

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	xix
Abkürzungsverzeichnis	xxvii
1 Einleitung	1
2 Glas im Bauwesen	5
2.1 Produktion von Flachglas – Ein historischer Überblick.....	5
2.2 Glas im konstruktiven Ingenieurbau	8
2.3 Chemie des Glases	11
2.3.1 Der Glaszustand	11
2.3.2 Chemische Zusammensetzung.....	14
2.3.3 Chemische Beständigkeit – Glaskorrosion	18
2.4 Floatglasherstellung.....	20
2.4.1 Allgemeines	20
2.4.2 Der Schmelzvorgang	22
2.4.3 Der Floatprozess	22
2.4.4 Beschichtung, Kühlung und Zuschnitt.....	24
2.5 Vorspannen von Glas	24
2.5.1 Thermisches Vorspannen von Glas	24
2.5.2 Chemisches Vorspannen von Glas	28
3 Oberflächendefekte auf Glas im Bauwesen	33
3.1 Allgemeines.....	33
3.2 Tribologische Beanspruchung der Glasoberfläche	34
3.3 Elementare Bestandteile eines Kratzers auf Glas	35
3.3.1 Grundlagen	35
3.3.2 Kontaktbereich und Verdichtungszone.....	37
3.3.3 Das laterale Risssystem.....	43
3.3.4 Das Tiefenriss- und das radiale Risssystem	45
3.4 Stand der Technik	46
3.4.1 Allgemeines	46
3.4.2 Optische Kratzanfälligkeit	47

3.4.3	Statisch wirksame Kratzanfälligkeit	50
3.4.4	Methoden zur Detektion und Charakterisierung von Kratzern auf Glas im Bauwesen	51
3.4.5	Sanierung von zerkratzten Glasoberflächen im Bauwesen	56
3.5	Stand der Forschung	58
3.5.1	Optische Kratzanfälligkeit	58
3.5.2	Statisch wirksame Kratzanfälligkeit	59
3.6	Ursachen für Kratzer auf Glas im Bauwesen	61
4	Bruchmechanische Grundlagen	67
4.1	Festigkeit – Definition im Zusammenhang mit dem Werkstoff Glas	67
4.2	Bruchverhalten von Glas	68
4.3	Grundlagen der linear-elastischen Bruchmechanik	70
4.4	Rissspitzennahfeld	73
4.4.1	Risse	73
4.4.2	Kerbähnliche Risse	75
4.5	Spannungsintensitätsfaktoren	76
4.5.1	Allgemein	76
4.5.2	Oberflächenrisse am halbinendlichen Körper	77
4.5.3	Ungleichmäßig beanspruchte Rissufer	79
4.5.4	Risse mit ausgerundeter Rissspitze	82
4.6	Mixed-Mode Beanspruchung	84
4.6.1	Allgemein	84
4.6.2	Bruchkriterium nach Erdogan & Sih	85
4.6.3	Bruchkriterium nach Richard	87
4.6.4	Vergleich der Bruchkriterien zu Mixed-Mode-Beanspruchungen	87
5	Subkritisches Risswachstum	89
5.1	Grundlagen des subkritischen Risswachstums	89
5.2	Molekularer Mechanismus der Spannungsrissskorrosion	90
5.3	Subkritisches Risswachstum in Glas	93
5.4	Einflüsse auf das subkritische Risswachstum	96
5.5	Rissheilung	97
5.6	Ermüdung von Glas	100
5.6.1	Experimentelle Methoden zur Bestimmung von Risswachstums- konstanten	100
5.6.2	Für das Bauwesen relevante Risswachstumskonstanten	101
5.6.3	Einfluss der Belastungsdauer auf die Glasfestigkeit	102
6	Festigkeit von Glas im Bauwesen	109
6.1	Statistische Auswertung experimentell ermittelter Biegefestigkeiten	109

6.1.1	Allgemeines	109
6.1.2	Lognormalverteilung	110
6.1.3	Weibull-Verteilung	110
6.1.4	Bestimmung der charakteristischen Biegefestigkeit	111
6.2	Bisherige Festigkeitsuntersuchungen von Gläsern im Bauwesen	114
6.3	Berücksichtigung von Risswachstumseffekten für Glas im Bauwesen	118
6.3.1	Allgemeines	118
6.3.2	Modifikationsbeiwerte für konstante Beanspruchungen	120
6.3.3	Modifikationsbeiwerte für stoßartige Beanspruchungen	124
7	Härte von Glas	129
7.1	Allgemeines	129
7.2	Historische Entwicklung der Härteprüfung	131
7.3	Einflüsse auf die Härtemessung	132
7.4	Verfahren zur Bestimmung der Härte	134
7.4.1	Herkömmliche Verfahren zur Bestimmung der Härte	134
7.4.2	Instrumentierte Eindringprüfung	138
7.5	Experimentelle Bestimmung der Eindringhärte von Glas	146
7.5.1	Allgemeines	146
7.5.2	Versuchsdurchführung	146
7.5.3	Auswertung von Eindringversuchen	150
7.6	Verfahren zur Bestimmung der Kratzbeständigkeit und Kratzhärte	154
8	Kontaktspannungen und Rissinitiierung	159
8.1	Allgemeines	159
8.2	Zeitabhängigkeit von Rissinitiierung und -wachstum	160
8.3	Analytische Beschreibung des Kontaktvorganges	160
8.3.1	Allgemeines	160
8.3.2	Elastische Kontaktspannungen	163
8.3.3	Infolge Materialverdichtung induzierte Eigenspannungen	169
8.4	Bruchmechanische Betrachtung der Rissinitiierung	177
8.4.1	Entwicklung von Tiefenrissen	177
8.4.2	Entwicklung von Lateralrissen	186
8.4.3	Analogiemodelle zum Einfluss der thermischen und chemischen Eigenspannung	192
9	Experimentelle Untersuchungen zur Kratzanfälligkeit von Glas im Bau- wesen	197
9.1	Allgemeines	197
9.2	Versuchseinrichtungen	197
9.2.1	Spannungsoptische Messungen an Glas	197

9.2.2	Fluoreszierende Eindringprüfung	199
9.2.3	Kratzversuche	201
9.2.4	Doppelring-Biegeversuche.....	209
9.2.5	Optische Dokumentation und numerisches Postprocessing	217
9.3	Versuchskonzept und -durchführung	218
9.3.1	Vorbemerkungen	218
9.3.2	Spannungsoptische Voruntersuchungen	218
9.3.3	Optische Charakterisierung von Oberflächendefekten real genutzter Verglasungen	220
9.3.4	Untersuchungen zur optischen Kratzanfälligkeit	223
9.3.5	Untersuchungen zur statisch wirksamen Kratzanfälligkeit	225
9.4	V Versuchsergebnisse	232
9.4.1	Ergebnisse der spannungsoptischen Messungen der Oberflächen- druckspannung.....	232
9.4.2	Ergebnisse der optischen Charakterisierung realer Oberflächende- fekte auf Einscheibensicherheitsglas	235
9.4.3	Ergebnisse der Untersuchungen zur optischen Kratzanfälligkeit.....	240
9.4.4	Ergebnisse der Untersuchungen zur statisch wirksamen Kratzan- fälligkeit	251
10	Ätzen und Sanierung von Glas	279
10.1	Allgemeines.....	279
10.2	Grundlagen der Glasätzerei	279
10.3	Ätzverfahren	281
10.4	Molekulare Betrachtung des Ätzvorgangs.....	282
10.5	Festigkeit geätzter Glasoberflächen	284
10.6	Anwendungspotenziale geätzter Glasoberflächen im Bauwesen.....	287
10.7	Experimentelle Untersuchungen zur Sanierung von Glas im Bauwesen.....	288
10.7.1	Vorbemerkungen	288
10.7.2	Versuchsreihe SP.1 – Abrasives Polieren.....	288
10.7.3	Versuchsreihe SP.2 – Lokales Ätzen mit Flusssäure.....	289
10.8	Ergebnisse der Untersuchungen zur Sanierung von Glas im Bauwesen	290
10.8.1	Allgemeines	290
10.8.2	Ergebnisse der Versuchsreihe SP.1 – Abrasives Polieren.....	290
10.8.3	Ergebnisse der Versuchsreihe SP.2 – Lokales Ätzen mit Flusssäure ..	292
11	Zusammenfassung und Ausblick	301
	Literaturverzeichnis	307

Anhang A – Analytische Lösungsansätze zur Berechnung von Kontaktspannungen	331
A.1 Elastische Kontaktspannungsfelder	331
A.1.1 Singulärer Kontakt durch Einzellast nach Boussinesq und Mindlin ..	331
A.1.2 Sphärischer Kontakt nach Hertz	336
A.1.3 Konischer Kontakt nach Sneddon	338
A.2 Inelastische Kontaktspannungsfelder	340
Anhang B – Wechsel der Basis mehraxialer Spannungszustände	343
Anhang C – Messwerte der Nanohärtemessungen	349
Anhang D – MATLAB-Routine zur Bestimmung der lateralen Rissbreite	359
Anhang E – Einzelmesswerte der lateralen Rissbreiten	367
Anhang F – Einzelmesswerte der Biegeversuche	377
F.1 Versuchsreihe SK – Statisch wirksame Kratzanfälligkeit	377
F.2 Versuchsreihe SP – Sanierung von Glas	401
Anhang G – Arbeiten mit Flusssäure: Hinweise zum Arbeitsschutz	405