

Schultz

# **Elektronenstrahl- schweißen**

2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

# Vorwort zur 2. Auflage

## Verzeichnis einiger Abkürzungen

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Geschichtlicher Rückblick .....	1
1.2	Die besonderen Merkmale und Vorteile des Elektronenstrahl-Schweißverfahrens ..	3
1.3	Sonstige Strahlschweißverfahren .....	5
<b>2</b>	<b>Erzeugung des Elektronenstrahles</b> .....	<b>6</b>
2.1	Freie Elektronen .....	6
2.2	Katode .....	7
2.3	Anode .....	8
2.4	Steuerelektrode .....	9
2.5	Raumladungsbetrieb .....	11
2.6	Fokussierlinse .....	13
2.7	Ablenksystem .....	14
2.8	Strahlkorrektursysteme .....	15
2.9	Elektronenstrahl-Kennwerte .....	17
2.9.1	Allgemeines .....	17
2.9.2	Aperturwinkel, Raumwinkel .....	17
2.9.3	Richtstrahlwert .....	17
2.9.4	Arata-Beam-Test .....	18
2.9.5	Leistungsdichteverteilung .....	18
2.9.6	Emitanz, Perveanz, Radianz .....	23
2.10	Vakuum .....	23
<b>3</b>	<b>Verhalten des Elektronenstrahles beim Eindringen in Metalle</b> .....	<b>25</b>
3.1	Allgemeines .....	25
3.2	Vorgänge an der Werkstückoberfläche .....	25
3.3	Tiefschweißeffekt .....	26
3.4	Folgerungen für den Schweißprozess .....	32
<b>4</b>	<b>Schweißparameter und Hinweise für die Schweißpraxis</b> .....	<b>34</b>
4.1	Allgemeines .....	34
4.2	Beschleunigungsspannung .....	35
4.3	Strahlstrom .....	36
4.4	Linienstrom, Fokuslage .....	37
4.5	Schweißgeschwindigkeit .....	41
4.6	Strahlableiten, Strahlpendeln .....	42
4.7	Strahlpulsen .....	45
4.8	Schweißen in Zwangsposition .....	46
4.9	Arbeitsdruck .....	49
4.9.1	Schweißen im Vakuum .....	49
4.9.2	Schweißen in Atmosphäre .....	50
4.10	Parameteroptimierung .....	51

<b>5</b>	<b>Schweißbeignung metallischer Werkstoffe</b>	<b>55</b>
5.1	Allgemeines	55
5.2	Verfahrensbedingte Einflüsse	55
5.2.1	Schmelz- und Dampfphase	55
5.2.2	Einfluß des Vakuums	55
5.2.3	Erstarrung	56
5.2.4	Wärmeeinflußzonen	59
5.2.5	Schweißbeignenspannungen	60
5.3	Einteilung der Schweißbeignung	62
5.4	Stahl- und Eisenwerkstoffe	64
5.4.1	Un- und niedriglegierte Stähle	64
5.4.2	Hochlegierte Stähle	65
5.4.3	Gußeisen	69
5.5	Kupferwerkstoffe	69
5.6	Nickel- und Kobaltwerkstoffe	69
5.7	Aluminium- und Magnesiumwerkstoffe	70
5.8	Titanwerkstoffe	73
5.9	Sondermetalle	74
5.10	Werkstoffkombinationen	75
5.11	Werkstoffbedingte Strahlablenkungen	77
5.12	Festigkeits- und Korrosionseigenschaften	78
<b>6</b>	<b>Vorbereitung der Werkstücke</b>	<b>80</b>
6.1	Allgemeines	80
6.2	Werkstückoberfläche, Nahtfugenreinigung	82
6.3	Nahtgrundformen	85
6.3.1	I-Nähte	85
6.3.2	Kehlnähte, T-Stöße und sonstige Nahtformen	88
6.3.3	Besonderheiten von Rundnähten	90
6.4	Unterschiedliche Werkstückdicken	92
6.5	Maßtoleranzen	93
6.5.1	Spaltbreiten	93
6.5.2	Passungen	94
6.6	Stirnflächenbearbeitung	94
6.7	Nahtkontroll-Linien	95
6.8	Nahtanfang und -ende	95
6.8.1	Allgemeines	95
6.8.2	Längsnähte	95
6.8.3	Rundnähte	96
6.9	Schweißen mit Zusatz	96
6.9.1	Allgemeines	96
6.9.2	Konstruktive Maßnahmen	97
6.9.3	Schweißen großer Wanddicken mit Zusatz	97
6.9.4	Auftragschweißen, Reparaturschweißen	100
6.10	Entlüftungsöffnungen	101
6.11	Schweißen schwer zugänglicher Nähte	102
6.12	Schweißverzug	103
6.12.1	Allgemeines	103
6.12.2	Längsnähte	103
6.12.3	Rundnähte	104
6.13	Schweißvorrichtungen	107
6.14	Arbeitskammerabmessungen und Werkstückbewegung	108

<b>7</b>	<b>Strahl- und Maschinensteuerungen</b>	<b>109</b>
7.1	Allgemeines	109
7.2	Strahlstromsteuerungen	109
7.3	Slope-Steuerungen	110
7.4	Automatisches Fokussieren	111
7.5	Heizstromsteuerung	112
7.6	Fugensuchsysteme	113
7.6.1	Allgemeines	113
7.6.2	Off line	114
7.6.3	On line	114
7.6.4	Teach in und play back	114
7.7	Pumpensteuerungen	115
7.8	Steuerungssysteme	115
7.8.1	Allgemeines	115
7.8.2	SPS-Steuerungen	116
7.8.3	CNC-Steuerungen	118
<b>8</b>	<b>Elektronenstrahl-Schweißmaschinen und Vorrichtungen</b>	<b>124</b>
8.1	Maschinengrundaufbau	124
8.2	Elektronenstrahlgenerator	125
8.3	Arbeitskammer	128
8.4	Bewegungseinrichtungen	128
8.5	Hochspannungsversorgung, Steuer- und Regeleinrichtungen	131
8.6	Vakuumeinrichtungen	132
8.6.1	Allgemeines	132
8.6.2	Physikalische Grundlagen	132
8.6.3	Pumpen	133
8.6.4	Meßgeräte	138
8.6.5	Aufbau und Arbeitsweise von Vakuumanlagen	139
8.6.6	Pumpzeiten	142
8.7	Maschinen- und Vorrichtungsbeispiele	142
8.8	Atmosphäre-Schweißmaschinen	148
8.9	Aufstellen der Elektronenstrahl-Schweißmaschine	150
<b>9</b>	<b>Fertigungsbeispiele elektronenstrahlgeschweißter Bauteile</b>	<b>151</b>
9.1	Luft- und Raumfahrt, Turbinenbau	151
9.2	Getriebe- und Fahrzeugbau	156
9.3	Maschinenbau	160
9.4	Werkzeuge	163
9.5	Elektrotechnik	164
9.6	Apparatebau	166
9.7	Atmosphäregeschweißte Bauteile	168
<b>10</b>	<b>Prüfen der Schweißmaschine</b>	<b>172</b>
10.1	Grundlagen, Prüfbedingungen	172
10.2	Messen der elektrischen und mechanischen Parameterkennwerte	175
10.2.1	Beschleunigungsspannung	175
10.2.2	Strahlstrom	177
10.2.3	Linsenstrom	178
10.2.4	Schweißgeschwindigkeit	178
10.3	Messen der maschinentechnischen Kennwerte	179

10.3.1	Führungsgenauigkeit .....	179
10.3.2	Flecklagekonstanz .....	180
10.3.3	Druckanstiegsrate .....	182
10.4	Messen der Schmelzzonen-Tiefenschwankung .....	182
10.5	Prüfen des Röntgenstrahlenschutzes .....	183
<b>11</b>	<b>Schweißanweisung</b> .....	<b>185</b>
<b>12</b>	<b>Prüfen des Bedien- bzw. Einrichtpersonals</b> .....	<b>186</b>
12.1	Allgemeines .....	186
12.2	Prüfungsverfahren .....	187
12.3	Prüfbescheinigung .....	187
12.4	Prüfer und Prüfstelle .....	189
<b>13</b>	<b>Verfahrensprüfung</b> .....	<b>190</b>
<b>14</b>	<b>Prüfen von geschweißten Nähten</b> .....	<b>193</b>
14.1	Allgemeines .....	193
14.2	Zerstörungsfreie Prüfverfahren .....	193
14.2.1	Sichtprüfung .....	193
14.2.2	Ultraschallprüfung .....	194
14.2.3	Durchstrahlungsprüfung .....	194
14.2.4	Eindring-, Wirbelstrom- und Magnetpulverprüfung .....	194
14.3	Zerstörende Prüfverfahren .....	194
14.3.1	Zugprüfung .....	194
14.3.2	Bruchprüfung .....	194
14.3.3	Biegeprüfung .....	195
14.3.4	Kerbschlagbiegeprüfung .....	195
14.3.5	Metallographische Prüfungen .....	195
14.3.6	Härteprüfung .....	196
14.3.7	Sonstige Prüfungen .....	197
<b>15</b>	<b>Bewerten von Schweißnaht-Unregelmäßigkeiten</b> .....	<b>198</b>
15.1	Allgemeines .....	198
15.2	Bewertungsgruppen .....	198
15.3	Risse, Poren, Lunker .....	199
15.4	Bindefehler, unvollständige Durchschweißung .....	200
15.5	Randkerben, Kantenersatz .....	201
15.6	Naht- und Wurzelunregelmäßigkeiten .....	201
15.7	Kehlnähte .....	202
15.8	Schweißspritzer .....	203
15.9	Schweißnaht-Nachbehandlungen .....	203
<b>16</b>	<b>Qualitätssicherung</b> .....	<b>204</b>
16.1	Allgemeines .....	204
16.2	Steuer-, Regel- und Überwachungssysteme .....	206
<b>17</b>	<b>Kostenrechnung und Wirtschaftlichkeit</b> .....	<b>211</b>
17.1	Allgemeines .....	211
17.2	Kostenaufwand .....	211
17.3	Kosteneinsparungen .....	214

<b>18</b>	<b>Regelwerke</b> .....	215
18.1	Normen, internationale, europäische und nationale .....	215
18.2	Werkstoffleistungsblätter .....	215
18.3	DVS-Merkblätter und -Richtlinien .....	216
18.4	Sonstige Regelwerke .....	216
<b>19</b>	<b>Weitere Elektronenstrahl-Bearbeitungsverfahren</b> .....	217
19.1	Allgemeines .....	217
19.2	Härten .....	218
19.3	Umschmelzen .....	220
19.4	Bohren, Perforieren .....	221
19.5	Kunststoffbearbeitung .....	223
<b>20</b>	<b>Schrifttum</b> .....	224
<b>21</b>	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	235
<b>22</b>	<b>Bildnachweis</b> .....	242