

# **Technische Information 3**

SCHWEISSEN, BIEGEN UND KORROSIONSSCHUTZ VON MSH-PROFILEN MIT KREISFÖRMIGEN, QUADRATISCHEN UND RECHTECKIGEN QUERSCHNITTEN



# Schweißen, Biegen und Korrosionsschutz von MSH-Profilen

Dipl.-Ing. Dipak Dutta überarbeitet von M.Sc. Daniel Stroetgen und Dipl.-Ing. Boris Straetmans

Wegen ihrer geschlossenen Form, die eine Besonderheit unter den Stahlprofilen darstellt, sind Planung und Fertigung von MSH-Konstruktionen spezifischen Maßnahmen unterworfen. Es sind hierfür Kenntnisse erforderlich, die zwar nicht arundlegend von den üblichen Blechund Profilkonstruktionen abweichen: man hat jedoch Rücksicht auf die besonderen Gegebenheiten der Querschnittsform zu nehmen, um optimale technische Durchführbarkeit und Sicherheit sowie Wirtschaftlichkeit zu erzielen.

Das Schweißen und Biegen, sowie das Verzinken und Applizieren von Korrosionsschutzsystemen, stellen wichtige Verarbeitungstechniken bei Hohlprofilkonstruktionen dar. Insbesondere nimmt das Schweißen unter allen Fügetechniken bei

MSH-Konstruktionen wie z. B. Schrauben und Kleben eine vorrangige Stellung ein. Es wird mit dieser Broschüre angestrebt, Hinweise zur schweißgerechten Gestaltung und Fabrikation von Hohlprofilen zu geben, um damit den Einsatz im Stahlund Maschinenbau zu erleichtern. Viele Architekten benutzen auch gebogene Hohlprofile, um gestalterische Vorstellungen in Form von Gewölben und Kuppeln zu verwirklichen. Auch konstruktive und verarbeitungstechnische Vorteile gebogener MSH-Profile werden beispielsweise bei Offshore-Konstruktionen für die Windindustrie genutzt. Dies erfordert die Entwicklung geeigneter Biegetechniken. Diese Broschüre beschreibt auch hier den Stand der Technik.

#### Überarbeitete Ausgabe 2019







UMWELT-PRODUKT-DEKLARATION für MSH-Profile nach ISO 14025 und EN 15804

Institut Bauen

Deklarationsnummer und Umwelt e.V. EPD-VAL-20150248-IBB1-DE

Vallourec ist Mitglied des CIDECT (Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire – Internationales Komitee für Forschung und Entwicklung von Hohlprofilkonstruktionen).



www.cidect.org

Weitere Druckschriften zur Anwendungstechnik von MSH-Profilen siehe "Technische Information Nr. 1"

# Inhalt

#### Schweißen und Biegen von MSH-Profilen

1	Einleitung	4
2	Werkstoffe und deren Schweißeignung	5
2.1	Sonderstähle	12
3	Schweißverfahren	13
3.1	Lichtbogenhandschweißen	
	(111) mit umhüllten Elektroden	13
3.2	Metall Schutzgasschweißen (13)	14
3.2.1	MIG-Verfahren (Metall-Inertgasschweißen mit Massivdrahtelektrode, 131)	15
3.2.2	MAG-Verfahren (Metall-Aktivgasschweißen, 135, 136, 138)	15
3.3	WIG-Verfahren (Wolfram- Inertgasschweißen, 141)	16
3.4	Unterpulverschweißen	
	(UP-Schweißen, 12)	17
3.5	Gasschmelzschweißen mit	
	Sauerstoff-Acetylen-	17
4	Flamme (311)	17
4	deschweißte Konstruktionen	19
5	Schweißnahtausführung	23
5.1	Stumpfnahtstöße	23
5.2	Schweißnähte in Knotenpunkte	 en
0.2	von MSH-Fachwerken	25
6	Fertigung von geschweißten Konstruktionen aus	
	MSH-Profilen	31
6.1	Allgemeines	31
6.2	Wärmebehandlung vor und nach dem Schweißen	31
6.3	Heftschweißen	31
6.4	Zusammenbau von geschweißten	
	MSH-Konstruktionen	32
6.5	Schweißfolge	32
6.6	Schweißeigenspannungen und Verformungen sowie	22
67		25
6.9	Fignungsprüfung von	35
0.0	Schweißern	36
6.9	Schweißen metallbeschichtete	r
	MSH-Profile	36
7	Rechnerische Auslegung der Schweißnähte	37

7.1	Schweißnahtdicke	37
7.2	Schweißnahtlänge	
	und -fläche	38
7.3	Durchgeschweißte Stumpfnaht	39
7.4	Nicht durchgeschweißte	
	Stumpfnaht	39
7.5	Kehlnähte	39
7.5.1	Richtungsbezogenes Verfahren	39
7.5.2	Vereinfachtes Verfahren	39
7.6	Weitere Hinweise	40
8	Literatur	41
Biege	en von warmgefertigten	
MSH	-Profilen	42
Inhalt		
1	Einleitung	42
2	Biegeverfahren und	
_	Biegeradien	43
3	Referenzen	58
Korro	osionsschutz von	
MSH	-Konstruktionen	59
Inhalt		
1	Einführung	59
2	Verhalten von	
	Stahlhohlprofilen unter Korrosionsbeanspruchung	60
2.1	Außenkorrosion von Stahlhohlprofilbauteilen	60
2.2	Innenkorrosion von Hohlprofilbauteilen in	
	Stahlkonstruktionen	62
2.3	Außenkorrosion	
	von Hohlprofilbauteilen	
	in Stahlkonstruktionen	64
3	Korrosionsschutzmaßnahmen	65
3.1	Beschichtungen	65
3.2	Fertigungsbeschichtungen	66
3.3	Metallische Überzüge	67
3.3.1	Feuerverzinkung	67
3.3.2	Elektrolytische Zinküberzüge	69
	Werkstoffe	70
3.3.3	Thermische Spritzüberzüge	70
3.3.4	Duplex-Beschichtung [19]	70
3.4	Elektrochemischer	
	Korrosionsschutz	70
3.5	Einsatz von MSH-Profilen aus wetterfesten Stählen	70
4	Literatur	71

# 1 Einleitung

Der Bereich der Stahlverarbeitung. der von der Schweißtechnik beherrscht wird, umfaßt mehr als 60% des gesamten Walzstahlsektors. Grenzen der schweißtechnischen Verarbeitung von MSH-Profilen sind praktisch nur durch spezifische Belange der Schweißnahtvorbereitung und Schweißdurchführung zu berücksichtigen.

Vor allem muss das Schweißen immer auch im Rahmen anderer Fügetechniken gesehen werden. Eine Entscheidung zur Wahl des technisch geeignetsten und wirtschaftlichsten Verfahrens ist dann erst möglich. Bei der Betrachtung von Material und Profilform sowie der üblichen Verbindungstypen ist jedoch klar, dass unter allen Fügetechniken, wie z. B. Schweißen, Verschrauben, Kleben, Nieten usw., das Schweißen die wichtigste Rolle in der Fertigung von Hohlprofilkonstruktionen spielt.

Als geschlossene Profile sind diese nur von außen zugänglich, von innen jedoch häufig nur beschränkt. Eine bessere Zugänglichkeit an Rohrknoten kann z. B. durch Handlöcher, geeignete Zusammenbaufolge oder durch die Stummeltechnik erreicht werden. Bei der Stummeltechnik werden die Rohrknoten separat aus einzelnen kürzeren Rohrstücken gefertigt und anschließend werden die Gurte und Streben zwischen die Rohrknoten einseitig angeschweißt.

Wegen dieser Eigenschaft einseitiger Zugänglichkeit sind zwar unmittelbar miteinander verschweißte Verbindungen von Hohlprofilen leicht durchführbar, stellten aber für eine unmittelbare Verschraubung dieser Bauteile ein Problem dar, da Schrauben wegen der Unzugänglichkeit der Innenseite nicht gesichert werden können. Es werden daher überwiegend nur mittelbare Schraubverbindungen erstellt, wobei zuerst Platten oder offene Profile an Hohlprofile geschweißt und diese dann miteinander verschraubt werden müssen.

Zur besseren Anschaulichkeit werden in Abb. 1 eine Stoßverbindung und ein Fachwerkknoten in geschweißter und geschraubter Ausführung gezeigt, wie sie in der Praxis häufig angewendet werden. In der Abbildung wird deutlich, dass der Fertigungsaufwand einer Schraubverbindung von Hohlprofilen größer ist als für eine Schweißverbindung.

- a1) Stoßverbindung
   Hohlprofile unmittelbar miteinander zusammengeschweißt
- a<sub>2</sub>) Stoßverbindung
   Hohlprofile mittelbar über Flanschplatten zusammengeschraubt



 b<sub>1</sub>) Fachwerkknoten
 Unmittelbar miteinander zusammengeschweißte Gurt- und Diagonalstäbe aus Hohlprofilen

b<sub>2</sub>) Fachwerkknoten Platten an Gurt- und Diagonalstäbe geschweißt und dann zusammenge-

schraubt



Abb. 1: Stoßverbindung und Fachwerkknoten in geschweißter und geschraubter Ausführung

Aus diesen Beispielen geht hervor, dass auch zur Herstellung von Schraubverbindungen der Einsatz von Schweißverfahren erforderlich ist. Konsequenterweise ist die Anzahl der Fabrikationsschritte bei der Schraubverbindung arbeits- und kostenaufwendiger als Konstruktionen aus unmittelbar zusammengeschweißten Hohlprofilen. Trotzdem kann man auf sie keinesfalls verzichten, da sie als Montageverbindungen auf der Baustelle ausschlaggebende Vorteile gegenüber Schweißverbindungen bringen. Beispielsweise werden bei temporären Brücken häufig geschraubte Hohlprofilbrücken verwendet. In diesem Fall ist es nur notwendig, die in der Werkstatt vorgefertigten Konstruktionsteile an der Baustelle durch Verschraubung zusammen zu montieren. Die Anwendung von Klebetechniken bei

Hohlprofilkonstruktionen im Stahlbau ist kaum, wenn überhaupt, zu finden. Aktuelle Forschungsvorhaben befassen sich mit Klebverbindungen zwischen Kreishohlprofilen und Stahlgussknoten [1], jedoch haben diese in der Praxis bisher keine Impulse zu deren Anwendung in Hohlprofilkonstruktionen gegeben.

In Fachwerken werden die Bauteile, Gurte, Diagonalstreben und Pfosten aus Hohlprofilen grundsätzlich unter Axialdruck und -zug beansprucht. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, Fachwerke aus Hohlprofilen zu bauen, da diese im Hinblick auf Druckund Torsionsbeanspruchungen den offenen Profilen überlegen sind.

# 2 Werkstoffe und deren Schweißeignung

MSH-Profile werden gemäß DIN EN 10210-1:2016-01 - Entwurf [2] und DIN EN 10225-3:2017-09 [3] geliefert.

Die Stahlherstellung erfolgt nach modernen Erschmelzungsverfahren. Die von Vallourec eingesetzten Stähle sind im allgemeinen durch niedrigere Gehalte der stahlbegleitenden Elemente Phosphor, Schwefel und Stickstoff im Vergleich zu den einschlägigen Normen gekennzeichnet (teils aber auch doppelberuhigt mit Al und Si, siehe Tabelle unten), werden im allgemeinen mit Aluminium beruhigt vergossen und weisen einen hohen oxidischen Reinheitsgrad auf. Sie besitzen eine hohe Zähigkeit. Weitere Informationen zu der Herstellung von warmgefertigten Hohlprofilen sind der Vallourec-Broschüre "Technische Information 1" zu entnehmen.

Die Tabellen 1 bis 5 und 7 geben einen Über- blick über die laut Normen zur Anwendung kommenden Stahlsorten im allgemeinen Stahlbau entsprechend den verschiedenen Festigkeitsklassen. Aufgrund des hohen Anteils der schweißtechnischen Fertigung und erhöhten Materialanforderungen im Offshore-Bereich, besitzen Stähle der prEN 10225-3:2018 niedrigere Gehalte an Schwefel, Phosphor, Kohlenstoff. Diese Stähle sind gesondert in den Tabellen 6 und 8 bis 10 aufgeführt.

Die Angaben zur chemischen Zusammensetzung stellen lediglich die normativen Richtwerte dar. Alle Stahlsorten werden heute legierungstechnisch so eingestellt, dass sie in Bezug auf optimale Schweißeigenschaften ein möglichst niedriges Kohlenstoffäquivalent und hier insbesondere einen möglichst niedrigen Kohlenstoffgehalt aufweisen. Diese Maßnahmen dienen in erster Linie der Vermeidung von Kaltrissen beim Schweißen.

Kaltrisse beim Schweißen können entstehen, wenn eine der drei Größen

→ Härte in der Schwei
ßnaht, besonders in der Wärmeeinflusszone, → Wasserstoffeintrag in die Schweißnaht,
 → Schweißeigenspannung,

bei gegebenen übrigen Größen einen kritischen Wert annimmt. Über die Vermeidung von Kaltrissen beim Schweißen von Feinkornbaustählen, zu denen die hier eingesetzten Stähle zu zählen sind, gibt DIN EN 1011 [4] detailliert Auskunft. Die Stähle sind nach allen Schmelz- und Pressschweißverfahren gut schweißbar.

Als wirksamste Maßnahme zur Vermeidung von Kaltrissen kommt das Vorwärmen in Betracht. Zudem ist die Reduktion des Wasserstoffanteils eine sehr wichtige Einflußgröße zur Vermeidung von Wasserstoffinduzierten Spannungsrissen in der WEZ. Da bei der Ausführung von Konstruktionen aus MSH-Profilen bevorzugt die sehr wasserstoffarme Schutzgasschweißtechnologie zur Anwendung kommt, wird Vorwärmen nur bei den höherfesten Güten und hier erst bei relativ dicken Wänden erforderlich (siehe besondere Ausführungen in Kapitel 6.2).

Stahlsorte			Massenanteile in % max.								
Kurzname	Werkstoff- nummer	Desoxi- dations-	C für Nennwand- dicken in mm		Si	Mn	Р	S	Alges min. <sup>2)</sup>		
		art 1)	≤ 40	> 40 ≤ 120							
S235JRH	1.0039	FF	0,17	0,20	-	1,40	0,040	0,040	0,020		
S275J0H	1.0149	FF	0,20	0,22	-	1,50	0,035	0,035	0,020		
S275J2H	1.0138	FF	0,20	0,22	-	1,50	0,030	0,030	0,020		
S355J0H	1.0547	FF	0,22	0,22	0,55	1,60	0,035	0,035	0,020		
S355J2H	1.0576	FF	0,22	0,22	0,55	1,60	0,030	0,030	0,020		
S355K2H	1.0512	FF	0,22	0,22	0,55	1,60	0,030	0,030	0,020		

# Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung nach der Schmelzanalyse von Hohlprofilen aus unlegierten Baustählen nach prEN 10210-1:2016

1) Die Desoxidationsart ist wie folgt gekennzeichnet:

FF = Vollberuhigter Stahl mit einem ausreichenden Anteil an stickstoffabbindenden Elementen (z. B.: min. 0,020 % Alges, oder 0,015 % Allöslich).

2) Falls der Stahl genügend stickstoffabbindende Elemente enthält, gilt Alges % bei einem Verhältnis Al/N 2:1 nicht. Die stickstoffabbindenden Elemente sind in der Prüfbescheinigung anzugeben.

# Tabelle 2: Höchstwerte für das Kohlenstoffäquivalent (CEV) nach der Schmelzenanalyse von unlegierten Hohlprofilen nach prEN 10210-1:2016

Stah	Isorte	Max. CEV (%) für Nennwanddicken in mm							
Kurzname	Werkstoff- nummer	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 65	> 65 ≤ 120				
S235JRH	1.0039	0,37	0,39	0,41	0,44				
S275J0H	1.0149	0,41	0,43	0,45	0,48				
S275J2H	1.0138	0,41	0,43	0,45	0,48				
S355J0H	1.0547	0,45	0,47	0,50	0,53				
S355J2H	1.0576	0,45	0,47	0,50	0,53				
S355K2H	1.0512	0,45	0,47	0,50	0,53				

## Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung von normalgeglühten/normalisierend gewalzten Hohlprofilen - Schmelzenanalyse für Erzeugnisdicken ≤ 65 mm nach prEN 10210-1:2016

Stah	lsorte	Deseri					Massenanteile
Kurzname	Werkstoff- nummer	dations- art <sup>1)</sup>	C max.	Si max.	Mn	P max.	S max.
S275NH	1.0493		0,20		0,50 bis 1,50	0,030	0,025
S275NLH	1.0497			0,40		0,025	0,020
S355NH	1.0539		0.00	0.50	0,90 bis 1,65	0,030	0,025
S355NLH	1.0549		0,20	0,50		0,025	0,020
S420NH	1.8750	FF	0.00	0.00	1,00	0,030	0,025
S420NLH	1.8751		0,22	0,60	bis1,70	0,025	0,020
S460NH	1.8953	]	0.00	0.00	1,00 bis 1,70	0,030	0,025
S460NLH	1.8956		0,22	0,22 0,60		0,025	0,020

1) Die Desoxidationsart ist wie folgt gekennzeichnet:

FF = Vollberuhigter Stahl mit einem ausreichenden Anteil an stickstoffabbindenden Elementen und zur Erzeugung einer Feinkornstruktur.

2) Falls der Stahl genügend stickstoffabbindende Elemente enthält, gilt min. Al<sub>nes</sub> nicht

# Tabelle 4: Höchstwerte für das Kohlenstoffäquivalent (CEV) nach der Schmelzenanalyse von<br/>normalgeglühten/normalisierend gewalzten Hohlprofilen nach prEN 10210-1:2016

Stah	Isorte	Max. CEV (%) für für Nenndicken von		
Kurzname	Kurzname Werkstoff- nummer		16 < t ≤ 65 mm	
S275NH	1.0493	0.40	0.40	
S275NLH	1.0497	0,40	0,40	
S355NH	1.0539	0.40	0.45	
S355NLH	1.0549	0,43	0,45	
S420NH	1.8750	0.50	0.50	
S420NLH	1.8751	0,50	0,52	
S460NH	1.8953	0.50	0.55	
S460NLH	1.8956	0,53	0,55	

in %	n %										
Cr max	Mo max.	Ni max.	Alges <sup>2)</sup> min.	Cu max. <sup>3)</sup>	Nb max.	Ti max.	V max.	N max.			
0,30	0,10	0,30	0,020	0,55	0,050	0,050	0,05	0,015			
0,30	0,10	0,50	0,020	0,55	0,050	0,050	0,20	0,015			
0,30	0,10	0,80	0,020	0,55	0,050	0,050	0,20	0,025			
0,30	0,10	0,80	0,020	0,55	0,050	0,050	0,20	0,025			

## Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung für vergütete Hohlprofile - Schmelzenanalyse für Erzeugnisdicken ≤ 65 mm nach prEN 10210-1:2016 (Auszug)

Stahl	sorte	Decevi					Massenanteile
Kurzname	Werkstoff- nummer	dations- art <sup>1)</sup>	C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.
S460QH	1.8608					0,025	0,015
S460QLH	1.8606	FF	0,25	0,80	1,70	0,020	0,010
S460QL1H	1.8616					0,020	0,010
S550QH	1.8604		0,25	0,80	1,70	0,025	0,015
S550QLH	1.8626	FF				0,020	0,010
S550QL1H	1.8686					0,020	0,010
S620QH			0,25		1,70	0,025	0,015
S620QLH		FF		0,80		0,020	0,010
S620QL1H						0,020	0,010
S690QH	1.8631		0,25	0,80	1,70	0,025	0,015
5690QLH	1.8628	FF				0,020	0,010
S690QL1H	1.8688					0,020	0,010
S770QH						0,025	0,015
S770QLH		FF	0,25	0,80	1,70	0,020	0,010
S770QL1H						0,020	0,010
S890QH						0,025	0,015
S890QLH		FF	0,25	0,80	1,70	0,020	0,010
S890QL1H						0,020	0,010
S960QH		EE	0.05	0.00	1.70	0,025	0,015
S960QLH		ГГ	0,20	0,00	1,70	0,020	0,010

1) Abhängig von der Dicke der Erzeugnisse und den Herstellbedingungen darf der Hersteller zur Erzielung der vorgeschriebenen Eigenschaften eines oder mehrere Legierungselemente bis zu den hier angegebenen Höchstwerten dem Stahl zusetzen.

2) Die Desoxidationsart ist wie folgt gekennzeichnet:

FF = Vollberuhigter Stahl mit einem ausreichenden Anteil an stickstoffabbindenden Elementen und zur Erzeugung einer Feinkornstruktur.

# Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung der normalgeglühten/normalisierend gewalzten Stähle (Schmelzen- und Stückanalyse) nach prEN 10225-3:2017

Stahl	sorte	Massenanteile							
Kurzname	Werkstoff- nummer	C₫	Si	Mn	Р	s	Cr		
S355NHHO (S355G1+N)	1.8814 (1.8814+N)	0,20	0,50	0,90 bis 1,65	0,035	0,030	0,30		
S355NLHHO (S355G14+N S355G15+N)	1.1182 (1.1182+N 1.1184+N)	0,18	0,15 bis 0,55	1,60	0,025	0,015	0,25		

a Höchstwerte, falls nicht anders angegeben.

b Die Anteile der Begleitelemente Arsen, Antimon, Zinn, Blei, Bismut, Calcium und Bor dürfen die folgenden Werte nicht überschreiten: 0,03 % As, 0,010 % Sb, 0,020 % Sn, 0,010 % Pb, 0,010 % Bi, 0,005 % Ca und 0,0008 % B. Diese Elemente müssen einmal je 5 000 to bei jedem Herstellwerk überprüft werden und sind in der Schmelzenanalyse anzugeben, falls die Option 7 verlangt wurde.

in % <sup>1)</sup>	in % <sup>1)</sup>										
Cr max.	Mo max.	Ni max.	Cu max.	Nb max. <sup>3)</sup>	Ti max. <sup>3)</sup>	V max. <sup>3)</sup>	W max.	Zr max. <sup>3)</sup>	N max.	B max.	
1,50	0,70	2,00	0,50	0,06	0,05	0,16	1,50	0,15	0,020	0,0050	
1,50	0,70	2,00	0,50	0,06	0,05	0,16	1,50	0,15	0,020	0,0050	
1,50	0,70	2,00	0,50	0,06	0,05	0,16	1,50	0,15	0,020	0,0050	
1,50	0,70	2,00	0,50	0,06	0,05	0,16	1,50	0,15	0,020	0,0050	
1,50	0,70	2,00	0,50	0,06	0,05	0,16	1,50	0,15	0,020	0,0050	
1,50	0,70	2,00	0,50	0,06	0,05	0,16	1,50	0,15	0,020	0,0050	
1,50	0,70	2,00	0,50	0,06	0,05	0,16	1,50	0,15	0,020	0,0050	

3) Es müssen mindestens 0,015 % von kornfeinenden Elementen zugesetzt werden, Aluminium ist eins davon. Der Mindestanteil von 0,015 % bezieht sich auf Allös. Dieser Wert gilt als erreicht, wenn der Wert von Alges k 0,018 % beträgt. In strittigen Fällen ist der Anteil an Allös zu bestimmen.

in % <sup>a, b</sup>	in % <sup>a, b</sup>											
Мо	Ni	Cu	Nb	Ti <sup>3)</sup>	v	AI <sub>tot</sub> c	N	В	Nb+V	Nb+V+Ti		
0,10	0,50	0,35	0,050	0,030	0,120	min. 0,020	0,015	-	-	_		
0,08	0,30	0,35	0,050	0,020	0,120	0,020 bis 0,060	0,020	-	0,12	0,14		

c Das Verhältnis Gesamtaluminium zu Stickstoff muss mindestens 2:1 betragen. Falls andere stickstoffabbindenden Elemente zugesetzt werden, gelten der Mindestaluminiumanteil und das Al/N Verhältnis nicht.

Stah	Isorte	Max. CEV (%) für	für Nenndicken von	
Kurzname	Werkstoff- nummer	t ≤ 16 mm	16 < t ≤ 65 mm	
S460QH	1.8608			
S460QLH	1.8606	0,47	0,47	
S460QL1H	1.8616			
S550QH	1.8604			
S550QLH	1.8626	0,65	0,65	
S550QL1H	1.8686			
S620QH				
S620QLH		0,65	0,65	
S620QL1H				
S690QH	1.8631			
S690QLH	1.8628	0,65	0,65	
S690QL1H	1.8688			
S770QH				
S770QLH		0,65	0,65	
S770QL1H				
S890QH				
S890QLH		0,72	0,72	
S890QL1H				
S960QH		0.00	0.00	
S960QLH		0,82	0,82	

# Tabelle 7: Höchstwerte für das Kohlenstoffäquivalent (CEV) nach der Schmelzenanalyse von vergüteten Hohlprofilen nach prEN 10210-1:2016 (Auszug)

# Tabelle 8: Höchstwert des Kohlenstoffäquivalents (CEV) für normalgeglühte/normalisierend<br/>gewalzte Stähle nach der Schmelzen- und Stückanalyse nach prEN 10225-3:2018

Stal	hlsorte	CEV Ho	hlprofile	Pcm Hohlprofile			
Kurzname	Werkstoff- nummer	t ≤ 40	t ≤ 40	40 < t ≤ 65			
S355NHHO (S355G1+N)	1.8814 (1.8814+N)	0,43	0,45	0,25	0,28		
S355NLHHO (S355G13+N S355G14+N)	1.1182 (1.1182+N 1.1184+N)	0,43	0,45	0,25	0,28		

Stahls	sorte	Massenanteile in % <sup>a, b</sup>																	
Kurzname	Werkstoff- nummer	Cd	Si	Mn	Р	s	Cr	Мо	Ni	Cu	Nb	Ti <sup>3)</sup>	v	w	Al <sub>tot</sub> c	N	Be	Nb+V	Nb+ V+Ti
S355QLHHO (S355G13+QT S355G14+QT)	1.1184 (1.1182+QT 1.1184+QT)	0,18	0,15 bis 0,55	1,60	0,025	0,015	0,25	0,15	0,30	0,35	0,050	0,020	0,10	-	0,020 bis 0,060	0,014	-	0,10	0,12
S420QLHHO (S420G5+QT S420G6+QT)	1.8852 (1.8853+QT 1.8852+QT)	0,16	0,15 bis 0,55	1,00 bis 1,65	0,025	0,015	0,30	0,25	0,65	0,30	0,050	0,040	0,10	-	0,020 bis 0,060	0,014	-	0,10	0,12
S460QLHHO (S460G5+QT S460G6+QT)	1.8885 (1.8885+QT 1.8884+QT)	0,16	0,15 bis 0,55	1,00 bis 1,65	0,025	0,015	0,30	0,25	0,65	0,30	0,050	0,040	0,10	-	0,020 bis 0,060	0,014	-	0,10	0,12
S550QLHHO	1.8669	0,18	0,55	1,70	0,025	0,015	0,30	0,60	1,00	1,00	0,050	0,050	0,14	1,50	0,020 bis 0,060	0,014	-	0,15	0,20
S690QLHHO	1.8671	0,18	0,55	1,70	0,025	0,015	0,80	0,60	1,00	1,00	0,050	0,050	0,14	1,50	0,020 bis 0,060	0,020	-	0,15	0,20
S770QLHHO	1.8672	0,18	0,55	1,70	0,025	0,015	0,80	0,60	1,00	1,00	0,050	0,050	0,14	1,50	0,020 bis 0,060	0,020	-	0,15	0,20

# Tabelle 9: Chemische Zusammensetzung der vergüteten Stähle (Schmelzen- und Stückanalyse) nach prEN 10225-3:2018

a Höchstwerte, falls nicht anders angegeben.

- b Die Anteile der Begleitelemente Arsen, Antimon, Zinn, Blei, Bismut, Calcium und Bor dürfen die folgenden Werte nicht überschreiten: 0,03 % As, 0,010 % Sb, 0,020 % Sn, 0,010 % Pb, 0,010 % Bi, 0,005 % Ca und 0,0008 % B. Diese Elemente müssen einmal je 5 000 to bei jedem Herstellwerk überprüft werden und sind in der Schmelzenanalyse anzugeben, falls die Option 7 verlangt wurde.
- c Das Verhältnis Gesamtaluminium zu Stickstoff muss mindestens 2:1 betragen. Falls andere stickstoffabbindenden Elemente zugesetzt werden, gelten der Mindestaluminiumanteil und das Al/N Verhältnis nicht.
- d Für HFW Hohlprofile für die Sorten S460 bis S550 C max = 0,20 % und für die Sorten S620 bis S770 C max = 0,25 %.
- e Für HFW Hohlprofile für die Sorten S500 und höher ist B max = 0,0025%.

Stah	Isorte	CEV Ho	hlprofile	Pcm Hohlprofile								
Kurzname	Werkstoff- nummer	t ≤ 40	40 < t ≤ 65	t ≤ 40	40 < t ≤ 65							
S355QLHHO	1.1184											
(S355G13+QT	(1.1182+QT	0,43	0,45	0,25	0,28							
S355G14+QT)	1.1184+QT)											
S420QLHHO	1.8852											
(S420G5+QT	(1.8853+QT	0,43	0,45	0,25	0,28							
S420G6+QT)	1.8852+QT)											
S460QLHHO	1.8885											
(S460G5+QT	(1.8885+QT	0,43	0,45	0,25	0,28							
S460G6+QT)	1.8884+QT)											
S550QLHHO		0,54	0,60	0,30	0,32							
S690QLHHO	1.8671	0,65	0,70	0,33	0,35							
S770QLHHO		0,70	0,75	0,33	0,35							

## Tabelle 10: Höchstwert des Kohlenstoffäquivalents (CEV) für vergütete Stähle nach der Schmelzen- und Stückanalyse nach prEN 10225-3:2018

# 2.1 Sonderstähle

Hochfeste Sondergüten aus der Oceanfit<sup>®</sup>-, Forterior<sup>®</sup>und FineXcell<sup>®</sup>-Serie

MSH-Profile aus der Oceanfit<sup>®</sup>-Serie werden für zahlreiche Konstruktionsanwendungen im Offshore-Bereich bei tiefen Einsatztemperaturen und gleichzeitig extremen Umweltbedingungen vorgesehen. Hingegen werden Hohlprofile aus der Forterior<sup>®</sup>- und FineXcell<sup>®</sup>-Serie vorzugsweise im Fahrzeugbau, Landmaschinenbau und im allgemeinen Maschinenbau verwendet.

Beim Einsatz von MSH-Profilen aus diesen Stählen können für die gleichen Beanspruchungen kleinere Querschnittsflächen als bei Profilen aus konventionellen Baustählen gewählt werden. So können Eigengewicht und Raumbedarf von Konstruktionen noch weiter als ohnehin mit MSH-Profilen möglich, verringert werden.

Hochfeste Oceanfit<sup>®</sup>-, Forterior<sup>®</sup>- und FineXcell<sup>®</sup>-Stähle ermöglichen somit erhebliche Gewichtseinsparungen bei gleichbleibend hoher Traglast.

Neben der Festigkeitssteigerung erhalten die Forterior<sup>®</sup>- und FineXcell<sup>®</sup>-Stähle Mikrolegierungselemente wie Vanadium, Niob und Aluminium, die mit geregelten Stickstoffgehalten von max. 0,20 % zur Ausscheidung kornfeinender und damit zähigkeitssteigernder Nitrid- und Karbonitridauscheidungen führen. Diese Ausscheidungen sind anlaßstabil und verzögern bei Temperatureinfluß, z.B. in der WEZ, die Kornvergröberung und wirken einer Schweißnahtversprödung entgegen. Der Stickstoffgehalt von max. 0,020 % wird zu Vanadin-, Niob- und/oder Aluminiumnitriden abgebunden. Dadurch ist sichergestellt, dass der Stickstoff nicht in freier Form vorliegt. MSH-Profile aus den hochfesten Sondergüten Oceanfit®, Forterior® und FineXcell® entsprechen den Anforderungen nach EN 10 210. Die hochfesten Offshore Oceanfit®-Stähle erfüllen und übertreffen die Anforderungen der Offshoreregelwerke DNV GL, ABS, API 5L und prEN 10225-3. Bei Lieferung wird ein Abnahmeprüfzeugnis nach EN 10 204 [5] 3.1 (Werksabnahme) oder nach Kundenwunsch 3.2 (Fremdabnahme) ausgestellt, das die Prüfergebnisse für die Lieferung enthält.

# 3 Schweißverfahren

Die Schweißtechnik nimmt sowohl bei der Herstellung von Hohlprofilen aus Stahlbändern und -blechen als auch bei dem Zusammenfügen von Hohlprofilbauteilen in Stahlkonstruktionen, d. h. der Verbindungsschweißung, eine vorrangige Stellung ein. Die schweißtechnischen Fertigungsverfahren für kreisförmige und rechteckige Hohlprofile sind in der Vallourec-Broschüre "Technische Information 1" beschrieben. Die vorliegende Broschüre behandelt die Verbindungsschweißverfahren, die bei Hohlprofilkonstruktionen vornehmlich angewendet werden. Die schweißtechnischen Anforderungen für Hohlprofilkonstruktionen weichen im allgemeinen nicht von denen für übliche Blech- und Profilkonstruktionen ab. Es muss allerdings besondere Sorgfalt auf die Gegebenheiten der Querschnittsform gelegt werden. Darauf wird in den nachfolgenden Abschnitten eingegangen.

Das Verbindungsschweißen von Hohlprofilen gehört überwiegend zur Gruppe der Schmelzschweißverfahren, obwohl manchmal, falls die Stückzahl groß ist, auch das zur Gruppe Pressschweißen gehörende Reibschweißen bei bestimmten Verbindungstypen zum Einsatz kommt. Das Hauptmerkmal des Schmelzschweißens ist die Entstehung der Verbindung im Schmelzfluss, wobei der Grundwerkstoff durch die Schweißwärme schmilzt und die Zusatzwerkstoffe wie Schweißstab, Schweißdraht und Schweißelektroden fast immer eingeschmolzen werden. Von den sechs Untergruppen des Schmelzschweißens-, Gas-, Lichtbogen-, Widerstandsschmelz-, Elektronenstrahl-, Lichtstrahlund Gießschmelzschweißen, die in unterschiedlicher Weise Schweißwärme erzeugen, werden für Hohlprofilverbindungen das Lichtbogenhandschweißen (111) und das Metall-Schutzgasschweißen (13) am häufigsten eingesetzt. Die Nummern hinter den Schweißverfahren entsprechen der Liste der Prozesse und Ordnungsnummern gemäß der DIN EN ISO 4063 [6].

Es wird beispielsweise für Offshore-Konstruktionen und Brücken, das Unterpulverschweißen angewendet. Grundsätzlich sind beim Einsatz von Schweißgeräten und -maschinen vier Mechanisierungsgrade zu unterscheiden: manuelles, teilmechanisches, vollmechanisches und automatisches Schweißen. Die ersten drei Verfahren werden bei Hohlprofilkonstruktionen normalerweise angewendet. Einen Überblick über die Unterschiede der Mechanisierungsgrade gibt die Tabelle 11. Automatisches Schweißen ist nicht üblich. allerdings, wenn nötig, anwendbar bei großen Stückzahlen, z.B. bei der Rohrknotenfertigung für Offshore-Jackets oder Einzelkomponentenfertigung im Nutzfahrzeugbau.

# 3.1 Lichtbogenhandschweißen (111)

Dieses Schweißverfahren, das durch die Energie des elektrischen Lichtbogens das "Schmelzen" bewirkt, ist für Hohlprofilverbindungen ein häufig benutztes Verfahren. Es ist für den Einsatz sowohl in der Werkstatt als auch auf der Baustelle geeignet. Insbesondere wird es bei schlechter Zugänglichkeit der Schweißstelle sowie ungünstiger Schweißlage eingesetzt. Schutzgasflaschen werden nicht benötigt, da der Lichtbogen durch die Umhüllung geschützt wird.

Man zündet einen Lichtbogen, indem man die Elektrodenspitze über das Werkstück streicht. Ein Stromkreis wird geschlossen, der die Stromquelle mit Elektrodenhalter und Werkstück verbindet. Die Lichtbogenstrecke ist der einzige bedeutende elektrische Widerstand, an den der Strom sein ganzes Arbeitsvermögen in Wärme und Strahlung umsetzt. Die Berührungsflächen kommen zum Glühen, die Elektrode schmilzt ab und füllt die Nahtfuge.

Da die Elektrode mit Umhüllung die Funktion hat, den flüssigen und glühenden Stahl durch Schlacke und Gas der Elektrodenhülle vor den schädlichen Einwirkungen der Luft zu schützen, ist es wichtig, die richtige Elektrodenwahl zu treffen.

### Tabelle 11: Mechanisierungsgrade Schweißung

	Bewegungsablauf / Arbeitsablauf									
	Brennerführung/ Werkstückführung	Vorschub Schweißzusatz	Werkstück- zuführung							
manuelles Schweißen	manuell	manuell	manuell							
teilmechanisches Schweißen	manuell	mechanisch	manuell							
vollmechanisches Schweißen	mechanisch	mechanisch	manuell							
automatisches Schweißen	mechanisch	mechanisch	mechanisch							





Dies ist von Fall zu Fall abzustimmen, d. h., alle wichtigen Punkte wie Verbindungstyp, Schweißlage, mechanisch-technologische Eigenschaften und Prüfmöglichkeiten bestimmen die Elektrodenwahl. Wegen der großen Bedeutung der Elektroden für die Schweißarbeit ist es erforderlich, auf folgende weitere Punkte hinzuweisen:

→ DIN EN ISO 2560 [7] klassifiziert 8 Umhüllungstypen für Stabelektroden für unlegierte und Feinkornstähle bis zu einer Streckgrenze von 500 N/mm<sup>2</sup> bzw. Zugfestigkeit von 560 bis 720 N/mm<sup>2</sup>.

Umhüllungstyp	Kennzeichen
sauer-umhüllt	A
zellulose-umhüllt	С
rutil-umhüllt	R
dick rutil-umhüllt	RR
rutil-zellulose-umhüllt	RC
rutil-sauer-umhüllt	RA
rutil-basisch-umhüllt	RB
basisch-umhüllt	В

Aufgrund der hohen Verbrennungswärme ist bei den sauerumhüllten Stabelektroden mit erhöhter Gefahr von Erstarrungsrissen zu rechnen. Niedrige Gütewerte und eine begrenzte Schweißbarkeit in Zwangslagen, sowie ein hoher Abbrand an Legierungselementen führen dazu, dass sauer-umhüllte Stabelektroden heute nicht mehr eingesetzt werden.

Die zellulose-umhüllte Stabelektrode besitzt einen hohen Anteil an brennbaren organischen Bestandteilen, daher entsteht bei dem Verschweißen wenig Schlacke und ein starker Lichbogen. Die zellulose-umhüllte Stabelektrode eignet sich besonders zum Fallnahtschweißen (PG: Fallposition entsprechend DIN EN ISO 6947 [8]) und besitzt eine hohe Abschmelzleistung bei gleichzeitig hoher Schweißgeschwindigkeit. Zellulose-umhüllte Stabelektroden werden hauptsächlich im Rohrleitungs- und Pipelinebau verwendet. Das Nahtaussehen ist grobschuppig.

Die basisch-umhüllte Stabelektrode, früher kalkbasischer Typ (kb-Elektrode), besitzt einen hohen Anteil an Calciumcarbonat und Flussspat. Der Abbrand der Legierungselemente ist gering, da im Lichtbogen wenig Sauerstoff vorhanden ist. Die Bestandteile der basisch-umhüllten Stabelektrode binden Schwefel und Phosphor in flüssigem Zustand und führen zu höchster Reinheit und hohen Gütewerten des Schweißgutes.

Die basisch-umhüllte Stabelektrode eignet sich für das Verschweißen schrumpfbehinderter Bauteile aufgrund eines sehr dehnfähigen und kaltzähen Schweißgutes, sowie für das Schweißen von dickwandigen Bauteilen. Das Nahtbild ist sehr gleichmäßig, allerdings auch rau. Die hohe Rauigkeit führt zu einer schlechten Schlackenentfernbarkeit.

Die rutil-umhüllten Stabelektroden erzeugen einen geringen Legierungsabbrand und besitzen gute Kerbschlagzähigkeit. Die Zähflüssigkeit des geschmolzenen Schweißgutes, das bei mittleren Temperaturen schmilzt, hilft, das Schweißen auch in Zwangslagen, ausgenommen Fallposition, ohne Störungen durchzuführen. Aufgrund des zähfliessenden Schweißgutes eignet sich die rutil-umhüllte Stabelektrode hervorragend bei großen Spaltbreiten bei der Wurzelschweißung. Gegenüber den sauer-, zellulose- und basisch-umhüllten Stabelektroden besitzen rutil-umhüllte Stabelektroden eine gute Zünd- und Wiederzündeigenschaft. Das Nahtbild ist feinschuppig und die Schlacke lässt sich leicht entfernen.

Aufgrund der guten Verarbeitungseigenschaften rutiler Stabelektroden wurden verschiedene Rutiltypen (RR, RC, RA, RB) entwickelt, welche die positven Eigenschaften der rutilen Umhüllung mit der andersartigen kombiniert. In der Praxis werden die Rutiltypen RR, RC und RB am häufigsten verwendet.

DIN EN ISO 18275 [9] klassifiziert Stabelektroden für wetterfeste, hochfeste und kaltzähe Stähle. Bei den hochfesten Stählen kommen nur noch die basisch-umhüllten Stabelektroden zum Einsatz mit einer Streckgrenze bis zu 890 N/mm<sup>2</sup> bzw. einer Zugfestigkeit von 980 bis 1180 N/mm<sup>2</sup>.

Umhüllte Stabelektroden müssen auf dem blanken Ende zum Einspannen oder auf der Umhüllung mit einer zurückverfolgbaren Handelsbezeichnung des Lieferanten oder der Stabelektrodenbezeichnung dauerhaft gekennzeichnet sein. In der DIN EN ISO 544 [10] sind die Technischen Lieferbedingungen für Schweißzusätze und Pulver definiert. Empfehlungen zur Lagerung von Stabelektroden sind im DVS Merkblatt 0957 enthalten und können bei den Herstellern eingeholt werden. Im Allgemeinen sind alle Elektroden nach den Empfehlungen der Elektrodenherstellerfirmen zu schützen und zu lagern. Es ist erforderlich, dass sie trocken und unbeschädigt sind. Die Umhüllung der Stabelektroden nimmt Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf. Um die Wasserstoffeinbringung in das flüssige Schweißgut zu vermeiden, ist es erforderlich, die Stabelektroden zu trocknen und ggf. eine Rücktrocknung durchzuführen. Hierzu sind die Angaben des Herstellers zu befolgen.

Häufig bieten Stabelektrodenhersteller in deren Broschüren Verarbeitungshinweise für die jeweilige Stabelektrode an. Dort sind typische Prozessparameter (z. B. Stromstärke, Spannung) in Abhängigkeit der Schweißposition und des Stabelektrodendurchmessers zu finden.

### 3.2 Metall Schutzgasschweißen (13)

Das halbautomatische Metall-Schutzgasschweißen ist eine Variante des Lichtbogenschweißens, die sich für das Schweißen in der Werkstatt und auf der Baustelle sehr gut bewährt hat. Das Verfahren ist jedoch ungünstiger im Vergleich zu dem Lichtbogenhandschweißen bei sehr schlechter Zugänglichkeit. Zu dem Metall-Schutzgasschweißen gehören die vier wesentlichen Prozesse:

1. Das Schweißen mit einer abschmelzenden Massivdrahtelektrode mit einem inerten Schutzgas (131).

2. Das Schweißen mit einer abschmelzenden Massivdrahtelektrode mit einem aktiven Schutzgas (135).

3. Das Schweißen mit einer abschmelzenden schweißpulvergefüllter Fülldrahtelektrode mit aktivem Schutzgas (136).

4. Das Schweißen mit einer abschmelzenden metallpulvergefüllten Fülldrahtelektrode mit aktivem Schutzgas (138).

Bei dem Schutzgasschweißen wird der flüssige und glühende Stahl vor den schädlichen Einwirkungen der Luft durch einen Gasmantel (Gase und Mischgase sind in DIN EN ISO 14175 [11] geregelt) um den Lichtbogen geschützt.





Das Verfahren besteht aus der Führung des Schweißdrahtes (Elektrode), des Schutzgases durch die Düse und der Auftragung des Schweißgutes auf die Nahtstelle. Das Gas dient nicht nur als Schutz gegen die Atmosphäre; es ist zugleich auch die elektrisch leitende Strombahn.

Die Ausströmgeschwindigkeit des Schutzgases ist so zu bemessen, dass weder Luft zu den vom Lichtbogen erwärmten Bereichen hinzutreten kann, noch Luft infolge Turbulenzbildung an die erwärmten Bereiche herangeführt wird. Als groben Richtwert kann man für das MAG-Schweißen einen Schutzgasbedarf von 12 bis 14 l/min annehmen, das entspricht dem 10 bis 12 fachen des Drahtelektrodendurchmessers. Je nach Schweißposition kann der Bedarf variieren.

Entsprechend dem Anwendungszweck werden Massiv- oder Fülldrahtelektroden gemäß der DIN EN ISO 14341 [12] oder DIN EN ISO 17632 [13] und Stäbe/Draht entsprechend DIN EN ISO 636 [14] für unlegierte und Feinkornstähle verwendet. Für hochfeste Stähle werden Drahtelektroden entsprechend der DIN EN ISO 16834 [15] und DIN EN ISO 18276 [16] verwendet.

Die Drahtdurchmesser für das Schutzgasschweißen umfassen einen Bereich von 0,6 - 3,2 mm. Übliche Größen sind 1,0 - 1,2 mm. Kleinere Durchmesser von 0,6 - 0,8 mm werden in der Regel für die dünnwandigen Profile bzw. für die Wurzelschweißung ohne Schweißbadsicherung benutzt. Die wesentlichen Vorzüge des Schutzgasschweißens liegen in den folgenden Punkten:

- 1. Schmalere Wärmeeinflußzone und einen geringeren Wärmeeintrag im Vergleich zu dem Lichtbogenhandschweißen
- Auf dem erstarrten Schweißgut bilden sich deutlich weniger Schlacken im Gegensatz zum Schweißen mit umhüllter Stabelektrode. Die Schweißnebenzeiten sind kürzer und damit die Fabrikationskosten niedriger.
- Bei dem Schutzgasschweißen können höhere Mechanisierungsgrade erzielt werden im Vergleich zu dem Schweißen mit Stabelektrode. Dies führt tendenziell zu einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit.

## 3.2.1 MIG-Verfahren (Metall-Inertgasschweißen mit Massivdrahtelektrode, 131)

Diese Art des Schutzgasschweißens ermöglicht eine hohe Abschmelzleistung, die jedoch eine aufwendigere Anlagentechnik erfordert. Im Vergleich zu dem Lichtbogenhandschweißen muss ein Schweißbrenner und eine Stromquelle mit Drahtvorschub eingesetzt werden. Als Schutzgase werden die inerten Gase Argon, Helium oder ein Gemisch aus beiden eingesetzt. Die inerten Gase, auch Edelgase genannt, sind teurer als die aktiven Gase, daher wird das MIG-Schweißen nicht bei dem Verbindungsschweißen von unlegierten, normalisierten und vergüteten Hohlprofilen verwendet. Das MIG-Verfahren wird standardmäßig bei Schweißungen von hochlegierten Stählen, bzw. NE-Metallen eingesetzt. Drahtdurchmesser. Stromstärke und Stromspannung sind nach Angaben der Schweißzusatzhersteller oder nach eigener Erfahrung festzulegen.

## 3.2.2 MAG-Verfahren (Metall-Aktivgasschweißen, 135, 136, 138)

Zu dem MAG-Verfahren zählt das Metall-Aktivgasschweißen mit

- 1. Massivdrahtelektrode (135)
- 2. Schweißpulvergefüllter Fülldrahtelektrode (136)
- 3. Metallpulvergefüllter Fülldrahtelektrode (138)

Der wesentliche Unterschied zwischen den Massivdrahtelektroden und Fülldrahtelektroden ist die Füllung im Drahtkern der Fülldrahtelektroden. Es wird zwischen formgeschlossenen und nahtlosen Fülldrähten weiter unterschieden. Die unterschiedlichen Füllungen haben Einfluss auf Lichtbogenstabilität, Spritzerbildung, Raupenprofil, Raupenoberfläche, Schlackenentfernbarkeit. Nahtaufbau in den Zwangslagen und mechanisch-technologische Schweißguteigenschaften. An dieser Stelle wird nicht vertieft auf die einzelnen Feinheiten der Fülldrahtelektroden eingegangen. Weitere Informationen können bei den Schweißzusatzherstellern eingeholt werden.

Das MAG-Schweißverfahren, das prinzipiell wie das MIG-Verfahren mit den gleichen Geräten arbeitet, wurde für das Schweißen unlegierter und niedriglegierter Stähle entwickelt. Der Hauptunterschied zum MIG-Verfahren liegt in der Anwendung von kostengünstigen aktiven Schutzgasen bei dem MAG-Verfahren. Es wird unterschieden in MAG-C (Schutzgas CO<sub>2</sub>) und MAG-M (Mischgas). Das Mischgas kann zusammengesetzt sein aus

- → Kohlenstoffdioxid und Argon
- → Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff
- → Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Argon
- → Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff und Sauerstoff.

Die Schutzgase für das Lichtbogenschweißen sind in der DIN EN ISO 14175 [11] geregelt. Das am häufigsten verwendetet Schutzgas für das MAG-Schweißen ist das Mischgas M21, 15 bis 25% CO und Rest Argon (typische Zusammensetzung 82% Ar, 18% CO.). Mit der Wahl des Schutzgases können Nahtform und Einbrand. Schweißbadtemperatur, Schweißbadentgasung und Schweißgeschwindigkeit beeinflusst werden. Die unterschiedlichen Einflüsse der verwendeten Schutzgase auf das Schwei-Ben lassen sich auf die Eigenschaft der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur zurückführen. Nicht mit jedem Schutzgas, kann für die Anwendung die richtige Lichtbogenart erzielt werden. Es wird zwischen Kurzlichtbogen, Übergangslichtbogen, Sprühlichbogen, Langlichtbogen und Impulslichtbogen unterschieden bei dem MAG-Verfahren. Typische Arbeitsbereiche der unterschiedlichen Lichtbogenarten (Spannung und

Drahtvorschub) sind im wesentlichen abhängig von Drahtdurchmesser, freier Drahtlänge (Abstand Drahtende zum Kontaktrohr), Lichtbogenlänge und dem Schutzgas. Arbeitsbereiche der Lichtbögen sind in Broschüren von Schweißstromquellen zu finden.

#### Kurzlichtbogen + Kohlenstoffdioxid und Argon als Mischgas

Durch den brennenden Lichtbogen wird das Ende des Schweißdrahtes am Schweißbrenner erwärmt, und es bildet sich ein Tropfen am Drahtende. Der Tropfen schnürt sich ein (Pinch-Effekt), löst sich von der Elektrode und geht in das Schmelzbad über. Der flüssige Tropfen verbindet den im Zulauf befindenden Zusatzwerkstoff und das flüssige Schweißbad bestehend aus flüssigem Zusatzwerkstoff und aufgeschmolzenem Grundwerkstoff. Der Strom steigt hierdurch an. Es entsteht ein Kurzschluss. Der flüssige Tropfen wird abgetrennt. Der Lichtbogen zündet erneut. Ar/CO<sub>2</sub>-Gemische eignen sich gut für Kurzlichtbogenschweißungen bei Dünnblechverbindungen, Spaltüberbrückungen und Zwangslagen für Verbindungsschwei-Bungen. Die Wärmeeinbringung und Abschmelzleistung ist im Vergleich zu anderen Lichtbogenarten gering. Je höher der CO<sub>2</sub>-Anteil im Gas im Verhältnis zu Argon ist, desto breiter und tiefer wird das Einbrandprofil. Mit zunehmendem Anteil von CO, wird die Porenhäufigkeit geringer, allerdings nimmt der Schlackenanteil zu. Der Schutzgastyp M21 eignet sich grundsätzlich für Massivdrähte und die meisten Fülldrähte für Verbindungsschweißungen von unlegierten und niedriglegierten Stählen. Die Spritzermenge, Abbrand und Porenhäufigkeit sind gering. Die mechanisch technologischen Gütewerte sind gut.

#### Sprühlichtbogen + Kohlenstoff und Argon als Mischgas

Der Lichtbogen wird so stark erwärmt, dass aufgrund der herrschenden Kräfte im Lichtbogen der Werkststoffübergang von Draht zu Schweißbad sehr feintröpfig ist. Zudem verläuft der Werkstoffübergang kurzschlussfrei ab.

Der Sprühlichtbogen wird umso feintröpfiger, je höher der Argon Anteil im Mischgas ist. Häufig wird M21 (typische Zusammensetzung 82% Ar, 18% CO<sub>2</sub>) verwendet. Aufgrund der höheren Energie im Vergleich zu dem Kurzlichtbogen, lassen sich höhere Abschmelzleistungen erzielen, dies jedoch die Schweißung in Zwangslagen verhindert. Aufgrund des kurzschlussfreien Werkstoffüberganges ist der Spühlichtbogen spritzerarm.

#### Übergangslichtbogen

Der Übergangslichtbogen ist der Bereich zwischen dem Kurzlichtbogen und Sprühlichtbogen. Der Werkstoffübergang findet sehr unregelmäßig statt. Der Übergangslichtbogen ist sehr instabil und spritzeranfällig. Aufgrund des instabilen Lichtbogens treten häufig Schweißfehler auf, daher sollte dieser Lichtbogen gemieden werden.

#### Impulslichtbogen + Kohlenstoffdioxid und Argon als Mischgas

Bei dem Impulslichtbogen wird von der Stromauelle ein kurzzeitig erhöhter Strom durch das Kontaktrohr in den Schweißdraht eingeleitet. Hierdurch wird am Drahtende der flüssige Drahttropfen schnell gebildet und sofort abgelöst, ohne dass ein Kurzschluss entsteht. Ar/CO<sub>2</sub>-Gemische eignen sich gut für Impulslichtbogenschweißungen, wenn der CO<sub>2</sub>-Gehalt unter 20% liegt (typische Zusammensetzung 82% Ar, 18% CO<sub>3</sub>). Der Impulslichtbogen in Kombination mit 82% Ar, 18% CO, lässt sich sehr gut in Zwangslagen, Dünnblech- und Wurzelschweißungen einsetzen mit höheren Abschmelzleistungen und Wärmeeintrag als der Kurzlichtbogen. Bei richtiger Einstellung der Prozessparameter entstehen sehr wenig Schweißspritzer.

#### Langlichtbogen + Kohlenstoffdioxid und Argon als Mischgas

Bei dem Schweißen mit großer Lichtbogenlänge entstehen am Drahtende sehr große Tropfen. Aufgrund des langen Lichtbogens geht der Tropfen kurzschlussfrei in das Schweißbad über. Der Werkstoffübergang ist in der Regel kurzschlussfrei, daher auch spritzerarm. Der Langlichtbogen kann mit mindestens 25% CO<sub>2</sub> im Mischgas bzw. 100% CO<sub>2</sub> erreicht werden. Mit dem Langlichtbogen können hohe Abschmelzleistungen erreicht werden in den Positionen PA und PB, allerdings eignet sich der Langlichtbogen nicht für die Schweißung in Zwangslagen.

### 3.3 WIG-Verfahren (Wolfram-Inertgasschweißen, 141)

Bei dem WIG-Schweißen werden der Schweißbrenner und der Schweißdraht getrennt in zwei Händen gehalten, d. h. das Verfahren besteht aus der getrennten Zuführung von Wärmequelle (Lichtbogen) und Schweißzusatzwerkstoff. Der WIG-Brenner enthält den stromführenden Wolfram-Stab und die Gasdüse.

Wolfram schmilzt im Lichtbogen nicht, würde aber ohne inertes Schutzgas verbrennen. Deshalb sorgt ein Gasregler beim Löschen des Lichtbogens für ein kurzes Nachströmen, um Elektrode und Schweißbad unter Gasschutz erkalten zu lassen. Die WIG-Schweißung wird bevorzugt für das Schweißen von dünnwandigen Profilen aus legierten Stählen eingesetzt. Aufgrund der Verwendung von inerten Schutzgasen und manueller Zugabe von Schweißzusatzwerkstoff ist dieses Verfahren äußerst unwirtschaftlich für das Verbindungsschweißen von Stahlhohlprofilen, jedoch sind WIG-Schweißverbindungen qualitativ hochwertig. Speziell bei hochfesten Güten können WIG-Verbindungen oder WIG-Wurzellagen vorteilhaft sein.





> Abb. 4: WIG-Verfahren

# 3.4 Unterpulverschweißen (UP-Schweißen, 12)

Im Vergleich zu den Metall-Schutzgasschweißverfahren wird der Lichtbogen bei dem UP-Schweißen durch eine Pulverschüttung vor der Atmosphäre geschützt. man spricht daher auch von einem verdeckten Lichtbogenschweißverfahren. Aufgrund der eingebrachten Prozesswärme wird das Pulver aufgeschmolzen und verdampft teilweise, so dass der Lichtbogen in einer geschützten Kaverne brennt. Der Schweißzusatzwerkstoff (Drahtelektrodendurchmesser 3 bis 5 mm), das Grundmaterial und das Pulver schmelzen und erstarren bei fortschreitender Bewegung des Schweißbrenners, dabei schwimmt das geschmolzende Pulver auf dem flüssigen Metall und erstarrt. Die Schlackeschicht schützt die Schweißnaht bei dem Abkühlvorgang vor der umliegenden Atmosphäre.

Aufgrund der Pulverabdeckung ist der thermische Wirkungsgrad im Vergleich zu anderen Schweißprozessen sehr hoch, wodurch höhere Abschmelzleistungen erzielt werden können. Höhere Abschmelzleistung bei dem UP-Schweißen werden allerdings hauptsächlich durch den Einsatz von leistungsstärkeren Stromquellen und dickeren Schweißdrähten erreicht. Die Verwendung von Mehrdrahtanlagen, bei denen 2 bis 5 Drähte gleichzeitig hintereinander abgeschmolzen werden, ermöglichen im schweren Stahlbau, dazu gehören beispielsweise Brücken und Offshore-Konstruktionen, sehr hohe Abschmelzleistungen. Aufgrund der Pulverschüttung wird dieses Schweißverfahren nur in den Positionen PA und PB eingesetzt. Das Schweißpulver beeinflusst z.B. die Strombelastbarkeit. Porensicherheit. Nahtaussehen, mechanische Gütewerte und den Schlackenabgang. Die unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Schweißpulver können bei den Herstellern von Schweißpulvern erfragt werden. Bei der Schweißung von Rohrknoten wird dieses Verfahren nicht eingesetzt, da das Schweißen in Zwangslagen bei nicht automatisierten Verfahren zu einem häufigen neuausrichten des Werkstückes führt, um die Schweißposition PA bzw. PB einzuhalten, damit das Pulver nicht herunterfällt. Bei Rohrstumpfstößen, z.B. bei der Verlängerung eines Rundrohres, kann das UP-Schweißen sehr aut eingesetzt werden, wenn das Rohr dreht und der Schweißkopf statisch in der Position PA/PB verbleibt. Hier wird in der Regel die Wurzel mit dem MAG-Verfahren geschweißt und anschließend mit dem UP-Verfahren die Fülllagen eingebracht. Die bereits eingebrachte Wurzellage sichert die durch das UP-Schweißen eingebrachte erste Lage vor dem Durchfallen. Aufgrund der höheren Streckenenergien bei dem UP-Schweißen sind besondere Schweißnahtvorbereitungen in der Wurzel zu treffen, wenn die Wurzellage nicht mit dem MAG-Verfahren geschweißt wird,

z.B. größere Steghöhen oder Schweißbadsicherungen. Geeignete Schweißnahtvorbereitungen sind in der DIN EN ISO 9692-2 [18] zu finden.

### 3.5 Gasschmelzschweißen mit Sauerstoff-Acetylen-Flamme (311)

Bei Hohlprofilverbindungen ist die Anwendung des Gasschmelzschweißens allgemein beschränkt auf das Schweißen von kleineren Profilwanddicken, von kleinen Abmessungen und gelegentlich auch auf Wurzelschweißungen bei unlegierten Stählen. Das Gasschmelzschweißverfahren wird heutzutage eher selten eingesetzt, findet aber im Rohrleitungsbau noch Anwendung.

Das Schweißgerät ist der Schweißbrenner, der die Schweißgase - Acetylen und Sauerstoff - führt und durch die Verbrennung der Gase Wärme erzeugt. Die schädlichen Einwirkungen der Luft werden durch den Gasmantel der Brennerflamme behindert. Der Schweißer hält den Schweißbrenner und den Schweißdraht als Zusatzwerkstoff getrennt in zwei Händen. Wegen des voneinander unabhängigen Einsatzes von Wärmequelle und Zusatzwerkstoff ist eine weitgehende Anpassung an die Arbeitsverhältnisse möglich.

Gasschmelzschweißen erlaubt eine Schweißung bei engen Raumverhältnissen und erfordert den geringsten Vorbereitungsaufwand. Durch eine besondere Arbeitstechnik können Luftspalte und Kantenversatz leicht überbrückt werden. Aufgrund der manuellen Zugabe von Schweißzusatzwerkstoff ist die Abschmelzleistung gering wodurch eine geringere Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu den MSG-Prozessen erreicht wird.

Die Schweißzusatzwerkstoffe sind entsprechend DIN EN ISO 20378 [19] zu wählen.



# 4 Hohlprofilbearbeitung für geschweißte Konstruktionen



> Abb. 6: Varianten der Hohlprofilendenvorbereitung für die Durchdringung zweier Stäbe.

Die Fabrikationskosten haben bei der Herstellung von geschweißten MSH-Konstruktionen, wie bei allen Stahlkonstruktionen, einen ausschlaggebenden Anteil. Zur Erzielung der höchsten Wirtschaftlichkeit ist nicht nur die richtige Wahl des Schweißverfahrens, sondern auch eine genaue Planung und Durchführung der Vorarbeiten in der Werkstatt äu-Berst wichtig. Dazu gehört die geeignete Ausführung der Endenbearbeitung von Hohlprofilbauteilen in einer Konstruktion, wobei die Hohlprofilenden in ihrer Ursprungsform belassen, aber auch voll oder teilweise bearbeitet sein können (siehe Abb. 6).

Die Vorbereitung zum Zusammenschweißen von Bauteilen beginnt mit dem Schneiden oder Sägen. Die am häufigsten verwendeten Schneidprozesse sind das autogene Brennschneiden und Plasmaschneiden.

Das Laserstrahlschneiden gewinnt für kleine Wanddicken (<12 mm) an Bedeutung.

Es können folgende Schnittarten zur Ausführung kommen: ebene, gerade Schnitte, Gehrungsschnitte und angepasste Profilformschnitte. Man muss hierbei den Unterschied von unmittelbaren Verbindungen zwischen kreisförmigen MSH-Profilen und denen von rechteckigen MSH-Profilen beachten, der bei der Fabrikation auch großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat.

Die Enden der kreisförmigen Hohlprofile müssen vor dem Schweißen mit räumlichen Schnitten angearbeitet werden, um eine passgerechte Durchdringung zu erzielen. Gegenüber kreisförmigen Hohlprofilen zeichnen sich die rechteckigen bzw. guadratischen Hohlprofile durch ebene Seitenflächen aus, die an der Durchdringungsstelle nur einfache ebene, gerade Schnitte erforderlich machen. Vergleicht man die Arbeitsschritte für den ebenen, geraden Schnitt (Rechteckhohlprofile) und die räumliche Verschneidungskurve (kreisförmige Hohlprofile) miteinander, so ist die Führung eines Beweises der kostengünstigeren Fabrikation von Rechteckhohlprofilkonstruktionen überflüssig.



> Abb. 7: Schablonenaufriß der Schnittstelle zweier unmittelbar miteinander verbundener, kreisförmiger Hohlprofile

Man kann jedoch für kleinere Abmessungen der kreisförmigen Hohlprofile durch einen geraden Schnitt, aber auch für größere Abmessungen durch zwei oder drei gerade Schnitte die räumliche Kurve ersetzen.

Ein weiterer Schritt bei der Endenbearbeitung von MSH-Profilen ist die Schweißkantenvorbereitung, wobei die Komplexität der Durchführung für kreisförmige Hohlprofile auch hierbei etwas größer als für rechteckige Hohlprofile ist.

Zur manuellen Anarbeitung räumlicher Durchdringungskurven zweier kreisförmiger Hohlprofile sind bei dem Trennvorgang durch Schneiden, Fräsen und Schleifen folgende Arbeitsschritte vorzunehmen:

- → graphische Darstellung der Schnittkurve
- → Herstellung der Schablone
- Anriss des kreisförmigen Hohlprofils -Schneiden (Brennschneiden) oder Fräsen des Hohlprofilendes gemäß Anriss
- → Korrektur der Schweissphase durch Schleifen (oder auch Brennschneiden)
- Korrektur der Kontaktlinie zweier Hohlprofile
- → letzte Korrekturen mittels Schleifmaschine

Bei dem Vorgang mit den oben aufgelisteten Schritten ist es wichtig, nachträgliche Bearbeitungsschritte zu vermeiden. Es werden daher schon beim Aufriss der Schablone notwendige Korrekturen durchgeführt. Abb. 7 stellt ein Beispiel für die entsprechende Herstellung einer Schablone dar. Um dieses zeit- und kostenaufwendige Trennverfahren einfacher und wirtschaftlicher zu handhaben, werden heute meist automatische Rohrschneidmaschinen eingesetzt, welche den Brennschneidprozess oder Plasmaschneidprozess verwenden.

Das Brennschneiden gehört zu der Gruppe der thermische Schneidverfahren, bei der als Wärmequelle eine Brenngas-Sauerstoff-Flamme verwendet wird. Prinzipiell kann ein Schweißbrenner für das bereits erwähnte Gasschmelzschweißen auch hier eingesetzt werden. Die veränderte Düsengeometrie macht das Gerät jedoch zum Schneidbrenner, und als Gase werden das Brenngas (es können statt Acetvlen Propan. Stadtgas oder Wasserstoff verwendet werden) und reiner Sauerstoff benutzt. Nachdem der Werkstoff an der zu trennenden Stelle durch die Brenngasflamme auf Zündtemperatur erwärmt ist, verbrennt der Sauerstoffstrahl das Metall zu einem flüssigen Oxid und bläst es zugleich aus der Fuge.

Das Brennschneiden ist für unlegierte und niedriglegierte Stähle anzuwenden. Für hochlegierte Stähle und Gusseisen muss die Trennfuge mit einer stärkeren Wärmequelle, z. B. Elektro-Lichtbogen, aufgeschmolzen werden. Wichtig ist, hier das "Plasmaschneiden" zu erwähnen, das mittels Lichtbogen hocherhitztes Gas. das Plasma zum Schneiden einsetzt. In einem dünnen Strahl trifft das Gas das Werkstück mit großer Geschwindigkeit und treibt das flüssige Metall aus. Als Plasmagase können ArH<sub>a</sub>, N<sub>a</sub>, O<sub>a</sub>, ArN<sub>a</sub>, ArH<sub>a</sub>N<sub>a</sub>, Luft und Gemische aus N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>, Ar/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>, Luft/O<sub>2</sub>, Ar/H, N/H, und Ar/H, verwendet werden. Für un- und niedriglegierte Stähle wird Sauerstoff am häufigsten verwendet. Detailliertere Informationen zu den Vor- und Nachteilen der einzelnen Gase und Gasgemische bei dem Plasmaschneiden werden häufig in den Broschüren von den Gaslieferanten erläutert.

Die Schneidgeschwindigkeit bei dem Plasmaschneiden ist höher als bei anderen Verfahren, der Schnitt ist meist verzugsfrei. Trennschnitte können im Dickenbereich 0,5 bis 160 mm durchgeführt werden. Der Blech- bzw. Profil- oder Rohrwanddickenbereich für Qualitätsschnitte schwankt stark in Abhängigkeit der Anlagentechnik und des Schneidgases. Auf dem Markt sind kleine tragbzw. fahrbare Geräte bis hin zu 3D-Hochleistungsschneidanlagen, z.T. auch robo-



> Abb. 8: Brennschneidevorgänge

tergestütze Anlagen, erhältlich. Das Sägen als Trennverfahren wird für die Endenvorbereitung von MSH-Profilen hauptsächlich dort eingesetzt, wo ebene, gerade Schnitte ausreichen. Daher wird das Sägen vorwiegend für rechteckige bzw. quadratische Hohlprofilverbindungen mit einer ebenen Durchdringungsfläche angewendet. Meistverbreitete Sägearten sind hochtourige Kreissägen und Trennschleifscheiben. Das Angebot unterschiedlicher Sägearten ist qualitätsabhängig und wird wie folgt beschrieben:

- → Schleifscheibe hohe Schneidleistung, fehlende Genauigkeit, Gratentstehung, die abgearbeitet werden muß.
- → Gezahnte Stahlscheibe: hohe Schneidleistung, aber ungenau, Gratentstehung durch Metallverschmelzung
- → Fräswerkzeuge: relativ niedrige Schneidleistung, aber große Genauigkeit ohne Grat, sowohl ebene, gerade Schnitte als auch schräge Schweißkantenbearbeitung möglich.

Zur Wahl der geeigneten Schneidverfahrens ist es wichtig, eine Kosten-Nutzen-Analyse unter Einbeziehung des Investitionsaufwandes, der Lebensdauer, der Betriebskosten und der Schnittleistung, aber auch der erforderlichen Schnittqualität vorzunehmen.

Die hohen erforderlichen Investitionskosten für die Anschaffung von koordinatengesteuerten Schneidmaschinen für die räumlichen Verschneidungskurven der Verbindungen aus kreisförmigen Hohlprofilen hindern viele kleine und mittelständische Betriebe, diese einzusetzen. In diesem Fall stellt sich die Frage, ob die räumlichen Schnittkurven an eine von den Hohlprofilabmessungen und der Verbindungsgeometrie abhängige Zahl gerader Sägeschnitte angenähert werden können, ohne die Traglast unzulässig herabzusetzen. Es ist dabei wichtig, welcher Schweißspalt zwischen den Hohlprofilstäben zu überbrücken ist.

#### Einfacher gerader Schitt:

Wenn ein kreisförmiges Hohlprofil kleinen Durchmessers an ein anderes mit einem relativ großen Durchmesser anschließt, dann ist ein ebener Zuschnitt unter folgenden Bedingungen zulässig:

 $g_1 \leq t_r$ 

wobei  $t_{\rm r}$  der kleiner der beiden Werte  $t_{\rm _0}$  und  $t_{\rm _1}$  ist.

Ferner gilt:  $g_2 \leq 3mm$ 

Eine weitere Bedingung lautet:  $d_0 \ge 0.08 \ d_1^2 + 3$ 

Größere  $d_1/d_0$  – Verhältnisse führen zu größeren Schweißspalten, die wiederum höhere Schweißkosten verursachen und außerhalb des Geltungsbereiches der DIN EN 1090-2 liegen können.



> Abb. 9: Stabendenbearbeitung

Das folgende Diagramm zeigt die möglichen Durchmesser des Gurtes und Strebe in Abhängigkeit mit dem möglichen maximalen Schweißspalt an der Schulter. Im Rahmen einer CIDECT-Forschung sind die Formeln für die Bestimmung der Schnittwinkel  $\beta_g$  und  $\beta_d$  mit den Hilfswerten  $\alpha_g$  und  $\alpha_d$  entwickelt worden. h ist ein von  $\theta$  unabhängiger Wert, der mit den Hohl-

profilabmessungen festgelegt ist. Formeln, Hilfstabellen und Diagramme von kreisförmigen Hohlprofilanschlüssen mit zweifachem und dreifachem Schnitt sind in dem CIDECT Bericht 5AH-85 enthalten.





> Abb. 10: Zweifache ebene Sägeschnitte für die Endenbearbeitung kreisförmiger Hohlprofile



> Abb. 11: Dreifache ebene Sägeschnitte für die Endenbearbeitung kreisförmiger Hohlprofile

# 5 Schweißnahtausführung

Es ist anzumerken, dass ein MSH-Profil als geschlossenes Profil mit nur außen zugänglicher Schweißnaht zu verbinden ist, so dass die Nahtwurzel in wenigen Fällen gegengeschweißt noch besichtigt werden kann.

### 5.1 Stumpfnahtstöße

Stoßverbindungen mit Stumpfnähten werden vorwiegend in den meist hoch beanspruchten Gurtstäben von Fachwerkkonstruktionen erforderlich. Bei einer separaten Rohrknotenfertigung, auch Stummeltechnik genannt, können Stumpfnahtstöße auch in den Streben auftauchen.

Stumpfnaht-Stoßverbindungen treten in der Regel abhängig von der Wanddicke als I-, Y- und V-Nahtformen ohne gegengeschweißte Wurzel auf.

Weiter können Stumpfstoßverbindungen auch mit Schweißbadsicherung oder Unterlegblechen geschweißt werden. Die Schweißbadsicherung und Unterlegbleche, i.d.R streifenförmig, mit einer Breite von 30 - 40 mm werden dann innerhalb der Hohlprofile unter der Schweißnahtwurzel angeordnet, um das Durchschweißen zu erleichtern. Technisch ist der Stumpfstoß ohne Schweißbadsicherung vorteilhafter, da er sich besser zerstörungsfrei prüfen lässt; es werden allerdings geschulte Schweißer benötigt. Darüber hinaus wirkt sich eine Schweißung ohne verbleibende Schweißbadsicherung besser auf die Ermüdungsfestigkeit aus.

In Tabelle 12 und Tabelle 13 werden die häufig verwendeten Schweißnahtvorbereitungen für Stumpfnähte an Hohlprofilverbindungen dargestellt. Tabelle 13 zeigt eine andere Art von Stumpfnahtverbindungen, wobei horizontal liegende Hohlprofile an vertikal stehenden Flächen angeschweißt werden. Sie werden häufig in End- bzw. Kopfplattenverbindungen angewendet, meistens ohne, aber auch mit Unterlegblech oder Schweißbadsicherung, wenn das Durchschweißen der Naht gesichert sein soll. Weitere mögliche Fugenformen für Stumpfstöße werden in der DIN EN ISO 9692-1 [20] aufgeführt.

Für den Stumpfnahtstoß zwischen MSH-Profilen verschiedener Dicken ist der Übergang so glatt wie möglich zu gestalten, besonders bei dynamisch belasteten Konstruktionen (Abb. 12). Die Festigkeit der Naht ist entsprechend dem Hohlprofil mit kleiner Wanddicke festzulegen.

Auf der Baustelle kommen auch vertikalstehende Stumpfnahtstöße vor. Hier können ebenfalls Schweißbadsicherungen oder Unterlegbleche verwendet werden.

Treffen zwei MSH-Profile schräg aufeinander, z. B. in Bogenträgern, werden die Stumpfnahtstöße so gestaltet, dass die Stabenden mit dem halben Gehrungswinkel geschnitten werden (Abb. 13).



> Abb. 12: Stumpfnahtstöße zwischen ungleichen Wanddicken ohne Unterlegblech



> Abb. 13: Gehrungsstumpfnähte

Tabelle	12: Empfohlene und häufig	verwendete	Schweißnaht	vorbereitungen <sup>-</sup>	für Stumpfnähte
	einseitig geschweißt für	r Hohlprofilve	rbindungen		

Fugen- form	Nah <sup>.</sup> [n	tdicke t nm]	Spalt [m	größe b nm]	Steg [m	höhe c nm]	Flanke [m	enhöhe h nm]	Winkel α, β [°]		Winkel α, β [°]		Winkel α, β [°]		Winkel α, β [°]		Winkel α, β [°]		geeigneter Schweiß- prozess	zusätzliche Bemerkung
 	min.	max. 4	min.	max. ≈t	min.	max.	min.	max.	min.	max.	Lichtbogen- handschweißen (111)									
I-Fuge	3	8	6	8							Metall-Schutz- gasschweißen (13)	Mit Schweiß- badsicherung								
V-Fuge	3	10		4		2			40	60	Lichtbogen- handschweißen (111) Metall-Schutz- gasschweißen (13)	Gegebenenfalls mit Schweiß- badsicherung								
Y-Fuge	5	40	1	4	2	4			40	60	Lichtbogen- handschweißen (111) Metall-Schutz- gasschweißen (13)									
V-Fuge auf V-Wurzel	12		2	4	2				α 60 β 10	α 90 β 15	Lichtbogen- handschweißen (111) Metall-Schutz- gasschweißen (13)									
HV-Fuge	3	10	2	4	1	2			35	60	Lichtbogen- handschweißen (111) Metall-Schutz- gasschweißen (13)									

Zu dem Metallschutzgasschweißen gehören die folgenden Prozesse:

135 Metall-Aktivgasschweißen mit Massivdrahtelektrode

136 Metall-Aktivgasschweißen mit schweißpulver gefüllter Fülldrahtelektrode

138 Metall-Aktivgasschweißen mit metallpulvergefüllter Fülldrahtelektrode

131 Metall-Inertgasschweißen mit Massivdrahtelektrode

Weitere Schweißnahtvorbereitungen können der DIN EN ISO 9692-1 [20] entnommen werden.

## Tabelle 13: Empfohlene und häufig verwendete Schweißnahtvorbereitungen für Stumpfnähte einseitig geschweißt für z.B. Stirnplatten an Hohlprofilen

Fugen- form	Nahi [n	tdicke t nm]	Spalt I [m	größe b ım]	Steg (m	höhe c ım]	Flankenhöhe h [mm]		Winkel α, β [°]		geeigneter Schweiß- prozess	zusätzliche Bemerkung
 	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.		
HV-Fuge	3	10	2	4	1	2			35	60	Lichtbogen- handschweißen (111) Metall-Schutz- gasschweißen (13)	Mit Schweiß- badsicherung
Steilflan-	10		6	12					15	60	Lichtbogen- handschweißen (111)	
HV-Fuge	10		n	12					15	60	Metall-Schutz- gasschweißen (13)	

## 5.2 Schweißnähte in Knotenpunkten von MSH-Fachwerken

Bei Hohlprofil-Fachwerkknoten werden die MSH-Profile unmittelbar miteinander verschweißt, üblicherweise durch HV- und/oder Kehlnähte, abhängig vom Winkel e zwischen den Achsen von Gurt und Strebe, sowie der Wanddicke der Strebe. Die Strebe hat normalerweise eine kleinere Wanddicke als der Gurt.



> Abb. 14: Anschluss der Füllstäbe an den Gurtstäben mittels Kehlnahtschweißung

Bei einer Kehlnaht lässt sich die Nahtdicke a beliebig gestalten. Sie kann unterwölbt (konkav), gerade oder überwölbt (konvex) ausgebildet werden.

Bei Öffnungswinkeln von mehr als 60° sollte gemäß DIN EN ISO 9692-1/ EN 1090-2 [21] die Kehlnaht durch eine Stumpfnaht ersetzt werden und bei geringeren Öffnungswinkeln eine abgewandelte V-Naht (HV-Naht) gewählt werden.

Abb. 15 bis 18 zeigen die Fugenformen bei den Anschlüssen aus kreisförmigen und denen aus rechteckigen Gurt- und Füllstäben, wie sie in DIN EN 1090-2 empfohlen werden. Wie die Detailausbildungen darstellen, wechselt der Winkel der Schnittfläche zwischen dem aufgesetzten und dem durchlaufenden MSH-Profil von Punkt zu Punkt am Umfang des aufgesetzten MSH-Profils.

- 1)  $\theta$  sollte nicht kleiner als 30° sein
- 2) Falls  $\theta < 60^{\circ}$ , ist das Stumpfnahtdetail C aus Abb. 16 zu verwenden.

Für kleinere Winkel ist volle Erfassung des theoretischen Wurzelpunktes nicht vorgesehen, falls ausreichende Schweißnahtdicke vorhanden ist.



Abb. 15: Kehlnaht-Fugenformen für Fachwerkknoten aus kreisförmigen Hohlprofilen (t<sub>1</sub> ≤ 8 mm)







Für kleinere Winkel ist volle Erfassung des theoretischen Wurzelpunktes nicht vorgesehen, falls ausreichende Schweißnahtdicke vorhanden ist.









) Folls  $\theta < 60^\circ,$  ist das Kehlnahtdetail D aus Abb. 20 zu verwenden. 3)  $h_{min} = t_1$ 







Bei Punkt C ist die Schweißnahtdicke gering, wenn der Anlaufwinkel  $\theta$  klein ist. In der Praxis muss eine Schweißkantenbearbeitung durchgeführt werden, falls  $\theta < 60^{\circ}$  ist. Hierdurch entsteht eine HV-Naht, wogegen für  $\theta < 60^{\circ}$  eine Kehlnaht ausreichend sein kann.

Bei A oder B ist die Nahtform (Kehl- oder HV-Naht) von der Wanddicke der Strebe abhängig. Im Falle einer Streben-Wanddicke mit  $t_{\rm l} \leq 8$  mm ist eine Kehlnaht anzuwenden. Darüber hinaus ist eine HV-Naht zu empfehlen.

Detail D ist ein Bereich, der sich bei kleinen Öffnungswinkeln sehr schlecht schweißen lässt. Empfohlen wird  $\theta \ge 30^{\circ}$ . Da aber in der Regel in diesem Bereich geringere Lasten übertragen werden, darf dieser Sachverhalt nicht unnötig gewichtet werden.

Bei Rechteckhohlprofilknoten mit einem Breitenverhältnis b/b = 1,0 ist zu prüfen, ob der Schweißspalt wegen der großen Eckradien des Gurtstabes zu groß ist. In solchen Fällen kann eventuell die Schweißnaht aufgetragen werden.

# 6 Fertigung von geschweißten Konstruktionen aus MSH-Profilen

## 6.1 Allgemeines

Schon beim Entwurf einer geschweißten Hohlprofilkonstruktion ist es erforderlich, die baurechtlichen Bestimmungen und die allgemein anerkannten Stahlbauvorschriften zu berücksichtigen. Auf die folgenden DIN EN Normen und Richtlinien wird hier verwiesen:

- DIN EN 1993-1-1 (Eurocode 3, Stahlbau) [22]
- DIN EN 1090-2 [21]
- DIN EN 10210-1/2 [2]
- DIN EN 10225-3 [3]
- DASt-Richtlinie 011 [23]
- DASt-Richtlinie 007 [24]

Ferner ist es besonders wichtig, dass die Zugänglichkeit für das Schweißen gewährleistet wird. Schweißbrenner und Elektrodenhalter müssen genügend Platz für den Fertigungsablauf haben.

Das Schweißen in kaltverformten Bereichen sollte grundsätzlich vermieden wer-den. Bei kaltgeformten kreisförmigen und rechteckigen Hohlprofilen sind die Regelungen der DIN EN 1993-1-8 [25] einzuhalten. Für warmgefertigte Hohlprofile entsprechen DIN EN 10210-1:2016-01 - Entwurf und DIN EN 10225-3:2017-09 - Entwurf existieren keine Einschränkungen.

Prinzipiell sollen die Planung und Durchführung einer Konstruktion so ausgelegt sein, dass eine weitgehende Vorfertigung im Betrieb möglich wird, da dieser Punkt für die Wirtschaftlichkeit der Fertigung eine wichtige Rolle spielt.

Baustellenschweißungen sind möglichst zu vermeiden; wenn sie unumgänglich sind, ist ihre Lage und Vorbereitung so zu wählen, dass der Zusammenbau ohne große Anpassarbeiten reibungslos und zügig durchgeführt werden kann. Zu erwähnen sind auch widrige Wetterumstände an der Baustelle, die zusätzliche Maßnahmen, z. B. Vorwärmen, erforderlich machen können.

Zu vermeiden sind auch Querschnittsübergänge, Bohrungen und Ausschnitte in oder in unmittelbarer Nähe einer Schweißnaht. Es besteht beim Schweißen häufig die Neigung, Schweißgut übermäßig einzubringen, so dass die Schweißnahtdicke a größer als technisch (statisch) notwendig wird. Die vermeidbaren Nachteile sind in erster Linie Verzug, höhere Kosten und eventuell auch Unansehnlichkeit der Konstruktion.

# 6.2 Wärmebehandlung vor und nach dem Schweißen

Die richtige Entscheidung über die Zweckmäßigkeit oder Notwendigkeit einer Wärmebehandlung vor und nach dem Schweißen erfordert den Sachverstand des Schweißfachingenieurs. Deshalb sollen hier auch nur sehr allgemein gehaltene Hinweise gegeben werden. Bezüglich des geeigneten Vorwärmens zur Vermeidung von Kaltrissen wird auf das Stahleisen-Werkstoffblatt 088 [26] und DIN EN 1011 [4] hingewiesen.

Nach DIN EN 1090-2 [21] ist grundsätzlich an ein Vorwärmen vor dem Schweißen zu denken.

Im allgemeinen kann das Schweißen bei niedrigen Außentemperaturen, feuchtem Wetter und auch bei dicken Bauteilen zu kritischen Zuständen und somit zur Kaltrissgefahr führen. Ein Vorwärmen zwischen 50 °C und 150 °C je nach Werkstoffgüte kann dies wirkungsvoll verhindern. Generell ist darauf zu achten, dass die Fügeteile schwitzwasserfrei sind. Für die Bestimmung der Vorwärmtemperatur kann das t8/5-Konzept zur Hilfe gezogen werden [27].

# 6.3 Heftschweißen

Die Kehldicke der Heftnähte soll entsprechend der Wurzellage sein. Heftschweißnähte sollen einen sauberen Anschluß der Wurzellage gewährleisten. Sie dürfen nicht an Hohlprofilecken angebracht werden, sondern sollten entsprechend dem empfohlenen Anfang und Ende der Schweißnaht im Sinne der Schweißfolge (siehe Abschnitt 6.5) gelegt werden. Um die Schweißqualität des Heftschweißens zu sichern, ist dieses von qualifizierten Schweißern durchzuführen.

## 6.4 Zusammenbau von geschweißten MSH-Konstruktionen

Ein rationeller Zusammenbau von Hohlprofilkonstruktionen ist die Grundlage einer wirtschaftlichen Fertigung. Es werden hierfür in der Werkstatt häufig Heft-, Spann- und Wendevorrichtungen verwendet, die den ersten Zusammenbau durch Heftschweißen und schließlich das Fertigschweißen erleichtern. Die Form, kleine Abmessungstoleranzen und Steifigkeit von Hohlprofilen machen diese dafür geeignet, in einer Vorrichtung geheftet, zusammengebaut und geschweißt zu werden. Weiter erlauben die Wendeeinrichtungen beim Schweißen Zwangslagen zu vermeiden und damit Zeit und Kosten zu sparen.

## 6.5 Schweißfolge

Für ebene, insbesondere auch räumliche Knoten aus MSH-Profilen ist es sehr wichtig, die richtige Schweißreihenfolge einzuhalten, die auf Schrumpfung, Schweißeigenspannung und Verwerfung der Konstruktionen großen Einfluß hat.

Bei Rechteckhohlprofilknoten muss der Anfang und das Ende des Schweißens an der Ecke des MSH-Profils vermieden werden, d. h., man beginnt in der Mitte der Ebene zu schweißen und arbeitet dann wechselweise an beiden Seiten nach außen zu den Enden (Abb. 25). Ferner ist auch eine Schweißüberlappung zu vermeiden, die beim Schweißen eines nachfolgenden Bauteils im Knoten entstehen kann.

Bei Knoten aus kreisförmigen MSH-Profilen sind Schweißanfang und -ende nicht in die Nähe des Hohlprofilfußes oder der seitlichen Flanke zu legen (siehe Abb. 25).

Eine volle Schweißung über den gesamten Hohlprofilquerschnitt ist erwünscht, wenn diese auch von der Tragfähigkeit her nicht immer notwendig ist. Eine Ausnahme ist der Knoten mit teilüberlappten Füllstäben, bei dem der teilüberlappte Fuß des Füllstabes nicht geschweißt zu werden braucht.



> Abb. 19: Empfohlene Schweißreihenfolge in Knoten rechteckiger, quadratischer und kreisförmiger MSH-Profile



> Abb. 20: Schweißen bei teilüberlappten Knoten kreisförmiger und rechteckiger MSH-Profile

## 6.6 Schweißeigenspannungen und Verformungen sowie Abbaumaßnahmen

Im allgemeinen wird während der Schweißarbeiten ein Werkstück örtlich erwärmt. Die dadurch verursachte Ausdehnung des warmen Metalls ist nicht gleichförmig, da sie durch das umgebende kalte Material gehindert wird.

Bei der Abkühlung der Schweißnaht treten Schrumpfspannungen im unmittelbaren Nahtbereich sowie durch das Zusammenziehen der gesamten Schweißkonstruktion bzw. deren Behinderung auf. Sie werden durch Verformung oder Verdrehung freigesetzt oder bleiben im geschweißten Teil als Eigenspannungen erhalten.

In steifen Konstruktionen ist die Schrumpfverformung beim Schweißen stark gehemmt. Andererseits sind dadurch die Schweißeigenspannungen wesentlich erhöht. Die Möglichkeit des Konstrukteurs beschränkt sich darauf, die Konstruktion so zu gestalten, daß die Verformungen und Eigenspannungen möglichst gering sind. Im Übrigen ist eine geeignete Schweißfolge von Wichtigkeit.

Um schwierige und aufwendige Richtarbeiten nach dem Schweißen zu vermeiden, kompensiert man die Schrumpfungen u. U. durch entsprechende Vorverformung. Dieser Vorgang wird in Abb. 21 anhand eines Beispiels mit einem Fachwerkträger gezeigt.

Nachdem man bei einem Fachwerkträger die durch das Schweißen bedingten Verformungen abgeschätzt hat (Abb. 21 a,b), werden die Gurtstäbe in einer gehefteten Konstruktion mittels Schraubenwinden vorverformt (Abb. 21 a,b).

Die Anordnung der Schweißnähte und auch die Schweißfolge bestimmen anteilmäßig die Eigenspannung und die Schrumpfung. Heftschweißungen vor dem Fertigschweißen müssen in so großer Zahl und so großer Festigkeit ausgeführt werden, dass sie während des Schweißens auftretende Kräfte aufnehmen können.

Es sind Stumpfnähte vor den Kehlnähten sowie Längsnähte vor den Quernähten durchzuführen, um die Schweißeigenspannung zu vermindern.



#### > Abb. 21: Vorverformung eines Fachwerkträgers

Es ist darauf zu achten, dass die Temperatur des Stahls bei dem Flammrichten nicht so hoch ist, dass mechanisch technologische Eigenschaften verschlechtert werden. Je nach Lieferzustand können folgende maximale Temperaturen verwendet werden:

- Normalisiert ≤ 650 °C
- Thermomechanisch gewalzt bis S460 ≤ 650 °C
- Thermomechanisch gewalzt S460 bis S700 ≤ 550 °C
- Vergütet ≤ 20 Kelvin unter der Anlasstemperatur, aber max. 550 °C

In Abhängigkeit der Dauer des Flammrichtens können die oben genannten Temperaturen erhöht werden. Weitere Informationen sind in der BS DD CEN/TR 10347:2006-09-29 [28] enthalten.

Die bereits gezeigte Abbildung 19 stellt die empfohlene Schweißfolge für einen MSH-Fachwerkträger dar, wobei immer von innen nach außen geschweißt wird. Dadurch können sich die Teile infolge des Schrumpfens frei zueinander bewegen, was eine geringe Verformung und Schweißeigenspannung zur Folge hat.

Weitere Maßnahmen, die zum Abbau von Verformungen und/oder Eigenspannungen führen, sind z. B. lokale Erwärmung an geeigneten Stellen (Abb. 22 und 23), Hämmern der Schweißnähte usw.



a) Kreisförmige Erwärmung



b) Erwärmung gegen die Schrumpfung an langen Schweißnähten



 c) Dreieckförmige Wärmekeile gegen Winkelverformungen durch Kehlnahtschweißung

> Abb. 22: Verformungsabbau durch Erwärmung nach dem Schweißen



### > Bild I: Wärmefiguren an Hohlprofilen

- a) quadratisches Profil gleiche Wärmefiguren bewirken an jeder Seite gleiche Krümmung
- b) Querseite eines Rechteckprofils kann mit kleineren Wärmekeilen, bzw. Punkten gebogen werden
- c) Hochkantseite des Rechteckprofils benötigt zum Krümmen eine größere Schrumpfung
- d) Ovalquerschnitte mit Wärmestrichen oder -punkten biegen [1]







C

#### > Bild III: Flammrichten des Verteilers einer Rohrleitung

- a) Beseitigung der Krümmung vom Anschweißen einer Hängelasche
- b) Lange angeschweißte Stege benötigen Punktreihen an der Gegenseite
- c) Winkelverzug wird durch Queroval auf der Steg-Gegenseite heboben.

# 6.7 Prüfung von Schweißnähten

Abb. 24 gibt einen Überblick über die Unregelmäßigkeiten in Kehl- und Stumpfnähten. Querschnittsänderungen durch lokale Unregelmäßigkeiten wirken sich jedoch bei MSH-Profilen nicht in gleichem Maße festigkeitsmindernd aus wie bei Blechen oder Walzprofilflanschen mit ungestützten Rändern, da sich ein Störeinfluß günstiger verteilt und das dadurch hervorgerufene örtliche Moment zu kleineren Zusatzbeanspruchungen führen kann. Außerdem treten bei kreisförmigen und rechteckigen MSH-Profilen Inhomogenitäten, wie Seigerungszonen in den Enden und Kehlen von offenen Walzprofilen, nicht auf. Als Folge wird die Schweißnahtgüte der MSH-Profile nicht beeinträchtigt. Einen Überblick über die Unregelmäßigkeiten bei Schmelzschweißverfahren gibt die DIN EN ISO 5817 [29].

Die Kontrolle der Schweißnähte kann wie bei allen Stahlbauten entweder durch eine zerstörende und/oder eine zerstörungsfreie Prüfung erfolgen. Zu jeder dieser Gruppen sind unterschiedliche Prüfmethoden gegeben, die ihre spezifischen Anwendungsbereiche haben.

Die Art und Umfang der Prüfung für die Qualifikation des Schweißverfahrens ist in Abhängigkeit der Ausführungsklasse nach DIN EN 1090 [21] und zum Beispiel der DIN EN ISO 15613 [29] oder DIN EN ISO 15614-1 [30] zu bestimmen.

Es können folgende zerstörungsfreie Prüfungen angewandt werden:

- Sichtprüfung
- Eindringprüfung
- Magnetpulverprüfung
- Ultraschallprüfung
- Wirbelstromprüfung
- Durchstrahlungsprüfung
- Beugungslaufzeitprüfung (TOFD)
- Phased Array

Es können folgende zerstörende Prüfungen angewandt werden:

- Querzugversuch
- Längszugversuch Schweißgut
- Kreuzzugprüfung
- Biegeprüfung
- Bruchprüfung
- Kerbschlagbiegeversuch
- Härteprüfung
- Mikro- und Makroskopische Untersuchung

Die Fehlerbezeichnung von geometrischen Unregelmäßigkeiten sind in der DIN EN 6520-1 zusammengefasst. Nach dem Schweißen ist die Sichtkontrolle der erste Schritt, die Schweißnähte auf Oberflächenfehler, z. B. Oberflächenporen oder zur Oberfläche geöffnete Risse, und auf ihre Gleichmäßigkeit bzw. geometrischen Eigenschaften zu prüfen. Hier können Wurzelüberhöhungen, Kantenversatz oder der Schweißgutüberläufe auftreten. Die Schweißnahtdicke und der Übergang der Schweißnaht zum Grundwerkstoff kann mit Hilfe hierzu entwickelter Lehren gemessen werden.

Die Magnetpulverprüfung und das Farbeindringverfahren sind die einfachen und schnellen Methoden, um mit dem bloßen Auge Unregelmäßigkeiten zu erkennen. Die Farbeindringprüfung und Magnetpulverprüfung eignen sich für Stumpf- und Kehlnähte.

Mit der Farbeindringprüfung können Oberflächenfehler detektiert werden, die zur Oberfläche hin geöffnet sind, z.B. Risse, Poren, Bindefahler und Schweißgutüberlauf.

Mit der Magnetpulverprüfung können Risse an der Werkstückoberfläche, Bindefehler und Schweißgutüberlauf festgestellt werden.

Die US-Prüfung eignet sich sehr gut bei flächigen Schweißunregelmäßigkeiten, wie z.B. Rissen, Dopplungen und Bindefehlern innerhalb der Schweißverbindung. Das Prüfverfahren wird bei Wanddicken ab 8 mm eingesetzt für Stumpfnähte, in Einzelfällen auch bei Wanddicken unterhalb 8 mm. Dieses Verfahren eignet sich nicht für Kehlnähte.

Aufgrund der Strahlenbelastung wird die Röntgenprüfung eher gemieden. Arbeitsschutztechnisch existieren hier viele Auflagen, die einzuhalten sind. Die Röntgenprüfung eignet sich besonders für volumenartige Schweißunregelmäßigkeiten, wie z.B. Poren oder Schlackeneinschlüsse. Die Durchstrahlung von Kehlnähten ist eher ungünstig.



- E = Riß
- C = Bindefehler
- A = runde Poren
- Ab = Schlauchporen
- B = Schlackeneinschlüsse
- Df = Wurzelfehler in Kehlnaht
- D = Flankenbindefehler
- dn = ungenügend ausgefüllt
- ov = übermäßiges Schweißgut
- F = Einbrandkerbe



### 6.8 Eignungsprüfung von Schweißern

Für abnahmepflichtige bzw. sicherheitsrelevante Bauteile müssen die zum Einsatz kommenden Schweißer im Besitz von gültigen Schweißerprüfungen nach DIN EN ISO 9606-1 [32] sein.

### 6.9 Schweißen metallbeschichteter oder feuerverzinkter MSH-Profile

Da häufig ausreichend große Zink-Tauchbäder für die Feuerverzinkung von Gesamtkonstruktionen fehlen, ist man gezwungen, verzinkte Bauteile miteinander zu verbinden und dann zusammenzuschweißen. Hier tritt die Frage der Überschweißbarkeit der Verzinkung auf.

Im allgemeinen wird im Schweißnahtbereich die Zinkschicht durch Abbrennen, Strahlen oder Schleifen entfernt, so dass keinerlei Beeinflussung beim Schweißen stattfindet. Nach dem Schweißen wird der freie Schweißbereich mit Zinkbeschichtung gespritzt.

Bei der Abbrennung der Zinkschicht entstehen giftige Dämpfe; daher muss diese Arbeit in einem Raum mit guter Ventilation ausgeführt werden. Allerdings ist dies nicht für Zinkprimer erforderlich.

Für das Überschweißen von Fertigungsbeschichtungen, die im allgemeinen eine Schichtdicke zwischen 15 und 25 µm haben, gelten die Maßnahmen nach DASt-Richtlinie 006 [33].







> Abb. 25: Herstellung von Röntgenfilmaufnahmen
### 7 Rechnerische Auslegung der Schweißnähte

In Abschnitt 5 werden die in Hohlprofilkonstruktionen vorkommenden Schweißnahtformen und -durchführungsarten beschrieben, die in engem Zusammenhang mit der Bemessung von Schweißnähten stehen. Hierzu gehören die Empfehlungen zu rechnerischer Schweißnahtdicke, -länge und -fläche sowie zu den Nachweismethoden für die Nähte, die in DIN EN 1993-1-8 [25] geregelt sind.

#### 7.1 Schweißnahtdicke

Eine Definition der rechnerischen Schweißnahtdicke "a" für die Stumpf und Kehlnähte in Schweißkonstruktionen aus MSH-Profilen ist in Abschnitt 5 gegeben worden. Der Anschaulichkeit halber werden sie nachfolgend dargestellt und weiter die Vorschriften erläutert.



Die einseitige nicht durchgeschweißte Stumpfnaht (HV-Naht) darf als Teil einer Schweißnahtgruppe um den Umfang eines Hohlprofils verwendet werden. Die Nahtdicke a ist in diesem Fall gleich dem Abstand vom theoretischen Wurzelpunkt zur Nahtoberfläche. Hierbei ist  $a < t_1$  zulässig, wenn die Zulässigkeit geringerer Schweißnahtabmessungen im Hinblick auf Beanspruchbarkeit und Verformungs- und/oder Rotationsvermögen nachgewiesen wird.



a=t<sub>1</sub>





a=t, a\*: siehe Abbildungen 16, 18 (Rohrknotenanschlüsse)

A) theoretischer Wurzelpunkt



Nahtdicke "a" ist gleich der bis zum theoretischen Wurzel punkt gemessenen Höhe des einzeichenbaren gleichschenkligen Dreiecks.

a: siehe Abschnitt 5.2 a = mindestens 3 mm

 $\overline{a} = a + e$   $\overline{a}$ : entspricht Nahtdicke "a" in A e: mit Verfahrensprüfung festlegen (siehe DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 4.5.2)  $a = \overline{a} + e$ , wie oben

Bei tiefem Einbrand darf eine vergrößerte Nahtdicke in der Berechnung berücksichtigt werden, vorausgesetzt, dass der über den theoretischen Wurzelpunkt hinausgehende Einbrand durch eine Verfahrensprüfung sichergestellt wird.



> Abb. 26: Wirksame Nahtdicke von Hohlkehlnähten an Rechteckhohlprofilen

## 7.2 Schweißnahtlänge und -fläche

Für Kehl- und HV-Nähte ist die rechnerische Nahtlänge Iw die geometrische Länge der Wurzellinie. Für die unterschiedlichen Anschlüsse von Hohlprofilen kann sie wie folgt berechnet werden:

 a) Planschnitt eines Kreishohlprofils am Anschluss an ein Blech oder ein Rechteckhohlprofil



\* Kehlnaht \*\* HV-Naht Bei  $\theta = 90^{\circ}$ Nahtlänge  $l_w = \pi * d_1$ Bei anderen  $\theta$ -Werten: Nahtlänge  $l_w = a + b + 3\sqrt{(a^2+b^2)}$ 

$$a = \frac{d_1}{2\cos\theta}, b = \frac{d_1}{2}$$

Beispiel: kreisförmiges MSH-Profil  $\varnothing$  =114,3 mm, Kehlnaht,  $\theta$  =45°

$$a = \frac{114,3}{2\cos 45^{\circ}} = \frac{114,3}{2*0,707} = 80,82 \text{ mm}$$
$$b = \frac{114,3}{2} = 57,15 \text{ mm}$$

Nahtlänge 
$$l_w = 80,82 + 57,15 + 3 * \sqrt{80,82^2 + 57,15^2} = 435 \text{ mm}$$

 b) Planschnitt eines Rechteckhohlprofils am Anschluss an ein Blech oder ein Rechteckhohlprofil



\* Kehlnaht \*\* HV-Naht Bei  $\theta = 90^{\circ}$ Nahtlänge I<sub>w</sub> = 2h<sub>1</sub> + 2b<sub>1</sub> Bei anderen  $\theta$ -Werten

#### Nahtlänge

 $l_{w} = \frac{2h_{1}}{\cos\theta} + 2b_{1}$ 

Beispiel: Rechteckiges MSH-Profil 90 x 50 x 4,5 mm, HV-Naht,  $\theta$  = 50°

 $h_1^{**} = 90 - 2 \cdot 4,5 = 81 \text{ mm}$  $b_1^{*} = 50 - 2 \cdot 4,5 = 41 \text{ mm}$ 

#### Nahtlänge

 $l_{w} = \frac{2 * 81}{\cos 50^{\circ}} + 2 * 41 = 334 \text{ mm}$ 

Nahtlänge  $l_w = a + b + 3\sqrt{a^2 + b^2}$ 

$$a = \frac{d_1}{2\cos\theta}, b = \frac{d_0 * \Phi}{4}$$

 $\Phi$  in Radiant ist sin  $\frac{\Phi}{2} = \frac{d_1}{d_0}$ 

Beispiel:  $d_1 = 88,9 \text{ mm}, d_0 = 139,7 \text{ mm}, \theta = 45^\circ,$ Kehlnaht

$$\sin\frac{\Phi}{2} = \frac{88,9}{139,7} = 0,636 \Rightarrow \Phi = 79^{\circ}$$
  
=1.3795 Rad

$$a = \frac{88,9}{2\cos 45^{\circ}} = 62,86 \text{ mm}$$
$$b = \frac{139,7 * 1,3795}{4} = 48,48 \text{ mm}$$

Nahtlänge  $l_w = 62,86 + 48,18 + 3\sqrt{62,86^2 + 48,48^2} = 349 \text{ mm}$ 

Die rechnerische Schweißnahtfläche  ${\rm A}_{\rm w}$  wird wie folgt ermittelt:

$$A_w = \sum a * l_w$$



\* Kehlnaht \*\* HV-Naht

#### 7.3 Durchgeschweißte Stumpfnaht

Entsprechend DIN EN 1993-1-8 [25] Abschnitt 4.7.1 wird der Bauteilnachweis des schwächeren Bauteils der zu verbindenden Bauteile maßgebend unter der Voraussetzung, dass die Mindestwerte Streckgrenze und Zugefestigkeit der verwendeten Schweißzusätze nicht geringer sind als die des Grundwerkstoffes des Bauteils mit geringerer Wanddicke.

#### 7.4 Nicht durchgeschweißte Stumpfnaht

Nicht durchgeschweißte Stumpfnähte sind in der Regel wie Kehlnähte mit tiefem Einbrand zu bemessen (vgl. DIN EN 1993-1-8 [25] Abschnitt 4.7.2). Hier ist auf das a-Maß zu achten (vgl. Kapitel 5 und 7.1).

#### 7.5 Kehlnähte

## 7.5.1 Richtungsbezogenes Verfahren

Bei dem richtungsbezogenen Verfahren werden je Längeneinheit die Kräfte übertragen, aufgeteilt in die Richtungen parallel und rechtwinkelig zur Längsachse der Schweißnaht und normal und rechtwinkelig zu Lage der wirksamen Kehlnahtfläche. Die Kehlnahtfläche A<sub>w</sub> ist das Produkt aus a-Maß und Kehlnahtlänge. Bei unterbrochenen Kehlnähten ist die Summe der einzelnen Kehlnähte die wirksame Kehlnahtfläche. Hier sind allerdings noch besondere Vorgaben der DIN EN 1993-1-8 [25] Abschnitt 4 einzuhalten.

- → σ<sub>⊥</sub> Normalspannung senkrecht zur Schwei
  ßnahtachse
- → σ<sub>II</sub> Normalspannung parallel zur Schweißnahtachse
- → τ<sub>⊥</sub>Schubspannung (Ebende der Kehlnahtfläche) senkrecht zur Schweißnahtachse
- τ<sub>II</sub> Schubspannung (Ebende der Kehlnahtfläche) senkrecht zur Schweißnahtachse



Die Tragfähigkeit einer Kehlnaht ist gewährleistet, wenn die nachfolgenden Bedingungen erfüllt werden (vgl. DIN EN 1993-1-8 [25] Gl. 4.1).

$$[\sigma_{\!\scriptscriptstyle \perp}^2 \! + \! 3 \; (\tau_{\!\scriptscriptstyle \perp}^2 \! + \! \tau_{\rm II}^2)]^{\! 0.5} \! \leq \; \frac{f_{\scriptscriptstyle u}}{(\beta_{\scriptscriptstyle w} \star \gamma_{\rm M2})}$$

$$\sigma_{\!_\perp} \le 0.9 * \frac{f_{\!_u}}{\gamma_{_{M2}}}$$

Als  $f_u$  wird die Zugfestigkeit des schwächeren angeschlossenen Bauteils bezeichnet.  $\beta_w$  ist der Korrelationsbeiwert entsprechend Tabelle 4.1 der DIN EN 1993-1-8 [25]. Der Teilsicherheitsbeiwert für Anschlüsse  $\gamma_{M2}$  für die Beanspruchbarkeit von Schweißnähten ist der DIN EN 1993-1-1 [22] zu entnehmen. Die Korrelationswerte und Teilsicherheitsbeiwerte können je nach Nationalen (NA) unterschiedlich sein.

#### Tabelle 14: Korrelationsbeiwert $\beta_w$ für Kehlnähte

	Name und Stahlsorte									
EN 10025	EN 10210	EN 10219	Korrelationsbelwert P <sub>w</sub>							
S 235 S 235 W	S 235 H	S 235 H	0,8							
S 275 S 275 N/NL S 275 M/ML	S 275 H S 275 NH/NLH	S 275 H S 275 NH/NLH S 275 MH/MLH	0,85							
S 355 S 355 N/NL S 355 M/ML S 355 W	S 355 H S 355 NH/NLH	S 355 H S 355 NH/NLH S 355 MH/MLH	0,9							
S 420 N/NL S 420 M/ML		S 420 MH/MLH	1,0							
S 460 N/NL S 460 M/ML S 460 Q/QL/QL1	S 460 NH/NLH	S 460 NH/NLH S 460 MH/MLH	1,0							

#### 7.5.2 Vereinfachtes Verfahren

Vereinfachtes Verfahren entsprechend DIN EN 1993-1-8 [25] Abschnitt 4.5.3.3

$$\label{eq:rescaled} F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \qquad \mbox{(GI. 4.2 DIN EN 1993-1-8)}$$

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} * a = \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}} * a$$

(Gl. 4.3 u. 4.4 DIN EN 1993-1-8)

Dabei ist  $F_{w,Ed}$  der Bemessungswert der auf die wirksame Kehlnahtfläche je Längeneinheit wirkt und  $F_{w,Rd}$  der Bemessungswert der Tragfähigkeit je Längeneinheit.  $f_{vw,d}$  ist der Bemessungswert der Scherfestigkeit der Schweißnaht und a ist die Kehlnahtdicke. Die Korrelationswerte und Teilsicherheitsbeiwerte können je nach Nationalen Anhang (NA) unterschiedlich sein.

$$\begin{split} F_{w,Ed} &= \sigma_{w,Ed} * a \\ \sigma_{w,Ed} &= \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2 + \tau_{II}^2} \\ \sigma_{\perp} &= \frac{N_{Ed}}{A_W} \quad \tau_{\perp} &= \frac{V_{z,Ed}}{A_W} \quad \tau_{II} &= \frac{V_{y,Ed}}{A_W} \\ A &= a * L \end{split}$$



#### 7.6 Weitere Hinweise

Neben der Bemessung der Schweißnaht, sind die einzelnen Versagenformen zu prüfen. Die Versagensformen sind entsprechend DIN EN 1993-1-8 [25] zu prüfen für Stahlbauten. Je nach Anwendungsbereich können andere Regelwerke zur Geltung kommen.

Bei ermüdungsbeanspruchten Konstruktionen sind die Regeln der DIN EN 1993-1-9 [34] zu beachten für Stahlbauten. Je nach Anwendungsbereich können andere Regelwerke zur Geltung kommen.

### 8 Literatur

- Albiez, M., Ummenhofer, T., Bucak, Ö., Ehard, H., Fricke, H., Vallée, T. (2016): Geklebte Kreishohlprofilanschlüsse in Stahlkonstruktionen. Stahlbau, 85 (12), S. 828–835
- [2] DIN EN 10210-1:2016-01 Entwurf, Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen
- [3] DIN EN 10225-3:2017-09 Entwurf Schweißgeeignete Baustähle für feststehende Offshore-Konstruktionen -Technische Lieferbedingungen -Teil 3: Warmgefertigte Hohlprofile
- [4] DIN EN 1011: Schweißen Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe
- [5] DIN EN 10204: Metallische Erzeugnisse - Arten von Prüfbescheinigungen
- [6] DIN EN ISO 4063: Schweißen und verwandte Prozesse – Liste der Prozesse und Ordnungsnummern
- [7] DIN EN ISO 4063: Schweißzusätze Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung
- [8] DIN EN ISO 6947: Schweißen und verwandte Prozesse – Schweißpositionen
- [9] DIN EN ISO 18275: Schweißzusätze Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von hochfesten Stählen - Einteilung
- [10] DIN EN ISO 544: Schweißzusätze Technische Lieferbedingungen für Schweißzusätze und Pulver - Art des Produktes, Maße, Grenzabmaße und Kennzeichnung
- [11] DIN EN ISO 14175: Schweißzusätze Gase und Mischgase f
  ür das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse
- [12] DIN EN ISO 14341: Schweißzusätze Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen - Einteilung
- [13] DIN EN ISO 17632: Schweißzusätze Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von unlegierten Stählen und Feinkornstählen - Einteilung
- [14] DIN EN ISO 636: Schweißzusätze Stäbe, Drähte und Schweißgut zum Wolfram-Inertgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen - Einteilung

- [15] DIN EN ISO 16834: Schweißzusätze Drahtelektroden, Drähte, Stäbe und Schweißgut zum Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen – Einteilung
- [16] DIN EN ISO 18276: Schweißzusätze Schweißzusätze - Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von hochfesten Stählen - Einteilung
- [17] DIN EN ISO 18276: Schweißzusätze Schweißzusätze - Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von hochfesten Stählen - Einteilung
- [18] DIN EN ISO 9692-2: Schweißen und verwandte Verfahren - Schweißnahtvorbereitung - Teil 2: Unterpulverschweißen von Stahl
- [19] DIN EN ISO 20378: Schweißzusätze Stäbe zum Gasschweißen von unlegierten und warmfesten Stählen – Einteilung
- [20] DIN EN ISO 9692-1: Schweißen und verwandte Prozesse - Arten der Schweißnahtvorbereitung - Teil 1: Lichtbogenhandschweißen, Schutzgasschweißen, Gasschweißen, WIG-Schweißen und Strahlschweißen von Stählen
- [21] DIN EN 1090-2: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken
- [22] DIN EN 1993-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
- [23] DASt-Ri 011: Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle mit Mindeststreckgrenzenwerten von 460 und 690 N/mm2, Anwendung für Stahlbauten, Ausgabe Februar 1988
- [24] DASt-Ri 007: Richtlinien für die Lieferung, Verarbeitung und Anwendung wetterfester Baustähle, Ausgabe November 1979
- [25] DIN EN 1993-1-8: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen
- [26] Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 088-87: Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, Richtlinien für die Weiterverarbeitung, besonders für das Schmelzschweißen; Verlag Stahleisen, 1987
- [27] Liedtke, M., Scheller, W., Krampen, J.(2012): Welding recommendations for modern tubular steels
- [28] BS DD CEN/TR 10347: Hinweise fuer das Umformen von Baustaehlen bei der Verarbeitung

- [29] DIN EN ISO 5817:
- Schweißen Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten [30] DIN EN ISO 15613:
- Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Qualifizierung aufgrund einer vorgezogenen Arbeitsprüfung
- [31] DIN EN ISO 15614-1: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Schweißverfahrensprüfung - Teil 1: Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen
- [32] DIN EN ISO 9606-1: Prüfung von Schweißern - Schmelzschweißen - Teil 1: Stähle
- [33] DASt-Ri 006: Überschweißen von Fertigungsbeschichtungen im Stahlbau, Januar 1980
- [34] DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung

### Biegen von warmgefertigten MSH-Profilen – 1 Einleitung

Obwohl seit Anfang der siebziger Jahre das Biegen von größeren Stahlprofilabmessungen technisch durchgeführt werden kann, haben die Architekten und Ingenieure erst etwa in den letzten zehn Jahren angefangen, die Möglichkeiten dieser Technik umfangreich auszuschöpfen. Im Rahmen dieser Entwicklung haben die MSH-Profile, sowohl kreisförmige als auch rechteckige, in weitreichenden Anwendungsbereichen, wie bei architektonisch ansprechenden Stahlbauten mit Gewölben und Kuppeln, Maschinenbauteilen aus gebogenen Hohlprofilen - die in vielen Fällen große Fabrikationserleichterungen ermöglichen - und selbstverständlich im Pipelinebau, ihren festen Platz errungen. Es ist hierbei klar, daß die Biegemethoden und -einrichtungen sowie die Materialund Formeigenschaften von Hohlprofilen den speziellen Anforderungen gerecht werden müssen.

Das Biegen eines MSH-Profils kommt dadurch zustande, dass durch Umformung im plastischen Bereich eine stetige Krümmung der Hohlprofilachse erzeugt wird. Die Verformung entsteht durch Strecken der Außenfasern und durch Stauchen der Fasern an der Innenseite des Bogens. Bei diesem Vorgang kann eine zur Rissbildung beitragende Verschwächung der Wanddicke an der Außenseite und eine Faltenbildung mit Wanddickenvergrößerung an der Innenseite eintreten. Diese sowie auch die beim Biegen auftretende Ovalität eines Hohlprofils sind möglichst klein zu halten.

Das Biegeverhalten eines MSHProfils wird von den folgenden mechanischen Eigenschaften und geometrischen Parametern maßgebend bestimmt:

- → Streckgrenze Das Biegen ist um so einfacher. ie aerinaer die Streckarenze ist.
- → Zugfestigkeit Hohe Zugfestigkeit verhindert frühe Rissbildung.
- → Dehnfähigkeit Ausreichende Bruchdehnungswerte (mindestens 20 %)
- → Gefügezustand des Werkstoffes
- → Verhältnis

Wanddicke des Hohlprofils Durchmesser des Kreishohlprofils bzw. Höhe des Rechteckprofils

→ Verhältnis

Krümmungsradius Durchmesser des Kreishohlprofils bzw. Höhe des Rechteckprofils

Zusätzlich zu den vorgenannten Werten bestimmen auch die absoluten Maße eines Hohlprofils die Art des Biegeverfahrens, z. B. ob warm oder kalt gebogen wird. Außerdem ist es wichtig, bei der Festlegung der Mindest-Krümmungsradien die Verwendung des gebogenen Endprodukts zu berücksichtigen, um dementsprechend die Anforderungen festzulegen. Zum Beispiel werden die zulässigen Deformationen (Konkavität oder Konvexität der Seitenfläche) von Hohlprofilen, die für den Büromöbelbau eingesetzt werden, nicht für gebogene MSH-Profile im Gebäudebau gelten.

Warmbiegung von galvanisierten Hohlprofilen ist zu vermeiden, da die galvanische Schicht beim Wärmebiegevorgang zerstört wird. Kaltbiegung von galvanisierten Hohlprofilen wird im allgemeinen nicht empfohlen, wenn aber unbedingt erforderlich, ist der Krümmungsradius gleich oder größer als 12 x Höhe des Rechteckhohlprofils oder 8 x Außendurchmesser des Kreishohlprofils zu nehmen. Günstig ist es, die Galvanisierung nach der Kaltbiegung durchzuführen, wobei zwischen Biegung und Galvanisierung das Hohlprofil wärmebehandelt wird.





d<sub>a</sub> = Außendurchmesser



## 2 Biegeverfahren und Biegeradien

Grundsätzlich können MSH-Profile sowohl in warmem als auch in kaltem Zustand gebogen werden. Das Biegen wird im allgemeinen in der Werkstatt, aber in manchen Fällen, je nach Abmessungsgrößen (klein) und Verwendung, auch auf der Baustelle durchgeführt. Es gibt jedoch große Überlappungsbereiche, bei denen sowohl Kalt- als auch Warmbiegeverfahren angewendet werden. Ferner muss je nach Anwendungszweck und -art beachtet werden, ob nach der Kaltbiegung eine anschließende Wärmenachbehandlung notwendig ist, um den ursprünglichen Gefügezustand wiederherzustellen (Nachbehandlungstemperatur je nach Stahlgüte).

Nachfolgend werden einige Biegeverfahren für Hohlprofile tabellarisch dargestellt (siehe Tabelle 1).





> Abb.2: Kaltbiegen mit Drehrollenformer (Aufrollen)



> Abb.3: Kaltbiegen mit Biegekasten



> Abb.4: Biegen mit Dreiwalzenmaschine

Bezeichnung des Biegeverfahrens	Wärmezustand	Ergebnisse	
Biegepressen (siehe Abb. 1)	kalt	Das Hohlprofil wird über zwei feste Rollen gesetzt und mit einem Biege- stempel gedrückt. Das Verfahren kann auch mit einem feststehenden Stempel und durch Pressen der seitlichen beweglichen Rollen ausgeführt werden.	Durchführbar für Biegungen bis zu 180° bei sehr unterschiedlichen Profilabmessun- gen. Eine Verformung des Hohlprofilquer- schnitts wird mit Hilfe der Anschläge in Formen und Rollen vermindert.
Biegen durch Aufrollen (siehe Abb. 2)	kalt	Das Hohlprofil wird durch Schellen oder einen Schraubstock (a) gehalten, der sich zusammen mit einem Formstück (b) bewegt. Ein Führungsstück (c) zwingt das Hohlprofil, sich in die Rille des Form- stücks (b) zu legen, wenn dieses sich dreht. Um die Abplattung der Wände und die Ovalität des Profilquerschnitts zu ver- meiden, kann innerhalb des Hohlprofils ein herausziehbares Futter eingeführt werden, das an einer Stange (d) befestigt ist.	Üblicherweise wird ein Biegewinkel bis 45° ausgeführt; für kleinere Abmessungen ist auch die Herstellung einer U-Form möglich. Bei Winkeln größer als 90°, insbesondere bei U-förmigen Bögen, ist das Formwerk- zeug geteilt, um das fertige Werkzeug herausheben zu können.
Biegen durch Hineinzwingen (siehe Abb. 3)	kalt	Prinzipiell wird bei dieser Methode das Hohlprofil in einen zuvor hergestellten Bogen hineingezwungen. Der Biegeka- sten wird auf einem horizontalen Sockel befestigt, und ein Führungskasten wird oberhalb des Biegekastens angeordnet. Das Hohlprofil wird mit Hilfe eines Stößels erst durch den Führungskasten und dann durch den Biegekasten hindurchgepreßt.	Um eine Beschädigung des Biegekastens zu vermeiden, muß das Hohlprofil ein Führungsstück haben. Die Anwendung von Gleitmitteln ist unbedingt notwendig.
Biegen mit Dreiwalzenmaschine (siehe Abb. 4)	sowohl kalt als auch warm	Dieses Verfahren wird weitgehend in Stahlbaubetrieben eingesetzt. Das Biegen erfolgt durch Hindurchführen des Hohlprofils zwischen drei Walzen. Alle drei Walzen können angetrieben sein. Die mittlere aber, die die Verformung bewirkt, kann lose mitlaufen. Die Walzen müssen an die zu biegenden Hohlprofile angepaßt werden. Entspre- chend den Hohlprofilabmessungen sind daher die Walzen unterschiedlich. Es gibt auch Maschinen mit vier Rollen, von denen drei feststehend sind. Für die Ermittlung der Mindestbiegeradien gemäß Tabelle 2 werden die Details der eingesetzten Dreiwalzenbiegemaschinen in Tabelle 3 angegeben.	In der Praxis wird für kreisförmige Hohl- profile üblicherweise ein Krümmungs- radius von 5 x Außendurchmesser für Kaltbiegung und 3 x Außendurchmesser für Warmbiegung genommen. In Tabelle 2 sind die Krümmungsradien für Rechteckhohlprofile bei Kaltbiegung aufgelistet, die aufgrund umfangreicher Versuche mit Hohlprofilen aus Stahl mit Streckgrenze = 350 N/mm2 Zugfestigkeit = 450-620 N/mm2 Mindest- Bruchdehnung = 22% Elastizitäts- modul $E_e$ = 200000 N/mm2 Plastizitäts- modul $E_p$ = 5 000 N/mm2 ermittelt worden sind [1, 2].

#### Tabelle 1: Biegeverfahren von MSH-Profilen

Bezeichnung des Biegeverfahrens	Wärmezustand	Beschreibung des Biegeverfahrens	Ergebnisse
Biegen von Kreis- hohlprofilen mit Sandfüllung	warm	Das Kreishohlprofil wird vor dem Erwärmen mit trockenem Sand gefüllt, damit Faltenbil- dung an der Innenseite des Bogens vermie- den und die Ovalität des Querschnitts klein gehalten wird. Die Biegezone des Hohlpro- fils wird auf 850-1100 °C erwärmt und nach Einspannung an einem Ende durch Ziehen am anderen Ende um eine Biegeplatte "herumgebogen". Dies erfolgt schrittweise, zunächst an der Einspannstelle. Nach der Abkühlung der ersten Biegezone wird die Verformung der benachbarten Zone durch- geführt. Schritt für Schritt wird in dieser Weise der gesamte Biegevorgang beendet.	Biegung von größeren Kreishohlprofilen (größere Durchmesser und Wanddicken) möglich
		Nach einem anderen Biegeverfahren, ge- nannt "Hamburger Rohrbogen", wird das erwärmte Kreishohlprofil über einen koni- schen Innendorn geschoben. Es findet eine Krümmung des Kreishohlprofils mit gleich- zeitiger Durchmesservergrößerung statt.	Herstellbar: Nach DIN EN 10253-2:2008: bis 914,4 mm ä $\emptyset$ Biegeradius R = 2,5 x ä $\emptyset$ Nach Werksnorm 2: bis 762 mm ä $\emptyset$ Biegeradius R = 1 x ä $\emptyset$ Nach Werksnorm 4: bis 323,2 mm ä $\emptyset$
Biegen durch induktive Erwärmung (siehe Abb. 6)	warm	In der Biegeanlage werden die Hohlprofile auf einer in Längsrichtung schmalen Zone durch einen ringförmigen Induktor erwärmt. Die Umformung (Biegung) findet in der schmalen erwärmten Zone statt. Nach dem darauffolgenden Vorschub des Hohlprofils durch den Induktor und die Erwärmung folgt der Biegevorgang der nächsten Zone usw., so dass die gesamte Bogenlänge mit dem gewünschten Biegeradius hergestellt wird.	Biegeradius R = $2 \times \ddot{a} \oslash$ Abb. 7 [3] zeigt das Fertigungsprogramm für Kreishohlprofilbögen der Mannes- mannröhren-Werke AG, Mülheim, die durch Induktivwarmbiegung hergestellt werden. Die Wanddickenveränderungen und die Ovalität beim Biegen werden in Abb. 8 dargestellt [3]. Tabelle 4 [6] listet das Fertigungspro- gramm der Mannesmann Anlagenbau AG, Dortmund, mit den Angaben über den kleinsten Biegeradius [6] auf, wobei die Kreishohlprofilbögen mit der CNC- Induktionsbiegemaschine 1) hergestellt werden. Rechteckhohlprofile können auch nach dem Induktivwarmbiegeverfahren herge- stellt werden [4]. Innerhalb des MSH-Fertigungsprogram- mes der Mannesmannrohr GmbH wird ein Mindestbiegeradius von 10 x Höhe "a" des Rechteckhohlprofils (siehe Abb. 10) vorgeschlagen. Folgende Toleranzen sind durch die Versuche ermittelt worden:

Bezeichnung des Biegeverfahrens	Wärmezustand	Beschreibung des Biegeverfahrens	Ergebnisse
Fortsetzung Biegen durch induktive Erwärmung (siehe Abb. 6)	warm		<ul> <li>Kantenlänge:</li> <li>Druckzone: -1 % bis + 3 % der ursprünglichen Kantenlänge</li> <li>Zugzone: -4 % bis + 1 % der ursprünglichen Kantenlänge</li> <li>Ober-/ Unterkante: ±2 %</li> <li>Wanddicke:</li> <li>Zugzone: ≤ I -8,7 I %</li> <li>Druckzone: ≥ + 10 %</li> <li>Diese Werte addieren sich zu den entsprechenden Toleran- zen nach DIN EN 10210, Teil 2 [7]</li> <li>Rechtwink- ligkeit: ±2 %</li> <li>Wölbung: Siehe Tabelle 6; es können Maßnahmen in der Adjustage erforderlich sein. Z.B. können zu starke Wölbungen durch ein hydraulisches Innenwerkzeug vermindert werden.</li> </ul>
Biegen durch schräge Schnitte (siehe Abb. 9)	kalt	Bei dieser Methode wird auf den Biegevorgang verzichtet, und die gebogene Form wird dadurch erreicht, dass zuvor schräg zuge- schnittene Hohlprofilstücke stumpf miteinander verschweißt werden. Es kann auch auf drei Profilseiten von Rechteckhohlprofilen ein V-förmiger Einschnitt vorgenom- men werden. Der Bogen entsteht durch Anstoßen der Schnittkan- ten, die dann verschweißt wer- den.	Dieses Verfahren wird meist zur Herstel- lung von Bögen mit sehr großen Biege- radien angewendet. Das Verfahren mit dem V-förmigen Ein- schnitt ist für die Herstellung von Bögen aus Rechteckhohlprofilen kleinerer Abmessungen geeignet.

#### Tabelle 2: Mindest-Biegeradien für quadratische und rechteckige MSH-Profile beim Kaltbiegen mit Dreiwalzenmaschinen [2] (Maschinendetails siehe Tabelle 3)

Hohlprofilabmessur	ngen Pb2)		Pe1)				
h x b x t (mm)	1%	2 %	0,5%	1%	2 %		
	Biegeradie	en (m)	Biegeradi	en (m)			
40 x 40 x 3,2	1,53	0,47	0,35	0,22	0,22		
4,0	1,44	0,45	0,22	0,22	0,22		
50 x 50 x 3,2	3,05	0,95	1,47	0,55	0,22		
4,0	2,88	0,90	0,79	0,29	0,22		
5,0	2,72	0,85	0,43	0,22	0,22		
60 x 60 x 3,2	5,36	1,67	4,74	1,76	0,66		
4,0	5,07	1,57	2,55	0,95	0,35		
5,0	4,79	1,49	1,37	0,51	0,22		
70 x 70 x 3,2	8,65	2,69	12,74	4,74	1,76		
3,6	8,39	2,61	9,18	3,41	1,27		
4,0	8,17	2,54	6,85	2,55	0,95		
5,0	7,72	2,40	3,68	1,37	0,51		
80 x 80 x 3,2	13,08	4,06	29,99	11,15	4,14		
3,6	12,69	3,94	21,61	8,03	2,99		
4,0	12,36	3,84	6,12	5,99	2,23		
5,0	11,68	3,63	8,66	3,22	1,20		
6,0	11,02	3,42	4,55	1,69	0,63		
90 x 90 x 3,2	18,83	5,85	63,82 2	3,72	8,82		
3,6	18,28	5,68	45,98	17,09	6,35		
4,0	17,80	5,53	34,29	12,75	4,74		
5,0	16,83	5,23	18,42	6,85	2,55		
6,3	15,87	4,93	9,68	3,60	1,34		
8,0	14,94	4,64	4,98	1,85	0,69		
100 x 100 x 4,0	24,67	7,67	67,38	25,05	9,31		
5,0	23,32	7,25	36,20	13,46	5,00		
6,3	22,00	6,83	19,03	7,07	2,63		
8,0	20,71	6,43	9,78	3,64	1,35		
10,0	19,58	6,08	5,26	1,95	0,73		
120 x 120 x 4,0	43,41	13,48	216,84	80,60	29,96		
5,0	41,03	12,75	116,51	43,31	16,10		
6,3	38,70	12,02	61,23	22,76	8,46		
8,0	36,44	11,32	31,49	11,70	4,35		
10,0	34,44	10,70	16,92	6,29	2,34		





1)  $P_e = e/h * 100 \text{ in \%}$ 2)  $P_b = (b' - b)/b * 100 \text{ in \%}$ 





1)  $P_e = e/h * 100$  in % 2)  $P_b = (b' - b)/b * 100$  in %

Hohlprofilabmessun	gen P <sub>b</sub> <sup>2</sup> )		P_1)			
h x b x t (mm)	1%	2 %	0,5%	1%	2 %	
	Biegeradie	en (m)	Biegerad	Biegeradien (m)		
140 x 140 x 5,0	66,15	20,55	313,00	116,34	43,25	
6,3	62,40	19,38	164,48	61,14	22,73	
8,0	58,75	18,25	84,59	31,44	11,69	
10,0	55,53	17,25	45,45	16,89	6,28	
150 x 150 x 6,3	77,27	24,00	255,98	95,15	35,37	
8,0	72,75	22,60	131,64	48,93	18,19	
10,0	68,76	21,36	70,73	26,29	9,77	
160 x 160 x 6,3	82,92	20,94	642,98	194,62	58,91	
8,0	54,64	13,79	321,95	97,45	29,50	
10,0	37,00	9,34	168,73	51,07	15,46	
180 x 180 x 6,3	123,65	31,22	831,60	251,71	76,19	
8,0	81,47	20,57	416,40	126,03	38,15	
10,0	55,18	3,93	218,22	66,05	19,99	
200 x 200 x 6,3	176,76	44,63	1.046,76	316,83	95,90	
8,0	116,74	29,41	524, 13	158,64	48,02	
10,0	78,88	19,92	274,69	83,14	25,17	
220 x 220 x 6,3	244,23	61,67	1.288,99	390,15	118,09	
8,0	160,92	40,63	645,42	196,35	59,13	
10,0	108,98	27,52	338,25	102,38	30,99	
250 x 250 x 6,3	376,81	95,14	1.704,11	515,80	156,12	
8,0	248,27	62,69	853,27	258,27	78,17	
10,0	168,15	42,46	447,18	135,35	40,97	
260 x 260 x 8,0	283,60	71,61	929,58	281,37	85,15	
10,0	192,04	48,49	487,03	147,41	44,62	
300 x 300 x 8,0	460,71	116,32	1.270,17	384,45	116,37	
10,0	312,03	78,79	665,71	201,50	60,99	
350 x 350 x 8,0	777,00	196,19	1.777,92	538,14	162,88	
10,0	526,28	132,88	931,90	282,07	85,38	
400 x 400 x 10,0	827,66	208,98	1.247,09	377,47	114,25	

Hohlprofilabmessung	jen P <sub>b</sub> ²)		P_1)		
h x b x t (mm)	1%	2 %	0,5%	1%	2 %
	Biegeradie	en (m)		Biegeradi	en (m)
50 x 30 x 3,2	2,31	0,72	0,49	0,22	0,22
4,0	2, 18	0,68	0,26	0,22	0,22
60 x 40 x 3,2	4,30	1,34	1,97	0,73	0,27
4,0	4,07	1,26	1,06	0,39	0,22
5,0	3,84	1,19	0,57	0,22	0,22
70 x 40 x 3,2	6,38	1,98	3,79	1,41	0,52
4,0	6,03	1,87	2,04	0,76	0,28
5,0	5,70	1,77	1,10	0,41	0,22
80 x 40 x 3,2	8,97	2,79	6,69	2,49	0,92
4,0	8,48	2,73	3,59	1,34	0,50
5,0	8,01	2,49	1,93	0,72	0,27
90 x 50 x 3,2	13,68	4,25	17,88	6,65	2,47
3,6	13,28	4,12	12,88	4,79	1,78
4,0	12,93	4,02	9,61	3,57	1,33
5,0	12,22	3,80	5,16	1,92	0,71
100 x 50 x 3,2	17,90	5,56	27,96	10,39	3,86
3,6	17,38	5,40	20,14	7,49	2,78
4,0	16,92	5,26	15,02	5,58	2,08
5,0	15,99	4,97	8,07	3,00	1,12
100 x 60 x 3,2	19,77	6,14	41,50	15,42	5,73
3,6	19,19	5,96	29,89	11,11	4,13
4,0	18,69	5,80	22,30	8,29	3,08
5,0	17,66	5,49	11,98	4,45	1,66
6,3	16,66	5,18	6,30	2,34	0,87
120 x 60 x 3,2	31,49	9,78	89,99	33,45	12,43
3,6	30,57	9,50	64,83	24,10	8,96
4,0	29,77	9,25	48,35	17,97	6,68
5,0	28,14	8,74	25,98	9,66	3,59
6,3	26,54	8,25	13,65	5,07	1,89
8,0	24,99	7,76	7,02	2,61	0,97
120 x 80 x 4,0	34,81	10,81	90,14	33,50	12,45
5,0	32,90	10,22	48,43	18,00	6,69
6,3	31,04	9,64	25,45	9,46	3,52
8,0	29,22	9,08	13,09	4,86	1,81
10,0	27,62	8,58	7,03	2,61	0,97
	i	I	1	1	I





1)  $P_e = e/h * 100 \text{ in \%}$ 2)  $P_b = (b' - b)/b * 100 \text{ in \%}$ 





1)  $P_e = e/h * 100$  in % 2)  $P_b = (b' - b)/b * 100$  in %

Hohlprofilabmessun	gen P <sub>b</sub> <sup>2</sup> )		P_1)		
h x b x t (mm)	1%	2 %	0,5%	1%	2 %
	Biegeradie	en (m)	Biegeradien (m)		
140 x 80 x 4,0	51,61	16,03	173,43	64,47	23,96
5,0	48,78	15,15	93,19	34,64	12,88
6,3	46,01	14,29	48,97	18,20	6,77
8,0	43,32	13,46	25,18	9,36	3,48
10,0	40,95	12,72	13,53	5,03	1,87
150 x 100 x 4,0	69,50	21,59	376,84	140,08	52,07
5,0	65,69	20,41	202,48	75,26	27,88
6,3	61,97	19,25	106,41	39,55	14,70
8,0	58,34	18,12	54,72	20,34	7,56
10,0	55,14	17,13	29,40	10,93	4,06
160 x 80 x 4,0	176,59	44,59	244,29	73,94	22,38
5,0	119,60	30,20	128,03	38,75	11,73
6,3	79,88	20,17	65,56	19,85	6,01
8,0	52,63	13,29	32,83	9,94	3,01
10,0	35,64	9,00	17,21	5,21	1,58
180 x 100 x 5,0	179,35	45,28	234,28	70,91	21,46
6,3	119,79	30,25	119,98	36,31	10,99
8,0	78,93	19,93	60,07	18,18	5,50
10,0	53,45	13,50	31,48	9,53	2,88
200 x 100 x 6,3	170,28	42,89	106,74	32,31	9,78
8,0	112,19	28,33	53,45	16,18	4,90
10,0	75,98	19,19	28,01	8,48	2,57
200 x 120 x 6,3	171,96	43,42	194,59	58,90	17,83
8,0	113,30	28,61	97,44	29,49	8,93
10,0	76,74	19,37	51,06	15,46	4,68
250 x 150 x 6,3	366,57	92,56	316,79	95,89	29,02
8,0	241,53	60,98	158,62	48,01	14,53
10,0	163,58	41,30	83,13	25,16	7,62
300 x 200 x 6,3	684,25	172,77	667,45	202.02	61.15
8,0	450,84	113,83	334,20	101,16	30,62
10,0	305,34	77,09	175,15	53,01	16,05
400 x 200 x 8.0	1.177,85	297.40	242,86	73,51	22,25
10,0	797,71	201,41	127,28	38,52	11,66
450 x 250 x 8.0	1.766.34	445.98	444.41	134.51	40.71
10,0	1.196,27	302,04	232,90	70,50	21,34
500 x 300 x 10.0	1.717.29	433.60	377,75	114,34	34.61

## Tabelle 3: Details der Dreiwalzenbiegemaschinen (Abb. 4), die zur Bestimmung der Biegeradien nach Tabelle 2 eingesetzt worden sind [1]

Maschinen-Nr.	Durchmesser (mm) Bewegliche Walze in der Mitte	Feste Walze	Abstand zwischen den zentralen Achsen der festen Walzen (mm)
1	430	385	710
2	515	460	1.015

#### Tabelle 4: Biegeradien für kreisförmige MSH-Profile beim Induktivwärmebiegen [6]

Kreis- hohlprofil Außen-∅	K	leinste	Bieger	adien F	? (mm)	bei War	nddick	e t (mm	)									
(mm) 4	5	5,6	6,3	7,1	8	8,8	10	12,5	14,2	16	18	20	25	30	35	40	45	50
48,3 100	95	95	95	95	95	95	95	95										
60,3 120	95	95	95	95	95	95	95	95	95									
76,1 130	115	95	95	95	95	95	95	95	95	95								
88,9 150	130	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114							
114,3 230	200	170	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152						
139,7 300	250	230	210	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190					
168,3 550	440	350	300	260	229	229	229	229	229	229	229	229	229	229				
193,7 600	520	420	350	290	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270			
219,1 850	700	600	480	400	330	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305		
244,5 860	720	620	530	470	370	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340	
273,0 1200	1000	800	680	580	460	410	381	381	381	381	381	381	381	381	381	381	381	381
323,9 1400	1200	1000	900	750	550	490	457	457	457	457	457	457	457	457	457	457	457	457

Die bei Induktivwärmebiegen nach Tabelle 4 einstellbaren Wanddickenverschwächungen im Rücken bzw. in der Innenkrümmung der Biegung als Richtwerte für Luft- und Wasserabkühlung beim Biegen sowie die Ovalität in Abhängigkeit vom R/d-Verhältnis sind in Abb. 9 dargestellt.



- 1 Biegearm (leicht)
- 2 Drehpunkt
- 3 Induktor
- 4 Führungsrollen
- 5 Ant riebsketten
- 6 Spannvorrichtung
- 7 Schienen
- 8 Vorschubeinrichtung
- 9 Biegearm (schwer)
- 10 Stromquelle
- 11 Maschinenbett



- A Systemmaß
- B Systemmaß
- da Außendurchmesser
- d; Innendurchmesser
- t Wanddicke des Rohres
- t<sub>a</sub> Wanddicke an der Bogenaußenseite
- t<sub>1</sub> Wanddicke an der Bogeninnenseite
- R<sub>m</sub> Mittlerer Biegeradius
- α<sup>"</sup> Biegewinkel
- a Geräder Schenkel
- b Gerader Schenkel

Rohre aus ferritischen Stählen



> Abb. 7: Fertigungsprogramm für das Induktivwärmebiegen von kreisförmigen MSH-Profilen der Salzgitter Mannesmann Grobblech GmbH – Rohrbiegewerk [3]



Die in den Diagrammen ablesbaren Wanddickenveränderungen sind durch das Biegeverfahren bedingt und müssen bei der Festlegung der erforderlichen Mindestwanddicke ggf. neben anderen Zuschlägen (z. B. Entzundern, Korrosionszuschlag) berücksichtigt werden.

> Abb. 8: Wanddickenänderung und Ovalität von kreisförmigen MSH-Profilen nach dem Induktivwärmebiegen [6],[9]



#### Tabelle 5: Standard-Biegeprogramm 1) für kreisförmige MSH-Profile mit der CNC-Kaltbiegemaschine der Essener Hochdruck-Rohrleitungsbau GmbH (EHR), Werk Dortmund [6]

Kreishohl- profil d <sub>a</sub>	Stand	lard-Bie	egeradi	en R (m	ım) bei \	Nanddi	icken t (	(mm)									
(mm)	unbeg	grenzt							4 - 45	5		4-40	4-35	4-30	5-15		
21,3	60	85	90	135													
25	68																
26,9	80	90	100														
30	90	100															
31,8	100	110	130	144	170												
33,7	100	110	150	220													
38	110	120	140	150	170	210	250										
42,4	120	160	180	230	250												
44,5	120	150	240														
48,3	125	145	155	160	171	190	197	280									
51	150	200	230														
57	150	175	240														
60,3	151	175	180	200	240	250											
63,5	190	250															
70	205	280	320														
73	254																
76,1	228	260	305														
88,9	267	320	360	450													
101,6	330																
106	310																
114,3	295	343	400	500	1000												
126	345	400															
139,7	420	500															
168,3									600	820	1500						
170												675					
174													675				
177														675			
219,1															640	800	1070

1) Gewährleistete Wanddickenschwächungen von  $\leq$  15 % sowie Ovalität  $\leq$  5 % bei R/d  $\geq$  3.0

MSH-Profil	200 x 100 x 5,6 Mittelwerte [mm]	Maximalwerte [mm]	200 x 100 x 12,5 Mittelwerte [mm]	Maximalwerte [mm]
Zugzone	0,1	0,9	1,5	1,9
Druckzone	3,2	4,1	2,1	3,0
Neutrale Zone oben	0,7	0,9	0,8	1,1
Neutrale Zone unten	1,3	1,5	1,0	1,1

#### Tabelle 6: Wölbung W von rechteckigen MSH-Profilen beim Induktivwärmebiegen (4]





Neutrale Zone unten

> Abb. 10: Gebogene Rechteckhohlprofile



> Abb. 11: Gebogene Rundhohlprofile



> Abb. 12: Herstellung einer Bogenform aus Rechteckhohlprofilen mit Anstoßen der Schnittkanten V-förmiger Einschnitte

## 3 Referenzen

- Kennedy, John B.: Minimum bending radii for square & rectangular hollow sections (3-roller cold bending). CIDECT Report 11 C-88/14-E
- [2] Brady, F.J.: Determination of minimum radii for cold bending of square & rectangular hollow structural sections. Final Report, CI-DECT Programme 11 B, Mai 1978
- [3] Lieferprogramm Rohrbiegewerk Salzgitter Mannesmann Grobblech GmbH
- [4] Schoch und Stender: Induktivbiegeversuche an MSH-Profilen. Untersuchungsbericht 36/87, Mannesmann Forschungsinstitut, März 1987
- [5] DIN EN 1090-2:2011-10, Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 2 : Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken
- [6] Rohrbiegungen; Pipe Bends.
   Essener Hochdruck-Rohrleitungsbau
   GmbH (EHR), Werk Dortmund,
   Ausgabe 1988
- [7] DIN EN 10 210: Warmgefertigte Hohlprofile f
  ür den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen, Teil 2: Ma
  ße, Grenzabma
  ße und statische Werte
- [8] DIN EN 10253-2:2008, Formstücke zum Einschweißen - Teil 2: Unlegierte und legierte ferritische Stähle mit be-sonderen Prüfanforderungen
- [9] Rohrbiegungen nach Maß Custom made bents, BILFINGER BERGER Power Service

### Korrosionsschutz von MSH-Konstruktionen – 1 Einführung

Das Korrosionsverhalten von Stahlbauten und die entsprechenden Korrosionsschutzmaßnahmen haben einen beträchtlichen Stellenwert, der sowohl die Technik wie auch die Wirtschaftlichkeit beeinflusst, MSH-Konstruktionen bilden hierbei keine Ausnahme, zumal Hohlprofile wegen ihrer geschlossenen Form sowohl der Innen- als auch der Außenkorrosionsbeanspruchung ausgesetzt sind. Betrachtet man die Eigenschaften von Hohlprofilen und die hohlprofilspezifischen Korrosionsschutzmöglichkeiten genauer, so werden deren technische und wirtschaftliche Vorteile gegenüber konventionellen I-, L- und U-Profilen deutlich.

MSH-Profile müssen bei ihrem Einsatz den zu erwartenden mechanischen und korrosiven Belastungen für die geplante Nutzungsdauer ohne Schaden, d. h. ohne Einbuße ihrer Funktion, widerstehen. Die mechanischen Belastungen können konstruktiv berücksichtigt werden. Zum Schutz vor Korrosionsbeanspruchungen werden andere relevante Maßnahmen ergriffen, die auf das jeweilige Belastungsprofil gezielt abgestimmt sind.

MSH-Profile sind aufgrund ihrer Form unterschiedlichen Korrosionsarten ausgesetzt, wobei grundsätzlich zwischen Innen- und Außenkorrosion abzugrenzen ist.

- → atmosphärische Korrosion in verschiedenen Klimaten, z. B. standortabhängige Außenluft (Land-, Stadt-, Industrie- und Meeresklima) sowie Klima unmittelbar am einzelnen Bauteil
- → Korrosion an Wässern (z. B. Meereswasser) und Böden

Die atmosphärische Korrosion ist ein elektromechanischer Vorgang, bei dem es sich um Reaktionen zwischen Stahl und kondensierter Feuchtigkeit aus der Atmosphäre unter Bildung von Rost handelt. Die wichtigsten korrosionsrelevanten Bestandteile der umgebenden Atmosphäre sind Wasser (Feuchtigkeit), Sauerstoff, Ozon und Kohlendioxid sowie ortsabhängige Schadstoffe wie Chloride (beispielsweise im Meeres- oder Küstenklima), Schwefeldioxide, nitrose Gase, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und unter Umständen auch Chlorwasserstoff oder Chlor. Die Stahloberfläche fängt an der Luft bei

#### Tabelle 1: Korrosion und Korrosionsschäden

Korrosion	Angreifendes	Korrosionsschäden	Umgebung
Werkstoff	Medium	Werkstoff	
Metallisch Organisch Anorganisch	Flüssigkeit Gas Feststoff	Minderung von Tragfähigkeit Festigkeit Zähigkeit Glanz	Verunreinigung Verfärbung

einer Feuchtigkeit oberhalb 60 % rel. Feuchte zu rosten an. Hierbei sind Feststoffablagerungen besonders korrosionsfördernd, da sie Feuchtigkeit absorbieren.

Eine weitere Grundlage für die Korrosionsbeurteilung ist die Temperatur. Sie ist zwischen -20 °C und +60 °C korrosionsrelevant.

Die Korrosionserscheinungen unterscheiden sich nach der Art der Metallauflösung in folgender Form:

- 1. Flächenkorrosion Gleichmäßige Auflösung der gesamten Metalloberfläche
- 2. Mulden-, Loch-, Spalt- und Belüftungskorrosion

Metallauflösung örtlich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durch örtliche Konzentrationsunterschiede im Korrosionsmedium 3. Kontaktkorrosion

Durch Kontakt unterschiedlicher Metalle, bei dem das elektrochemisch unedlere Metall im Kontaktbereich stärker abgezehrt wird

4.Interkristalline oder transkristalline Korrosion

Selektiver Korrosionsangriff entlang von Korngrenzen oder ohne Verlauf an Korngrenzen durch Inhomogenität an der Oberfläche; statische und dynamische Zugbeanspruchungen können in korrosiven Medien von der Oberfläche ausgehende Rissbildung bewirken

5. Wasserstoffinduzierte Korrosion Innenrisse durch Diffusion von aus kathodischen Korrosionsreaktionen stammendem Wasserstoff in den Stahl





# 2 Verhalten von Stahlhohlprofilen unter Korrosionsbeanspruchung



## 2.1 Außenkorrosion von Stahlhohlprofilbauteilen

Die Beschreibung von Korrosionsverhalten ist zunächst üblicherweise auf Außenoberflächen bezogen. Hierbei unterscheiden sich Hohlprofile grundsätzlich nicht vom Verhalten anderer Walzprofile. Die nachfolgend erwähnten Vorteile sind jedoch besonders zu berücksichtigen.

MSH-Profile, rund oder rechteckig, werden im Allgemeinen werkseitig ohne Korrosionsschutz geliefert. Ihre Oberfläche ist walzglatt. Dies gewährleistet erfahrungsgemäß am ehesten eine universelle Verwendbarkeit der Profile bei den Verarbeitern.

Tabelle 1 beschreibt das Phänomen Korrosion im Allgemeinen. Auf Basis dieser Darstellung werden bei allen Stahlbauprofilen, auch bei kreisförmigen und rechteckigen Hohlprofilen, folgende Anforderungen gestellt:

a) keine Verminderung der Wanddicke durch Abrostung

- b) keine Abgabe von rosthaltigen Wassern an die Umgebung
- c) keine unerwünschte Veränderung des Aussehens.

Zu a) kann durchaus ein genügend geringfügiger Dickenbetrag toleriert werden, wenn die Tragfähigkeit nicht leidet. Die Anforderungen nach b) und c) hängen von dem jeweiligen Anwendungsfall und den örtlichen Gegebenheiten ab. Die Frage nach der Beeinträchtigung der Bauteile und den erforderlichen Schutzmaßnahmen kann nicht allgemein, d. h. für jeden Anwendungsfall gleich, beantwortet werden.

Die Anforderungen sind daher schon im Planungsstadium zu definieren.

Die Verwendung von MSH-Profilen statt offener Walzstahlprofile stellt, aufgrund fehlender Kanten und geringerer Angriffsflächen (Abbildung 2), bereits eine konstruktive Korrosionsschutzmaßnahme dar.

Da MSH-Profile keine scharfen Kanten haben, ist der Aufwand für die Aufbringung einer gleichmäßigen Korrosionsbeschichtung gering. Dies begünstigt ein erheblich besseres Langzeitverhalten eines Bauteils/Bauwerks aus MSH-Profilen.

> Abb. 2: Gleichmäßigkeit der Beschichtungsdicke bei Hohlprofilen



> Abb. 3: Vergleich der Oberflächenwerte von MSH- und I-Profil Weiter sind im Regelfall die zu beschichtenden Oberflächen von Bauwerken mit MSH-Profilen wesentlich kleiner als bei konventionellen Walzstahlprofilen (siehe Abbildung 3). Dies kann z.B. bei weitgespannten Tragwerken zu einer Reduktion der Anstrichfläche um 50 % führen. Große Einsparungen an Beschichtungsstoffen und Arbeitszeit sind die Folge. Die Oberflächen sind in der Druckschrift "Technische Information Nr. 1" für alle MSH-Profile verfügbar. Darüber hinaus bietet die App weitere Möglichkeiten, zusätzlich Abmessungen zu berechnen.

Die Unterhaltung einer Hohlprofilkonstruktion, bei der eine Wiederholung der Aufbringung des Korrosionsschutzes vorzusehen ist, ist erheblich wirtschaftlicher als die Unterhaltung einer Konstruktion aus offenen Profilen. Dieser Punkt nimmt in einer Zeit hoher Luft- und Umweltbelastung mehr und mehr an Bedeutung zu.

Stahlbauten müssen so gestaltet werden, dass sie korrosionsaggressiven Medien geringe Angriffsmöglichkeiten bieten. Dieser Forderung tragen die MSH-Profile mit ihren steifenlosen, geschweißten Verbindungen in besonderem Maße Rechnung (keine Hohlräume, Wasser- und Schneesäcke, einspringende Ecken und dergleichen). Abbildung 4 lässt dies deutlich erkennen.



Wegen der geschlossenen Form von Hohlprofilen sind die Außen- und Innenoberflächen unterschiedlichen Korrosionsbelastungen unterworfen. Auf die Innenkorrosion wird entsprechend nachfolgend gesondert eingegangen.



#### 2.2 Innenkorrosion von Hohlprofilbauteilen in Stahlkonstruktionen

Innen benötigen Hohlprofile keinen Korrosionsschutz, wenn alle Öffnungen und Stöße der Konstruktionen luftdicht zugeschweißt werden. Nach Verbrauch des in dem Hohlprofil eingeschlossenen Sauerstoffs und der Feuchtigkeit sind dann keine Rostbilder mehr vorhanden und können auch nicht mehr eindringen. Bei einer Verschweißung des Innenraumes ist kein Korrosionsschutz erforderlich. Seit vielen Jahren wird dieser Regel gefolgt. Zur Innenkorrosion liegen die Ergebnisse umfangreicher, praxisnaher Langzeitversuche [1– 4] der Deutschen Bundesbahn vor. [4] enthält eine Zusammenfassung.

Außerdem enthält [5] eine umfassende Zusammenstellung von Untersuchungen an ausgeführten Bauwerken. Dort wird über amerikanische, deutsche, englische, französische, italienische und japanische Untersuchungen berichtet (siehe Tabelle 2). Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen zwei Beispiele von Hohlprofilbauteilen, die über 13 Jahre der Korrosionsbeanspruchung der Industrieatmosphäre ausgesetzt waren. Diese Abbildungen bestätigen die vorhergehenden Aussagen.



> Abb. 5: Kreisförmiges Hohlprofil mit abgeflachten Enden - Innen- und Außenoberfläche nach 13 Jahren



> Abb. 6: Rechteckiges Hohlprofil mit platten zugeschweißten Enden – Innen- und Außenoberfläche nach 13 Jahren

### Tabelle 2: Beispiele zur Verdeutlichung, dass an den inneren Oberflächen versiegelter Hohlprofile keine Korrosion auftritt

Anwendung	Lage	Kommentar	Betriebsdauer in Jahren	Prüfbefund
Trolleybus-Maste	Pittsburgh, USA	Mindestens 22 000 solcher Masten wurden installiert. Etwa 18 000 sind bis heute in Betrieb	40 – 50	Wanddicke der Profile noch innerhalb der Herstelltoleranzen
Lichtmaste	Dayton, Ohio, USA	Keine sichtbaren Korrosionsschäden an allen Masten	59	Innere Oberflächen haben noch die ursprüngliche Walzhaut. Keinerlei Zeichen von Korrosion
Offshore-Laufbühnen zwischen den Nore-Festungen	Thames Estuary, Großbritannien	Anwendung in aggressiver See-Atmosphäre. Beispiele sind noch verfügbar nach der Kollision mit dem Dampfschiff "Baalbeck"	10	Innere Oberflächen haben noch die ursprüngliche Walzhaut. Keinerlei Zeichen von Korrosion
Rettungsboot- Hebezüge des Seeschiffs "SS Aquitania"	-	Anwendung in aggressiver See-Atmosphäre. Als das Schiff verschrottet wurde, wurden 2 Hebezüge zu Forschungszwecken zur Verfügung gestellt	37	Keinerlei innere Korrosion
Flutlichtmaste für einen Fußballverein	Chelsea, London, Großbritannien	Zwei der ursprünglichen Maste wurden untersucht, als sie einer neuen Tribüne weichen mussten und ab- montiert wurden	21	Ursprüngliche Walzhaut ist sichtbar. Außenkorrosion begrenzt auf Bereich der Schraubverbindungen, wo zwischen Flanschen sich Regen- wasser einsaugen konnte.
Usk-Fußgängersteg (über Eisenbahnlinie)	Coulsdon, Surrey, Großbritannien	Stadtgebiet	25	Der größte Teil der ursprünglichen Walzhaut ist noch vorhanden. Leichte Oberflächenoxidation in einigen Berei- chen wahrzunehmen, durch Lagerung vor der Herstellung entstanden
Sendeturm	Säckingen Deutschland	Turm wurde außer Betrieb genom-men nach Ände- rung des Netzes	18	Keinerlei Spuren von Korrosionsangriff. Walzhaut noch vorhanden, einschließ- lich der Blaufärbung durch Schweiß- hitze beim Anschweißen von Befesti- gungsösen
Dachbinder einer Beizanlage	Hiltrup, Westfalen, Deutschland	Extrem aggressive Industrieatmosphäre	9	Keine Innenkorrosion. Ursprüngliche Walzhaut sichtbar
Lichtmaste	Dicht besiedeltes Stadtgebiet, Japan	Innere Korrosion gemessen durch Ultraschall- Dickenmessung	6 - 11	Maste mit Entwässerungslöchern an der Grundplatte zeigten keine Innenkor- rosion. Korrosion wurde festgestellt, wo die Seitenplatte an die Grundplatte an- geschweißt ist
Kranausleger	Italien	-	10 - 20	Keine Innenkorrosion festgestellt
Industriegebäude	Italien	Hohlprofil-Fachwerk war nach der geplanten Demontage verfügbar	25 - 30	Keine Innenkorrosion festgestellt
Maste und Türme	Italien	Anwendung aus Industrieatmosphäre	10	Keine Innenkorrosion festgestellt

Aufgrund der Ergebnisse von Langzeit-Korrosionsversuchen des Bundesbahnzentralamts in München mit Stahlhohlprofilen und Rohrfachwerken, die teils luftdicht, teils mit Öffnung für den Feuchtigkeitseintritt versehen und teils gar nicht verschlossen waren, wurden in [5] u. a. die folgenden Schlussfolgerungen gezogen.

- Im Inneren luftdichter Hohlprofile kommt es zu keinem Kondenswasserniederschlag und damit zu keinerlei Korrosion. Luftdicht hergestellte Hohlprofilbauteile benötigen daher im Inneren keinen Korrosionsschutz. Einer luftdichten Ausführung von Hohlprofilbauten stehen technisch keinerlei Schwierigkeiten entgegen. Es wird heute bei den meisten Konstruktionen eine luftdichte Verschweißung des Innenraums vorgenommen, sofern das gewählte Korrosionsverfahren keine anderen Anforderungen stellt.
- 2. Kondenswasser sammelte sich auch in undichten Hohlprofilbauteilen nicht an. Durch Undichtigkeiten, an die kein Oberflächenwasser (Regen, Schmelzwasser, Tau) gelangt, kann wohl feuchte Luft eindringen; es kommt jedoch zu keinem feststellbaren Niederschlag dieser Feuchtigkeit im Inneren. Im Gegenteil konnte festgestellt werden, dass mit der Luft durch solche undichten Stellen auch wieder Feuchtigkeit heraustransportiert wird.
- 3. Feuchte Luft kann in unmittelbarer Umgebung von undichten Stellen eine Rostbildung im Inneren des Hohlprofilbauteils hervorrufen. Die Anrostung beschränkt sich dabei jedoch auf kleine Stellen und ist geringfügig.

- 4. Durch eindringendes Oberflächenwasser, das an der Innenwand eines Hohlprofilbauteils herabrinnt, kann eine Rostbildung stattfinden. Diese beschränkt sich im Wesentlichen auf die vom herabfließenden Wasser benetzten Stellen.
- 5. Wasser in einem Hohlprofilbauteil wird in erster Linie bei Frost gefährlich. Es besteht die Gefahr des Aufplatzens unter innerem Eisdruck. Um dies zu vermeiden, kann am unteren Ende des Bauteils eine Gewindebohrung angebracht werden, die mit einer abdichtenden Schraube zu verschließen ist. Eine Entlastungsbohrung ohne Verschlussschraube ist abzulehnen.
- 6. Wenn ein Hohlprofilbauteil aus konstruktiven Gründen nicht luftdicht hergestellt werden kann, ist dafür zu sorgen, dass Luft durchzieht und kein Wasser in dem Bauteil stehen bleibt. Außerdem ist das Innere so weit wie möglich gegen Korrosion zu schützen. Angaben hierzu enthält DIN EN ISO12944 [6 – 15].
- 7. Geschraubte Stöße mit Stoßlaschen in Hohlprofilbauteilen, die aus Blechen zusammengeschweißt werden, erfordern besondere Maßnahmen. Die Stoßlaschen decken den an der Stoßstelle vorhandenen Spalt nicht luftdicht ab. Der Stoßbereich ist daher gegen die übrigen Hohlräume abzuschotten. Der verbleibende Raum zwischen den Schotten ist gegen Korrosion zu schützen. Die zum Festhalten der Schrauben notwendigen Handlöcher sind mit Deckeln und Gummidichtung zu verschließen [16].

### 3 Korrosionsschutzmaßnahmen

Grundsätzlich kann Korrosionsschutz auf drei Wegen erreicht werden:

- a) durch Beeinflussung der Eigenschaften der Reaktionspartner und/oder Änderung der Reaktionsbedingungen. Dies beinhaltet Werkstoffauswahl, Mediumaufbereitung und konstruktive Maßnahmen
- b) durch Trennen des Werkstoffs vom Korrosionsmedium mit Hilfe der Aufbringung organischer und anorganischer Beschichtungen und metallischer Überzüge
- c) durch elektrochemische Schutzmaßnahmen, d. h. kathodischem bzw. anodischem Schutz.

Zu a) kann festgestellt werden, dass beim Einsatz von Stahlprofilen die Werkstoffauswahl im Allgemeinen vorgegeben und eine Mediumaufbereitung (z. B. Absenkung der Luftfeuchtigkeit oder Entfernung von Sauerstoff) in der Regel nicht möglich ist.

Angemerkt sei an dieser Stelle das aufgrund meist geringerer Mindestlosgrößen insbesondere runde MSH Profile dafür geeignet sind spezifische Korrosionsanforderungen zu erfüllen, zumal diese in großen Mengen für hochkorrosive Medien/Umgebungsbedingungen eingesetzt werden.

Bei Verwendung vorgegebener Werkstoffe können in Verbindung mit b) und c) durch konstruktive Maßnahmen wichtige Beiträge zum Korrosionsschutz geliefert werden.

Als Oberflächenschutz werden folgende Systeme angewendet:

- 1. Beschichtungen
- 2. Metallische Überzüge
- 3. Elektrochemische Polarisation.

Dominierend beim Korrosionsschutz von Hohlprofilen sind die organischen Beschichtungen und metallischen Überzüge. Demgegenüber ist die elektronische Schutzmaßnahme nur bei Anwesenheit wässriger Medien (z. B. bei Offshore-Anlagen und im Erdboden) anwendbar, nicht aber bei atmosphärischen Korrosionsbedingungen.

#### 3.1 Beschichtungen

Korrosionsschutzbeschichtungen bestehen aus Grund- und Deckbeschichtungen mit meist organischen Bindemitteln und anorganischen Pigmenten. Die Grundbeschichtung enthält bevorzugt Korrosionsschutzpigmente, die Korrosionsreaktionen auf der Stahloberfläche anhalten. Diese haben eine indirekte korrosionsschützende Wirkung durch Erhöhung des Permeabilitätswiderstands und vor allem die Aufgabe, der Deckbeschichtung eine gute Wetter- und Lichtbeständigkeit zu verleihen. Die Deckbeschichtung enthält ebenfalls Pigmente.

Zur Vorbereitung der Stahloberfläche für das Auftragen von Korrosionsschutzbeschichtungen (meist zwei Grund- und zwei Deckbeschichtungen) gehören: Reinigung, Entfettung, Entrostung und Entzunderung. Es ist wichtig zu wissen, dass das Aufbringen von Beschichtungen, auch bester Qualität, auf unzulänglich gereinigten oder leicht oxidierten Oberflächen nur schlechte Ergebnisse bringt. Reinigung und Entfettung bestehen aus Abwaschen, Abkochen und Abspritzen mit alkalischen Mitteln sowie organischen Lösemitteln, die physiologisch unbedenklich sind.

Entrostung und Entzunderung werden nach den folgenden Methoden durchgeführt:

a) Mechanisch:	Hand- oder maschinelles
	Bürsten, Strahlen
b) Thermisch:	Flammstrahlen
c) Chemisch:	Beizen

Für die Applikation von Korrosionsschutzbeschichtungen sind die Pinsel- und die Spritztechnik, insbesondere das Hochdruckspritzen, am zweckmäßigsten.

Die Grundbeschichtung ist möglichst bald unmittelbar auf die Oberfläche eines Hohlprofils aufzubringen. Dies ist wichtig, da sie nicht nur die Korrosion verhindert, sondern auch die Haftung für die nachfolgenden Beschichtungen herstellt.

Zur Aufgabe der Zwischenbeschichtungen gehört die Verbesserung der Haftung zwischen Grundbeschichtung und Endbeschichtung. Sie sind chemisch inert, aber für von außen einwirkende Medien undurchlässig.

Die Endbeschichtung ist auch undurchlässig und gegen chemische und mechanische Angriffe widerstandsfähig. In bestimmten Fällen hat sie auch eine dekorative Funktion.

#### 3.2 Fertigungsbeschichtungen

In neuerer Zeit wird häufig vorkonservierter Stahl eingesetzt. Die MSH-Profile werden dazu bereits im Walzwerk entrostet, entzundert und anschließend sofort beschichtet (Shop-Primer). Eine solche Fertigungsbeschichtung hat eine Schichtdicke von 15 bis 20 µm; sie muss überschweißbar sein und dient als vorübergehender Korrosionsschutz für die Zeit des Transports, der Lagerung und der Verarbeitung auf der Baustelle. Sie wirkt ferner als Teil der Grundbeschichtung. Nach der Fertigung des Bauteils müssen Schadstellen, die z. B. bei Transport, Lagerung und Verarbeitung entstehen, umgehend ausgebessert werden. Anschließend erfolgt der Auftrag der ersten Grundbeschichtung. Hierbei ist zu beachten, dass Grundbeschichtungen und Shop-Primer aufeinander abgestimmt und verträglich sein müssen [17]

#### 3.3 Metallische Überzüge

Die Schmelztauchverzinkungen (Feuerverzinkungen) haben unter allen metallischen Überzügen für den Korrosionsschutz von Hohlprofilen die größte Bedeutung. In Verbindung mit nachfolgender organischer Beschichtung sind auch elektrolytische (galvanische) Zinküberzüge einsetzbar (DIN EN ISO 12944-7 [8]/ DIN EN ISO 19598 [8a]). Auch thermische Spritzüberzüge aus Zink oder Aluminium oder eine Kombination beider Metalle haben in den letzten Jahren, insbesondere für kleinere Flächen und nicht zuletzt durch weiterentwickelte Auftragseinrichtungen, an Bedeutung gewonnen [DIN EN ISO 2063].

In beiden Fällen ist eine nachfolgende Beschichtung anzuraten, weil "Duplex-Beschichtungen" (Metallüberzug + organische Beschichtung) die Lebensdauer des Korrosionsschutzes erheblich erhöhen.

#### 3.3.1 Feuerverzinkung

Die Feuerverzinkung ist ein bewährter und wirtschaftlicher metallischer Korrosionsschutz für Außen- und Innenfläche der MSH-Profile zugleich. Vor der Feuerverzinkung wird die Stahloberfläche entfettet, gebeizt und durch Benetzen mit Flussmitteln aktiviert. Danach werden Stahlteile, als Schweißbaugruppen geeigneter Größe vorliegend, in ein Schmelzbad aus flüssigem Zink bei etwa 450 °C getaucht. Dabei bildet sich auf dem Stahl ein porenfreier, metallischer Zinküberzug aus. Dessen Aufbau ist gekennzeichnet durch einen Bereich intermetallischer Zink-Eisen-Phasen, die für die hohe Widerstandsfähigkeit und Haftvermittlung des Überzugs verantwortlich sind, sowie durch eine überlagernde Reinzinkschicht, die für die silbrig-graue Erscheinung sorat.

#### Verfahren Übliche Dicke Legierung Aufbau und Verfahrenstechnik Nachbehandlung des Überzugs mit dem Zusammensetzung bzw. der Be-Untergrund des Überzugs bzw. schichtungen der Beschichtung (µm) üblich möglich 1 Überzüge Eisen-Zink-Legierungs-Eintauchen in schichten am Stahlflüssiaes Zink **Beschichten** 1.1 Feuerverzinken untergrund, i. d. R. mit einer darüber liegen-Stückverzinken 50 - 150 ia **Beschichten** 50 - 100 den Zinkschicht Rohrverzinken ja 80 - 150 Überzug aus 1.2 Thermisches Aufspritzen von Versieaeln Beschichten nein Zinktropfen mit Spritzverzinken aeschmolzenem durch Oxidhaut Zink penetrierende Beschichtung 5 - 25 Lamellarer Überzug Zinkabscheidung 1.3 Galvanisches Chromatieren Beschichten durch elektr. Strom bzw. elektrolytisches Verzinken in wässrigem Elektrolvten 2 Beschichtungen Zinkstaubdünnschichtig Zinkstaubpigment in Auftragen durch Deckbenein beschichtungen 10 - 20 Bindemittel Streichen, Rollen, schichtung normalschichtig Spritzen, Tauchen auf Grund-40 - 80 beschichtung dickschichtig abgestimmt 60 - 120

#### Tabelle 4: Korrosionsschutz von Stahlhohlprofilen durch Verzinken

Die Geschwindigkeit der Bildung der Eisen-Zink-Legierungsschicht hängt von der chemischen Zusammensetzung des Stahls, im Wesentlichen von seinem Siliziumgehalt ab. Es besteht eine nichtlineare Abhängigkeit zwischen dem Si-Gehalt und der Schichtdicke des Zinküberzugs. Für ein optimales Verzinkungsergebnis im Hinblick auf eine hohe und dauerhafte Belastbarkeit wie auch die Optik ist für MSH Profile ein Siliziumanteil von 0,15-0,25% zu wählen [DIN EN ISO 14173]

Aus diesem Grund werden die MSH-Profile aus den allgemeinen Baustählen mit einem Siliziumgehalt zwischen 0,15 % und 0,25 % hergestellt. Sie sind damit für eine Feuerverzinkung optimal geeignet.

Neben dieser Eigenschaft nehmen oft weitere Aspekte maßgebend Einfluss auf das Verzinkungsergebnis, die es insbesondere bei Konstruktion und Fertigung zu beachten gilt:

- 1. Verzinkungsgerechte Konstruktion
- 2. Schweißnahtausführung
- 3. Vermeidung von Bauteilverzug
- 4. Effekte aus Kaltverformung
- 5. Vermeiden von schwer oder nicht löslichen Oberflächenverunreinigungen wie z.B. Schweißsprays

Bezüglich der verzinkungsgerechten Konstruktion ist darauf zu achten, dass die Konstruktion über genügend große Durch-/ Ablaufflussöffnungen für die flüssigen Prozessmedien (Säure Spülwasser Zink) verfügt. Es sind Entlüftungsöffnungen in ausreichender Größe und Anzahl vorzusehen, um den Luftaustritt aus dem Inneren zu ermöglichen, da sonst Explosionsgefahr besteht. Durch das ins Innere der Hohlprofile eintretende Zink wird ein zusätzlicher Innenschutz erreicht.

Anschlüsse sind so zu bilden, dass die Prozessmedien frei und ungehindert hindurchfließen können. Abbildung 7 bis 9 zeigen empfohlene Lösungen. In Abbildung 10 wird die Anordnung gezeigt, die vermieden werden soll.



Abb. 7: Position des Lochs in einer Pfosten-Riegel-Verbindung







Abb. 9: Empfohlene Anordnung der Löcher in einem Vierendeelträger





Beim Eintauchen in das flüssige Zink wird der Stahl erwärmt und dehnt sich um ca. 4,5 mm/m aus. In ungünstigen Fällen werden fertigungsbedingte Eigenspannungen (z.B. infolge Schweißen, Kaltrichten und Kaltverformung) abgebaut und es kann zu Verzug kommen. Durch Maßnahmen in der Fertigung kann in Grenzen der Verzug gesteuert werden.

Die Wärmeeinwirkung im Zinkbad beeinflusst die technologischen Eigenschaften der Baustähle nicht. Für die Stahlgüten S 235 (früher St37) und S 355 (St52) ist dies eingehend untersucht worden [18].

Zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit der Feuerverzinkung sind folgende Einflussgrößen zu beachten:

- → Entfernung zur Verzinkerei
- → Frachtmöglichkeiten
- → Masse
- → Oberfläche
- → Werkstoff
- → Beizbarkeit
- → Gestalt und Abmessung

Die Größe der vorhandenen Bäder begrenzt die Abmessungen der zu tauchenden Bauteile.

Eine zusätzliche Beschichtung erhöht die Schutzdauer von feuerverzinktem Stahl beträchtlich (um etwa das 1,5-Fache der Schutzdauer der einzelnen Schutzsysteme).

#### 3.3.2 Elektrolytische Zinküberzüge

Bei diesem Verfahren wird durch Tauchen in ein elektrolytisches Verzinkungsbad und Anlegen einer geeigneten Spannung unter Gleichstrombedingungen ein "galvanischer" Zinküberzug erzeugt. Elektrolytische Zinküberzüge mit Dicken zwischen 5 und 25 mm je nach Einsatzbereich können nur in Galvanikbetrieben aufgebracht werden. Galvanische Verzinkung wird häufig zur Verbesserung des Korrosionsschutzes chromatiert. Dauerhafter Schutz wird jedoch durch nachträgliche Beschichtung erzielt. In diesem Fall wird der Zinküberzug zur Verbesserung der Haftung zuvor phosphatiert.

## Werkstoffe

#### 3.3.3 Thermische Spritzüberzüge

Durch thermisches Spritzen werden nach diesen Verfahren Überzüge aus Zink und/oder Aluminium erzeugt. Dies kann sowohl in der Werkstatt als auch direkt auf der Baustelle durchgeführt werden. Zwei unterschiedliche Spritzverfahren werden bevorzugt angewendet: Flammspritzen und Lichtbogenspritzen. Bei beiden Verfahren wird das Spritzmaterial in Drahtform in eine Spritzpistole eingeführt. Die Schmelzwärme entsteht für Flammspritzen aus einer Azetylen Sauerstoff-Flamme, für Lichtbogenspritzen aus einem elektrischen Lichtbogen. Das abschmelzende Metall wird mit Druckluft zerstäubt und vom Luftstrahl auf die Stahloberfläche geschleudert, wo die Tröpfchen zu einem Überzug teilverschmelzen. Als Oberflächenvorbereitung ist Strahlen mit z. B. Korund, scharfkantigem Granulat und Drahtkorn Vorbedingung. Nur sie führt zu der erforderlichen Rauheit (Sollwert ca. 20 - 30 um) der Stahloberfläche, die eine Haftung der Spritzschicht sicherstellt.

Da die thermischen Überzüge, deren Dicke üblicherweise bei 80 – 150 µm liegt, grundsätzlich eine porige Beschaffenheit haben, ist das nachträgliche Aufbringen eines Beschichtungssystems unerlässlich.

#### 3.3.4 Duplex-Beschichtung [19]

Werden Metallüberzüge zusätzlich organisch beschichtet, so verlängert sich die Korrosionsschutzdauer beträchtlich. Hierbei ist die Gesamtschutzdauer größer als die Summe der jeweiligen Schutzzeiten des Metallüberzugs und die Beschichtung (Faktor 1,2 bis 2,5). Dabei spielt die Oberflächenvorbereitung (vgl. DIN 55 928, Teil 4 [9]) die ausschlaggebende Rolle, die besonders bei bereits bewitterten Metallüberzügen sehr aufwändig sein kann. Die Dicken der Beschichtungen liegen zwischen 70 und 360 mm (bei Mehrschichtsystemen). Damit haben die Gesamtsystemschichtdicken Werte zwischen 150 und 440 µm.



> Abb. 11: Kathodischer Schutz mit Zink als Opferanode

## 3.4 Elektrochemischer Korrosionsschutz

Der elektrochemische Korrosionsschutz stellt eine aktive Schutzmaßnahme dar. bei der die zu schützende Oberfläche durch von außen zugeführten Gleichstrom in einen Potenzialbereich polarisiert wird, bei dem die Korrosionsgeschwindigkeit akzeptable Größenordnungen besitzt. Wird dabei das zu schützende Objekt zur Kathode gemacht, spricht man von kathodischem Schutz. Die kathodische Polarisation kann auch durch Kontakt mit Metallen erreicht werden, die im betrachteten Medium ein negativeres Korrosionspotenzial als das zu schützende Objekt haben. Die Anwendung des elektrochemischen Schutzes setzt grundsätzlich die ständige Anwesenheit eines Elektrolyten voraus. Er ist daher besonders zum Schutze von erd- oder meerwasserverlegten Stahlkonstruktionen geeignet.

## 3.5 Einsatz von MSH-Profilen aus wetterfesten Stählen

Die wetterfesten Baustähle weisen eine Beständigkeit gegenüber atmosphärischer Korrosion auf, wobei auf der Stahloberfläche unter normalen Witterungsbedingungen fest haftende und dicht oxidische Deckschichten entstehen, die den Widerstand gegen atmosphärische Korrosion erhöhen. Dies wird durch Legierungszusätze u. a. von Chrom, Kupfer und Nickel und teilweise auch einen erhöhten Phosphorgehalt bewirkt. Nachfolgend sind diese Stähle entsprechend den "Richtlinien für die Lieferung, Verarbeitung und Anwendung wetterfester Baustähle" (DASt-Ri 007, Nov. 1979) aufgelistet:

Die prEN 10210:2016 definiert nun auch für Hohlprofile die Lieferbedingungen für wetterfeste Stähle.

Ob diese Konstruktionen mit braungefärbter Deckschicht architektonisch ansprechend sind, ist Ansichtssache. In jedem Fall ist konstruktiv darauf zu achten, dass die Entwässerung der Bauteile so gestaltet wird, dass z.B. unansehnliche Rostfahnen vermieden werden.

### 4 Literatur

- Seils, A., Kranitzky, W.: Sind Stahlbauwerke, bei denen allseits geschlossene Hohlkörper verwendet wurden, durch Wasseransammlung und Innenkorrosion gefährdet? Der Stahlbau 22 (1953), Nr. 4, S. 80 – 84 und Nr. 5, S. 113 – 118
- [2] Seils, A., Kranitzky, W.: Die Verwendung geschlossener Hohlquerschnitte im Stahlbau und ihr Korrosionsschutz. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), Sonderausgabe 4 "Brückenbau und Ingenieurhochbauten", Juli 1954, S. 119 – 135
- Seils, A., Kranitzky, W.: Der Korrosionsschutz im Inneren geschlossener Hohlkästen. Der Stahlbau 28 (1959), Nr. 2, S. 46 – 53
- [4] Kranitzky, W.: Untersuchung der Innenkorrosion bei Stahlrohrkonstruktionen und geschlossenen Kastenquerschnitten aus Stahlblechen. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag der Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e. V., Düsseldorf
- [5] Tournay, M.: La résistance à la cor- rosion de l'intérieur de profilés creux en acier (Korrosionsfestigkeit im Inneren geschlossener Hohlprofile). Studie im Auftrag von CSFTA und CIDECT, Paris 1978, auszugsweise veröffentlicht in Acier-Stahl-Steel 43 (1978), Nr. 2, S. 67 – 75
- [6] EN ISO 12944-1:1998-07:
   Beschichtungsstoffe -Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme -Teil 1: Allgemeine Einleitung
- [7] EN ISO 12944-2:1998-07:
   Beschichtungsstoffe Korrosionsschutz von Stahlbauten durch
   Beschichtungssysteme Teil 2: Einteilung der Umgebungsbedingungen

- [8] EN ISO 12944-3:1998-07:
   Beschichtungsstoffe Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme Teil 3: Grundregeln zur Gestaltung
- [9] DIN EN ISO 12944-4:1998-07
   Beschichtungsstoffe -Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme -Teil 4: Arten von Oberflächen und Oberflächenvorbereitung
- [10] DIN EN ISO 12944-5:2008-01
   Beschichtungsstoffe Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme Teil 5: Beschichtungssysteme
- [11] DIN EN ISO 12944-6:1998-07
   Beschichtungsstoffe -Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme Teil 6: Laborprüfungen zur Bewertung von Beschichtungssystemen
- [12] DIN EN ISO 12944-7:1998-07
   Beschichtungsstoffe Korrosionsschutz von Stahlbauten
   durch Beschichtungssysteme Teil 7: Ausführung und Überwachung
   der Beschichtungsarbeiten
- [13] DIN EN ISO 12944-8:1998-07
   Beschichtungsstoffe Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme Teil 8: Erarbeiten von Spezifikationen für Erstschutz und Instandsetzung
- [14] DIN EN ISO 19598 DIN EN ISO 19598:2017-04 Metallische Überzüge -Galvanische Zink- und Zinklegierungsüberzüge auf Eisenwerkstoffen mit zusätzlichen Cr(VI)-freien Behandlungen

- [15] DIN EN ISO 2063:2005-05
   Thermisches Spritzen Metallische und andere anorganische Schichten - Zink, Aluminium und ihre Legierungen
- [16] DIN EN ISO 14713-2:2010-05
   Zinküberzüge Leitfäden und Empfehlungen zum
   Schutz von Eisen- und Stahl konstruktionen vor Korrosion Teil 2: Feuerverzinken
- [17] pr EN 10210-2:2016-02
   Warmgefertigte Hohlprofile f
  ür den Stahlbau -Teil 2: Technische Lieferbedingungen
- [18] Seils, A.:
   Optimaler Korrosionsschutz der Stahlbauwerke. Der Stahlbau 37 (1968), Nr. 3, S. 72 – 81
- [19] von Oeteren, K. A.: Korrosionsschutz durch Beschichtungsstoffe, Band 1 und 2, Hanser Verlag, München, 1981
- [20] Peterson, Ch.: Dauerfestigkeit von Schwei
  ßverbindungen nach Überschwei
  ßung der Feuerverzinkung. Der Stahlbau 46 (1977), S. 277 – 282
- [21] von Oeteren, K. A.:Feuerverzinkung + Beschichtung = Duplex-System.Bauverlag, Berlin, 1983



