

Inhaltsverzeichnis

Liste der Formelzeichen	XI
1 Einführung	1
1.1 Phänomene, Begriffe, Einflußgrößen	1
1.2 Entstehung, Veränderung, Beseitigung von Schweißeigenspannungen	4
1.3 Arten von Schweißeigenspannungsfeldern	6
1.4 Arten von Schweißformänderungen	11
1.5 Fachbuchhinweise und Darstellungsgesichtspunkte	12
2 Temperaturfelder beim Schweißen	15
2.1 Grundlagen	15
2.1.1 Schweißwärmequellen	15
2.1.1.1 Bedeutung des Schweißtemperaturfeldes	15
2.1.1.2 Arten von Schweißwärmequellen	15
2.1.1.3 Leistung der Schweißwärmequellen	17
2.1.2 Wärmeausbreitungsgesetze	18
2.1.2.1 Wärmeleitungsgesetz	18
2.1.2.2 Wärmeübergangsgesetz	19
2.1.2.3 Wärmestrahlungsgesetz	19
2.1.2.4 Feldgleichung der Wärmeleitung	20
2.1.2.5 Anfangs- und Randbedingungen	21
2.1.2.6 Thermische Werkstoffkennwerte	21
2.1.3 Modellvereinfachungen zur Geometrie und Wärmeführung	24
2.1.3.1 Notwendigkeit der Vereinfachungen	24
2.1.3.2 Vereinfachungen der Geometrie	24
2.1.3.3 Räumliche Vereinfachungen der Wärmequelle	25
2.1.3.4 Zeitliche Vereinfachungen der Wärmequelle	29
2.1.3.5 Anwenderfragen an Schweißtemperaturfelder	29
2.1.3.6 Numerische Lösung und experimentelle Kontrolle	30
2.2 Globale Temperaturfelder	31
2.2.1 Momentane stillstehende Quellen	31
2.2.1.1 Momentane Punktquelle auf Halbkörper	31
2.2.1.2 Momentane Linienquelle in Scheibe	32
2.2.1.3 Momentane Flächenquelle im Stab	32

2.2.2	Kontinuierliche stillstehende und wandernde Quellen	33
2.2.2.1	Wandernde Punktquelle auf Halbkörper	33
2.2.2.2	Wandernde Linienquelle in Scheibe	36
2.2.2.3	Wandernde Flächenquelle im Stab	38
2.2.3	Normalverteilte Quellen	38
2.2.3.1	Stillstehende und wandernde Kreisquelle auf Halbkörper	38
2.2.3.2	Stillstehende und wandernde Kreisquelle in Scheibe	39
2.2.3.3	Stillstehende Streifenquelle in Scheibe	40
2.2.4	Schnellwandernde Hochleistungsquellen	40
2.2.4.1	Schnellwandernde Hochleistungsquelle auf Halbkörper	40
2.2.4.2	Schnellwandernde Hochleistungsquelle in Scheibe	41
2.2.5	Wärmesättigung und Temperatenausgleich	42
2.2.6	Einfluß begrenzter Körperabmessungen	44
2.2.7	Finit-Element-Lösungen	46
2.3	Lokale Wärmewirkung auf Schmelzzone	49
2.3.1	Schweißlichtbogen als Wärmequelle	49
2.3.1.1	Physikalisch-technische Grundlagen	49
2.3.1.2	Wärmebilanz und Wärmestromdichte	51
2.3.1.3	Abschmelzen der Elektrode	54
2.3.1.4	Aufschmelzen des Grundwerkstoffes	58
2.3.1.5	Zusammenwirken von Abschmelzen und Aufschmelzen	62
2.3.2	Schweißflamme als Wärmequelle	63
2.3.2.1	Physikalisch-technische Grundlagen	63
2.3.2.2	Wärmebilanz und Wärmestromdichte	65
2.3.3	Widerstandserwärmung des Schweißpunkts	67
2.4	Wärmewirkung auf Wärmeeinflußzone	69
2.4.1	Gefügeänderung in Wärmeeinflußzone	69
2.4.2	Abkühlgeschwindigkeit, Abkühlzeit, Verweilzeit beim Einlagenschweißen	75
2.4.3	Temperaturablauf beim Mehrlagenschweißen	83
3	Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen	86
3.1	Grundlagen	86
3.1.1	Ausgangsbasis Temperaturfeld	86
3.1.2	Elastisches Wärmespannungsfeld	87
3.1.3	Elastoplastisches Wärmespannungsfeld	90
3.1.4	Grundgleichungen der Thermomechanik	91
3.1.5	Thermomechanische Werkstoffkennwerte	94
3.2	Finit-Element-Modelle	101
3.2.1	Intelligente Lösung	101
3.2.2	Stabelementmodell	103
3.2.3	Ringelementmodell	110
3.2.4	Scheibenelementmodell in Plattenebene	119
3.2.5	Scheibenelementmodell quer zur Plattenebene	123
3.3	Schrumpfkraft- und Eigenspannungsquellmodelle	127
3.3.1	Längsschrumpfkraftmodell	127

3.3.2	Querschrumpfkraftmodell	133
3.3.3	Anwendung auf Zylinder- und Kugelschale	137
3.3.4	Eigenspannungsquellmodell	140
3.4	Praxisrelevante Übersicht zu Schweißeigenspannungen	142
3.4.1	Allgemeine Aussagen	142
3.4.2	Nahtlängseigenspannungen	143
3.4.3	Nahtquereigenspannungen	146
3.4.4	Eigenspannungen nach Punktschweißen, Plattieren, Brennschneiden	149
3.5	Schweißverzug	151
3.5.1	Modellvereinfachungen	151
3.5.2	Querschrumpfung und Fugenquerbewegung	152
3.5.3	Längs- und Biegeschrumpfung	156
3.5.4	Winkelschrumpfung und Torsionsverzug	158
3.5.5	Verwerfung dünnwandiger geschweißter Bauteile	161
3.6	Eigenspannungs- und Verzugsmessung, Modellgesetze	165
3.6.1	Bedeutung von Versuch und Messung	165
3.6.2	Dehnungs- und Verschiebungsmessung während des Schweißens	165
3.6.3	Zerstörende Eigenspannungsmessung	167
3.6.3.1	Messung einachsiger Schweißeigenspannungen	168
3.6.3.2	Messung zweiachsiger Schweißeigenspannungen	169
3.6.3.3	Messung dreiachsiger Schweißeigenspannungen	175
3.6.4	Zerstörungsfreie Eigenspannungsmessung	177
3.6.5	Verzugsmessung	178
3.6.6	Modellgesetze	179
4	Verminderung von Schweißeigenspannungen und Schweißverzug	182
4.1	Notwendigkeit und Art der Maßnahmen	182
4.2	Konstruktive Maßnahmen	183
4.3	Werkstofftechnische Maßnahmen	187
4.3.1	Ausgangslage	187
4.3.2	Werkstoffkennwerte in den Feldgleichungen	187
4.3.3	Herkömmliche Betrachtung des Werkstoffeinflusses	188
4.3.4	Ableitung neuartiger Schweißignungszahlen	189
4.4	Fertigungstechnische Maßnahmen	191
4.4.1	Ausgangslage	191
4.4.2	Maßnahmen vor und während des Schweißens	192
4.4.2.1	Übersicht	192
4.4.2.2	Allgemeine Maßnahmen	193
4.4.2.3	Nahtspezifische Maßnahmen	193
4.4.2.4	Thermische Maßnahmen	196
4.4.2.5	Mechanische Maßnahmen	197
4.4.2.6	Anwendungsbeispiele	199
4.4.3	Maßnahmen nach dem Schweißen	203

4.4.3.1	Übersicht	203
4.4.3.2	Warmentspannen (Spannungsarmglühen)	204
4.4.3.2.1	Praxis des Warmentspannens und Regelwerk	204
4.4.3.2.2	Spannungsrelaxationsversuche	206
4.4.3.2.3	Gefügeänderung beim Warmentspannen	211
4.4.3.2.4	Gleichwertigkeit von Glühtemperatur und Glühzeit	212
4.4.3.2.5	Kriechgesetz und Kriechtheorien zum Warmentspannen	214
4.4.3.2.6	Berechnungsbeispiele zum Warmentspannen	217
4.4.3.3	Kaltentspannen (Kaltrecken, Flamm- und Vibrationsentspannen)	221
4.4.3.3.1	Stabelementmodelle für Kaltrecken	221
4.4.3.3.2	Kerb- und Rißmechanik beim Kaltrecken	225
4.4.3.3.3	Praxis des Kaltreckens	227
4.4.3.3.4	Flammmentspannen	231
4.4.3.3.5	Vibrationsentspannen	233
4.4.3.4	Hämmern, Walzen, Preß- und Wärmepunkten	234
4.4.3.5	Warm-, Kalt- und Flammrichten	236
5	Festigkeitsauswirkungen des Schweißens (Übersicht)	240
	Literaturverzeichnis	246
	Sachverzeichnis	260