

**Der ProfilMaker
Komfortables Berechnen
von Profilen**

Im ProfilMaker werden aus Normprofilen und beliebigen anderen Teilquerschnitten neue Profile zusammengesetzt. Für diese komplexen Profile ermittelt der ProfilMaker die Querschnittswerte und falls gewünscht auch die Spannungen für eine beliebige Beanspruchung. Die Ausgabe der Berechnungen und des maßstäblichen Querschnitts erfolgt mit dem mb-Viewer, einem umfangreichen Ausgabewerkzeug zum Darstellen und Bearbeiten der Ergebnisse. Ein Export der Ausgabe nach Microsoft Word bzw. in das RTF-Format ist möglich.

In der mb-news Nr. 2/2001 (Juni '01) wurde ein Fachartikel zum Thema Berechnungsgrundlagen und verwendete Algorithmen veröffentlicht.

Eine Fortsetzung der Thematik finden Sie nun auf den folgenden Seiten. Dieser zweite Teil gibt Auskunft über die Möglichkeiten, die Berechnung zu steuern. Er zeigt außerdem, was zu beachten ist, damit realistische Ergebnisse berechnet werden.

Den ersten Teil des Artikels aus der mb-news Nr. 2/2001 finden Sie unter: <http://www.mb-software.de/produkte/ingenieurbau/profilmaker>.

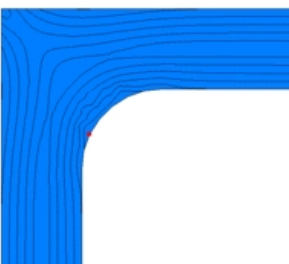


Abbildung 1: Beispiel A

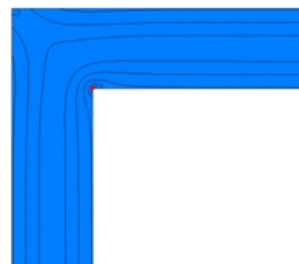


Abbildung 2: Beispiel B

Wölbkrafttorsion

Der Kreis- bzw. Kreisringquerschnitt ist der einzige Querschnitt, der bei der Torsion wölbfrei ist. Das bedeutet, dass für alle anderen Querschnitte Wölbkrafttorsion (Torsion mit Wölbbehinderung) vorliegt und die entsprechenden Normal- und Schubspannungen entstehen.

ProfilMaker

4. Berechnungsdetails

4.1 Besonderheiten, die durch die Anwendung der Elastizitätstheorie bedingt sind

Singularitäten

Im Ergebnis von Elastizitätsberechnungen können bei einspringenden Ecken Singularitäten der Spannungsfunktionen auftreten. In der FE-Berechnung entstehen dann mit zunehmender Netzverfeinerung umso größere Spannungen. Deshalb sollten beim Erzeugen von Profilen mit dem ProfilMaker in solchen Bereichen Ausrundungen vorgenommen werden, um Spannungsspitzen zu vermeiden.

In der Praxis treten diese Singularitäten nicht auf, weil die Ecke ausgerundet ist oder weil es dort zu örtlich begrenzten Plastifizierungen kommt.

Damit der ProfilMaker nicht zu große Spannungen ermittelt, sollten in solchen Ecken immer Ausrundungen eingefügt werden. Die Abbildungen zu Beispiel A und Beispiel B zeigen die Unterschiede. Gegenüber dem Beispiel A steigt die maximale Spannung im Beispiel B um dem Faktor 1,4 an.

Reine Torsionsbeanspruchung erzeugt also in allen anderen Querschnitten bereits Normal- und Schubspannungen.

Die Ermittlung der Schnittgrößen, die diese Spannungen hervorgerufen, erfolgt mit Hilfe der Wölbkrafttorsionsgleichungen. Bimoment und Wölbmoment ergeben sich damit wie folgt:

$$B_{\omega} = C_1 e^{-\alpha(x-x_0)} + C_2 e^{\alpha(x-x_0)} \quad (31)$$

$$M_{\omega} = C_1 \alpha e^{-\alpha(x-x_0)} - C_2 \alpha e^{\alpha(x-x_0)}$$

Hierin sind:

$$\alpha = \sqrt{\frac{GI_t}{EC_m}}$$

x_0 Koordinate des Punktes der Wölbbehinderung (Auflager oder Lastangriff)

C_1, C_2 Integrationskonstanten, die aus den Randbedingungen ermittelt werden

Bei großem α klingen diese Schnittgrößen rasch ab, d.h. sie haben den Charakter eines Randeffektes. In der Regel erfolgt die Berechnung von Stäben nach dem St. Venant'schen Prinzip. Dabei werden diese lokalen Effekte nicht berücksichtigt.

Bei entsprechendem Abklingverhalten wird im ProfilMaker ebenfalls ohne Wölbkrafttorsion gerechnet und der Parameter C_m zu Null angenommen. Diese Bedingung ergibt sich bei:

$$C_m < \frac{1}{5} [\max(b, h)]^2 I_t \quad (32)$$

Hierin sind:

b, h charakteristische Abmessungen des Querschnittes

Der Anwender kann auf die Anwendung dieser Bedingung verzichten. Dazu ist vor jeder Berechnung die Tastenkombination **Strg+M** zu drücken. Dann wird der Wert C_m und die Normal- und Schubspannung infolge Wölbkrafttorsion für jedes beliebige Profil berechnet und ausgegeben.

Gespreizte Querschnitte



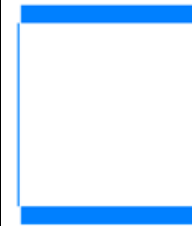
Auch bei gespreizten Querschnitten (zusammengesetzte Querschnitte aus mehreren sich nicht berührenden Teilen) sind einige Besonderheiten zu beachten. Für die Berechnung der Normalspannungsverteilung unter Normalkraft- und Biegebeanspruchung gilt die Hypothese des Ebenbleibens der Querschnitte (Bernoulli-Hypothese). Diese ermöglicht die Ermittlung der entsprechenden Querschnittswerte.

Anders sieht das aus, wenn die Wölbtorsion berücksichtigt wird. In diesem Fall ist es notwendig zu definieren, wie die Querschnittsteile miteinander verbunden sind. Ohne diese Definition ist keine Lösung möglich. Sind solche Verbindungen nicht vorhanden, wird von Programm eine Warnung ausgegeben und gegebenenfalls eine Verbindung (willkürlich) festgelegt.

In der Praxis sind fast alle gespreizten Querschnitte irgendwie miteinander verbunden (z. B. durch Schweißblaschen). Diese meist nur örtlich vorhandenen Verbindungen können "verschmiert" im Querschnitt berücksichtigt werden. Wie die Profile miteinander verbunden sind, beeinflusst wesentlich die Ergebnisse der Berechnung der Querschnittswerte. Das zeigen deutlich die Beispiele in Tabelle 1.

Die Flansche sind in allen Beispielen 10x100 mm groß. Die Abmessungen des Stegs im Beispiel 1 ist 2x100 mm. Im Beispiel 2 und 3 ist die Abmessung der Stege jeweils 1x100 mm. Im Beispiel 3 wurden diese Stege um 1 mm nach außen verschoben, so dass ein gespreizter Querschnitt entsteht. Die Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse. Die Torsionssteifigkeit I_T ist beim geschlossenen Profil 36 mal größer als beim gespreizten.

Tabelle 1: Einfluss der Verbindung auf die Torsionssteifigkeit

	Beispiel 1	Beispiel 2	Beispiel 3 ¹
Querschnittswerte			
A_y [cm ²]	17	15	14
A_z [cm ²]	2	2	12
I_y [cm ⁴]	623	623	633
I_z [cm ⁴]	167	216	220
W_y [cm ³]	104	104	104
W_z [cm ³]	33	43	42
I_T [cm ⁴]	6	216	6
C_m [cm ⁶]	5051	3807	6956

Der ProfilMaker erkennt gespreizte Querschnitte und verweist den Anwender auf die Notwendigkeit, das Zusammenwirken der Querschnittsteile durch die Beschreibung der Verbindungsart selbst zu definieren. Ansonsten können durch das programmseitige "zufällige" Fixieren der Querschnittsteile z.T. unbrauchbare Querschnittswerte entstehen.

¹ Die Ergebnisse dieses Beispiels wurden durch Auswahl der Option "Alle Querschnittsteile fixieren" in der Dialogbox "Nicht verbundene Querschnittsteile" ermittelt.

4.2 Steuerung der Netzgenerierung

Die für die FE-Berechnung notwendige Netzgenerierung erfolgt automatisch. Nicht immer ist das automatisch generierte Netz optimal für den jeweiligen Querschnitt und die Leistungsfähigkeit des Rechners. Deshalb gibt es Möglichkeiten die Generierung zu beeinflussen.

Alle Profile werden programmiert als eine Kombination von Teilflächen aus Dreiecken, Vierecken, Segmenten, Ausrundungen und Ringsektoren dargestellt. Die

Zerlegung des Profils in solche Teilflächen kann man mittels der Tastenkombination **Strg+T** kontrollieren. In jeder Teilfläche wird ein orthogonales FE-Netz in Richtung parallel zur längsten Seite der jeweiligen Teilfläche generiert. Mit der Tastenkombination **Strg+G** kann dieses FE-Netz im Berechnungsmodus dargestellt werden. In der Dialogbox "Einstellungen für Finite Elemente" können die Parameter des Netzgenerators eingegeben werden:

Anzahl der Elemente je Seite

Die kürzeste Seite jeder Teilfläche wird dividiert durch diese Anzahl. Daraus ergibt sich die Netzschrittweite "s1" senkrecht zur längsten Seite der Teilfläche.

Relative Länge eines Elementes

Die mit diesem Faktor multiplizierte Netzschrittweite "s1" ergibt die Netzschrittweite "s2" in Richtung der längsten Seite der Teilfläche.

Erlaubte Netzdichte

In jeder Teilfläche (Dreieck, Viereck usw.) wird durch die obigen Parameter eine eigene minimale Netzschrittweite ermittelt. Die "Erlaubte Netzdichte" definiert,

wie weit sich die Netzschrittweiten in unterschiedlichen Teilflächen unterscheiden dürfen. Zu kleine Netzschrittweiten werden vergrößert. Die Eingabe von "0" bedeutet, dass keine derartige Korrektur erfolgen soll.

Anzahl der Elemente im Kreis

Dieser Parameter definiert, in wie viele Teile der Kreis zur Ermittlung der Netzschrittweite zerlegt wird. Berücksichtigt wird dieser Parameter bei Kreissegmenten mit einem Winkel > 90° und bei geschlossenen Kreisquerschnitten.

Anzahl der Elemente im Winkel

Dieser Parameter wird nur bei Kreisquersegmenten mit Winkeln, die nicht größer als 90° sind, verwendet.

Maximaler Winkel im Viereck

Dieser Parameter gibt den maximalen inneren Winkel eines Vierecks an. Bei Überschreitung des Winkels wird das Viereck in zwei Dreiecke zerlegt. Bei der Eingabe eines Wertes < 90° wird ein Netz aus finiten Dreieckselementen generiert.

4.3 Empfehlungen für die Einstellungen der FE-Netz-Parameter

Die maßgebenden Querschnittswerte für dünnwandige Profile erreichen bereits bei 5 FE-Elementen über die Dicke eine ausreichende Genauigkeit. Deshalb ist es nicht notwendig, sehr feine Netze zu wählen. Um aber gute Bilder der Spannungsverteilung mit geglätteten Isolinen zu erhalten, ist es sinnvoll, ein feineres Netz zu generieren.

a) In der Tabelle 2 ist der Einfluss der Netzdichte N auf das Ergebnis der Berechnung von I_T für ein Rechteck $b \times h$ angezeigt.

$$I_T = \beta h b^3 \quad (33)$$

Tabelle 2: β -Beiwert

h/b \ N	Exakt	5	10
1	0,141	0,145	0,142
2	0,229	0,232	0,229
4	0,281	0,282	0,281
10	0,313	0,313	0,313

b) Um die Spannungen besser vergleichen zu können wird das Widerstandsmoment W_t eingeführt.

$$\tau_{max} = \frac{M}{W_t} \quad (34)$$

Hier ist:

$$W_t = \eta h b^2 \quad (35)$$

Der komplizierteste Querschnitt für die Netzgenerierung im ProfilMaker ist der geschlossene Ring. Deshalb soll bei der Berechnung keine große Zahl für den Parameter "Anzahl der Elemente je Seite" eingegeben werden, insbesondere bei einem großen Verhältnis R/t .

Tabelle 3: η -Beiwert

$h/b \backslash N$	Exakt	5	10	20
1	0,208	0,227	0,211	0,209
2	0,246	0,282	0,254	0,248
4	0,282	0,315	0,290	0,284
10	0,313	0,350	0,322	0,315

Profilmaker

5. Beispiele

5.1 Winkel

Es wird die Torsion des Winkels 100x100x20 mit dem Moment 2.4 kNm betrachtet. Die "genaue Lösung", die bei den Berechnungen der Torsion der Stäbe verwendet wird, deren Querschnitt aus Rechtecken besteht, kann mit Verwendung der Formeln (33) - (35) und der Tabellen 2 und 3 ermittelt werden. In den praktischen Berechnungen solcher Querschnitte werden oft die Näherungsformeln verwendet:

$$I_t \approx \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \delta_i^3 L_i \quad (36)$$

$$\tau_i \approx \frac{M_t}{I_t} \delta_i$$

Hierin sind δ_i - Dicken der Rechteckstreifen, und L_i - ihre Längen. In der Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Berechnungen der "genauen Lösung" angeführt, die durch die Formeln (36) angenähert sind. Dabei wird der Profilmaker mit einem Netz verwendet, das aus 40 Elementen über die Dicke besteht.

Tabelle 4:

Variante	"Genauer Wert"	Formel (36)	Nicht fixierte	R=40	R=20	R=10	R=5	R=1
I_t [cm ⁴]	41.3	48	41.3	75.5	53.4	48.1	46.6	45.9
τ [N/mm ²]	116	100	116	107	135	151	176	271

In den Bildern 3 und 4 sind die Isolinien der Schubspannungen dargestellt, die vom Profilmaker für den verbundenen Winkel mit einer Aus-



Abbildung 3: Winkel ohne Ausrundung und ohne Verbindung

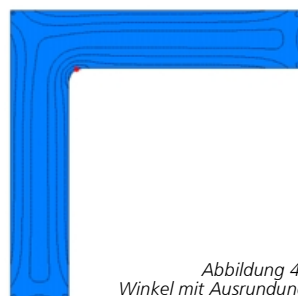


Abbildung 4: Winkel mit Ausrundung

rundung R (Abbildung 4) und für einen nicht verbundenen Winkel (Abbildung 3) ermittelt sind.

Die angeführten Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung der Lösung der Elastizitätstheorie mit dem Profilmaker eine Erhöhung der Torsionssteifigkeit und der maximalen Schubspannungen um 20-30% ermöglicht (in der Regel haben der Radius der Ausrundung und die Wanddicke ähnliche Werte). Außerdem ist die Lage des Punktes unterschiedlich, in dem die Schubspannungen das Maximum erreichen. Dieses Beispiel kann auch den Punkt 4.1 (Singularitäten) illustrieren, da der Einfluss des Radius R der Ausrundung auf die Größe der Spannungskonzentration verdeutlicht wird.

5.2 Kranbahnträger

Die Leistungsfähigkeit des Profilmakers wird mit dem folgenden Beispiel zur Spannungsberechnung eines Kranbahnquerschnitts ist in den Abbildungen 5-7 dargestellt. Der Träger ist aus den Profilen IPE 500, U 320 und A 55 zusammengesetzt und mit den Schnittgrößen $M_y=400$ kNm, $M_z=20$ kNm, $Q_z=500$ kN, $Q_y=60$ kN, $M_t=6$ kNm, $M_\omega=10$ kNm, $B_\omega=2$ kNm² beansprucht.

Von oben nach unten sind die Normal-, Schub und Vergleichsspannungen abgebildet. Außerdem sieht man in Abbildung 5 die Lage der Nulllinien im elastischen Zustand (grüne Linie) und im plastischen Zustand (rote Linie), die ohne Berücksichtigung des Bimomentes ermittelt wurde.

Weitere Informationen:

Dr.-Ing. Dorian Lutzkanov
dl@mb-software.de
Dr.-Ing. Jochen Weise
jow@mb-software.de

Geschäftsstelle Dresden

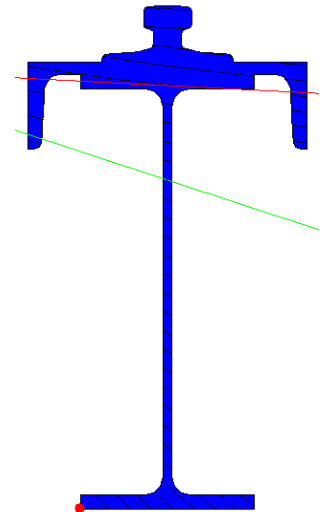


Abbildung 5: Normalspannungen (max $\sigma = 214$ N/mm²)

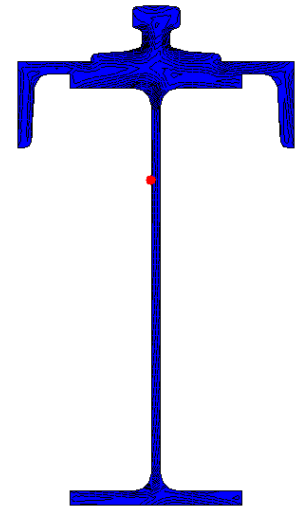


Abbildung 6: Schubspannungen (max $\tau = 115$ N/mm²)

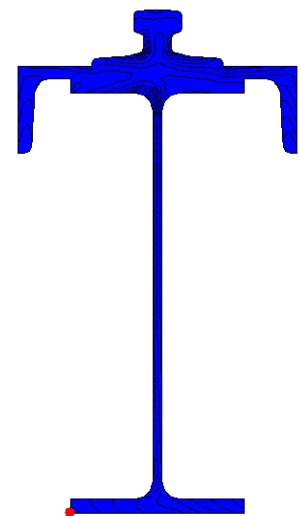


Abbildung 7: Vergleichsspannungen ($\sigma_v = 214$ N/mm²)