

Schuster

Schweißen von Eisen-, Stahl- und Nickelwerkstoffen

**Leitfaden für die
schweißmetallurgische Praxis**

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1	Erzeugung der Stähle	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Eisenverhüttung	2
1.2.1	Vorbereitung der Hochofeneinsatzstoffe	2
1.2.2	Hochofenprozess	3
1.2.3	Direkt- und Schmelzreduktionsverfahren	4
1.2.3.1	Direktreduktionsverfahren	4
1.2.3.2	Schmelzreduktionsverfahren	4
1.2.4	Stahlraffination	5
1.2.5	Sekundärmetallurgie	7
1.3	Vergießen von Stahl	8
1.4	Walzprozess	10
1.4.1	Allgemeines	10
1.4.2	Herstellung von Grobblechen	11
1.4.3	Herstellung von Warmband	13
1.4.4	Herstellung von Kaltband	14
1.4.5	Herstellung von Formstahl	15
1.4.6	Herstellung von Stäben und Drähten	15
1.5	Rohrherstellung	16
1.5.1	Herstellung nahtloser Rohre	16
1.5.2	Herstellung geschweißter Rohre	16
1.6	Literaturhinweise	16
2	Baustähle	18
2.1	Allgemeines	18
2.2	Unlegierte Baustähle	20
2.2.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	20
2.2.2	Schweißtechnische Verarbeitung der unlegierten Stähle	22
2.2.3	Mischverbindungen mit unlegierten Baustählen	25
2.2.4	Literaturhinweise	26
2.3	Feinkornbaustähle	27
2.3.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	27
2.3.2	Schweißtechnische Verarbeitung der Feinkornbaustähle	30
2.3.3	Mischverbindungen mit hochfesten Feinkornbaustählen	34
2.3.4	Literaturhinweise	35
2.4	Wetterfeste Baustähle	35
2.4.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	35
2.4.2	Schweißen der wetterfesten Baustähle	38
2.4.3	Mischverbindungen mit wetterfesten Baustählen	39
2.4.4	Literaturhinweise	39
3	Betonstahl	41
3.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	41
3.2	Schweißtechnische Verarbeitung von Betonstählen	45
3.3	Literaturhinweise	46

4	Druckbehälterstähle	47
4.1	Warmfeste (und druckwasserstoffbeständige) Druckbehälterstähle	47
4.1.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	47
4.1.2	Schweißen der warmfesten (und druckwasserstoffbeständigen) Druckbehälterstähle	51
4.1.3	Mischverbindungen mit warmfesten Stählen	54
4.1.4	Literaturhinweise	55
4.2	Kaltzähe Druckbehälterstähle	55
4.2.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	55
4.2.2	Schweißtechnische Verarbeitung der kaltzähen Druckbehälterstähle	57
4.2.3	Mischverbindungen mit kaltzähen Druckbehälterstählen	60
4.2.4	Literaturhinweise	61
5	Verschleißbeständige Stähle	62
5.1	Sonderbaustähle mit erhöhtem Verschleißwiderstand	62
5.1.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	62
5.1.2	Schweißtechnische Verarbeitung verschleißfester Sonderbaustähle	63
5.1.3	Literaturhinweise	68
5.2	Hartmanganstahl	68
5.2.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	68
5.2.2	Schweißtechnische Verarbeitung von Hartmanganstahl	69
5.2.3	Mischverbindungen mit Hartmanganstählen	70
5.2.4	Literaturhinweise	71
6	Gusswerkstoffe	72
6.1	Stahlguss	72
6.1.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	72
6.1.2	Schweißen von Stahlguss	72
6.1.3	Literaturhinweise	72
6.2	Gusseisen	73
6.2.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	73
6.2.2	Schweißen von Gusseisen	79
6.2.3	Mischverbindungen mit Gusseisen	83
6.2.4	Literaturhinweise	83
7	Chromstähle	84
7.1	Ferritischer Chromstahl	84
7.1.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	84
7.1.2	Schweißtechnische Verarbeitung der ferritischen Chromstähle	85
7.2	Martensitischer Chromstahl	87
7.2.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	87
7.2.2	Schweißtechnische Verarbeitung der martensitischen Chromstähle	88
7.3	Weichmartensitische Chrom-Nickel-Stähle	89
7.3.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	89
7.3.2	Schweißtechnische Verarbeitung der weichmartensitischen Chrom-Nickel-Stähle ..	90
7.4	Hitzebeständiger Chromstahl	91
7.4.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	91
7.4.2	Schweißtechnische Verarbeitung der hitzebeständigen Chromstähle	92
7.5	Mischverbindungen mit Chromstählen	93
7.6	Literaturhinweise	93

8	Chrom-Nickel-(Molybdän-)Stähle	95
8.1	Austenitische Chrom-Nickel-(Molybdän-)Stähle	95
8.1.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	95
8.1.2	Schweißtechnische Verarbeitung der Chrom-Nickel-Stähle	97
8.2	Unstabilisierte austenitische Stähle	99
8.2.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	99
8.2.2	Schweißtechnische Verarbeitung	100
8.3	Stabilisierte austenitische Stähle	100
8.3.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	100
8.3.2	Schweißtechnische Verarbeitung	101
8.4	Austenitische Stähle mit erhöhtem Molybdäengehalt.....	102
8.4.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	102
8.4.2	Schweißtechnische Verarbeitung	103
8.5	Hitze- und zunderbeständige austenitische Stähle	103
8.5.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	103
8.5.2	Schweißtechnische Verarbeitung	105
8.6	Zweiphasige Chrom-Nickel-Stähle (Duplexstähle)	105
8.6.1	Werkstoffübersicht – Grundwerkstoffe	105
8.6.2	Schweißtechnische Verarbeitung	108
8.7	Mischverbindungen mit Chrom-Nickel-(Molybdän-)Stählen	110
8.8	Literaturhinweise	112
9	Schweißtechnische Verarbeitung artfremder Stähle	113
9.1	Allgemeine Hinweise	113
9.2	Schweißtechnische Verarbeitung, Anforderungen an Mischverbindungen	114
9.2.1	Anforderungen an Mischverbindungen	115
9.2.2	Schweißtechnische Hinweise	117
9.2.3	Anforderungen an Schweißzusatzwerkstoffe für Mischverbindungen	118
9.3	Vermischung beim artfremden Schweißen	118
9.4	Literaturhinweise	125
10	Stahlgüte und Güteauswahl	126
10.1	Auswahl der Stahlsorten im Hinblick auf die Bruchzähigkeit	126
10.2	Auswahl der Stahlsorten im Hinblick auf ihre Eigenschaften in Dickenrichtung	128
10.3	Weitere Güteeigenschaften	130
10.3.1	Rissauffangvermögen der Wärmeeinflusszone	130
10.3.2	Kaltumformbarkeit	133
10.4	Literaturhinweise	134
11	Nickel und Nickellegierungen	136
11.1	Allgemeines	136
11.2	Werkstoffkundliche Grundlagen	137
11.2.1	Erzeugung von Nickel	137
11.2.2	Physikalische Eigenschaften	138
11.2.3	Chemische Eigenschaften und Korrosionsverhalten	140
11.3	Nickel und Nickellegierungen	141
11.3.1	Reinnickel	141
11.3.2	Nickellegierungen	142
11.3.2.1	Übersicht der Nickellegierungen	142

11.3.2.2	Nickel-Kupfer-Legierungen	143
11.3.2.3	Nickel-Eisen-(Eisen-Nickel-)Legierungen	144
11.3.2.4	Nickel-Chrom-(Eisen-)Legierungen	144
11.3.2.5	Nickel-Chrom-(Kobalt-)Legierungen	144
11.3.2.6	Nickel-(Chrom-)Molybdän-Legierungen	144
11.3.2.7	Eigenschaften ausgewählter Nickellegierungen	145
11.3.2.8	Chemische Zusammensetzung wichtiger Nickellegierungen nach ISO 9722	146
11.3.2.9	Art der Legierungsbildung ausgewählter Nickellegierungen	148
11.4	Schweißtechnische Verarbeitung	149
11.4.1	Grundregeln	149
11.4.2	Besonderheiten beim Schweißen von Nickel und Nickellegierungen	150
11.4.3	Porenbildung in Schweißverbindungen aus Nickellegierungen	150
11.4.4	Vorbereitung zum Schweißen	151
11.4.4.1	Wärmebehandlung und Wärmebehandlungszustand	151
11.4.4.2	Nahtvorbereitung beim Schweißen von Nickel und Nickellegierungen	151
11.4.5	Schweißtechnische Hinweise	152
11.4.5.1	Lichtbogenhandschweißen	152
11.4.5.2	WIG-Schweißen	152
11.4.5.3	MIG-/MAG-Schweißen	153
11.4.5.4	UP-Schweißen	153
11.4.6	Schweißen plattierter Werkstoffe	153
11.4.7	Hemdauskleidung (Wallpapering)	154
11.5	Normung von Nickel und Nickellegierungen	155
11.5.1	Allgemeines	155
11.5.2	DIN-Normen für Nickel und Nickellegierungen	155
11.5.3	ISO-Normen für Nickel und Nickellegierungen	156
11.6	Mischverbindungen mit Nickellegierungen	157
11.7	Literaturhinweise	158
12	Übersicht zu ausgewählten schweißmetallurgischen Problemen	160
12.1	Verhalten der Stähle beim Schweißen	160
12.1.1	Begriff der Schweißbarkeit	160
12.1.2	Gefügebau einer Schweißverbindung	161
12.1.3	Erstarrung von Schweißverbindungen	164
12.1.4	Literaturhinweise	166
12.2	Korrosion von metallischen Werkstoffen	167
12.2.1	Vorbetrachtungen	167
12.2.2	Allgemeiner Grundvorgang der Korrosion	168
12.2.3	Grundvorgang der chemischen Korrosion	168
12.2.4	Grundvorgang der elektrolytischen Korrosion	169
12.2.5	Übersicht zu ausgewählten Korrosionsarten	169
12.2.6	Übersicht zu wichtigen Korrosionsprodukten	171
12.2.7	Ausgewählte Probleme zu speziellen Korrosionsarten	172
12.2.7.1	Gleichmäßige Flächenkorrosion (Rost)	172
12.2.7.2	Interkristalline Korrosion (IK)	173
12.2.7.3	Messerschnittkorrosion (MsK)	174
12.2.7.4	Spannungsrissskorrosion (SpK)	175
12.2.7.5	Lochkorrosion (LK)	177
12.2.7.6	Spaltkorrosion (SK)	179
12.2.7.7	Bimetallkorrosion (BK)	180

12.2.7.8	Spongiose	182
12.2.8	Maßnahmen zur Beseitigung bzw. Verminderung der Korrosionsgefahr	182
12.2.9	Untersuchung von Korrosionsvorgängen	184
12.2.10	Literaturhinweise	185
12.3	Werkstoffbedingte Schweißfehler	186
12.3.1	Kaltrisse	186
12.3.1.1	Definition des Begriffes „Kaltriss“	186
12.3.1.2	Einflussgrößen auf die Kaltrissbildung	187
12.3.1.3	Aufhärtungsrisse	187
12.3.1.4	Wasserstoffinduzierte Risse	188
12.3.1.5	Lamellarrissigkeit, Terrassenbruch	190
12.3.1.6	Allgemeingültige Maßnahmen zur Vermeidung von Kaltrissen	191
12.3.1.7	Kaltrissprüfung	192
12.3.1.7.1	Allgemeines zur Kaltrissprüfung	192
12.3.1.7.2	Selbstbeanspruchte Kaltrissprüfung	193
12.3.1.7.3	Fremdbeanspruchte Kaltrissprüfung	193
12.3.2	Heißrisse	194
12.3.2.1	Definition des Begriffes „Heißriss“	194
12.3.2.2	Voraussetzungen für die Heißrissbildung	194
12.3.2.3	Mechanismus der Heißrissbildung	195
12.3.2.4	Erstarrungsrisse (solidification cracks)	196
12.3.2.5	Wiederaufschmelzrisse (liquation cracks)	197
12.3.2.6	Risse durch Verformbarkeitsabfall (DDC)	197
12.3.2.7	Den Heißrissen zuordenbare Risserscheinungen	198
12.3.2.8	Möglichkeiten zur Heißrissvermeidung	200
12.3.2.8.1	Metallurgische Möglichkeiten	200
12.3.2.8.2	Technologische Möglichkeiten	201
12.3.2.9	Heißrissbildung und Deltaferrit	201
12.3.2.10	Heißrissprüfung	202
12.3.2.10.1	Selbstbeanspruchte Heißrissprüfverfahren	202
12.3.2.10.2	Fremdbeanspruchte Heißrissprüfverfahren	203
12.2.3	Hohlräume	204
12.3.3.1	Definition des Begriffes „Hohlraum“	204
12.3.3.2	Lunker	204
12.3.3.3	Poren	205
12.3.3.4	Einschlüsse	206
12.4	Deltaferrit in Schweißverbindungen hochlegierter Stähle	207
12.4.1	Allgemeines	207
12.4.2	Wirkungen des Deltaferrits in austenitischen Stählen und Schweißgütern	207
12.4.3	Bildungsmechanismus und Morphologie des Ferrits in Chrom-Nickel-Stählen	209
12.4.4	Bestimmung von Ferrit	211
12.4.4.1	Zum Problem der Ferritmessung	211
12.4.4.2	Ferritzahl-System	211
12.4.4.3	Zustandsdiagramme	213
12.4.4.4	Ferritzahlmessung	214
12.4.5	Wirkungen der Schweißbedingungen auf den Ferritanteil im Schweißgut	214
12.4.6	Wirkungen von Wärmebehandlungen auf den Ferritanteil im Schweißgut	216
12.4.7	Spezifikation von Ferrit	217
12.4.7.1	Allgemeines	217
12.4.7.2	Ferritfreies oder -armes Schweißgut (FN 0 bis FN 0,5)	218

12.4.7.2.1	Ferritanteil < FN 0,1	218
12.4.7.2.2	Ferritanteil < FN 0,5	218
12.4.7.3	Schweißgut mit niedrigen bis mittleren Ferritanteilen (FN 3 bis FN 15)	219
12.4.7.4	Schweißgut mit hohem Ferritanteil (> FN 15)	219
12.4.8	Einflüsse auf den gemessenen Ferritanteil	220
12.5	Literaturhinweise	220
12.6	„Alte“ Stähle und deren Schweißbeignung	222
12.6.1	Allgemeines	222
12.6.2	Besonderheiten nicht mehr gebräuchlicher Stahlherstellungsverfahren	222
12.6.3	Empfohlene Werkstoffprüfungen zur Bewertung der Schweißbeignung	225
12.7	Literaturhinweise	227
13	Hinweise zur Wärmebehandlung von Stählen und Schweißverbindungen	229
13.1	Wärmebehandlungstechnische Begriffe	229
13.2	Empfehlungen zum Vorwärmen von Schweißverbindungen	231
13.2.1	Allgemeines	231
13.2.2	Vorwärmung von Stählen der Festigkeitsklasse S355 (St 52) nach DVS 1703	232
13.2.3	Vorwärmung von Feinkornbaustählen nach SEW 088 ($t_{8/5}$ -Konzept)	233
13.2.4	Vorwärmung beim Lichtbogenhandschweißen (Tabelle von MROSKO)	234
13.3	Wärmebehandlung von Grundwerkstoffen	236
13.3.1	Normalglühen (Normalisieren)	236
13.3.2	Grobkornglühen	237
13.3.3	Weichglühen	238
13.3.4	Perlitglühen	239
13.3.5	Spannungsarmglühen	239
13.3.6	Diffusionsglühen	241
13.3.7	Härten und Anlassen	242
13.3.8	Vergüten	244
13.3.9	Praktische Hinweise für die Wärmebehandlung von Grundwerkstoffen	244
13.3.9.1	Abschätzen der Höhe der Glühetemperatur	244
13.3.9.2	Richtwerte für das Aufheizen und Abkühlen von Stahlwerkstoffen	245
13.3.9.3	Aufheizgeschwindigkeit von Stahlguss	245
13.3.9.4	Haltezeit beim Spannungsarm- bzw. Normalglühen	245
13.3.9.5	Zeitwerte für die Wärmebehandlung von Schweißkonstruktionen	245
13.3.10	Übersicht zu ausgewählten Wärmebehandlungsprozessen	246
13.4	Literaturhinweise	247
14	Werkstoffprüfung, Werks- und Abnahmeprüfzeugnisse	248
14.1	Werkstoffprüfung	248
14.2	Werks- und Abnahmeprüfzeugnisse	250
14.3	Literaturhinweise	251
15	Europäische Normung von Stählen, Schweißzusätzen und Hilfsstoffen	252
15.1	Normung von Stählen	252
15.1.1	Allgemeines	252
15.1.2	Aufbau des Bezeichnungssystems	252
15.1.3	Definition und Einteilung der Stähle	253
15.1.4	Bezeichnung von Stahlwerkstoffen	254
15.1.4.1	Hauptsymbole	254
15.1.4.2	Zusatzsymbole	255

15.1.4.3	Bezeichnungsbeispiele für Stähle nach europäischer Normung	257
15.1.4.3.1	Bezeichnung entsprechend der mechanischen Eigenschaften	257
15.1.4.4	Bezeichnung entsprechend der chemischen Zusammensetzung	258
15.1.4.4.1	Nichtrostende (hochlegierte) Stähle	259
15.1.5	Literaturhinweise	260
15.2	Umstellung auf internationale Normen bei den Schweißzusätzen	261
15.3	Bezeichnung von umhüllten Stabelektroden für das Lichtbogenhandschweißen	262
15.3.1	Allgemeines	262
15.3.2	Grundaufbau einer Kurzbezeichnung für umhüllte Stabelektroden	263
15.3.2.1	Verbindlicher Teil	263
15.3.2.2	Nicht verbindlicher Teil	263
15.3.2.3	Bezeichnungen und Anforderungen	264
15.3.2.4	Bezeichnungsbeispiele	268
15.3.2.4.1	Bezeichnungsbeispiel nach ISO 2560-A (unlegiert)	268
15.3.2.4.2	Bezeichnungsbeispiel nach ISO/DIS 18275-A (EN 757) (hochfest)	268
15.3.2.4.3	Bezeichnungsbeispiel nach ISO 3580 (warmfest)	269
15.3.2.4.3	Bezeichnungsbeispiel nach EN 1600 (rostbeständig)	269
15.4	Bezeichnung von Drähten und Schweißgütern beim Schutzgasschweißen	269
15.4.1	Grundaufbau einer Schweißgutbezeichnung nach ISO 14341-A	269
15.4.2	Bezeichnungen und Anforderungen	270
15.4.3	Bezeichnungsbeispiel für Schweißgüter nach ISO 14341-A	272
15.4.3.1	Bezeichnung eines Schweißgutes	272
15.4.3.2	Drahtelektrode für das Schutzgasschweißen	272
15.5	Bezeichnung von Drähten und Schweißgütern beim Unterpulverschweißen	273
15.5.1	Grundaufbau einer Schweißgutbezeichnung nach ISO 14171-A	273
15.5.2	Bezeichnungen und Anforderungen	274
15.5.3	Bezeichnungsbeispiele für Schweißdrähte nach ISO 14171	277
15.5.3.1	Draht-Pulver-Kombination für das Mehrlagen-Unterpulverschweißen	277
15.5.3.2	Draht-Pulver-Kombination für das Lage-/Gegenlage-Unterpulverschweißen	277
15.5.3.3	Drahtelektrode zum Unterpulverschweißen	278
15.5.4	Bezeichnungsbeispiel für Schweißdrähte nach ISO 26304	278
15.5.4.1	Draht-Pulver-Kombination für das Unterpulverschweißen	278
15.5.4.2	Draht-Pulver-Kombination für das Unterpulverschweißen (wärmenachbehandelt)	278
15.6	Bezeichnung von Gasen zum Schutzgasschweißen und zum Schneiden	278
15.6.1	Einteilung der Schutzgase nach ISO 14175	278
15.6.2	Bezeichnungsbeispiele nach ISO 14175	279
15.7	Bezeichnung von Pulvern für das Unterpulverschweißen	280
15.7.1	Definition des Begriffes „Schweißpulver“	280
15.7.2	Grundaufbau einer Kurzbezeichnung für Schweißpulver	281
15.7.2.1	Verbindlicher Teil	281
15.7.2.2	Nicht verbindlicher Teil	281
15.7.2.3	Bezeichnungen und Anforderungen	282
15.7.2.4	Bezeichnungsbeispiel nach ISO/DIS 14174 (EN 760)	285
15.7.3	Beschreibung der Schweißpulvertypen nach ISO/DIS 14174 (EN 760)	285
15.7.3.1	Mangan-Silikat-Typ (MS)	285
15.7.3.2	Calcium-Silikat-Typ (CS)	286
15.7.3.3	Calcium-Magnesium-Oxid (CG)	286
15.7.3.4	Calcium-Magnesium-basische Oxide (CB)	286
15.7.3.5	Calcium-Magnesium-Oxide mit Eisen (CI)	287
15.7.3.6	Calcium-Magnesium-basische Oxide mit Eisen (IB)	287

15.7.3.7	Zirkon-Silikat-Typ (ZS)	287
15.7.3.8	Rutil-Silikat-Typ (RS)	287
15.7.3.9	Aluminat-Rutil-Typ (AR)	288
15.7.3.10	Aluminat-basischer Typ (AB)	288
15.7.3.11	Aluminat-Silikat-Typ (AS)	288
15.7.3.12	Aluminat-Fluorid-basischer Typ (AF)	289
15.7.3.13	Fluorid-basischer Typ (FB)	289
15.7.3.14	Typen mit anderen Zusammensetzungen (Z)	290
15.8	Literaturhinweise	290
16	Systematik der US-Normstähle	291
16.1	Allgemeines	291
16.2	UNS-System	291
17	Anhang	294
17.1	Glossar – Begriffsdefinitionen	294
17.2	Anschriften ausgewählter Zusatzwerkstoffhersteller	319
17.3	Werkstoffvergleich – Grundwerkstoffe	320
17.3.1	Unlegierte Baustähle	320
17.3.2	Feinkornbaustähle	321
17.3.3	Warmfeste Druckbehälterstähle	322
17.3.4	Kaltzähe Druckbehälterstähle	323
17.3.5	Druckwasserstoffbeständige Stähle	323
17.3.6	Wetterfeste Stähle	324
17.3.7	Chromstähle	324
17.3.7.1	Ferritische Chromstähle	324
17.3.7.2	Martensitische und ausscheidungshärtbare Chromstähle	325
17.3.8	Chrom-Nickel-Stähle	325
17.4	Sachwortverzeichnis	327