

Das Merkblatt soll insbesondere den Konstrukteuren Empfehlungen geben zum laserstrahlschweißgerechten Konstruieren metallischer Bauteile. Die in Tabelle 1 enthaltenen Beispiele von typischen Schweißverbindungen werden mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt und sollen dem Konstrukteur eine Entscheidungshilfe sein.

Das Merkblatt ist in Zusammenarbeit von Herstellern und Anwendern von Laserstrahlschweißanlagen sowie von Forschungsinstituten aufgestellt worden.

Inhalt:

- 1 Anwendungsbereich
- 2 Besondere Merkmale des Laserstrahlschweißens
 - 2.1 Fokussierter Laserstrahl
 - 2.2 Schmelz- und Wärmeeinflußzonen
 - 2.3 Maßhaltigkeit
- 3 Oberflächenvorbehandlung und Nahtvorbereitung
 - 3.1 Werkstückoberfläche
 - 3.2 Spaltbreiten
 - 3.3 Werkstückbedingte Beeinflussung des Laserstrahls
- 4 Nahtarten
- 5 Nachbearbeitung und Prüfbarkeit
- 6 Konstruktive Hinweise
 - 6.1 Nahtanfang und Nahtende
 - 6.2 Schweißen unterschiedlicher Werkstückdicken
 - 6.3 Schweißen mit Zusatz
 - 6.4 Schweißen von Rundnähten
 - 6.5 Schweißen schwer zugänglicher Nähte
 - 6.6 Spannvorrichtungen
- 7 Schrifttum

1 Anwendungsbereich

Dieses Merkblatt enthält Empfehlungen zum fachgerechten Konstruieren und zur Vorbehandlung von Werkstücken aus metallischen Werkstoffen zum CO₂-Laserstrahlschweißen.

Verfahrenstechnische Grundlagen des CO₂-Laserstrahlschweißens (insbesondere des Naht- und Punktschweißens) werden in Merkblatt DVS 3203 Teil 1 beschrieben.

Für das Laserstrahlschweißen mit Festkörperlaseren in Elektronik und Feinwerktechnik gilt Merkblatt DVS 2809 (Laserstrahlschweißen in Elektronik und Feinwerktechnik).

2 Besondere Merkmale des Laserstrahlschweißens

Das Laserstrahlschweißen weist gegenüber anderen Schmelzschweißverfahren folgende Besonderheiten auf:

2.1 Fokussierter Laserstrahl

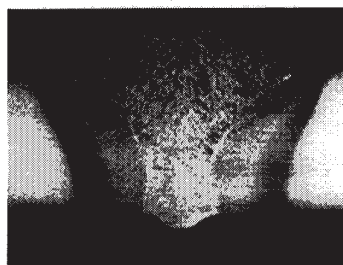
Ein Laserstrahl mit einer optischen Strahlleistung von 0,5 bis zu 10 kW (im Forschungs- und Entwicklungsbereich auch darüber) kann mit Hilfe von Spiegeln oder Linsen auf eine Brennfleckgröße von weniger als 1 mm² fokussiert werden. Die dadurch erzielbaren hohen Leistungsflußdichten im Brennpunkt von über 10⁶ W/cm² ermöglichen das Schmelzschweißen metallischer Werkstoffe, wobei im allgemeinen ohne Schweißzusätze geschweißt wird.

2.2 Schmelz- und Wärmeeinflußzonen

Die Schmelz- und Wärmeeinflußzonen sind wesentlich schmäler als beispielsweise die von Lichtbogenschweißverbindungen. Entsprechend geringer sind wegen des kleinen Schweißnahtvolumens die Wärmebeeinflussung des Grundwerkstoffes und die Schrumpfkkräfte. Die Bilder 1a und 1b verdeutlichen dies anhand von jeweils drei Makroschliffen an Schweißnähten, die mit vergleichbaren Schweißverfahren hergestellt wurden.

MAG-Schweißung

V-Naht 50° zweilagig



$v_1 = 4,8 \text{ mm/s}$ $I_1 = 140 \text{ A}$
 $v_2 = 5,6 \text{ mm/s}$ $I_2 = 225 \text{ A}$
 $P_1 = 2,8 \text{ kW}$
 $P_2 = 4,9 \text{ kW}$

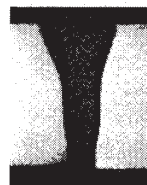
Laserstrahlschweißung

Fugenform:

I-Stoß



$v = 15 \text{ mm/s}$
 $P = 4,5 \text{ kW}$



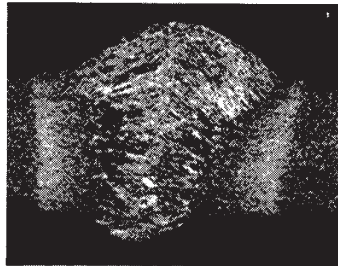
$v = 40 \text{ mm/s}$
 $P = 7,0 \text{ kW}$

Werkstoff: St 52-3
Blechdicke: 6 mm
Schweißposition: waagrecht

Bild 1a. MAG- und Laserstrahlschweißnaht im Vergleich.

Diese Veröffentlichung wurde von einer Gruppe erfahrener Fachleute in ehrenamtlicher Gemeinschaftsarbeit erstellt und wird als eine wichtige Erkenntnisquelle zur Beachtung empfohlen. Der Anwender muß jeweils prüfen, wie weit der Inhalt auf seinen speziellen Fall anwendbar und ob die ihm vorliegende Fassung noch gültig ist. Eine Haftung des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik e. V. und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

UP-Schweißung



$v = 6,7 \text{ mm/s}$
 $P = 21 \text{ kW}$
 $I_s = 700 \text{ A}$

Schweißpulver:
 OP 121 TT
 Zusatzwerkstoff S 3

Laserstrahl-
schweißung

$v = 24 \text{ mm/s}$
 $P = 10 \text{ kW}$
 Prozeßgas:
 Helium

Elektronenstrahl-
schweißung

$v = 70 \text{ mm/s}$
 $P = 10 \text{ kW}$

Werkstoff: St 52-3
 Blechdicke: 10 mm
 Schweißposition: waagrecht
 I-Naht

Bild 1b. Unterpulver-, Laserstrahl- und Elektronenstrahlschweißnaht im Vergleich.

2.3 Maßhaltigkeit

Ein besonderer Vorzug des Verfahrens ist, daß aufgrund der verhältnismäßig hohen Schweißgeschwindigkeit und der geringen Erwärmung des Werkstücks ein sehr geringer Verzug zu erreichen ist.

Dadurch ist im allgemeinen keine Nachbearbeitung des geschweißten Werkstücks bzw. der Schweißverbindung erforderlich.

3 Oberflächenvorbehandlung und Nahtvorbereitung

3.1 Werkstückoberfläche

Im allgemeinen wird wie bei anderen Verfahren auch beim Laserstrahlschweißen durch Verunreinigungen und Fremdbeschichtungen an den Werkstückoberflächen die Entstehung von inneren Nahtfehlern wie Poren, Risse, Endkrater begünstigt.

Die durch Aufkohlen, Nitrieren, Eloxieren, Phosphatieren, Chromatieren usw. behandelten Werkstückoberflächen müssen deshalb an den Stirnflächen und im Abstand von etwa zweimal Nahtbreite neben der Stoßfuge entfernt werden.

Bei den zu schweißenden Werkstücken mit hohen Anforderungen an die Nahtgüte (zum Beispiel Festigkeit, Gasdichtheit) ist im Bereich der Schweißnaht (mindestens Nahtoberraupenbreite) und an den Stirnflächen eine chemische oder mechanische Reinigung vorzusehen.

Bei geringen Anforderungen an die Nahtgüte ist – in Abhängigkeit von der Art der Verunreinigung – nicht immer eine Oberflächenreinigung erforderlich. In einzelnen Fällen sind Schweißungen trotz unterschiedlicher Verunreinigungen und Fremdbeschichtungen (Öl, Fett, Lack, Oxidschicht, Zink) erfolgreich durchgeführt worden.

Zum Entfernen dieser Oberflächenschichten eignen sich folgende Bearbeitungsverfahren: Strahlen mit abrasiven Mitteln, Fräsen, Drehen und Schleifen.

Bei der Bearbeitung ist in Abhängigkeit vom Werkstoff und der Verträglichkeit mit dem nachfolgenden Schweißvorgang ein Kühlmittel besonderer Zusammensetzung zu verwenden. Beim Entgraten der Werkstücke ist nach Möglichkeit ein Anfasen im Nahtbereich zu vermeiden.

3.2 Spaltbreiten

Die maximal zulässige Spaltbreite ist abhängig vom Fokussdurchmesser des Laserstrahls, der Nahtgeometrie, der Nahtart und der Bauteilgeometrie sowie den metallurgischen Eigenschaften des Werkstoffs.

Die maximal zulässige Spaltbreite $b_{s\max}$ sollte kleiner als das 0,7fache des Fokussdurchmessers d_F sein:

$$(1) \quad b_{s\max} < 0,7 d_F; \quad d_F \approx 0,1 \text{ bis } 1,0 \text{ mm, je nach verwendeter Fokussieroptik und vorhandener Strahlqualität.}$$

Für das Schweißen von Nähten in Stahl (I-Stoß) gelten bei freier Schrumpfung nachstehende Erfahrungswerte:

Die maximale Spaltbreite $b_{s\max}$ muß kleiner als die Querschrumpfung S_Q sein, um Nahteinfall zu vermeiden:

$$(2) \quad b_{s\max} < S_Q.$$

Die Querschrumpfung S_Q beträgt für Stähle etwa 6% der mittleren Schweißnahtbreite b_s :

$$(3) \quad S_Q = 0,06 b_s.$$

Das Verhältnis der Schmelzzonentiefe t zur Schweißnahtbreite b kann beim Laserstrahlschweißen über einen weiten Bereich variiert werden. Dabei sind die Werte t/b von 2 bis 6 charakteristische Größen.

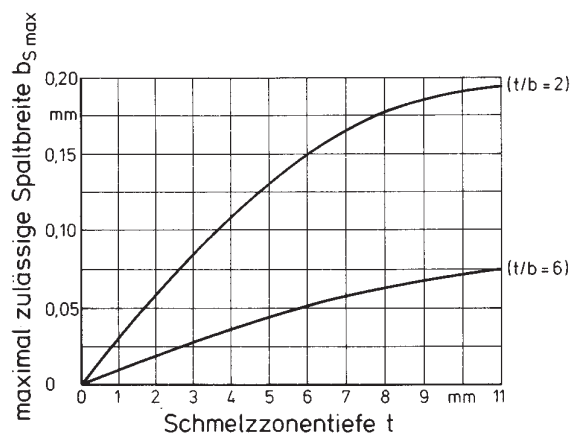


Bild 2. Maximal zulässige Spaltbreiten für Längsnähte ohne Nahteinfall an Stahl für verschiedene Verhältnisse t/b .

In Bild 2 wird die maximale Spaltbreite $b_{s\max}$ in Abhängigkeit von der Schmelzzonentiefe t für zwei verschiedene Tiefe: Breite-Verhältnisse t/b gezeigt. Beim Laserstrahlschweißen mit Schweißzusatz können größere Spaltbreiten überbrückt werden.

3.3 Werkstückbedingte Beeinflussung des Laserstrahls

Der Laserstrahl wird durch elektrische und magnetische Felder nicht beeinflusst. Eine Streuung des Laserstrahls kann hervorge-

rufen werden durch Lösungsmitteldämpfe. Deshalb ist darauf zu achten, daß im Bereich des Laserstrahls unter anderem keine Lösungsmitteldämpfe vorhanden sind.

4 Nahtarten

Jede Nahtart ist durch geometrische Besonderheiten gekennzeichnet. Der Konstrukteur hat deshalb unter Beachtung der Fertigungsmöglichkeiten und unter Berücksichtigung der Festigkeitsanforderungen, Bauteilfunktionen, Prüfbarkeit und Kostenaufwand zu entscheiden, welche der in Tabelle 1 (siehe Seiten 5 und 6) wiedergegebenen Nahtarten die geeignete ist.

5 Nachbearbeitung und Prüfbarkeit

Bei allen Nahtarten ist zu beachten, daß Randkerben, Wurzeldurchgang, Wurzelbindefehler usw. die Schweißnahtfestigkeit nachhaltig beeinträchtigen können. Im Falle hoher dynamischer Beanspruchung der Laserschweißnaht kann es zweckmäßig sein, ein Dickenaufmaß einzuplanen, um Abweichungen im Nahtäußeren mechanisch abarbeiten zu können. Ein nachträgliches Bearbeiten erleichtert das einwandfreie zerstörungsfreie Prüfen der Laserschweißnaht.

Hinweise für das prüfgerechte Gestalten von Schweißkonstruktionen enthält Merkblatt DVS 1003 Teil 1.

6 Konstruktive Hinweise

6.1 Nahtanfang und Nahtende

Beim Laserstrahlschweißen kann es bei Längsnähten hilfreich sein, um Ansatz- bzw. Endkraterfehler zu vermeiden, mit gezielter Strahlleistungssteuerung („Rampen“) zu schweißen oder am Nahtanfang ein Anlaufstück und am Nahtende ein Auslaufstück vorzusehen, das nachträglich abgearbeitet wird.

Beim Schweißen von Rundnähten oder Überschweißen von Längsnähten benutzt man ebenfalls ein Rampen am Nahtanfang und am Nahtende.

Rampen (slope-in/slope-out):

- definiertes zeitliches Ändern der Streckenenergie durch Steuern der Strahlleistung bzw. der Schweißgeschwindigkeit,
- definiertes zeitliches Ändern der Intensität durch Ändern der Strahlleistung bzw. der Fokusslage.

Bild 3 verdeutlicht das Schema des Rampens.

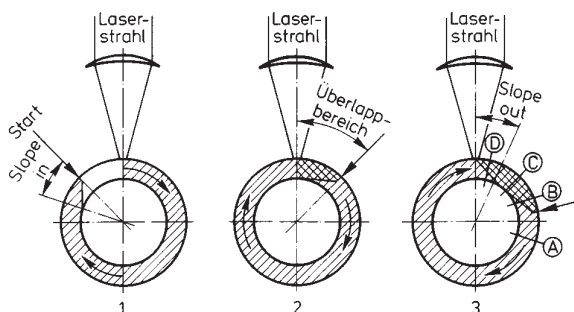


Bild 3. Schema des Rampens.

6.2 Schweißen unterschiedlicher Werkstückdicken

Ein Schweißen unterschiedlicher Werkstückdicken ist möglich; zu beachten sind je nach Anwendungsfall der Kraftlinienfluß und der Steifigkeitsverlauf zwischen beiden Verbindungspartnern

sowie die erhöhte Rißgefahr im Bereich der Nahtoberraupe durch die überwiegend konkave Oberfläche.

6.3 Schweißen mit Zusatz

Der Schweißzusatz hat die Aufgabe, die Bauteiltoleranzen auszugleichen und/oder Gefügeausbildungen im Werkstück zu beeinflussen.

Das Laserstrahlschweißen mit Zusatz in Drahtform ist derzeit nur bei Laserstrahlleistungen ab etwa 5 kW sinnvoll.

Bei geringeren Strahlleistungen kann der Schweißzusatz auch in Form von Einlegefolien, Pulver oder Beschichtungen zugeführt werden.

6.4 Schweißen von Rundnähten

Bild 4 zeigt Konstruktionsbeispiele von Axial- und Radialrundnähten, die zum Laserstrahlschweißen geeignet sind.

Die besonders bei Rundnähten auftretenden Verformungsvorgänge, siehe Bild 5, lassen sich durch vorhergehendes Hefen und/oder Spannen verringern.

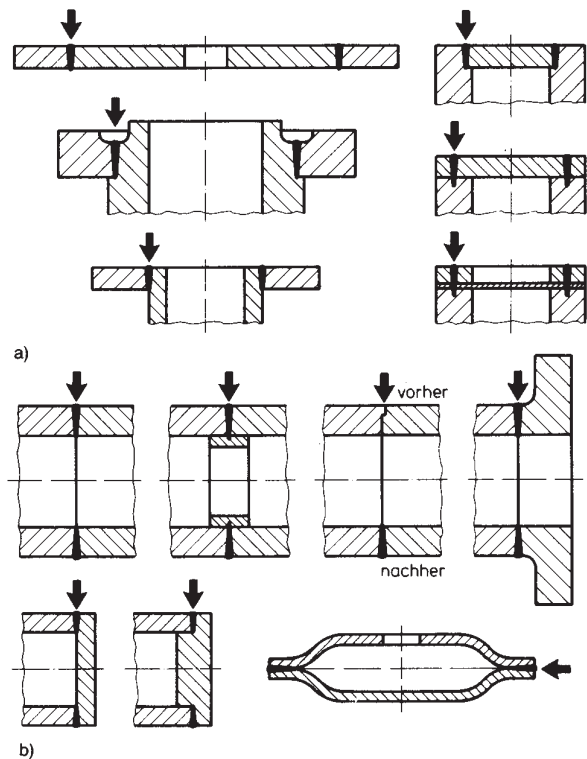


Bild 4. Konstruktionsbeispiele von a) Axial- und b) Radialrundnähten.

6.5 Schweißen schwer zugänglicher Nähte

Sofern der Laserstrahl unbeeinflussbar auf die Schweißstelle fokussiert werden kann und die Zufuhr eines Arbeitsgases möglich ist, läßt sich der Laserstrahl auch an schwer zugänglichen Stellen anwenden. In Einzelfällen muß eine Anpassung zwischen Werkstück und Fokussieroptik bzw. eine Änderung des Einfallwinkels erfolgen, Bild 6.

6.6 Spannvorrichtungen

Im allgemeinen ist eine Badsicherung beim Laserstrahlschweißen nicht erforderlich. Bei Verwendung von Spannvorrichtungen ist darauf zu achten, daß im Falle einer Durchschweißung der Laserstrahl an der Unterseite frei austreten kann.

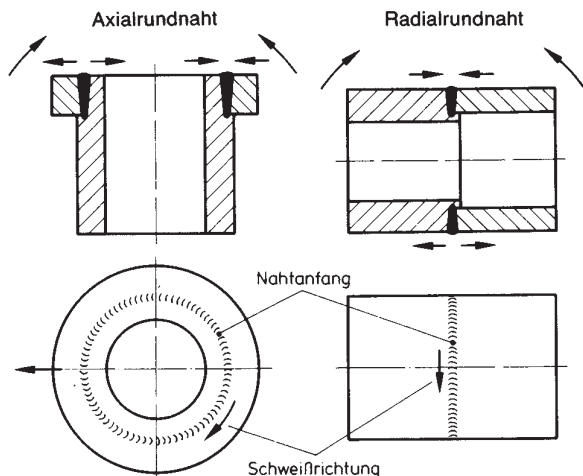


Bild 5. Verformungstendenzen von Axial- und Radialrundnähten.

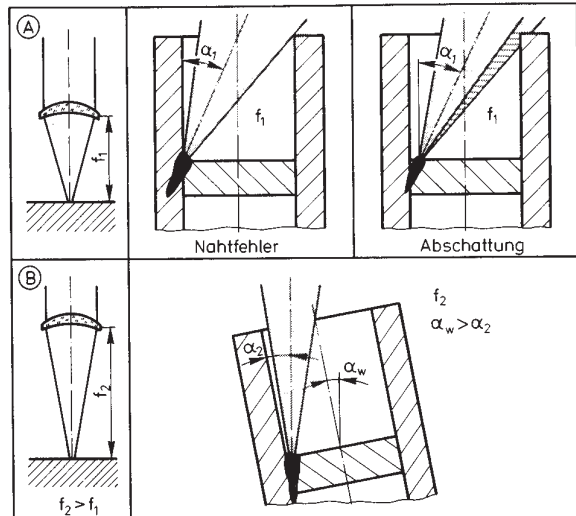


Bild 6. Beispiele für eine Anpassung von Werkstück und Fokussieroptik.

7 Schrifttum

- [1] N. N.: Handbuch „Schweißen mit Hochleistungs-CO₂-Lasern“. Technologie Aktuell, Bd. 4. VDI-Verlag, Düsseldorf 1987.
- [2] Merkblatt DVS 0501 „Prüfen der Porenneigung beim Überschweißen von Fertigungsbeschichtungen auf Stahl“.
- [3] Merkblatt DVS 3201 „Grundsätze für das Konstruieren elektronenstrahlgeschweißter Bauteile“. DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [4] DIN ISO 1302 „Technische Zeichnungen; Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in Zeichnungen“. Beuth Verlag, Berlin/Köln.
- [5] DIN 6784 „Werkstückkanten; Begriffe, Zeichnungsangaben“. Beuth Verlag, Berlin/Köln.
- [6] Merkblatt DVS 3203 Teil 1 „Qualitätssicherung von CO₂-Laserstrahl-Schweißarbeiten; Verfahren und Laserstrahl-schweißanlagen“.
- [7] Merkblatt DVS 3203 Teil 2 „Qualitätssicherung von CO₂-Laserstrahl-Schweißarbeiten; Prüfen von Schweißparametern“.
- [8] Merkblatt DVS 3203 Teil 3 „Qualitätssicherung von CO₂-Laserstrahl-Schweißarbeiten; Laserstrahl-Schweißbeignung metallischer Werkstoffe“ (in Vorbereitung).
- [9] Merkblatt DVS 1003 Teil 1 „Empfehlungen zum prüfge-rechten Gestalten von Schweißkonstruktionen; Beispiele aus verschiedenen Anwendungsbereichen“.
- [10] Merkblatt DVS 2809 „Laserstrahlschweißen in Elektronik und Feinwerktechnik“.

Tabelle 1. Beispiele von Nahtarten zum Laserstrahlschweißen.

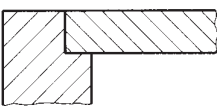
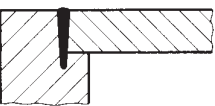
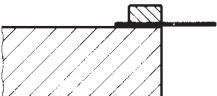
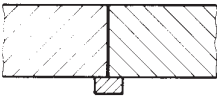
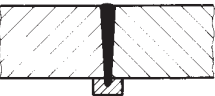
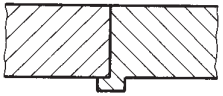
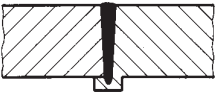
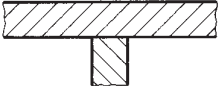
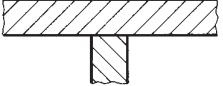
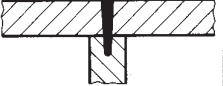
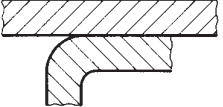
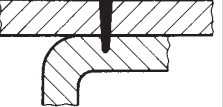
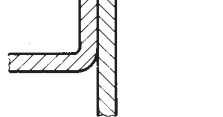
Lfd. Nr.	Benennung	Stoß		Bemerkungen
		vorbereitet	geschweißt (schematisch)	
1	I-Naht			Vorteile: - geringer Bearbeitungsaufwand - günstiger Kraftfluß Nachteil: - kein Formschluß für das Positionieren der Stirnflächen.
2	I-Naht am Überlappstoß			Vorteil: - geringer Bearbeitungsaufwand Nachteile: - geringe Festigkeit durch kleinen Fügequerschnitt (ggf. Nahtbreite durch Querspendeln vergrößern) - ungünstiger Kraftfluß - Kontrolle der erzielten Schmelzzonentiefe schwierig
3	I-Naht bei ungleichen Wanddicken			Vorteil: - geringer Bearbeitungsaufwand Nachteile: - Positionieraufwand hoch - Schrägstellung des Werkstückes - erhöhter Leistungsbedarf durch erhöhte Wärmeabfuhr in das dickere Bauteil - Nahtwurzel läuft aus dem Fugenbereich (Bindefehler) - ungünstiger Kraftfluß
4	I-Naht bei ungleichen Wanddicken			Vorteile: - Formschluß - Positionierhilfe - geringer Vorrichtungsaufwand - höhere Parametertoleranz im Vergleich zu lfd. Nr. 1 Nachteile: - Porenbildung an Nahtwurzel - Kontrolle der Schmelzzonentiefe schwierig - Gefahr von Spaltkorrosion
5	I-Naht bei ungleichen Wanddicken			Vorteile: - angepaßter Wärmeflußquerschnitt - geringe Rißneigung Nachteile: - Porenbildung an der Nahtwurzel - Kontrolle der Schmelzzonentiefe schwierig - Gefahr von Spaltkorrosion - erhöhter Bearbeitungsaufwand
6	Folienschweißen mit Auflage			Vorteile: - hohe Parametertoleranz - extreme Wanddickenunterschiede möglich - geringer Bearbeitungsaufwand Nachteile: - Porenbildung an der Nahtwurzel - besonderer Aufwand zum Andrücken von Folie und Auflage - Gefahr von Spaltkorrosion
7	I-Naht bei ungleichen Wanddicken			Vorteil: - günstigerer Kraftfluß als bei lfd. Nr. 3 Nachteile: - kein Formschluß für das Positionieren der Stirnflächen - erhöhter Bearbeitungsaufwand im Vergleich zu lfd. Nr. 3
8	I-Naht mit Schweißzusatz in Form von Folie			Vorteil: - Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe (zum Beispiel unlegierter Baustahl mit nichtrostendem Stahl) Nachteile: - ggf. höhere Strahlleistung in Abhängigkeit von der Foliendicke - Positionierung schwieriger als bei lfd. Nr. 1 - erhöhter Einspannaufwand - Einhaltung und Ermittlung der Schweißparameter schwierig
9	I-Naht mit Beilage			Vorteile: - geringerer Aufwand beim Ermitteln der Schweißparameter als bei lfd. Nr. 1 - geringe Gefahr von Schweißspritzern an der Nahtunterseite Nachteile: - höherer Bearbeitungsaufwand als bei lfd. Nr. 1 - erhöhter Einspannaufwand - Gefahr von Spaltkorrosion möglich, wenn die Wurzelsicherung nicht abgearbeitet wird - Nahtwurzel nicht sichtbar

Tabelle 1. Fortsetzung.

Lfd. Nr.	Benennung	Stoß		Bemerkungen
		vorbereitet	geschweißt (schematisch)	
10	I-Naht mit Zentrierlippe außen			Vorteile: - geringerer Aufwand beim Ermitteln der Schweißparameter als bei lfd. Nr. 1 - Parametertoleranz größer - geringe Gefahr von Schweißspritzern an der Nahtunterseite Nachteile: - erhöhter Bearbeitungsaufwand im Vergleich zu lfd. Nr. 1 - Gefahr von Spaltkorrosion bei nicht abgearbeiteter Zentrierlippe - Nahtwurzel nicht sichtbar
11	I-Naht mit Zentrierlippe innen			Vorteil: - formschlüssige Positionierung Nachteile: - Fugenmarkierung nötig - höhere Paßgenauigkeit im Vergleich zu lfd. Nr. 1 - erhöhter Bearbeitungsaufwand im Vergleich zu lfd. Nr. 1 - Einhalten und Ermitteln der Schweißparameter schwierig bei geforderter Nahtgeometrie
12	I-Naht am T-Stoß			Vorteile: - geringe Winkelschrumpfung - geringer Schweißaufwand - großer Verbindungsquerschnitt Nachteile: - Gefahr von Spaltkorrosion bei nicht durchgeschweißtem bzw. erfaßtem Nahtquerschnitt - Schweißspritzer im Bereich der Nahtwurzel - Einhaltung und Ermittlung der Schweißparameter schwierig
13	I-Naht am T-Stoß			Vorteile: - keine Spritzerbildung an der Nahtunterseite - geringe Winkelschrumpfung - keine Gefahr von Spaltkorrosion - günstiger Kraftlinienfluß Nachteile: - erhöhter Schweißaufwand - Gefahr von Porenbildung in der Schweißnaht - Nahtwurzel nicht sichtbar - Zugänglichkeit von beiden Seiten erforderlich
14	I-Naht am T-Stoß			Vorteile: - geringere Gefahr von Heißrissen - günstiger Kraftfluß Nachteile: - hoher Bearbeitungsaufwand - teils undefiniertes Aufschmelzen der Kanten
15	I-Naht am T-Stoß			Vorteile: - geringer Bearbeitungsaufwand - größere Parametertoleranzen im Vergleich zu lfd. Nr. 14 Nachteile: - Spaltkorrosion - Porenbildung im Wurzelbereich - geringe Festigkeit durch kleinen Fügequerschnitt - ungünstiger Kraftlinienfluß
16	I-Naht am überlappten T-Stoß			Vorteile: - geringer Bearbeitungsaufwand - größere Parametertoleranzen im Vergleich zu lfd. Nr. 14 Nachteile: - Spaltkorrosion - Porenbildung im Wurzelbereich - geringe Festigkeit durch kleinen Fügequerschnitt - ungünstiger Kraftlinienfluß
17	Stirnflächennaht			Vorteil: - geringer Bearbeitungsaufwand Nachteile: - unverschweißter Spalt kerbwirkend - keine Kontrolle der Einschweißtiefe möglich - Einhalten und Ermitteln der Schweißparameter schwierig bei geforderter Nahtgeometrie