

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XV	
1	Glasschmelzöfen, Übersicht	1
2	Technische Merkmale, Bezeichnungen, Bauarten	3
2.1	Technische Merkmale	3
2.2	Kenndaten	5
2.3	Benennung der Bauteile	5
2.4	Bauarten	7
2.4.1	Behälterglaswannen.	7
2.4.2	Flachglaswannen	8
2.4.3	Spezialglaswannen	11
3	Bauelemente, Dimensionierung	13
3.1	Wannenbecken	13
3.1.1	Geometrische Daten	13
3.1.1.1	Grundfläche	13
3.1.1.2	Längen-/Breiten-Verhältnis	13
3.1.1.3	Badtiefe	14
3.1.2	Konstruktion	15
3.1.2.1	Wannenseitenwand	15
3.1.2.2	Wannenboden	16
3.1.2.3	Durchlaß	18
3.1.2.4	Einlegevorbau	20
3.2	Wannenoberbau	21
3.2.1	Verbrennungsraum	22
3.2.2	Seitenwände	22
3.2.3	Gewölbe	23
3.2.3.1	Kräfte im Gewölbe	24
3.2.3.2	Stützlinien	24
3.2.3.3	Einfluß durch Wärmedehnung	27
3.2.3.4	Gewölbeaufbau und Betriebsverhalten	28
3.2.4	Stirn- oder Giebelwände und Einlegevorbau	30
3.2.5	Abgrenzungen zwischen Schmelz- und Arbeitswannen bzw. Abstehwannen	30
3.2.6	Brenner	32
3.3	Wärmeregeneratoren	35
3.3.1	Anordnung	35
3.3.2	Dimensionierung	36
3.3.3	Durchströmung	36
3.3.3.1	Glattschachtpackungen	36
3.3.3.2	Rostgitterpackungen	38
3.3.3.3	Vergleich der verschiedenen Packungsarten	39
3.3.3.4	Einfluß der Temperaturverteilung	40
3.3.4	Betriebsdaten von Regenerativkammern	40
3.3.4.1	Gittersetzarten	41
3.3.4.1.1	Glattschachtgitterung	42
3.3.4.1.2	Rostgitterung	42
3.3.4.1.3	Korbgeflechtgitterung	42
3.3.4.1.4	Steinformate	42
3.3.4.2	Kenngrößen für Gitterwerke	43

VIII Inhaltsverzeichnis

3.3.5	Kammergewölbe und Kammerwände	46
3.3.6	Schlitzbögen und Rostauflagesteine	46
3.4	Rekuperatoren	47
3.4.1	Keramische Rekuperatoren	47
3.4.2	Metallrekuperatoren	48
3.5	Kanäle	50
3.6	Wechselorgane	52
3.7	Schornsteine	54
3.7.1	Schornsteindimensionierung.....	54
3.7.2	Schornsteinbauteile	55
3.7.3	Schornsteinausrüstung.....	55
3.8	Verankerungen.....	56
3.8.1	Verankerung des Wannengewölbes	56
3.8.1.1	Pendelstützen mit Ankereisen	56
3.8.1.2	Starre Gewölbeverankerung	58
3.8.2	Verankerung der Seitenwände	59
3.8.2.1	Oberbauseitenwand	59
3.8.2.2	Wannenbecken	59
3.8.2.3	Verankerung der Stirn- und Giebelwand	60
3.8.2.4	Verankerung des Einlegevorbau	60
3.8.3	Verankerung der Brenner	60
3.8.4	Verankerung der Regenerativkammern	61
3.8.5	Berechnung.....	61
4	Auswahl und Einsatz feuerfester (ff-)Baustoffe für Glasschmelzwannen	63
4.1	Auswahlkriterien	63
4.2	Zusammensetzung und Eigenschaften der wichtigsten feuerfesten Steine..	63
4.2.1	Schamottesteine	63
4.2.2	Sillimanit- und Mullitsteine	63
4.2.3	Zirkonsilikatsteine	63
4.2.4	Schmelzflüssig gegossene Steine	66
4.2.4.1	Stampfmassen in Verbindung mit schmelzgegossenen Steinen.....	66
4.2.5	Silikasteine	68
4.2.6	Basische Steine	68
4.3	Auswahl und Einsatz im Einzelfall.....	70
4.3.1	Schmelzwannengewölbe	70
4.3.2	Gewölbe von Arbeits- und Abstehwannen	72
4.3.3	Seitenwände von Schmelzwannen	73
4.3.4	Seitenwände von Arbeits- und Abstehwannen	75
4.3.5	Schmelzwanne	76
4.3.6	Arbeitswanne und Abstehwanne	78
4.3.7	Brennerhälse	78
4.3.8	Regenerativkammern	78
4.3.9	Kanäle	80
5	Betrieb von Glasschmelzwannen	81
5.1	Wärmetechnik	81
5.1.1	Temperaturverteilung	81
5.1.2	Wärmestromdichte und Brennstoffverteilung	82
5.1.3	Wirkungsgrade	83
5.1.3.1	Wirkungsgrade der Feuerung	83
5.1.3.2	Theoretischer Wärmebedarf der Schmelze	85
5.1.4	Energieverbrauch.....	86
5.1.4.1	Einfluß des Ofenalters und der Umgebungstemperatur auf den Energieverbrauch.....	87
5.1.4.2	Einfluß des Luftfaktors und der Falschluft auf den Energieverbrauch	88
5.1.5	Energiebilanzen	89
5.1.5.1	Bilanzkreise.....	89
5.1.5.2	Bilanzposten	89
5.1.5.3	Bezugsgrößen	89

5.1.5.3.1	Zugeführte Wärmemenge in Prozent	89
5.1.5.3.2	Nutzwärme im Glas in Prozent	90
5.1.5.3.3	Gewichtseinheit des erschmolzenen Glases	90
5.1.5.3.4	Zeiteinheit	91
5.1.5.3.5	Beispiele	91
5.1.5.4	Mehrkreisige Bilanzen	91
5.1.5.5	Exergiebilanzen	91
5.1.6	Wärmeisolierung und Kühlung	93
5.1.6.1	Wärmeisolierung	93
5.1.6.1.1	Berechnung von Wärmeisolierungen	93
5.1.6.1.2	Ausführung von Wärmeisolierungen	97
5.1.6.1.2.1	Wannenbecken	97
5.1.6.1.2.2	Gewölbe und Seitenwände	98
5.1.6.2	Kühlung des Wannenbeckens	98
5.1.6.2.1	Wirkung der Kühlung	98
5.1.6.2.2	Dimensionierung der Kühlung	100
5.2	Meß- und Regelungstechnik	101
5.2.1	Temperatur	101
5.2.2	Herdraumdruck	105
5.2.3	Volumen und Brennstoff/Luft-Gemisch	106
5.2.4	Glasstand	107
5.2.5	Abgaszusammensetzung	109
5.2.6	Regelanlagen	109
5.3	Umsteuern	110
5.3.1	Zeitlicher Ablauf des Umsteuervorgangs	111
5.3.2	Steuerung des Umsteuervorgangs	113
5.4	An- und Abtempern von Glasschmelzöfen	113
5.4.1	Ausdehnungsverhalten der Steine	114
5.4.2	Temperaturgradient und Wärmespannungen im feuerfesten Stein	114
5.4.3	Temperkurve	116
5.4.4	Antempern	116
5.4.4.1	Anordnung der Temperbrenner	116
5.4.4.2	Temperbrenner	117
5.4.4.3	Temperverlauf	117
5.4.4.4	Beherrschung der Wärmedehnung des feuerfesten Materials	118
5.4.4.5	Einlegen bei angetempelter Wanne	120
5.4.4.6	Meßtechnische Überwachung	121
5.4.5	Abtempern von Glasschmelzöfen	121
5.4.6	Ablassen von Schmelzwannen	121
5.5	Heißreparaturen	122
5.5.1	Verstärkung der Kühlung	122
5.5.2	Heißreparatursteine	123
5.5.3	Heißreparaturmassen	124
5.5.4	Spritztechnik	125
5.5.5	Heißreparaturen mit schmelzgegossenen Steinen	126
5.5.6	Heißreparatur von Regenerativkammern	128
6	Wannenofen, Betriebsverhalten	129
6.1	Gasströmungen im Oberofen	129
6.1.1	Querbrennerwannen	129
6.1.2	U-Flammenwannen	130
6.2	Flammenausbildung im Oberofen	133
6.2.1	Art und Anordnung der Flammen	133
6.2.2	Turbulente Diffusionsflammen	134
6.2.2.1	Freistrahler	134
6.2.2.2	Diffusionsflamme	135
6.2.2.2.1	Freistrahldiffusionsflamme	135
6.2.2.2.2	Diffusionsflammen in begrenzten Räumen	135
6.3	Wärmeabgabe im Oberofen	137
6.3.1	Ausbrandverlauf von Strahlflammen	137
6.3.2	Wärmeabgabe und Flammenlänge	138

6.3.3	Wärmeabgabe der Flamme durch Strahlung	139
6.3.3.1	Gasstrahlung	139
6.3.3.2	Strahlung leuchtender Flammen	141
6.3.3.3	Wechselwirkung zwischen Flamme und Ofenraum	142
6.3.4	Konvektiver Wärmeübergang zwischen Flamme und Glasbad	144
6.4	Einlegen und Abschmelzen des Gemenges	145
6.4.1	Abschmelzvorgang	146
6.4.2	Verstaubung und Verdampfung	150
6.4.3	Einlegetechniken	150
6.4.3.1	Querbrennerwannen	151
6.4.3.2	U-Flammenwannen	153
6.4.3.3	Schmale, direkt befeuerte Wannen	154
6.4.3.4	Elektrisch beheizte Wannen	154
6.5	Glasströmungen	156
6.5.1	Entstehung der Glasströmungen	156
6.5.2	Berechnung der Glasströmungen	160
6.5.3	Beeinflussung der Glasströmungen	161
6.5.3.1	Abgrenzung des Schmelzbereichs vom Läuterbereich	161
6.5.3.1.1	Steigerung der Durchsatzströmung	162
6.5.3.1.2	Elektrozusatzheizung im Läuterbereich	163
6.5.3.1.3	Elektrozusatzheizung im Einschmelzbereich	163
6.5.3.1.4	Einblasen von Gasen	163
6.5.3.1.5	Einbau von Wällen	166
6.5.3.1.6	Einbau von Drainagen im Wannenboden	166
6.5.3.1.7	Badtiefe, Glasfarbe und Isolierung des Wannenbeckens	167
6.5.3.1.8	Strömung im Seitenbereich der Wanne	168
6.5.3.2	Abgrenzung des Arbeits- und Abstehbereichs	168
6.5.3.3	Strömung im Durchlaß von Hohlglaswannen	169
6.5.3.4	Strömung in Arbeits- und Abstehwannen	170
6.5.3.5	Glasströmungen in Elektrowannen	171
6.6	Homogenisierung und Läuterung der Glasschmelze	171
6.7	Mischungsverhalten von Glasschmelzwannen	174
6.7.1	Experimentelle Ergebnisse	174
6.7.2	Verhalten idealisierter Mischer	175
6.7.3	Mischungsverhalten bei zufälligen Schwankungen der Gemenge- und Scherbenzusammensetzung	177
6.8	Umfärben von Glasschmelzwannen	178
6.8.1	Ablassen und Neuaufschmelzen	178
6.8.2	Kontinuierliches Umfärben bei laufendem Betrieb	179
6.8.2.1	Mischungscharakteristika von Glasschmelzwannen	179
6.8.2.2	Beeinflussung des Umfärbevorgangs	179
6.8.2.3	Praxis des Umfärbevorgangs	181
6.8.2.3.1	Beispiele für Umfärbungen	181
6.8.2.3.1.1	Behälterglas	181
6.8.2.3.1.2	Flachglas	182
6.9	Verhalten der feuerfesten Baustoffe im Kontakt mit der Glasschmelze	183
6.9.1	Korrosion von Wannensteinen durch Diffusion ohne Konvektion	183
6.9.2	Korrosion von Wannensteinen durch Diffusion und erzwungene Konvektion	184
6.9.3	Korrosion von Wannensteinen durch Diffusion und Dichtekonvektion	185
6.9.4	Einfluß von Oberflächen- und Grenzflächenspannungen	186
6.9.4.1	Spülkantenkorrosion	186
6.9.4.2	Blasenbohren, Lochfraß	187
6.9.5	Möglichkeiten zur Verminderung der Korrosion	188
6.10	Verhalten der feuerfesten Baustoffe im Oberofen und im Abgasbereich des Schmelzofens	188
7	Mathematische Modelle von Glasschmelzwannen	190
7.1	Feuerungsmodelle	190
7.2	Glasströmungsmodelle	191

7.3	Glasschmelzwannenmodelle	191
7.3.1	Übersicht	191
7.3.2	Glasschmelzwannenmodell von Trier und Voss, Aufbau	191
7.3.3	Glasschmelzwannenmodell von Trier und Voss, Ergebnisse	195
7.3.3.1	Brennstoffwärmezufuhr, spezifischer Energieverbrauch, flächenbezogene Schmelzeistung, Badtiefe	195
7.3.3.2	Strahlungseigenschaften des Oberofens, Kammerwirkungsgrad, Gewölbetemperatur	199
7.3.3.2.1	Einfluß des Emissionsgrades des Flammenraumes ε_F	200
7.3.3.2.2	Einfluß der Wärmeverluste des Gewölbes	200
7.3.3.2.3	Einfluß des Emissionsgrades des Gewölbes ε_G	201
7.3.3.2.4	Einfluß der Badoberflächentemperatur ϑ_O	202
7.3.3.2.5	Einfluß des Emissionsgrades des Bades ε_O	202
7.3.3.2.6	Einfluß des Kammerwirkungsgrades η_k	203
7.3.3.2.7	Einfluß der prozentualen Abschmelzeistung von der Ober- und Unterseite des Gemenetepichs (Faktor φ)	204
7.3.3.3	Ergebnisse für die Wanne als Ganzes	205
7.3.3.3.1	Anwendung des Rechenmodells für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	206
7.3.3.3.2	Einfluß einer Elektrozusatzheizung	207
8	Elektrowannen	208
8.1	Elektrische Eigenschaften von Glasschmelzen	208
8.1.1	Elektrische Leitfähigkeit	208
8.1.2	Thermische Instabilität	210
8.2	Energieabgabe der Elektroden in Glasschmelzen	213
8.3	Schaltung von Elektroden	215
8.3.1	Reihenschaltung von Heizkreisen	215
8.3.2	Parallelschaltung von Heizkreisen	216
8.3.3	Dreieckschaltung bei Drehstrom	216
8.3.4	Sternschaltung bei Drehstrom	216
8.3.5	Sonderschaltungen	217
8.4	Elektrischer Widerstand verschiedener Elektrodenanordnungen	217
8.4.1	Parallel angeordnete Stabelektronen ohne Badbegrenzung bei Einphasenschaltung	217
8.4.1.1	Zwei parallel angeordnete Stabelektronen	217
8.4.1.2	Vier parallel angeordnete Stabelektronen	217
8.4.1.3	Sechs parallel angeordnete Stabelektronen	218
8.4.2	Parallel angeordnete Stabelektronen ohne Badbegrenzung bei Dreiphasenschaltung	218
8.4.2.1	Drei parallel angeordnete Elektroden bei Dreieckschaltung	218
8.4.2.2	Drei parallel in Reihe angeordnete Elektroden	218
8.4.2.3	Vier parallel in Reihe angeordnete Elektroden	219
8.4.3	Parallel angeordnete Stabelektronen im begrenzten Glasbad	219
8.4.3.1	Zwei parallel angeordnete Stabelektronen	219
8.4.3.2	Zwei gleichgerichtete, einander gegenüber angeordnete Stabelektronen	219
8.4.3.3	Rechteckig angeordnete Bodenelektronen für Zweiphasenschaltung	220
8.4.3.4	Im Dreieck angeordnete Bodenelektronen für Dreiphasenstrom	220
8.5	Elektrodenmaterialien	221
8.5.1	Molybdän	221
8.5.2	Graphit	223
8.5.3	Zinnoxid	223
8.5.4	Platin	224
8.6	Anordnung der Elektroden	224
8.6.1	Waagrechter Einbau von Stabelektronen	224
8.6.2	Senkrechter Einbau von Stabelektronen	225
8.6.3	Plattenelektronen	225
8.7	Elektrodenhalter	225
8.7.1	Stabelektronen	225
8.7.2	Plattenelektronen	228
8.7.3	Zinnoxidelektronen	228

XII Inhaltsverzeichnis

8.8	Konstruktion und Betriebsverhalten von Elektrowannen	229
8.8.1	Konstruktion	229
8.8.2	Betriebsverhalten von Elektroöfen	232
8.8.2.1	Schmelzverhalten	232
8.8.2.2	Meß- und Regelgeräte	233
8.8.2.2.1	Temperaturmessung	234
8.8.2.2.2	Glasstand	235
8.9	Glasschmelzwannen mit Elektrozusatzheizung	236
8.10	Sicherheitstechnische Maßnahmen	239
8.10.1	Bestehende Vorschriften	239
8.10.2	Maßnahmen zur Abwehr von Gefahren	239
9	Tageswannen	240
9.1	Temperatur- und Schmelzführung	240
9.2	Feuerführung	241
9.3	Brennstoffverbrauch	241
9.4	Schmelzleistung	242
9.5	Glasqualität	242
9.6	Feuerfeste Baustoffe	242
10	Hafenöfen	244
10.1	Konstruktion	244
10.2	Betriebsweise	246
10.3	Wärmetechnik	249
10.4	Elektrisch beheizte Hafenöfen	250
10.5	Feuerfeste Baustoffe	251
11	Verbrennung und Brennstoffe	254
11.1	Grundlagen	254
11.1.1	Luftüberschuß	255
11.1.2	Wärmeentwicklung	256
11.1.3	Verbrennungsablauf	258
11.1.4	Taupunkt	259
11.2	Technische Brennstoffe	260
11.2.1	Gasförmige Brennstoffe	260
11.2.2	Flüssige Brennstoffe	261
11.2.2.1	Heizöle	261
11.2.2.2	Flüssiggase	263
12	Abwärmeverwertung	266
12.1	Rekuperatoren, Regeneratoren, Berechnung	266
12.1.1	Rekuperatoren	266
12.1.1.1	Örtlicher Temperaturverlauf und Wärmedurchgangskoeffizient	267
12.1.1.2	Wirkungsgrad	267
12.1.1.3	Temperaturverhältnisse	268
12.1.2	Regeneratoren	268
12.1.2.1	Berechnungsverfahren nach Hausen	269
12.1.2.1.1	Wärmedurchgangskoeffizient	269
12.1.2.1.2	Temperaturverlauf und Steintemperatur	269
12.1.2.1.3	Wärmeübergangskoeffizienten	270
12.1.2.1.4	Druckverlust	271
12.1.2.1.5	Einfluß der Durchströmung auf die ausgetauschte Wärmemenge	271
12.1.2.2	Regeneratorberechnung mit dem Rechenprogramm HVG/Woelk	272
12.1.2.2.1	Örtliche und zeitliche Temperaturänderungen im Kammerstein	273
12.2	Abhitzekessel	274
12.2.1	Abhitzekessel hinter Regenerativwannen	274

12.2.1.1	Abhitzekessel für Heizzwecke	274
12.2.1.2	Abhitzehheizkraftwerk	274
12.2.1.3	Ausführung von Abhitzekesseln	276
12.2.2	Abhitzekessel hinter direkt befeuerten Glasschmelzwannen	278
12.2.2.1	Auslegung	278
12.2.2.2	Betriebsverhalten	280
12.2.3	Energiewirtschaft und Energieverteilung	281
13	Emissionen von Glasschmelzöfen	283
13.1	Mengenbilanzen	283
13.2	Verdampfung aus Glasschmelzen	284
13.3	Verdampfung aus dem einschmelzenden Gemenge	285
13.4	Verstaubung aus dem einschmelzenden Gemenge	286
13.5	Ablagerungen und Reaktionen in den Regenerativkammern	287
13.6	Schornsteinemissionen	287
13.6.1	Staubemissionen	287
13.6.2	Schadgasemissionen	290
13.7	Sichtbarkeit von Abgasfahnen	291
13.8	Anlagen zur Verminderung der Emissionen	291
13.8.1	Gewebefilter	291
13.8.2	Elektrofilter	293
13.8.3	Anlagen mit Trockensorption	294
Literaturverzeichnis	296	
Sachverzeichnis	307	