

Inhaltsverzeichnis

Teil I Werkstoff Glas und Verfahren zur Aufdeckung seiner Fehlererscheinungen

1	Einführung (H. JEBSEN-MARWEDEL)	3
1.1	Glas als Sonderzustand der Materie	3
1.1.1	Der Werkstoff Glas als selbständiger thermodynamischer Zustand	4
1.1.2	Verzögerungerscheinungen am technischen Glas	4
1.1.3	Glasfehler als Durchlaufstadien von Raumteilen selbständiger thermodynamischer Systeme	5
1.2	Fabrikationsfehler als Technologie „pathologischer“ Ausnahmezustände	5
1.2.1	Fehler eines Werkstoffes als Quelle technologischer Erkenntnisse	6
1.3	Physikalischer Ablauf der Formgebung	7
1.3.1	Besonders relevante Bereiche des Zähigkeitsverlaufs („Länge“ bzw. „Kürze“ des Glases)	7
1.3.2	Praktische Auswertung	8
1.4	Systematik der Fehler	9
1.4.1	Schematische Übersicht „geduldeter“ Fehler (Mängel)	9
1.4.2	Stufen der Glasherstellung und ihrer Störungsquellen	9
1.4.3	Untrennbarer Zusammenhang mehrerer Fabrikationsfehler (Beispiel)	11
1.4.4	Suche nach „potentiellen“ Fehlerquellen	13
1.5	Einspielung des Glases auf optimale Beschaffenheit	13
1.5.1	Empirie und Methodik	13
1.5.2	Technisches Feld eines Mehrstoffsystems	14
	Literatur	14
2	Eigenschaften der Glasschmelze und des Glases als Werkstoff (R. BRÜCKNER, außer Abschnitte 2.1.7.1, 2.2.5 und 2.2.6)	16
2.1	Eigenschaften der Schmelze als „potentielle“ Fehlerquellen	16
2.1.1	Dichte und Auftrieb	16
2.1.2	Viskosität	19
2.1.2.1	Temperaturabhängigkeit der Viskosität	19
2.1.2.2	Zeitabhängigkeit der Viskosität	20
2.1.2.3	Viskosität und chemische Zusammensetzung	21
2.1.3	Viskoelastisches Verhalten bei rascher und großer Verformung	22
2.1.4	Oberflächenspannung, Grenzflächenspannung, Benetzung und Grenzflächenkonvektion	24
2.1.5	Diffusion, Löslichkeit und Konvektion	27
2.1.6	Verdampfung und Zersetzung	28
2.1.7	Phasentrennung	30
2.1.7.1	Entglasung (Kristallisation) (H. PETERMÖLLER)	30
2.1.7.2	Entmischung	33
2.1.8	Einfrierverhalten, Einfrieren der Fehler mit dem Glas	35
2.2	Eigenschaften des Glases als „potentielle“ Fehlerquellen	36
2.2.1	Dichte und thermische Ausdehnung	36
2.2.1.1	Eine einfache Beziehung zwischen Δ und der Kationenfeldstärke	38
2.2.1.2	Thermische Ausdehnung einfacher Gläser	38
2.2.2	Fließvorgänge unterhalb der Einfriertemperatur	40

X Inhaltsverzeichnis

2.2.3	Wärmeinhalt und Wärmetransport	41
2.2.3.1	Spezifische Wärme	41
2.2.3.2	Wärmetransport	42
2.2.3.2.1	Wärmeleitung	42
2.2.3.2.2	Wärmeübergangszahl α und Wärmedurchgangszahl k	43
2.2.3.2.3	Strahlungsleitfähigkeit	44
2.2.3.2.4	Wärmeabstrahlung	45
2.2.4	Thermische Spannungen, Temperaturwechselbeständigkeit und Wärmespannungszahl	46
2.2.4.1	Entstehung von Kühlspannungen	46
2.2.4.1.1	Vorübergehende Spannungen (Wärmespannungen)	46
2.2.4.1.2	Bleibende Spannungen	48
2.2.4.1.3	Temperaturwechselbeständigkeit (TWB) und Wärmespannungszahl	48
2.2.4.2	Der Entspannungsvorgang	49
2.2.5	Mechanik und Bruchfestigkeit (F. KERKHOF)	50
2.2.5.1	Das allgemeine Spannungs-Dehnungsverhalten	51
2.2.5.2	Die maximalen Spannungen für verschiedene Belastungsfälle	53
2.2.5.3	Die Spannungen an einem Riß	57
2.2.5.4	Festigkeitskriterien	58
2.2.5.4.1	Allgemeines über Festigkeitskriterien	58
2.2.5.4.2	Parameter der Festigkeit	58
2.2.6	Chemische Beständigkeit (A. PETERS)	61
2.2.6.1	Konstitution des Glases als Ursache für die Reaktionsbereitschaft der Oberfläche	61
2.2.6.2	Prinzip der chemischen Wechselwirkung von Glas mit der Umwelt unter Beteiligung von Wasser	62
2.2.6.3	Veränderung der chemischen Beständigkeit durch thermische Belastung	64
2.2.7	Optische Eigenschaften	66
2.2.7.1	Lichtbrechung	66
2.2.7.2	Reflexion	67
2.2.7.3	Absorption bzw. Transmission	68
2.2.7.4	Lichtstreuung	70
	Literatur	70
3	Verfahren zur Erkennung und Untersuchung von Glasfehlern – Überwachung der Produktion	76
3.1	Verfahren zur Erfassung von Formfehlern (V. CAIMANN)	76
3.1.1	Grundlagen	76
3.1.2	Begriffsbestimmungen	78
3.1.3	Die Meßverfahren	79
3.1.3.1	Optische Verfahren	79
3.1.3.1.1	Lichtspaltprüfung	79
3.1.3.1.2	Betrachtung eines Liniennetzes in Transmission und Reflexion	79
3.1.3.1.3	Schattenbild-(Projektions-) Verfahren	81
3.1.3.1.4	Interferenzverfahren	83
3.1.3.1.5	Schlierenverfahren	84
3.1.3.1.6	Optisches Abtastverfahren	85
3.1.3.2	Optoelektronische Verfahren	86
3.1.3.2.1	Messung in Transmission	86
3.1.3.2.2	Messung in Reflexion	87
3.1.3.3	Mechanische Verfahren	87
3.1.3.3.1	Taststiftverfahren	87
3.1.3.4	Elektromechanische Verfahren	87
3.1.3.5	Pneumatische Verfahren	88
3.1.3.6	Elektrische Verfahren	88
3.1.3.6.1	Die kapazitive Methode	88
3.1.3.7	Strahlenverfahren	88
3.1.3.8	Mikroskopische Verfahren	89
3.2	Optische Verfahren zur Erfassung von Schlieren (F. KERKHOF)	89
3.2.1	Über den Begriff Schlieren	89
3.2.2	Allgemeines über die optische Erfassung von Schlieren	89
3.2.3	Das Interferenzverfahren	91
3.2.4	Das Toeplersche Schlierenverfahren	95

3.2.5	Das Schattenverfahren	98
3.2.6	Die Untersuchungen von Querschliffen	103
3.2.7	Spannungsoptischer Nachweis von Schlieren	104
3.3	Verfahren zur Untersuchung von Spannungen	
3.3.1	(F. KERKHOF, außer Abschnitt 3.3.3)	106
3.3.1	Überblick über die Verfahren zur Untersuchung von Spannungen	
3.3.1	in Gläsern	106
3.3.2	Spannungsoptische Verfahren	107
3.3.2.1	Das spannungsoptische Grundgesetz	107
3.3.2.2	Das einfache spannungsoptische Verfahren mit linear polarisiertem Licht ..	109
3.3.2.3	Das einfache spannungsoptische Verfahren mit zirkular polarisiertem Licht ..	111
3.3.2.4	Das Kompensationsverfahren nach Sénarmont	114
3.3.2.5	Die Kompensationsverfahren nach Berek, Babinet und Babinet-Soleil	115
3.3.3	Registrierende automatische Spannungsprüfung an Flachglas (V. CAIMANN) ..	116
3.4	Analyse von Schlieren und Identifizierung von Fremdkörpereinschlüssen –	
3.4.1	Rohstoff-, Qualitäts- und Produktionskontrolle	121
3.4.2	Allgemeine Bemerkungen zur Analytik des Glases (A. PETERS)	121
3.4.2.1	Untersuchung von Schlieren (L. MERKER)	123
3.4.2.2	Untersuchung von Schlieren anhand ihrer Gestalt	123
3.4.2.2	Untersuchung von Al_2O_3 -haltigen Schlieren anhand der Totalreflexion	
3.4.2.3	Glas/Schliere	124
3.4.2.3	Interferenzmikroskopische Untersuchung von Schlieren	
3.4.2.3	anhand ihrer Ätzbarkeit	125
3.4.2.4	Untersuchung von Schlieren durch örtliche Ermittlung ihrer	
3.4.2.4	Zusammensetzung	126
3.4.2.5	Untersuchung von Schlieren nach Isolierung aus dem umgebenden Glas ..	127
3.4.3	Untersuchung von Fremdkörpereinschlüssen (J. JANSEN, H. PETERMÖLLER) ..	127
3.4.4	Merkmale für die mikroskopische Bestimmung von Kristallen –	
3.4.4	Grundlagen der Kristalloptik der Silicate (J. JANSEN, H. PETERMÖLLER) ..	130
3.4.5	Röntgenographische Bestimmung von Kristallen (L. MERKER)	134
3.4.5.1	Vorbemerkungen	134
3.4.5.2	Probenvorbereitung	135
3.4.5.3	Aufnahmetechnik	136
3.4.5.4	Kombination Mikroskopie/Röntgenbeugung	136
3.4.5.5	Auswertung	137
3.5	Analytische Untersuchungsmethoden – moderne Verfahren	139
3.5.1	Untersuchung von Glasfehlern mit dem Transmissions-	
3.5.1	Elektronenmikroskop und Raster-Elektronenmikroskop (H. BACH)	139
3.5.1.1	Auflösungsvermögen, Schärfentiefe, Nachweisempfindlichkeit, Präparation	
3.5.1.1	und Wahl des Elektronenmikroskops für Glasuntersuchungen	140
3.5.1.2	Glasfehler, Glaseigenschaften und elektronenmikroskopischer Befund ..	143
3.5.2	Röntgenspektroskopie, Röntgenfluoreszenzanalyse (F. J. DÖRR)	148
3.5.2.1	Arbeitsprinzipien	148
3.5.2.1.1	Elektronenanregung	148
3.5.2.1.2	Fluoreszenzanregung	149
3.5.2.2	Röntgendetektoren	149
3.5.2.3	Strahlungsmeßgeräte	150
3.5.2.4	Auswertung der Intensitätsinformationen	150
3.5.2.5	Zusammenfassung, Geräte, Anwendungsmöglichkeiten	150
3.5.3	Elektronenstrahlmikrosonde (F. J. DÖRR)	151
3.5.3.1	Arbeitsprinzip	152
3.5.3.1.1	Unelastisch gestreute Elektronen (Sekundärelektronen)	152
3.5.3.1.2	Elastisch gestreute Elektronen (RückstreuElektronen)	152
3.5.3.1.3	Elektromagnetische Wellen	152
3.5.3.2	Anforderungen an die Analysenobjekte	153
3.5.3.3	Methodische Anwendungspotentiale	154
3.5.3.4	Anwendungsfelder bei der Glaserzeugung	154
3.5.4	Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) (A. PETERS)	155
3.5.5	Analyse von Gläsern, Glasoberflächen und -belägen sowie von Gasen	
3.5.5	mit Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS) und der	
3.5.5	Spektralanalyse angeregter Strahlung (IBSCA oder SCANIIR) (H. BACH) ..	156

XII Inhaltsverzeichnis

3.5.5.1	Apparative Ausstattung	157
3.5.5.2	Die Anwendbarkeit von SIMS und IBSCA oder SCANIIR zur Analyse von Festkörperoberflächen, insbesondere Gläsern, und zum Nachweis von Elementen und Molekülen, bzw. Molekülbruchstücken	159
3.5.5.2.1	Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS)	159
3.5.5.2.2	Spektralanalyse der mit Projektionen oder -atomen angeregten Strahlung	159
3.5.5.2.3	Besonderheiten bei der Untersuchung und der quantitativen Analyse von Gläsern mit SIMS und IBSCA oder SCANIIR	160
3.5.5.3	Beispiele von SIMS- und IBSCA-Untersuchungen	161
3.5.6	Analyse von Blasen und Gasen im Glas (H. O. MULFINGER, F. KRÄMER)	162
3.5.6.1	Analyse des Gasinhaltes von Blasen im Glas	162
3.5.6.1.1	Anforderungen an die Analysenmethode	163
3.5.6.1.2	Die Verfahren der Blasenanalyse	165
3.5.6.2	Messung der Gasgehalte von Gläsern	169
3.5.6.2.1	Universelle Methoden	169
3.5.6.2.2	Substanzspezifische Methoden	170
3.5.6.3	Blasenfehlerdiagnose durch Analyse des Gasinhaltes von Blasen	171
3.5.6.3.1	Bestimmung der zeitlichen Veränderung von Blaseninhalten	171
3.5.6.3.2	Bedeutung der Breite und Inhaltsverteilungen	174
3.5.6.3.3	Unterscheidung von Fehlertypen innerhalb einer Inhaltsverteilung, Vertrauensbereiche, Analysenzahlen	175
3.5.6.3.4	Weitere Unterscheidungskriterien	176
3.5.6.3.5	Läuterschmelzen im Labormaßstab zur Fehlerdiagnose an unzugänglichen Wannen	177
3.5.6.3.6	Fehlerdiagnose an zugänglichen Wannen	178
	Literatur	179

Teil II Fehler an der Schmelzmasse

4	Gase (Blasen) in der Glasschmelze (H. O. MULFINGER)	193
4.1	Allgemeines	193
4.2	Das Einschmelzen des Gemenges	193
4.2.1	Die Temperaturverteilung im einschmelzenden Gemenge	194
4.2.2	Gemengehaufenreaktion und Rauhschmelze (unter Mitarbeit von W. MUSCHICK)	195
4.2.3	Gasabgabe beim Schmelzprozeß (unter Mitarbeit von F. KRÄMER)	195
4.2.4	Maßnahmen, um das Einschmelzen und Läutern zu beeinflussen (unter Mitarbeit von W. MUSCHICK)	199
4.2.4.1	Einfluß der Scherben	199
4.2.4.2	Einfluß der Gemengefeuchtigkeit	201
4.2.4.3	Einfluß der Korngröße der Gemengekomponenten	201
4.2.4.4	Einfluß von Schmelzbeschleunigern	202
4.2.4.5	Einfluß der Gemengeverdichtung (Pelletieren, Brikettieren, Granulieren) und des Vorheizens	203
4.2.5	Bildung von Blasen im Glas	204
4.3	Löslichkeit und Diffusion von Gasen in Glasschmelzen	205
4.3.1	Physikalische Löslichkeit von Gasen in Glasschmelzen	206
4.3.2	Chemische Löslichkeit von Gasen in Glasschmelzen	207
4.3.2.1	Löslichkeit von Wasserdampf	207
4.3.2.2	Löslichkeit von Kohlendioxid in Glasschmelzen	209
4.3.2.3	Die Löslichkeit von Schwefeltrioxid (SO ₃)	210
4.3.2.4	Löslichkeit reduzierter Schwefelverbindungen	212
4.3.2.5	Chemische Löslichkeit von Stickstoff in Glasschmelzen	214
4.3.2.6	Chemische Löslichkeit von Sauerstoff in Glasschmelzen	216
4.3.3	Diffusion von Gasen in Glasschmelzen	219
4.4	Entfernung von Blasen und Gasen aus der Schmelze (Läuterung, Entgasung und Homogenisierung)	222
4.4.1	Das Aufsteigen der Blasen in der Glasschmelze (unter Mitarbeit von F. KRÄMER)	222
4.4.2	Das Austreten von Blasen aus der Glasschmelze (unter Mitarbeit von F. KRÄMER)	224

4.4.3	Die chemische Läuterung	224
4.4.3.1	Mechanismus der chemischen Läuterung	225
4.4.3.2	Sauerstoffläuterung	227
4.4.3.3	Sulfatläuterung (unter Mitarbeit von H. P. WILLIAMS)	228
4.4.3.4	Einfluß von Redoxbedingungen auf die Sulfatläuterung	229
4.4.3.5	Andere Läutermittel	234
4.4.4	Physikalische Läuterverfahren	235
4.4.5	Homogenisierung und Läuterung	237
4.4.6	Einfluß von Glasströmungen auf die Läuterung des Glases	237
4.5	Blasen im Glas	239
4.5.1	Definition der drei Blasentypen	239
4.5.2	Anwendung der Blasenfehlerdiagnose	240
4.5.3	Blasen aus der Läuterung	241
4.5.4	Blasen aus gelösten Gasen (Nachgasen, Reboil) (unter Mitarbeit von K. P. HANKE)	242
4.5.4.1	Physikalische Ursachen (thermisches und mechanisches Reboil)	242
4.5.4.2	Chemische Ursachen; Änderung der Gaslöslichkeit; Reaktionen zwischen verschiedenen Schmelzen	246
4.5.4.3	Elektrochemische Ursachen (unter Mitarbeit von F. G. K. BAUCKE)	249
4.5.5	Blasen aus Verunreinigungen	249
4.5.5.1	Blasen aus gasförmigen Verunreinigungen	254
4.5.5.2	Blasen aus festen oder flüssigen Verunreinigungen	260
4.5.5.3	Salzblasen	261
	Literatur	261
5	Schmelzrelikte, Fremdkörper, „Steinchen“ und Entglasungen	
	(J. JANSEN, H. PETERMÖLLER, außer Abschnitt 5.4)	269
5.1	Allgemeine Einführung	269
5.2	Kristallarten, die in Steinchen, Knoten und Entglasungen vorkommen können	271
5.2.1	Kieselsäure (Siliciumdioxid) SiO_2	271
5.2.2	Tonerde (Aluminiumoxid) Al_2O_3	274
5.2.3	Zirkondioxid (Baddeleyit) ZrO_2 und Zirkonsilicat (Zirkon) $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$..	275
5.2.4	Andere Metalloxide	277
5.2.5	Calciumsilicate	277
5.2.6	Aluminiumsilicate	280
5.2.7	Sulfate	284
5.2.8	Kristalle als Wegweiser zur Fehlerquelle	285
5.3	Herkunft der „Steinchen“ und Knoten	286
5.3.1	Herkunft aus dem Gemenge und aus Scherbenverunreinigungen	286
5.3.1.1	Kieselsäuresteinchen und -knoten	288
5.3.1.2	Schwarze Steinchen	289
5.3.1.3	Metallische Einschlüsse	291
5.3.2	Herkunft aus den feuerfesten Baustoffen	292
5.3.2.1	Tropfen und Knoten	296
5.3.3	Herkunft aus der Glasschmelze (Entglasungen)	297
5.3.3.1	Allgemeine Entglasungsformen	298
5.3.3.2	Entglasung als Anzeiger der Schlieren- und Steinchensubstanz	302
5.3.3.3	Stufenkristallisation; Paragenese technischer Gläser	303
5.4	Störungen aus dem Bereich der optischen Gläser (F. J. DÖRR, N. MÜLLER)	306
	Literatur	308
6	Schlieren (Glas in Glas) (R. BRÜCKNER)	309
6.1	Grundsätzliches über Schlieren im Glas	309
6.1.1	Definition und Überblick	309
6.1.2	Entstehung der verschiedenen Schlierenarten	310
6.2	Homogenitätsstörungen in der Schmelze	311
6.2.1	Zum Begriff Homogenität	311

6.2.2	Homogenität des Gemenges	312
6.2.3	Inhomogenitäten der Rauhschmelzen	313
6.2.4	Homogenisierende Wirkung der Läuterung	316
6.2.5	Flüchtigkeit und Verstaubung als Schlierenquelle	318
6.2.5.1	Verstaubung	318
6.2.5.2	Flüchtigkeit	318
6.2.5.2.1	Verflüchtigung alkalihaltiger Bestandteile	319
6.2.5.2.2	Verflüchtigung borhaltiger Bestandteile	320
6.2.5.2.3	Verflüchtigung bleihaltiger Bestandteile	320
6.2.5.2.4	Verflüchtigung fluorhaltiger Bestandteile	322
6.2.5.2.5	Sonstige Verflüchtigungserscheinungen	322
6.2.6	Ofenatmosphäre als Ursache von Schlierenbildung	323
6.2.7	Durch Scherbenzusatz verursachte Schlieren	326
6.2.8	Gemengeumstellung als Schlierenursache	330
6.3	Schlieren von feuerfesten Wänden und Einbauten	331
6.4	Schlieren aus dem Oberbau der Öfen	333
6.4.1	Verschlackung des Oberofens als Schlierenquelle	333
6.4.2	Vom Gewölbe ausgehende Störungen	335
6.5	Einfluß von Konvektion und Verformung auf den Abbau von Schlieren	337
6.5.1	Weiträumige Strömungen: Homogenisierung durch Diffusion und Deformation („Difformation“)	337
6.5.2	Systemeigene lokale Strömungen: Freie Dichte- und Grenzflächenkonvektion	339
6.6	Verhalten von Schlieren in der Schmelze und bei der Formgebung	341
6.6.1	Besondere Eigenschaften von Schlieren, die beim Erschmelzen und bei der Formgebung eine Rolle spielen	341
6.6.2	Durch die Formgebung fixierte Schlierenanordnungen	343
6.6.3	Verborgene Schlieren	349
6.6.4	Thermische Schlieren	350
	Literatur	351
7	Wechselwirkung zwischen Glasschmelze und feuerfestem Material	358
7.1	Feuerfestes Material (O. SCHMID)	358
7.1.1	Eigenschaften der feuerfesten Steine und Massen	358
7.1.2	Einteilung der feuerfesten Steinqualitäten	359
7.1.2.1	Tonerde - Kieselsäure - hältige Steine	359
7.1.2.2	SiO ₂ -haltige Steine	359
7.1.2.3	Basische Steine	359
7.1.2.4	Zirkonsilikatsteine und -massen	360
7.1.2.5	Siliciumcarbidhaltige Produkte	360
7.1.2.6	Kohlenstoffsteine	360
7.1.2.7	Schmelzgegossene Steine	360
7.1.2.8	Metalle	360
7.1.3	Isolier- und Feuerleichtsteine	361
7.1.4	Maße und Formate der feuerfesten Steine	361
7.1.5	Glasfehler, die vom Feuerfestmaterial herrühren	361
7.2	Die besondere Rolle der Grenzflächenkonvektion bei der Korrosion von Feuerfestmaterial durch Glasschmelzen (R. BRÜCKNER)	362
7.2.1	Bevorzugte Korrosion horizontal („Spülkantenerosion“)	362
7.2.2	Bevorzugte Korrosion vertikal („Blasen-“ und „Metalltropfenbohren“)	366
7.2.3	Hinweise zur Bekämpfung der bevorzugten Korrosion	370
7.3	Die Herkunft von Glasfehlern aus den feuerfesten Baustoffen (J. JANSEN, H. PETERMÖLLER)	370
7.3.1	Fugen und Risse als Angriffsstelle für Korrosion	371
7.3.2	Eutektische Korrosion	373
7.3.2.1	Einfluß der Reaktionsfolge von Schlackenflüssen	376
7.3.2.2	Schlackenbildung durch Verunreinigung	379
7.3.2.3	Verschlackung am Silikagewölbe und davon ausgehende Störungen	382
	Literatur	384

8	Farbstich des Glases (L. MERKER, außer Abschnitt 8.4.4.2)	387
8.1	Was ist der Farbstich	387
8.2	Die Bedeutung des Farbstiches	387
8.2.1	Die Bedeutung des Farbstiches für den Gebrauchswert	387
8.2.2	Die schmelztechnische Bedeutung des Farbstiches	387
8.3	Die Beurteilung des Farbstiches	388
8.3.1	Die visuelle Beurteilung	388
8.3.2	Die Farbmessung als quantitatives Maß	388
8.4	Ursachen der Färbung in Gläsern	391
8.4.1	Der Farbstich durch Eisen	392
8.4.1.1	Die Herkunft des Eisens	393
8.4.1.2	Die Beeinflussung in der Schmelze („chemische Entfärbung“)	393
8.4.1.3	Die Beeinflussung des Farbstiches von außen	395
8.4.2	Farbstich durch andere Verunreinigungen	396
8.4.3	Veränderungen des Farbstiches	396
8.4.3.1	Veränderungen durch kleine Zusätze an Färbemitteln („physikalische Entfärbung“)	396
8.4.3.2	Veränderungen durch Licht	397
8.4.4	Der Farbstich bei farbigem Glas	398
8.4.4.1	Farbnuancen bei Kohlegelb-Glas	398
8.4.4.2	Farbnuancen bei pharmazeutischen Braungläsern (A. PETERS)	398
	Literatur	399

Teil III Fehler am Erzeugnis

9	Form- und Oberflächenfehler an Hohl- und Preßglas (H. KRÜGER, E. WUNDERLICH, außer Abschnitt 9.4.11)	403
9.1	Grundsätzliches zu Vorgängen bei der Formgebung	403
9.2	Die verschiedenen Teile eines Hohlglasbehälters und ihre wichtigsten Mündungsarten	404
9.3	Fertigungstechnische Grundlagen der Glasverarbeitungsmaschinen	405
9.3.1	Hohlglas	405
9.3.1.1	Die IS-Maschine	405
9.3.1.2	Die Roirant-S10-Maschine	408
9.3.2	Preßglas	410
9.4	Oberflächenfehler	412
9.4.1	Runzeln (bucklige Unebenheiten und gehämmertes Aussehen) und Falten an der Oberfläche	412
9.4.2	Fließwellen	413
9.4.3	Herausgerissenes Glas an der Oberfläche („angebackte“)	415
9.4.4	„Rauhe“ Mündungen	415
9.4.5	Abdrücke der Formflächen	416
9.4.6	Pegel- oder Stempelkleber, Glasfäden	418
9.4.7	Abdrücke von Verunreinigungen	419
9.4.8	Kratzer und Schrammen	420
9.4.9	Brandflecken an der Oberfläche (Staubteilchen)	421
9.4.10	Glätten des Glases durch Verwärmen	421
9.4.11	Oberflächenfehler beim Bearbeiten und Veredeln (F. HOLL)	422
9.4.11.1	Schliff- und Schnittdekore	422
9.4.11.2	Malereidekore	427
9.4.11.3	Ätzdekore	428
9.5	Risse und Brüche	429
9.5.1	Risse, die während der Formgebung entstehen	429
9.5.2	Kleben des Glases	431
9.5.3	Risse, die nach der Formgebung entstehen	432
9.5.4	Von der Mündung abgesprungene Glasteile	432
9.5.5	Bruch nach der Formgebung herrührend	433
9.6	Inhomogenität der Glasschmelzmasse	433

9.7	Wandstärkeverteilung	434
9.8	Nahtmarkierungen	437
9.8.1	Nahtmarkierungen an den Teilen des Glasbehälters	437
9.8.2	Messerschnittmarkierungen	439
9.8.3	Preßnähte	439
9.9	Gestaltfehler, Gewicht und Inhalt	441
9.9.1	Nicht fertiggeformte Teile von Hohl- und Preßgläsern	441
9.9.2	Gestaltfehler, entstehend nach der Formgebung	442
9.9.3	Maßhaltigkeit (Abmessungen, Gewicht, Inhalt)	443
9.10	Qualitätskontrolle	444
	Literatur	445
10	Formfehler an Flachglas (V. CAIMANN)	447
10.1	Einleitung	447
10.2	Formfehler, die allen Flachgläsern gemeinsam sind	448
10.3	Formfehler an Floatglas	452
10.4	Formfehler an gezogenen Flachgläsern (Maschinengläsern)	453
10.4.1	Formfehler an Fourcault-Glas	454
10.4.2	Formfehler an Libbey-Owens-Glas	454
10.4.3	Formfehler an Pittsburgh-Glas	455
10.5	Formfehler an geschliffenem und poliertem Walzglas	456
10.5.1	Formfehler, die durch den Walzvorgang entstehen	456
10.5.2	Formfehler, die durch das Schleifen verursacht werden	457
10.5.3	Formfehler, die durch das Polieren verursacht werden	459
10.6	Formfehler an anderen Walzglasprodukten	461
10.6.1	Formfehler an Drahtglas	462
10.6.2	Formfehler an Ornamentglas	464
10.6.3	Formfehler an Guß-Walzglas mit einer feuerpolierten Oberfläche	465
10.7	Formfehler an gebogenem Flachglas	466
10.8	Formfehler an Sicherheitsgläsern	468
10.8.1	Formfehler an thermisch gehärtetem Sicherheitsglas	468
10.8.2	Formfehler an Verbund-Sicherheitsglas	469
10.9	Formfehler, die durch mechanische Verletzungen der Oberflächen entstehen	470
10.10	Formfehler, die bei der Nachbearbeitung durch Schleifen entstehen	471
	Literatur	475
11	Chemische Veränderungen an der Oberfläche des Glases (A. PETERS, außer Abschnitt 11.3.2)	476
11.1	Einleitung	476
11.2	Veränderungen an der Oberfläche als Folge chemischer Reaktionen	478
11.2.1	Veränderungen unter Beteiligung von Wasser	478
11.2.1.1	Überschuß von Wasser	478
11.2.1.2	Unterschuß von Wasser (Feuchtigkeit)	482
11.2.1.3	Einige Prüfungen des Glases, insbesondere auf Erblindungsneigung und Fleckenbildung	488
11.2.2	Veränderungen unter Beteiligung von Säuren	489
11.2.2.1	Überschuß wäßriger Säuren	489
11.2.2.2	Gasförmiger Zustand („Hüttenrauch“)	490
11.2.3	Veränderungen unter Beteiligung von Laugen	492
11.2.3.1	Überschuß von Laugen	492
11.2.3.2	Unterschuß von Laugen	493
11.3	Spezielle unerwünschte chemische Wechselwirkungen mit der Glasoberfläche	493
11.3.1	Störungen der Benetzung der Glasoberfläche durch Wasser	493
11.3.2	Spezielle chemische Wechselwirkungen beim Floatglas (L. MERKER)	496

11.3.3	Reduktion von Schwermetalloxiden an der Oberfläche	498
11.3.4	Unerwünschte Abgaben von Ionen aus der Glasoberfläche („Bleilässigkeit“)	499
11.3.5	Veränderungen von Glasoberflächen nach Reinigung in Spülmaschinen	500
11.4	Technisch herbeigeführte chemische Veränderungen der Glasoberfläche	505
11.4.1	Ionenaustausch zur chemischen Härtung	505
11.4.2	Vergütung von Glas (besonders von Glasbehältnissen) durch Ionenaustausch mit Gasen (Erhöhung der Wasserbeständigkeit)	507
11.4.3	Vergütung von Glas durch Anlagern von Schichten	508
11.4.3.1	Siliconisieren der Innenoberfläche von Glasbehältnissen	509
11.4.3.2	Äußere Beschichtung von Glasbehältnissen zur Erhöhung der Stoßfestigkeit bzw. Verminderung der Oberflächenreibung	510
11.4.3.3	Schichten auf Flachglas zur Veränderung der optischen Eigenschaften	512
11.4.3.4	Weiteres über Schichten	512
11.5	Veränderung der Glasoberfläche nach thermischer Behandlung	514
	Literatur	517
12	Bruchentstehung und Bruchausbreitung im Glas (F. KERKHOF)	523
12.1	Theoretische Grundlagen aus der Bruchmechanik	523
12.1.1	Allgemeines über das Konzept der linearelastischen Bruchmechanik	523
12.1.2	Spannungen und Verschiebungen am Riß unter Beanspruchungsmodus I . .	525
12.1.3	Spannungen und Verschiebungen am Riß unter Beanspruchungsmodus II .	526
12.1.4	Der Spannungsintensitätsfaktor K_I für verschiedene Rißformen	526
12.1.4.1	Der Einzelriß in oder an einer Scheibe unter Zugspannung	527
12.1.4.2	Der Oberflächenriß an einer Scheibe unter Biegespannung	528
12.1.4.3	Der randferne elliptische Innenriß unter Zugspannung	529
12.1.4.4	Der halbelliptische Oberflächenriß unter Zugspannung	530
12.1.5	Spannungen bei der Überlagerung der Beanspruchungen I und II	531
12.1.6	Die K -Faktoren beim Zusammenwirken von Rissen	531
12.1.7	Der Energieumsatz bei Rißvergrößerung	532
12.2	Der elementare Prozeß der Bruchentstehung	533
12.3	Bruchentstehung unter verschiedenen statischen Belastungsarten	537
12.3.1	Bruchentstehung bei Zugversuchen an Glasfäden	537
12.3.2	Bruchentstehung durch Biegung	539
12.3.3	Bruchentstehung beim Bersten von Flaschen	540
12.3.4	Bruchentstehung unter Mitwirkung von vorübergehenden thermisch induzierten Spannungen	542
12.3.4.1	Praktische Beispiele	542
12.3.4.2	Versuche zur Erklärung der Entstehung thermisch induzierter Brüche	545
12.3.5	Bruchentstehung unter Mitwirkung von bleibenden thermisch induzierten Spannungen	548
12.3.5.1	Bruchentstehung unter Mitwirkung von Vorspannungen in einem einheitlichen Glase	548
12.3.5.2	Bruchentstehung infolge der Verspannung von Glas-Metall-Verbindungen .	551
12.3.6	Bruchentstehung durch Druckbelastung	553
12.4	Bruchentstehung unter Stoßbelastung	555
12.5	Die Bruchausbreitung	558
12.5.1	Die Richtung der Rißausbreitung; Rißflächenmodulation durch elastische Wellen	558
12.5.1.1	Ultraschall-Linien	559
12.5.1.2	Wallner-Linien	561
12.5.2	Die Größe der Rißausbreitungsgeschwindigkeit	565
12.6	Die Morphologie der Bruchfläche	566
12.6.1	Grenzlinien zwischen Teilrißfronten – Bruchhyperbeln, Bruchparabeln .	566
12.6.2	Lanzettbrüche	568
12.6.3	Halte- und Übergangslinien	571
12.6.4	Bruchverzweigung	572
12.6.5	Einige Beispiele typischer Bruchbilder	574
12.6.5.1	Die Biegebruchfläche	574

XVIII	Inhaltsverzeichnis	
12.6.5.2	Die Bruchfläche von vorgespanntem Glas	575
12.6.5.3	Die Seitenansicht von Rißsystemen in Scheiben	576
12.7.	Das „Schneiden“ des Glases (unter Mitarbeit von B. GÄNSWEIN)	577
12.8	Schleifen und Polieren des Glases (unter Mitarbeit von B. GÄNSWEIN)	582
	Literatur	584
13	Glas, „fehler“ als Dekor (H. JEBSEN-MARWEDEL)	588
	Literatur	591
	Sachverzeichnis	592