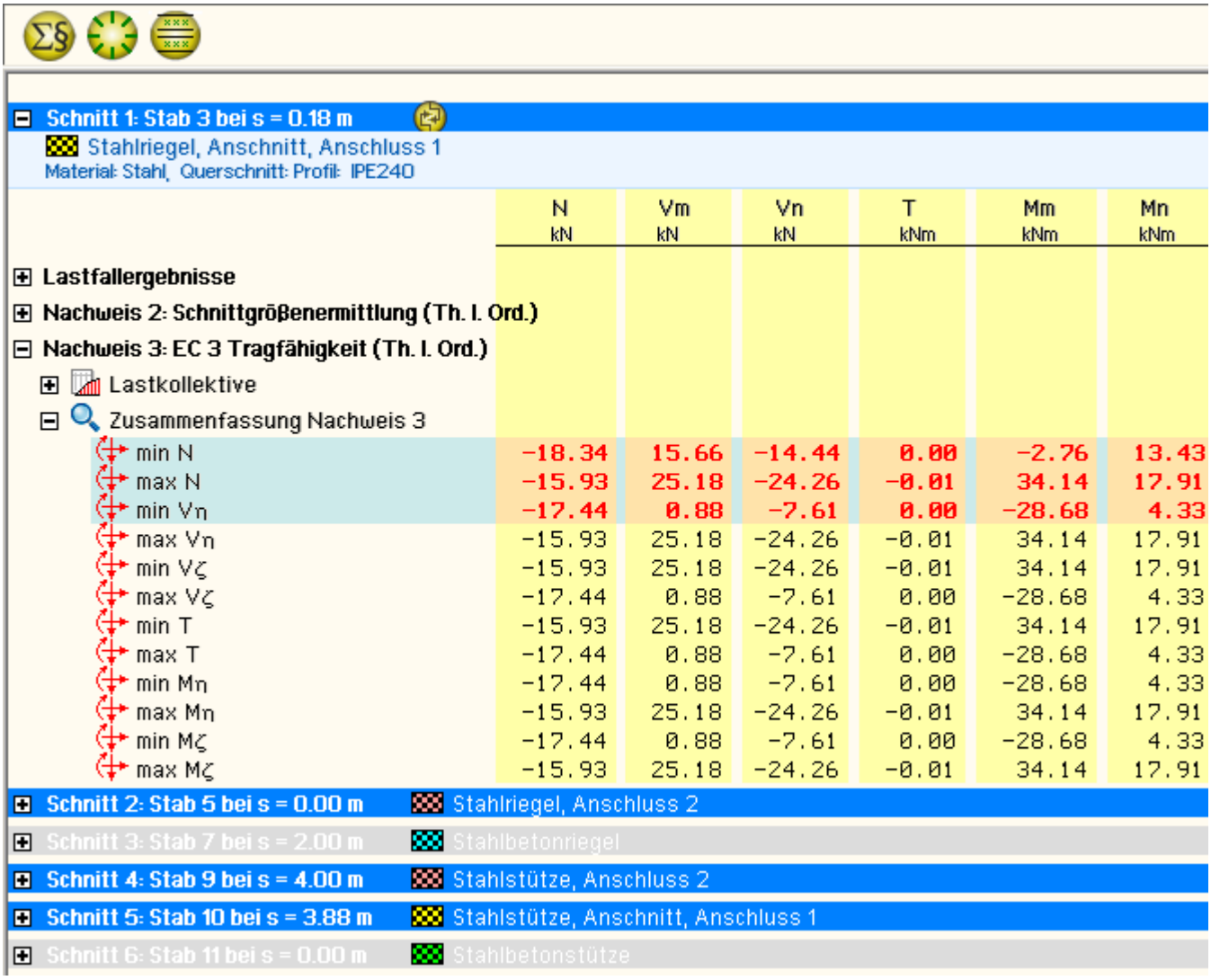
aus dem aufnehmenden *4H*-Programm wird nun über den ***Import***-Button das Fenster zur DTE®-**Bauteilauswahl** aufgerufen. Hier werden alle berechneten Bauteile dargestellt, wobei diejenigen, die Schnittgrößen exportiert haben, dunkel gekennzeichnet sind.

Das gewünschte Bauteil kann nun markiert und über den ***bestätigen***-Button ausgewählt werden. Alternativ kann durch Doppelklicken des Bauteils direkt in die DTE®-**Schnittgrößenauswahl** verzweigt werden.



In der Schnittgrößenauswahl werden die verfügbaren Schnittgrößenkombinationen aller im übergebenden Programm gekennzeichneten Schnitte angeboten. Dabei sind diejenigen Schnitte deaktiviert, deren Material nicht kompatibel mit dem Detailprogramm ist.

Es wird nun der Schnitt angeklickt und damit geöffnet, dessen Schnittgrößen eingelesen werden sollen.



	N kN	Vm kN	Vn kN	T kNm	Mm kNm	Mn kNm
Schnitt 1: Stab 3 bei s = 0.18 m Stahlriegel, Anschnitt, Anschluss 1 Material: Stahl, Querschnitt: Profil: IPE240						
Lastfallergebnisse						
Nachweis 2: Schnittgrößenermittlung (Th. I. Ord.)						
Nachweis 3: EC 3 Tragfähigkeit (Th. I. Ord.)						
Lastkollektive						
Zusammenfassung Nachweis 3						
min N	**-18.34**	**15.66**	**-14.44**	**0.00**	**-2.76**	**13.43**
max N	**-15.93**	**25.18**	**-24.26**	**-0.01**	**34.14**	**17.91**
min Vη	**-17.44**	**0.88**	**-7.61**	**0.00**	**-28.68**	**4.33**
max Vη	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
min Vζ	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
max Vζ	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
min T	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
max T	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
min Mη	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
max Mη	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
min Mζ	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
max Mζ	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
Schnitt 2: Stab 5 bei s = 0.00 m Stahlriegel, Anschluss 2						
Schnitt 3: Stab 7 bei s = 2.00 m Stahlbetonriegel						
Schnitt 4: Stab 9 bei s = 4.00 m Stahlstütze, Anschluss 2						
Schnitt 5: Stab 10 bei s = 3.88 m Stahlstütze, Anschnitt, Anschluss 1						
Schnitt 6: Stab 11 bei s = 0.00 m Stahlbetonstütze						

In *4H*-EC3SA ist der komplette verfügbare Schnittgrößensatz importierbar, was durch gelbe Hinterlegung der Spalten angezeigt wird.

Die Schnittgrößenkombinationen können beliebig zusammengestellt werden; **pcae** empfiehlt jedoch, nur diejenigen auszuwählen, die als Bemessungsgrößen für den zu führenden Detailnachweis relevant sind.

ein nützliches Hilfsmittel bietet dabei der dargestellte Button, mit dem die Anzahl zu übertragender Lastkombinationen durch Eliminierung doppelter Zeilen stark reduziert werden kann.

Wird nun die DTE®-Schnittgrößenauswahl bestätigt, bestückt das Importprogramm die Schnittgrößentabelle, wobei ggf. vorhandene Kombinationen erhalten bleiben.

	N_{Ed} kN	$M_{y,Ed}$ kNm	$V_{z,Ed}$ kN	$M_{z,Ed}$ kNm	$V_{y,Ed}$ kNm	nur für o,O-Profile $M_{x,Ed}$ kNm	Bezeichnung
	-18.34	-2.76	-14.44	13.43	15.66	-0.00	min N
	-15.93	34.14	-24.26	17.91	25.18	-0.01	max N
	-17.44	-28.68	-7.61	4.33	0.88	0.00	min Vη

Wenn eine Reihe von Anschlüssen gleichartig ausgeführt werden soll, können in einem Rutsch weitere Schnittgrößen anderer Schnitte aktiviert und so bis zu 10.000 Kombinationen übertragen werden.

Die Kompatibilität der Querschnitts- und Nachweisparameter zwischen exportierendem und importierendem Programm ist zu gewährleisten.

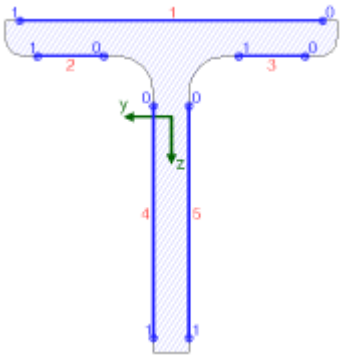
Eine Aktualisierung der importierten Schnittgrößenkombinationen, z.B. aufgrund einer Neuberechnung des exportierenden Tragwerks, erfolgt nicht!

Schweißnahtnachweis nach EC 3

I.A. werden die Verbindungselemente (Träger und Stirnblech, Träger und Stütze, Stütze und Fußplatte) mit Kehlnähten verbunden, deren Schweißnaht konzentriert in der Wurzellinie angenommen wird. Ebenso können (nicht durchgeschweißte) Stumpfnähte verwendet werden, die hier als HY-Nähte berücksichtigt werden.

Die Wurzellinien der Einzelnähte bilden den Linienquerschnitt (s. *G. Wagenknecht: Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3, Band 2*) zur Aufnahme bzw. Weiterleitung der Schnittgrößen.

Beispielhaft sind nebenstehend die Einzelnähte, die den Linienquerschnitt bilden, für einen T-Querschnitt dargestellt.

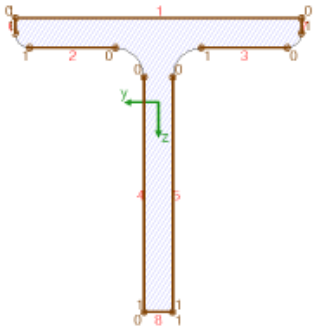


Die Nummerierung in rot kennzeichnet die Naht, die Zahlenangaben in blau bezeichnen die maßgebenden Nachweispunkte auf der jeweiligen Naht.

Für jeden Punkt einer Naht werden die Spannungen ermittelt und der Nachweis geführt.

Zur Orientierung ist das Querschnitts-Koordinatenkreuz, auf das die Schnittgrößen bezogen sind, in grün eingefügt.

Bei umlaufenden Nähten werden an jeder gerade verlaufenden Profilkante Schweißnähte angeordnet.

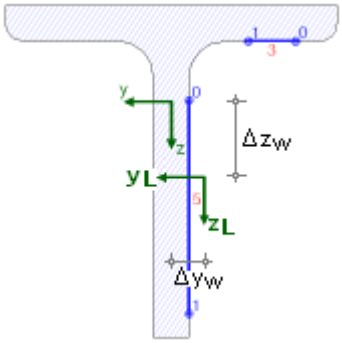


Diese haben im Normalfall eine einheitliche Nahtdicke.

Es können Kehlnähte, nicht durchgeschweißte und voll durchgeschweißte Stumpfnähte angeordnet werden.

Zur Unterscheidung werden Kehlnähte in blau und Stumpfnähte in braun gezeichnet. Nebenstehend ist der Linienquerschnitt einer umlaufenden Stumpfnaht dargestellt.

Es ist zu unterscheiden zwischen dem Querschnittsschwerpunkt und dem Schwerpunkt des Linienquerschnitts.



Da die Einzelnähte beliebig lang und dick sein können, kann der Schwerpunkt des Linienquerschnitts mehr oder weniger stark vom Querschnittsschwerpunkt abweichen.

Nebenstehend ist für einen Extremfall das um Δy_w und Δz_w abweichende Koordinatensystem des Linienquerschnitts dargestellt.

Bezogen auf den Schwerpunkt des Linienquerschnitts werden die Querschnittsfläche ΣA_w, ggf. die Querschnittsflächen in y- und z-Richtung $A_{w,y}$, $A_{w,z}$, die gesamte Nahtlänge Σl_w, die Trägheitsmomente $I_{w,y}$, $I_{w,z}$, $I_{w,yz}$ und die Differenzabstände zum Querschnittsschwerpunkt Δy_w, Δz_w ermittelt.

Querschnittswerte bezogen auf den Schwerpunkt des Linienquerschnitts:
$\Sigma A_w = 11.00$ cm², $\Sigma l_w = 11.0$ cm
$I_{w,y} = 141.10$ cm⁴, $I_{w,z} = 21.46$ cm⁴, $I_{w,yz} = 40.09$ cm⁴, $\Delta y_w = -13.9$ mm, $\Delta z_w = 31.8$ mm

Über eine Interaktionsbeziehung (s. **Theorie**, mehrteilige Querschnitte) können den Einzelnähten Schnittgrößen zugeordnet werden, die im Schwerpunkt der Naht wirken.

Die lokalen Normalkräfte und Biegemomente werden über diese Beziehung ermittelt.

Da die Querkraftaufteilung unabhängig von der Momenten-/Normalkraftverteilung erfolgt, werden zwei Verfahren zur Verteilung der Querkräfte auf die Nähte angeboten.

- nach der *konventionellen Methode* wird die Querkraft denjenigen Nähten zugeordnet, die in Richtung der entsprechenden Querkraftkomponente verlaufen, d.h. horizontale Nähte tragen V_y, vertikale Nähte V_z.

  Diese klassische Aufteilung wird beim Schweißnahtnachweis nach **DIN 18800** angewandt.

Schnittgrößenverteilung auf die Einzelnähte:

				Spannungen:	
Naht 3:	N_w = -14.67 kN	$M_{y,w}$ = -0.00 kNm	$M_{z,w}$ = -0.04 kNm	$\tau_{w,y}$ = -16.59 N/mm²	$\tau_{w,z}$ = 0.04 N/mm²
Naht 5:	N_w = 14.88 kN	$M_{y,w}$ = -1.03 kNm	$M_{z,w}$ = -0.04 kNm	$\tau_{w,y}$ = -4.15 N/mm²	$\tau_{w,z}$ = 3.50 N/mm²

- alternativ wird die Querkraft in Abhängigkeit der *Steifigkeiten* auf die Nähte verteilt.

  Dies entspricht der Theorie der Aussteifungssysteme, die jedoch im strengen Sinne nur gilt, wenn sich die Schweißnähte unabhängig voneinander verformen können.

Schnittgrößenverteilung auf die Einzelnähte:

Naht 3:	N_w = -14.67 kN	$M_{y,w}$ = -0.00 kNm	$V_{z,w}$ = 0.01 kN	$M_{z,w}$ = -0.04 kNm	$V_{y,w}$ = -3.32 kN
Naht 5:	N_w = 14.88 kN	$M_{y,w}$ = -1.03 kNm	$V_{z,w}$ = 3.15 kN	$M_{z,w}$ = -0.04 kNm	$V_{y,w}$ = -3.73 kN

Damit werden die Spannungen in den maßgebenden Nachweispunkten berechnet.

Spannungen in den Endpunkten der Einzelnähte:

Naht 3,	Pkt. 0:	$\sigma_{w,x}$ = -132.81 N/mm²	$\tau_{w,y}$ = -16.59 N/mm²	$\tau_{w,z}$ = 0.04 N/mm²
	Pkt. 1:	$\sigma_{w,x}$ = -13.86 N/mm²	$\tau_{w,y}$ = -16.59 N/mm²	$\tau_{w,z}$ = 0.04 N/mm²
Naht 5,	Pkt. 0:	$\sigma_{w,x}$ = 92.58 N/mm²	$\tau_{w,y}$ = -4.15 N/mm²	$\tau_{w,z}$ = 3.50 N/mm²
	Pkt. 1:	$\sigma_{w,x}$ = -59.51 N/mm²	$\tau_{w,y}$ = -4.15 N/mm²	$\tau_{w,z}$ = 3.50 N/mm²

Sowohl Druck- als auch Zugnähte werden entweder mit dem *richtungsabhängigen*

Nachweis für Naht 3, Pkt. 0:

Spannungen auf der wirksamen Nahtfläche (α = 45°, $\sigma_w = \sigma_{w,x}$, $\tau_w = \tau_{w,z}$):

$\sigma_s = \sigma_w \cdot \cos(\alpha) - \tau_w \cdot \sin(\alpha)$ = -93.9 N/mm²

$\tau_s = \sigma_w \cdot \sin(\alpha) + \tau_w \cdot \cos(\alpha)$ = -93.9 N/mm²

$\tau_p = \tau_{w,y}$ = 16.6 N/mm²

$\sigma_{1,w,Ed} = (\sigma_s^2 + 3 \cdot (\tau_s^2 + \tau_p^2))^{1/2}$ = 19.00 kN/cm²

Tragfähigkeit der Schweißnaht (Bed.1): $f_{1,w,Rd} = f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2})$ = 36.00 kN/cm²

$\sigma_{1,w,Ed}$ = 19.00 kN/cm² < $f_{1,w,Rd}$ = 36.00 kN/cm² ⇒ Ausnutzung U = 0.528 < 1 **ok.**

$\sigma_{2,w,Ed} = \sigma_s$ = 9.39 kN/cm²

Tragfähigkeit der Schweißnaht (Bed.2): $f_{2,w,Rd} = 0.9 \cdot f_u / \gamma_{M2}$ = 25.92 kN/cm²

$\sigma_{2,w,Ed}$ = 9.39 kN/cm² < $f_{2,w,Rd}$ = 25.92 kN/cm² ⇒ Ausnutzung U = 0.362 < 1 **ok.**

oder dem *vereinfachten Verfahren* nachgewiesen.

Nachweis für Naht 3, Pkt. 0:

Spannungen auf der wirksamen Nahtfläche (α = 45°):

$\sigma_{w,Ed} = (\sigma_{w,x}^2 + \tau_{w,y}^2 + \tau_{w,z}^2)^{1/2}$ = 133.8 N/mm²

resultierende Nahtkraft: $F_{w,Ed} = \sigma_{w,Ed} \cdot a$ = 13.38 kN/cm

Tragfähigkeit der Schweißnaht: $F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a$ = 20.78 kN/cm, a = 10.0 mm, $f_{vw,d}$ = 207.85 N/mm²

$F_{w,Ed}$ = 13.38 kN/cm < $F_{w,Rd}$ = 20.78 kN/cm ⇒ Ausnutzung U = 0.644 < 1 **ok.**

Da die Beschreibung der Schweißnahtnachweise nach EC 3 programmübergreifend identisch ist, wird auf die allgemeine Beschreibung des **Schweißnahtnachweises** verwiesen.

Besonderheiten bei doppelt-symmetrischen Querschnitten mit umlaufenden Kehlnähten

Zu den doppelt-symmetrischen Querschnitten im Sinne des Schweißnahtnachweises zählen das Rohr- und Rechteckprofil sowie der Rundstahl, die umlaufend geschweißt sind.

Sie sind in der Lage, zusätzlich zu den Normal-, Querkräften und Biegemomenten auch Torsionsmomente aufzunehmen.

Besonderheiten bei *4H*-QUER-Querschnitten

Bei beliebigen dünnwandigen Querschnitten können nur umlaufende Schweißnähte nachgewiesen werden.

Sind Stumpfnähte voll durchgeschweißt, wird die Spannungsausnutzung der Schweißnähte mit der minimalen Festigkeit der verbundenen Elemente (Profil oder Platte) berechnet.

Kehlnähte und nicht durchgeschweißte Stumpfnähte werden vereinfachend über die Tragfähigkeit eines fiktiven Querschnitts mit Blechdicken = 2-facher Nahtdicke bemessen.
Daher können nur beidseitige angeordnete Kehl- oder Stumpfnähte verwendet werden.

Querschnittsnachweis nach EC 3

Der Tragsicherheitsnachweis der offenen, dünnwandigen Querschnitte kann *elastisch* (DIN EN 1993-1-1, Abs. 8.2.1(5)) oder *plastisch* geführt werden (DIN EN 1993-1-1, Abs. 8.2.1(6)).

Die Schnittgrößen (Beanspruchungen) sind stets auf Grundlage der Elastizitätstheorie zu bestimmen.

Elastischer Nachweis

Der Spannungsnachweis erfolgt mit dem Fließkriterium aus DIN EN 1993-1-1, Abs. 8.2.1(5), Gln. (8.1) und (8.2).

Es sind nur nicht beulgefährdete Querschnitte der Klassen 1 bis 3 zugelassen.

Beispiel T140

elastischer Spannungsnachweis für N = 0.21 kN, V_z = 3.16 kN, M_z = -0.60 kNm, V_y = -7.05 kN
T_t = 0.83 kNm
elastische Spannungen: max $|\sigma_x|$ = 12.78 N/mm², max τ = 45.53 N/mm², max σ_v = 78.89 N/mm²
max σ_x bei y = 70.0 mm, z = -30.8 mm: σ_x = 12.78 N/mm², τ = 0.00 N/mm², σ_v = 12.78 N/mm²
min σ_x bei y = -70.0 mm, z = -30.8 mm: σ_x = -12.67 N/mm², τ = 0.00 N/mm², σ_v = 12.67 N/mm²
max τ bei y = 12.7 mm, z = -18.3 mm: σ_x = 2.36 N/mm², τ = 45.53 N/mm², σ_v = 78.89 N/mm²
max σ_v bei y = 12.7 mm, z = -18.3 mm: σ_x = 2.36 N/mm², τ = -45.53 N/mm², σ_v = 78.89 N/mm²
zul. Vergleichsspannung: $\sigma_{v,Rd}$ = 235.0 N/mm²
Nachweis: σ_v = 78.89 N/mm² < $\sigma_{v,Rd}$ = 235.00 N/mm² ⇒ U_σ = 0.336 < 1 ok

c/t-Verhältnis (bzgl. Querschnittsklasse 3):
einseitig gestützt: Ausnutzung $U_{c/t}$ = 0.049 < 1 ok

Plastischer Nachweis

Der plastische Querschnittsnachweis wird - wenn möglich - n. EC 3-1-1, 8.2.3-10 geführt.

Er ist nicht für *4H*-QUER-Querschnitte (beliebige dünnwandige Querschnitte) konzipiert.

Es können nur doppeltsymmetrische Doppel-T-Profile, Rohrprofile und Flachstähle nachgewiesen werden.

Der plastische Nachweis darf nur für Querschnitte der Klassen 1 und 2 angewandt werden.

Für *4H*-QUER-Querschnitte wird mit Hilfe des Teilschnittgrößenverfahrens (TSV) mit Umlagerung nach *R. Kindmann, J. Frickel: Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit* überprüft, ob die Schnittgrößen vom Querschnitt unter Ausnutzung der plastischen Reserven aufgenommen werden können (plastische Querschnittstragfähigkeit).

Da das Verfahren nur für Zwei- bzw. Dreiblechquerschnitte (I-, C-, U-, Z-, L-, T-Querschnitte) und Rohre als Profile oder typisierte Querschnitte unter zweiachsiger Beanspruchung einschl. St. Venant'scher Torsion und Wölbkrafttorsion geeignet ist, wurde eine Erweiterung für allgemeine dünnwandige Querschnitte entwickelt.

Eine Begrenzung der Grenzbiegemomente wie in DIN 18800, El. 755, ist in DIN EN 1993 nicht erforderlich.

Kann der Querschnitt plastisch nicht nachgewiesen werden, erfolgt ein elastischer Nachweis.

Beispiel T140, Nachweis mit TSV

plastischer Spannungsnachweis für N = 0.21 kN, V_z = 3.16 kN, M_z = -0.60 kNm, V_y = -7.05 kN
T_t = 0.83 kNm
Schnittgrößen bzgl. yz-Richtung in kN, m: My = 0.00, Mz = -0.60, Vy = -7.05, Vz = 3.16
Teilschnittgrößen der Linien des Querschnitts in kN, m:
1: N = 7.85, My = -0.00, Mz = -0.00, Vy = -4.03, Vz = 0.04, T = 0.21
2: N = -9.48, My = 0.00, Mz = -0.00, Vy = -3.02, Vz = -0.03, T = 0.21
3: N = 1.84, My = -0.11, Mz = -0.00, Vy = 0.00, Vz = 3.15, T = 0.41
Ausnutzungen der Linien des Querschnitts
1: U_σ = 0.032, U_τ = 0.229, U = 0.232
2: U_σ = 0.039, U_τ = 0.228, U = 0.231
3: U_σ = 0.009, U_τ = 0.220, U = 0.220
max. Lastfaktor (plast.): f_{pl} = 4.317
Verwölbungsungleichgewicht im Grenzzustand: ΔB = -0.000 kNm²
Ausnutzung (ohne Verwölbungsgleichgewicht): U_{pl} = 0.232
Nachweis: U_{pl} = 0.232 < 1 ok
c/t-Nachweis: Ausnutzung $U_{c/t}$ = 0.317 < 1 ok (bzgl. Querschnittsklasse 2)

Beispiel HE140A, Nachweis mit EC 3

plastischer Spannungsnachweis für N_{Ed} = 0.21 kN, $V_{z,Ed}$ = 3.16 kN, $M_{z,Ed}$ = -0.60 kNm, $V_{y,Ed}$ = -7.05 kN
$T_{t,Ed}$ = 0.83 kNm
Q-Klasse des Profils 1 ≤ 2 ok
Schubbeulen: h_p/t_p = 21.09 ≤ 72·ε/η = 60.00 ok
plastische Kenngrößen: $N_{pl,Rd} = A \cdot f_y/\gamma_{M0}$ = 738.28 kN, $V_{pl,z,Rd} = A_{vz} \cdot f_y/(3^{1/2} \cdot \gamma_{M0})$ = 137.35 kN
$M_{pl,z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y/\gamma_{M0}$ = 19.93 kNm, $V_{pl,y,Rd} = A_{vy} \cdot f_y/(3^{1/2} \cdot \gamma_{M0})$ = 322.91 kN
Torsion
$\tau_{t,Ed} = |T_{t,Ed}|/\min W_t$ = 84.50 N/mm²
Nachweis: $\tau_{t,Ed}/\tau_{Rd}$ = 0.623 < 1 ok
Querkraft und Torsion
Abminderung V_z: $f_{T,z} = (1 - \tau_{t,z,Ed}/(1.25 \cdot \tau_{Rd}))^{1/2}$ = 0.823 ⇒ $V_{pl,T,z,Rd} = V_{pl,z,Rd} \cdot f_{T,z}$ = 113.07 kNm
Abminderung V_y: $f_{T,y} = (1 - \tau_{t,y,Ed}/\tau_{Rd})^{1/2}$ = 0.614 ⇒ $V_{pl,T,y,Rd} = V_{pl,y,Rd} \cdot f_{T,y}$ = 198.32 kNm
Querkraft
Nachweis: $|V_{z,Ed}|/V_{pl,T,z,Rd}$ = 0.028 < 1 ok
Nachweis: $|V_{y,Ed}|/V_{pl,T,y,Rd}$ = 0.036 < 1 ok
Abminderungsfaktoren:
Steg: 0.5·$V_{pl,T,z,Rd}$ = 56.53 kN > $|V_{z,Ed}|$ = 3.16 kN: ρ_z = 0 (keine Abminderung)
Flansche: 0.5·$V_{pl,T,y,Rd}$ = 99.16 kN > $|V_{y,Ed}|$ = 7.05 kN: ρ_y = 0 (keine Abminderung)
Normalkraft
Nachweis: $|N_{Ed}|/N_{pl,Rd}$ = 0.000 < 1 ok
Biegung und Normalkraft
Abminderung M_z: $M_{pl,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \cdot f_{N,z}$ = 19.93 kNm, $f_{N,z}$ = 1.000
Biegung
Nachweis: $|M_{z,Ed}|/M_{pl,z,Rd}$ = 0.030 < 1 ok

Die Grenzwerte grenz (c/t) werden mit DIN EN 1993-1-1, Abs. 7.5.2, Tabn. 7.3-5 ermittelt.

Dies entspricht der Überprüfung der erforderlichen Klassifizierung des Querschnitts.

Läßt die Klassifizierung keinen plastischen Nachweis zu, wird eine Fehlermeldung ausgegeben.

Schweißnahtnachweis nach DIN 18800

Bemessung von Schweißnähten für Biegung und Normalkraft

Die Spannungsberechnung für Schweißnähte, die durch Biegemomente und Normalkräfte beansprucht werden, erfolgt gemäß den Regeln der Technischen Biegelehre analog zur Berechnung eines allgemeinen Stahlquerschnitts.

Die einzelnen Schweißnahtanteile des Nahtbildes sind gemäß ihrer geometrischen Anordnung alle am Abtrag der Schnittgrößen beteiligt.

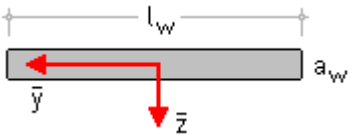
Für die Berechnung der Querschnittswertanteile werden die Nahtflächen als in der Wurzellinie konzentriert betrachtet (Kehlnähte).

Die Querschnittswerte des Nahtbildes ergeben sich durch Summation der Anteile der Einzelnähte.

Eigenträgheitsmomente von Schweißnähten

Die Eigenträgheitsmomente einer einzelnen Schweißnaht können wie bei einem schmalen Rechteckquerschnitt berechnet werden.

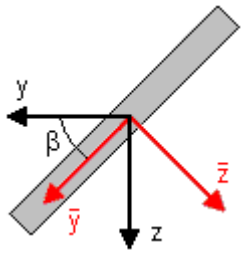
$$i_y = \frac{a_w^3 \cdot l_w}{12} \quad \text{... und ...} \quad i_z = \frac{a_w \cdot l_w^3}{12}$$



Transformation der Trägheitsmomente bei geneigten Nähten

Da auch senkrechte und geneigte Schweißnähte vorkommen können, muss das Eigenträgheitsmoment vom lokalen Koordinatensystem in das globale y-z-Koordinatensystem des Stahlquerschnitts transformiert werden.

$$I_y = \bar{I}_y \cdot \cos^2\beta + \bar{I}_z \cdot \sin^2\beta$$
$$I_z = \bar{I}_z \cdot \cos^2\beta + \bar{I}_y \cdot \sin^2\beta$$
$$I_{yz} = (\bar{I}_z - \bar{I}_y) \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta$$



Die Gesamtfläche A_w der Schweißnähte eines Nahtbildes ergibt sich als Summe der Flächen der Einzelnähte.

Im weiteren Verlauf der Berechnung wird der Schwerpunkt des Nahtbildes berechnet.

Die Gesamtträgheitsmomente des Nahtbildes können dann aus den transformierten Einzelträgheitsmomenten und den Steiner-Anteilen der Einzelnähte aufsummiert werden.

Für die Spannungsberechnung werden die Hauptträgheitsmomente und Hauptachsenwinkel des Nahtbildes benötigt.

Nach der Transformation der Belastung auf das Hauptachsensystem kann die Spannungsberechnung erfolgen.

Für einen beliebigen Punkt auf einer Schweißnaht lässt sich die Normalspannung nach der Gleichung berechnen

$$\sigma_{(\zeta,\eta)} = \frac{N}{A_w} + \frac{M_\eta \cdot \zeta}{I_\eta} - \frac{M_\zeta \cdot \eta}{I_\zeta}$$

I_η und I_ζ sind die Hauptträgheitsmomente des Nahtbildes; M_η und M_ζ sind die auf die Hauptachsen transformierten Biegemomente.

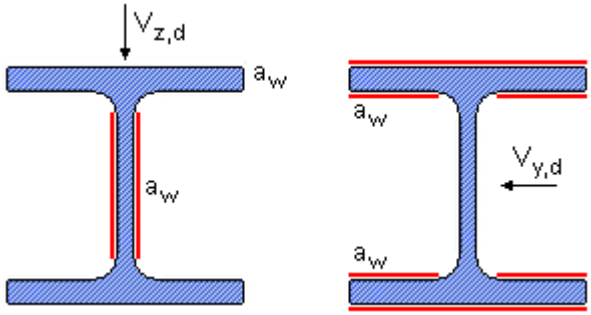
Bei umlaufenden Schweißnähten ist der Berechnungsablauf ähnlich wie zuvor beschrieben. Als zusätzlicher Rechenschritt wird hier die Schweißnaht automatisch in einzelne Abschnitte aufgeteilt, die als Einzelnähte behandelt werden.

Bemessung von Schweißnähten für Querkräfte

Gemäß DIN 18800, El. 821, sind beim Spannungsnachweis die Flächen anzusetzen, die aufgrund ihrer Lage vorzugsweise in der Lage sind, die vorhandenen Schnittgrößen in der Verbindung zu übertragen.

Bei Querkräften sind dies die Nähte, die parallel zur eingetragenen Querkraft verlaufen.

Bei einem I-förmigen Profil werden die Querkräfte in z-Richtung also von den Stegnähten und die Querkräfte in y-Richtung von den Flanschnähten übertragen.



Es gibt Schweißnahtbilder, die nicht zur Übertragung von Querkräften herangezogen werden können.
Z.B. sind Flanschnähte nicht in der Lage, V_z-Lasten aufzunehmen, weil die Flansche in z-Richtung eine zu geringe Biegesteifigkeit aufweisen.

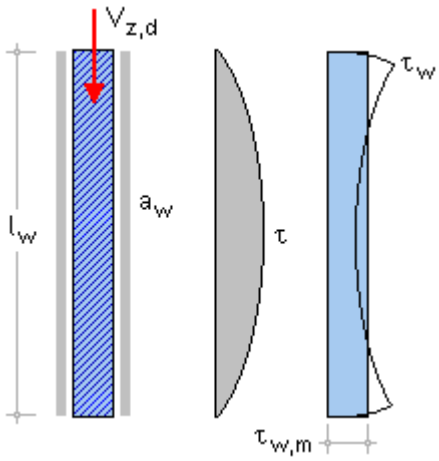
Schubspannungsnachweis

Die Schubspannungsverteilung in der Schweißnaht weicht von der aus der Biegetheorie bekannten Parabelform ab.

Die Schubspannung ist am Nahtende = 0 und erreicht sehr schnell unweit des Nahtendes ihren Höchstwert.

Diese hohen Schubspannungen werden durch einen Verzerrungssprung zwischen der steifen Stirnplatte und dem Schweißnahtende verursacht.

Für die Bemessung wird der Schubspannungsverlauf durch eine konstante Schubspannung angenähert.



$$\tau_{w,m} = \frac{V_{z,d}}{A_{w,q}}$$

Hierin ist $A_{w,q}$ der Anteil der Schweißnahtfläche, der vorzugsweise in der Lage ist, Querkräfte in z-Richtung zu übertragen.

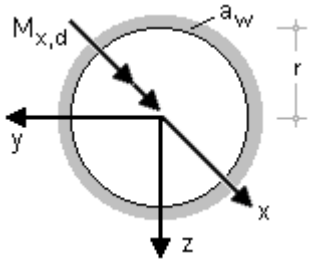
Für den gezeigten Rechteckquerschnitt gilt

$$A_{w,q} = 2 \cdot l_w \cdot a_w$$

Bemessung von Schweißnähten für Torsionsmomente

Die Schweißnahtbemessung für Torsionsmomente kann für Rundrohre und -stähle, Rechteckrohr- und Rechteckprofile und Flachstähle mit umlaufender Kehlnaht erfolgen.

Rundrohr und Rundstahl



Die Bemessung der Schweißnähte erfolgt für diese Profiltypen analog der Bemessung eines dünnwandigen Kreisrings mit der Wandstärke a_w.

Die Schubspannung, die von einem Torsionsmoment in der Schweißnaht erzeugt wird, kann berechnet werden mit

$$\tau_T = \frac{M_{x,d}}{W_T}$$

Die Gleichung für das im Nenner stehende Torsionswiderstandsmoment lautet

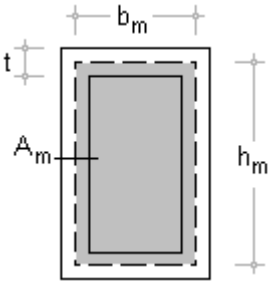
$$W_T = \pi \cdot r^2 \cdot a_w$$

Das Torsionsmoment erzeugt eine konstante umlaufende Schubspannung in der Schweißnaht, die zu der Schubspannung aus Querkraft addiert werden muss.

Rechteckrohre, Rechteckquerschnitte und Flachstähle

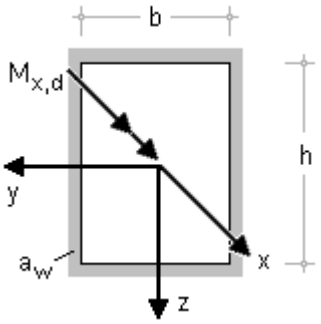
Die Bemessung der Schweißnähte erfolgt für diese Profiltypen wie die Bemessung eines dünnwandigen Hohlkastens.

Dieses Bemessungsmodell gilt für umlaufende Schweißnähte.



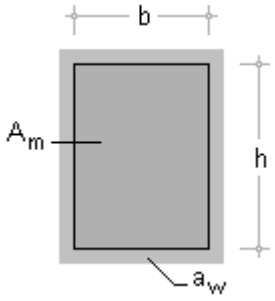
Hohlkastenquerschnitt: Gemäß der 1. Bredt'schen Formel kann ein Hohlkasten mit der Wandstärke t mit Hilfe der folgenden Gleichungen bearbeitet werden

$$\tau_T = \frac{M_{x,d}}{W_T} \quad \text{... mit ...} \quad W_T = 2 \cdot A_m \cdot t \quad \text{... und ...} \quad A_m = b_m \cdot h_m$$



Rechteckquerschnitt mit umlaufender Kehlnaht: Bei der Berechnung der umlaufenden Schweißnaht kann analog vorgegangen werden.

Die Schubspannung in der umlaufenden Kehlnaht eines rechteckigen Querschnitts ergibt sich somit zu



$$\tau_T = \frac{M_{x,d}}{W_T} \quad \text{... mit ...} \quad W_T = 2 \cdot b \cdot h \cdot a_w$$

... und ... $A_m = b \cdot h$ als Fläche zwischen den Wurzellinien der Schweißnähte (Querschnittsfläche des Rechtecks)

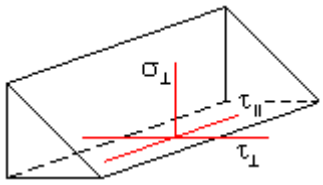
Durch das Torsionsmoment wird in der umlaufenden Kehlnaht eine konstante Schubspannung erzeugt, die zu der Schubspannung aus Querkraft zu addieren ist.

Bemessung von Schweißnähten bei zusammengesetzter Beanspruchung

Treten in den Schweißnähten Normalspannungen und Schubspannungen gleichzeitig auf, sind die Spannungen zu kombinieren.

Beim Nachweis des Bauteils selbst ist der Vergleichsspannungsnachweis zu führen. Für den Nachweis der Schweißnähte hingegen ist gemäß DIN 18800, El. 825, mit einem Vergleichswert $\sigma_{w,v}$ zu arbeiten, der berechnet wird mit

$$\sigma_{w,v} = \sqrt{\sigma_\perp^2 + \tau_\perp^2 + \tau_\parallel^2}$$



Der Vergleichswert darf nicht mit der aus dem Querschnittsnachweis bekannten Vergleichsspannung verwechselt werden. Die Vergleichsspannung führt eine mehraxiale Bauteilbeanspruchung rechnerisch auf eine einaxiale Beanspruchung zurück. Der Vergleichswert hingegen ist keine reale Spannung in der Schweißnaht, sondern ein Versuchswert.

Gemäß El. 825 ist nun nachzuweisen, dass der Vergleichswert die Grenzschweißnahtspannung nicht überschreitet

$$\frac{\sigma_{w,v}}{\sigma_{w,R,d}} \le 1$$

Die Grenzschweißnahtspannung ergibt sich gemäß El. 829 zu

$$\sigma_{w,R,d} = \frac{\alpha_w \cdot f_{y,k}}{\gamma_M}$$

wobei der Abminderungsfaktor α_w von der Nahtgüte, der Stahlgüte und der Beanspruchungsart abhängig ist; er kann DIN 18800, Teil 1, Tab.11, entnommen werden.

Querschnittsnachweis nach DIN 18800

Spannungsnachweis

Die Querschnittsbemessung erfolgt für Lastkombinationen nach Theorie I. Ordnung (lineare Berechnung) mit dem *elastischen* Verfahren.

Dazu werden sowohl die Normalspannungen n. Gl. 31, die Schubspannungen n. Gl. 32 als auch die Vergleichs-spannungen n. Gl. 33 nachgewiesen.

Örtlich begrenzte Plastifizierungen n. El. 747, 749 bzw. 750 sind nicht zugelassen.

Die elastischen Normal-, Schub- und Vergleichsspannungen werden in jedem Eckpunkt durch Addition der Einzelteile aus den Schnittgrößen berechnet

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_\eta \cdot \zeta}{I_\eta} - \frac{M_\zeta \cdot \eta}{I_\zeta}$$

$$\tau = -Q_\eta \cdot \frac{\int_0^s \eta t \cdot ds}{I_\zeta \cdot t} - Q_\zeta \cdot \frac{\int_0^s \zeta t \cdot ds}{I_\eta \cdot t} + \tau_0 \cdot \frac{t_0}{t} \pm T \cdot \frac{t}{I_T}$$

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

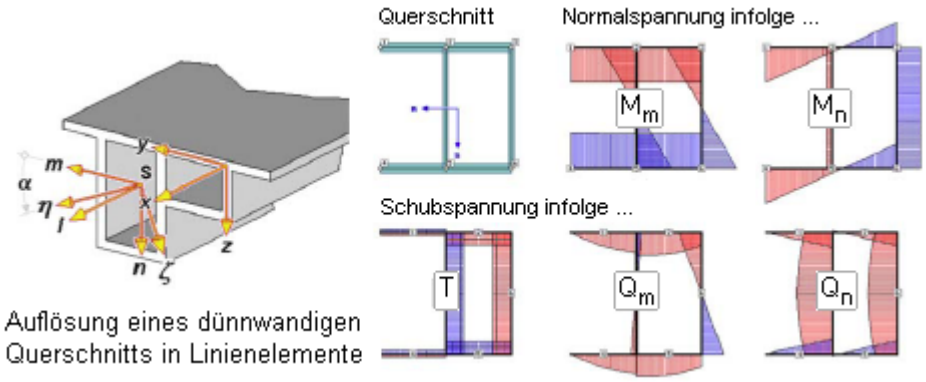
Für die extremalen Spannungen werden die Ausnutzungen berechnet.

Die Spannungsausnutzung ist das Maximum aus den Ausnutzungen der Normal-, Schub- und Vergleichsspannungsnachweise

$$U_\sigma = \max\left(\frac{\sigma}{\sigma_{Rd}}, \frac{\tau}{\tau_{Rd}}, \frac{\sigma_V}{\sigma_{V,Rd}}\right)$$

vereinfachter Beulnachweis

Stehen einzelne Querschnittsteile unter Druckbeanspruchung, kann ein vereinfachter Beulnachweis über den grenz(b/t)-Nachweis geführt werden.



Dazu werden die Druckspannungen eines dünnwandigen Querschnitts nach Tab. 13, 14 (elastisches Verfahren) für den Linienquerschnitt ermittelt.

Die Ausnutzung vorh(b/t)/grenz(b/t) wird für alle Linien maximiert, wobei sich unterschiedliche Werte für beidseitig (z.B. Steg, $(b/t)_{o\text{-}o}$) und einseitig gelagerte (z.B. eine Gurtseite, $(b/t)_{o\text{-}-}$) Plattenstreifen ergeben.

Die maximale Ausnutzung aus Querschnittsbeulen ergibt sich zu

$$U_{b/t} = \max\left((b/t)_{o\text{-}o}, (b/t)_{o\text{-}-}\right)$$

Theorie dünnwandiger Querschnitte

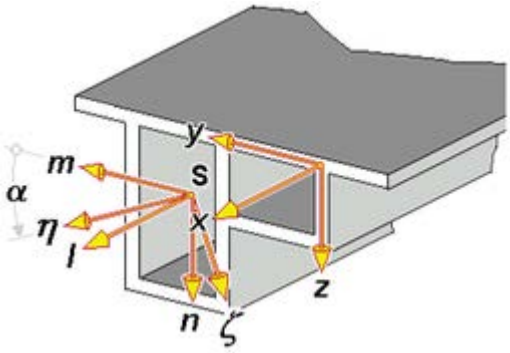
• Koordinatensysteme

Die klassische Stabtheorie geht von der Formerhaltung des Querschnitts aus.

Die Querschnittslage lässt sich im lokalen xyz-Querschnittskoordinatensystem über drei Verschiebungen u_x, u_y, u_z und drei Verdrehungen φ_x, φ_y, φ_z beschreiben.

Bei der Theorie der Wölbkrafttorsion wird die Verwölbung des Querschnitts durch das Produkt der Einheitsverwölbung ω mit der Verwindung ψ_x beschrieben.

Neben dem xyz-Querschnittskoordinatensystem, in dem der Querschnitt modelliert wird, gibt es das durch den Schwerpunkt S mit den Koordinaten (e_y, e_z) verlaufende lmn-System, dessen Achsen parallel zu den xyz-Achsen verlaufen (Entkopplung der Fläche und der Trägheitsmomente), und das durch S verlaufende ξηζ-Hauptachsensystem (Entkopplung der Trägheitsmomente).



Zur Beschreibung der Torsion wird der Schubmittelpunkt M mit den Koordinaten (y_M, z_M) als Drehpunkt verwendet (z.B. normierte Einheitsverwölbung ω, Entkopplung der Biegung und Wölbkrafttorsion).

Die Berechnung der Querschnittswerte und der Spannungen aus Biegung erfolgt am vollständigen Modell mit Verschneidungen, Abschrägungen und Ausrundungen.

Die Verteilung der Schubflüsse, der Schubspannungen und der Verwölbung längs der Mittellinien wird am Linienmodell unter Berücksichtigung der veränderlichen Dicke ermittelt.

• Schwerpunkt, Trägheitsmomente und Hauptachsen

Bei einer konstanten Spannungsverteilung verschwinden die Biegemomente im Schwerpunkt.

Die Schwerpunktskoordinaten (e_y, e_z) lassen sich mit der Querschnittsfläche A und den statischen Momenten S_y bzw. S_z berechnen.

$$e_y = S_z / A \quad \text{... und ...} \quad e_z = S_y / A \quad \text{... mit ...} \quad S_z = \int_A y \cdot dA \quad \text{... und ...} \quad S_y = \int_A z \cdot dA$$

Mit den Trägheitsmomenten im Schwerpunkt lassen sich im linear elastischen Fall die Schnittgrößen der Biegung aus der Dehnung ε_S und den Krümmungen κ_m, κ_n ermitteln.

$$N = E \cdot A \cdot \varepsilon_S \quad \ldots \quad M_m = E \cdot (I_m \cdot \kappa_m - I_{mn} \cdot \kappa_n) \quad \ldots \quad M_n = E \cdot (-I_{nm} \cdot \kappa_m + I_n \cdot \kappa_n)$$

$$I_m = \int_A (z - e_z)^2 \cdot dA \quad \ldots \quad I_n = \int_A (y - e_y)^2 \cdot dA \quad \ldots \quad I_{mn} = \int_A (y - e_y) \cdot (z - e_z) \cdot dA$$

Das ξηζ-Hauptachsensystem ist bzgl. des Querschnittskoordinatensystems um den Winkel α verdreht.
Im Hauptachsensystem ist das Deviationsmoment I_{mn} gleich Null, so dass die Krümmungen und Momente der Hauptbiegerichtungen entkoppelt sind.

$$\eta = (y - e_y) \cdot \cos\alpha + (z - e_z) \cdot \sin\alpha \quad \ldots \quad \zeta = -(y - e_y) \cdot \sin\alpha + (z - e_z) \cdot \cos\alpha$$

$$I_\eta = \int_A \zeta^2 \cdot dA = I_m \cdot \cos^2\alpha + I_n \cdot \sin^2\alpha - 2 \cdot I_{mn} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha$$

$$I_\zeta = \int_A \eta^2 \cdot dA = I_m \cdot \sin^2\alpha + I_n \cdot \cos^2\alpha + 2 \cdot I_{mn} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha$$

$$I_{\eta\zeta} = \int_A \eta \cdot \zeta \cdot dA = (I_m - I_n) \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha + I_{mn} \cdot (\cos^2\alpha - \sin^2\alpha) = 0$$

$$\alpha = 0.5 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot I_{mn}}{I_n - I_m}\right)$$

Der Hauptachsendrehwinkel ist bis auf ein Vielfaches von 90° bestimmt. Der Winkel wird so gewählt, dass er bzgl. des Querschnittskoordinatensystems betragsmäßig möglichst klein ist.

- **Verwölbung und Schubmittelpunkt**

Für dünnwandige Querschnitte berechnet sich die Wölbordinate $\omega_{D,0}$ für den Drehpunkt D mit den Koordinaten (y_D, z_D) als Integral des Hebelarms r_D der Querschnittspunkte zum Drehpunkt längs der Profilkoordinate s (β: Winkel der Tangente an die Mittellinie).

$$\omega_{D,0}(s) = \int_0^s r_D \cdot ds \quad \ldots \text{mit} \ldots \quad r_D = (y - y_D) \cdot \sin\beta - (z - z_D) \cdot \cos\beta$$

Es wird davon ausgegangen, dass die Verwölbung in Dickenrichtung konstant ist.
Die mittlere Querschnittsdehnung der zugehörigen Einheitsverwölbung ω_D ist Null, so dass bei reiner Verwölbung (im linear elastischen Fall) keine Normalkraft vorhanden ist.

$$\omega_D(s) = \omega_{D,0}(s) - \int_A \omega_{D,0} \cdot dA$$

Die Einheitsverwölbungen mit den Drehpunkten (y_D, z_D) und (y_M, z_M) stehen in folgender Beziehung

$$\omega_M = \omega_D + (z_M - z_D) \cdot (y - e_y) - (y_M - y_D) \cdot (z - e_z)$$

Der Schubmittelpunkt (y_M, z_M) ist der Drehpunkt, für den bei reiner Verwölbung (im linear elastischen Fall) keine Biegemomente auftreten. Für den Abstand (y_{SM}, z_{SM}) des Schubmittelpunkts vom Schwerpunkt ergibt sich

$$y_{SM} = y_M - e_y = \frac{R_{Sy} \cdot I_n - R_{Sz} \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2}$$

$$z_{SM} = z_M - e_z = \frac{R_{Sz} \cdot I_m - R_{Sy} \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2}$$

$$R_{Sy} = \int_A \omega_S \cdot (z - e_z) \cdot dA \quad \ldots \text{und} \ldots \quad R_{Sz} = \int_A \omega_S \cdot (y - e_y) \cdot dA$$

- **Schnittgrößen und Spannungen**

Die Schnittgrößen ergeben sich durch Integration der Normal- bzw. Schubspannungen über den Querschnitt.

Die Schnittkräfte wirken in Richtung der verformten Querschnittsachsen, die Momente drehen um die entsprechenden Achsen in positiver Richtung (Rechte-Hand-Regel).

$$N = \int_A \sigma_x \cdot dA \quad \ldots \quad M_y = \int_A \sigma_x \cdot z \cdot dA \quad \ldots \quad M_z = -\int_A \sigma_x \cdot y \cdot dA \quad \ldots \quad M_\omega = \int_A \sigma_x \cdot \omega \cdot dA$$

$$V_y = \int_A \tau_{xy} \cdot dA \quad \ldots \quad V_z = \int_A \tau_{xz} \cdot dA \quad \ldots \quad T_t = \int_A \left(\tau_{xz} \cdot \left(y - y_M - \frac{\partial\omega}{\partial z}\right) - \tau_{xy} \cdot \left(z - z_M + \frac{\partial\omega}{\partial y}\right)\right) \cdot dA$$

Mit den Biegemomenten im Hauptachsensystem, den Torsionsschnittgrößen um den Schubmittelpunkt und den entsprechenden Trägheitsmomenten können im linear elastischen Fall die Normalspannungen aus den Schnittgrößen ermittelt werden.

$$\varepsilon_x(y,z) = u'(y,z) = u'_S - (y - e_y)\cdot\varphi'_z + (z - e_z)\cdot\varphi'_y - \omega_M(y,z)\cdot\vartheta''$$

$$\sigma_x(y,z) = E\cdot\varepsilon_x(y,z) = \frac{N}{A} - (y - e_y)\cdot\frac{I_m\cdot M_n + I_{mn}\cdot M_m}{I_m\cdot I_n - I_{mn}^2} + (z - e_z)\cdot\frac{I_n\cdot M_m + I_{mn}\cdot M_n}{I_m\cdot I_n - I_{mn}^2} + \omega_M\cdot\frac{M_\omega}{C_M}$$

$$\varepsilon_x(\eta,\zeta) = u'(\eta,\zeta) = u'_S - \eta\cdot\varphi'_\zeta + \zeta\cdot\varphi'_\eta - \omega_M(\eta,\zeta)\cdot\vartheta''$$

$$N = E\cdot A\cdot u'_S \quad\ldots\quad M_\eta = E\cdot I_\eta\cdot\varphi'_\eta \quad\ldots\quad M_\zeta = E\cdot I_\zeta\cdot\varphi'_\zeta \quad\ldots\quad M_\omega = -E\cdot C_M\cdot\vartheta''$$

$$\sigma_x(\eta,\zeta) = E\cdot\varepsilon_x(\eta,\zeta) = \frac{N}{A} - \eta\cdot\frac{M_\zeta}{I_\zeta} + \zeta\cdot\frac{M_\eta}{I_\eta} + \omega_M\cdot\frac{M_\omega}{C_M} \quad\ldots\quad I_\eta = \int_A \zeta^2\cdot dA \quad\ldots\quad I_\zeta = \int_A \eta^2\cdot dA \quad\ldots\quad C_M = \int_A \omega_M{}^2\cdot dA$$

Für dünnwandige Querschnitte werden zur Berechnung des Schubflusses T und der Schubspannung τ_{xs} in Richtung der Profilmittellinien die statischen Momente S_η, S_ζ, S_ω und die Profildicken t in Abhängigkeit der Profilkoordinate s benötigt.

$$V_\eta = -M'_\zeta \quad\ldots\quad V_\zeta = M'_\eta \quad\ldots\quad T_w = M'_\omega \quad\ldots\quad T_t = G\cdot I_T\cdot\vartheta'$$

$$S_\zeta(s) = \int_{A(s)}\eta\cdot ds \quad\ldots\quad S_\eta(s) = \int_{A(s)}\zeta\cdot ds \quad\ldots\quad S_\omega(s) = \int_{A(s)}\omega_M\cdot ds$$

$$T(s) = -\frac{S_\zeta(s)}{I_\zeta}\cdot V_\eta - \frac{S_\eta(s)}{I_\eta}\cdot V_\zeta - \frac{S_\omega(s)}{C_M}\cdot T_w + \vartheta_{Tt,B}(s)\cdot T_t = \vartheta_{V\eta}(s)\cdot V_\eta + \vartheta_{V\zeta}(s)\cdot V_\zeta + \vartheta_{T\omega}(s)\cdot T_w + \vartheta_{Tt,B}(s)\cdot T_t$$

$$\tau_{xs}(s,\lambda) = \frac{T(s)}{t(s)} + \frac{T_t\cdot t(s)}{I_T} = \frac{\vartheta_{V\eta}(s)}{t(s)}\cdot V_\eta + \frac{\vartheta_{V\zeta}(s)}{t(s)}\cdot V_\zeta + \frac{\vartheta_{T\omega}(s)}{t(s)}\cdot T_w + \frac{\vartheta_{Tt,B}(s)}{t(s)}\cdot T_t + \lambda\cdot t(s)\cdot\mu_{Tt,S}(s)\cdot T_t \quad\ldots\quad -1 \le \lambda \le 1$$

T_t ist dabei das primäre Torsionsmoment aus *St. Venant'scher Torsion* und T_w das sekundäre Torsionsmoment aus *Wölbkrafttorsion*.

Für Querschnitte mit geschlossenen Zellen kommen noch Schubspannungen aus den Schubflüssen der einzelnen Zellen hinzu.

Die Faktoren ϑ entsprechen den Einheitsschubflüssen der entsprechenden Schnittgröße.

Die Schubspannungen aus V_η, V_ζ und T_w bzw. T_t der Zellen sind nach Voraussetzung konstant in Dickenrichtung.

Die Schubspannung aus T_t der einzelnen Querschnittslinien ist in Dickenrichtung linear veränderlich und verschwindet auf der Mittellinie.

• Wagner-Effekt

Neben dem primären Torsionsmoment T_t tritt bei Berechnungen nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung des Wagner-Effekts das Torsionsmoment T_σ infolge Normalspannungen auf.

$$T_\sigma = \int_A \sigma_x\cdot r_M^2\cdot dA\cdot\vartheta' = \int_A \sigma_x\cdot\left((y - y_M)^2 + (z - z_M)^2\right)\cdot dA\cdot\vartheta' = K_\sigma\cdot\vartheta'$$

Der Wagner-Koeffizient K_σ lässt sich aus den Schnittgrößen im Hauptachsensystem berechnen.

$$K_\sigma = N\cdot i_M^2 + M_\eta\cdot r_\zeta - M_\zeta\cdot r_\eta + M_\omega\cdot r_\omega$$

Die Querschnittsstrecken ergeben sich durch Integration des Quadrats des Schwerpunktabstands r_S über den Querschnitt.

$$i_M^2 = \frac{I_\eta + I_\zeta}{A} + \eta_M^2 + \zeta_M^2 = i_p^2 + \eta_M^2 + \zeta_M^2 \quad\ldots\quad r_\eta = \frac{1}{I_\zeta}\cdot\int_A \eta\cdot r_S^2\cdot dA - 2\cdot\eta_M \quad\ldots\quad r_\zeta = \frac{1}{I_\eta}\cdot\int_A \zeta\cdot r_S^2\cdot dA - 2\cdot\zeta_M \quad\ldots\quad r_\omega = \frac{1}{C_M}\cdot\int_A \omega_M\cdot r_S^2\cdot dA$$

• Schubkorrekturfaktoren

Die Schubkorrekturfaktoren werden zur Ermittlung der Schubflächen bzw. Schubsteifigkeiten bei der Berechnung von schubweichen Stäben benötigt.

Die mittlere Schubgleitungen γ_{xy} und γ_{xz} stehen mit den zugehörigen Querkräften in Beziehung.

$$\gamma_{xy} = \kappa_y \cdot \frac{V_y}{G \cdot A} \quad \gamma_{xz} = \kappa_z \cdot \frac{V_z}{G \cdot A} \quad A_{Vy} = \frac{A}{\kappa_y} \quad A_{Vz} = \frac{A}{\kappa_z}$$

$$\kappa_y = \frac{A}{V_y^2} \cdot \int_A (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2) \cdot dA = A \cdot \int_s \frac{\vartheta_{Ty}^2}{t} \cdot ds \quad \kappa_z = \frac{A}{V_z^2} \cdot \int_A (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2) \cdot dA = A \cdot \int_s \frac{\vartheta_{Tz}^2}{t} \cdot ds \quad \kappa_{yz} = A \cdot \int_s \frac{\vartheta_{Ty} \cdot \vartheta_{Tz}}{t} \cdot ds$$

ϑT_y und ϑT_z sind dabei die Einheitsschubflüsse der Querkräfte in y- und z-Richtung. Aus den κ-Werten lassen sich die Schubkorrekturfaktoren in einem um den Winkel α verdrehten Koordinatensystem berechnen.

$$\kappa_\eta = \cos^2\alpha \cdot \kappa_y + \sin^2\alpha \cdot \kappa_z + 2 \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot \kappa_{yz} \quad \kappa_\zeta = \sin^2\alpha \cdot \kappa_y + \cos^2\alpha \cdot \kappa_z - 2 \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot \kappa_{yz}$$

- **mehrteilige Querschnitte**

Falls nicht alle Querschnittsteile miteinander verbunden sind, liegt ein mehrteiliger Querschnitt vor.

Bei einem derart gespreizten Querschnitt wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Teile durch Riegel oder Platten so miteinander gekoppelt sind, dass sie sich affin zueinander verformen.

Den Schubmittelpunkt des Gesamtquerschnitts erhält man durch gewichtete Summation der Schubmittelpunkte der Teile. Die Verwölbung mit dem Schubmittelpunkt (y_M, z_M) als Drehachse des i-ten Teils im Gesamtquerschnitt kann aus der Verwölbung des Teils mit dem i-ten Schubmittelpunkt ($y_{M,i}$, $z_{M,i}$) als Drehachse berechnet werden.

Die Verschiebung u in Richtung der Stabachse bzw. die Längsspannung für den linear-elastischen Fall kann dann lokal für jedes Teil formuliert werden.

$$y_M = \frac{\left(\sum_i y_{M,i} \cdot I_{m,i} - \sum_i z_{M,i} \cdot I_{mn,i}\right) \cdot \sum_i I_{n,i} + \left(\sum_i z_{M,i} \cdot I_{n,i} - \sum_i y_{M,i} \cdot I_{mn,i}\right) \cdot \sum_i I_{mn,i}}{\sum_i I_{m,i} \cdot \sum_i I_{n,i} - \left(\sum_i I_{mn,i}\right)^2}$$

$$z_M = \frac{\left(\sum_i z_{M,i} \cdot I_{n,i} - \sum_i y_{M,i} \cdot I_{mn,i}\right) \cdot \sum_i I_{m,i} + \left(\sum_i y_{M,i} \cdot I_{m,i} - \sum_i z_{M,i} \cdot I_{mn,i}\right) \cdot \sum_i I_{mn,i}}{\sum_i I_{m,i} \cdot \sum_i I_{n,i} - \left(\sum_i I_{mn,i}\right)^2}$$

$$\omega_M = \omega_{M,i} - (y - e_{y,i}) \cdot (z_{M,i} - z_M) + (z - e_{z,i}) \cdot (y_{M,i} - y_M)$$

$$u = \left(u_S + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot \varphi_y - \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot \varphi_z\right) + (z - e_{z,i}) \cdot \left(\varphi_y - (y_{M,i} - y_M) \cdot \vartheta'\right) - (y - e_{y,i}) \cdot \left(\varphi_z - (z_{M,i} - z_M) \cdot \vartheta'\right) - \omega_{M,i} \cdot \vartheta'$$

$$\sigma_{x,i}(y,z) = \frac{N}{A} - \left((y - e_{y,i}) + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y)\right) \cdot \frac{I_m \cdot M_n + I_{mn} \cdot M_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} + \left((z - e_{z,i}) + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z)\right) \cdot \frac{I_n \cdot M_m + I_{mn} \cdot M_n}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2}$$
$$+ \left(\omega_{M,i} - (y - e_{y,i}) \cdot (z_{M,i} - z_M) + (z - e_{z,i}) \cdot (y_{M,i} - y_M)\right) \cdot \frac{M_\omega}{C_M}$$

$$= \left(\frac{N}{A} - \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot \frac{I_m \cdot M_n + I_{mn} \cdot M_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot \frac{I_n \cdot M_m + I_{mn} \cdot M_n}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2}\right)$$
$$- (y - e_{y,i}) \cdot \left(\frac{I_m \cdot M_n + I_{mn} \cdot M_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} + (z_{M,i} - z_M) \cdot \frac{M_\omega}{C_M}\right) + (z - e_{z,i}) \cdot \left(\frac{I_n \cdot M_m + I_{mn} \cdot M_n}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} + (y_{M,i} - y_M) \cdot \frac{M_\omega}{C_M}\right) + \omega_{M,i} \cdot \frac{M_\omega}{C_M}$$

Die Querschnittsteile können biegesteif oder biegeschlaff miteinander verbunden sein.

Die Verteilung der Normalkräfte hängt vom Grad α der Biegekopplung ab (biegesteif: α = 1, biegeschlaff: α = 0).

Der Wert von α hat über den Steiner-Anteil der Teile Einfluss auf die Trägheitsmomente des Gesamtquerschnitts.

Die Querschnittswerte des Gesamtquerschnitts erhält man durch Summation der Querschnittswerte der Teile.

$$A = \sum_i A_i \quad e_y = \frac{\sum_i e_{y,i} \cdot A_i}{A} \quad e_z = \frac{\sum_i e_{z,i} \cdot A_i}{A}$$

$$I_m = \sum_i \left(I_{m,i} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z)^2 \cdot A_i\right) \quad I_n = \sum_i \left(I_{n,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y)^2 \cdot A_i\right)$$

$$I_{mn} = \sum_i \left(I_{mn,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot A_i\right) \quad I_T = \sum_i I_{T,i}$$

$$C_M = \sum_i \left(C_{M,i} + (y_{M,i} - y_M)^2 \cdot I_{m,i} + (z_{M,i} - z_M)^2 \cdot I_{n,i} - 2 \cdot (y_{M,i} - y_M) \cdot (z_{M,i} - z_M) \cdot I_{mn,i}\right)$$

Die Normalkräfte verteilen sich im Verhältnis der Teilflächen.

$$N_i = \int_{A_i} \sigma_{x,i} \cdot dA = \frac{A_i}{A} \cdot N + \alpha \cdot A_i \cdot \left(\frac{(e_{z,i} - e_z) \cdot I_n - (e_{y,i} - e_y) \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot M_m + \frac{(e_{z,i} - e_z) \cdot I_{mn} - (e_{y,i} - e_y) \cdot I_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot M_n \right)$$

Wenn die Krümmungen der Querschnittsteile identisch sind, lassen sich die (linear elastischen) Momente $M_{m,i}$ und $M_{n,i}$ der Teile bzgl. ihrer Schwerpunkte aus den Momenten M_m und M_n des Gesamtquerschnitts berechnen.

$$M_{m,i} = \int_{A_i} \sigma_{x,i} \cdot (z - e_{z,i}) \cdot dA = \frac{I_{m,i} \cdot I_n - I_{mn,i} \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot M_m + \frac{I_{m,i} \cdot I_{mn} - I_{mn,i} \cdot I_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot M_n + \frac{(y_{M,i} - y_M) \cdot I_{m,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot I_{mn,i}}{C_M} \cdot M_\omega$$

$$M_{n,i} = -\int_{A_i} \sigma_{x,i} \cdot (y - e_{y,i}) \cdot dA = \frac{I_{n,i} \cdot I_{mn} - I_{mn,i} \cdot I_n}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot M_m + \frac{I_{n,i} \cdot I_m - I_{mn,i} \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot M_n + \frac{(z_{M,i} - z_M) \cdot I_{n,i} - (y_{M,i} - y_M) \cdot I_{mn,i}}{C_M} \cdot M_\omega$$

Für die Aufteilung der Querkräfte ergeben sich dann ähnliche Beziehungen.

$$V_m = -M_n' = \int_A (y - e_y) \cdot \sigma_x' \cdot dA = \sum_i \int_{A_i} \left((y - e_{y,i}) + (e_{y,i} - e_y) \right) \cdot \sigma_x' \cdot dA = \sum_i \left(-M_{n,i}' + (e_{y,i} - e_y) \cdot N_i' \right)$$

$$V_n = M_m' = \int_A (z - e_z) \cdot \sigma_x' \cdot dA = \sum_i \int_{A_i} \left((z - e_{z,i}) + (e_{z,i} - e_z) \right) \cdot \sigma_x' \cdot dA = \sum_i \left(M_{m,i}' + (e_{z,i} - e_z) \cdot N_i' \right)$$

$$V_{m,i} = \frac{I_{n,i}^+ \cdot I_m - I_{mn,i}^+ \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot V_m - \frac{I_{n,i}^+ \cdot I_{mn} - I_{mn,i}^+ \cdot I_n}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot V_n - \frac{(z_{M,i} - z_M) \cdot I_{n,i} - (y_{M,i} - y_M) \cdot I_{mn,i}}{C_M} \cdot T_\omega$$

$$V_{n,i} = -\frac{I_{m,i}^+ \cdot I_{mn} - I_{mn,i}^+ \cdot I_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot V_m + \frac{I_{m,i}^+ \cdot I_n - I_{mn,i}^+ \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot V_n + \frac{(y_{M,i} - y_M) \cdot I_{m,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot I_{mn,i}}{C_M} \cdot T_\omega$$

... mit ... $I_{m,i}^+ = I_{m,i} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z)^2 \cdot A_i$ ... und ... $I_{n,i}^+ = I_{n,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y)^2 \cdot A_i$

... und ... $I_{mn,i}^+ = I_{mn,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot A_i$

Die Torsionsmomente und das Wölbbimoment verteilen sich im Verhältnis der Querschnittswerte auf die einzelnen Teile.

$$T_{t,i} = \frac{I_{T,i}}{I_T} \cdot T_t \quad \ldots \quad T_{w,i} = \frac{C_{M,i}}{C_M} \cdot T_w \quad \ldots \quad M_{\omega,i} = \frac{C_{M,i}}{C_M} \cdot M_\omega$$

Die Schnittgrößen des Gesamtquerschnitts erhält man durch Summation der Teilschnittgrößen.

$$N_i = \sum_i N_i \quad \ldots \quad M_m = \sum_i \left(M_{m,i} + (e_{z,i} - e_z) \cdot N_i \right) \quad \ldots \quad M_n = \sum_i \left(M_{n,i} - (e_{y,i} - e_y) \cdot N_i \right)$$

$$M_\omega = \sum_i \left(M_{\omega,i} + (y_{M,i} - y_M) \cdot M_{m,i} + (z_{M,i} - z_M) \cdot M_{n,i} \right)$$

$$V_m = \sum_i V_{m,i} \quad \ldots \quad V_n = \sum_i V_{n,i} \quad \ldots \quad T_t = \sum_i T_{t,i}$$

$$T_w = M_\omega' = \sum_i \left(T_{w,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot V_{m,i} + (y_{M,i} - y_M) \cdot V_{n,i} \right)$$

Ergebnisse dünnwandiger Querschnitte

- **Ergebnisse im y-z-Querschnittskoordinatensystem**

A ..... Querschnittsfläche

$e_y = \frac{1}{A} \cdot \int_A y \cdot dA$ ..... y-Koordinate Schwerpunkt

$e_z = \frac{1}{A} \cdot \int_A z \cdot dA$ ..... z-Koordinate Schwerpunkt

$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot I_{mn}}{I_n - I_m}\right)$ ..... Hauptachsendrehwinkel

h_{y+} ..... maximale y-Koordinate Randabstand

h_{y-} ..... minimale y-Koordinate Randabstand

h_{z+} ..... maximale z-Koordinate Randabstand

h_{z-} ..... minimale z-Koordinate Randabstand

$h_y = h_{y+} - h_{y-}$ ..... Abmessung in y-Richtung

$h_z = h_{z+} - h_{z-}$ ..... Abmessung in z-Richtung

t_{max} ..... maximale Liniendicke

t_{min} ..... minimale Liniendicke

$\kappa_y = \frac{A}{V_y^2} \cdot \int_A (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2) \cdot dA$ ..... Schubkorrekturfaktor in y-Richtung

$\kappa_z = \frac{A}{V_z^2} \cdot \int_A (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2) \cdot dA$ ..... Schubkorrekturfaktor in z-Richtung

$A_{Vy} = \frac{A}{\kappa_y}$ ..... Schubfläche in y-Richtung

$A_{Vz} = \frac{A}{\kappa_z}$ ..... Schubfläche in z-Richtung

U_a ..... Querschnittsumfang außen

U_i ..... Querschnittsumfang innen

$U = U_a + U_i$ ..... Querschnittsumfang

- **Torsion und Verwölbung**

y_M ..... y-Koordinate Schubmittelpunkt

z_M ..... z-Koordinate Schubmittelpunkt

$y_{SM} = y_M - y_S = \frac{R_{Sy} \cdot I_n - R_{Sz} \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2}$ ..... Abstand Schubmittelpunkt/Schwerpunkt: y-Koordinate

$z_{SM} = z_M - z_S = \frac{R_{Sz} \cdot I_m - R_{Sy} \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2}$ ..... Abstand Schubmittelpunkt/Schwerpunkt: z-Koordinate

η_M ..... Schubmittelpunkt im Hauptachsensystem: η-Koordinate

ζ_M ..... Schubmittelpunkt im Hauptachsensystem: ζ-Koordinate

$I_{T,S}$ ..... Saint Venant'sches Torsionsträgheitsmoment der Linien

$I_{T,B}$ ..... Bredt'sches Torsionsträgheitsmoment der Zellen

$I_T = I_{T,S} + I_{T,B}$ ..... (Gesamt)Torsionsträgheitsmoment

$R_{Sy} = \int_A \omega_S \cdot (z - e_z) \cdot dA$ ..... Wölbmoment (im Schwerpunkt) um die y-Achse

$R_{Sz} = \int_A \omega_S \cdot (y - e_y) \cdot dA$ ..... Wölbmoment (im Schwerpunkt) um die z-Achse

$C_M = I_{\omega,M} = \int_A \omega_M^2 \cdot dA$ ..... Wölbwiderstand bzgl. Schubmittelpunkt

$C_S = I_{\omega,S} = \int_A \omega_S^2 \cdot dA =$

$= C_M + R_{Sy} \cdot (y_M - e_y) - R_{Sz} \cdot (z_M - e_z)$ ..... Wölbwiderstand bzgl. Schwerpunkt

$I_{p,M} = I_p + A \cdot (\eta_M^2 + \zeta_M^2) = A \cdot i_M^2$ ..... polarer Trägheitsradius bzgl. Schubmittelpunkt

$i_{\omega,M} = \sqrt{\frac{C_M}{I_{p,M}}}$ ..... Wölbträgheitsradius

ω_{M+} ..... maximale Verwölbung

ω_{M-} ..... minimale Verwölbung

$W_{\omega+} = \frac{C_M}{\omega_{M+}}$ ..... Wölbwiderstandsmoment der maximalen Verwölbung

$W_{\omega-} = \frac{C_M}{|\omega_{M-}|}$ ..... Wölbwiderstandsmoment der minimalen Verwölbung

$W_{el,\omega} = \min(|W_{\omega+}|, |W_{\omega-}|)$ ..... Wölbwiderstandsmoment

- **Ergebnisse im m-n-Schwerpunktsystem**

$I_m = \int_A (z - e_z)^2 \cdot dA$ ..... Trägheitsmoment um die m-Achse

$I_n = \int_A (y - e_y)^2 \cdot dA$ ..... Trägheitsmoment um die n-Achse

$I_{mn} = \int_A (y - e_y) \cdot (z - e_z) \cdot dA$ .... Deviationsmoment (Zentrifugalmoment) im Schwerpunktsystem

$i_m = \sqrt{I_m / A}$ ..... Trägheitsradius um die m-Achse

$i_n = \sqrt{I_n / A}$ ..... Trägheitsradius um die n-Achse

$i_{mn} = \sqrt{I_{mn} / A}$ ..... Trägheitsradius bzgl. der m-n-Achsen

h_{m+} ..... Randabstand: maximale m-Koordinate

h_{m-} ..... Randabstand: minimale m-Koordinate

h_{n+} ..... Randabstand: maximale n-Koordinate

h_{n-} ..... Randabstand: minimale n-Koordinate

$W_{m+} = \frac{I_m}{h_{n+}}$ ..... Widerstandsmoment um die m-Achse, positive n-Seite

$W_{m-} = \frac{I_m}{|h_{n-}|}$ ..... Widerstandsmoment um die m-Achse, negative n-Seite

$W_{n+} = \frac{I_n}{h_{m+}}$ ..... Widerstandsmoment um die n-Achse, positive m-Seite

$W_{n-} = \frac{I_n}{|h_{m-}|}$ ..... Widerstandsmoment um die n-Achse, negative m-Seite

$W_{el,m} = \min(W_{m+}, W_{m-})$ ..... Widerstandsmoment um die m-Achse

$W_{el,n} = \min(W_{n+}, W_{n-})$ ..... Widerstandsmoment um die n-Achse

$\kappa_m = \frac{A}{V_m^2} \cdot \int_A (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2) \cdot dA$ ... Schubkorrekturfaktor in m-Richtung

$\kappa_n = \frac{A}{V_n^2} \cdot \int_A (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2) \cdot dA$ ... Schubkorrekturfaktor in n-Richtung

$A_{Vm} = A / \kappa_m$ ..... Schubfläche in m-Richtung

$A_{Vn} = A / \kappa_n$ ..... Schubfläche in n-Richtung

- **Ergebnisse im η-ζ-Hauptachsensystem**

$I_\eta = \int_A \eta^2 \cdot dA$ ..... Trägheitsmoment um die η-Achse

$I_\zeta = \int_A \zeta^2 \cdot dA$ ..... Trägheitsmoment um die ζ-Achse

$I_p = \int_A r_S^2 \cdot dA = I_\eta + I_\zeta = I_m + I_n$ polares Trägheitsmoment

$i_\eta = \sqrt{I_\eta / A}$ ..... Trägheitsradius um die η-Achse

$i_\zeta = \sqrt{I_\zeta / A}$ ..... Trägheitsradius um die ζ-Achse

$i_p = \sqrt{I_p / A}$ ..... polarer Trägheitsradius

$h_{\eta+}$ ..... Randabstand: maximale η-Koordinate

$h_{\eta-}$ ..... Randabstand: minimale η-Koordinate

$h_{\zeta+}$ ..... Randabstand: maximale ζ-Koordinate

$h_{\zeta-}$ ..... Randabstand: minimale ζ-Koordinate

$h_{\eta-} = h_{\eta+} - h_{\eta-}$ ..... Abmessung in η-Richtung

$h_{\zeta+} = h_{\zeta+} - h_{\zeta-}$ ..... Abmessung in ζ-Richtung

$W_{\eta+} = \frac{I_\eta}{h_{\zeta+}}$ ..... Widerstandsmoment um die η-Achse, positive ζ-Seite

$W_{\eta-} = \frac{I_\eta}{|h_{\eta-}|}$ ..... Widerstandsmoment um die η-Achse, negative ζ-Seite

$W_{\zeta+} = \frac{I_\zeta}{h_{\eta+}}$ ..... Widerstandsmoment um die ζ-Achse, positive η-Seite

$W_{\zeta-} = \frac{I_\zeta}{|h_{\eta-}|}$ ..... Widerstandsmoment um die ζ-Achse, negative η-Seite

$W_{el,\eta} = \min(W_{\eta+}, W_{\eta-})$ ..... Widerstandsmoment um die η-Achse

$W_{el,\zeta} = \min(W_{\zeta+}, W_{\zeta-})$ ..... Widerstandsmoment um die ζ-Achse

$\kappa_\eta = \frac{A}{V_\eta^2} \cdot \int_A (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2) \cdot dA$ ... Schubkorrekturfaktor in η-Richtung

$\kappa_\zeta = \frac{A}{V_\zeta^2} \cdot \int_A (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2) \cdot dA$ ... Schubkorrekturfaktor in ζ-Richtung

$A_{V\eta} = A / \kappa_\eta$ ..... Schubfläche in η-Richtung

$A_{V\zeta} = A / \kappa_\zeta$ ..... Schubfläche in ζ-Richtung

$i_M = \sqrt{\frac{I_\eta + I_\zeta}{A} + \eta_M^2 + \zeta_M^2} =$

$= \sqrt{i_p^2 + \eta_M^2 + \zeta_M^2}$ ..... Querschnittsstrecke in Längsrichtung

$r_\eta = \frac{1}{I_\zeta} \cdot \int_A \eta \cdot r_S^2 \cdot dA - 2 \cdot \eta_M$ Querschnittsstrecke in η-Richtung

$r_\zeta = \frac{1}{I_\eta} \cdot \int_A \zeta \cdot r_S^2 \cdot dA - 2 \cdot \zeta_M$ Querschnittsstrecke in ζ-Richtung

$r_\omega = \frac{1}{C_M} \cdot \int_A \omega_M \cdot r_S^2 \cdot dA$ ..... Querschnittsstrecke der Verwölbung

Ergebnisübersicht

das dritte Register gibt einen Überblick über die ermittelten Ergebnisse

	Ausnutzung
Lastkombination 1	**41%**
Tragfähigkeit Träger	9%
c/t-Verhältnis Träger	40%
Schweißnähte	41%
Lastkombination 2	**95%**
Tragfähigkeit Träger	46%
c/t-Verhältnis Träger	40%
Schweißnähte	95%
Lastkombination 3	**102%**
Tragfähigkeit Träger	46%
c/t-Verhältnis Träger	40%
Schweißnähte	102%
Gesamt Tragfähigkeit	**102%**

Tragfähigkeit nicht gewährleistet (s. Druckliste) !!

Zur sofortigen Kontrolle und des besseren Überblicks halber werden die Ergebnisse in diesem Register lastfallweise übersichtlich zusammengestellt.

Eine Box zeigt an, ob ein Lastfall die Tragfähigkeit des Anschlusses überschritten hat (rot ausgekreuzt) oder wie viel Reserve noch vorhanden ist (grüner Balken).

Zur besseren Fehleranalyse oder zur Einschätzung der Tragkomponenten werden zudem die Einzelberechnungs-ergebnisse protokolliert.

Eine Meldung zeigt an, wenn ein Fehler aufgetreten oder die Tragfähigkeit überschritten ist.

Wenn die Ursache des Fehlers nicht sofort ersichtlich ist, sollte die Druckliste in der **ausführlichen** Ergebnisdarstellung geprüft werden.

---

zur Hauptseite ***4H*-EC3SA**, SchweißnahtAnschluss

© pcae GmbH Kopernikusstr. 4A 30167 Hannover Tel. 0511/70083-0 Fax 70083-99 Mail dte@pcae.de