

# Inhaltsverzeichnis

<b>Teil I</b>	<b>Werkstoff Glas und Verfahren zur Aufdeckung seiner Fehlererscheinungen</b>	
<b>1</b>	<b>Einführung (H. JEBSEN-MARWEDEL)</b>	<b>3</b>
1.1	Glas als Sonderzustand der Materie	3
1.1.1	Der Werkstoff Glas als selbständiger thermodynamischer Zustand	4
1.1.2	Verzögerungserscheinungen am technischen Glas	4
1.1.3	Glasfehler als Durchlaufstadien von Raumteilen selbständiger thermodynamischer Systeme	5
1.2	Fabrikationsfehler als Technologie „pathologischer“ Ausnahmestände	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
<b>2</b>	<b>Eigenschaften der Glasschmelze und des Glases als Werkstoff (R. BRÜCKNER, außer Abschnitte 2.1.7.1, 2.2.5 und 2.2.6)</b>	<b>16</b>
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 $\alpha$ 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 $\alpha$ 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
<b>3</b>	<b>Verfahren zur Erkennung und Untersuchung von Glasfehlern – Überwachung der Produktion</b>	<b>76</b>
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 Schliere	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 (F. KERKHOF, außer Abschnitt 3.3.3) .....	106
3.3.1	Überblick über die Verfahren zur Untersuchung von Spannungen 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 – Rohstoff-, Qualitäts- und Produktionskontrolle .....	121
3.4.1	Allgemeine Bemerkungen zur Analytik des Glases (A. PETERS) .....	121
3.4.2	Untersuchung von Schlieren (L. MERKER) .....	123
3.4.2.1	Untersuchung von Schlieren anhand ihrer Gestalt .....	123
3.4.2.2	Untersuchung von Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -haltigen Schlieren anhand der Totalreflexion Glas/Schliere .....	124
3.4.2.3	Interferenzmikroskopische Untersuchung von Schlieren anhand ihrer Ätzbareit .....	125
3.4.2.4	Untersuchung von Schlieren durch örtliche Ermittlung ihrer 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 – 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 – modernere Verfahren .....	139
3.5.1	Untersuchung von Glasfehlern mit dem Transmissions- Elektronenmikroskop und Raster-Elektronenmikroskop (H. BACH) .....	139
3.5.1.1	Auflösungsvermögen, Schärfentiefe, Nachweisempfindlichkeit, Präparation 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 mit Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS) und der Spektralanalyse angeregter Strahlung (IBSCA oder SCANIR) (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. MÜLFINGER, 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. MÜLFINGER) .....	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 <sub>3</sub> ) .....	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
<b>5</b>	<b>Schmelzrelikte, Fremdkörper, „Steinchen“ und Entglasungen</b> (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) $\text{SiO}_2$ .....	271
5.2.2	Tonerde (Aluminiumoxid) $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	274
5.2.3	Zirkondioxid (Baddeleyit) $\text{ZrO}_2$ 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
<b>6</b>	<b>Schlieren (Glas in Glas) (R. BRÜCKNER) .....</b>	<b>309</b>
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

## XIV Inhaltsverzeichnis

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
<b>7</b>	<b>Wechselwirkung zwischen Glasschmelze und feuerfestem Material</b>	<b>358</b>
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--haltige Steine	359
7.1.2.2	SiO <sub>2</sub> -haltige Steine	359
7.1.2.3	Basische Steine	359
7.1.2.4	Zirkonsilicatsteine 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 Angriffsort 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

<b>8</b>	<b>Farbstich des Glases (L. MERKER, außer Abschnitt 8.4.4.2)</b>	<b>387</b>
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

<b>9</b>	<b>Form- und Oberflächenfehler an Hohl- und Preßglas (H. KRÜGER, E. WUNDERLICH, außer Abschnitt 9.4.11)</b>	<b>403</b>
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 (buckelige 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 (FR. HOLLI)	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
<b>10</b>	<b>Formfehler an Flachglas (V. CAIMANN) .....</b>	<b>447</b>
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
<b>11</b>	<b>Chemische Veränderungen an der Oberfläche des Glases (A. PETERS, außer Abschnitt 11.3.2) .....</b>	<b>476</b>
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	Unterschluß 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	Unterschluß 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 Ionen- austausch 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
<b>12</b>	<b>Bruchentstehung und Bruchausbreitung im Glas (F. KERKHOF) .....</b>	<b>523</b>
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

<b>XVIII</b>	<b>Inhaltsverzeichnis</b>	
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
<b>13</b>	<b>Glas,,fehler“ als Dekor (H. JEBSEN-MARWEDEL) .....</b>	<b>588</b>
	Literatur .....	591
	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>592</b>