

Kriterien für die Produktauswahl bei Stahlbau-Hohlprofilen

Warm- und kaltgefertigte Hohlprofile unterscheiden sich nicht nur im Preis, sondern auch in ihren Eigenschaften. Mehr darüber erfahren sie direkt von der Autorin. Text und Grafiken: Dipl.-Ing. Kirstin Bach, Firma Tata Steel International, Düsseldorf

Mit der Auswahl der richtigen Hohlprofile werden Verhalten und Tragfähigkeit einer Konstruktion deutlich verbessert. Stahlbau-Hohlprofile können entweder warm- oder kaltgefertigt hergestellt werden und aufgrund der verschiedenen Herstellungsprozesse haben die beiden Typen unterschiedliche technische Eigenschaften. Bei Tata Steel Europe erfolgt die Produktion nach beiden Prozessen, deshalb werden in diesem Beitrag die Hauptunterschiede dieser zwei Hohlprofilarten erläutert, um eine sinnvolle und gezielte Produktauswahl zu ermöglichen.

Homogenität *siehe Abbildung 1*

Warmgefertigte Hohlprofile haben ein homogenes, gleichmässiges Gefüge im gesamten Querschnitt des Profils. Die Vickers Härtewerte sind in allen Bereichen gleich, sowohl an der flachen Seite, in den Eckrundungen als auch an der Schweissnaht. Kaltgefertigte Hohlprofile weisen dagegen Härtespitzen in den Eck- und Schweissnahtbereichen auf, ein Hinweis auf erhöhte Sprödigkeit im Vergleich zu den übrigen Bereichen des Profils.

*(Duktilität ist die Eigenschaft eines Werkstoffs, sich unter Belastung plastisch zu verformen).

Duktilität* *siehe Abbildung 2*

Warmgefertigte Hohlprofile weisen eine hohe Zähigkeit und Duktilität auf, so dass selbst bei einem Überschreiten der Streckgrenze, z.B. an Anschlussstellen, eine gewisse Reserve an Plastizität bleibt. Diese Duktilität wird im Zugversuch gemessen. Hierfür werden die Proben in Längsrichtung entnommen, und zwar bei eckigen Hohlprofilen aus der Mitte der flachen Seite und bei runden Hohlprofilen in einem gewissen Abstand von der Schweissnaht. Bei kaltgefertigten Profilen ist jedoch die Duktilität insbesondere in den Eck- und Schweissnahtbereichen beträchtlich reduziert und aus den Standard-Zugversuchen kann man darauf leider keinen Hinweis finden, da keine Proben aus diesen Bereichen entnommen werden.

Bruchfestigkeit *siehe Abbildung 3*

Warmgefertigte Hohlprofile weisen sowohl ein niedriges Streckgrenze-Zugfestigkeit-Verhältnis als auch eine gute Energieabsorptionsfähigkeit und eine hohe Bruchfestigkeit auf. Diese Eigenschaften gewährleisten eine wesentlich bessere Dauerfestigkeit, insbesondere bei zyklischer oder dynamischer Stossbelastung. Beim Kerbschlag-

biegeversuch nach Charpy werden gleichmässig hohe Kerbschlagzähigkeitswerte bei niedrigen Temperaturen erreicht. Die Proben für den Kerbschlagversuch werden bei eckigen Hohlprofilen aus der Mitte der flachen Seite oder bei runden Hohlprofilen mit gewissem Abstand von der Schweissnaht in Längsrichtung entnommen. Das bedeutet, dass die beträchtlich reduzierte Bruchzähigkeit in den Ecken oder im Schweissnahtbereich bei kaltgefertigten Profilen daraus nicht ersichtlich wird. Bei der Werkstoffspezifikation ist es deshalb wichtig zu berücksichtigen, dass kaltgefertigte Profile in den Ecken und im Schweissnahtbereich Schwachstellen hinsichtlich der Bruchzähigkeit aufweisen.

Eigenspannungen *siehe Abbildung 4*

Warmgefertigte Hohlprofile sind nach der Fertigung praktisch frei von Eigenspannungen in sämtlichen Richtungen. Eigenspannungen können, insbesondere in Kombination mit durch Schweißen verursachten Schrumpfspannungen, zu einem früheren Bruch führen und erhöhen die Gefahr von durch Flüssigmetall unterstützter Rissbildung beim Galvanisieren. >

PROFILS POUR LA CONSTRUCTION DE CHARPENTES MÉTALLIQUES

Critère de sélection des profils creux pour charpentes métalliques

Les profils creux formés à chaud et à froid se distinguent par leur prix, mais aussi par leurs propriétés. L'auteur vous en dit plus à ce sujet.

Choisir des profils creux adéquats

permet d'améliorer considérablement le comportement et la résistance d'une construction. On peut produire des profils creux pour charpentes métalliques à chaud ou à froid. Ces différents processus

confèrent des propriétés techniques différentes à chaque type. Chez Tata Steel Europe, on utilise les deux processus. Cet article explique les différences majeures entre ces deux sortes de profils afin de sélectionner le produit de façon sensée et ciblée.

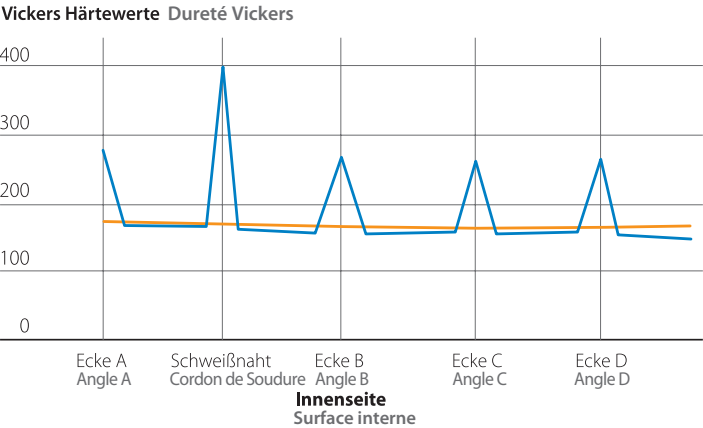
Homogénéité *voir illustration 1*

Les profils formés à chaud ont une structure régulière et homogène en tous points de leur section. Les valeurs de dureté de Vickers sont identiques dans les parties planes, dans les arrondis d'angle et au

niveau de la soudure. En revanche, les profils creux formés à froid présentent des pics de dureté dans les angles et à proximité de la soudure qui sont donc plus fragiles que les autres zones.

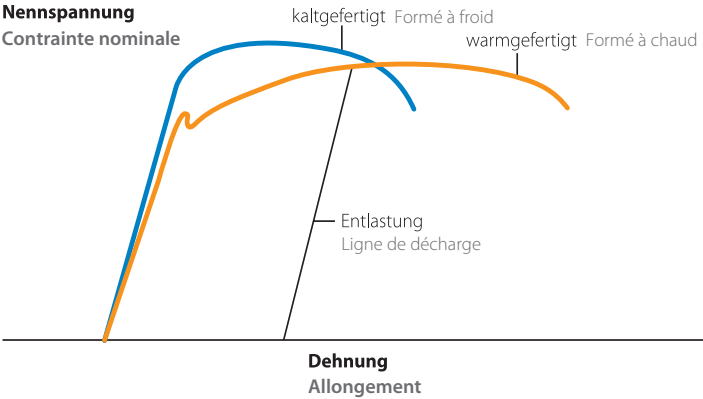
>

Abbildung 1 illustration 1



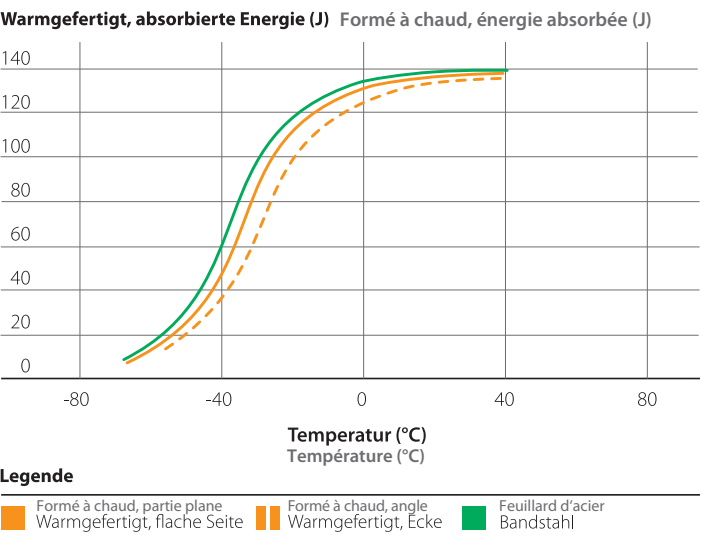
Typischer Verlauf der Härtewerte auf der Innenseite quadratischer Stahlbau-Hohlprofile.
Courbe type des valeurs de dureté sur la face interne des profils creux carrés pour charpentes métalliques.

Abbildung 2 illustration 2



Spannungs-Dehnungskurven von Proben, die den Ecken warmgefertigter und kaltgefertigter Stahlbau-Hohlprofile entnommen wurden, zeigen die unterschiedliche Duktilität.
Différence de ductilité mise en évidence par les courbes d'allongement en fonction de la contrainte des échantillons prélevés dans les angles de profils pour charpentes métalliques formés à chaud et à froid.

Abbildung 3 illustration 3



Typische Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurve von Stahlbau-Hohlprofil-Proben.
Courbe type de la résilience d'échantillons de profils creux pour charpentes métalliques en fonction de la température.

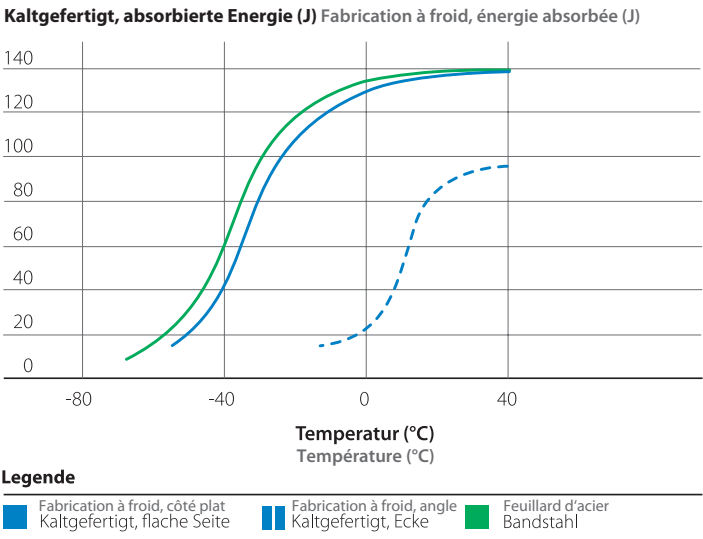
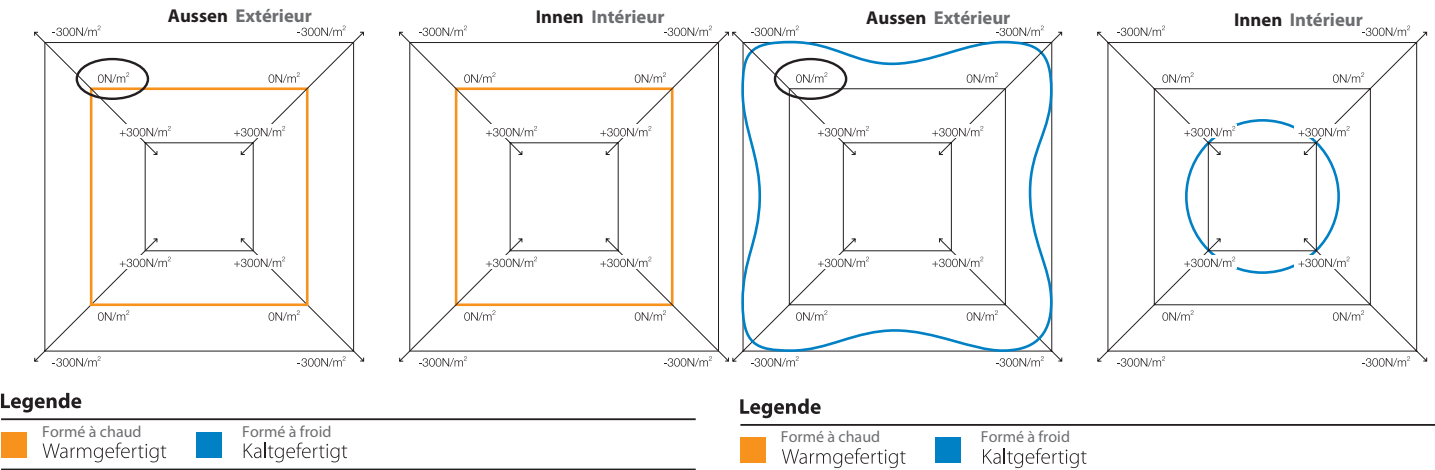
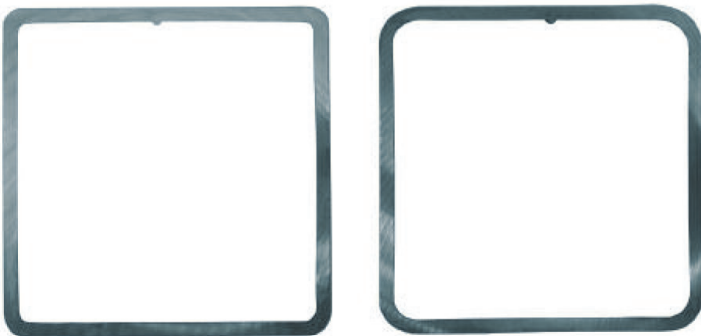


Abbildung 4 illustration 4



Verläufe typischer Eigenspannungen auf den Innen- und Aussenseiten der Hohlprofile.
Courbe type des contraintes résiduelles sur les faces internes et externes des profils creux.

Abbildung 5 illustration 5

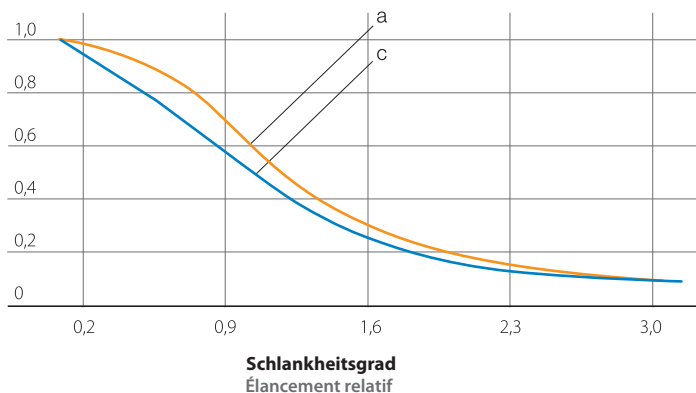


Das Foto zeigt die unterschiedlichen Querschnitte von warmgefertigten (links) und kaltgefertigten (rechts) Stahlbau-Hohlprofilen.

Comparaison entre la coupe transversale d'un profilé creux pour charpentes métalliques fabriqués à chaud (à gauche) et celle d'un profilé fabriqué à froid (à droite).

Abbildung 6 illustration 6

Abminderungsfaktoren Facteurs de réduction (%)



Legende

Formé à chaud Warmgefertigt Formé à froid Kaltgefertigt

Knickspannungslinien nach EC3 Teil 1.1. Kurvenverlauf 'a' gilt für warmgefertigte Hohlprofile und 'c' für kaltgefertigte.

Courbes flambement selon l'EC3 partie 1.1. La courbe (a) correspond aux profils formés à chaud, la courbe (c) à ceux formés à froid.

>

Querschnittswerte siehe Abbildung 5

Die Herstellung bei Normalisierungstemperatur ermöglicht engere Eckradien bei warmgefertigten Hohlprofilen. Eckrundungen mit kleinem Radius bieten bessere statische Eigenschaften, reduzierte Schweisskosten und eine attraktivere Optik. Zusätzlich lassen sich auch die Werkstoffeigenschaften voll nutzen. Die plastische Bemessung wird nicht durch einen Mangel an Duktilität beschränkt, wie dies bei Verwendung von kaltgefertigten Profilen der Fall ist.

Knickfestigkeit siehe Abbildung 6

Warmgefertigte Hohlprofile bieten eine bessere Sicherheit gegen Knicken im Vergleich zu kaltgefertigten Profilen. Die Knickfestigkeit ist um bis zu 35 % höher als bei kaltgefertigten Profilen derselben Abmessung. Bei Konstruktionen mit kaltgefertigten Profilen muss bei der Berechnung der Festigkeit eine ungünstigere Knickkurve gewählt werden. Dies berücksichtigt die Eigenspannungen und die geringere plastische Verformbarkeit des Werkstoffes.

Formbeständigkeit

Warmgefertigte Hohlprofile sind formbeständig und neigen beim Schneiden, Schweißen und sonstigen Bearbeiten nicht zu Verformungen. Beim Galvanisieren oder Schweißen in der Nähe der Ecken brauchen keine besonderen Vorkehrungen getroffen zu werden. Dagegen neigen kaltgefertigte Profile mit ihren hohen Eigenspannungen viel eher dazu, sich beim Bearbeiten und Fertigen zu verziehen.

>

PROFILS POUR LA CONSTRUCTION DE CHARPENTES MÉTALLIQUES

>

Duktilität voir illustration 2

La ductilité d'un matériau est sa capacité à se déformer plastiquement sous la charge. Les profils formés à chaud ont une résistance et une ductilité élevées ; ils conservent donc une certaine réserve d'élasticité même lorsque leur limite d'élasticité est dépassée, au niveau des assemblages par exemple. On mesure cette ductilité lors d'un essai de résistance à la rupture. Des échantillons sont prélevés dans la longueur et au centre d'une partie plane pour des profils carrés ou à une distance éloignée de la soudure pour des profils circulaires. Dans ces conditions standard d'échantillonnage, les valeurs significativement inférieures de la ductilité dans les angles et à proximité de la soudure, pour les profils formés à froid, ne peuvent pas être observées.

Résistance à la rupture voir illustration 3

Les profils creux formés à chaud ont un faible rapport limite d'élasticité / contrainte à la rupture, une bonne capacité d'absorption de l'énergie et une forte résistance à la rupture. Ces propriétés garantissent une bien meilleure tenue à la fatigue, notamment en cas de choc dynamique ou cyclique. Un essai de résilience Charpy permet de constater les valeurs de résilience élevées et uniformes même à basses températures.

Les échantillons destinés à l'essai de résilience sont prélevés dans la longueur et au centre d'une partie plane pour les profils carrés et à une distance éloignée de la soudure pour les profils circulaires. Dans ces conditions d'échantillonnage, les valeurs réduites de résistance à la rupture dans les angles et à proximité de la soudure, pour les profils creux formés à froid, ne peuvent

pas être observées. Lors de la spécification des matériaux, il est donc essentiel de tenir compte des points faibles des profils formés à froid en matière de résistance à la rupture, dans les angles et à proximité de la soudure.

Contraintes résiduelles voir illustration 4

En fin de production, les profils formés à chaud n'ont pratiquement aucune contrainte résiduelle quelle que soit la direction considérée. Celles-ci peuvent créer une rupture anticipée, surtout si elles sont associées à des tensions de retrait dues au soudage, et augmenter le risque de fissuration favorisé par le métal liquide lors de la galvanisation.

Caractéristiques géométriques des sections voir illustration 5

La mise en forme à température de normalisation permet d'obtenir des rayons d'angle plus serrés sur des

profils formés à chaud. Les arrondis d'angle d'un faible rayon ont de meilleures propriétés statiques, leurs coûts de soudage sont réduits et ils sont plus esthétiques. De plus, les propriétés du matériau peuvent être exploitées en intégralité. Leur dimensionnement plastique n'est limité par aucun manque de ductilité, contrairement aux profils formés à froid.

Résistance au flambement

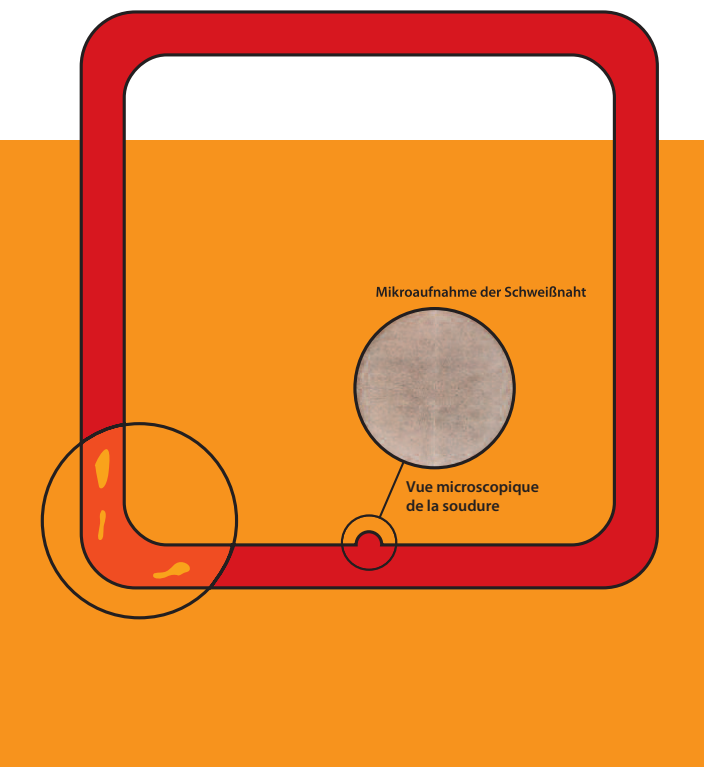
voir illustration 6

Les profils formés à chaud offrent une meilleure résistance au flambement que les profils formés à froid. Ils sont jusqu'à 35 % plus résistants au flambement que des profils formés à froid de mêmes dimensions. Il faut calculer la résistance des constructions faites de profils formés à froid avec une courbe de flambement inférieure qui permet de tenir compte des contraintes >

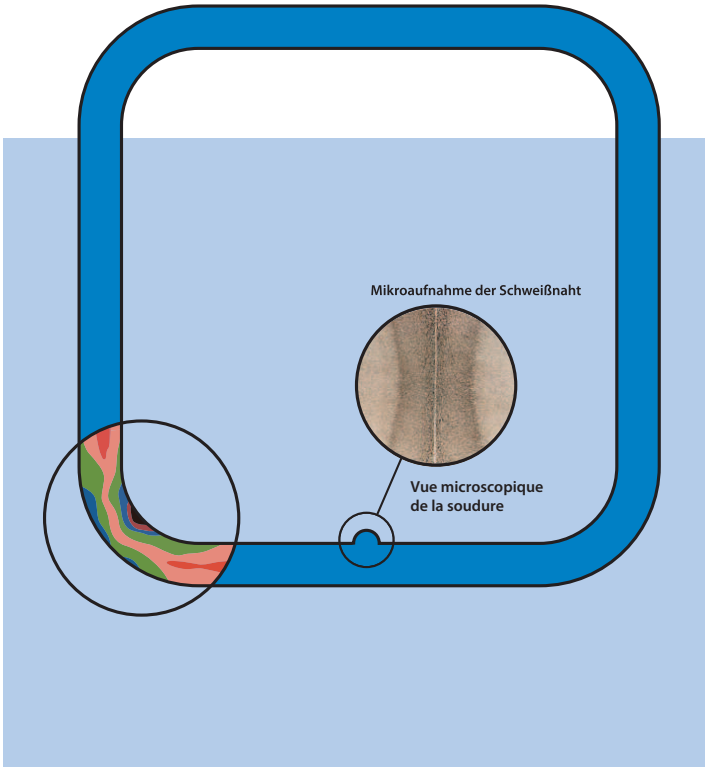
Vergleich warm- und kaltgefertigter Stahlbau-Hohlprofile

	warmgefertigt	kaltgefertigt
Fertigung	Formgebung bei Normalisierungstemperatur mit Temperaturen über 840°C.	Formgebung bei Umgebungstemperaturen.
Mikrostruktur	Gleichmässiges feinkörniges Gefüge über den gesamten Profilquerschnitt.	Ungleichmässige Korngrösse und ungleichmässiges Gefüge in den verschiedenen Querschnittsbereichen
Werkstoffprüfung	Die Ergebnisse von Werkstoffprüfungen und Probenahmen sind repräsentativ für die Eigenschaften des gesamten Profils.	Die Ergebnisse von Werkstoffprüfungen und Probenahmen sind NICHT repräsentativ für die Eigenschaften des gesamten Profils.
Homogenität	Härte- und Festigkeitseigenschaften sind über den gesamten Profilquerschnitt gleichmässig verteilt.	Härte- und Festigkeitseigenschaften sind im Profilquerschnitt NICHT gleichmässig verteilt.
Duktilität	Hervorragende Duktilität, so dass beträchtliche Reserven an Plastizität nach Überschreiten der Fließgrenze vorhanden sind.	Nach Überschreiten der Fließgrenze sind nur geringe Reserven an Plastizität vorhanden.
Bruchfestigkeit	Im gesamten Profilquerschnitt weist die Bruchfestigkeit einheitliche Werte auf.	Die Bruchfestigkeit ist im Schweißnahtbereich und im übrigen Querschnitt ungleichmässig (dasselbe gilt bei quadratischen und rechteckigen Profilen für die Eckbereiche).
Eigenspannung	Praktisch eigenspannungsfrei.	Bereiche hoher Spannungen im Querschnitt.
Querschnittswerte	Eckrundungen mit kleinen Radien und damit optimale statische Eigenschaften. Leichter zu schweißen und attraktive Optik.	Eckrundungen mit grösseren Radien als bei warmgefertigten Profilen zur Vermeidung von Sprödigkeit und damit schlechtere statische Eigenschaften.
Knickfestigkeit	Verwendung der Knickspannungslinie A des Eurocodes sowie die optimalen statischen Eigenschaften ergeben die höchste Drucktragfähigkeit.	Entsprechend der Knickspannungslinie C des Eurocodes ausgelegt mit reduzierten Querschnittswerten und damit reduzierter Drucktragfähigkeit
Formbeständigkeit	Neigen beim Erwärmen oder mechanischen Bearbeiten nicht zum Verdrehen oder Verformen.	Können aufgrund der noch vorhandenen Eigenspannungen bei der Weiterverarbeitung zu Verformungen neigen.
Brandverhalten	Die Festigkeit nimmt im Brandfalle langsam und gleichmässig ab.	Der Festigkeitsverlust kann wegen der Kaltbearbeitung und den vorhandenen Eigenspannungen unvorhersehbar sein.

>



Warmgefertigte Hohlprofile haben ein gleichmässiges Gefüge bei geringer Härte.
Structure homogène et dureté relativement faible des profils formés à chaud.



Kaltgefertigte Hohlprofile weisen ein ungleichmässiges Gefüge mit Härte-
spitzen auf.
Structure irrégulière et pics de dureté des profils formés à froid.

PROFILS POUR LA CONSTRUCTION DE CHARPENTES MÉTALLIQUES

Comparaison entre les profils creux pour charpentes métalliques formés à chaud et à froid		
	Formés à chaud	Formés à froid
Fabrication	Mise en forme à température de normalisation supérieure à 840 °C.	Mise en forme à température ambiante.
Microstructure	Structure fine et régulière sur l'intégralité du profil.	Diamètre des grains inégal, structure irrégulière autour du profil
Examen du matériau	Résultats des examens du matériau et des échantillons représentatifs des propriétés de l'ensemble du profil.	Résultats des examens du matériau et des échantillons NON représentatifs des propriétés de l'ensemble du profil.
Homogénéité	Propriétés relatives à la dureté et à la résistance réparties de façon homogène sur l'intégralité du profil.	Propriétés relatives à la dureté et à la résistance réparties de façon NON homogène autour du profil.
Ductilité	Ductilité exceptionnelle permettant de conserver des réserves importantes de plasticité au-delà de la limite d'écoulement	Faibles réserves de plasticité au-delà de la limite d'écoulement
Résistance à la rupture	Résistance à la rupture uniforme sur l'intégralité du profil	Résistance à la rupture différente au niveau de la soudure et dans les angles des profils creux carrés et rectangulaires, que dans le reste de la section.
Contrainte résiduelle	Pratiquement aucune contrainte résiduelle	Zones soumises à de fortes contraintes dans la section transversale
Caractéristiques géométriques des sections	Arrondis d'angle de faible rayon avec des propriétés statiques optimales. Plus faciles à souder et plus esthétiques.	Arrondis d'angle au rayon plus grand que sur les profils formés à chaud pour éviter de les fragiliser et de dégrader leurs propriétés statiques.
Résistance au flambement	Utilisation de la courbe de contrainte de flambement A de l'Eurocode et des propriétés statiques optimales pour une résistance à la compression des plus fortes	Comme le montre la courbe de contrainte de flambement C de l'Eurocode, valeurs de section transversale réduites et donc une résistance à la compression elle aussi réduite
Stabilité de forme	Aucune tendance au voilement ou à la déformation lors d'un échauffement ou de travaux mécaniques	En raison des contraintes résiduelles existantes, possible tendance à la déformation lors de travaux de parachèvement
Comportement au feu	En cas d'incendie, détérioration lente et régulière de la résistance	Perte de résistance potentiellement imprévisible à cause du traitement à froid et des contraintes résiduelles existantes

>

Verhalten bei hohen und niedrigen Temperaturen

Warmgefertigte Hohlprofile weisen gute Eigenschaften am oberen und unteren Ende der Temperaturskala auf. Bei niedrigen Temperaturen werden Steckgrenze, Elastizität und Bruchzähigkeit aufrecht erhalten. Bei hohen Temperaturen nehmen diese Eigenschaften nur langsam und auf voraussagbare Weise ab. Im Brandfall gewähren das duktile Verhalten und der langsamere Verlust der Materialeigenschaften in der Erwärm- und Abkühlphase erhöhte Sicherheit.

Zusammenfassung

Warmgefertigte Hohlprofile haben eine höhere Tragfähigkeit und bessere Eigenschaften bei hohen und niedrigen Temperaturen als kaltgefertigte Hohlprofile. Die Verarbeitung von warmgefertigten Hohlprofilen ist mit weniger Risiken verbunden, da sie im Vergleich zu kaltgefertigten Profilen weniger rissanfällig sind, bei der Weiterbearbeitung nicht zu Verformungen neigen und sich im Einsatz zuverlässiger verhalten. Deshalb können warmgefertigte Hohlprofile nicht von kaltgefertigten Hohlprofilen derselben Abmessung ersetzt werden, ohne den Entwurf und die Bemessung komplett zu überarbeiten.

Literatur

DIN EN 1993-1-1:2005: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

DIN EN 10210-1:2006: Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 1: Technische Lieferbedingungen

DIN EN 10210-2:2006: Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 2: Grenzabmasse, Masse und statische Werte

DIN EN 10219-1:2006: Kaltgefertigte geschweisste Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 1: Technische Lieferbedingungen

DIN EN 10219-2:2006: Kaltgefertigte geschweisste Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 2: Grenzabmasse, Masse und statische Werte

Quelle: nach Stahlbau 81 (2012), Heft 10, S. 792-795. ■

> résiduelles et de la faible ductilité du matériau.

Stabilité de forme

Les profils formés à chaud conservent leur forme même en cas de coupe, de soudage ou d'autres travaux de parachèvement. Lors d'une galvanisation ou d'un soudage à proximité des angles, aucune précaution particulière n'est requise. Par contre, de par leurs contraintes résiduelles élevées, les profils formés à froid ont tendance à se déformer lors de leur fabrication ou pendant le parachèvement.

Comportement à des températures extrêmes

Les profils formés à chaud présentent de bonnes propriétés à des températures extrêmes. A basse température, ils conservent leur limite d'élasticité, leur élasticité et leur résistance à la rupture. A des températures élevées, ces propriétés se détériorent lentement et de façon prévisible. En cas d'incendie, le comportement ductile et la lente réduction des propriétés du matériau assurent une sécurité accrue lors des phases de chauffage et de refroidissement.

Synthèse

Les profils creux formés à chaud ont une capacité de charge plus élevée et de meilleures propriétés à des températures extrêmes que les

profils creux formés à froid. Le parachèvement des profils formés à chaud présente moins de risques car ils sont moins sensibles à la fissuration que les profils formés à froid, ils n'ont pas tendance à se déformer lors de travaux de parachèvement ultérieurs et se comportent de façon plus fiable en pratique. C'est pourquoi on ne peut pas remplacer des profils creux formés à chaud par des profils creux formés à froid de mêmes dimensions sans revoir complètement la conception et les calculs. ■

Références

DIN EN 1993-1-1:2005 : Eurocode 3 : calcul des structures en acier – Partie 1-1: règles générales et règles pour les bâtiments

DIN EN 10210-1:2006 : profils creux de construction finis à chaud en aciers non alliés et à grains fins – Partie 1 : conditions techniques de livraison

DIN EN 10210-2:2006 : profils creux de construction finis à chaud en aciers non alliés et à grains fins – Partie 2 : tolérances, dimensions et caractéristiques de profils

DIN EN 10219-1:2006 : profils creux de construction soudés, formés à froid en aciers non alliés et à grains fins – Partie 1 : conditions techniques de livraison

DIN EN 10219-2:2006 : profils creux de construction soudés, formés à froid en aciers non alliés et à grains fins – Partie 2 : tolérances, dimensions et caractéristiques de profils

Source : Stahlbau 81 (2012), livret 10, pp. 792-795.