

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

<b>1</b>	<b>Einführung zum Schweißen und Schneiden unter Wasser</b> .....	1
	Schrifttum .....	3
<b>2</b>	<b>Einwicklung und Bedeutung der Unterwasser-Schweißtechnik</b> .....	5
2.1	Allgemeines .....	5
2.2	Schweißen in nasser Umgebung (nasse und halbnasse Verfahren) .....	6
2.3	Schweißen in hyperbar trockener Atmosphäre .....	11
	Schrifttum .....	15
<b>3</b>	<b>Entwicklung und Forschung am GKSS-Forschungszentrum Geesthacht (Bereich Unterwassertechnik des Instituts für Anlagentechnik)</b> .....	16
3.1	Institut für Anlagentechnik .....	16
3.2	GKSS-Tauchanlagen für technische Einsätze .....	17
3.2.1	Unterwasserlabor „Helgoland“ .....	17
3.2.2	GKSS-Unterwasserschweißhaus .....	19
3.2.3	GKSS-Unterwasser-Simulationsanlage (GUSI) – allgemeine Informationen .....	21
3.2.3.1	Beschreibung der einzelnen Systemkomponenten .....	24
3.2.3.1.1	Wohnbereich .....	24
	Wohn- und Rettungskammer A5 .....	24
	Medizinische Behandlungskammer A6 .....	26
	Zentralkammer A3 .....	27
3.2.3.1.2	Arbeitsbereich .....	29
	Nassversuchskammer A3u .....	29
	Hauptarbeits- und Versuchskammer A1 .....	30
3.2.3.2	Hochdruckorientierungskammer A8 .....	34
3.2.3.3	30-bar-Schweißversuchskammer .....	35
3.2.3.4	Hochdruckorientierungskammer D10 .....	36
3.2.3.5	Kammer-Beschickungswagen .....	37
3.2.3.6	Tauchbecken .....	38
3.3	Atem- und Kammergas-Bewirtschaftung .....	40
3.3.1	Zentrales Gaslager .....	40
3.3.2	Schweißgasabsorbersystem .....	41
3.4	Besondere Erfordernisse an Anlagen, Ausrüstung und Taucher für das sichere Arbeiten in nasser und trockener Umgebung bis in große Wassertiefen .....	42
	Schrifttum .....	46
<b>4</b>	<b>Betrachtungen zur Zielsetzung des GKSS in der Forschung zur Unterwasser- technik</b> .....	48
4.1	Besonderheiten der Versuchsdurchführung beim nassen Schweißen – sicherheits- technische Betrachtungen .....	48
4.2	Arbeitstechniken für den Einsatz unter Wasser .....	49
4.2.1	Entwicklung der Unterwasser-Schweißtechnik in Deutschland .....	50
4.2.2	Besonderheiten des hyperbaren Schweißens .....	52
4.2.3	Schweißen in nasser Umgebung .....	53
4.2.3.1	Handhabung des manuellen nassen Schweißens .....	57

4.2.3.2	Elektrodenzusammensetzung .....	61
4.2.3.3	Elektroden Durchmesser .....	65
4.2.3.4	Kohlenstoffäquivalent und das Temper-Bead-Schweißen .....	65
	Schrifttum .....	66
<b>5</b>	<b>Verfahren, Geräte, Anlagen und Zubehör zum Schweißen und Schneiden unter Wasser</b> .....	<b>68</b>
5.1	Schweißstromquellen für das Unterwasser-Lichtbogenhandschweißen .....	68
5.1.1	Umformer oder Gleichstromgeneratoren .....	68
5.1.2	Gleichrichter älterer Bauart .....	68
5.1.3	Gleichrichter neuerer Bauart .....	70
5.2	Stromquelle für das nasse vollmechanische Schweißen .....	72
5.2.1	Drahtschubgerät .....	74
5.2.2	Schweißbrenner .....	75
5.2.2.1	Schweißzange zum nassen Lichtbogenschweißen mit Stabelektroden .....	75
5.2.2.2	Schweißpistole zum nassen Unterwasserschweißen .....	75
5.3	Entwicklung hyperbar trockener Schweißsysteme .....	76
5.3.1	Hyperbares Orbitalschweißen nach dem WIG- und MIG-/MAG-Verfahren .....	76
5.3.2	MOSS – Modulares Orbital-Schweißsystem für atmosphärische und hyperbare Einsätze .....	77
	Schrifttum .....	78
<b>6</b>	<b>Entwicklungen und Erprobungen zum hyperbar nassen Schweißen</b> .....	<b>80</b>
6.1	Schweißen artfremder Stahl-Schweißzusätze .....	82
6.2	Schweißzusätze für das artgleiche Schweißen .....	83
6.3	Einfluss der Umgebungsbedingungen .....	86
6.3.1	Porosität in Abhängigkeit von der Wassertiefe .....	87
6.4	Mechanisch-technologische Eigenschaften .....	88
6.5	Chemische Analyse .....	90
6.6	Wasserstoff im nass geschweißten Schweißgut .....	92
	Schrifttum .....	97
<b>7</b>	<b>Hyperbar trockenes Schweißen</b> .....	<b>99</b>
7.1	Allgemeines .....	99
7.2	Schweißverfahren und ihr Einsatzbereich .....	100
7.3	Versuchsausrüstung zum Schweißen in hyperbarer Atmosphäre .....	101
7.3.1	Allgemeine Bemerkungen zu Konstruktion und Ausführung von in hyperbar trockener Atmosphäre einsetzbaren Anlagen und Geräten .....	101
7.3.2	Zweiachsen-Traversen-Schweißsystem .....	102
7.3.3	Orbitalschweißsystem .....	103
7.3.4	Roboterschweißsystem .....	105
7.4	Grundlagenuntersuchungen zum Schweißen in hyperbar trockener Atmosphäre .....	106
7.4.1	Verhalten des Lichtbogens unter hyperbaren Bedingungen .....	107
7.4.2	Werkstoffkundliche Untersuchungen zum hyperbaren WIG-Schweißen .....	114
7.4.2.1	Einfluss des Kammergases auf Ergebnisse zum WIG-Schweißen .....	114
7.4.2.2	Ergebnisse von mechanisch-technologischen Grundlagen-Untersuchungen zum hyperbaren WIG-Schweißen mit Zusatzdraht (an Auftrag- und Verbindungsnahten) .....	115
7.4.3	Verfahrensentwicklungen zum hyperbar trockenen MAG-Schweißen unter Verwendung verschiedener Kammergase (Versuchsbedingungen) .....	119
7.5	Anlagenentwicklung zum hyperbaren MAG-Orbitalschweißen .....	129
7.5.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung .....	130

7.5.2	Werkstoffübergang, Prozessstabilität und Schweißparameter .....	135
7.5.2.1	Qualitätsmerkmale von hyperbaren MAG-Schweißnähten .....	137
7.5.3	Hyperbares MAG-Schweißen mit Industrieroboter .....	148
7.6	Modulares Orbital-Schweißsystem (MOSS) .....	157
7.6.1	Systembeschreibung .....	158
7.6.1.1	Orbital-Schweißkopf und weitere Module .....	158
7.6.1.2	Steuerung und Überwachung .....	160
7.6.1.3	Systemqualifizierung und Ausblick .....	161
	Schrifttum .....	162
<b>8</b>	<b>Beschreibung einer Instandsetzung unter Einsatz einer autonomen taucherlosen Station</b> .....	<b>167</b>
8.1	Beschreibung des Systems .....	168
8.2	Beschreibung einer möglichen Pipeline-Instandsetzung durch das autonome System .....	170
	Schrifttum .....	172
<b>9</b>	<b>Erfahrungen mit Unterwasser-Instandsetzungen durch nasses Schweißen</b> .....	<b>173</b>
9.1	Erfolgreiche Plattform-Instandsetzung vor der Küste Englands .....	173
9.2	Schiffsinstandsetzung durch nasses Unterwasserschweißen .....	177
9.2.1	Ausführung der Instandsetzung .....	178
9.3	Instandsetzung einer Spundwand .....	179
9.3.1	Ausführung der Sanierungsarbeiten .....	182
9.4	Beseitigung des Havarieschadens einer Hafen-Hochwasser-Schutzwand .....	184
9.4.1	Ausführung der Instandsetzung .....	186
	Schrifttum .....	189
<b>10</b>	<b>Schwingfestigkeitsuntersuchungen zur Bewertung von Unterwasser-Schweißverbindungen</b> .....	<b>190</b>
10.1	Einführung .....	190
10.2	Versuchsprogramm für die Ermüdungsversuche .....	191
10.3	Kleinversuchsproben .....	191
10.3.1	Probenform .....	194
10.3.2	Durchführung der Ermüdungsversuche .....	194
10.3.3	Auswertung der Kleinprobenversuche und Darstellung der Ergebnisse .....	195
10.4	Untersuchungen an Rohr-Muffen-Verbindungen (Bauteilproben) .....	198
10.4.1	Konstruktionsform .....	199
10.4.2	Vorbereitung der Versuchsproben .....	199
10.4.3	Versuchsdurchführung und Auswertung der Bauteilversuche .....	201
10.4.4	Versuchsbegleitende Berechnungen .....	203
10.4.5	Eigenspannungsmessungen .....	204
10.5	Schlussfolgerungen .....	206
	Schrifttum .....	210
<b>11</b>	<b>Laserstrahlschweißen in hyperbarer Umgebung</b> .....	<b>212</b>
11.1	Orientierende Laborversuche .....	212
11.1.1	Druckkammerversuche .....	214
11.1.2	Laserstrahlführung .....	214
11.1.3	Werkstückpositionierung .....	215
11.1.4	Gaszufuhr und Druckregelung .....	215
11.1.5	Steuerung des Versuchsstands .....	215
11.2	Versuchslaser .....	216

11.2.1	CO <sub>2</sub> -Laser .....	216
11.2.2	Nd:YAG-Laser .....	219
11.3	Werkstückbearbeitung mit einem Nd:YAG-Laser in hyperbarer Umgebung .....	222
11.3.1	Aufgabenstellung .....	223
11.3.2	Containerstation .....	223
11.3.3	Versuchslaser .....	224
11.3.3.1	Glasfaserkabel .....	225
11.3.3.2	Laserstrahl-Schweiß- und -Schneidköpfe .....	226
11.4	Laserstrahlschneiden in hyperbar trockener Atmosphäre .....	231
11.4.1	Schneidversuche mit dem Miniaturlaserkopf .....	231
11.5	Laserstrahlschweißen in hyperbar nasser Umgebung .....	235
11.5.1	Entwicklung einer Düse zur Schaffung einer wasserfreien Kaverne an ebenen Oberflächen .....	235
11.5.2	Entwicklung einer Vorsatzdüse für gekrümmte Oberflächen .....	241
11.6	Ergebnisse des Laserstrahlschweißens in hyperbar trockener und hyperbar nasser Umgebung .....	243
11.6.1	Laserstrahlschweißen in hyperbar trockener Umgebung .....	243
11.6.2	Beseitigen von Rissen mit dem Laserstrahlschweißen .....	248
11.6.3	Laserstrahlschweißen in hyperbar nasser Umgebung .....	249
11.7	Schlussfolgerung .....	252
	Schrifttum .....	252
<b>12</b>	<b>Unterwasserschneiden</b> .....	<b>254</b>
12.1	Unterwasserschneiden mit dem Benzinbrenner .....	254
12.2	Unterwasserschneiden mit der Hohlelektrode .....	255
12.3	Unterwasserschneiden mit der Sauerstoffkernlanze .....	256
12.4	Unterwasserschneiden mit Spezialelektroden .....	259
12.5	Unterwasserfräse .....	259
12.6	Wasserstrahlschneiden .....	261
12.7	Unterwasserschneiden mit einer rotierenden Trennscheibe (Unterwasserwinkelschleifer) .....	261
12.8	Entwicklung weiterer Unterwasserschneidverfahren .....	262
12.8.1	CMAG-Technik .....	262
12.8.2	Thermisches Schneiden mit Kohlelektroden (CMAC-Verfahren) .....	262
12.8.3	Weitere Verfahrensentwicklungen .....	263
	Schrifttum .....	264
<b>13</b>	<b>Entwicklung von Nahterkennungs- und Nahtverfolgungssystemen</b> .....	<b>265</b>
13.1	Anforderungen an ein hyperbar einsetzbares Kamerasystem .....	265
13.2	Röhrenkameras .....	266
13.2.1	Generelle Wirkungsweise .....	266
13.2.2	Röhrenkameras für den hyperbaren Einsatz ohne Druckgehäuse .....	267
13.2.3	Einsatz von Röhrenkameras beim hyperbaren Schweißen mit druckfestem Gehäuse. .....	267
13.3	CCD-Kameras .....	268
13.3.1	Generelle Systembeschreibung .....	268
13.3.2	Schwarz-/Weiß-CCD-Kameras für den hyperbaren Einsatz .....	269
13.3.3	CCD-Farbkameras .....	269
13.4	Aufbau eines Nahtführungs- und Nahtverfolgungssystems .....	269
13.4.1	Versuchsdurchführung .....	271
13.4.1.1	Orientierungsversuche unter atmosphärischen Bedingungen .....	271
13.4.1.2	Orientierungsversuche unter hyperbaren Bedingungen .....	272

13.4.1.3	Ergebnisse und kritische Beurteilung der Orientierungsversuche .....	272
13.5	Systemerprobung im hyperbaren Schweißbetrieb .....	273
	Schrifttum .....	275
<b>14</b>	<b>Thermisches Beschichten unter Wasser .....</b>	<b>276</b>
14.1	Versuchsaufbau .....	276
14.2	Unterwasser-Feststoffstrahlen .....	278
14.3	Einsatz von Propan und Wasserstoff beim Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen unter Wasser .....	279
14.4	Versuchsergebnisse .....	280
14.5	Wärmenachbehandlung von Schweißnähten unter Wasser .....	281
14.5.1	Vorbemerkungen und Versuchsaufbau .....	281
14.5.2	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	282
	Schrifttum .....	287
<b>15</b>	<b>Qualifizierung des Fachpersonals sowie Hinweise zum Arbeits- und Gesundheitsschutz .....</b>	<b>288</b>
15.1	Anforderungsbestimmungen an Taucher und Tauchbetriebe .....	288
15.1.1	Gewerbliche Taucher in Industrie und Handwerk .....	288
15.1.2	Taucher der Wasser- und Schifffahrtsdirektion .....	292
15.1.3	Bundeswehrtaucher als gewerbliche Taucher .....	293
15.2	Hinweise zum Arbeits- und Gesundheitsschutz (Aufsichts- und Überwachungs- gremien) .....	293
15.2.1	Berufsgenossenschaft .....	293
15.2.2	Germanischer Lloyd .....	294
	Schrifttum .....	294
<b>16</b>	<b>Normen, Vorschriften und Regeln in der Unterwasser-Schweißtechnik .....</b>	<b>296</b>
16.1	Normen .....	296
16.2	Richtlinie VDE 0100-200 .....	298
16.3	DVS-Richtlinien und -Merkblätter .....	298
16.4	Internationale Richtlinien und Vorschriften .....	300
<b>17</b>	<b>Weiterführendes Schrifttum der Unterwassertechnik nach Sachgebieten geordnet .....</b>	<b>302</b>
	Hyperbar nasses Schweißen .....	302
	Hyperbar trockenes Schweißen .....	304
	Arbeitsschutz und Prüftechnik .....	306
	Finite-Element-Analysen und theoretische Betrachtungen .....	307
	Druckkammertechnik .....	309
	Korrosionsschutz und Wärmenachbehandlung von Schweißnähten .....	310
	Nahterkennungs- und Nahtverfolgungssysteme .....	311
	Ausbildung und Schulung .....	311
	Mehrphasentransporttechnik und Wasserstrahlabrasivstrahlen .....	312
	Einsatz des Laserstrahls unter Wasser .....	312