



4H- STATIKPROGRAMME
AUS HANNOVER

DTE Desktop®
Engineering



pcae GmbH

Kopernikusstr. 4A

30167 Hannover

Tel 0511/70083-0

Fax 0511/70083-99

Internet www.pcae.de

Mail dte@pcae.de



4H-QUER

Querschnittswerteermittlung

Juli 2024

4H-QUER

Querschnittswerteermittlung

Copyright 2015-2024

2. durchgesehene Auflage, Juli 2024

pcae GmbH, Kopernikusstr. 4 A, 30167 Hannover

pcae versichert, dass Handbuch und Programm nach bestem Wissen und Gewissen erstellt wurden. Für absolute Fehlerfreiheit kann jedoch infolge der komplexen Materie keine Gewähr übernommen werden.

Änderungen an Programm und Beschreibung vorbehalten.

Korrekturen und Ergänzungen zum vorliegenden Handbuch sind ggf. auf der aktuellen Installations-CD enthalten. Ergeben sich Abweichungen zur Online-Hilfe, ist diese aktualisiert.

Ferner finden Sie **Verbesserungen und Tipps im Internet unter www.pcae.de**.

Von dort können zudem aktualisierte Programmversionen herunter geladen werden.

S. hierzu auch *automatische Patch-Kontrolle* im DTE®-System.

Produktbeschreibung

Das Programm **##-QUER** dient der Analyse von Stabquerschnitten und der Berechnung der Querschnittskennwerte, die für die Ermittlung zur Aufnahme von Schnittgrößen wesentlich sind.

##-QUER kann als eigenständiges Programm aus der DTE®-Schreibtischschublade heraus aufgerufen werden. Viele **pcae**-Rechenprogramme ermöglichen den Import von in **##-QUER** definierten Querschnitten, um diese mit Stäben von Stabwerken oder Anschlüssen zu verknüpfen.

##-QUER unterscheidet zwischen dünnwandigen und dickwandigen Querschnitten.

dünnwandige Querschnitte

- geometrisch korrekte Beschreibung der dünnwandigen Profilgeometrie
- dünnwandige Querschnitte werden als Netzwerk von Knotenpunkten und diese verbindende Linien beschrieben
- Linien können gerade oder kreisbogenförmig sein
- Linien verfügen über eine Dicke, die konstant oder linear veränderlich sein kann
- an den Linienenden können Ausrundungen definiert werden, die den Übergang von einer Linie zur nächsten beschreiben
- an freien Linienenden können Abschrägungen definiert werden
- in den Berührungsknoten werden die Außenkanten der Linien verschnitten, sodass keine Überlappungsbereiche entstehen
- der Gesamtquerschnitt kann aus mehreren, nicht zusammenhängenden Teilquerschnitten bestehen
- die Schubkennwerte können alternativ mittels der Finite-Elemente-Methode ermittelt werden
- Profilgeometrieübernahme aus neuem Profilmanager mit über 5.300 Profilen
- Konstruktionshilfen
 - Wahl der Längendimension
 - manuelle und numerische Linienzugenerzeugung
 - geometrische Vorgabe typisierter Profile
 - Import einer beliebigen Anzahl bereits erzeugter **##-QUER**-Querschnitte
 - Modellierungsfunktionen Verschieben, Verdrehen, Dehnen, Spiegeln, Ausrichten, Verschneiden
 - Anwenden der Modellierungsfunktionen auf vorher erzeugtes Duplikat
 - Rasterdefinition mit Rasterpunktanziehung
 - DXF-Vorlagenimport mit Kontrollpunktanziehung
 - Konstruktionskoordinatensystem
 - undo/redo-Funktion
 - Vielzahl an Darstellungseigenschaften
 - tabellarische Bearbeitung
 - Gruppendefinition
- Querschnittsverwaltung
- Fotorealistische Querschnittsdarstellung
- Querschnittsexport in die **pcae**-Planbearbeitung
- Vielzahl ermittelter elastischer und plastischer Querschnittswerte
- numerisches und grafisches Druckprotokoll
- englischsprachige Druckausgabe

dickwandige Querschnitte

- dickwandige Querschnitte werden als polygonal umrandete Flächen beschrieben
- Polygonabschnitte können gerade oder kreisbogenförmig sein
- der Gesamtquerschnitt kann aus mehreren, nicht zusammenhängenden Teilquerschnitten bestehen
- die Querschnitte können mit Aussparungen versehen werden
- punkt- und linienförmige Stahleinlagen sowie Spannstähle mit Hüllrohren
- die Schubkennwerte können mittels der Finite-Elemente-Methode ermittelt werden
- Ermittlung Netto-, Brutto- und ideeller Querschnittswerte

- Konstruktionshilfen
 - Wahl der Längendimension
 - manuelle und numerische Linienzugerzeugung
 - geometrische Vorgabe typisierter Querschnitte
 - Import einer beliebigen Anzahl bereits erzeugter *##-QUER*-Querschnitte
 - Modellierungsfunktionen Verschieben, Verdrehen, Dehnen, Ausrichten
 - Rasterdefinition mit Rasterpunktanziehung
 - DXF-Vorlagenimport mit Kontrollpunktanziehung
 - Konstruktionskoordinatensystem
 - undo/redo-Funktion
 - Vielzahl an Darstellungseigenschaften
 - tabellarische Bearbeitung
- Querschnittsverwaltung
- Fotorealistische Querschnittsdarstellung
- Querschnittsexport in die **pcae**-Planbearbeitung
- Vielzahl ermittelter Querschnittswerte
- numerisches und grafisches Druckprotokoll
- englischsprachige Druckausgabe

Die Programmentwicklung erfolgt nahezu ausschließlich durch Bauingenieure.

Die interaktiven Steuermechanismen des Programms sind aus anderen Windows- Anwendungen bekannt. Wir haben darüber hinaus versucht, weitestgehend in der Terminologie des Bauingenieurs zu bleiben und *##-QUER* von detailliertem Computerwissen unabhängig zu halten.



Das vorliegende Handbuch beschreibt die Handhabung des Programms. Informationen zu dem jeweiligen Eigenschaftsblatt finden Sie zusätzlich über den lokalen Hilfebutton.

Zur *##-QUER*-Dokumentation gehört neben diesem Manual das Handbuch
DTE®-DeskTopEngineering.

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg mit *##-QUER*.

pcae GmbH

Hannover, im Juli 2024

Abkürzungen und Begriffe

Um die Texte zu straffen, werden folgende Abkürzungen benutzt:

RMT	rechte Maustaste drücken
LMT	linke Maustaste drücken
LF	Lastfall (Teileinwirkung)
Nwtyp	Nachweistyp
Gk	Grundkomponente
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit



signalisiert Anmerkungen

Buttons

Das Betätigen von Buttons wird durch Setzen des Buttoninhalts in **blaue Farbe** und die Auswahl eines Begriffs in einer Listbox durch diese **Farbe** symbolisiert.



Rot markierte Buttons bzw. Mauszeiger kennzeichnen erforderliche Eingaben bzw. anzuklickende Buttons.

Index

Indexstichworte werden im Text zum schnelleren Auffinden **grün markiert**.

Beim Verweis auf Eigenschaftsblätter wird deren *Bezeichnung kursiv gedruckt*.

Doppelklick

zweimaliges schnelles Betätigen der LMT

blank

Leerzeichen

Cursor

Schreibmarke in Texten, Zeigesymbol bei Mausbedienung

icon

oder Ikon, Piktogramm, Bildsymbol

Zur Definition der Begriffe **Lastbild**, **Lastfall**, **Einwirkung**, **Lastkollektiv** und **Extremalbildungsvorschrift** s. Handbuch das **pcae-Nachweiskonzept**, Theoretischer Teil.

Die in der Interaktion mit **pcae**-Programmen stehenden **Buttons** besitzen folgende Funktionen:



Bricht Eigenschaftsblätter ohne Änderung der Eingabewerte ab.



Lädt abgespeicherte Werte in das Eigenschaftsblatt bzw. speichert die aktuellen Werte zum späteren Abruf in anderen Eigenschaftsblättern.



Ruft das Online-Hilfesystem.



Bestätigt die Eingaben und schließt das Eigenschaftsblatt.



Löschen-Button vernichtet Eingaben mit Nachfrage.



Datenzustand
überprüfen

Wenn der Mauszeiger einen Moment auf einem Button verweilt, erscheint ein Fähnchen, das den zugehörigen Aufruf beschreibt.

Inhaltsverzeichnis

1	Programminstallation und DTE®-Schreibtisch einrichten	7
2	Programmaufruf.....	9
3	Eingabeoberfläche.....	10
3.1	Allgemeines	10
3.2	dünnwandige Querschnitte.....	10
3.3	dickwandige Querschnitte	11
3.4	Oberfläche.....	11
3.5	Koordinatensysteme.....	13
3.6	Querschnittsverwaltung	14
3.7	Objekte erzeugen	15
3.7.1	Allgemeines.....	15
3.7.2	dünnwandige Objekte erzeugen	15
3.7.3	dickwandige Objekte erzeugen	16
3.8	Objekte modellieren	19
3.8.1	Allgemeines.....	19
3.8.2	Undo-Service.....	19
3.8.3	Doppelklickfunktionen	19
3.8.4	Auswählen und Abwählen.....	22
3.8.5	ausgewählte Objekte löschen, kopieren, ausschneiden, einfügen, gruppieren.....	22
3.8.6	Modellieren-Fenster	23
3.9	Hilfsmittel	26
3.9.1	Konstruktionskoordinatensystem	26
3.9.2	Darstellungseigenschaften	27
3.9.3	Maßlinien und Fangrasterpunkte	28
3.9.4	DXF-Vorlagen.....	29
3.9.5	Elemente neu durchnummerieren.....	30
3.9.6	Querschnitte tabellarisch bearbeiten.....	30
3.9.7	aktuellen Querschnitt drucken.....	31
3.9.8	aktuellen Querschnitt plotten.....	32
3.9.9	aktuellen Querschnitt visualisieren.....	32
4	Theorie.....	33
4.1	Koordinatensysteme.....	33
4.2	Schwerpunkt, Trägheitsmomente und Hauptachsen	33
4.3	Verwölbung und Schubmittelpunkt.....	34
4.4	Schnittgrößen und Spannungen.....	34
4.5	Wagner-Effekt.....	35
4.6	Schubkorrekturfaktoren	35
4.7	mehrteilige Querschnitte	36
4.8	plastische Widerstandsmomente	37
4.9	Berechnung von Wölbfunktion und Torsionskennwerten mittels FEM.....	38
4.10	von #H-QUER ausgewiesene Werte	39
4.11	alternative Berechnung der Schubkennwerte	41
5	Tutorium.....	43
5.1	HE400B mit angeschweißter Flanschverstärkung	43
5.2	Überprüfung des Querschnitts	49
5.3	praktische Übungen mit dem Modellieren-Fenster	53
5.4	Konstruktion eines regelmäßigen Sechsecks	56
6	Literaturverzeichnis	57
7	Index	57

1 Programminstallation und DTE®-Schreibtisch einrichten

Die Installation des DTE®-Systems und das Überspielen des Programms *##-QUER* auf Ihren Computer erfolgt über einen selbsterläuternden Installationsdialog.

Sofern Sie bereits im Besitz anderer *##*-Programme sind und diese auf Ihrem Rechner installiert sind, lesen Sie bitte Abs. 2, Programmaufruf, auf S. 9 weiter.

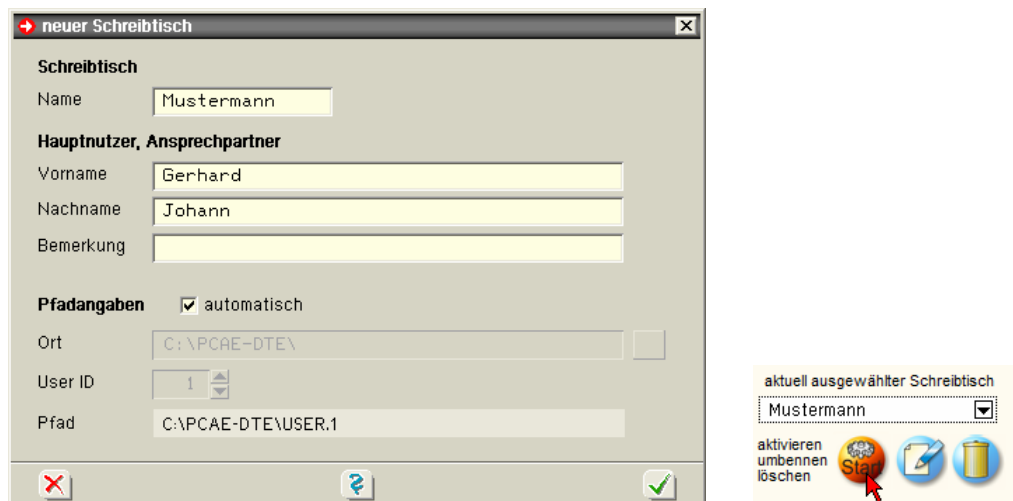


Nach erfolgreicher Installation befindet sich das DTE®-**Startsymbol** auf Ihrer Windowsoberfläche. Führen Sie bitte darauf den Doppelklick aus.

Daraufhin erscheint das Eigenschaftsblatt zur **Schreibtischauswahl**. Da noch kein Schreibtisch vorhanden ist, wollen wir einen neuen einrichten. Klicken Sie hierzu bitte auf den Button **neu**.



Schreibtischname Dem neuen Schreibtisch kann ein beliebiger Name zur Identifikation zugewiesen werden. Klicken Sie hierzu mit der LMT in das Eingabefeld. Hier ist *Mustermann* gewählt worden.

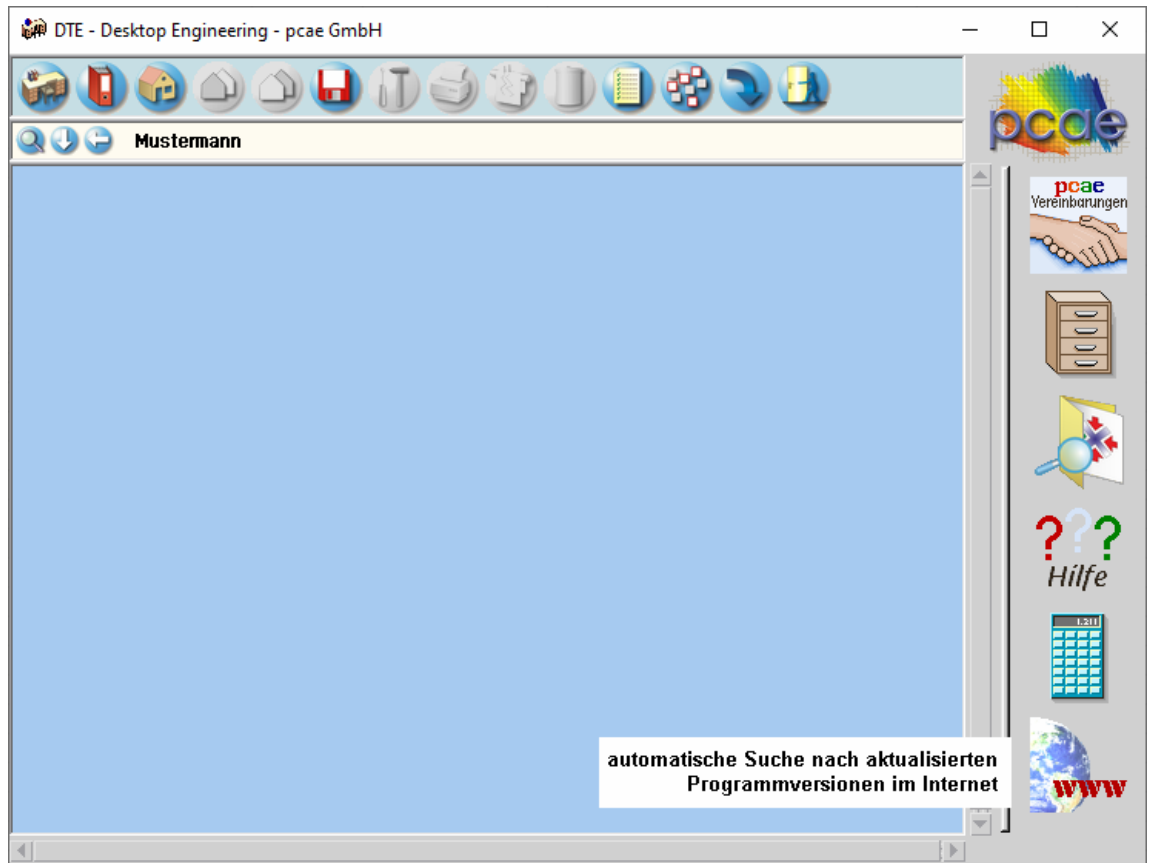


Nach Bestätigen über das **Hakensymbol** erscheint wieder die Schreibtischauswahl, in die der neue Name bereits eingetragen ist. Drücken Sie auf **Start** und die DTE®-Schreibtischoberfläche erscheint auf dem Bildschirm.

DTE® steht für *DeskTopEngineering* und stellt das "Betriebssystem" für *pcae*-Programme und die Verwaltungsoberfläche für die mit *pcae*-Programmen berechneten Bauteile dar.



Zur Beschreibung des DTE®-Systems und der zugehörigen Funktionen s. Handbuch *DTE®-DeskTopEngineering*.



Steuerbuttons

Im oberen Bereich des Schreibtischs sind Interaktionsbuttons lokalisiert.

Die Funktion eines Steuerbuttons ergibt sich aus dem Fähnchen, das sich öffnet, wenn sich der Mauscursor über dem Button befindet.

Auf Grund der **Kontextsensitivität** des DTE®-Systems sind manche Buttons solange abgedunkelt und nicht aktiv bis ein Bauteil aktiviert wird.

- | | |
|--|---|
| | Die Buttons bewirken im Einzelnen |
| | öffnet die Schreibtischauswahl |
| | legt einen neuen Projektordner an |
| | erzeugt ein neues Bauteil |
| | kopiert das aktivierte Bauteil |
| | fügt die Bauteilkopie ein |
| | lädt/sichert Bauteile. Hier befindet sich auch der e-Mail-Dienst . |
| | menügesteuerte Bearbeitung des aktivierten Bauteils |
| | druckt die Datenkategorien des aktivierten Bauteils |
| | ruft das Planerstellungsmodul des aktivierten Bauteils |
| | löscht das aktivierte Bauteil/Ordner |
| | öffnet die Bearbeitung der Auftragsliste |
| | öffnet die Mehrfachauswahl zur gleichzeitigen Bearbeitung von Bauteilen |
| | eröffnet Verwaltungsfunktionen |
| | schließt den geöffneten Ordner/beendet die DTE®-Sitzung |

Programmaufruf



Querschnitte

Im Gegensatz zu den anderen ##-Rechenprogrammen ist ##-QUER kein bauteilbezogenes Programm, sondern ein Werkzeug, das sich nach Installation in der Schublade des DTE®-Schreibtischs befindet. Von hier aus kann das nebenstehend dargestellte Symbol ausgewählt und per Doppelklick oder Menüfunktion gestartet werden.

Es erscheint die auf S. 10 dargestellte Eingabeoberfläche von ##-QUER.

##-QUER kann alternativ aus einer Vielzahl von ##-Programmen als Hilfswerkzeug aufgerufen werden. Hierbei bestehen keinerlei Einschränkungen bzgl. der nachfolgend beschriebenen Leistungsmerkmale des Programms.

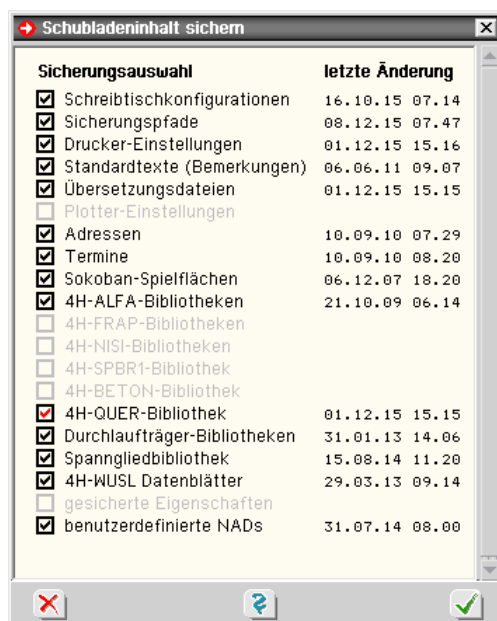
Der Aufruf erfolgt i.d.R. über den jeweiligen Querschnittsbutton in der Liste der angebotenen Querschnittstypen.



Querschnitt

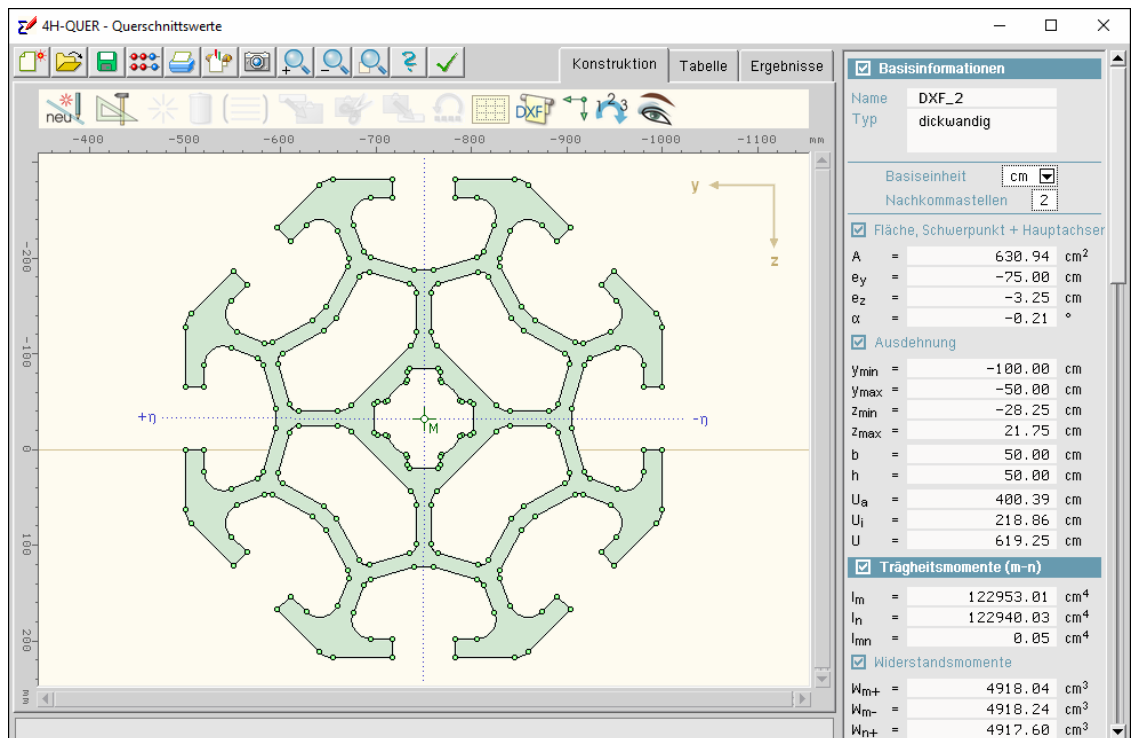


##-QUER speichert seine Querschnitte in einer eigenen Datenbibliothek, die sich ebenfalls in der DTE®-Schreibtischschublade befindet. Es empfiehlt sich, diese Bibliothek von Zeit zu Zeit auf einem externen Datenträger zu sichern. Die Sicherung wird über die DTE®-Menüfunktion *Schubladeninhalt sichern* bei geöffneter Schublade eingeleitet.





Nachfolgend ist das Konstruktionsfenster von **4H-QUER** dargestellt.



3.1

Allgemeines

4H-QUER dient der Analyse von Stabquerschnitten und der Berechnung der Querschnittskennwerte, die für die Ermittlung zur Aufnahme von Schnittgrößen wesentlich sind.

4H-QUER kann als eigenständiges Programm aus der DTE[®]-Schreibtischschublade heraus aufgerufen werden. Viele **pcae**-Rechenprogramme ermöglichen den Import von in **4H-QUER** definierten Querschnitten, um diese mit Stäben von Stabwerken oder Anschlüssen zu verknüpfen.

4H-QUER unterscheidet auf oberster Ebene zwischen dünnwandigen und dickwandigen Querschnitten.

3.2

dünnwandige Querschnitte

Dünnwandige Querschnitte werden als Netzwerk von Knotenpunkten und diese verbindenden Linien beschrieben. Linien können gerade oder kreisbogenförmig sein und verfügen über eine Dicke, die als konstant oder linear veränderlich festgelegt werden kann.

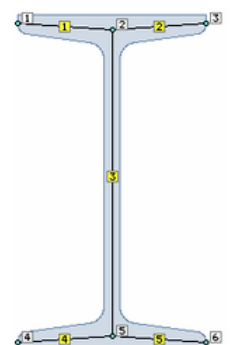
An den Linienenden können Ausrundungen definiert werden, die den Übergang von einer Linie zur nächsten beschreiben. An den freien Enden können darüber hinaus Abschrägungen angegeben werden.

Dies alles stellt sicher, dass die Profile des DTE[®]-Profilmanagers (mit Ausnahme der Elliptischen Rohre) geometrisch korrekt beschrieben werden können.

Nebenstehend ist ein typisches Beispiel eines dünnwandigen Querschnitts dargestellt. Es besteht aus 6 Knotenpunkten und 5 Linien, die gemeinsam ein Doppel-T-Profil der IPN-Familie abbilden.

Man beachte, dass die meisten **pcae**-Programme beim Import von **4H-QUER**-Querschnitten einen bestimmten Typ vorschreiben!

Hierbei sind die dünnwandigen Querschnitte i.d.R. dem Stahlbau zugeordnet.



3.3

dickwandige Querschnitte

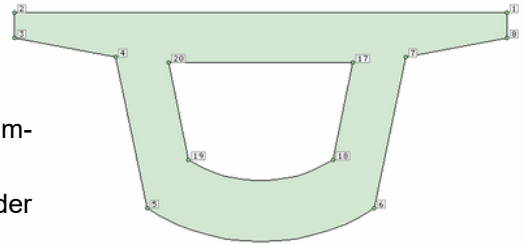
Dickwandige Querschnitte werden als polygonal umrandete Flächen eingegeben.

Die einzelnen Polygonabschnitte können gerade oder kreisbogenförmig sein.

Wie dem nebenstehenden Beispiel entnommen werden kann, können zusätzlich zur Außenkontur weitere Polygonzüge zur Definition von Aussparungen erzeugt werden.

Weiterhin können dem Querschnitt punkt- und linienförmige Stahleinlagen sowie Spannstähle mit Hüllrohren hinzugefügt werden. Auf diese Weise lassen sich Netto-, Brutto- und ideelle Querschnittswerte ermitteln.

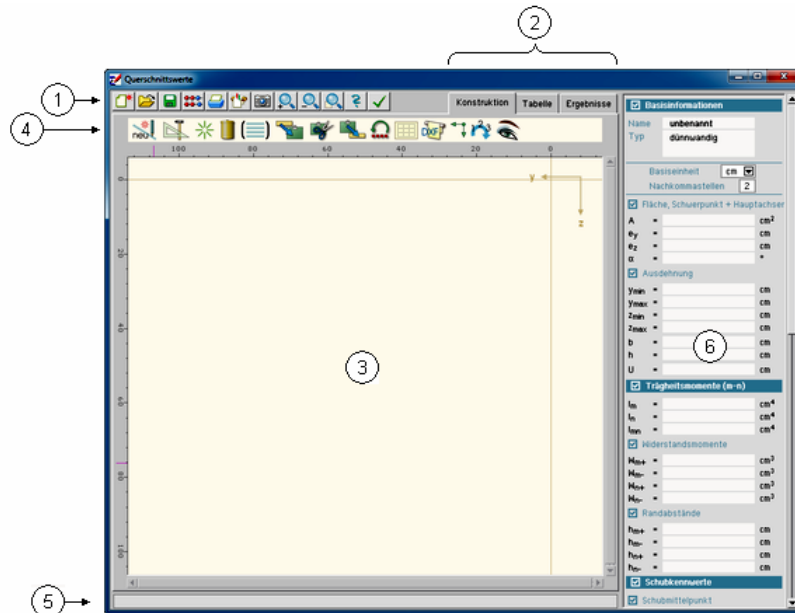
In den **pcae**-Stabwerksprogrammen sind dickwandige Querschnitte den Stahlbeton- und Holzstäben zugeordnet.



3.4

Oberfläche

Nachfolgend ist das **4#-QUER**-Bearbeitungsfenster im Normalmodus dargestellt. Hierin bedeuten



Hauptbuttonleiste - 1



Erzeugung eines neuen Querschnitts. Der Inhalt des Konstruktionsfensters wird gelöscht und der Zustand wird auf voreingestellte Werte gesetzt. Der Benutzer wird gefragt, ob ein dünn- oder ein dickwandiger Querschnitt erstellt werden soll.



Laden eines gespeicherten Querschnitts. Das Eigenschaftsblatt zur Verwaltung gespeicherter Querschnitte wird auf der Seite *Verwaltung* (s. Abs. 3.6, S. 14) erläutert.



Speichern des aktuell bearbeiteten Querschnitts



Bei dickwandigen Querschnitten werden die Schubkennwerte mithilfe eines Finite-Elemente-Programms ermittelt. Da dies einen kurzen Augenblick dauert, wird die Berechnung erst auf Anforderung durch Anklicken des **Abacus**-Buttons gestartet.








Der aktuell bearbeitete Querschnitt wird auf dem Drucker ausgegeben. Weitere Informationen zur Druckausgabe s. Querschnitt *drucken* (s. Abs. 3.9.7, S. 31).

Der aktuell bearbeitete Querschnitt wird in einem vorgegebenen Maßstab in eine Plotdatei geschrieben. Zur Weiterverarbeitung wird das DTE®-eigene Planerstellungsmodule aufgerufen.



Der aktuell bearbeitete Querschnitt wird an das DTE®-eigene FotoView-Programm zur realistischen dreidimensionalen Darstellung weitergegeben.

-  Durch Anklicken des **Zoom**-Buttons erscheint ein Fadenkreuz im Konstruktionsfenster, mit dem ein rechteckförmiger Teilbereich ausgewählt werden kann, der dann vergrößert dargestellt wird.
-  Mithilfe dieses Buttons wird auf den vorangegangenen Zoomzustand zurückgesprungen.
-  Dieser Buttons stellt sicher, dass der gesamte Arbeitsbereich im Fenster erscheint. Die Größe des Arbeitsbereichs kann vom Benutzer festgelegt werden. Näheres hierzu s. *Darstellungseigenschaften* (s. Abs. 3.9.2, S. 27).
-  Aufruf des Hilfedokuments
-  Ende der Bearbeitung von Querschnitten mit *##-QUER*. Das Fenster wird geschlossen. Wurde *##-QUER* von anderen **pcae**-Programmen zur Übernahme von Querschnitten aufgerufen, erfolgt eine Nachfrage, ob der aktuelle Querschnitt übergeben werden soll.

Register - 2

Es werden drei Register angeboten

- | | |
|--------------|---|
| Konstruktion | Dies ist der Normalmodus von <i>##-QUER</i> . Hier können Querschnitte mit grafischen Hilfsmitteln konstruiert werden. Entsprechende Werkzeuge werden bereitgestellt. |
| Tabelle | Im Register <i>Tabelle</i> können dieselben Daten tabellarisch eingegeben, überprüft und geändert werden. |
| Ergebnisse | Im <i>Ergebnisregister</i> werden Ergebnisse des aktuellen Querschnitts dargestellt, die sich (wie etwa Funktionsverläufe) nicht an einzelnen Parametern festmachen lassen. |









Konstruktionsfenster - 3

Im Konstruktionsfenster werden die Objekte *Knotenpunkte* und *Linien* (bei dünnwandigen Querschnitten) bzw. *Polygonzüge* (bei dickwandigen Querschnitten) dargestellt.

Objekte können dort durch Anklicken oder Umfahren (Rechteck aufspannen) ausgewählt werden. Ausgewählte Objekte können bearbeitet (modelliert) werden (s. Abs. 3.8, S. 19).

Konstruktionsschalttafeln - 4

Die Konstruktionsschalttafeln werden nur im Normalmodus (*Konstruktionsregister*) angeboten und dienen der grafischen Modellierung der aktuell im Konstruktionsfenster definierten Objekte.

-  Hinzufügen neuer Elemente zum aktuellen Querschnitt. Die hierdurch hervorgerufenen Auswahlmenüs unterscheiden sich bei dünnwandigen und dickwandigen Querschnitten. Näheres s. *Objekte erzeugen*, Abs. 3.7.2, S. 15.
-  ... ausgewählte Objekte können verschoben, verdreht, vergrößert, gespiegelt, ausgerichtet und verschnitten werden. Näheres s. Abs. 3.8, S. 19.
-  ... alle ausgewählten Objekte werden abgewählt
-  ... alle ausgewählten Objekte werden gelöscht
-  ... alle ausgewählten Objekte werden gruppiert. Die Objekte einer derart erzeugten Gruppe lassen sich nur noch gemeinsam auswählen. Darüber hinaus sind Gruppen vor bestimmten Modellierungsaktionen geschützt. Eine Gruppe kann nach Doppelklicken wieder aufgegeben werden.
-  ... die ausgewählten Objekte werden kopiert. Diese Funktion kann auch über die Tastatur mit [Strg][C] initiiert werden.
-  ... die ausgewählten Objekte werden ausgeschnitten. Das Ausschneiden entspricht dem Kopieren, jedoch werden die ausgewählten Objekte danach im Konstruktionsfenster gelöscht. Diese Funktion kann auch über die Tastatur mit [Strg][X] initiiert werden.
-  ... die zuvor kopierten Objekte werden eingefügt. Diese Funktion kann auch über die Tastatur mit [Strg][P] initiiert werden.



... die letzte Modellierungsaktion wird rückgängig gemacht. Diese Funktion kann auch über die Tastatur mit [Strg][Z] initiiert werden.



In einem speziellen Eigenschaftsblatt kann ein Hintergrundraster (mit Fangrasteroption) definiert und eingeblendet werden. Näheres s. *Maßlinien und Fangrasterpunkte* Abs. 3.9.3, S. 28.



... eine DXF-Datei kann als Hintergrundbild geladen werden. Auch für die Kontrollpunkte der DXF-Vorlage kann eine Kontrollpunktanziehung definiert werden. Näheres s. *DXF-Vorlagen* Abs. 3.9.4, S. 29.



Diese Schaltfläche dient dem An- bzw. Abschalten des Konstruktionskoordinatensystems (KKS, Abs. 3.9.1, S. 26). Hiermit können Punkte untereinander vermessen und Abstände korrigiert werden.



... Knoten und Linien können auf Basis einer geometrischen Ordnung neu durchnummeriert werden



Aufruf des Darstellungseigenschaftsblatts. Hierin wird bestimmt mit welchen Informationen der Querschnitt im Konstruktionsfenster dargestellt werden soll. Ferner werden Dimensionen und Voreinstellungen festgelegt.

Informationszeile - 5

Hier werden nützliche Informationen und ggf. Interaktionsaufforderungen eingeblendet.

Ergebnisfenster - 6

Hier werden die zum aktuellen Zustand des Querschnitts gehörenden statischen Kennwerte angezeigt. Hierzu wird der Querschnitt nach jeder Modellierungsaktion neu berechnet. Allein die Schubkennwerte dickwandiger Querschnitte müssen separat durch Anklicken des **Abacus**-Buttons in der Hauptbuttonleiste angefordert werden.

Die Bedeutungen der einzelnen ausgewiesenen Werte werden im theoretischen Kapitel erklärt, s. Abs. 4.10, S. 39.

3.5

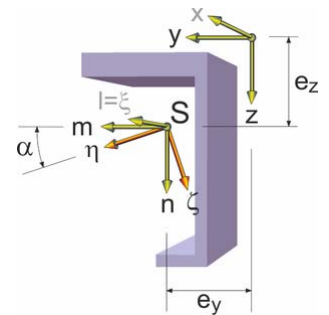
Koordinatensysteme

In *##-QUER* wird zwischen drei Koordinatensystemen unterschieden.

$[x,y,z]$ ist das Beschreibungskordinatensystem. x steht stets senkrecht auf dem Querschnitt. Im Konstruktionsfenster zeigt y nach links und z nach unten. Die Lage des Nullpunkts ist beliebig und kann vom Anwender so gewählt werden, dass die Beschreibung des Querschnitts möglichst einfach gerät.

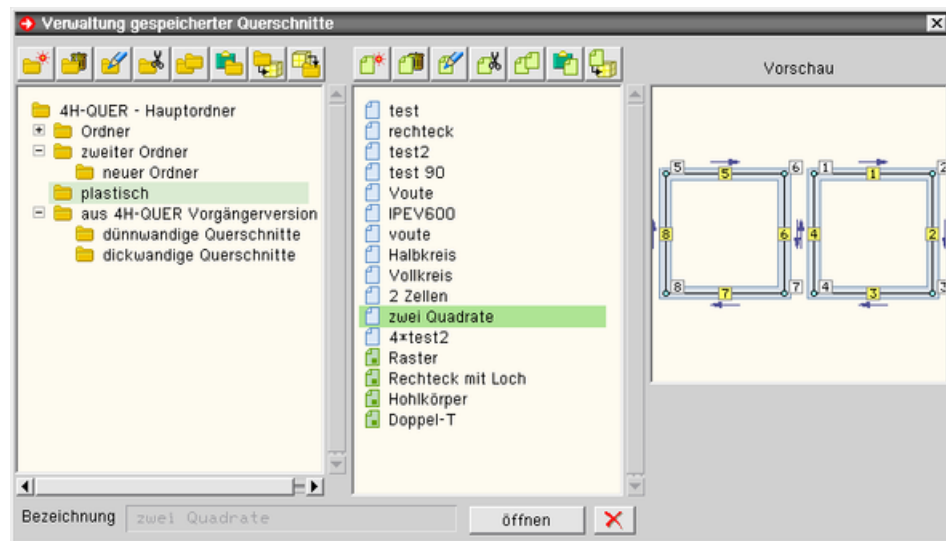
$[l,m,n]$ ist das um e_y und e_z in den Schwerpunkt verschobene $[x,y,z]$ -System

$[\xi,\eta,\zeta]$ ist das um den Hauptachseneckwinkel α um die l -Achse verdrehte $[l,m,n]$ -System




Querschnittsverwaltung









Sollen Querschnitte gespeichert oder gespeicherte Querschnitte in das Konstruktionsfenster geladen oder zu bestehenden Objekten hinzugefügt werden, erscheint das Eigenschaftsblatt *Verwaltung gespeicherter Querschnitte*.





Die Querschnitte werden in übersichtlicher Form in vom Benutzer angelegten Ordnern gespeichert. Alle Ordner befinden sich im *##-QUER - Hauptordner*.

Wenn auf dem Rechner bereits die Vorgängerversion von *##-QUER* installiert war, existiert der Ordner *aus ##-QUER Vorgängerversion* mit den Unterordnern *dünnwandige Querschnitte* und *dickwandige Querschnitte*.

Die Ordner () werden im linken Fenster des Eigenschaftsblatts zur Auswahl und Bearbeitung in einer Baumstruktur angeboten. Oberhalb dieses Fensters sind Buttons zur Bearbeitung der Ordnerstruktur lokalisiert.






-  Erzeugen eines neuen Ordners im aktuell ausgewählten Ordner
-  Löschen des aktuell ausgewählten Ordners
-  Umbenennen des aktuell ausgewählten Ordners
-  Ausschneiden des aktuell ausgewählten Ordners
-  Kopieren des aktuell ausgewählten Ordners
-  Einfügen des kopierten oder ausgeschnittenen Ordners in den aktuell ausgewählten Ordner
-  der aktuell ausgewählte Ordner wird in eine externe **pcae-Paketdienstdatei** geschrieben
-  der Inhalt einer externen **pcae-Paketdienstdatei** wird in den aktuellen Ordner geladen

pcae-Paketdienstdateien können zur Sicherung und zum Austausch benutzereigener Daten verwendet werden.

Im mittleren Fenster werden die Querschnitte angezeigt, die sich im aktuell ausgewählten Ordner befinden. An dem Symbol ist bereits zu erkennen, ob es sich bei dem Querschnitt um einen dünnwandigen () oder einen dickwandigen () Querschnitt handelt.

Ein ausgewählter Querschnitt wird im Vorschaufenster dargestellt.

Oberhalb des mittleren Fensters befinden sich Buttons zur verwaltungstechnischen Bearbeitung der Querschnitte.

-  Erzeugen eines neuen Querschnitts im aktuell ausgewählten Ordner
-  Löschen des aktuell ausgewählten Querschnitts
-  Umbenennen des aktuell ausgewählten Querschnitts
-  Ausschneiden des aktuell ausgewählten Querschnitts
-  Kopieren des aktuell ausgewählten Querschnitts



Einfügen des kopierten oder ausgeschnittenen Querschnitts in den aktuell ausgewählten Ordner



der aktuell ausgewählte Querschnitt wird in eine externe **pcae**-Paketdienstdatei geschrieben

gelöschte Querschnitte

Die Querschnittsverwaltung bietet keine undo-Aktion an. Jedoch werden gelöschte Querschnitte zunächst in einen automatisch temporär erzeugten Ordner mit der Bezeichnung *gelöschte Querschnitte* gespeichert. Ein versehentlich gelöschter Querschnitt kann über den ausschneiden/einfügen-Mechanismus wieder in einen regulären Ordner integriert werden.

Wird die Bearbeitung mit *##-QUER* beendet, wird dieser temporäre Ordner mitsamt seinem Inhalt endgültig gelöscht.

Je nach Kontext, aus dem heraus das Eigenschaftsblatt zur Verwaltung aufgerufen wurde, bietet ein Button die Aktionen **speichern**, **öffnen** oder **einfügen** an.

3.7 Objekte erzeugen

3.7.1 Allgemeines



Unter dem Begriff *Objekte* werden bei dünnwandigen Querschnitten Knotenpunkte und Linienelemente und bei dickwandigen Querschnitten geschlossene Polygonzüge verstanden. In beiden Fällen wird die Erzeugung neuer Objekte mit der nebenstehend dargestellten Schalttafel eingeleitet.

Existieren bereits Objekte im Konstruktionsfenster, werden die neu erzeugten Objekte hinzugefügt und können gemeinsam modelltechnisch weiterbearbeitet werden.

3.7.2 dünnwandige Objekte erzeugen

Durch Anklicken der o.a. Schalttafel erscheint das nebenstehend dargestellte symbolische Untermenü, in dem verschiedene Aktionen gewählt werden können.



Mit diesem Symbol wird die manuelle Erzeugung von Knotenpunkten und Linienelementen eingeleitet.

Es erscheint ein Fadenkreuz, mit dem die zu erzeugenden Linien jeweils vom Anfangsknoten zum Endknoten manuell (durch Bewegen der Maus) erzeugt werden können. Hierbei sind die Aufforderungen in der Informationszeile zu beachten!

Wird die Lage des Endknotens mit der linken Maustaste (LMT) bestätigt, ist die Schleife beendet. Die Bestätigung der Lage des Endknotens mit der rechten Maustaste (RMT) bewirkt, dass *##-QUER* die Eingabe der nächsten Linie erwartet.

Durch Anklicken eines bereits existierenden Knotens wird die zu erzeugende Linie mit diesem verknüpft.

Die hier erzeugten Linien haben eine voreingestellte Dicke, die im *Darstellungseigenschaftsblatt* geändert werden kann (Abs. 3.9.2, S. 27).

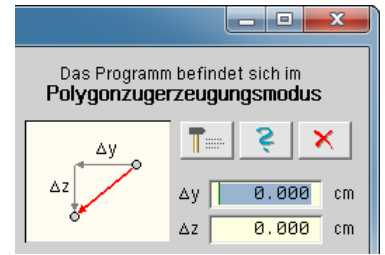


Mit diesem Symbol wird die numerische Erzeugung eines **Polygonzugs** eingeleitet.

Zunächst werden die Anfangskoordinaten des Polygonzugs abgefragt. Hiernach sind Δy - und Δz -Koordinatenpaare einzugeben, die einen Differenzsprung zum Nachfolgeknoten darstellen. Die Erzeugung wird von einem am oberen rechten Fensterrand eingeblendeten Schaltflächenensemble unterstützt, das sich zum größten Teil selbst erklärt.

Hinter dem Hammer-Button verstecken sich drei nützliche Funktionen

- mit **Koordinatensystem drehen** kann ein Winkel vorgegeben werden, sodass nicht achsenparallele orthogonale Randstrukturen leicht beschrieben werden können
- mit **Linienzugmodus umschalten** kann das $[\Delta y, \Delta z]$ -Koordinatenpaar gegen das $[\Delta l, \alpha]$ -Wertepaar getauscht werden
- mit der Funktion **letzte Linie zurück** kann eine falsche Eingabe rückgängig gemacht werden

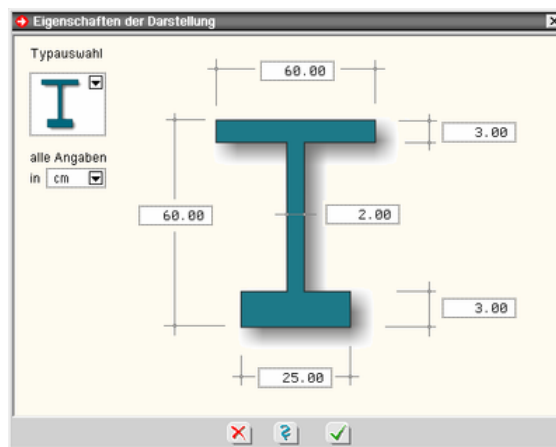


Durch Klicken des **X**-Buttons wird die Eingabe des Polygonzugs beendet.



über dieses Symbol können spezielle, **typisierte Querschnitte** erzeugt werden. Das nachfolgend dargestellte Eigenschaftsblatt erscheint.

Zunächst wird in einer Auswahlliste der Querschnittstyp bestimmt. Anschließend müssen die angebotenen Maßlinienwerte dem gewünschten Querschnitt angepasst werden.



Mit diesem Symbol können Profile des **Profilmanagers** geladen werden. Zur Auswahl wird der Profilmanager aufgerufen. Dank der Möglichkeiten, Ausrundungen, Abschrägungen und Linien mit gevouteten Dicken zu definieren, werden mit Ausnahme der elliptischen Hohlprofile alle Profile geometrisch exakt übernommen.

Elliptische Hohlprofile werden durch vier Kreisbögen angenähert. Hierbei ist sichergestellt, dass 1.) Höhe und Breite korrekt sind, 2.) die vier Knotenpunkte exakt auf der Ellipse liegen und 3.) die Kreisbögen glatt ineinander übergehen.



Durch Anklicken dieser Schaltfläche erscheint das Eigenschaftsblatt zur **Querschnittsverwaltung** (Abs. 3.6, S. 14), das ermöglicht, einen bereits definierten Querschnitt in das Konstruktionsfenster zu laden. Hierbei können nur dünnwandige Querschnitte ausgewählt werden.

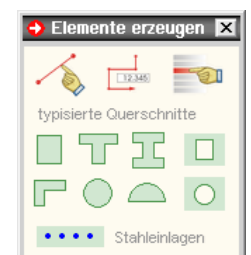
3.7.3

dickwandige Objekte erzeugen

Wird die unter *Allgemeines* (Abs. 3.1, S. 10) gezeigte Schalttafel für einen dickwandigen Querschnitt angeklickt, erscheint das nebenstehend dargestellte symbolische Untermenü, in dem zwischen unterschiedlichen Aktionen gewählt werden kann.



Mit diesem Symbol wird die manuelle Erzeugung eines **Polygonzugs** eingeleitet. Es erscheint ein Fadenkreuz, mit dem der Polygonzug Linie für Linie mit der Maus abgefahren wird.



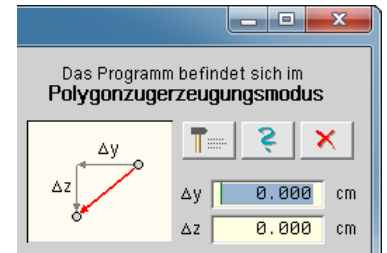
Bei einem Mausklick (linke Maustaste) wird ein Zwischenknoten erzeugt. Die Schleife wird beendet, wenn der zuerst erzeugte Knotenpunkt angeklickt und damit der Polygonzug geschlossen wird.

Diese Funktion bietet sich insbesondere an, wenn zuvor ein Fangraster oder eine DXF-Vorlage aktiviert wurden.



Mit diesem Symbol wird die numerische Erzeugung eines Polygonzugs eingeleitet. Zunächst werden die Anfangskoordinaten des Polygonzugs abgefragt. Hiernach sind Δy - und Δz -Koordinatenpaare einzugeben, die einen Differenzsprung zum Nachfolgeknoten darstellen.

Die Erzeugung wird von einem am oberen rechten Fenster- rand eingeblendeten Schaltflächenensemble unterstützt, das sich zum größten Teil selbst erklärt.



Hinter dem **Hammer**-Button verstecken sich drei nützliche Funktionen

- mit **Koordinatensystem drehen** kann ein Winkel vorgegeben werden, sodass nicht achsenparallele orthogonale Randstrukturen leicht beschrieben werden können
- mit **Linienzugmodus umschalten** kann das $[\Delta y, \Delta z]$ -Koordinatenpaar gegen das $[\Delta l, \alpha]$ -Wertepaar getauscht werden
- mit der Funktion **letzte Linie zurück** kann eine falsche Eingabe rückgängig gemacht werden

Durch Klicken des **X**-Buttons wird der Polygonzug geschlossen und der Erzeugungsmodus beendet.



Durch Anklicken dieser Schaltfläche erscheint das Eigenschaftsblatt zur **Querschnittsverwaltung** (Abs. 3.6, S. 14), das ermöglicht, einen bereits definierten Querschnitt in das Konstruktionsfenster zu laden.

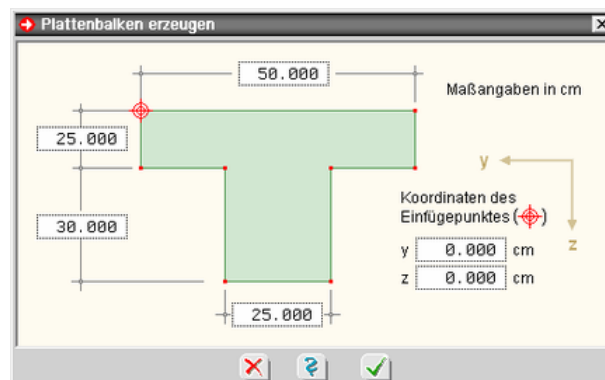
Hierbei können sowohl dickwandige als auch dünnwandige Querschnitte ausgewählt werden. Dünnwandige Querschnitte werden bei der Übernahme in dickwandige Querschnitte umgewandelt.

typisierte Querschnitte



Wird einer der **typisierten Querschnitte** angeklickt, erscheint ein speziell auf den angeklickten Typ angepasstes Eigenschaftsblatt, in dem vorgegebene Maßlinien ausgefüllt werden können.

Darüber hinaus kann ein Einfügapunkt ausgewählt werden (Punkt anklicken) und dessen Koordinaten festgelegt werden.



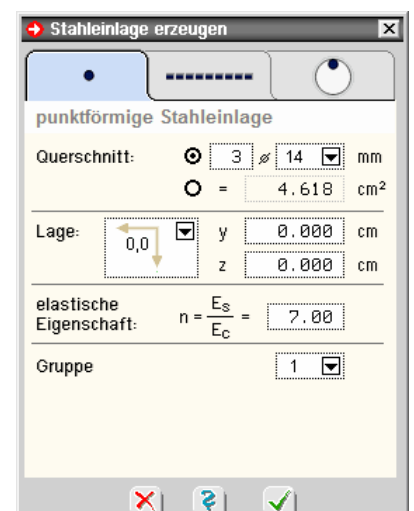
Stahleinlagen

Dem dickwandigen Querschnitt können Stahleinlagen hinzugefügt werden. Im Ergebnisfenster können dann wahlweise die Netto-, Brutto- oder ideellen Querschnittskennwerte eingesehen werden.

Das Eigenschaftsblatt zur Definition von Stahleinlagen unterscheidet zwischen drei Typen, die in Registern angeboten werden.

- punktförmige Stahleinlagen

Hierbei ist der Stahlquerschnitt durch die Anzahl Stahlstäbe mit einem definierten Durchmesser oder direkt durch Vorgabe der Querschnittsfläche anzugeben, die in ihrer Lage punktförmig konzentriert angenommen wird.



Die Lage ist im [y,z]-System vorzugeben. Bei aktiviertem Konstruktionskoordinatensystem (KKS) kann die Vorgabe auch im KKS-System erfolgen.

Um auch die ideellen Querschnittskennwerte ermitteln zu können, muss das Verhältnis der Elastizitätsmoduln der Stahleinlage E_s zum Material des Querschnitts (meist Beton) E_c angegeben werden.

Die Gruppenzuordnung ist innerhalb von *##-QUER* ohne Bedeutung, kann aber für importierende Bemessungsprogramme von Relevanz sein.

- linienförmige Stahleinlagen

Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich die Stahleinlagen auf einer Strecke vom Punkt [ya,za] bis zum Punkt [ye,ze] kontinuierlich verteilen.

Die Koordinaten sind vorzugeben. Auch hierin kann das KKS benutzt werden.

The screenshot shows the 'Stahleinlage erzeugen' dialog box with the 'linienförmige Stahleinlage' tab selected. The 'Querschnitt' section shows a diameter of 14 mm and an area of 4.618 cm². The 'Lage' section shows a coordinate system with origin (0,0) and points ya=15.000 cm, za=0.000 cm, ye=25.000 cm, and ze=0.000 cm. The 'elastische Eigenschaft' section shows the ratio $n = \frac{E_s}{E_c} = 7.00$. The 'Gruppe' is set to 1. The dialog has standard OK, Cancel, and Help buttons at the bottom.

- Hüllrohr mit Spannstahleinlage

Hierbei sind zunächst Durchmesser und Lage des **Hüllrohrs** festzulegen. Diese Werte beeinflussen die Netto-Kennwerte des Querschnitts.

Des Weiteren müssen Durchmesser und Lage des **Spannstahls** im Hüllrohr festgelegt werden. Alle weiteren Angaben gelten wie zuvor beschrieben.

The screenshot shows the 'Stahleinlage erzeugen' dialog box with the 'Hüllrohr mit (Spann)stahleinlage' tab selected. The 'Hüllrohr' section shows a diameter of 5.00 cm. The 'Lage' section shows a coordinate system with origin (0,0) and points y=15.000 cm, z=0.000 cm. The 'Spannstahl' section shows an area $A_s = 4.618$ cm². The 'Lage' section for the reinforcement shows points y=25.000 cm and z=0.000 cm. The 'elastische Eigenschaft' section shows the ratio $n = \frac{E_s}{E_c} = 7.00$. The 'Gruppe' is set to 1. The dialog has standard OK, Cancel, and Help buttons at the bottom.

3.8 Objekte modellieren

3.8.1 Allgemeines

Objekte im Konstruktionsfenster können modelliert werden.

Unter dem Begriff *Objekte* werden hier bei dünnwandigen Querschnitten Knotenpunkte und Linienelemente und bei dickwandigen Querschnitten die einzelnen Linien und Zwischenknoten der geschlossenen Polygonzüge verstanden.

Unter *Modellieren* ist das Verändern der Formgebung der Objekte und somit der Querschnittsgeometrie zu verstehen. Natürlich können die Querschnitte auch tabellarisch eingegeben werden. Dies ist jedoch i.d.R. die aufwendigere Methode.

Die einfachste Möglichkeit, direkt in die Geometrie des Querschnitts einzugreifen, ist das manuelle Verschieben einzelner Knoten. Hierzu müssen der Mauszeiger über dem Knoten positioniert und dann die linke Maustaste gedrückt werden. Der Knoten wird sich dann mit der Maus bewegen, solange die Maustaste gedrückt gehalten wird.

Bei dieser Methode ist zu beachten, dass - wie bei allen manuellen Modellierungsaktionen - das exakte Positionieren nur im Rahmen der Pixelauflösung des Bildschirms zu erreichen ist!

Außerdem wird die manuelle Verschiebeaktion nur für Knoten zugelassen, die nicht mit anderen Objekten zu einer Gruppe zusammengefasst wurden.

3.8.2 Undo-Service



Jede der nachfolgend beschriebenen Aktionen kann mit einem Mausklick auf das nebenstehende Symbol rückgängig gemacht werden.

Der Undo-Service merkt sich hierzu die Zustände der letzten zehn Aktionen und schaltet auf Anforderung stufenweise zurück. Selbst wenn eine Stufe zu weit zurückgesprungen wurde, kann dies rückgängig gemacht werden.

Die Undo-Funktion kann auch über die Tastenkombination [Strg][Z] aktiviert werden.

3.8.3 Doppelklickfunktionen

Erfährt ein Objekt im Objektfenster einen Doppelklick, erscheint das individuelle Eigenschaftsblatt dieses Objekts.

Da bei dünnwandigen wie auch bei dickwandigen Querschnitten jeweils Linien und Knotenpunkte angeklickt werden können, müssen hier vier Eigenschaftsblätter erläutert werden.

individuelles Linieneigenschaftsblatt dünnwandiger Querschnitte

Wird bei einem dünnwandig beschriebenen Querschnitt eine Linie doppelt angeklickt, erscheint ihr individuelles Eigenschaftsblatt. Die Inhalte sind zeilenweise thematisch geordnet.

In der Zeile *Liniennummer* werden die Nummer und der Typ der Linie festgelegt.

Liniennummern sind eindeutig zu vergeben, um Irritationen im Protokoll und bei der tabellari-schen Bearbeitung zu vermeiden. #-QUER wird bei der Erzeugung neuer Linien stets noch nicht vorhandene Nummern vergeben. Der Typ unterscheidet zwischen **Blech** und **Schweiß-naht**.

Während der Typ *Blech* einen normalen Teil des Querschnitts beschreibt wird der Typ *Schweißnaht* nur bei der Betrachtung des **Schubflusses** berücksichtigt. Ein Beispiel hierzu be-findet sich im Tutorium, Abs. 5.1, S. 43.

In der Zeile *Verknüpfung* werden die Nummern von Anfangs- und Endknoten ausgewiesen. Durch Klicken des Symbols hinter diesen Angaben werden Anfangs- und Endknoten vertauscht. Dies hat Einfluss auf die positive Linienrichtung und somit auf das Vorzeichen der Schubflüsse, wie sie im Register *Ergebnisse* dargestellt werden.

In der Zeile *Dicken* wird die Dicke des Blechs angegeben, die konstant oder linear veränderlich (gevoutet) sein kann.

Die Form einer Linie ist entweder **gerade** oder **kreisbogenförmig**. Die Voreinstellung ist *Gera-de*. Durch Umschalten auf *Kreisbogen* wird das Eigenschaftsblatt um zusätzliche Eingabefelder erweitert.

Form	Gerade	Kreisbogen
y	79.3333 cm	
z	20.0000 cm	
r	22.6667 cm	
s	12.0000 cm	
α	123.8550 °	

Vorschau:

Im mittleren Teil können die den Kreisbogen definierenden Größen eingegeben werden, die in der Skizze auf der linken Seite erläutert werden. Da die Größen nicht unabhängig voneinander sind, werden bei Vorgabe eines Werts die jeweils anderen Werte berechnet und aktualisiert. Das Ergebnis der aktuellen Einstellungen kann unter der Überschrift *Vorschau* überprüft werden.

Durch Anklicken der nebenstehend dargestellten Schaltfläche verschwindet das Eigenschaftsblatt temporär und gibt den Blick frei auf die Linie. Durch Bewegen der Maus kann nun der Kreisbogen manuell verändert werden. Mit einem Mausklick wird die Position festgelegt und das Eigenschaftsblatt erscheint wieder, in dem die derart definierten Kreisbogenwerte angezeigt werden.

Das Anklicken der nebenstehend dargestellten Schaltfläche bewirkt, dass der jeweils andere Teil des Vollkreises gewählt wird. Die Reaktion des Programms kann ausprobiert und in der Vorschauskizze überprüft werden.

Das Anklicken der nebenstehend dargestellten Schaltfläche bewirkt, dass die Kreisbogensehne auf die andere Seite des Kreises springt. Auch dies wird umgehend in der Vorschauskizze an-gezeigt.

In der Zeile *Abschrägungen* können Linien an freien Enden abgeschrägt werden. Voreingestellt sind die Werte für die **Abschrägungen** 0.0, was besagt, dass das Blech senkrecht zur Mittellinie abgeschnitten ist.



In der Zeile *Aktion* kann festgelegt werden, ob die Linie bei Bestätigen des Eigenschaftsblatts unterteilt werden soll. Hierbei ist die Anzahl der Zwischenknoten, die kontinuierlich über die Li-nie verteilt werden, vorzugeben.

individuelles Knoteneigenschaftsblatt dünnwandiger Querschnitte

Wird bei einem dünnwandig beschriebenen Querschnitt ein Knotenpunkt doppelt angeklickt, erscheint sein individuelles Eigenschaftsblatt.

Hierin wird zunächst die Knotennummer festgelegt. Knotennummern sind eindeutig zu vergeben, um Irritationen im Protokoll und bei der tabellarischen Bearbeitung zu vermeiden. ##-QUER wird bei der Erzeugung neuer Punkte stets noch nicht vorhandene Nummern vergeben.

Weiterhin werden hier die [y,z]-Koordinaten festgelegt. Ist das Konstruktionskoordinatensystem (KKS, Abs. 3.9.1, S. 26) aktiviert, kann dies auch bzgl. dessen Lage und Orientierung erfolgen.

Letztlich wird in diesem Eigenschaftsblatt der Zugang zur Definition von **Ausrundungen** angeboten. Es erscheint ein Eigenschaftsblatt, in dem die Situation des Knotens und der angeschlossenen Stäbe dargestellt wird. Die möglichen Ausrundungsstellen werden nummeriert und dargestellt. Hierin können die Ausrundungsradien festgelegt werden. Nach Bestätigen des Eigenschaftsblatts erscheint das Ergebnis im Konstruktionsfenster.

individuelles Linieneigenschaftsblatt dickwandiger Querschnitte

Wird bei einem dickwandig beschriebenen Querschnitt eine Linie doppelt angeklickt, erscheint ihr individuelles Eigenschaftsblatt.

Hierin werden im oberen Bereich zunächst Angaben zum gesamten **Polygonzug** gemacht.

Bezeichnung und **Typ** sind festzulegen. Ein Polygonzug ist entweder vom Typ **Außenberandung** oder vom Typ **Aussparung**. Eine Aussparung muss stets vollständig in einem Polygonzug vom Typ **Außenberandung** liegen.

Durch Klicken des **Mülleimersymbols** wird der gesamte Polygonzug gelöscht.

Unter der Überschrift *Linie* kann die Linie zum Kreisbogen erklärt oder unterteilt werden. Die daraus resultierenden Interaktionsmöglichkeiten und Programmreaktionen wurden bereits im Eigenschaftsblatt der Linien dünnwandiger Querschnitte vorgestellt (s.o.).

individuelles Knoteneigenschaftsblatt dickwandiger Querschnitte

Wird bei einem dickwandig beschriebenen Querschnitt ein Knotenpunkt doppelt angeklickt, erscheint sein individuelles Eigenschaftsblatt. Es ist identisch zum entsprechenden Eigenschaftsblatt von Knoten dünnwandiger Querschnitte; nur können hier keine Ausrundungen definiert werden.

individuelles Gruppeneigenschaftsblatt

Wird bei dünnwandigen Querschnitten ein Objekt, das zuvor mit anderen Objekten zu einer Gruppe zusammengefasst wurde, doppelt angeklickt, erscheint das individuelle Gruppeneigenschaftsblatt. Hierin wird einzig die Möglichkeit angeboten, die Gruppe wieder aufzulösen.



3.8.4

Auswählen und Abwählen

Die im Konstruktionsfenster dargestellten Objekte können durch einfaches Anklicken oder durch Umfahren ausgewählt und wieder abgewählt werden.

Mittels Aufspannen eines Rechtecks durch Mausbewegung bei gedrückter linker Maustaste werden beim Lösen der Maustaste alle Objekte ausgewählt, die sich vollständig im Rechteck befinden. Ausgewählte Objekte werden rot markiert.

Werden ausgewählte Objekte neuerlich angeklickt oder umfahren, werden sie wieder abgewählt.

Zu einer Gruppe zusammengefasste Objekte können nur gemeinsam aus- bzw. abgewählt werden.



Die nebenstehend dargestellte Schaltfläche stellt den Zustand *alle Objekte abgewählt* her.

Die im nachfolgenden Absatz beschriebenen Modellierungstechniken werden ausschließlich auf die ausgewählten Objekte angewandt.

3.8.5

ausgewählte Objekte löschen, kopieren, ausschneiden, einfügen, gruppieren

Die nachfolgenden Operationen können bei Bearbeitung dünnwandiger Querschnitte genutzt werden. Die Funktion *Löschen* wird auch bei dickwandigen Querschnitten angeboten.



Löschen: Durch Klicken der nebenstehend dargestellten Schaltfläche werden alle ausgewählten Objekte gelöscht. Das Drücken der [Entf]-Taste auf der Tastatur besitzt die gleiche Funktion.



Kopieren: Alle ausgewählten Objekte werden in einen programminternen Speicher kopiert. Alternativ kann die [Strg][C]-Kombination auf der Tastatur genutzt werden.



Ausschneiden: Alle ausgewählten Objekte werden in einen programminternen Speicher kopiert und im Konstruktionsfenster gelöscht ([Strg][X]-Kombination auf der Tastatur).



Einfügen: Der Inhalt des programminternen Speichers wird im Konstruktionsfenster eingefügt ([Strg][V]-Kombination auf der Tastatur).



Gruppieren: Alle ausgewählten Objekte werden zu einer Gruppe zusammengefasst.

3.8.6

Modellieren-Fenster



Durch Klicken der dargestellten Schaltfläche erscheint das *Modellieren-Fenster* auf dem Sichtgerät (s.S. 24). Hierin werden Aktionen wie *Verschieben*, *Verdrehen*, *Vergrößern* und *Spiegeln* etc. ausgewählter Objekte eingeleitet.

Das Fenster kann neben dem *##-QUER-Fenster* positioniert werden, um den Blick auf das Konstruktionsfenster nicht zu versperren, und bietet seine Funktionen in sechs Registern an.

Bei dünnwandigen Querschnitten werden in (fast) allen Registern die Optionsschalter **auf Duplikat anwenden** und **anschließend bereinigen** angeboten.

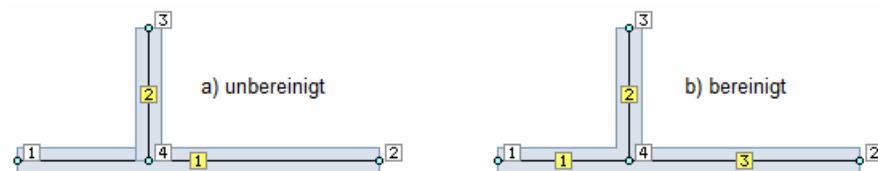
auf Duplikat anwenden

Ist dieser Schalter aktiviert, wird die angeforderte Aktion nicht mit den ausgewählten Objekten selbst, sondern mit einer zuvor erzeugten Kopie der ausgewählten Objekte durchgeführt.

anschließend bereinigen

Die Konstruktion von Linien und Knoten wurde bereits als Netzwerk vorgestellt. Bei einem Netzwerk werden die Knoten untereinander mit Linien verbunden. *##-QUER* macht sich dies bei der Ermittlung des Schubflusses zu Nutze. Der Schub fließt von einer Linie zu den anderen am selben Knoten angeschlossenen Linien. Bei geschlossenen Systemen ergibt sich hierdurch zudem ein Ringfluss, der besonders geeignet ist, Torsionsmomente aufzunehmen.

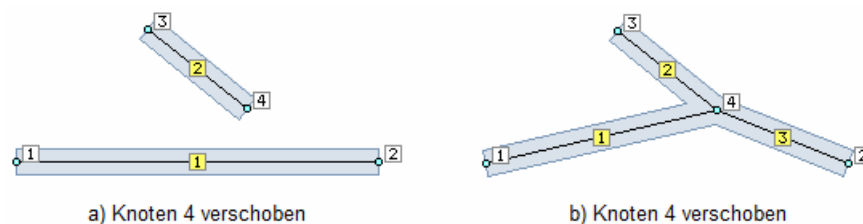
Bei der Netzwerkbeschreibung in grafischer Form existiert jedoch eine Falle, wie die folgende Skizze zeigt.



Im Teil a) sind zwei Linien zu erkennen. Linie 1 verbindet die Knoten 1 und 2. Linie 2 verbindet die Knoten 3 und 4. Auch wenn es geometrisch so aussieht, es besteht keine Verbindung zwischen den beiden Linien.

In der Teilskizze b) ist diese Situation bereinigt. Linie 1 verbindet nun die Knoten 1 und 4 und eine neu hinzugefügte Linie 3 verbindet die Knoten 4 und 2. Ein Schubfluss zwischen den Linien 1, 2 und 3 ist nun über den Knoten 4 möglich.

Jedoch kann die automatische Bereinigung auch nicht gewünschte Effekte nach sich ziehen. Betrachten wir, wie sich eine nachfolgende Verschiebeaktion des Knotens 4 in den Teilskizzen a) und b) auswirkt.



Da der Knoten 4 in Skizze a) keine Verbindung zur Linie 1 besitzt, hat die Verschiebeaktion allein Auswirkungen auf die Form der Linie 2. In Skizze b) betrifft die Verschiebeaktion aber alle drei angeschlossenen Linien.

Wenn nachfolgende Modellierungsaktionen auf soeben modellierte Teilbereiche angewandt werden sollen, ist der Optionsschalter ggf. zu deaktivieren.

ausgewählte Objekte verschieben

Im ersten Register des *Modellieren*-Fensters werden Aktionen zum Verschieben ausgewählter Objekte angeboten.

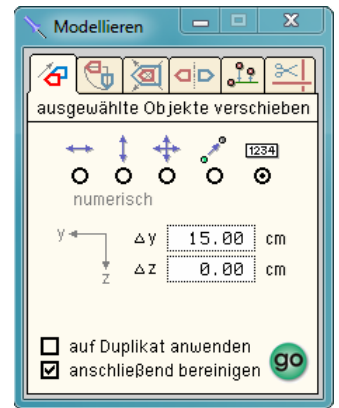
Die Symbole über den alternativen Schaltflächen weisen auf eine horizontale, eine vertikale und eine beliebige manuelle Verschiebeaktion hin. Des Weiteren kann eine Punkt-zu-Punkt-Verschiebeaktion eingeleitet oder eine Verschiebeaktion numerisch beschrieben werden.

Die ersten drei Aktionen beschreiben Verschiebungen, die mit der Maus gesteuert werden. Hierbei bestimmt die Pixelauflösung des Bildschirms ggf. die Genauigkeit des Ergebnisses.

Bei der Punkt-zu-Punkt-Verschiebeaktion sind Start- und Zielknoten anzuklicken. Die Verschiebung wird vom Programm aus den Differenzkoordinaten ermittelt.

Bei der numerischen Verschiebung sind die Koordinaten Δy und Δz direkt vorzugeben. Man beachte, dass Δy positiv nach links und Δz positiv nach unten verschieben!

Der **go**-Button führt die gewählte Aktion aus.



ausgewählte Objekte verdrehen

Im zweiten Register des *Modellieren*-Fensters werden Aktionen zum Verdrehen ausgewählter Objekte angeboten.

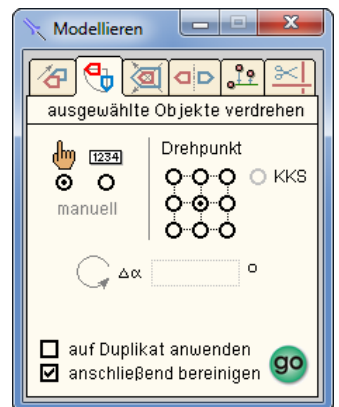
Hierin wird zunächst zwischen manueller und numerisch beschriebener Drehung unterschieden.

Bei manueller Verdrehung wird die Drehung durch Bewegen der Maus und bei numerischer Verdrehung durch Vorgabe eines Drehwinkels festgelegt.

Als Drehpunkte können der Mittelpunkt, die Eckpunkte oder die Seitenmittelpunkte eines fiktiven, die ausgewählten Objekte umspannenden Rechtecks angegeben werden.

Ist das Konstruktionskoordinatensystem aktiviert, kann auch dessen Nullpunkt zum Drehpunkt erklärt werden.

Der **go**-Button führt die gewählte Aktion aus.



ausgewählte Objekte dehnen

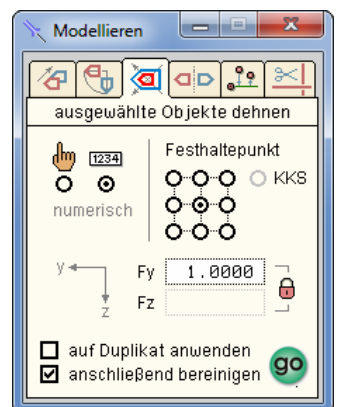
Im dritten Register des *Modellieren*-Fensters werden Aktionen zum Dehnen ausgewählter Objekte angeboten.

Ausgehend von einem Festhaltepunkt werden hierbei die Abstände der Knoten zueinander den Strahlensatzgesetzen folgend vergrößert (Faktor > 1) oder verkleinert (Faktor < 1).

Auch eine **Punktspiegelung** (Faktor < 0.0) kann manuell oder numerisch (mit Vorgabe des Faktors) erfolgen.

I.A. ist bei der numerischen Dehnung der Faktor für die Dehnung in y-Richtung gleich dem des Faktors in z-Richtung, was bewirkt, dass das Ergebnis der ursprünglichen Form ähnlich ist (gleiche Winkel- und Längenverhältnisse). Das Schloss hinter den Zahleneingabefeldern kann geöffnet werden, um diese Bindung zu lösen.

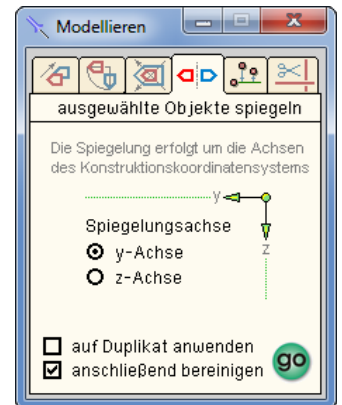
Der **go**-Button führt die gewählte Aktion aus.



ausgewählte Objekte spiegeln

Im vierten Register des *Modellieren*-Fensters werden Aktionen zum Spiegeln ausgewählter Objekte angeboten.

Es wird stets um die Achsen des Konstruktionskoordinatensystems (KKS) gespiegelt, das zuvor entsprechend zu platzieren ist. Ist das KKS nicht aktiviert, kann keine Spiegelung durchgeführt werden. Andererseits sind die gewünschte Achse auszuwählen und der **go**-Button anzuklicken.



ausgewählte Knoten ausrichten

Im fünften Register des *Modellieren*-Fensters werden Aktionen zum Ausrichten ausgewählter Knoten angeboten. Hierzu werden acht Alternativen angeboten.

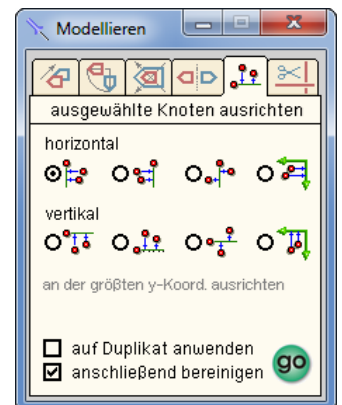
In der ersten Zeile erfolgt die Ausrichtung (von links nach rechts)

- an der größten y-Koordinate
- an der kleinsten y-Koordinate
- an der mittleren y-Koordinate
- an der z-Achse des Konstruktionskoordinatensystems

In der zweiten Zeile erfolgt die Ausrichtung

- an der kleinsten z-Koordinate
- an der größten z-Koordinate
- an der mittleren z-Koordinate
- an der y-Achse des Konstruktionskoordinatensystems

Der **go**-Button führt die gewählte Aktion aus.

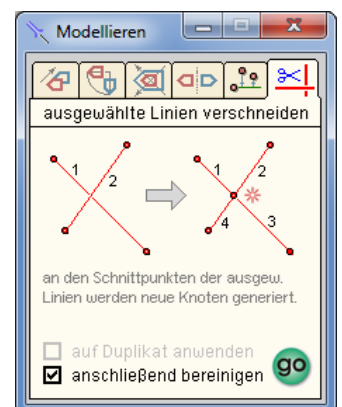


ausgewählte Linien verschneiden

Dieses Register verfügt über keine Optionsschalter und gilt nur für dünnwandig beschriebene Querschnitte.

Durch Klicken des **go**-Buttons werden alle ausgewählten Linien miteinander verschnitten, wenn sie einander überlappen.

Hierzu werden wie in der Skizze dargestellt im Schnittpunkt der Linien ein zusätzlicher Knoten und zwei weitere Linien erzeugt.



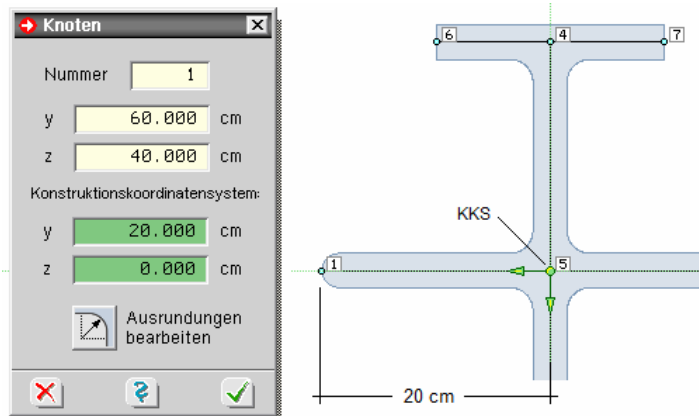
Konstruktionskoordinatensystem



Das Konstruktionskoordinatensystem (KKS) kann durch Anklicken des nebenstehenden Buttons im Konstruktionsfenster jederzeit aktiviert bzw. deaktiviert werden.

Das KKS versteht sich als Konstruktionshilfe, mit der in der Ebene sehr einfach Punkte von beliebigen Positionen aus vermessen werden können.

Das aktivierte KKS kann beliebig im Darstellungsfenster positioniert und jederzeit verschoben werden. Hierzu wird die Maus im Nullpunkt des KKS's positioniert und mit gedrückt gehaltener linker Maustaste verschoben. Wird das KKS hierbei direkt über einem Knoten abgelegt, nimmt es die genaue Position des Knotens ein und es erfolgt eine entsprechende Meldung in der Informationszeile.



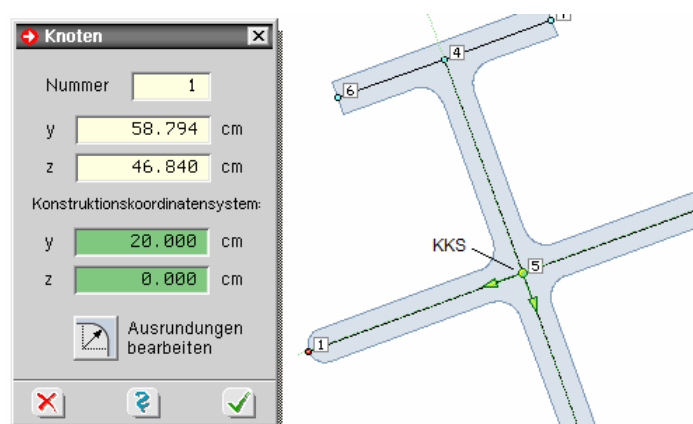
Wenn das KKS aktiviert ist, werden die Knotenkoordinaten im individuellen Eigenschaftsblatt der Knoten alternativ zum globalen y-z-System auch im y-z-System des KKS angeboten.

Zur Kenntlichmachung sind die entsprechenden Eingabefelder grün hinterlegt. Beispielhaft kann der o.a. Abbildung entnommen werden, dass der Knoten 1 die Absolutkoordinaten $y = 60.00$ cm und $z = 40.00$ cm hat. Er liegt 20 cm neben dem auf Knoten 5 platzierten KKS.

Dies kann auch dem individuellen Eigenschaftsblatt von Knoten 1 entnommen werden. Wird nun der grün hinterlegte y-Wert in 15 cm geändert, rutscht der Knoten 1 5.00 cm näher an den Knoten 5 heran.

Das KKS kann auch verdreht werden. Hierzu wird die Maus über einem der Richtungspfeile des KKS's positioniert und mit gedrückt gehaltener linker Maustaste verdreht. Wird die Maustaste gelöst, während die Maus auf einen Knoten zeigt, verdreht sich die entsprechende Achse präzise auf diesen Knoten. Auch hier erfolgt eine entsprechende Meldung in der Statuszeile.

Wie in der nachfolgenden Abbildung zu erkennen ist, funktioniert der oben beschriebene Eingabemechanismus auch bei schief liegenden Strukturen.

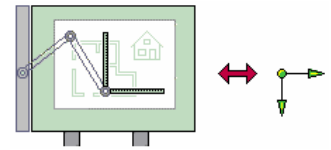


Nach Doppelklicken des Koordinatenursprungs des KKS erscheint das Eigenschaftsblatt des Konstruktionskoordinatensystems auf dem Sichtgerät, in dem Lage und Drehwinkel numerisch eingestellt werden können.

Hier können auch Inkremente festgelegt werden, die die Koordinatensystemangaben und somit die Lage des KKS nach jeder Bestätigung des Eigenschaftsblatts automatisch um einen konstanten Wert verändern.

Da das KKS beliebig positioniert und verdreht werden kann, können Knoten in beliebiger Form untereinander vermessen und in ihrer ebenen Lage konstruiert werden.

Das KKS kann deshalb mit einem herkömmlichen Zeichengerät verglichen werden, dessen Arme ebenfalls dem zu zeichnenden Detail angepasst werden können.



Es sei an dieser Stelle noch darauf hingewiesen, dass bestimmte Modellierungsaktionen die Aktivierung des KKS voraussetzen. Näheres s. *Modellieren*, Abs. 3.8.6, S. 23.

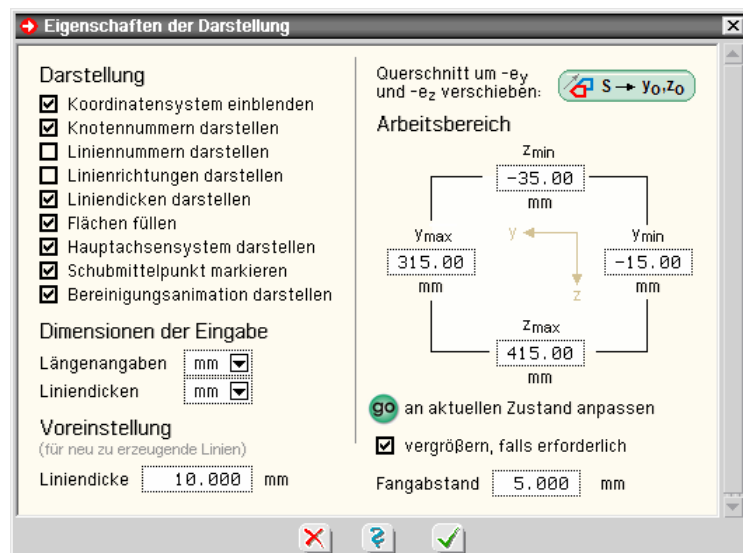
Um das KKS zu deaktivieren, muss das **Mülleimersymbol** im KKS-Eigenschaftsblatt oder der **KKS-Aktivierungsbutton** angeklickt werden.

3.9.2

Darstellungseigenschaften



Durch Anklicken der nebenstehend dargestellten Schaltfläche erscheint das Eigenschaftsblatt zur Bearbeitung der Darstellungseigenschaften.



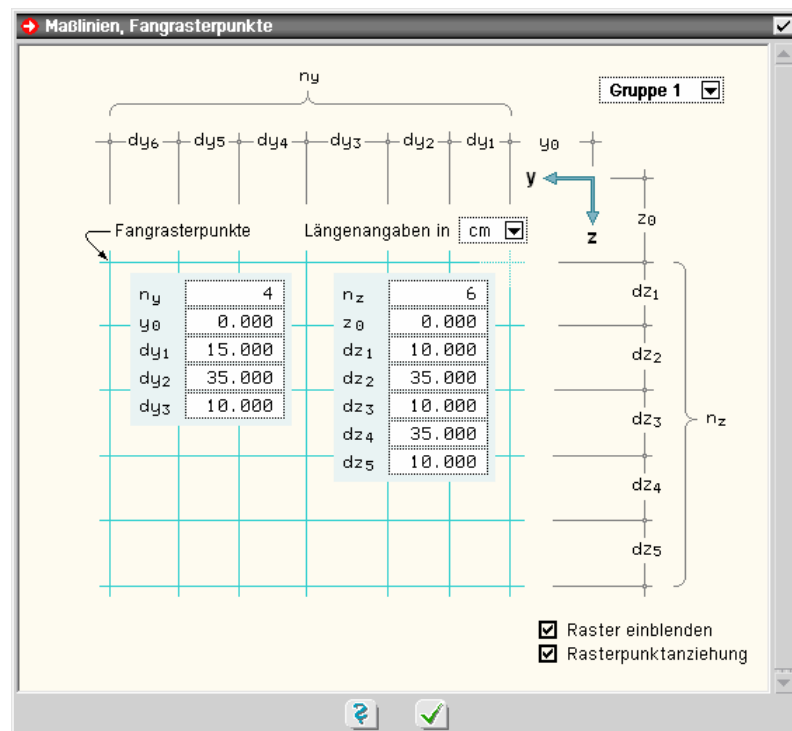
- Unter der Überschrift *Darstellung* wird festgelegt, mit welchen Zusatzinformationen der Querschnitt im Konstruktionsfenster dargestellt werden soll.
- Unter *Dimension der Eingabe* wird festgelegt, ob die Angaben zu Längen (auch Koordinaten) und Liniendicken in m, dm, cm oder mm erfolgen soll.
- Unter *Voreinstellung* kann festgelegt werden, welche Liniendicke neu erzeugte Linien erhalten sollen.
- Die Größe des *Arbeitsbereichs* kann numerisch definiert werden. Der beschriebene Querschnitt sollte sich sinnvollerweise vollständig darin befinden. Wird der **go**-Button angeklickt, berechnet *##-QUER* den Arbeitsbereich derart, dass der aktuell definierte Querschnitt optimal dargestellt wird.
- Die automatische Bereinigungsprozedur stellt im Konstruktionsprozess zu möglichst jedem Zeitpunkt das einwandfreie Netzwerk sicher. Näheres s. unter *Modellieren*, Abs. 3.8, S. 19. Immer wenn soeben neu erzeugte Knoten in unmittelbarer geometrischer Nähe zu bereits existierenden Knoten oder Linien definiert werden, werden die Objekte miteinander verbunden. Dies geht zur Verdeutlichung mit einer kleinen Animation einher. Die Bereinigungsprozedur benötigt einen **Fangabstand**, mit dem festgelegt wird, welcher Abstand unterschritten werden muss, damit die Bereinigungsaktion durchgeführt wird.

3.9.3

Maßlinien und Fangrasterpunkte



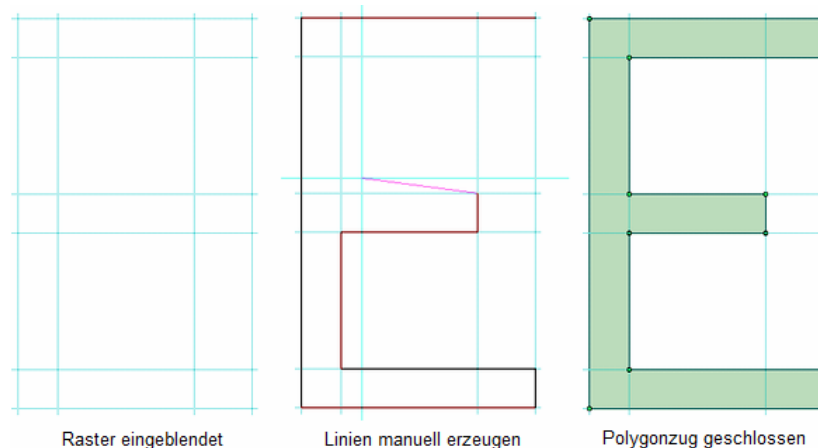
Über die nebenstehend dargestellte Schaltfläche wird das Eigenschaftsblatt zur Definition von Maßlinien und Fangrasterpunkten aufgerufen.



Hierin sind zunächst die Dimension für die nachfolgenden Längenangaben und die Anzahlen (n_y , n_z) der Rasterlinien pro Koordinatenrichtung vorzugeben. Anschließend sind die Startkoordinaten (y_0, z_0) und die Rasterlinienabstände (dy_i, dz_i) einzugeben.

Für einen Querschnitt können bis zu sechs Gruppen von Rasterlinienblöcken vorgegeben werden. Eine entsprechende Auswahl befindet sich im Eigenschaftsblatt oben rechts.

Die Optionsschalter unten rechts legen fest, ob das definierte Raster im Konstruktionsfenster eingeblendet und die **Rasterpunktanziehung** aktiviert werden sollen.



Wird das Eigenschaftsblatt im oben dargestellten Zustand bestätigt, erscheint das Raster im Konstruktionsfenster.

Werden nun Linien manuell erzeugt und wird dabei darauf geachtet, dass ein Mausklick stets in der Nähe eines Rasterpunkts erfolgt, übernimmt der Knoten die exakten Koordinaten des Rasterpunkts. Es entfällt hierdurch der Nachteil des Genauigkeitsverlusts durch die Pixelauflösung des Bildschirms.

3.9.4

DXF-Vorlagen



Durch Klicken der dargestellten Schaltfläche erscheint das Eigenschaftsblatt zum DXF-Vorlagen-Import. Hierin können beliebig viele DXF-Vorlagen verwaltet werden.

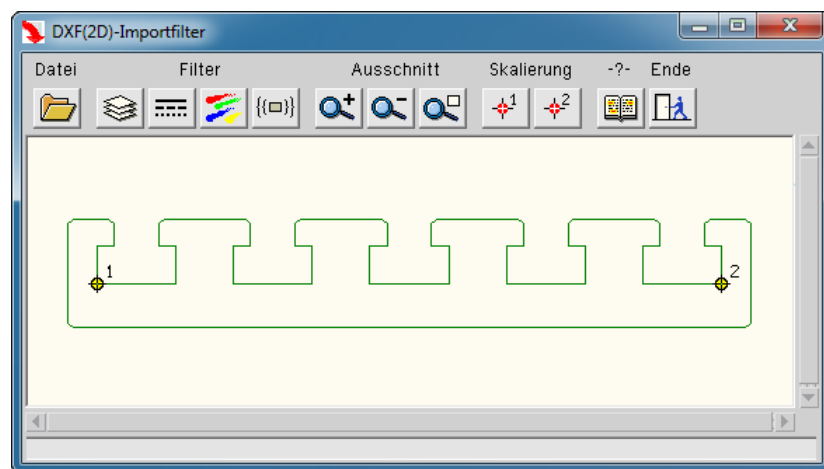
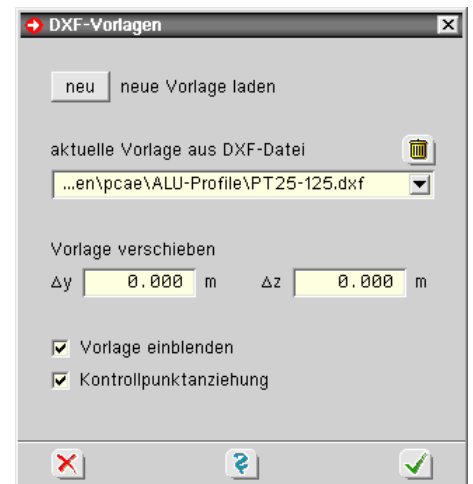
Jede definierte Vorlage kann ausgewählt und in das Konstruktionsfenster eingeblendet werden.

Mit Vorgabe von Δy und Δz kann eine Vorlage im Konstruktionsfenster verschoben werden.

Die Endpunkte der DXF-Linien können zur **Kontrollpunktanziehung** herangezogen werden.

Das Einfügen einer neuen DXF-Vorlage wird durch Anklicken des **neu**-Buttons eingeleitet. Es erscheint das Fenster des DXF(2D)-Import-Filters, in dem die gewünschte DXF-Datei ausgewählt werden muss.

Sie sollte sinnvollerweise einen Querschnitt darstellen.



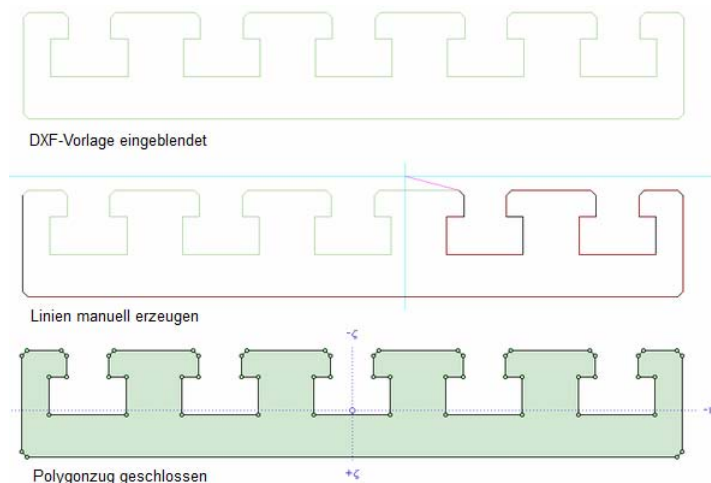
Der Inhalt der DXF-Datei wird im Fenster des DXF-Importfilters dargestellt. Er kann durch gezieltes Setzen von Filtern inhaltlich reduziert werden.

Durch die Definition zweier Kontrollpunkte werden Lage und Größe des Querschnitts präzise festgelegt.

Nach Beendigung des Filterprogramms werden die DXF-Daten in eine DXF-Vorlage umgewandelt und in **##-QUER** importiert.

Nach Schließen des Eigenschaftsblatts zur Verwaltung der DXF-Vorlagen erscheint die DXF-Vorlage im Konstruktionsfenster. Analog zur Vorgehensweise bei der Fangrasterdefinition kann nun bei der manuellen Linienzeugung die Kontrollpunktanziehung genutzt werden.

Jeder Knoten, der per Mausklick in der Nähe eines Kontrollpunkts erzeugt wird, erhält die exakten Koordinaten des Kontrollpunkts. Die nachfolgenden Abbildungen erläutern diese Abfolge.



3.9.5

Elemente neu durchnummerieren

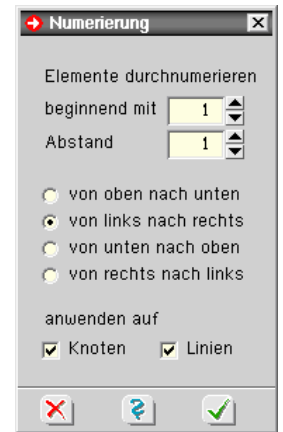


Durch Klicken der dargestellten Schaltfläche erscheint ein Eigenschaftsblatt, das eine schnelle Durchnummerierung der geometrischen Objekte ermöglicht.

Bei der Erzeugung neuer Objekte wird **##-QUER** stets neue (noch nicht existierende) Objektnummern vergeben. Nach Durchführung diverser Erzeugungs- und Modellierungsoperationen entsteht dadurch mitunter eine unterbrochene Nummerierungsfolge.

Durch Löschaktionen entstehen z.B. Lücken in der Reihenfolge. Daher kann am Ende der Modellierungsarbeiten der Wunsch bestehen, die Knoten- und Liniennummern neu zu vergeben.

Im nebenstehend dargestellten Eigenschaftsblatt, das bei dünnwandigen Querschnitten angeboten wird, kann dies sehr einfach durchgeführt werden.



Ziel ist eine geschlossene Durchnummerierung, die einer aus der Geometrie erwachsenen Ordnung folgt. Bei dickwandigen Querschnitten werden die Knotennummern in der Reihenfolge des Polygonzugs neu durchnummeriert.

3.9.6

Querschnitte tabellarisch bearbeiten

Alternativ zur grafischen Objektbearbeitung wird im Register *Tabelle* die tabellarische Bearbeitung angeboten. Es kann stets zwischen den Registern *Konstruktion* und *Tabelle* hin- und hergeschaltet werden; es wird immer der gleiche Querschnitt bearbeitet.

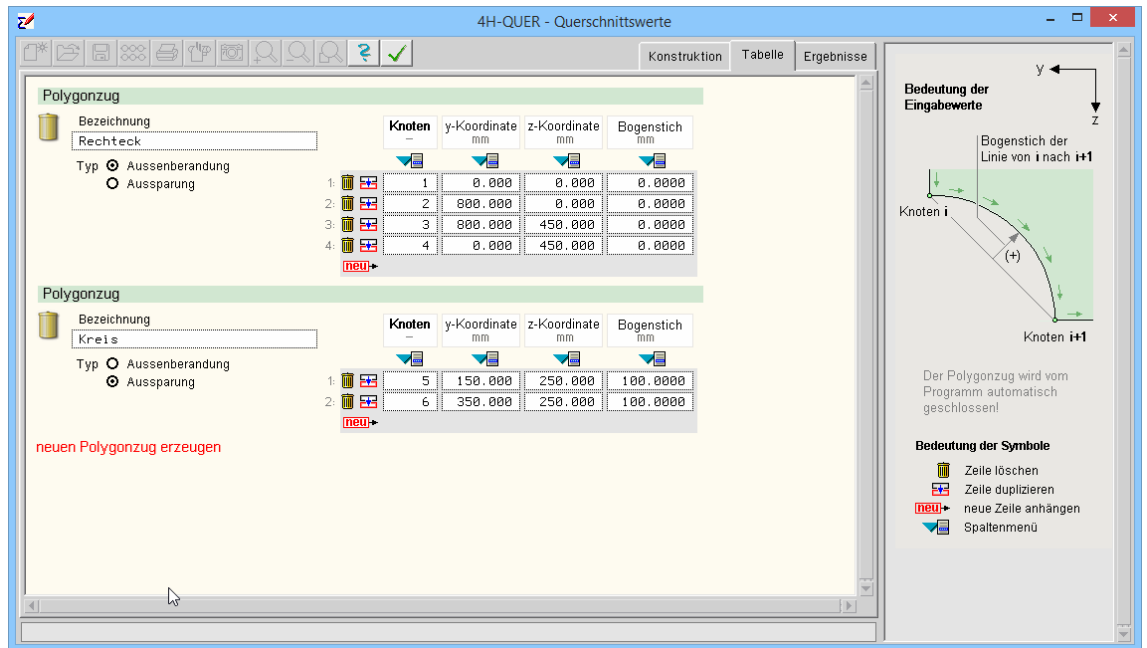
Wenngleich die grafische Bearbeitung von **pcae** favorisiert wird, kann auch die tabellarische Bearbeitung Vorteile bieten. Die nachfolgende Abbildung zeigt das **##-QUER**-Fenster in der tabellarischen Bearbeitung eines dünnwandigen Querschnitts.

Knoten			Linie					
	y-Koordinate	z-Koordinate		Anf.-Kno.	Endkno.	Dicke (A)	Dicke (E)	Bogenstich
1	0.000	0.000	1	1	7	20.00	20.00	0.0000
2	800.000	0.000	2	2	5	20.00	20.00	0.0000
3	800.000	800.000	3	3	11	20.00	20.00	0.0000
4	0.000	800.000	4	4	10	20.00	20.00	0.0000
5	800.000	266.667	5	5	12	20.00	20.00	0.0000
6	800.000	533.333	6	6	3	20.00	20.00	0.0000
7	266.667	0.000	7	7	9	20.00	20.00	0.0000
8	533.333	0.000	8	8	2	20.00	20.00	0.0000
9	400.000	0.000	9	9	8	20.00	20.00	0.0000
10	0.000	400.000	10	10	1	20.00	20.00	0.0000
11	400.000	800.000	11	11	4	20.00	20.00	0.0000
12	800.000	400.000	12	12	6	20.00	20.00	0.0000
13	700.000	400.000	13	13	13	20.00	20.00	0.0000
14	400.000	100.000	14	14	9	20.00	20.00	0.0000
15	100.000	400.000	15	15	15	20.00	20.00	0.0000
16	400.000	700.000	16	16	11	20.00	20.00	0.0000
17	1050.000	266.667	17	17	5	22	20.00	0.0000
18	1050.000	533.333	18	18	6	21	20.00	0.0000
19	533.333	-250.000	19	19	8	23	20.00	0.0000
20	266.667	-250.000	20	20	7	24	20.00	0.0000
21	925.000	533.333	21	21	21	18	20.00	0.0000
22	925.000	266.667	22	22	22	17	20.00	0.0000

Im Hauptfenster werden je eine Tabelle für die Knoten und eine Tabelle für die Linien angeboten. Skizzen im Ergebnisfenster erklären die einzelnen Tabellenspalten und die Bedeutung der Funktionssymbole.

Es ist zu beachten, dass alle in der Linientabelle angegebenen Anfangs- und Endknoten in der Knotentabelle aufgelistet sein müssen!

Ausrundungen und Abschrägungen können nur grafisch im Konstruktionsfenster definiert werden.



Bei dickwandigen Querschnitten werden die einzelnen Polygonzüge tabellarisch erfasst.

Jeder Polygonzug hat eine eigene Bezeichnung, ist von einem bestimmten Typ und hat eine zugeordnete Knotentabelle. Die Elemente der Tabelle, so sie nicht selbsterklärend sind, werden im Ergebnisfenster erläutert.

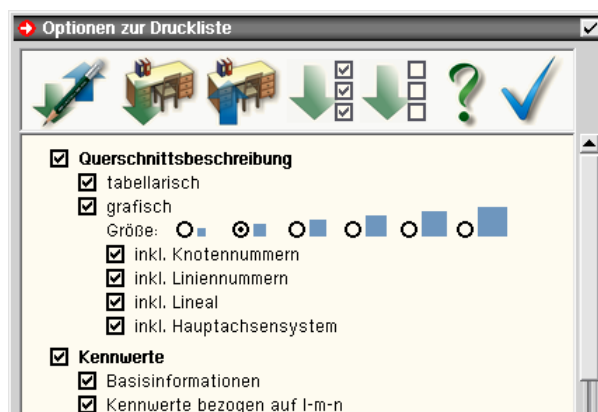
3.9.7 aktuellen Querschnitt drucken



Die Druckausgabe des aktuell geladenen Querschnitts wird durch Anklicken des nebenstehend dargestellten Buttons eingeleitet. Es erscheint ein symbolisches Untermenü, in dem (von links nach rechts)

- optionale Einstellungen bzgl. des nachfolgenden Ausdrucks festgelegt,
- der DTE®-eigene Viewer zur Vorschau am Sichtgerät gestartet
- und der DTE®-Druckmanager zur Ausgabe des Druckdokuments aufgerufen werden kann

Die optionalen Einstellungen sind selbsterklärend. Ihre Auswirkungen können mit Hilfe des Viewers überprüft werden. Die Schaltflächen in der Kopfzeile des Eigenschaftsblatts dienen dem Speichern, Laden bzw. Setzen der **Druckoptionen**.



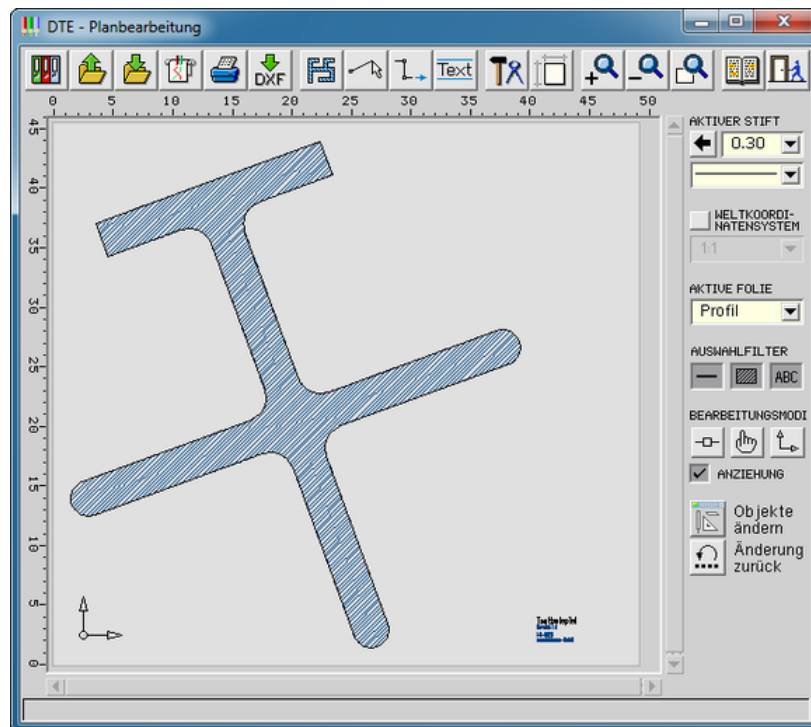
3.9.8

aktuellen Querschnitt plotten



Durch Anklicken des nebenstehend dargestellten Buttons wird die Planerstellung zum Querschnitt eingeleitet.

Nach Abfrage eines Maßstabs wird ein Plan vom aktuell geladenen Querschnitts erzeugt und an das DTE®-Planerstellungsmodul weitergeleitet, von dem aus der Plan auf einem Plotter ausgegeben oder zur weiteren Bearbeitung schreibischglobal gesichert werden kann.



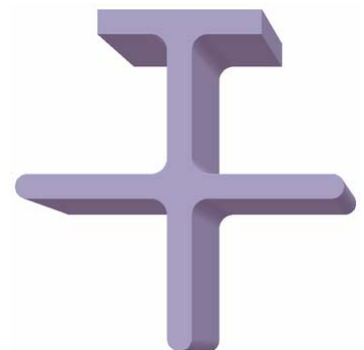
3.9.9

aktuellen Querschnitt visualisieren



Durch Anklicken des nebenstehend dargestellten Buttons wird der aktuell geladene Querschnitt an das DTE®-FotoView-Programm übergeben.

Hierin kann der Querschnitt dreidimensional gedreht und aus beliebigen Richtungen betrachtet werden.



4

Theorie

4.1

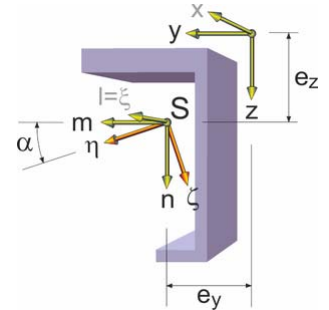
Koordinatensysteme

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.

In 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 weiterhin 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), sowie das durch S verlaufende $\xi\eta\zeta$ -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.

4.2

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 aus der Dehnung ε_S und den Krümmungen κ_m , κ_n die Schnittgrößen der Biegung ermitteln.

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

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

Das $\xi\eta\zeta$ -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.

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

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

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

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

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

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

4.3

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 Profilkordinate s (β : Winkel der Tangente an die Mittellinie).

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

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

$$\begin{aligned} y_{SM} &= y_M - e_y = \frac{R_{Sy} \cdot I_n - R_{Sz} \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \\ z_{SM} &= z_M - e_z = \frac{R_{Sz} \cdot I_m - R_{Sy} \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \\ R_{Sy} &= \int_A \omega_S \cdot (z - e_z) \cdot dA \quad \dots \text{und} \dots R_{Sz} = \int_A \omega_S \cdot (y - e_y) \cdot dA \end{aligned}$$

4.4

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).

$$\begin{aligned} N &= \int_A \sigma_x \cdot dA \quad \dots M_y = \int_A \sigma_x \cdot z \cdot dA \quad \dots M_z = - \int_A \sigma_x \cdot y \cdot dA \quad \dots M_\omega = \int_A \sigma_x \cdot \omega \cdot dA \\ V_y &= \int_A \tau_{xy} \cdot dA \quad \dots V_z = \int_A \tau_{xz} \cdot dA \quad \dots T_t = \int_A \left(\tau_{xz} \cdot (y - y_M - \frac{\partial \omega}{\partial z}) - \tau_{xy} \cdot (z - z_M + \frac{\partial \omega}{\partial y}) \right) \cdot dA \end{aligned}$$

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.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x(y, z) &= u'(y, z) = u'_S - (y - e_y) \cdot \varphi'_z + (z - e_z) \cdot \varphi'_y - \omega_M(y, z) \cdot \vartheta'' \\ \sigma_x(y, z) &= E \cdot \varepsilon_x(y, z) = \frac{N}{A} - (y - e_y) \cdot \frac{I_m \cdot M_n + I_{mn} \cdot M_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} + (z - e_z) \cdot \frac{I_n \cdot M_m + I_{mn} \cdot M_n}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} + \omega_M \cdot \frac{M_\omega}{C_M} \\ \varepsilon_x(\eta, \zeta) &= u'(\eta, \zeta) = u'_S - \eta \cdot \varphi'_\zeta + \zeta \cdot \varphi'_\eta - \omega_M(\eta, \zeta) \cdot \vartheta'' \\ N &= E \cdot A \cdot u'_S \quad \dots M_\eta = E \cdot I_\eta \cdot \varphi'_\eta \quad \dots M_\zeta = E \cdot I_\zeta \cdot \varphi'_\zeta \quad \dots M_\omega = -E \cdot C_M \cdot \vartheta'' \\ \sigma_x(\eta, \zeta) &= E \cdot \varepsilon_x(\eta, \zeta) = \frac{N}{A} - \eta \cdot \frac{M_\zeta}{I_\zeta} + \zeta \cdot \frac{M_\eta}{I_\eta} + \omega_M \cdot \frac{M_\omega}{C_M} \quad \dots I_\eta = \int_A \zeta^2 \cdot dA \quad \dots I_\zeta = \int_A \eta^2 \cdot dA \quad \dots C_M = \int_A \omega_M^2 \cdot dA \end{aligned}$$

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 Profilkordinate s benötigt.

$$\begin{aligned} V_\eta &= -M'_\zeta \dots V_\zeta = M'_\eta \dots T_w = M'_\omega \dots T_t = G \cdot I_T \cdot \vartheta' \\ S_\zeta(s) &= \int_{A(s)} \eta \cdot ds \dots S_\eta(s) = \int_{A(s)} \zeta \cdot ds \dots S_\omega(s) = \int_{A(s)} \omega_M \cdot ds \\ T(s) &= -\frac{S_\zeta(s)}{I_\zeta} \cdot V_\eta - \frac{S_\eta(s)}{I_\eta} \cdot V_\zeta - \frac{S_\omega(s)}{C_M} \cdot T_w + \vartheta_{Tt,B}(s) \cdot T_t = \vartheta_{V\eta}(s) \cdot V_\eta + \vartheta_{V\zeta}(s) \cdot V_\zeta + \vartheta_{T\omega}(s) \cdot T_w + \vartheta_{Tt,B}(s) \cdot T_t \\ \tau_{xs}(s, \lambda) &= \frac{T(s)}{t(s)} + \frac{T_t \cdot t(s)}{I_T} = \frac{\vartheta_{V\eta}(s)}{t(s)} \cdot V_\eta + \frac{\vartheta_{V\zeta}(s)}{t(s)} \cdot V_\zeta + \frac{\vartheta_{T\omega}(s)}{t(s)} \cdot T_w + \frac{\vartheta_{Tt,B}(s)}{t(s)} \cdot T_t + \lambda \cdot t(s) \cdot \mu_{Tt,S}(s) \cdot T_t \dots -1 \leq \lambda \leq 1 \end{aligned}$$

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.

4.5

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.

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

4.6

Schubkorrekturfaktoren

Die Schubkorrekturfaktoren werden zur Ermittlung der Schubflächen bzw. Schubsteifigkeiten bei der Berechnung von schubweichen Stäben benötigt. Die mittleren Schubgleitungen γ_{xy} und γ_{xz} stehen mit den zugehörigen Querkräften in Beziehung.

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \kappa_y \cdot \frac{V_y}{G \cdot A} \dots \gamma_{xz} = \kappa_z \cdot \frac{V_z}{G \cdot A} \dots A_{Vy} = \frac{A}{\kappa_y} \dots A_{Vz} = \frac{A}{\kappa_z} \\ \kappa_y &= \frac{A}{V_y^2} \cdot \int_A (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2) \cdot dA = A \cdot \int_s \frac{\vartheta_{Ty}^2}{t} \cdot ds \dots \kappa_z = \frac{A}{V_z^2} \cdot \int_A (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2) \cdot dA = A \cdot \int_s \frac{\vartheta_{Tz}^2}{t} \cdot ds \dots \kappa_{yz} = A \cdot \int_s \frac{\vartheta_{Ty} \cdot \vartheta_{Tz}}{t} \cdot ds \end{aligned}$$

ϑ_{Ty} und ϑ_{Tz} 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.

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

Falls nicht alle Querschnittsteile miteinander verbunden sind, liegt ein mehnteiliger Querschnitt vor. Bei einem mehnteiligen 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.

$$\begin{aligned}
 y_M &= \frac{\left(\sum_i y_{M,i} \cdot l_{m,i} - \sum_i z_{M,i} \cdot l_{mn,i}\right) \cdot \sum_i l_{n,i} + \left(\sum_i z_{M,i} \cdot l_{n,i} - \sum_i y_{M,i} \cdot l_{mn,i}\right) \cdot \sum_i l_{mn,i}}{\sum_i l_{m,i} \cdot \sum_i l_{n,i} - \left(\sum_i l_{mn,i}\right)^2} \\
 z_M &= \frac{\left(\sum_i z_{M,i} \cdot l_{n,i} - \sum_i y_{M,i} \cdot l_{mn,i}\right) \cdot \sum_i l_{m,i} + \left(\sum_i y_{M,i} \cdot l_{m,i} - \sum_i z_{M,i} \cdot l_{mn,i}\right) \cdot \sum_i l_{mn,i}}{\sum_i l_{m,i} \cdot \sum_i l_{n,i} - \left(\sum_i l_{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 &= (u_S + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot \varphi_y - \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot \varphi_z) + (z - e_{z,i}) \cdot (\varphi_y - (y_{M,i} - y_M) \cdot \vartheta') - (y - e_{y,i}) \cdot (\varphi_z - (z_{M,i} - z_M) \cdot \vartheta') - \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{l_m \cdot M_n + l_{mn} \cdot M_m}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} + \left((z - e_{z,i}) + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z)\right) \cdot \frac{l_n \cdot M_m + l_{mn} \cdot M_n}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \\
 &\quad + \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{l_m \cdot M_n + l_{mn} \cdot M_m}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot \frac{l_n \cdot M_m + l_{mn} \cdot M_n}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2}\right) \\
 &\quad - (y - e_{y,i}) \cdot \left(\frac{l_m \cdot M_n + l_{mn} \cdot M_m}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} + (z_{M,i} - z_M) \cdot \frac{M_\omega}{C_M}\right) + (z - e_{z,i}) \cdot \left(\frac{l_n \cdot M_m + l_{mn} \cdot M_n}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} + (y_{M,i} - y_M) \cdot \frac{M_\omega}{C_M}\right) + \omega_{M,i} \cdot \frac{M_\omega}{C_M}
 \end{aligned}$$

Die Querschnittsteile können biegesteif oder biegeschlaff miteinander verbunden sein. Die Verteilung der Normalkräfte hängt vom Grad α der **Biegekopplung** ab (biegesteif: $\alpha = 1$, biegeschlaff: $\alpha = 0$). 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.

$$\begin{aligned}
 A &= \sum_i A_i \quad \dots \quad e_y = \frac{\sum_i e_{y,i} \cdot A_i}{A} \quad \dots \quad e_z = \frac{\sum_i e_{z,i} \cdot A_i}{A} \\
 I_m &= \sum_i \left(l_{m,i} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z)^2 \cdot A_i \right) \quad \dots \quad I_n = \sum_i \left(l_{n,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y)^2 \cdot A_i \right) \\
 I_{mn} &= \sum_i \left(l_{mn,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot A_i \right) \quad \dots \quad I_T = \sum_i I_{T,i} \\
 C_M &= \sum_i \left(C_{M,i} + (y_{M,i} - y_M)^2 \cdot l_{m,i} + (z_{M,i} - z_M)^2 \cdot l_{n,i} - 2 \cdot (y_{M,i} - y_M) \cdot (z_{M,i} - z_M) \cdot l_{mn,i} \right)
 \end{aligned}$$

Die Normalkräfte verteilen sich im Verhältnis der Teilflächen.

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

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.

$$\begin{aligned}
 M_{m,i} &= \int_{A_i} \sigma_{x,i} \cdot (z - e_{z,i}) \cdot dA = \frac{l_{m,i} \cdot l_n - l_{mn,i} \cdot l_{mn}}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot M_m + \frac{l_{m,i} \cdot l_{mn} - l_{mn,i} \cdot l_m}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot M_n + \frac{(y_{M,i} - y_M) \cdot l_{m,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot l_{mn,i}}{C_M} \cdot M_\omega \\
 M_{n,i} &= - \int_{A_i} \sigma_{x,i} \cdot (y - e_{y,i}) \cdot dA = \frac{l_{n,i} \cdot l_{mn} - l_{mn,i} \cdot l_n}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot M_m + \frac{l_{n,i} \cdot l_m - l_{mn,i} \cdot l_{mn}}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot M_n + \frac{(z_{M,i} - z_M) \cdot l_{n,i} - (y_{M,i} - y_M) \cdot l_{mn,i}}{C_M} \cdot M_\omega
 \end{aligned}$$

Für die Aufteilung der Querkräfte ergeben sich dann ähnliche Beziehungen.

$$\begin{aligned}
 V_m &= -M'_m = \int_A (y - e_y) \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \int_{A_i} \left[(y - e_{y,i}) + (e_{y,i} - e_y) \right] \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \left(-M'_{m,i} + (e_{y,i} - e_y) \cdot N'_i \right) \\
 V_n &= M'_m = \int_A (z - e_z) \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \int_{A_i} \left[(z - e_{z,i}) + (e_{z,i} - e_z) \right] \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \left(M'_{m,i} + (e_{z,i} - e_z) \cdot N'_i \right) \\
 V_{m,i} &= \frac{l_{n,i}^+ \cdot l_m - l_{mn,i}^+ \cdot l_{mn}}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot V_m - \frac{l_{n,i}^+ \cdot l_{mn} - l_{mn,i}^+ \cdot l_n}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot V_n - \frac{(z_{M,i} - z_M) \cdot l_{n,i} - (y_{M,i} - y_M) \cdot l_{mn,i}}{C_M} \cdot T_\omega \\
 V_{n,i} &= -\frac{l_{m,i}^+ \cdot l_{mn} - l_{mn,i}^+ \cdot l_m}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot V_m + \frac{l_{m,i}^+ \cdot l_n - l_{mn,i}^+ \cdot l_{mn}}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot V_n + \frac{(y_{M,i} - y_M) \cdot l_{m,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot l_{mn,i}}{C_M} \cdot T_\omega \\
 &\dots \text{ mit } \dots l_{m,i}^+ = l_{m,i} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z)^2 \cdot A_i \dots \text{ und } \dots l_{n,i}^+ = l_{n,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y)^2 \cdot A_i \\
 &\dots \text{ und } \dots l_{mn,i}^+ = l_{mn,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot A_i
 \end{aligned}$$

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

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

Die Schnittgrößen des Gesamtquerschnitts erhält man durch Summation der Teilschnittgrößen.

$$\begin{aligned}
 N_i &= \sum_i N_i \dots M_m = \sum_i \left(M_{m,i} + (e_{z,i} - e_z) \cdot N_i \right) \dots M_n = \sum_i \left(M_{n,i} - (e_{y,i} - e_y) \cdot N_i \right) \\
 M_\omega &= \sum_i \left(M_{w,i} + (y_{M,i} - y_M) \cdot M_{m,i} + (z_{M,i} - z_M) \cdot M_{n,i} \right) \\
 V_m &= \sum_i V_{m,i} \dots V_n = \sum_i V_{n,i} \dots T_t = \sum_i T_{t,i} \\
 T_w &= M'_\omega = \sum_i \left(T_{w,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot V_{m,i} + (y_{M,i} - y_M) \cdot V_{n,i} \right)
 \end{aligned}$$

4.8

plastische Widerstandsmomente

Die plastischen Grenzmomente können mit Hilfe der plastischen Widerstandsmomente berechnet werden. Die zugehörige Spannungsverteilung erzeugt dabei keine Normalkraft; die resultierenden Momente beziehen sich auf den Schwerpunkt.

Für jede Achse, um die das Grenzmoment wirkt (z.B. m-, n-, η -, ζ -Achse), sind zwei evtl. unterschiedliche Widerstandsmomente von Interesse. Das maximale plastische Widerstandsmoment liefert das maximal mögliche Moment um die betrachtete Achse.

Die neutrale Achse ist parallel zur Achse und teilt die Querschnittsfläche in zwei gleiche Teile. Das zum Grenzmoment senkrecht wirkende Moment kann dabei von Null verschieden sein (z.B. unsymmetrische Querschnitte, gedrehte Hauptachsen).

Die Spannungsverteilung des reduzierten plastischen Widerstandsmoments liefert das maximal mögliche Moment um die betrachtete Achse unter der Zusatzbedingung, dass das zum Grenzmoment senkrecht wirkende Moment gleich Null ist. Die neutrale Achse ist evtl. zur Momentenachse verdreht.

Die Berechnung der Widerstandsmomente erfolgt mit Hilfe der Dehnungsiteration. Als Stoffgesetz wird hierbei eine bilineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung verwendet. Zu dem betrachteten Moment wird iterativ ein Dehnungszustand unter Berücksichtigung der Grenzdehnung (z.B. 20%) und der zu beachtenden Nebenbedingungen (keine Normalkraft, evtl. kein Quermoment) ermittelt. Aus der zugehörigen Spannungsverteilung lassen sich das Grenzmoment und das Widerstandsmoment berechnen.

Die Verwölbung der primären und sekundären Torsion bzw. des Querkraftschubs berechnen sich mit der Methode der Finiten Elemente aus der Potentialgleichung (in den Hauptachsenkoordinaten η, ζ)

$$\frac{d^2\omega}{d\eta^2} + \frac{d^2\omega}{d\zeta^2} = f(\eta, \zeta)$$

Längs der Querschnittsränder gilt die Randbedingung (mit dem Normalenvektor (n_η, n_ζ))

$$\frac{d\omega}{d\eta} \cdot n_\eta + \frac{d\omega}{d\zeta} \cdot n_\zeta = g(\eta, \zeta)$$

Es werden folgende Funktionen $f(\eta, \zeta)$ und $g(\eta, \zeta)$ für die einzelnen Problemstellungen angesetzt

Primäre Torsion $f(\eta, \zeta) = 0$ $g(\eta, \zeta) = \eta \cdot n_\zeta - \zeta \cdot n_\eta$

$$\tau_{x\eta} = -G \cdot \vartheta' \cdot \left((\zeta - \zeta_M) + \frac{d\omega_M}{d\eta} \right) \quad \dots \text{und} \dots \tau_{x\zeta} = G \cdot \vartheta' \cdot \left((\eta - \eta_M) - \frac{d\omega_M}{d\zeta} \right)$$

Sekundäre Torsion $f(\eta, \zeta) = \frac{\omega_M}{I_\omega}$ $g(\eta, \zeta) = 0$ $\tau_{x\eta} = G \cdot \frac{d\omega}{d\eta}$ $\tau_{x\zeta} = G \cdot \frac{d\omega}{d\zeta}$

Querkraft in η -Richtung $f(\eta, \zeta) = \frac{\eta}{I_\zeta}$ $g(\eta, \zeta) = 0$ $\tau_{x\eta} = G \cdot \frac{d\omega}{d\eta}$ $\tau_{x\zeta} = G \cdot \frac{d\omega}{d\zeta}$

Querkraft in ζ -Richtung $f(\eta, \zeta) = \frac{\zeta}{I_\eta}$ $g(\eta, \zeta) = 0$ $\tau_{x\eta} = G \cdot \frac{d\omega}{d\eta}$ $\tau_{x\zeta} = G \cdot \frac{d\omega}{d\zeta}$

Dabei ist ω_M die normierte Verwölbung der primären Torsion und (η_M, ζ_M) der Schubmittelpunkt. Für die Torsionskennwerte ergeben sich dann

$$I_T = \int_A \left(\left((\eta - \eta_M) - \frac{d\omega_M}{d\zeta} \right) \cdot (\eta - \eta_M) + \left((\zeta - \zeta_M) + \frac{d\omega_M}{d\eta} \right) \cdot (\zeta - \zeta_M) \right) \cdot dA \quad \dots \quad I_\omega = \int_A \omega_M^2 \cdot dA$$

Nachfolgend sind die von ##-QUER ausgewiesenen Größen zusammengestellt. Die Größen erscheinen sowohl im Ergebnisfenster des Konstruktionsregisters als auch in der Druckliste.

Fläche, Schwerpunkt + Hauptachsen

A	Querschnittsfläche
e_y	Abstand des Schwerpunkts in y-Richtung von der z-Achse
e_z	... in z-Richtung von der y-Achse
α	Hauptachseneckwinkel

Ausdehnung

y_{\min}	kleinste y-Koordinate
y_{\max}	größte y-Koordinate
z_{\min}	kleinste z-Koordinate
z_{\max}	größte z-Koordinate
b	Querschnittsbreite (= $y_{\max} - y_{\min}$)
h	Querschnittshöhe (= $z_{\max} - z_{\min}$)
U_a	äußere Mantelfläche/cm
U_i	innere Mantelfläche/cm (nur bei mehrzelligen dünnwandigen Querschnitten bzw. dickwandigen Querschnitten mit Aussparungen)
U	Mantelfläche/cm (= $U_a + U_i$)

Trägheitsmomente (m-n)

I_m	Biegeträgheitsmoment für die Biegung um die m-Achse
I_n	... um die n-Achse
I_{mn}	Deviationsmoment (= 0, falls $\alpha = 0$)
W_{m+}	Widerstandsmoment für Biegung um n-Achse zur Randspannungsermittlung bei h_{m+}
W_{m-}	... bei h_{m-}
W_{n+}	Widerstandsmoment für Biegung um m-Achse zur Randspannungsermittlung bei h_{n+}
W_{n-}	... bei h_{n-}
h_{m+}	größter Schwerpunktsabstand in positiver m-Richtung
h_{m-}	... in negativer m-Richtung
h_{n+}	größter Schwerpunktsabstand in positiver n-Richtung
h_{n-}	... in negativer n-Richtung
i_m	Trägheitsradius um die m-Achse
i_n	... um die n-Achse

Trägheitsmomente (η - ζ) (nur für $\alpha \neq 0$)

I_η	Biegeträgheitsmoment für die Biegung um die η -Achse
I_ζ	... um die ζ -Achse
I_p	polares Trägheitsmoment
$W_{\eta+}$	Widerstandsmoment für Biegung um ζ -Achse zur Randspannungsermittlung bei h_{m+}
$W_{\eta-}$	... bei h_{m-}
$W_{\zeta+}$	Widerstandsmoment für Biegung um η -Achse zur Randspannungsermittlung bei h_{n+}
$W_{\zeta-}$	... bei h_{n-}
$h_{\eta+}$	größter Schwerpunktsabstand in positiver η -Richtung
$h_{\eta-}$	... in negativer η -Richtung
$h_{\zeta+}$	größter Schwerpunktsabstand in positiver ζ -Richtung
$h_{\zeta-}$	... in negativer ζ -Richtung
i_η	Trägheitsradius um die η -Achse
i_ζ	... um die ζ -Achse
i_p	polarer Trägheitsradius

Schubkennwerte

y_M	y-Koordinate des Schubmittelpunkts
z_M	z-Koordinate des Schubmittelpunkts
y_{SM}	Abstand des Schubmittelpunkts vom Schwerpunkt in y-Richtung ($y_{SM} = y_M - e_y$)
z_{SM}	... in z-Richtung ($z_{SM} = z_M - e_z$)
η_M	η -Koordinate des Schubmittelpunkts
ζ_M	ζ -Koordinate des Schubmittelpunkts
κ_m	Schubflächenbeiwert für Querkräfte in m-Richtung
κ_n	... in n-Richtung
A_m	Schubfläche für Querkräfte in m-Richtung ($A_m = A / \kappa_m$)
A_n	.. in n-Richtung ($A_n = A / \kappa_n$)
κ_η	Schubflächenbeiwert für Querkräfte in η -Richtung
κ_ζ	... in ζ -Richtung
A_η	Schubfläche für Querkräfte in η -Richtung ($A_\eta = A / \kappa_\eta$)
A_ζ	... in ζ -Richtung ($A_\zeta = A / \kappa_\zeta$)
I_T	Torsionsträgheitsmoment
I_W	Wölbwiderstand bzgl. des Schubmittelpunkts (früher: C_M)
R_{Sy}	Wölbmoment im Schwerpunkt um die y-Achse
R_{Sz}	... um die z-Achse
C_S	Wölbwiderstand bzgl. des Schwerpunkts
I_{pM}	polarer Trägheitsradius bzgl. des Schubmittelpunkts
$i_{\omega M}$	Wölbträgheitsradius
ω_{M+}	maximale Verwölbung
ω_{M-}	minimale Verwölbung
$W_{\omega+}$	Wölbwiderstandsmoment der maximalen Verwölbung
$W_{\omega-}$	... der minimalen Verwölbung
i_M	Querschnittsstrecke in Längsrichtung
r_η	... in η -Richtung
r_ζ	... in ζ -Richtung
r_ω	... der Verwölbung

plastische Kennwerte

$W_{ply,max}$	maximales plastisches Widerstandsmoment für Biegung um die m-Achse
$W_{plz,max}$	... um die n-Achse
$W_{pl\eta,max}$	... um die η -Achse
$W_{pl\zeta,max}$	... um die ζ -Achse
$W_{ply,red}$	reduziertes plastisches Widerstandsmoment für Biegung um die m-Achse mit $M_n = 0$
$W_{plz,red}$	... um die n-Achse mit $M_m = 0$
$W_{pl\eta,red}$	... um die η -Achse mit $M_\zeta = 0$
$W_{pl\zeta,red}$	... um die ζ -Achse mit $M_\eta = 0$

Die Schubkennwerte dünnwandig beschriebener Querschnitte werden i.d.R. durch Auswertung der o.a. Linienintegrale ermittelt. Da dies bei allgemein polygonal umrandeten, dickwandig beschriebenen Querschnitten nicht möglich ist, wurde in *##-QUER* die Finite-Elemente-Lösung eingebaut, die i.A. die besseren Ergebnisse liefert, da sie detailliert auch Ausrundungsbereiche und Abschrägungen berücksichtigen kann.

In bestimmten Fällen ist es wünschenswert, die besseren Ergebnisse auch für dünnwandige Querschnitte bereitzustellen. Dies betrifft insbesondere das Torsionsträgheitsmoment I_T , wenn es zur Weiterverarbeitung (Schnittgrößenermittlung und Nachweisführung) von *##-FRAP*, *##-NISI* oder *##-DULAS* etc. angefordert wird.

##-QUER ermöglicht dies, indem der dünnwandig beschriebene Querschnitt temporär in einen dickwandigen Querschnitt umgewandelt wird.

Die Vorgehensweise und der daraus resultierende Vorteil werden an Hand des Standardprofils HE320A erläutert.

Nach Laden des Profils HE320A als dünnwandiges Profil in *##-QUER* wird (durch Auswertung der Linienintegrale) ein Torsionsträgheitsmoment $I_T = 81.63 \text{ cm}^4$ ausgewiesen. Hierbei bleiben die Ausrundungsbereiche notgedrungen unberücksichtigt.



Durch Anklicken des nebenstehend dargestellten **Abacus**-Buttons erscheint ein Eigenschaftsblatt, in dem entschieden werden kann, ob die FEM-Berechnung als Standard zur Ermittlung der Schubkennwerte festgelegt werden soll.

Da man i.d.R. beim erstmaligen Aufruf nicht weiß, ob es sich der Berechnungsmehraufwand lohnt, kann der Testmodus aktiviert werden. Die Angaben zur nachfolgenden Netzgenerierung können auf **automatisch** belassen werden.

Nach Bestätigen des Eigenschaftsblatts erscheint bei aktiviertem Testmodus nach der FE-Berechnung eine Tabelle, in der die Werte für I_T , k_η und k_ζ aus den verschiedenen Ansätzen miteinander verglichen werden.

Dreiecksnetz

optionale Einstellungen:

I_T , k_η und k_ζ sollen bei diesem Querschnitt stets am

☐ dünnwandigen Querschnitt

☒ dickwandigen Ersatzquerschnitt ermittelt werden.

☒ Testmodus

Angaben zur nachfolgenden Netzgenerierung:

Dichtefaktor ☒ automatisch 8.571

Wie der Abbildung entnommen werden kann, wurde mit Hilfe der FE-Methode ein Torsionsträgheitsmoment $I_T = 109.03 \text{ cm}^4$ ermittelt. Der Unterschied zum dünnwandig berechneten I_T beträgt über 25 %.

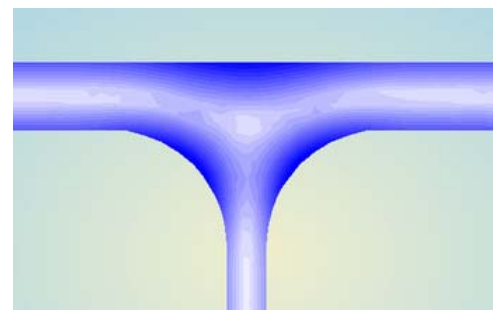
Der Profilmanager weist für den HE320A ein Torsionsträgheitsmoment $I_T = 108.00 \text{ cm}^4$ aus. Der mit der FE-Methode ermittelte Wert stellt somit ein sehr viel besseres Ergebnis gegenüber der Auswertung der Linienintegrale dar.

Wert	dickwandig	dünnwandig	Fehler
I_T	1090306	816339	25.13 %
k_η	1.473	1.542	4.65 %
k_ζ	4.521	4.886	8.07 %

Wird das Profil HE320A als dickwandiger Querschnitt beschrieben und berechnet, kann im Register *Ergebnisse* der Grund hierfür erkannt werden (s. Abb.).

Die höchsten Spannungskonzentrationen infolge Torsionsbeanspruchung finden sich im Bereich der Ausrundungen, die von der dünnwandigen Theorie nicht berücksichtigt werden können.

Werden die Ausrundungen des HE320A-Profiles auf 0 gesetzt, liefert die FE-Methode den Wert $I_T = 79.98 \text{ cm}^4$ und liegt damit sogar knapp unter dem dünnwandig ermittelten Ergebnis. Dies zeigt: Bei aus Blechen zusammengesetzten Schweißträgern lohnt sich der Aufwand der FE-Berechnung i.d.R. nicht.



Die optionale Berechnung der Schubkennwerte am dickwandigen Ersatzquerschnitt hat folgende Konsequenzen

- Im Ergebnisfenster erscheint ein neuer Absatz, der die nach FEM berechneten Schubkennwerte zusätzlich zu den dünnwandig ermittelten Kennwerten ausweist. Dieser Absatz setzt sich farblich von den restlichen Absätzen ab, um kenntlich zu machen, dass es sich hier um besondere Zusatzangaben handelt. Wird am Querschnitt noch modelliert, muss die Berechnung ggf. durch Anklicken des **Abacus**-Buttons neu gestartet werden.
- Wird der Querschnitt zwecks Import von einem *##*-Rechenprogramm angefordert, werden die per FE-Berechnung verbesserten Werte für I_T , κ_η und κ_z übergeben.

5.1

HE400B mit angeschweißter Flanschverstärkung

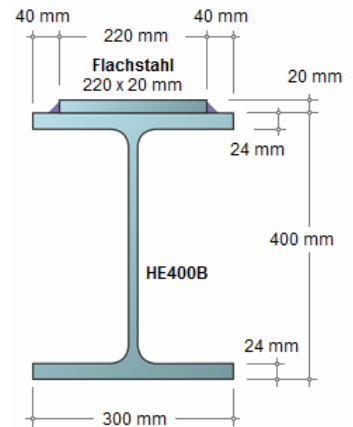
An einen HE400B soll an den oberen Flansch als Kopfverstärkung ein Flachstahl 220x20 mm wie dargestellt angeschweißt werden.

Da der Träger später in #FRAP importiert werden soll, wird er als dünnwandiger Querschnitt beschrieben.

Es werden nun die einzelnen Schritte zur Definition des Querschnitts und die Reaktionen des Programms #QUER gezeigt.

Da hierbei u.a. die Techniken zur Erzeugung und zum Modellieren geübt werden sollen, empfiehlt es sich, die entsprechenden Eingaben selbst vorzunehmen.

Anweisungen, die auffordern, bestimmte Aktionen durchzuführen, werden grün hinterlegt bzw. in grüner Schrift dargestellt.



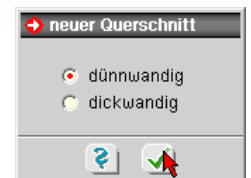
Starten Sie #QUER durch einen Doppelklick auf das entsprechende Symbol in der DTE®-Schublade, falls das #QUER-Fenster nicht bereits geöffnet ist.



Klicken Sie auf den nebenstehend dargestellten Button, um einen neuen Querschnitt zu erzeugen.

Der Inhalt des Konstruktionsfensters wird gelöscht und alle Eigenschaften auf einen voreingestellten Wert gesetzt.

#QUER muss nun wissen, ob der neue Querschnitt vom Typ **dünnwandig** oder **dickwandig** sein soll.



Wählen Sie den Typ **dünnwandig** und bestätigen dies über den grünen Haken.

Klicken Sie auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche.

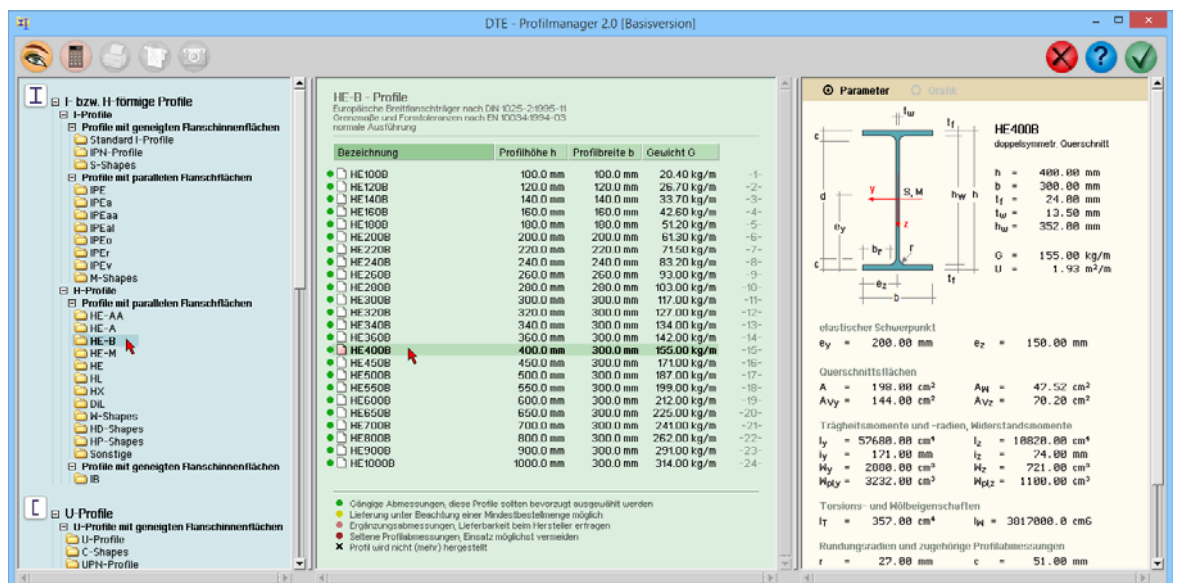
Es erscheint ein symbolisches Untermenü, das diverse Möglichkeiten anbietet, Elemente in das Konstruktionsfenster zu laden.



Wenn Sie den Mauszeiger über die Symbole gleiten lassen, erscheint ein Fähnchen, das die zugeordnete Funktion näher erläutert. Näheres hierzu s. *Dünnwandige Objekte erzeugen* Abs. 3.7.2, S. 15.



Klicken Sie auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche.



Hierdurch wird der DTE[®]-Profilmanager aufgerufen. Unter der Überschrift *Profile mit parallelen Flanschflächen* findet sich im linken Fenster die Profildfamilie HE-B. Durch Anklicken werden alle Profile dieser Reihe im mittleren Fenster eingeblendet. Wird hierin das Profil HE400B angeklickt, erscheinen dessen Parameter im dritten Fenster.

Wir notieren $A = 198.00 \text{ cm}^2$, $I_y = 57680.00 \text{ cm}^4$, $I_T = 357.00 \text{ cm}^4$.

Um den ausgewählten Querschnitt an *##-QUER* zu übergeben, klicken Sie im Profilmanager in der Kopfzeile auf den grünen Haken rechts oben.

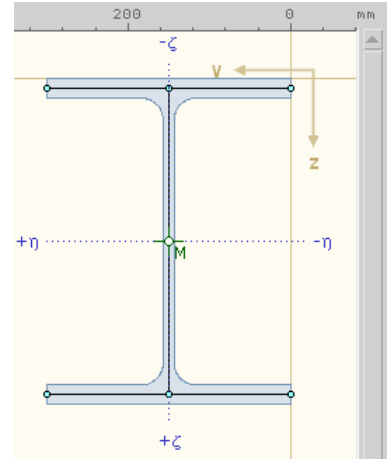
Das Profil erscheint im Konstruktionsfenster.

Die unmittelbar errechneten Parameter können dem Ergebnisfenster entnommen werden. Es ergeben sich

$A = 197.78 \text{ cm}^2$, $I_m = 57680.93 \text{ cm}^4$, $I_T = 307.32 \text{ cm}^4$.

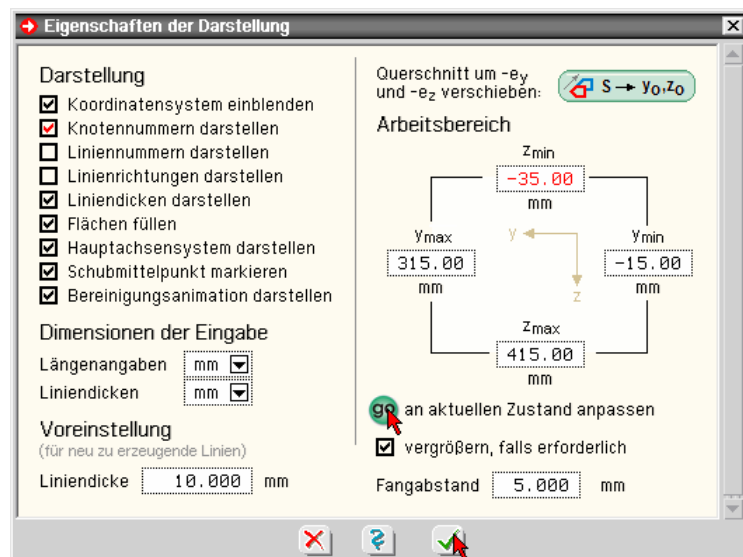
Während sich die Werte für die Fläche A und das Trägheitsmoment I_m praktisch nur durch einen Rundungsfehler unterscheiden, erkennt man deutliche Differenzen beim Vergleich der Werte für I_T .

Der Grund hierfür liegt in der Theorie dünnwandiger Querschnitte begründet und wurde in *Alternative Berechnung der Schubkennwerte* Abs. 4.11, S. 41, erläutert.



Klicken Sie auf das Augensymbol.

Aktivieren Sie im Eigenschaftsblatt *Eigenschaften der Darstellung* unter der Überschrift *Darstellung* den Schalter **Knotennummern darstellen** und klicken Sie unter der Überschrift *Arbeitsbereich* auf den **go**-Button. Da wir am oberen Rand des Profils noch etwas mehr Platz benötigen, korrigieren Sie den Wert für z_{\min} auf -35.00 mm .



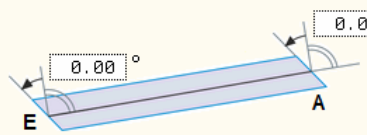
Hierdurch wird der Arbeitsbereich optimal an den aktuellen Inhalt und unser weiteres Vorhaben angepasst. Nach Bestätigen des Eigenschaftsblatts (grüner Haken) erscheint der Querschnitt in voller Größe im Konstruktionsfenster.



Speichern Sie den Querschnitt durch Anklicken des nebenstehend dargestellten Buttons. Geben Sie dem Querschnitt den Namen HE400B. Wir werden auf den Querschnitt zu einem späteren Zeitpunkt im Tutorium zurückkommen.

Führen Sie einen Doppelklick über der Linie 1 (zwischen Knoten 1 und Knoten 2) aus.

Es erscheint das individuelle Eigenschaftsblatt der Linie 1.

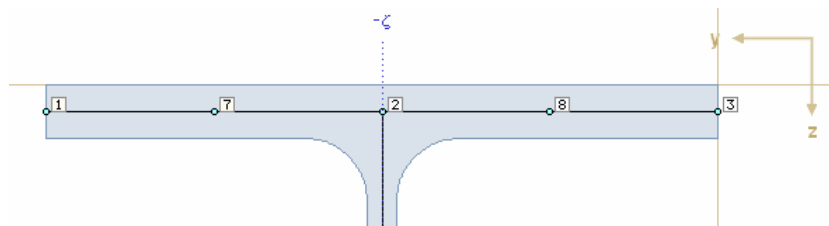
Linie	
Liniennummer	1 Typ Blech
Verknüpfung	Anfangsknoten 1 Endknoten 2
Dicken	am Anfangsknoten 24.000 mm am Endknoten 24.000 mm
<input type="checkbox"/> gevoutet	
Form	<input checked="" type="radio"/> Gerade <input type="radio"/> Kreisbogen
Abschrägungen	nur für die Randbeschreibung an freien Enden relevant. 
Aktion nach Bestätigung des Eigenschaftsblatts	<input checked="" type="checkbox"/> unterteilen Anzahl Zwischenknoten 1

Aktivieren Sie im unteren Bereich des Eigenschaftsblatts den Schalter **unterteilen** (Anzahl Zwischenknoten = 1) und klicken auf den grünen Haken (bestätigen).

Im Konstruktionsfenster erscheint der Knoten 7. Die ehemalige Linie 1 verbindet nun die Knoten 1 und 7. Eine neu erzeugte Linie (mit der Nummer 6) verbindet die Knoten 7 und 2. Auf die Parameter im Ergebnisfenster hat dies keine Auswirkungen, da das Profil durch die Knoteneinfü-
geoperation geometrisch nicht verändert wurde.

Führen Sie die letzten beiden Aktionen mit der Linie 2 durch, die die Knoten 2 und 3 verbindet.

Das Profil sollte nun im oberen Bereich wie folgt aussehen



Wir wollen nun eine neue Linie einfügen.



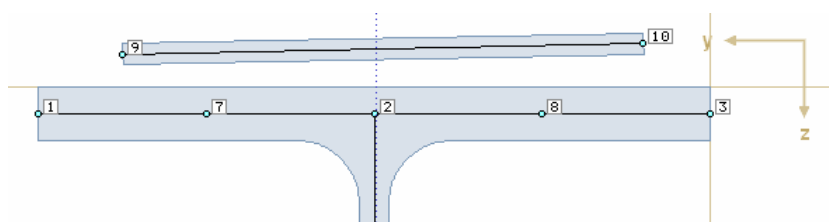
Klicken Sie auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche ...

... und anschließend auf dieses Symbol, um eine neue Linie manuell zu erzeugen.

Es erscheint ein Fadenkreuz im Konstruktionsfenster.

Fahren Sie das Fadenkreuz oberhalb des Knotens 7 und klicken Sie die linke Maustaste. Fahren Sie das Fadenkreuz nun oberhalb des Knotens 8 und klicken abermals auf die linke Maustaste.

Es kommt nicht darauf an, die genaue Position zu treffen. Dies gelingt bei manuellen Modellierungsaktionen sowieso nur in den seltensten Fällen. Im Konstruktionsfenster sollte nun in etwa Folgendes dargestellt werden



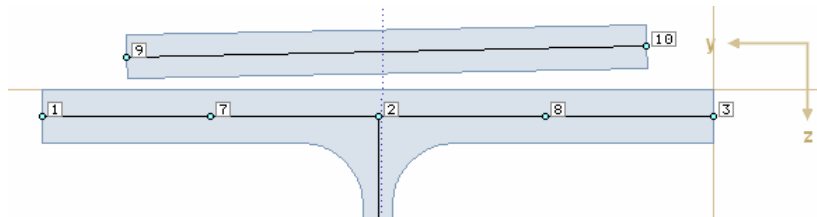
Sollte die Aktion im ersten Anlauf missglückt sein, hilft die undo-Funktion: Ein Klick auf den nebenstehend dargestellten Button macht eine misslungene Aktion rückgängig.

Führen Sie nun auf der neuen Linie zwischen Knoten 9 und 10 einen Doppelklick aus.

Es erscheint das individuelle Eigenschaftsblatt der Linie 8.

Legen Sie hierin für die Linie eine konstante Dicke von 20.00 mm fest und bestätigen Sie das Eigenschaftsblatt.

Das Ergebnis erscheint unmittelbar im Konstruktionsfenster.



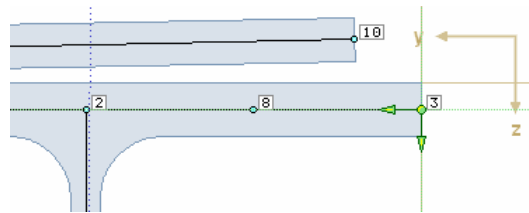
Aktivieren Sie nun das Konstruktionskoordinatensystem (KKS), indem Sie die nebenstehend dargestellte Schaltfläche anklicken.

Es erscheint ein kleines Kreuz, das Sie bitte genau über dem Knoten 3 positionieren (linke Maustaste anklicken). In der Informationszeile erscheint die Meldung

Konstruktionskoordinatensystem auf Knoten 3 verlagert

Wir sind nun in der Lage, alle relevanten Knoten vom Knoten 3 aus zu vermessen. Insbesondere die Knoten 8 und 10 können wir nun leicht in die endgültige Position bringen.

Führen Sie einen Doppelklick auf Knoten 10 aus.



Es erscheint das individuelle Eigenschaftsblatt von Knoten 10.

Hierin können die [y,z]-Koordinaten des Knotens einmal absolut und einmal bzgl. des KKS angegeben werden (grün hinterlegte Eingabefelder).

Konstruktionskoordinatensystem:		
y	40.000	mm
z	-22.000	mm

Da der Knoten 10 per Aufgabenstellung 40 mm horizontal neben und $24/2 + 20/2 \text{ mm} = 22 \text{ mm}$ oberhalb des Knotens 3 liegen soll, können wir diese Werte unmittelbar in die grünen Felder eintragen. Hierbei ist allein auf das Vorzeichen zu achten. Nach Bestätigen des Eigenschaftsblatts nimmt der Knoten 10 die gewünschte Position ein.

Führen Sie einen Doppelklick auf Knoten 8 aus.

Aus Gründen, die später einsichtig werden, soll Knoten 8 40 mm neben dem Knoten 3 liegen.

Tragen Sie also die Werte $y = 40 \text{ mm}$ und $z = 0 \text{ mm}$ in die grünen Eingabefelder ein und bestätigen das Eigenschaftsblatt. Verschieben Sie nun das KKS, indem Sie den Mauscursor über das KKS bewegen, die linke Maustaste drücken, gedrückt halten und das Kreuz über dem Knoten 1 "fallen lassen" (linke Maustaste lösen).

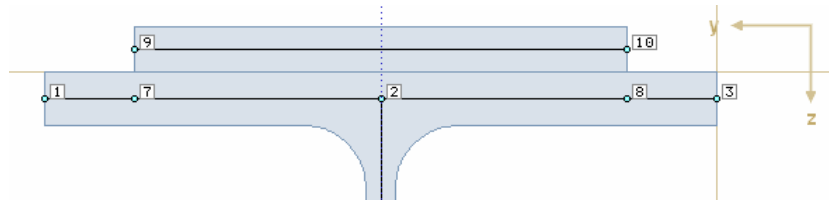
In der Informationszeile erscheint die Meldung

Konstruktionskoordinatensystem auf Knoten 1 verlagert

Von diesem Knoten aus können wir sehr einfach den Knoten 9 (Doppelklick, KKS-Koordinaten: $y = -40 \text{ mm}$, $z = -22 \text{ mm}$) und den Knoten 7 (Doppelklick, KKS-Koordinaten: $y = -40 \text{ mm}$, $z = 0 \text{ mm}$) in die korrekte Position bringen. Beachten Sie hierbei die Vorzeichen!

Klicken Sie auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche, um das KKS, das nun nicht mehr benötigt wird, verschwinden zu lassen.

Der obere Bereich des Konstruktionsfensters sollte nun wie folgt aussehen



Um zu überprüfen, ob alles korrekt ist, kann der Mauscursor über die neue Linie zwischen den Knoten 9 und 10 gefahren werden, ohne diese anzuklicken. Es erscheint ein Fähnchen, das die Dicke von 20 mm und eine Länge von 22 mm ausweist.

Interessant ist nun ein Blick in das Ergebnisfenster.

Wir notieren die Werte $A = 241.78 \text{ cm}^2$, $I_m = 73568.38 \text{ cm}^4$, $I_T = 365.98 \text{ cm}^4$.

Sehr leicht überprüfen lässt sich die Fläche A . Sie muss gegenüber der Version ohne Flachstahl gerade um $22 \cdot 2 = 44 \text{ cm}^2$ größer geworden sein. Tatsächlich ergibt sich: $197.78 + 44 = 241.78 \text{ cm}^2$.

Interessant ist im Ergebnisfenster aber auch die Typisierung des Querschnitts, die ganz oben unter der Überschrift *Basisinformationen* angegeben wird. Hier wird der Querschnitt als *dünnwandig - 2-teilig, offen* deklariert. Tatsächlich liegen hier zwei unabhängige, nicht miteinander verbundene Teile vor. Ein Schubfluss zwischen diesen beiden Teilen besteht nicht. Dies soll nun geändert werden.



Klicken Sie auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche ...

... und anschließend auf dieses Symbol, um eine neue Linie manuell zu erzeugen.

Klicken Sie nun mit der linken Maustaste zunächst den Knoten 9 und dann den Knoten 7 an.

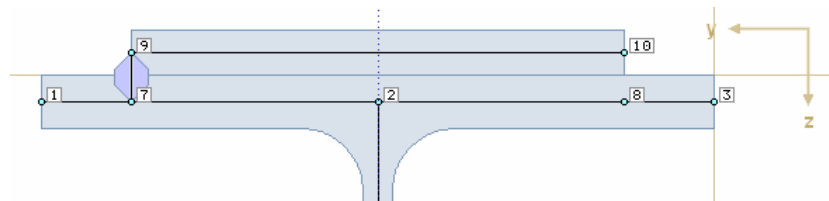
Sie haben nun eine neue Linie zwischen den beiden Knoten erzeugt. Im Ergebnisfenster wird nun als Typisierung *1-teilig, offen* angegeben. Es besteht jetzt also eine Verbindung zwischen den beiden zuvor unabhängigen Teilen.

Leider ist nun auch die Querschnittsfläche A um einen cm^2 angewachsen, was so nicht erwünscht ist und geändert werden soll.

Doppelklicken Sie die soeben erzeugte Linie 9, um ihre individuellen Eigenschaften zu bearbeiten. Wählen Sie als Typ **Schweißnaht**, geben Sie der Linie die Dicke 15 mm und bestätigen die Eigenschaften.

Linie	
Liniennummer	9 Typ Schweißnaht
Verknüpfung	Anfangsknoten 9 Endknoten 7
Dicken	am Anfangsknoten 15.000 mm am Endknoten 15.000 mm
<input type="checkbox"/> gevoutet	

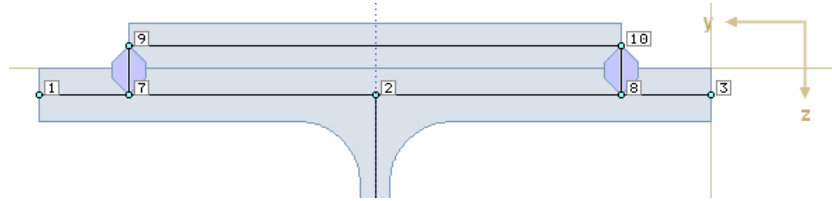
Im Konstruktionsfenster erscheint folgende Abbildung



Linien vom Typ *Schweißnaht* werden bei der Ermittlung von Parametern, die für die Normalkraft und Biegung wesentlich sind (Fläche, Biegeträgheitsmomente, Widerstandsmomente etc.), nicht berücksichtigt. Sie werden auch nicht mit den normalen Linien (vom Typ *Blech*) verschnitten. Sehr wohl werden sie jedoch bei der Analyse des Schubflusses berücksichtigt.

Im Ergebnisfenster ist zu erkennen, dass es sich nach wie vor um einen einteiligen, offenen Querschnitt handelt, die Querschnittsfläche A jedoch wieder ihren ursprünglichen Wert angenommen hat.

Führen Sie nun die gleichen Aktionen auf der anderen Seite durch: Erzeugen Sie eine Linie zwischen den Knoten 10 und 8 und erklären Sie diese zu einer 15 mm dicken Schweißnaht.

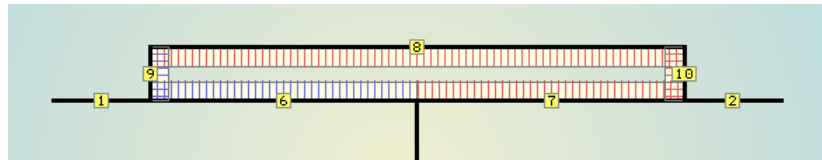


Im Ergebnisfenster lesen wir als Typisierung *einteilig, 1-zellig*. Tatsächlich hat sich nun eine geschlossene Zelle gebildet, durch die der Schubfluss zirkulieren kann.

Des Weiteren lesen wir ab $A = 241.78 \text{ cm}^2$, $I_m = 73568.38 \text{ cm}^4$, $I_T = 776.57 \text{ cm}^4$.

Während A und I_m vollkommen unbeeindruckt von den neu hinzugefügten Schweißnähten bleiben, hat sich das Torsionsträgheitsmoment I_T mehr als verdoppelt.

Der Grund dafür kann im Register *Ergebnisse* betrachtet werden. Der Ergebnistyp *Schubkraftverlauf* infolge $M_t = 1 \text{ kNm}$ zeigt, dass im Inneren der Zelle ein Schubfluss gemäß der zweiten Bredt'schen Formel einem äußeren Torsionsmoment Paroli bieten kann.



Speichern Sie den Querschnitt durch Anklicken des nebenstehend dargestellten Buttons und vergeben Sie einen sinnvollen Namen. Sie können auf den erstellten Querschnitt später z.B. aus den Stabwerksprogrammen *##-FRAP*, *##-NISI* etc. zugreifen.

Überprüfung des Querschnitts

Der bisher bearbeitete Querschnitt soll nun überprüft werden. Dies soll geschehen, indem die Kontur des Querschnitts als dickwandiger Querschnitt beschrieben wird. Unser besonderes Augenmerk wird hierbei wieder auf den Kenngrößen A , I_m und I_T liegen.



Klicken Sie den nebenstehend dargestellten Button an, um einen neuen Querschnitt zu erzeugen.

Der Inhalt des Konstruktionsfensters wird gelöscht und alle Eigenschaften auf einen voreingestellten Wert gesetzt. *##-QUER* muss nun wissen, ob der neue Querschnitt vom Typ *dünnwandig* oder *dickwandig* sein soll.

Wählen Sie den Typ **dickwandig** und bestätigen dies über den grünen Haken.

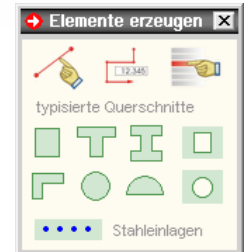


Klicken Sie auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche.

Es erscheint ein symbolisches Untermenü, das diverse Möglichkeiten anbietet, Elemente in das Konstruktionsfenster zu laden. Wenn Sie den Mauszeiger über die Symbole gleiten lassen, erscheint ein Fähnchen, das die zugeordnete Funktion näher erläutert. Näheres hierzu s. Abs. 3.7.3, S. 16.



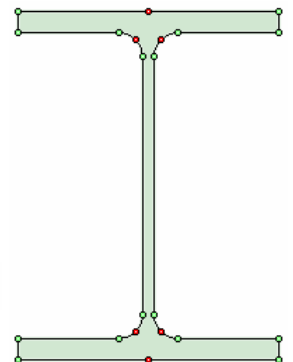
Klicken Sie auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche und laden Sie den zuvor gespeicherten Querschnitt *HE400B*.



##-QUER ist in der Lage, dünnwandig definierte, gespeicherte Querschnitte beim Laden automatisch in dickwandige Querschnitte umzuwandeln. Der umgekehrte Weg funktioniert jedoch nicht.

Der nebenstehend abgebildete Querschnitt erscheint im Konstruktionsfenster.

Hierin sind einige Knoten zu erkennen, die zur Beschreibung des Querschnitts nicht unbedingt erforderlich sind. Es sind dies die Seitenmittenknoten an den Flanschen und die Knoten in der Mitte der Ausrundungsradien (hier rot = ausgewählt dargestellt).

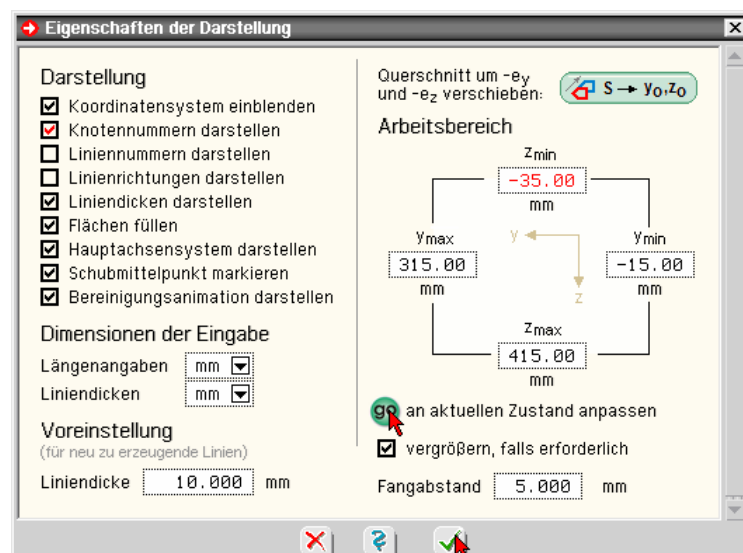


Wählen Sie diese Knoten durch Anklicken aus und klicken auf das **Mülleimersymbol** oder alternativ auf die [Entf]-Taste ihrer Tastatur.



Klicken Sie auf das Augensymbol.

Aktivieren Sie im Eigenschaftsblatt *Eigenschaften der Darstellung* unter der Überschrift *Darstellung* den Schalter **Knotennummern darstellen** und klicken Sie unter der Überschrift *Arbeitsbereich* auf den **go**-Button. Da wir am oberen Rand des Profils noch etwas mehr Platz benötigen, korrigieren Sie den Wert für z_{min} auf -35.00 mm.



Hierdurch wird der Arbeitsbereich optimal an den aktuellen Inhalt und unser weiteres Vorhaben angepasst. Nach Bestätigen des Eigenschaftsblatts (**grünen Haken anklicken**) erscheint der Querschnitt in voller Größe im Konstruktionsfenster.

Es ist zu erkennen, dass die vorangegangene Löschoption Lücken in der Nummerierung erzeugt hat.



Klicken Sie auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche, um diesen Missstand zu beheben.

Bevor wir am oberen Flansch die Verstärkung einbauen, schauen wir ins Ergebnisfenster.

Mit $A = 197.78 \text{ cm}^2$, $I_m = 57680.90 \text{ cm}^4$ ergeben sich dieselben Werte, die bereits der Profilmanager für den HE400B ausgewiesen hat. Einen Wert für I_T bekommen wir unmittelbar nicht.

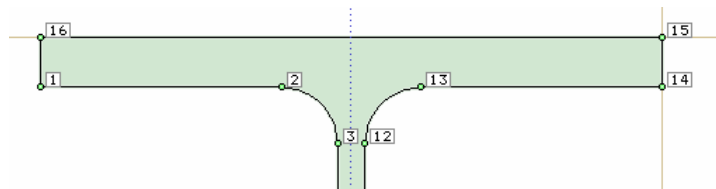
Bei dickwandig beschriebenen Querschnitten bedarf es einer etwas umfänglicheren FE-Analyse, die nicht automatisch (bei Querschnittsänderung) angestoßen wird.



Klicken Sie auf den nebenstehend dargestellten Button, um dies nachzuholen. Den abgefragten Dichtefaktor können Sie auf **automatisch** belassen.

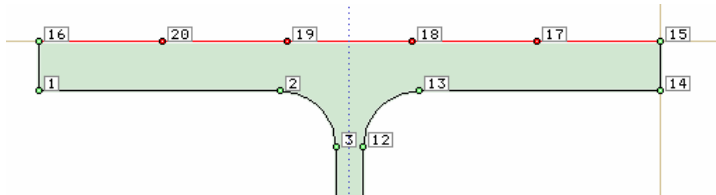
Nach durchgeführter Berechnung ergibt sich $I_T = 361.80 \text{ cm}^4$, Dieser Wert weicht von dem vom Profilmanager ausgewiesenen Tabellenwert um 1.3 % ab.

Wenden wir uns nun der Modellierung der Flanschverstärkung zu. Der obere Bereich des Querschnitts im Konstruktionsfenster stellt sich wie folgt dar



Doppelklicken Sie die obere horizontale Linie (von Knoten 15 nach Knoten 16). Es erscheint das individuelle Eigenschaftsblatt der Linie. Aktivieren Sie den Schalter **unterteilen** und wählen 4 Zwischenknoten.

Nach Bestätigen des Eigenschaftsblatts (grüner Haken) erscheinen die neuen Knoten im Konstruktionsfenster.



Aktivieren Sie nun das Konstruktionskoordinatensystem (KKS), indem Sie auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche klicken.

Es erscheint ein kleines Kreuz, das Sie bitte genau über dem Knoten 15 positionieren (**linke Maustaste anklicken**).

In der Informationszeile erscheint die Meldung

Konstruktionskoordinatensystem auf Knoten 15 verlagert

Wir sind nun in der Lage, alle relevanten Knoten vom Knoten 15 aus zu vermessen. Insbesondere die Knoten 18 und 17 können wir nun leicht in die endgültige Position bringen.

Führen Sie einen Doppelclick auf dem Knoten 18 aus.


Es erscheint das individuelle Eigenschaftsblatt des Knotens 18. Hierin können die [y,z]-Koordinaten des Knotens absolut oder bzgl. des KKS angegeben werden (grün hinterlegte Eingabefelder).


Konstruktionskoordinatensystem:	
y	40,000 mm
z	-20,000 mm

Da per Aufgabenstellung Knoten 18 40 mm horizontal neben und 20 mm oberhalb des Knotens 15 liegen soll, können wir diese Werte unmittelbar **in die grünen Felder eintragen**. Hierbei ist allein auf das Vorzeichen zu achten. Nach Bestätigen des Eigenschaftsblatts nimmt Knoten 18 die gewünschte Position ein.

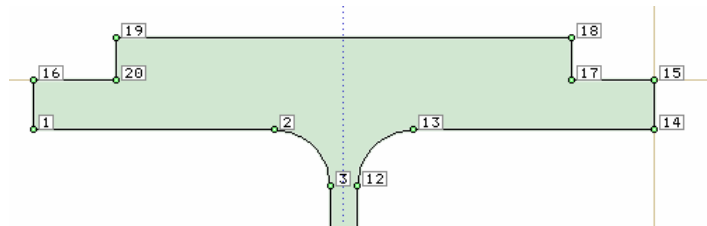
Führen Sie einen Doppelklick auf dem Knoten 17 aus und tragen in die grün hinterlegten Eingabefelder $y = 40 \text{ mm}$ und $z = 0 \text{ mm}$ ein. Verschieben Sie das KKS nun in den Knoten 16. Führen Sie einen Doppelklick auf dem Knoten 19 aus und tragen in die grün hinterlegten Eingabefelder $y = -40 \text{ mm}$ und $z = -20 \text{ mm}$ ein. Führen Sie einen Doppelklick auf dem Knoten 20 aus und tragen in die grün hinterlegten Eingabefelder $y = -40 \text{ mm}$ und $z = 0 \text{ mm}$ ein.


Durch die vorangegangenen Aktionen erhielten einige Linien und Punkte den Status ausgewählt (rot dargestellt).

 Um dies zu ändern, klicken Sie auf das nebenstehend dargestellte Symbol.


 Klicken Sie auf das nebenstehend dargestellte Symbol, um das Konstruktionskoordinatensystem (KKS), das nun nicht mehr gebraucht wird, verschwinden zu lassen.

Der obere Bereich des Querschnitts im Konstruktionsfenster sollte nun aussehen wie nachfolgend dargestellt.



 Klicken Sie auf den nebenstehend dargestellten Button, um FEM-Analyse zu starten. Den abgefragten Dichtefaktor können Sie auf automatisch belassen.

Dem Ergebnisfenster kann nun entnommen werden $A = 241.78 \text{ cm}^2$, $I_m = 73568.28 \text{ cm}^4$, $I_T = 880.42 \text{ cm}^4$.

 Speichern Sie den Querschnitt. Klicken Sie hierzu auf den nebenstehend dargestellten Button und vergeben einen sinnvollen Namen.

Bevor das Tutorium mit weiteren interessanten Beispielen fortgeführt werden soll, werfen wir noch einen Blick auf die gewonnenen Ergebnisse. Für den HE400B ergaben sich

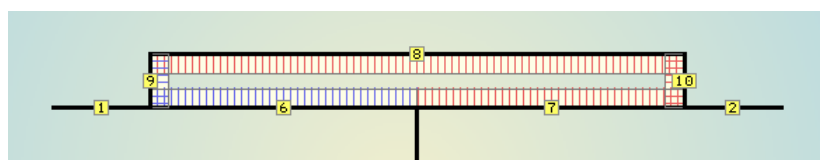
Quelle	$A [\text{cm}^2]$	$I_m [\text{cm}^4]$	$I_T [\text{cm}^4]$
Profilmanager	198.00	57680.00	357.00
#-QUER (dünnwandig)	197.78	57680.93	307.32
#-QUER (dickwandig)	197.78	57680.84	361.80

Während die Werte für A und I_m praktisch identisch sind, liefert #-QUER beim dünnwandig beschriebenen Querschnitt für I_T einen deutlich geringeren Wert. Dies liegt daran, dass die Ausrundungen des Profils bei der Schubflussanalyse nach der dünnwandigen Theorie nicht berücksichtigt werden können. Näheres s. *Alternative Berechnung der Schubkennwerte* Abs. 4.11, S. 41.

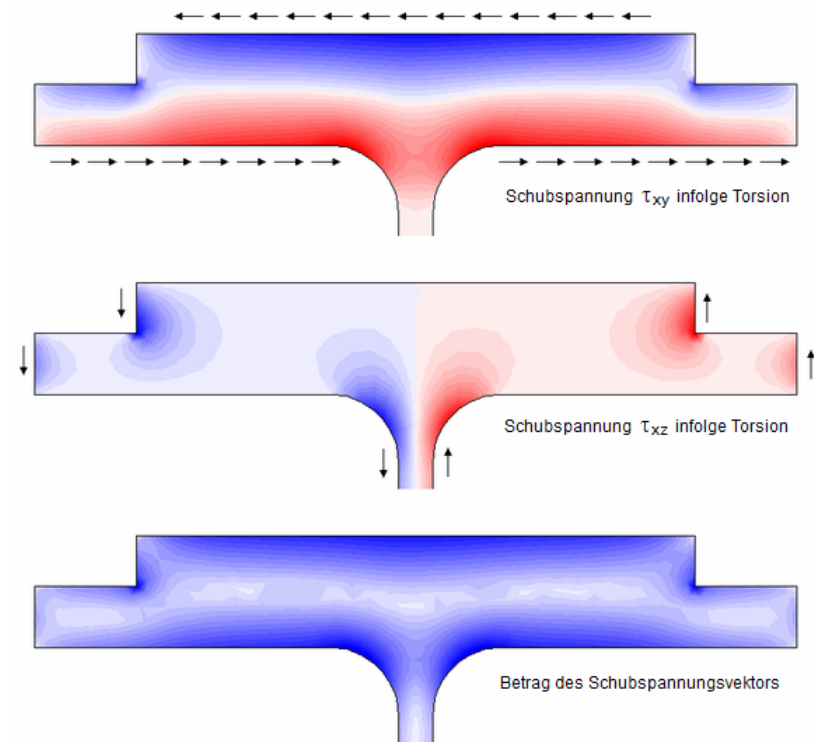
Für den HE400B mit angeschweißter Flanschverstärkung ergaben sich

Quelle	$A [\text{cm}^2]$	$I_m [\text{cm}^4]$	$I_T [\text{cm}^4]$
#-QUER (dünnwandig)	241.78	73568.38	776.57
#-QUER (dickwandig)	241.78	73568.28	880.42

Auch hier sind die Werte für A und I_m praktisch identisch. Die berechneten Werte für I_T unterscheiden sich wiederum erheblich. Man beachte, dass dem Ringfluss der Schubspannungen nach der dünnwandigen Theorie (hier noch einmal dargestellt)



der sehr viel differenziertere Schubspannungsverlauf aus der FEM-Analyse gegenübersteht. Die nachfolgenden Bilder können beim dickwandigen Querschnitt dem Register *Ergebnisse* entnommen werden.



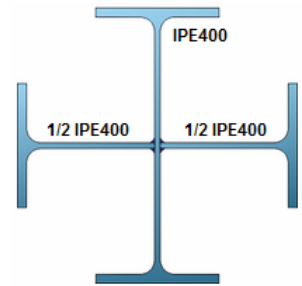
5.3

praktische Übungen mit dem Modellieren-Fenster

Viele Wege führen nach Rom. Aber meistens gibt es einen optimalen Weg, der am schnellsten zum Ziel führt. In diesem Sinne werden nun noch einige Lösungen zu ausgewählten Aufgabenstellungen vorgestellt.

An einen IPE400 sollen 2 1/2 IPE400 wie dargestellt angeschweißt werden.

Der Querschnitt soll mit *##-QUER* erzeugt und gespeichert werden, um ihn später in *##-FRAP* einzuladen und zu verwenden.



Starten Sie *##-QUER* durch Doppelklicken des entsprechenden Symbols in der DTE®-Schublade, falls das *##-QUER*-Fenster nicht bereits geöffnet ist.



Klicken Sie auf den dargestellten Button, um einen neuen Querschnitt zu erzeugen.

Der Inhalt des Konstruktionsfensters wird gelöscht und alle Eigenschaften auf einen voreingestellten Wert gesetzt. *##-QUER* muss nun wissen, ob der neue Querschnitt vom Typ *dünnwandig* oder *dickwandig* sein soll.



Wählen Sie den Typ *dünnwandig* und bestätigen dies über den grünen Haken und klicken dann auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche.

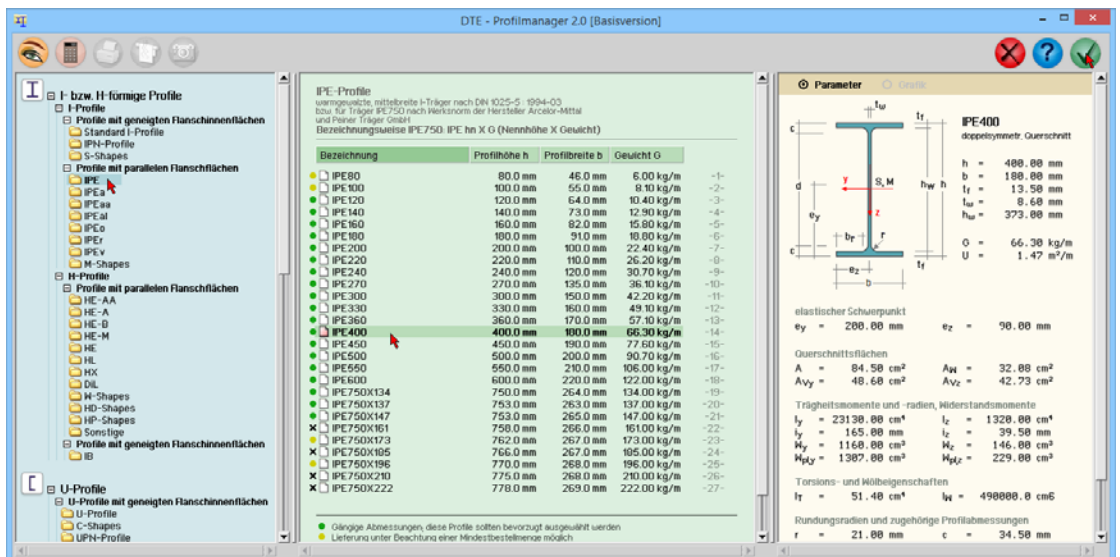
Es erscheint ein symbolisches Untermenü, das diverse Möglichkeiten anbietet, Elemente in das Konstruktionsfenster zu laden.



Wenn Sie den Mauszeiger über die Symbole gleiten lassen, erscheint ein Fähnchen, das die zugeordnete Funktion näher erläutert. Näheres hierzu s. *Dünnwandige Objekte erzeugen* Abs. 3.7.2, S. 15.



Klicken Sie auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche.



Hierdurch wird der DTE®-Profilmanager aufgerufen. Unter der Überschrift *Profile mit parallelen Flanschflächen* findet sich hierin im linken Fenster die Profildfamilie IPE. Wird diese angeklickt, werden alle Profile dieser Reihe im mittleren Fenster eingeblendet. Wird hierin das Profil IPE400 angeklickt, erscheinen dessen Parameter im dritten Fenster.

Um den ausgewählten Querschnitt an *##-QUER* zu übergeben, klicken Sie im Profilmanager in der Kopfzeile auf den grünen Haken rechts oben.

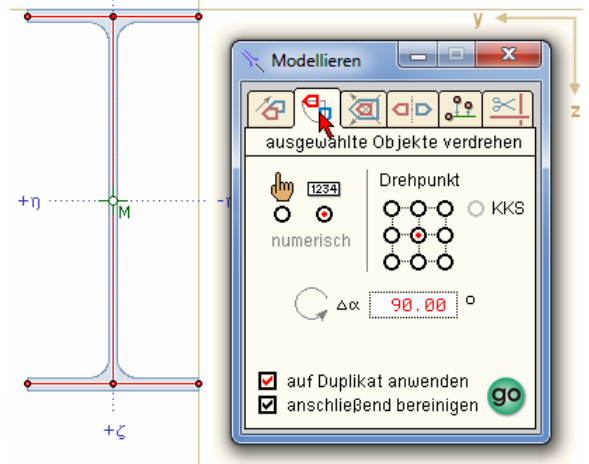
Der Träger erscheint im Konstruktionsfenster.



Rufen Sie nun das Modellieren-Fenster auf, indem Sie auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche klicken. Verschieben Sie das Fenster an eine Stelle auf dem Sichtgerät, an der es den Blick auf das $\#$ -QUER-Fenster nicht behindert.

Das zweite Register im Modellieren-Fenster bietet Interaktionsmittel an, mit deren Hilfe ausgewählte Objekte verdreht werden können.

Wählen das zweite Register aus. Wählen Sie hierin als Interaktionstyp **numerisch** (voreingestellt) und als Drehpunkt den Mittelpunkt der ausgewählten Objekte. Geben Sie für $\Delta\alpha$ 90° ein und achten Sie darauf, dass der Schalter **auf Duplikat anwenden** wie in der nebenstehend dargestellten Abbildung aktiviert ist.



Wählen Sie nun im Objektfenster alle Linien aus. Dies geschieht am einfachsten, indem ein Rechteck um die dargestellten Linien aufgespannt wird. Klicken Sie dann auf den **go**-Button im Modellieren-Fenster.



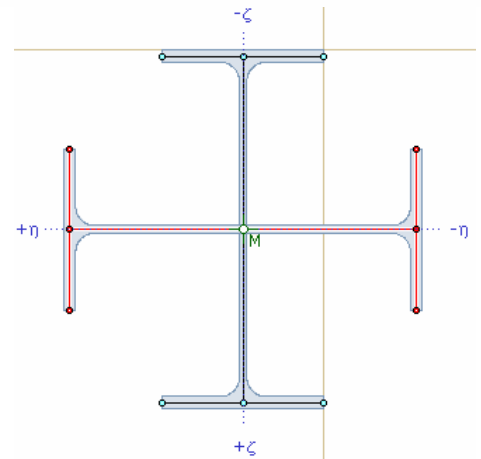
Klicken Sie auf das **Augensymbol** und klicken Sie unter der Überschrift **Arbeitsbereich** auf den **go**-Button.

Das Ergebnis dieser Operation kann unmittelbar im Konstruktionsfenster eingesehen werden: Eine Kopie des IPE400 wurde um den Mittelpunkt (der Lage des Originals) um 90° verdreht hinzugefügt.

Die Darstellung im Konstruktionsfenster sieht bereits so aus wie das, was letztlich erreicht werden soll.

Ein Blick in das Ergebnisfenster weist als Typ unter der Überschrift **Basisinformationen 2-teilig, offen** aus.

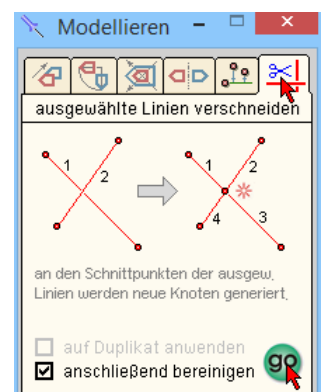
Die beiden Querschnitte liegen offensichtlich "über-einander" ohne kraftschlüssig miteinander verbunden zu sein. Dies soll nun geändert werden.



Klicken Sie auf die nebenstehend dargestellte Schalttafel, um die aktuell ausgewählten Linien abzuwählen. Wählen Sie daraufhin im Objektfenster durch einfaches Anklicken die beiden Linien aus, die die Stege der Doppel-T-Träger repräsentieren.

Wählen Sie nun im Modellieren-Fenster das letzte Register, um die beiden ausgewählten Linien zu verschneiden. Klicken Sie dort auf den **go**-Button, um die Aktion durchzuführen.

Während wir im Konstruktionsfenster keinen Unterschied zum vorhergehenden Zustand bemerken, wird im Ergebnisfenster nun der Typ **einteilig, offen** ausgewiesen.





Klicken Sie auf die nebenstehend dargestellte Schalttafel, um die Eigenschaften der Darstellung zu ändern. Aktivieren Sie in dem Eigenschaftsblatt die Schalter **Knotennummern** und **Liniennummern darstellen** und klicken Sie unter der Überschrift **Arbeitsbereich** auf den **go**-Button.

Nach Bestätigen des Eigenschaftsblatts kann nun auch im Konstruktionsfenster die Auswirkung der zuletzt durchgeführten Operation studiert werden. Die Steglinien (3 und 8) wurden in ihrem Schnittpunkt unterteilt. Hierzu wurden ein neuer Knoten 13 und die Linien 11 und 12 generiert.

Im Grunde genommen sind wir mit der Aufgabe fertig. Es könnte aber nun jemand auf die Idee kommen, dass der Querschnitt um die Stegdicke des IPE400 breiter sein müsste, als er hoch ist, da ja die beiden $\frac{1}{2}$ IPE400 jeweils von außen (links und rechts) an den Steg des vertikal stehenden IPE400 angeschweißt werden sollen. Falls gewünscht, können wir auch dies bereinigen.



Klicken Sie auf die nebenstehend dargestellte Schalttafel, um die aktuell ausgewählten Linien abzuwählen. Wählen Sie daraufhin im Objektfenster durch einfaches Anklicken oder Umfahren die beiden Linien aus, die den linken Flansch des liegenden Doppel-T-Trägers repräsentieren.

Fahren Sie den Mauscursor über die Linie 3 (ohne diese anzuklicken). Sie können unmittelbar die Liniendicke = Stegdicke = 8,60 mm ablesen.

Wählen Sie im Modellieren-Fenster das erste Register aus, wählen Sie dort die numerische Verschiebeaktion und tragen in dem numerischen Eingabefeld Δy den Wert $8.60/2 = 4.30$ mm ein. Achten Sie darauf, dass der Schalter **auf Duplikat anwenden** nicht aktiviert ist und klicken auf **go**. Führen Sie dieselbe Aktion mit den Linien des rechten Flansches durch, die mit $\Delta y = -4.30$ mm verschoben werden müssen.

Sie können nun im Ergebnisfenster unter der Überschrift **Ausdehnung** einsehen, dass der Querschnitt eine Höhe $h = 40$ cm und eine Breite von $b = 40,86$ cm hat. Darüber hinaus ist er gegenüber einer Biegung um die n -Achse etwas steifer geworden, was am Trägheitsmoment I_n abgelesen werden kann.



Prinzipiell kann der Querschnitt nun gespeichert werden. Klicken Sie hierzu auf den nebenstehend dargestellten Button.

Da der Querschnitt später in **4FRAP** importiert werden soll und dort in einem 3D-Stabwerksystem hohe Torsionsmomente aufnehmen muss, könnten wir überprüfen, ob eine genauere FE-Analyse nicht ein besseres (höheres) Torsionsträgheitsmoment liefert.



Klicken Sie hierzu auf den **Abacus**-Button. Achten Sie im folgenden Eigenschaftsblatt darauf, dass der Testmodus angeschaltet ist. Belassen sie alle anderen Einstellungen und bestätigen Sie das Eigenschaftsblatt.

Nach kurzer Berechnung erscheint ein Eigenschaftsblatt, das die wesentlichen Werte aus der dick- und dünnwandigen Berechnung einander gegenüberstellt.

Zu erkennen ist, dass die genauere dickwandige FE-Berechnung ein um ca. 25% höheres Torsionsträgheitsmoment liefert.

Soll auch **4FRAP** davon profitieren, muss der alternative Schalter **dickwandigen Ersatzquerschnitt** unter der Überschrift **optionale Einstellungen** gesetzt werden.

Ergebnis der FEM-Schubspannungsanalyse			
Wert	dickwandig	dünnwandig	Fehler
I_T	101.457	75.620	25.47 %
κ_η	4.381	4.519	3.15 %
κ_ζ	4.451	4.599	3.33 %

optionale Einstellungen:

I_T , κ_η und κ_ζ sollen bei diesem Querschnitt stets am

☐ dünnwandigen Querschnitt

☒ dickwandigen Ersatzquerschnitt

ermittelt werden.

Dies kann sowohl bei der Schnittgrößenermittlung als auch bei der Nachweisführung innerhalb von **4FRAP** von Vorteil sein. Näheres zu diesem Thema s. **Alternative Berechnung der Schubkennwerte** Abs. 4.11, S. 41.

Konstruktion eines regelmäßigen Sechsecks



Als letzte kleine Übung soll nun durch Anklicken des dargestellten Buttons ein regelmäßiges, dickwandiges Sechseck mit einer Kantenlänge von 40 cm erzeugt werden.

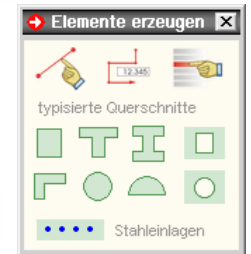
Der Inhalt des Konstruktionsfensters wird gelöscht und alle Eigenschaften auf einen voreingestellten Wert gesetzt. **##-QUER** muss nun wissen, ob der neue Querschnitt vom Typ dünnwandig oder dickwandig sein soll.



Wählen Sie den Typ **dickwandig**, bestätigen dies über den grünen Haken und klicken auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche.

Es erscheint ein symbolisches Untermenü, das diverse Möglichkeiten anbietet, Elemente in das Konstruktionsfenster zu laden.

Wenn Sie den Mauszeiger über die Symbole gleiten lassen, erscheint ein Fähnchen, das die zugeordnete Funktion näher erläutert. Näheres hierzu s. *Dickwandige Objekte erzeugen* Abs. 3.7.3, S. 16.



Klicken Sie auf die nebenstehend dargestellte Schaltfläche.

Hierdurch wird das Werkzeug zur Definition eines (geschlossenen) Polygonzugs aufgerufen.

Es erscheint ein Eigenschaftsblatt, in dem die Startkoordinaten des Polygonzugs abgefragt werden. Sie können es ruhig bei der voreingestellten [0,0] belassen.

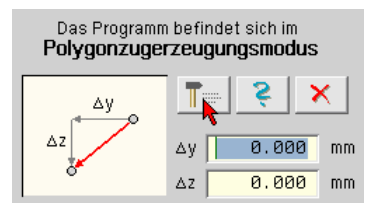
Nach Bestätigen des Eigenschaftsblatts schaltet **##-QUER** in den Polygonzugerzeugungsmodus um.

Am oberen rechten Rand des **##-QUER**-Fensters erscheinen einige Schaltflächen und Eingabefelder zur Definition der einzelnen zum Polygonzug gehörenden Punkte.

Klicken Sie auf den linken Button mit dem Hammersymbol.

Es erscheint ein Menü.

Wählen Sie **Linienzugmodus umschalten**.



An der Skizze, wie auch an den Einträgen vor den numerischen Eingabefeldern ist zu erkennen, dass **##-QUER** nun keine $[\Delta x, \Delta y]$ -Paare, sondern $[\Delta l, \alpha]$ -Werte erwartet.

In der nachfolgenden Eingabe über die Tastatur schaltet **##-QUER** stets zwischen den beiden Eingabefeldern hin- und her. Sobald der zweite Wert eingegeben wurde, wird die so festgelegte Polygonzuglinie im Konstruktionsfenster dargestellt. Eine Eingabe wird mit der Entertaste (**[↵]**) bestätigt.

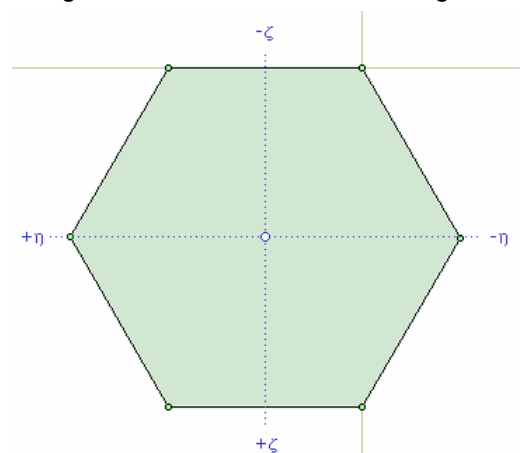
Geben Sie nun Folgendes ein

400 **[↵]**, 0 **[↵]**, 400 **[↵]**, 60 **[↵]**, 400 **[↵]**, 120 **[↵]**, 400 **[↵]**, 180 **[↵]**, 400 **[↵]**, 240 **[↵]**, 400 **[↵]**, 300 **[↵]**

Da **##-QUER** die Inhalte der Eingabefelder unverändert belässt, müssen die bloss dargestellten Zahlen (400) nicht tatsächlich eingegeben, sondern lediglich mit der Entertaste bestätigt werden.

Nach jeder zweiten Eingabe erscheint die soeben beschriebene Linie direkt im Konstruktionsfenster. Erkennt man hierbei einen Eingabefehler, kann dieser mit der Menüfunktion **letzte Linie zurück**, die sich ebenfalls hinter dem Button mit dem Hammersymbol versteckt, rückgängig gemacht werden.

Wird die letzte Eingabe bestätigt, erkennt **##-QUER**, dass der Polygonzug geschlossen wurde. Der Polygonzugmodus wird beendet und im Konstruktionsfenster erscheint das Ergebnis.



6 Literaturverzeichnis

- /1/ Kindmann, R.; Frickel, J.: Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2002
- /2/ Gruttmann, F.; Wagner, W.; Sauer, R.: Zur Berechnung von Wölbfunktion und Torsionskennwerten beliebiger Stabquerschnitte mit der Methode der finiten Elemente, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Baustatik, Mitteilung 3, 1997
- /3/ Kraus, M.: Computerorientierte Berechnungsmethoden für beliebige Stabquerschnitte des Stahlbaus, Dissertation, Bochum, Februar 2005
- /4/ Petersen, Chr., Stahlbau, Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten, 4. Aufl., Springer Vieweg, 2013

7 Index

Abkürzungen.....	3	Lastfall.....	3
Abschrägung.....	20	Lastkollektiv	3
abwählen.....	22	löschen.....	22
Arbeitsbereich	27	Maßlinien	28
ausrichten	25	Nummerierung	30
Ausrundung.....	21	Objekterzeugung.....	15, 16
ausschneiden.....	22	Paketsdienst	14
auswählen.....	22	plotten	32
Bearbeitung tabellarische	30	Polygonzug	15, 16, 21
bereinigen	23	Profilmanager.....	16
Biegekopplung	36	Punktspiegelung	24
blank	3	Querschnitt, dickwandiger	11
Buttons	3	Querschnitt, dünnwandiger	10
Cursor	3	Querschnitt, mehrteiliger.....	36
Darstellungseigenschaften	27	Querschnitt, typisierter	16, 17
dehnen	24	Rasterpunktanziehung	28
Doppelklick.....	19	Schnittgrößen.....	34
drucken	31	Schreibtisch	8
Druckoptionen.....	31	Schreibtischauswahl	7
Duplikat	23	Schubfluss	20
DXF	29	Schubkennwerte alternativ	41
einfügen	22	Schubkorrekturfaktoren	35
Einwirkung	3	Schubmittelpunkt	34
e-Mail	8	Schwerpunkt	33
Extremalbildungsvorschrift.....	3	Spannstahl	18
Fangrasterpunkte.....	28	Spannungen.....	34
FE-Methode	38	spiegeln.....	25
FotoView	32	Stahleinlagen	17
Größen ausgewiesene.....	39	Startsymbol	7
Gruppe	22	Steuerbutton	8
gruppieren.....	22	Theorie	33
Hauptachsen.....	33	Trägheitsmomente	33
Hauptachsendrehwinkel	33	undo	19
Hüllrohr	18	verdrehen.....	24
Installation.....	7	verschieben.....	24
Konstruktionskoordinatensystem.....	26	verschneiden.....	25
Kontextsensitivität	8	Verwölbung	34
Kontrollpunktanziehung	29	visualisieren	32
Koordinatensysteme	13, 33	Wagner-Effekt.....	35
kopieren	22	Widerstandsmoment plastisches	37
Lastbild.....	3		