

Schultz

Elektronenstrahl- schweißen

**Grundlagen, Maschinen und
Anwendungen**

3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 93

ISBN 978-3-945023-85-3

Alle Rechte vorbehalten.

© DVS Media GmbH, Düsseldorf · 2017

Herstellung: Griebisch und Rochol Druck GmbH, Hamm

Vorwort zur 3. Auflage

In den zurückliegenden anderthalb Jahrzehnten seit Erscheinen der letzten Auflage haben neue elektronische Steuerungen die wirtschaftlichen Einsatzmöglichkeiten des Elektronenstrahlschweißens in der Fertigung wesentlich erweitert. Die unverändert große Nachfrage nach einem Fachbuch über das Verfahren des Elektronenstrahlschweißens, hat mich deshalb mit Freude veranlasst, eine neue Auflage nach dem heutigen Stand der Technik auszuarbeiten.

Der bewährte Leitgedanke wurde beibehalten, dem Ingenieur in Versuch, Entwicklung und Fertigung das Elektronenstrahlschweißen detailliert und anschaulich so grundlegend zu erläutern, dass er nach eigenen Überlegungen in der Schweißpraxis selbständige Lösungen finden und Entscheidungen treffen kann.

Folgende Abschnitte wurden umfassend überarbeitet bzw. neu aufgenommen:

- statisches und dynamisches Formen und Ablenken des Elektronenstrahles,
- Fokuswobbeln,
- Leistungsdichteverteilung,
- Strahlparameterprodukt,
- elektronenoptische Einblicksysteme,
- automatische Strahljustierungen,
- automatische Fugensuchsysteme,
- geteilter Elektronenstrahl für Mehrbad- und Mehrprozesstechnik,
- Taktmaschinen, Mehrkammer- und Schleusenmaschinen,
- Qualitätssicherung, Keilprobe,
- Kostenrechnung und Wirtschaftlichkeit
- Lohnschweißungen,
- Elektronenstrahl in Fest- und Flüssigphasenprozessen,
- additives Schweißen mit dem Elektronenstrahl.

Ich bedanke mich bei zahlreichen Kollegen, Firmen und Instituten, insbesondere bei den Firmen pro beam, Steigerwald Strahltechnik und PTR Strahltechnik sowie bei der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, für die Bereitstellung von Bild-, Textmaterial und für viele fachliche Beratungen.

Weiterhin danke ich dem Verlag, DVS Media GmbH, insbesondere dem Fachbuchlektor Lothar Knittel, für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und Unterstützung bei der Manuskripterstellung und Beschaffung von Fachliteratur.

Krailling, im Februar 2017

Helmut Schultz

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 3. Auflage

Verzeichnis einiger Abkürzungen

1	Einführung	1
1.1	Geschichtlicher Rückblick	1
1.2	Die besonderen Merkmale des Elektronenstrahl-Schweißverfahrens	3
1.3	Andere Strahlschweißverfahren	5
2	Das Erzeugen des Elektronenstrahles	6
2.1	Freie Elektronen	6
2.2	Kathode	7
2.3	Anode	9
2.4	Steuerelektrode	9
2.5	Raumladungsbetrieb	12
2.6	Fokuslinse	14
3	Das Formen und Ablenken des Elektronenstrahles	16
3.1	Statisches Formen und Ablenken	16
3.1.1	Zentrieren	16
3.1.2	Stigmatisieren	17
3.1.3	Ablenken	18
3.2	Dynamisches Ablenken	19
3.2.1	Allgemeines	19
3.2.2	Pendeln	21
3.2.3	Vektorisieren	21
3.2.4	Fokuswobbeln	21
4	Elektronenstrahl-Kennwerte	23
4.1	Allgemeines	23
4.2	Aperturwinkel und Kaustik	23
4.3	Arata-Beam-Test	24
4.4	Leistungsdichteverteilung	25
4.5	Strahlparameterprodukt	28
5	Eindringen des Elektronenstrahles in Metallwerkstoffe	30
5.1	Allgemeines	30
5.2	Vorgänge an der Metalloberfläche	30
5.3	Tiefschweißeffekt	31
5.4	Folgerungen für den Schweißprozess	34
6	Schweißparameter und Hinweise für die Schweißpraxis	36
6.1	Allgemeines	36
6.2	Beschleunigungsspannung	37
6.3	Strahlstrom	38
6.4	Linsenstrom und Fokusalage	39
6.5	Schweißgeschwindigkeit	41
6.6	Strahlpendeln	42
6.7	Strahlpulsen	44

6.8	Schweißen in Zwangsposition	45
6.9	Arbeitsdruck	46
6.9.1	Schweißen im Vakuum	46
6.9.2	Schweißen in Atmosphäre	47
6.10	Parameteroptimierung	48
7	Strahl- und Maschinensteuerungen	53
7.1	Allgemeines	53
7.2	Licht- und elektronenoptische Einblicksysteme	53
7.3	Automatische Strahljustierungen	54
7.3.1	Automatisches Zentrieren	55
7.3.2	Automatisches Stigmatisieren	55
7.3.3	Automatisches Fokussieren	56
7.4	Automatische Fugensuchsysteme	57
7.4.1	Allgemeines	57
7.4.2	Teach-in- und Play-back-Verfahren	59
7.4.3	Schleppfehlerkompensation	59
7.4.4	Schweißen mit Offline- und Online-Fugensuche	60
7.5	Schweißen mit geteiltem Elektronenstrahl	61
7.6	Heizstromsteuerung	62
7.7	Strahlstromsteuerung	63
7.8	Slope-Steuerungen	63
7.9	Pumpensteuerung	66
7.10	Gesamtsteuerungssysteme	66
7.10.1	Allgemeines	66
7.10.2	SPS-Steuerungen	66
7.10.3	CNC-Steuerungen	68
8	Schweißbeignung metallischer Werkstoffe	70
8.1	Allgemeines	70
8.2	Verfahrensbedingte Einflüsse	70
8.2.1	Schmelz- und Dampfphase	70
8.2.2	Erstarrungsphase	70
8.2.3	Einfluss des Vakuums	72
8.2.4	Wärmeeinflusszonen	73
8.2.5	Schweißbeignenspannungen	74
8.3	Werkstoffbedingte Einflüsse	76
8.3.1	Stahl- und Eisenwerkstoffe	76
8.3.2	Aluminium- und Magnesiumwerkstoffe	83
8.3.3	Kupferwerkstoffe	86
8.3.4	Nickel- und Kobaltwerkstoffe	86
8.3.5	Titanwerkstoffe	86
8.3.6	Sondermetalle	87
8.3.7	Metallkombinationen	88
8.3.8	Werkstoffbedingte Strahlablenkungen	92
8.4	Festigkeits- und Korrosionseigenschaften	93
8.5	Schweißbeignung – Einteilung und zusammenfassender Überblick	94
8.5.1	Einteilung der Schweißbeignung	94
8.5.2	Schweißbeignungen verschiedener Metalle	94

9	Vorbereitung der Werkstücke	96
9.1	Allgemeines	96
9.2	Nahtgrundformen	98
9.2.1	I-Nähte	98
9.2.2	Kehlnähte, T-Stöße und sonstige Nahtformen	101
9.2.3	Besonderheiten von Rundnähten	104
9.3	Unterschiedliche Werkstückdicken	107
9.4	Stirnflächenbearbeitung	108
9.5	Nahtkontroll-Linien	108
9.6	Nahtanfang und -ende	109
9.7	Entlüftungsöffnungen	110
9.8	Schweißen schwer zugänglicher Nähte	110
9.9	Werkstück- und Nahtfugenreinigung	111
9.10	Schweißvorrichtungen	113
9.11	Maße für Arbeitskammer, Werkstück- und Strahlgeneratorbewegung	114
10	Schweißmaschinen und Einrichtungen	116
10.1	Maschinengrundaufbau	116
10.2	Hochspannungsversorgung	118
10.3	Strahlgenerator	119
10.4	Arbeitskammer	121
10.5	Bewegungseinrichtungen	122
10.6	Vakuumeinrichtungen	125
10.6.1	Allgemeines	125
10.6.2	Physikalische Grundlagen	126
10.6.3	Pumpen	127
10.6.4	Messgeräte	134
10.6.5	Aufbau und Arbeitsweise von Vakuumanlagen	134
10.6.6	Evakuierungszeiten	137
10.7	Beispiele weiterer Schweißmaschinen	137
10.7.1	Taktmaschinen	137
10.7.2	Mehrkammer-Schweißmaschinen	139
10.7.3	Durchlaufmaschinen	142
10.7.4	Atmosphäre-Schweißmaschinen	143
10.8	Aufstellen von Schweißmaschinen	144
10.8.1	Allgemeines	144
10.8.2	Sonstige Maßnahmen zum Arbeits- und Gesundheitsschutz	144
11	Fertigungsbeispiele geschweißter Bauteile	145
11.1	Luft- und Raumfahrt	145
11.2	Fahrzeug- und Getriebebau	150
11.3	Schienentechnik	153
11.4	Apparatebau	155
11.5	Elektrotechnik	159
12	Prüfen von Schweißnähten	160
12.1	Allgemeines	160
12.2	Zerstörungsfreie Prüfverfahren	160
12.2.1	Sichtprüfung	160
12.2.2	Durchstrahlungsprüfung	160
12.2.3	Ultraschallprüfung	160

12.2.4	Eindringprüfung	161
12.2.5	Magnetpulverprüfung	161
12.2.6	Wirbelstromprüfung	161
12.3	Zerstörende Prüfverfahren	161
12.3.1	Zugprüfungen	161
12.3.2	Biegeprüfungen	162
12.3.3	Kerbschlagbiegeversuch	162
12.3.4	Metallographische Prüfungen	163
12.3.5	Härteprüfungen	163
13	Bewerten von Schweißnaht-Unregelmäßigkeiten	164
13.1	Allgemeines	164
13.2	Bewertungsgruppen	164
13.3	Poren, Lunker und Risse	165
13.4	Bindefehler und unvollständige Durchschweißung	166
13.5	Randkerben und Kantenversatz	167
13.6	Unregelmäßigkeiten der Nahtraupen	168
13.7	Kehlnähte	168
13.8	Schweißspritzer und Metaldampfsublimat	169
14	Prüfen der Schweißmaschine	170
14.1	Allgemeines	170
14.2	Prüfen des Schutzes gegen Röntgenstrahlen	173
14.3	Messen der elektrischen und mechanischen Parameterkennwerte	174
14.3.1	Beschleunigungsspannung	174
14.3.2	Strahlstrom	175
14.3.3	Linsenstrom	176
14.3.4	Schweißgeschwindigkeit	176
14.4	Messen der maschinentechnischen Kennwerte	177
14.4.1	Führungsgenauigkeit	177
14.4.2	Flecklagekonstanz	178
14.4.3	Arbeitsdruck-Anstiegsrate	179
14.5	Keilprobe	179
15	Prüfen des Bedien- und Einrichtpersonals	181
15.1	Allgemeines	181
15.2	Prüfverfahren	181
15.3	Prüfbescheinigung	182
16	Schweißanweisung	184
17	Verfahrensprüfung	186
17.1	Allgemeines	186
17.2	Qualifizierung der Schweißanweisung	187
17.3	Prüfungen	187
17.4	Geltungsbereich und Gültigkeitsdauer	188
18	Qualitätssicherung	190
18.1	Allgemeines	190
18.2	Einflussgrößen	190
18.3	Regel-, Steuer- und Überwachungssysteme	191
18.4	Dokumentation	192

19	Kostenrechnung und Wirtschaftlichkeit	194
19.1	Allgemeines	194
19.2	Kosteneinsparungen vor und nach dem Schweißen	194
19.3	Kostenarten	195
19.3.1	Berechnung des Maschinenstundensatzes	196
19.3.2	Berechnung des Fertigungskostensatzes	197
19.4	Automatisierung	197
19.5	Lohnschweißungen	198
20	Weitere thermische Elektronenstrahlverfahren zur Metallbearbeitung	200
20.1	Allgemeines	200
20.2	Abtragende Verfahren	200
20.2.1	Elektronenstrahlbohren	200
20.2.2	Elektronenstrahlgravieren und -profilieren	203
20.3	Elektronenstrahl-Randschichtbehandlungen	204
20.3.1	Festphasenprozesse	204
20.3.2	Flüssigphasenprozesse	207
20.4	Additive Bearbeitungsverfahren	209
20.4.1	Allgemeines	209
20.4.2	Form des Ausgangswerkstoffes – Pulver	210
20.4.3	Form des Ausgangswerkstoffes – Draht	211
21	Normen und Regeln zum Elektronenstrahlschweißen (Auswahl)	213
22	Schrifttum	216
23	Stichwortverzeichnis	224
24	Bildnachweis	228