

# WERKSTOFFKUNDLICHE GRUNDLAGEN DES SCHWEISSENS

**H. GRANJON**

**Ehren-Direktor der Ecole Supérieure du Soudage et de ses Applications,  
Institut de Soudure, Paris**

Deutsche Übertragung

H. Cerjak

unter Mitwirkung von P. Štular und G. Cerjak

und

**Anhang**

**Berechnung schweißtechnischer Kenndaten mit dem Softwarepaket WEZ-Kalkulator  
von B. Buchmayr**

**H. CERJAK**

**Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS-Verlag, Düsseldorf**

---

durch zugelassene Rechte der Publications de la Soudure Autogène, Paris und  
Zveza društev za varilno tehniko Slovenije, Ljubljana

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>KAPITEL I: WERKSTOFFKUNDLICHE UND METALLURGISCHE GRUNDLAGEN SOWIE ALLGEMEINE KENNZEICHEN DES SCHWEISSPROZESSES</b>		<b>1</b>
1	Definition des Schweißens: Einteilung der Schweißverfahren	1
1.1	Definition der metallischen Kontinuität	1
1.2	Mechanismen, die 'metallische Kontinuität' erzeugen	2
1.3	Randbedingungen zur Herstellung der 'metallischen Kontinuität': Grundzüge einer Einteilung	6
1.4	Einteilung nach der Art der Energieübertragung auf die Berührungsfläche	7
1.5	Dem Schweißen verwandte Verfahren	11
2	Allgemeine Kennzeichen der Schweißverfahren	12
2.1	Vergleich mit anderen Verfahren	12
2.2	Thermischer Einfluß	13
2.3	Chemischer Einfluß	15
2.4	Thermomechanischer Einfluß	16
2.5	Konstruktiver Einfluß	17
3	Allgemeine Schlußfolgerung: Was versteht man unter Werkstoffkunde und Metallurgie des Schweißens?	17
<b>KAPITEL II: DIE THERMISCHE UND THERMOMECHANISCHE WIRKUNG DES SCHWEISSENS</b>		<b>20</b>
1	Bedeutung der Wärmeeinwirkung des Schweißens	20
2	Ziel der Untersuchung - verwendete Untersuchungsverfahren	21
3	Temperaturzyklus und Temperaturverteilung, allgemeine Kennzeichen	25
3.1	Der Begriff des "quasi-stationären" Zustandes (Schweißen mit beweglicher Wärmequelle)	25
3.2	Temperaturzyklus beim Schweißen: Temperatur-Zeit-Kurven	27
3.3	Temperaturverteilung: Abstand-Temperatur-Kurven, "Thermischer Körper"	29
3.4	Schweißen ohne Bewegung der Wärmequelle	31
4	Einflüsse auf den Temperatur-Zeit-Zyklus und die Temperaturverteilung	31
4.1	Einfluß des Grundwerkstoffs	31
4.2	Einfluß der Schweißbedingungen: Energie, Umgebung	37
4.3	Wiederholung: Mathematische Formulierung	39
4.4	Mehrlagenschweißungen	40
5	Besonderheiten der wichtigsten Schweißverfahren und des thermischen Schneidens	43
5.1	Gasschweißen	43
5.2	Lichtbogenschweißen	44
5.3	Elektroschlackeschweißen	46
5.4	Elektronenstrahl- und Laserstrahlschweißen	47
5.5	Widerstandspunktschweißen	49
5.6	Thermisches Schneiden	50
6	Durch Schweißen verursachter Verzug und Eigenspannungen	51
6.1	Mechanismus	51
6.2	Mögliche Auswirkungen von Verzug und Eigenspannungen	55
6.3	Abbau von Eigenspannungen	56
6.4	Lamellenbruch	57
6.4.1	Beschreibung des Phänomens	57
6.4.2	Einflußgrößen auf den Lamellenbruch	58

<b>KAPITEL III: DIE METALLOGRAPHISCHE UNTERSUCHUNG VON SCHWEISSVERBINDUNGEN, EINFÜHRUNG</b>		<b>63</b>
1	Besonderheiten der metallographischen Untersuchung von Schweißverbindungen	63
1.1	Allgemeines	63
1.2	Probennahme und Präparationstechniken	65
2	Möglichkeiten der makroskopischen Untersuchungen	66
2.1	Makroskopisches Aussehen einer Schweißverbindung, Definitionen	66
2.1.1	Schweißgut (aufgeschmolzener Bereich)	66
2.1.2	Übergangszone	67
2.1.3	Wärmeeinflußzone (WEZ)	67
2.1.4	Grundwerkstoff	68
2.1.5	Sonderfälle	68
2.2	Beschreibung von makroskopischen Untersuchungen von Schweißverbindungen aus Stahl	68
2.2.1	Typische Fehler	68
2.2.2	Makroskopische Beurteilung	69
2.2.3	Abschätzung des Aufmischungsgrades	70
2.2.4	Wärmebehandlungen vor, während oder nach der Schweißung	71
2.3	Anmerkungen über die unterschiedlichen Anwendungen der makroskopischen Untersuchung	73
3	Ergänzungen zur mikroskopischen Untersuchung	73
4	Schlußfolgerungen	74
<b>KAPITEL IV: HERSTELLUNG DES SCHWEISSGUTES</b>		<b>76</b>
1	Die Entstehung der chemischen Zusammensetzung des Schweißgutes (Zusammenfassung)	76
2	Physikalisch-chemisches Verhalten der anwesenden Elemente	76
2.1	Verdampfung von Elementen	76
2.2	Chemische Reaktionen in flüssigem Zustand	79
2.2.1.	Unberuhigte Stähle - Beruhigte Stähle, Einfluß des Schweißens	80
2.2.2	Beruhigung des Schmelzschweißbades, Konsequenzen	82
3	Einfluß der umgebenden Gasatmosphäre	83
3.1	Notwendigkeit eines Schutzes beim Schweißen an Luft	83
3.2	Chemische Wirkung aktiver Gase beim Schweißen von Stahl	85
3.3	Einfluß auf den Schweißprozeß	85
3.4	Normen für Schutzgase und Drahtelektroden	85
4	Die Wirkung des Wasserstoffs	86
4.1	Herkunft und Entstehung des Wasserstoffs	86
4.2.	Folgen für die Stahlschweißung	89
4.3	Einfluß des Wasserstoffs beim Schweißen von Nichteisenmetallen	93
5	Einfluß der "flüssigen Umgebung": Elektrodenumhüllungen und Schweißpulver	94
5.1	Allgemeines	94
5.2	Normen für umhüllte Elektroden und Schweißpulver	94
5.2.1	Elektrodenumhüllungen	94
5.2.2	Fülldrähte	96
5.2.3	UP-Schweißpulver	96
6	Einfluß der "festen Umgebung": Aufmischung und ihre Folgen	97
6.1	Aufmischung	97
6.2	Eigenschaften des Schweißguts - Schweißbeignung	98
6.3	Spezifikation für Zusatzwerkstoffe	98
6.4	Mischschweißverbindungen (Beispiel: Schweißungen mit Chrom-Nickel-Stählen)	99
7	Veränderungen der chemischen Zusammensetzung im Bereich der Übergangszone	103

<b>KAPITEL V: ERSTARRUNG DES SCHWEISSGUTS</b>		<b>108</b>
1	Besonderheiten der Erstarrung	108
2	Vorgänge im Schmelzbad	109
2.1	Allgemeiner Fall	109
2.2	Sonderfälle: Elektronenstrahlschweißen, Punktschweißen	111
3	Kristallographie der Erstarrung	113
3.1	Ausrichtung der Kristalle in der Übergangszone: Epitaxie	113
3.2	Erstarrungsrichtung - Erstarrungsgeschwindigkeit	114
3.3	Anwendungsmöglichkeiten aufgrund der makroskopischen Ausbildung des Schweißguts	117
3.4	Einfluß der Umwandlungen in festem Zustand	120
4	Physikalische Chemie der Erstarrung	122
4.1	Seigerungen	122
4.2	Andere Ursachen von Heterogenitäten	125
5	Praktische Schlußfolgerungen	126
5.1	Porenbildung durch Gasausscheidung	126
5.2	Heißrißbildung im Schweißgut	128
5.3	Mechanische Eigenschaften des Schweißgutes	131
<b>KAPITEL VI: UMWANDLUNGEN IN FESTEM ZUSTAND WÄHREND DES SCHWEISSENS (ERWÄRMUNG)</b>		<b>135</b>
1	Allgemeines	135
2	Gefügeveränderungen	136
2.1	Rekristallisation nach einer Kaltverformung	136
2.2	Gleichzeitige Verformung und Rekristallisation	142
2.3	Überhitzung	143
2.4	Einformung	145
3	Veränderung der Gefügeanteile	145
3.1	Aufhebung des Ungleichgewichtszustandes, Wiederherstellung einer festen Lösung	145
3.1.1	Art der Erscheinung	145
3.1.2	Nichtrostende austenitische Chrom-Nickel-Stähle	146
3.1.3	Aushärtbare Aluminiumlegierungen	147
3.1.4	Alterung eines weichen Stahls	148
3.1.5	Anlaßeffekte	149
3.2	Allotrope Umwandlung von Stahl	151
4	Übergangszone	154
<b>KAPITEL VII: UMWANDLUNGEN IN FESTEM ZUSTAND WÄHREND DES SCHWEISSENS (ABKÜHLUNG)</b>		<b>157</b>
1	Allgemeines	157
2	Zweiphasige Legierungen ohne allotrope Umwandlung	157
2.1	Einstellung des Gleichgewichtszustandes	157
2.2	Ausscheidungshärtung (Härtung durch eine zweite Phase)	158
3	Die allotrope Umwandlung bei Stahl	160
3.1	Allgemeines, Untersuchungsmethoden	160
3.2	Besonderheiten der perlitischen Umwandlung beim Schweißen	163
3.2.1	Einlagenschweißung	163
3.2.2	Mehrlagenschweißungen	165
3.3	Besonderheiten der martensitischen Umwandlung beim Schweißen	166
3.3.1	Zeitlicher Ablauf und Topographie der Umwandlungen	166

3.3.2	Härte, Sprödigkeit und Versprödung, Eigenspannungen	167
3.3.3	Anlaßeffekte bei der Wärmebehandlung nach dem Schweißen	169

KAPITEL VIII: AUFHÄRTUNG UND KALTRISSBILDUNG BEIM SCHWEISSEN VON STAHL 171

1	Einleitung	171
2	Faktoren, die das Aufhärten beim Schweißen beeinflussen	171
2.1	Stahlsorte - Begriff des Kohlenstoffäquivalents	171
2.2.	Temperaturzyklus beim Schweißen	173
2.2.1	Masse der Werkstücke	173
2.2.2	Energieeinbringung beim Schweißen (Streckenenergie)	174
2.2.3	Vorwärmung	175
2.2.4	Nachwärmung	176
3	Folgen der Aufhärtung beim Schweißen	177
3.1	Aufhärtung, maximal zulässige Unternahthärte	177
3.2	Sprödigkeit - Wasserstoffversprödung	178
3.3	Verhalten bei Ermüdung	179
4	Risiken im Zusammenhang mit der Aufhärtung: Kaltrissbildung	179
4.1	Beschreibung des Phänomens	179
4.1.1	Risse in der Wärmeeinflußzone	180
4.1.2	Risse in der Übergangszone	180
4.1.3	Risse im Schweißgut	180
4.1.4	Mehrlagenschweißungen	181
4.2	Nachweis von Kaltrissen	181
4.3	Kaltriss-Prüfverfahren	183
4.4	Praktische Schlußfolgerungen - Vorsichtsmaßnahmen	186
5	Entwicklung von Stählen für geschweißte Konstruktionen unter Berücksichtigung ihrer Schweißbeignung	188
5.1	Problemstellung	188
5.2	Entwicklung der chemischen Zusammensetzung	189
5.3	Lieferzustand der Werkstoffe	190
5.3.1	Kontrolliertes Walzen	190
5.3.2	Vergütung	191
5.3.3	Zweiphasige Stähle oder Stähle mit reduziertem Perlitanteil	192
5.4.4	Wirkung von Zusatzwerkstoffen	192

KAPITEL IX: DIE WÄRMEBEHANDLUNG VON STAHLSCHEISSVERBINDUNGEN 195

1	Zweck und Durchführung von Wärmebehandlungen	195
1.1	Einteilung nach dem Zweck der Wärmebehandlungen	195
1.2	Arten der Wärmebehandlungen	197
2	Spannungsarmglühen und/oder Anlassen	198
2.1	Zweck	198
2.2	Mechanismus des Spannungsabbaus	198
2.3	Werkstoffkundliche Auswirkungen der Wärmebehandlung	200
2.4	Wiedererwärmungsrisse (Relaxationsrisse)	201
2.5	Spannungsarmglühung vor oder nach der Abkühlung	203
3	Wärmebehandlung mit Austenitisierung	204
3.1	Glühen und Normalisieren	204
3.2	Punktschweißen	205
3.3	Interkritische Wärmebehandlung	206
3.4	Vergüten (Härten und Anlassen) von geschweißten Bauteilen	207

KAPITEL X: WERKSTOFFKUNDLICHE UND METALLURGISCHE GESICHTSPUNKTE DER ZERSTÖRENDE UND ZERSTÖRUNGSFREIEN PRÜFUNGEN VON SCHWEISSVERBINDUNGEN 209

1	Allgemeines	209
2	Zerstörende Prüfungen	210
2.1	Zugversuche	210
2.2	Biegeversuche	211
2.3	Kerbschlagzähigkeitsprüfung	213
2.4	Bedeutung der Bruchmechanik	214
2.5	Prüfung von Punktschweißverbindungen	216
3	Zerstörungsfreie Prüfungen	219

ANHANG: BERECHNUNG SCHWEISSTECHNISCHER KENNDATEN MIT DEM SOFTWAREPAKET "WEZ-KALKULATOR" VON B. BUCHMAYR

1.	Einleitung	225
1.1.	Datenbanken	226
1.2.	Empirische Ansätze	226
1.3.	Expertensysteme	226
1.4.	Mathematisches Modellieren	227
1.5.	Das Softwarepaket "WEZ-Kalkulator" von B. Buchmayr	227
2.	"WEZ-Kalkulator, Version G". Allgemeine Beschreibung und Benutzungshinweise	228
2.1.	Hardwareanforderungen	228
2.2.	Programmstart und Programmende	228
2.3.	Dateneingabe	229
2.3.1.	Grundwerkstoff	229
2.3.2.	Schweißgut	229
2.3.3.	Datenübergabe in das Hauptmenü	230
2.4.	Informationen zu den Programmpunkten	231
2.5.	Ausdruck von Text und graphischen Darstellungen	232
2.6.	Allgemeine Beschreibung der Originalversion des Softwarepakets "WEZ-Kalkulator"	232
3.	Berechnung schweißtechnischer Kenndaten, Anwendungsbeispiele	232
3.1.	Berechnung der Wärmeeinwirkung des Schweißens, Temperaturzyklus $t_{g/s}$ , Menüpunkt [4]	232
3.1.1.	Berechnung des Zeit-Temperatur-Verlaufs bei einer E-Hand-Schweißung	233
3.1.1.1.	Dateneingabe	233
3.1.1.2.	Berechnung der Kennwerte	233
3.1.1.3.	Graphische Darstellung der Zeit-Temperatur-Kurve (E-Hand-Schweißung)	236
3.1.2.	Einfluß der Streckenenergie auf den Zeit-Temperatur-Verlauf	237
3.1.2.1.	Berechnung des Zeit-Temperatur-Verlaufes	237
3.1.2.2.	Graphische Darstellung der Zeit-Temperatur-Kurve (UP-Schweißung)	237
3.1.3.	Einfluß der Nahtart	240
3.1.4.	Einfluß des Schweißverfahrens auf die Abkühlgeschwindigkeit $t_{g/s}$	241
3.1.5.	Einfluß der Wanddicke auf die Abkühlzeit $t_{g/s}$	241
3.1.6.	Einfluß der Vorwärmtemperatur (Arbeitstemperatur)	242
3.1.7.	Schlußfolgerungen	243
3.2.	Berechnung der Gefügeausbildung in der Wärmeeinflußzone, "Schweiß-ZTU-Schaubild", Menüpunkt [10]	244
3.2.1.	Berechnung der Gefügemengen in der WEZ eines Stahls St 52-3	244
3.2.2.	Einfluß der Schwankungen der chemischen Analyse innerhalb eines Werkstofftyps (Beispiel St 52-3)	245

3.2.3.	Schlußfolgerungen	246
3.3.	<i>WEZ-Härteverlauf, Menüpunkt [8]</i>	247
3.3.1.	Allgemeines	247
3.3.2.	WEZ-Härteverlauf für einen Werkstoff St 52-3	248
3.3.3.	Einfluß des C-Gehalts auf den Härteverlauf	249
3.3.4.	Einfluß der Abkühlzeit $t_{8/5}$ auf die WEZ-Härte	249
3.3.5.	Einfluß der Legierungselemente auf die WEZ-Härte	250
3.3.6.	WEZ-Härte hochfester Stähle, Vergleich Feinkombustähle - TM-Stähle	251
3.3.7.	Schlußfolgerungen	253
3.4.	<i>Kohlenstoffäquivalent, Menüpunkt [11]</i>	254
3.4.1.	Allgemeines	254
3.4.2.	Berechnung der Kohlenstoff-Äquivalente	254
3.4.3.	Schlußfolgerungen	254
3.5.	<i>Berechnung der Vorwärmtemperaturen, Menüpunkt (12)</i>	255
3.5.1.	Allgemeines	255
3.5.2.	Beispiel der Berechnung der Vorwärmtemperatur nach Ito und Bessyo, Menüpunkt [12]	256
3.5.3.	Einfluß des Wasserstoffgehalts des Schweißguts	257
3.5.4.	Einfluß der chemischen Analyse	258
3.5.5.	Schlußfolgerungen	258
3.6.	<i>Schaeffler-Diagramm, Menüpunkt [42]</i>	259
3.6.1.	Allgemeines	259
3.6.2.	Beispiele für austenitisches Schweißgut	259
3.6.3.	Schlußfolgerungen	261
3.7.	<i>Aufmischung, Menüpunkt [46]</i>	261
3.7.1.	Allgemeines	261
3.7.2.	Berechnung der Aufmischung bei einer Auftragschweißung mit niedriglegiertem Schweißgut	261
3.7.3.	Austenitische Auftragschweißung auf einen Grundwerkstoff 10 CrMo 9 10	263
3.7.3.1.	Schweißgut Typ 1.4551	263
3.7.3.2.	Überlegiertes Schweißgut Typ Cr Ni 24 13 Nb	
3.7.4.	Schlußfolgerungen	266
	Sachverzeichnis	267
	Verzeichnis der Europäischen Normen der Schweißtechnik (Stand: April 1993)	275