

Torsion

1. Einführung

1.1 Allgemeines

Eine Torsionsbeanspruchung liegt dann vor, wenn sich der Querschnitt eines Balkens entlang seiner Schwerachse **unterschiedlich stark** verdreht. Das kann nur dann geschehen, wenn z.B. die Vertikalbelastung auf einen Balken nicht durch den Schubmittelpunkt geht. Je nach Querschnitt können Schubmittelpunkt (M) und Schwerpunkt (S) eines Querschnitts verschieden sein!

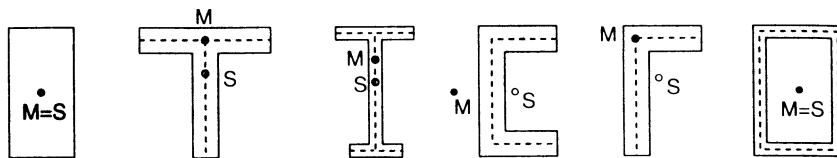


Bild: Querschnitte

Die Torsionsbelastung (Torsionsmoment) eines Querschnitts ergibt sich somit als Moment aus der Vertikalbelastung mal dem Hebelarm zum Schubmittelpunkt. Eine stabile Lagerung kann nur gewährleistet werden, wenn am Auflager zusätzlich eine Querschnittsverdrehung verhindert wird. Dies wird durch ein sog. **Gabellager** sichergestellt (siehe folgende Bilder).

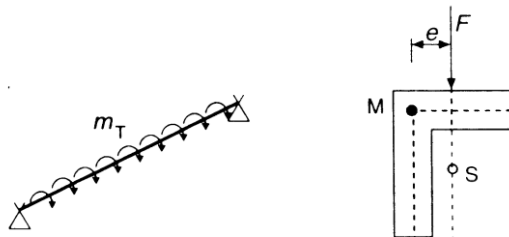


Bild: Torsionsbelastung eines Einfeldträgers unter Gleichstreckenlast

Je nach der Geometrie des Querschnitts können infolge Torsion sowohl Schubspannungen als auch Längsspannungen entstehen. Wenn **nur Schubspannungen** existieren, dann spricht man von **St. Venant'scher Torsion (reiner Torsion)**. Längsspannungen können nur entstehen, wenn eine **freie Verformung in Längsrichtung nicht möglich** ist, das ist die sog. **Wölbkrafttorsion (Verwölbung = Verschiebung in Längsrichtung infolge Torsion)**.

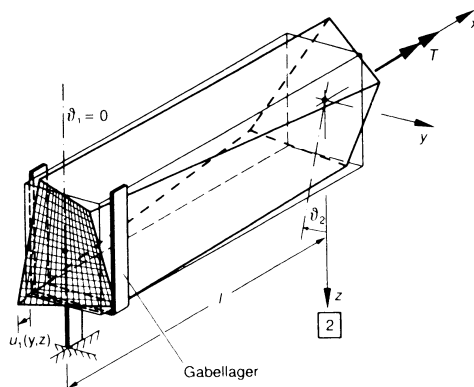


Bild: Stab mit übertrieben dargestellter Verwölbung

Als **nahezu wölbfrei** erweisen sich **Kompaktquerschnitte** wie z.B. Rechteckquerschnitte und geschlossenen Hohlquerschnitte, **insbesondere wenn sie dickwandig** sind.

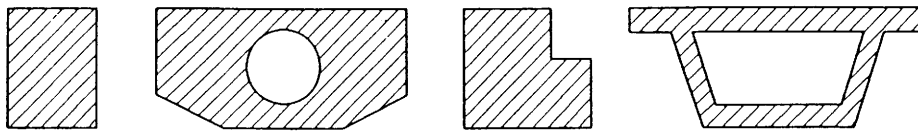
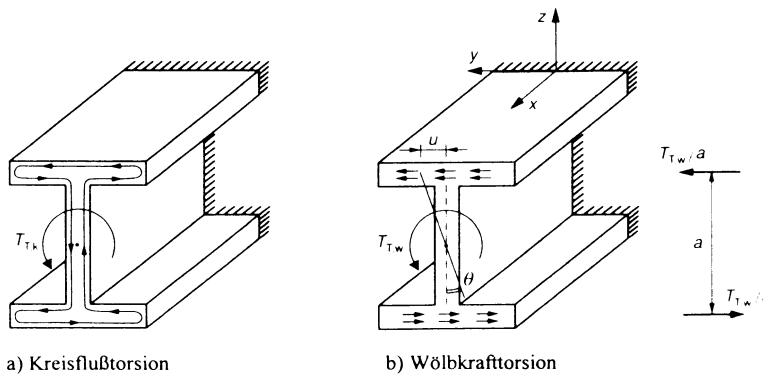


Bild: Nahezu wölbfreie Querschnitte

Offensichtlich **nicht wölbfrei** sind **offene Querschnitte mit mindestens 2 Flanschen**. Hier wird das Torsionsmoment hauptsächlich durch Wölbkräfte aufgenommen, da der Hebelarm bei der Kreisflusstorsion zu klein ist.



a) Kreisflusstorsion

b) Wölbkrafttorsion

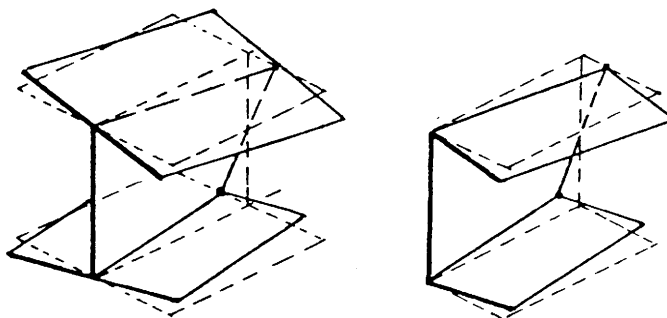


Bild: Profile mit Wölbkrafttorsion

Wölbfrei sind **Quadrat-, Kreis- und Kreisringquerschnitte**, außerdem **dünnwandige Querschnitte, die sich aus 2 Rechtecken zusammensetzen lassen**.

Die Zusammenhänge bei **reiner Torsion** können gemäß der technischen Mechanik folgendermaßen berechnet werden:

Änderung der Querschnittsverdrehung:
$$\mathcal{G}' = \frac{d\mathcal{G}}{dx} = \frac{T_{Ed}}{G \cdot I_T} \quad (1.1)$$

Max. Schubspannung infolge Torsion:
$$\tau_T = \frac{T_{Ed}}{W_T} \quad (1.2)$$

Die Querschnittswerte I_T und W_T können aus Tafelwerken entnommen werden.

1.2 Torsion im Stahlbetonbau

Die Aufnahme von Torsionsmomenten T_{Ed} ist nur dann nachzuweisen, wenn sie für das Gleichgewicht erforderlich ist (**Gleichgewichtstorsion**). Der Nachweis umfasst dann sowohl den Grenzzustand der Tragfähigkeit als auch den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

Wenn Torsion in statisch unbestimmten Tragwerken nur zur Erfüllung der Verträglichkeitsbedingungen auftritt, dann spricht man von **Verträglichkeitstorsion**. In diesem Fall ist es im Allgemeinen nicht erforderlich, die Torsion im Grenzzustand der Tragfähigkeit zu berücksichtigen. Dies liegt hauptsächlich darin begründet, dass sich die Torsionssteifigkeit durch Rissbildung stark reduziert (um ca. 70%). Dafür ist dann eine **konstruktive Bewehrung in Form von Bügeln und Längsbewehrung** vorzusehen.

Zur Vermeidung übermäßiger Rissbildung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit allerdings kann es erforderlich werden, die Torsion in die Nachweise mit einzubeziehen.

Der Fall a im folgenden Bild zeigt ein solches Beispiel: Ohne Torsionsmoment (= gelenkige Lagerung) ist das Gleichgewicht nicht gefährdet, es ergibt sich nur eine etwas größere Durchbiegung der Decke.

Im Fall b kann das Torsionsmoment offensichtlich auf keinen Fall entfallen, da dann der Kragarm einstürzen würde, d.h. hierbei handelt es sich um **Gleichgewichtstorsion**.

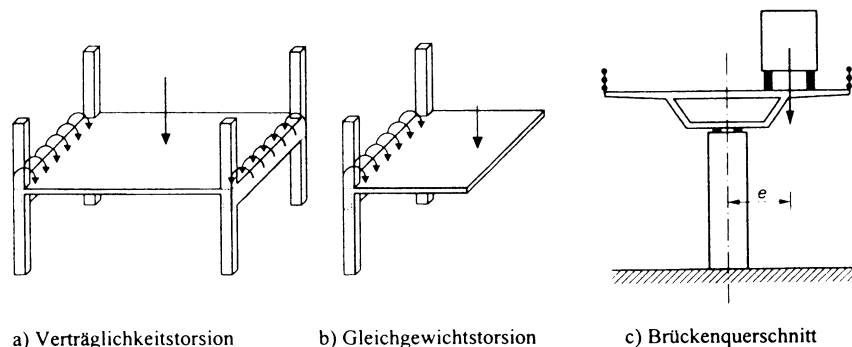


Bild: Gleichgewichts- und Verträglichkeitstorsion

Da im Stahlbetonbau meist dickwandige Querschnitte verwendet werden, ist die Wölbbehinderung relativ klein. Die trotzdem noch auftretenden Längsspannungen infolge Wölbbehinderung werden durch die Rissbildung zusätzlich noch stark abgebaut. Da immer konstruktive Maßnahmen (z.B. Anordnung einer Mindestbewehrung) ergriffen werden, braucht die **Wölbkrafttorsion in der Regel im Stahlbetonbau nicht rechnerisch nachgewiesen** zu werden.

Versuche mit bewehrten Stahlbetonbalken unter Torsion haben gezeigt, dass sich Vollquerschnitte wie Hohlquerschnitte verhalten, d.h. das Innere des Vollquerschnitts kann rechnerisch unberücksichtigt bleiben, da es kaum zur Tragwirkung beiträgt. Näherungsweise kann mit einem **gedachten Hohlquerschnitt mit konstanter Schubspannungsverteilung** gerechnet werden.

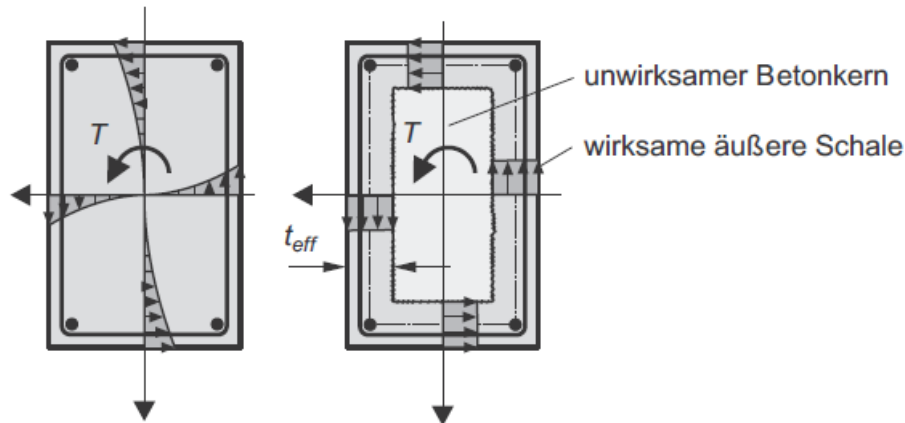


Bild: Schubspannungen vor und nach der Rissbildung

Der Kraftfluss nach der Rissbildung kann analog zur Bemessung auf Querkraft mit Hilfe eines Fachwerks modelliert werden (Zugstreben durch Stahl, Druckstreben durch Beton). Allerdings ist in diesem Fall ein **räumliches Fachwerk** erforderlich, dessen Zug- und Druckstreben entsprechend den Hauptspannungen geneigt sein müssen:

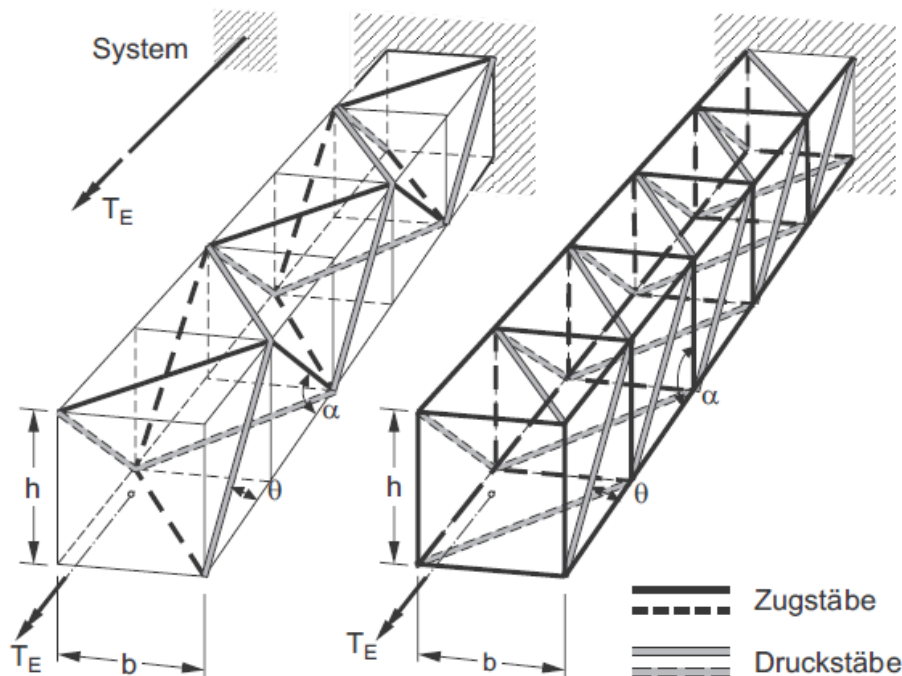


Bild: Fachwerk für Torsion mit schrägen und vertikalen Zugstreben.

Da gegenüberliegende schräge Zugstreben gegenläufig sind, wäre eine praktische Ausführung sehr umständlich. Deshalb werden die Zugkräfte in 2 Komponenten zerlegt, eine in Achsrichtung und eine senkrecht dazu. Diese Komponenten werden durch Längs- und Bügelbewehrung aufgenommen.

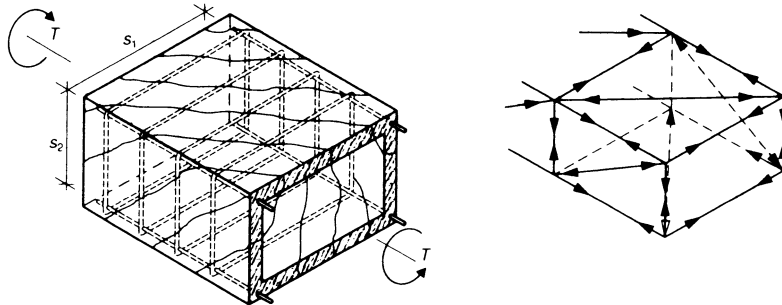


Bild: Bügel- und Längsbewehrung für die Zugstreben infolge Torsion

Eine Seite des Hohlquerschnitts kann dann wie eine Wand betrachtet werden, die durch Querkräfte belastet ist: Man nennt sie deshalb Schubwand.

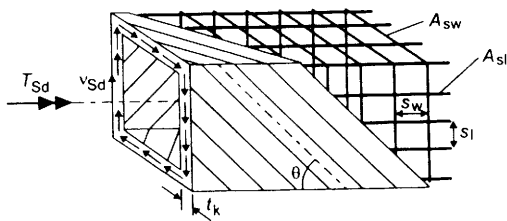


Bild: Ausbildung von Schubwänden bei Torsionsbelastung

Die Bemessung der einzelnen Schubwände des gedachten Hohlquerschnitts erfolgt im Prinzip genauso wie die Bemessung auf Querkraft. Folgende Unterschiede sind zu beachten:

- Das Fachwerk ist räumlich, d.h. auch die horizontalen Bügelchenkel werden voll benötigt. Das bedeutet, dass die **Bügel zugfest geschlossen** werden müssen !
- Die Zugkräfte auf gegenüberliegenden Seiten sind entgegengerichtet, d.h. **in Kombination mit Querkraft wird die Belastung einer Seite erhöht**, die der anderen Seite vermindert !
- Da Zug- und Druckstreben wendelförmig um den Querschnitt herumlaufen, ist außer der Bügel- auch **immer eine Längsbewehrung erforderlich**, die in Kombination mit Biegung **zur Biegezugbewehrung hinzuaddiert werden muss**. In der Biegedruckzone kann die Torsionslängsbewehrung entsprechend reduziert werden.

2 Nachweise für Torsion nach EC 2

2.1 Nachweis für reine Torsion

Der Nachweis des **Grenzzustandes der Tragfähigkeit** erfolgt analog aller anderen Nachweise: Das infolge der Belastungen einwirkende Torsionsmoment muss kleiner oder gleich dem Bauteilwiderstand bleiben, der sich aus den Zug- und Druckstreben ergibt:

Widerstand Druckstrebe: $T_{Ed} \leq T_{Rd,max}$ (2.1.1) Widerstand Zugstrebe: $T_{Ed} \leq T_{Rd,sy}$ (2.1.2)

2.1.1 Herleitung der Bemessungsformeln

Wie oben schon allgemein erläutert, wird die Torsionstragfähigkeit anhand eines räumlichen Fachwerkmodells ermittelt. Grundlage ist ein echter oder gedachter Hohlquerschnitt mit der Wandstärke t_{ef} . Die Mittellinie des Hohlquerschnitts geht durch die Schwerpunkte der Ecklängsbewehrung (vgl. Bild unten), wobei t_{ef} natürlich nicht größer als eine echte Wandstärke werden darf.

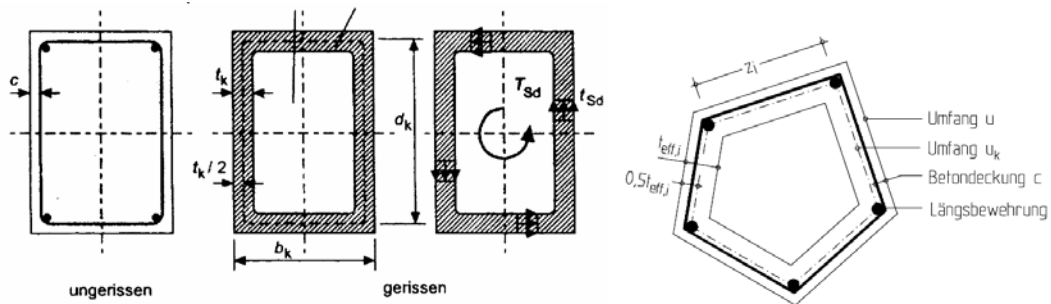


Bild: Querschnitt für Torsion

Die folgenden geometrischen Größen werden definiert:

Kernquerschnitt A_k = von der Mittellinie des Hohlquerschnitts umschlossenen Fläche
Kernumfang u_k = Länge aller Mittellinien

Am Beispiel **Rechteckquerschnitt** (siehe Bild oben) ergibt sich:

Kernquerschnitt: $A_k = b_k \cdot d_k$ (2.1.3)

Kernumfang: $u_k = 2 \cdot (b_k + d_k)$ (2.1.4)

Mit dem Torsionsmoment: $T_{Ed} = 2 \cdot (\tau_{Ed} \cdot t_{ef} \cdot d_k) \cdot \frac{b_k}{2} + 2 \cdot (\tau_{Ed} \cdot t_{ef} \cdot b_k) \cdot \frac{d_k}{2}$

folgt die Schubspannung: $\tau_{Ed} = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k \cdot t_{ef}} = \frac{v_{Ed}}{t_{ef}}$ mit $v_{Ed} = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k}$ in kN/m (2.1.5)

τ_{Ed} ist die Schubspannung, v_{Ed} ist der **Schubfluss in den Schubwänden des Querschnitts**. Die Ermittlung von Schubfluss und Schubspannung gilt allgemein für alle Querschnitte mit den Querschnittsgrößen A_k und t_{ef} .

Damit ergibt sich die **Querkraft in einer vertikalen Wand** des Rechteckquerschnitts zu:

$V_{Ed} = v_{Ed} \cdot d_k = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k} \cdot d_k$ und damit **allgemein** $V_{Ed,i} = v_{Ed} \cdot z_i = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k} \cdot z_i$ (2.1.6)

z_i ist hierbei die **Länge der Schubwand i**, gemessen zwischen den Schwerpunkten der Eckstäbe.

Für den Nachweis der Zug- und Druckstreben ist es ausreichend, das Kraffteck eines Knotens in einer Schubwand zu betrachten:

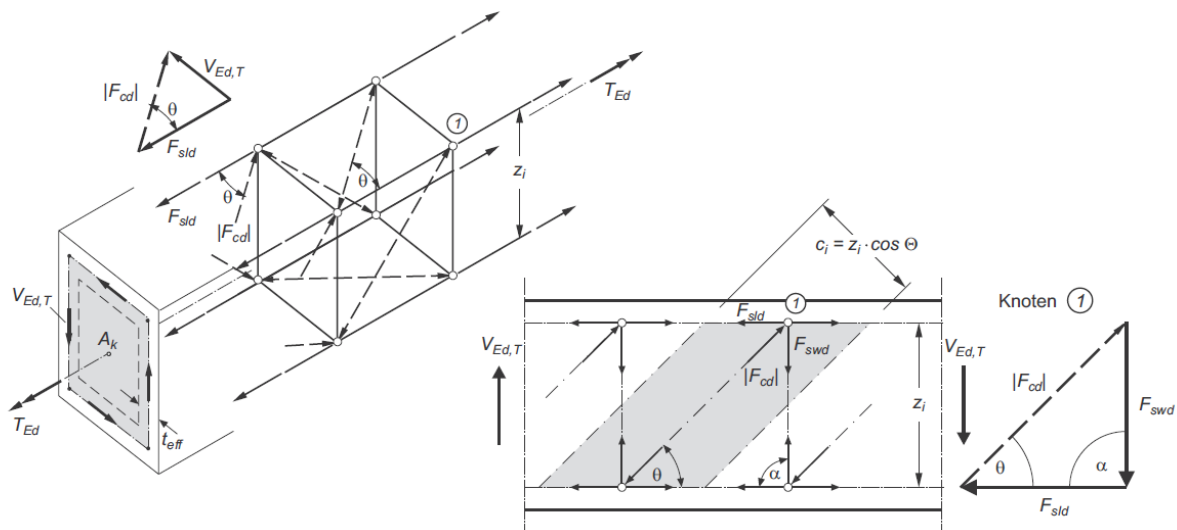


Bild: Räumliches Fachwerkmodell und Kraffteck in einer Schubwand

Höhe einer Druckstrebe: $c_i = z_i \cdot \cos \theta$ (2.1.7)

Abzudeckende Schubkraft vertikal: $V_{Edv} = v_{Ed} \cdot z_i$ (2.1.8)

Abzudeckende Schubkraft horizontal: $V_{Edh} = v_{Ed} \cdot z_i \cdot \cot \theta$ (2.1.9)

Druckstrebenkraft: $F_{cd} = \sigma_{cd} \cdot c_i \cdot t_{ef}$ (2.1.10)

$\sum V = 0$: mit (2.1.8)(2.1.10) $V_{Edv} = F_{cd} \cdot \sin \theta$ $v_{Ed} \cdot z_i = \sigma_{cd} \cdot c_i \cdot t_{ef} \cdot \sin \theta$

daraus folgt: $\sigma_{cd} = \frac{v_{Ed} \cdot z_i}{c_i \cdot t_{ef} \cdot \sin \theta} = \frac{T_{Ed} \cdot z_i}{2 \cdot A_k \cdot z_i \cdot \cos \theta \cdot t_{ef} \cdot \sin \theta} \leq v \cdot f_{cd}$

Daraus ergibt sich der **Querschnittswiderstand aufgrund der Druckstrebenfestigkeit** (= das maximal aufnehmbare Torsionsmoment T_{Rd}):

$T_{Rd,max} = v \cdot f_{cd} \cdot A_k \cdot t_{ef} \cdot 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta = v \cdot f_{cd} \cdot A_k \cdot t_{ef} \cdot \sin(2\theta)$ (2.1.11)

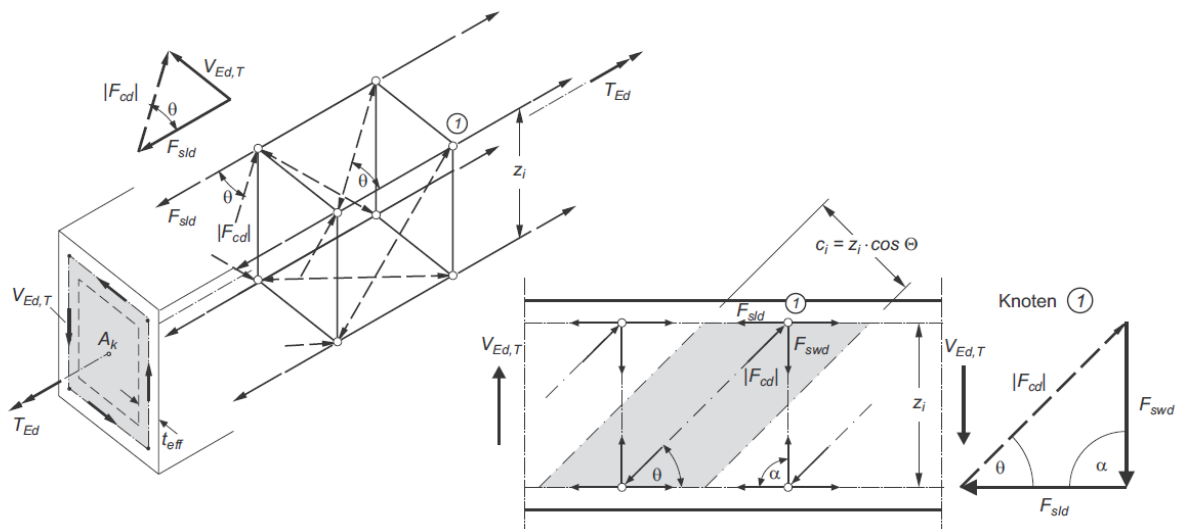
Dabei ist v ein Abminderungsbeiwert für die Betonfestigkeit bei Schubrisen:

$v = 0,525$ für Torsion allgemein

$v = 0,75$ für Kastenquerschnitte mit Bewehrung an den Innen- und Außenseiten der Wände
Ab C55/67 sind die Werte mit $v_2 = (1,1 - f_{ck}/500)$ zu multiplizieren.

Empfohlener Wert nach EC 2: $v = 0,6 \cdot (1,0 - f_{ck}/250)$

Bei einem idealisierten Hohlkasten liegt die Bügelbewehrung an den Wandaußenseiten, wodurch eine ungleichmäßige Spannungsverteilung entsteht, da die Druckstrebe exzentrisch zur Zugstrebe verläuft. Die ausnutzbare Betondruckspannung ist deshalb gegenüber der Querkraftbemessung auf ca. 70 % reduziert. Dagegen kann sich die Druckkraft bei echten Hohlkastenkonstruktionen zentrisch in eine beidseitig angeordnete Bügelbewehrung einhängen und darf dann höher belastet werden.



Abzudeckende Schubkraft vertikal:

$$V_{Edv} = v_{Ed} \cdot z_i \quad (2.1.8)$$

Abzudeckende Schubkraft horizontal:

$$V_{Edh} = v_{Ed} \cdot z_i \cdot \cot \theta \quad (2.1.9)$$

Stahlzugkraft horizontal:

$$F_{sld} = a_{sl} \cdot f_{yd} \cdot z_i \quad (2.1.12)$$

Stahlzugkraft vertikal:

$$F_{swd} = a_{sw} \cdot f_{yd} \cdot (z_i \cdot \cot \theta) \quad (2.1.13)$$

Berechnung des Querschnittswiderstandes infolge Stahlversagen:

1) Berechnung mit der Bügelbewehrung: mit (2.1.8)(2.1.13) und (2.1.6)

$$\sum V = 0: \quad V_{Edv} = F_{swd} \quad v_{Ed} \cdot z_i = a_{sw} \cdot f_{yd} \cdot (z_i \cdot \cot \theta) \quad \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k} \cdot z_i = a_{sw} \cdot f_{yd} \cdot z_i \cdot \cot \theta$$

daraus folgt: $T_{Rd, sy} = 2 \cdot A_k \cdot f_{yd} \cdot a_{sw} \cdot \cot \theta \quad (2.1.14)$

Bemessung: $a_{sw} = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta} \quad \text{cm}^2/\text{m je Schubwand} \quad (2.1.15)$

2) Berechnung mit der Längsbewehrung mit (2.1.9)(2.1.12) und (2.1.6)

$$\sum H = 0: \quad V_{Edh} = F_{sld} \quad v_{Ed} \cdot z_i \cdot \cot \theta = a_{sl} \cdot f_{yd} \cdot z_i \quad \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k} \cdot z_i \cdot \cot \theta = a_{sl} \cdot f_{yd} \cdot z_i$$

daraus folgt: $T_{Rd, sy} = 2 \cdot A_k \cdot f_{yd} \cdot a_{sl} \cdot \tan \theta \quad (2.1.16)$

Bemessung: $a_{sl} = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k \cdot f_{yd} \cdot \tan \theta} \quad \text{cm}^2/\text{m Umfang } u_k \quad (2.1.17)$

Gesamtlängsbewehrung auf u_k : $A_{sl} = a_{sl} \cdot u_k \quad (2.1.18)$

Durch gleichsetzen der beiden Lösungen für $T_{Rd, sy}$ ergibt sich: $a_{sl} = a_{sw} \cdot \cot^2 \theta \quad (2.1.19)$

Wie man sieht ist für einen Druckstrebenneigungswinkel von 45° die Längsbewehrung gleich der Bügelbewehrung.

Der **Druckstrebenneigungswinkel** ist genau wie bei der Bemessung auf Querkraft auf einen bestimmten Bereich zu begrenzen. Hierbei sind nur die Querschnittsbreite b_w und der innere Hebelarm z durch die Breite und die Länge der Schubwand zu ersetzen:

$$1,0 \leq \cot \Theta \leq \frac{1,2 + 1,4 \cdot \sigma_{cd} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,cc} / V_{Ed}} \leq k \quad (2.1.20)$$

$k = 3,0$ für Normalbeton, d.h. $18,4^\circ \leq \Theta \leq 45^\circ$ (Empfehlung EC 2: $k = 2,5$)

Bei geeigneter Querkraftbewehrung darf $\cot \theta$ bis $0,58$ (60°) ausgenutzt werden.

Der Betontraganteil $V_{Rd,cc}$ in der Schubwand wird analog zur Querkraft wie folgt berechnet:

$$V_{Rd,cc} = \left[c \cdot 0,48 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot \left(1 - 1,2 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) \right] \cdot t_{ef} \cdot z_i \quad (2.1.21)$$

$c = 0,5$ Rauigkeitsbeiwert für die Querkraftübertragung in verzahnten Fugen.

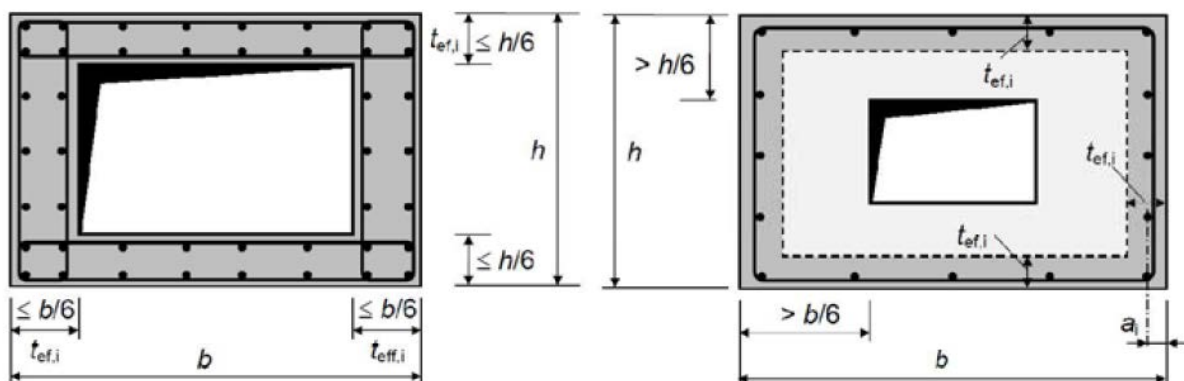
$\sigma_{cd} = \frac{N_{Ed}}{A_c}$ Betonlängsspannung im Schwerpunkt des Querschnitts

N_{Ed} Bemessungswert der Längskraft des Querschnitts infolge äußerer Einwirkungen oder Vorspannung (Druck > 0).

Die Querkraft V_{Ed} ist hierbei die Querkraft in einer Schubwand nach 2.1.6.

2.1.2 Effektive Wanddicke bei Hohlkästen

Bei Hohlkästen mit Wanddicken $h_w \leq b/6$ bzw. $h_w \leq h/6$ und beidseitiger Wandbewehrung darf die gesamte Wanddicke für $t_{ef,i}$ angesetzt werden.



Schlanker Hohlkasten

gedrungener Hohlkasten

2.1.3 Zusammengesetzte Querschnitte

Querschnitte von komplexer Form wie z.B. T-Querschnitte können in Teilquerschnitte (meist Rechtecke) aufgeteilt werden. Die Gesamttorsionstragfähigkeit berechnet sich dann aus der Summe der Tragfähigkeit der Einzelelemente.

Praktisch bedeutet dies, dass das angreifende Torsionsmoment auf die einzelnen Teilquerschnitte verteilt wird, die dann getrennt nachgewiesen werden können. Die Aufteilung darf im Verhältnis der Steifigkeiten des ungerissenen Zustandes erfolgen:

$$T_{Ed,i} = T_{Ed} \cdot \frac{I_{T,i}}{\sum I_{T,i}}$$

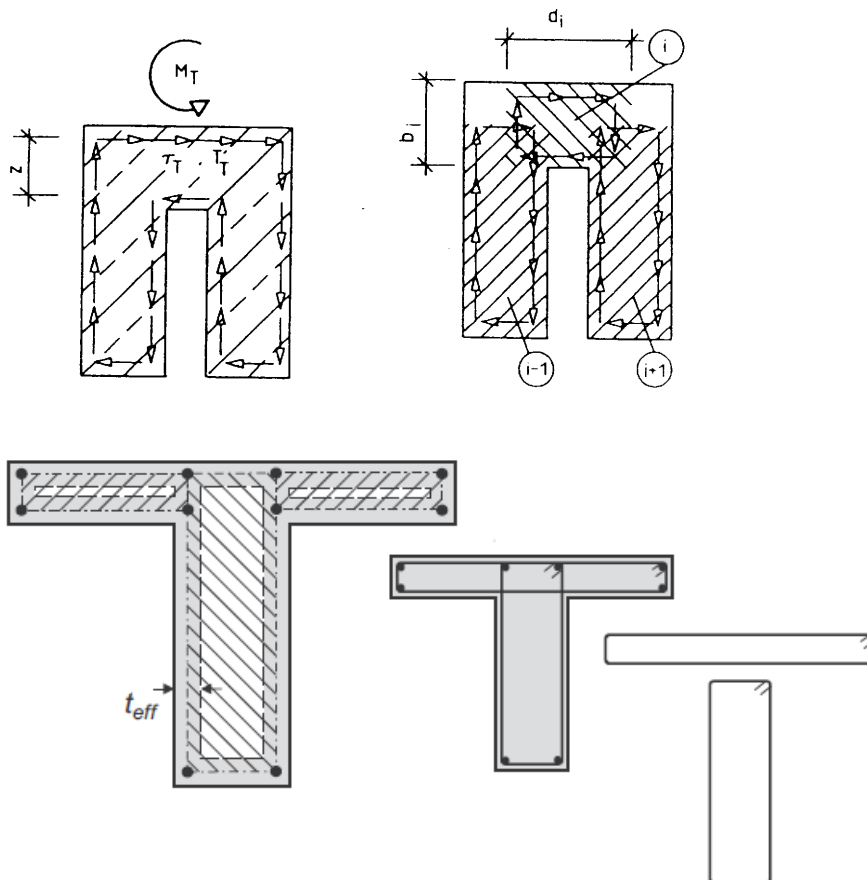
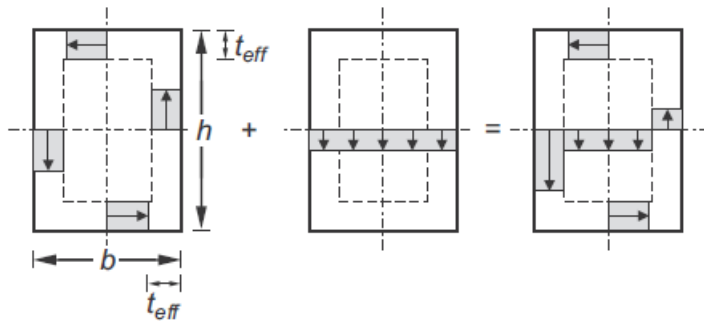


Bild: Aufteilung des Schubflusses in Einzelschubflüsse

2.2 Nachweis für kombinierte Beanspruchung aus Querkraft und Torsion

Der Nachweis für eine kombinierte Beanspruchung aus Querkraft und Torsion erfolgt ebenfalls wie bei reiner Torsion für die ungünstigste Schubwand des Hohlquerschnitts. Die in der Schubwand wirkende Querkraft setzt sich jetzt aus 2 Anteilen zusammen:



$$V_{Ed,T+V} = V_{Ed,T} + V_{Ed,V} = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k} \cdot z_i + \frac{V_{Ed} \cdot t_{ef}}{b_w} \quad (2.2.1)$$

Mit dieser Querkraft ist eine Bemessung durchzuführen, die ermittelte **Bewehrung ist zu der Bewehrung aus der Querkraftbemessung zu addieren**. Der gewählte **Druckstrebenneigungswinkel gilt sowohl für den Nachweis der Querkraft wie auch für den Nachweis der Torsion**.

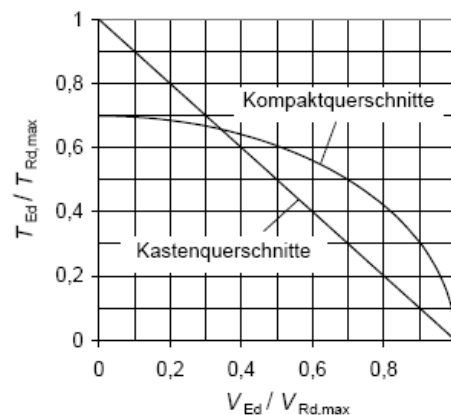
Der Nachweis der Druckstrebentragfähigkeit erfolgt für jeden Teilquerschnitt wie folgt:

Für Kompaktquerschnitte:

$$\left[\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} \right]^2 + \left[\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \right]^2 \leq 1 \quad (2.2.2)$$

Für Kastenquerschnitte:

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1 \quad (2.2.3)$$



Für die Querkraftbeanspruchung steht die gesamte Stegbreite b_w zur Verfügung, dagegen dürfen die Torsionsdruckspannungen lediglich im Randbereich t_{ef} angesetzt werden. Damit verbleiben bei den Kompaktquerschnitten Umlagerungsmöglichkeiten, die die Interaktionsgleichung für Kompaktquerschnitte ausnutzt. Diese Umlagerungsmöglichkeiten sind bei Hohlkastenquerschnitten nicht mehr gegeben, da die Druckspannungen infolge Torsion und Querkraft gemeinsam in dem Wandquerschnitt wirken. Aus diesem Grund ist die zweite Interaktionsgleichung konservativer aufgebaut.

Vereinfachungsmöglichkeit: Die Bewehrung für Torsion allein kann mit einem Druckstrebenneigungswinkel von 45° ermittelt werden und muss dann wie gehabt zur ermittelten Querkraftbewehrung aufaddiert werden.

2.3 Entfall der Bemessung für Querkraft und Torsion

Für einen **näherungsweise rechteckigen Vollquerschnitt** ist **nur die Mindestbewehrung** erforderlich, wenn die folgende Bedingung eingehalten ist:

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,c}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,c}} \leq 1 \quad (\text{EC2 6.31}) \quad (2.3.3)$$

$T_{Rd,c}$ Das Torsionsrissmoment, das mit $\tau_{t,i} = f_{ctd}$ berechnet werden darf, d.h.

$$T_{Rd,c} = W_t \cdot f_{ctd}$$

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot f_{ctk;0,05} / \gamma_c \quad \text{Bemessungswert der Betonzugfestigkeit } (\alpha_{ct} = 0,85)$$

Ergänzung durch den NA:

Bei geringer Torsions- bzw. geringer Querkraft+Torsions-Beanspruchung darf unter gewissen Umständen bei einem **näherungsweise rechteckigen Querschnitt** auf einen rechnerischen Nachweis der Bewehrung verzichtet werden. Dazu ist sicher zu stellen, dass im ungerissenen Querschnitt (Zustand I) die näherungsweise ermittelten Schubspannungen infolge Torsion mit $\tau_T \approx 4,5 \cdot T_{Ed} / (b_w^2 \cdot z)$ nicht größer werden als die Schubspannungen infolge Querkraft mit $\tau_V = V_{Ed} / (b_w \cdot z)$ und bei kombinierter Beanspruchung infolge Torsion+Querkraft darf es nicht zu einem Versagen infolge Schrägrissbildung ($\leq V_{Rd,c}$) kommen.

Deshalb sollte neben dem Einbau der Mindestbewehrung der Nachweis auf Querkraft und Torsion geführt werden, wenn eine der folgenden beiden Bedingungen nicht eingehalten ist:

Für Torsion:

$$T_{Ed} \leq \frac{V_{Ed} \cdot b_w}{4,5} \quad (\text{EC2 NA.6.31.1}) \quad (2.3.1)$$

Für Querkraft + Torsion:

$$V_{Ed} \cdot \left[1 + \frac{4,5 \cdot T_{Ed}}{V_{Ed} \cdot b_w} \right] \leq V_{Rd,c} \quad (\text{EC2 NA.6.31.2}) \quad (2.3.2)$$

2.4 Konstruktive Anforderungen

Die Torsionsbewehrung ist in Form eines **rechtwinkligen Bewehrungsnetzes** aus Bügeln und Längsstäben auszuführen. Die **Bügel sind hierbei zugfest zu schließen**.

Der Längsabstand der Bügel muss den Anforderungen für die Querkraftbewehrung genügen (vgl. Kap. Querkraft). Zusätzlich darf der **Längsabstand der Torsionsbügel den Wert $u_k/8$ nicht überschreiten**.

Die Längsstäbe sollten gleichmäßig über den Umfang innerhalb der Bügel verteilt werden, wobei in jedem Knickpunkt der Bügel mindestens ein Längsstab vorhanden sein muss. Der **Abstand der Längsstäbe darf 35 cm nicht überschreiten**.

Höchstabstände: $s_w \leq \frac{u_k}{8}$ bzw. $s_w \leq s_{w,V}$ $s_l \leq 35\text{cm}$ (2.4.1)

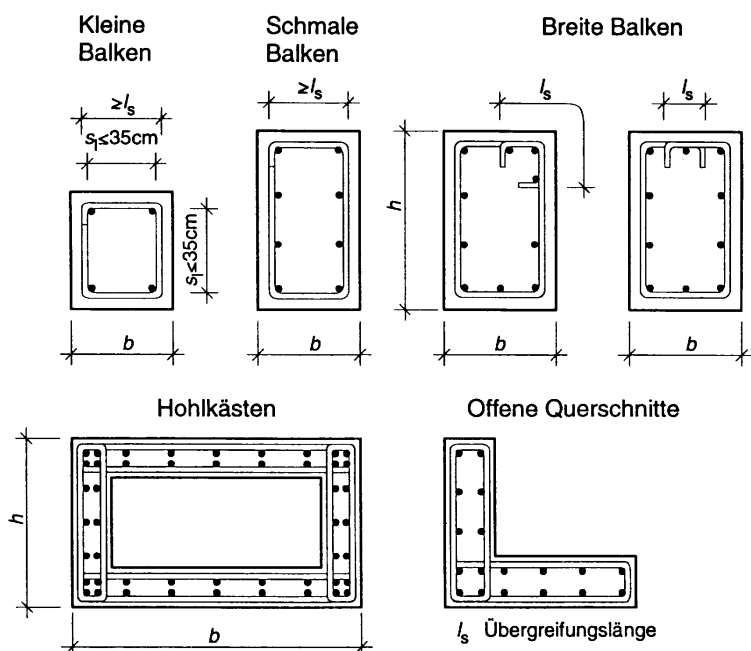


Bild: Beispiele für eine Torsionsbewehrung

Bei Verträglichkeitstorsion darf im Grenzzustand der Tragfähigkeit auf einen rechnerischen Nachweis der Torsionsbeanspruchung verzichtet werden. Hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit, insbesondere um eine übermäßige Rissbildung zu vermeiden und eine angemessene Robustheit zu gewährleisten, sollte eine konstruktive Bewehrung in Form von geschlossenen Bügeln und einer über den Umfang verteilten Längsbewehrung vorgesehen werden. Diese Forderung ist als Anwendungsregel gekennzeichnet. Das heißt, es darf davon abgewichen werden, es ist jedoch eine vom Prinzip gleichwertige Lösung zu gewährleisten. Die in diesem Kapitel beschriebenen konstruktiven Regeln sollten jedoch als Mindestgrundlage zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit auch bei nicht nachzuweisender Verträglichkeitstorsion angewendet werden.