

Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen | Band 64

Steffen Müller-Braun

Risssystem und Festigkeit der geschnittenen Kante von Floatglas

 Springer Vieweg

Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen

Band 64

Reihe herausgegeben von

Ulrich Knaack, Darmstadt, Deutschland

Jens Schneider, Darmstadt, Deutschland

Johann-Dietrich Wörner, Darmstadt, Deutschland

Stefan Kolling, Gießen, Deutschland

Institutsreihe zu Fortschritten bei Mechanik, Werkstoffen, Konstruktionen, Gebäudehüllen und Tragwerken. Das Institut für Statik und Konstruktion der TU Darmstadt sowie das Institut für Mechanik und Materialforschung der TH Mittelhessen in Gießen bündeln die Forschungs- und Lehraktivitäten in den Bereichen Mechanik, Werkstoffe im Bauwesen, Statik und Dynamik, Glasbau und Fassadentechnik, um einheitliche Grundlagen für werkstoffgerechtes Entwerfen und Konstruieren zu erreichen. Die Institute sind national und international sehr gut vernetzt und kooperieren bei grundlegenden theoretischen Arbeiten und angewandten Forschungsprojekten mit Partnern aus Wissenschaft, Industrie und Verwaltung. Die Forschungsaktivitäten finden sich im gesamten Ingenieurbereich wieder. Sie umfassen die Modellierung von Tragstrukturen zur Erfassung des statischen und dynamischen Verhaltens, die mechanische Modellierung und Computersimulation des Deformations-, Schädigungs- und Versagensverhaltens von Werkstoffen, Bauteilen und Tragstrukturen, die Entwicklung neuer Materialien, Produktionsverfahren und Gebäudetechnologien sowie deren Anwendung im Bauwesen unter Berücksichtigung sicherheitstheoretischer Überlegungen und der Energieeffizienz, konstruktive Aspekte des Umweltschutzes sowie numerische Simulationen von komplexen Stoßvorgängen und Kontaktproblemen in Statik und Dynamik.

Weitere Bände in der Reihe <https://link.springer.com/bookseries/13824>

Steffen Müller-Braun

Risssystem und Festigkeit der geschnittenen Kante von Floatglas

Steffen Müller-Braun
Mainhausen, Deutschland

Vom Fachbereich 13 – Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Steffen Müller-Braun aus Frankfurt am Main.

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider

2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Kolling

Tag der Einreichung: 15. Juni 2021

Tag der mündlichen Prüfung: 26. August 2021

Darmstadt 2021

ISSN 2512-3238

ISSN 2512-3246 (electronic)

Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen

ISBN 978-3-658-36790-9

ISBN 978-3-658-36791-6 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-36791-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Ralf Harms

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Danksagung

Meine Promotion war ein prägender und wichtiger Abschnitt in meinem Leben. Dies lag vor allem an dem Umfeld in dem ich meine Arbeit anfertigen konnte. Es war für mich ein großes Glück, dass Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider es mir ermöglichte, am Institut für Statik und Konstruktion zu arbeiten. Er hat mich gefordert, unterstützt und stand mir mit fachlichem Rat zur Seite.

Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Kolling von der Technischen Hochschule Mittelhessen hat mir als Korreferent wichtigen Input und Motivation gegeben. Insbesondere durch ein gemeinsames Forschungsprojekt entstand ein sehr hilfreicher Austausch.

Alle MitarbeiterInnen am Institut haben für mich dazu beigetragen, dass diese Zeit sehr besonders und äußerst positiv war. Neben dem Arbeitsalltag, sei es Lehre oder die Bearbeitung von Forschungsprojekten, war auch immer Platz für persönliches, sodass auch einige Freundschaften entstanden sind. Miri, Matthias, Andi, Andrei, Joschi, Stephan, Johannes, Kerstin, Louisa, Christopher, Dave und Carina, Ihr seid klasse! Durch Überschneidungen der Promotionsthemen, schlichtes Interesse an der Thematik des Gegenübers oder als SchreibtischnachbarIn ergaben sich viele spannende und lehrreiche Diskussionen. Doktorandenseminare und Ski-Ausfahrten haben mit Euch erst richtig Laune gemacht!

Die Studierenden waren ebenfalls ein wesentlicher und wichtiger Bestandteil in meiner Zeit am Institut. Die Betreuung hat mir immer viel Spaß bereitet und sorgte auch für neue Betrachtungswinkel auf die eigene Arbeit.

Meine Eltern, meine beiden Schwestern und Freunde waren und sind ein wichtiger Anker in meinem Leben. Ich konnte immer zu Ihnen kommen, mir Rat holen oder Luft ablassen. Wenn ich mal wieder vor lauter Aufgaben den Überblick verlor, konnte die Devise – Eins nach dem Anderen – mich wieder in die Spur setzen.

Als Hauptleidtragende, vor allem in der letzten Schreibphase, ist Sabine zu nennen. Trotz meiner schwankenden Laune hat Sie mich in dieser Zeit geheiratet und zudem das Korrekturlesen übernommen. Sie hat mich ermutigt, unterstützt und auch Druck gemacht, was hin und wieder wirklich nötig war. Ich freue mich riesig auf die gemeinsame, familiäre, hoffentlich stressfreiere weitere gemeinsame Zeit mit Dir!

Ich danke allen genannten Menschen von ganzem Herzen für die geniale Zeit, den Rat und die Unterstützung!

Kurzfassung

Glas muss bei der Herstellung und Weiterverarbeitung geschnitten werden. Der bisherige Wissensstand geht pauschal davon aus, dass die Festigkeit an der Kante gegenüber der Oberfläche durch den Schneidprozess vermindert ist. Der zugrunde liegende Mechanismus ist jedoch nicht vollumfänglich verstanden. Diese Arbeit setzt hier an indem sie zum einen auf das Rissystem infolge des Schneidvorgangs eingeht und zum anderen aufzeigt, dass eine pauschale Abminderung der Festigkeit nicht nötig ist. Damit einhergehend werden optische Eigenschaften herausgearbeitet, welche zur Qualitätssicherung herangezogen werden können.

Durch theoretische Betrachtungen sowie experimentelle Untersuchungen des Rissystems werden die grundsätzlichen Zusammenhänge aufgezeigt und nachvollzogen. Unterhalb des Schneidrädchens stellt sich eine fragmentierte und verdichtete Zone ein, von der aus der Medianriss senkrecht in das Glas hineinläuft. Dieser Medianriss ist der für den anschließenden Brechvorgang benötigte Bestandteil des Rissystems. Als Begleiterscheinung können zudem Lateralrisse seitlich zur Schnittspur parallel und minimal unter der Glasoberfläche entstehen. Die neue wesentliche Erkenntnis liegt in der Charakterisierung der sogenannten sekundären Radialrisse, welche bei Eindringversuchen mittels Schneidrädchen beobachtet werden können. Diese verlaufen schräg von der Schnittspur weg und können aufgrund ihrer Orientierung für die Festigkeitsminderung verantwortlich gemacht werden. Diese Risse sind ausschließlich gemeinsam mit Lateralrisse zu beobachten.

Umfangreiche zerstörende Prüfungen dienen dazu die Schneidparameter hinsichtlich ihres Einflusses auf die Kantenfestigkeit zu untersuchen und zu optimieren. Die Schneidradgeometrie und der Schneiddruck werden so als die wesentlichen Einflussfaktoren identifiziert. Durch eine geeignete Wahl der Parameter ist es zudem möglich die Kantenfestigkeit nachhaltig und reproduzierbar zu erhöhen.

Mikroskopische Betrachtungen führen zu der Erkenntnis, dass die Ausprägung der Lateralrisse an der geschnittenen Kante ein entscheidendes Kriterium zur Beurteilung der mechanischen Qualität darstellen. Je größer der Lateralriss ist, umso geringer ist die Kantenfestigkeit. Auf Basis umfassender Versuchsergebnisse und deren statistischer Auswertung wird hieraus ein Konzept erarbeitet, welches durch optische Untersuchungen der geschnittenen Kante eine Zuordnung zu einer Kantenfestigkeitsklasse ermöglicht.

Abstract

Glass has to be cut during production and further processing. The current scientific knowledge assumes that the process of cutting glass weakens the strength of the edge compared to the surface, but this mechanism is not yet fully explored and understood. This work aims to address the cracking system resulting from the cutting process and to show that a general reduction of the strength is not necessary. In addition, optical characteristics are elaborated which can be used for visual quality controls.

By theoretical considerations as well as experimental investigations of the crack system the main correlations can be shown and comprehended. Below the cutting wheel, a fragmented and compacted zone develops, from which the median crack extends vertically into the glass. This median crack is the part of the crack system which is required for the subsequent breaking process. As a collateral effect, lateral cracks can also develop sideways to the cut line parallel to and minimally below the glass surface. The new essential aspect is the characterization of the so-called secondary radial cracks, which can be observed during indentation tests by using cutting wheels. These cracks extend oblique to the cut line and, because of their orientation, can be responsible for the reduction of strength. These cracks are observed only in combination with lateral cracks.

In this work, Comprehensive destructive tests are used to investigate and optimize the cutting process parameters regarding their influence on the edge strength. The cutting wheel geometry and the cutting pressure are thereby identified as the essential factors. By a suitable choice of parameters, it is also possible to increase the edge strength in a sustainable and reproducible way.

Microscopic examinations show that the extent of the lateral cracks at the cut edge is a decisive criterion for the assessment of the mechanical quality. An increase in lateral crack size results in a decrease in edge strength. On the basis of comprehensive test results and their statistical evaluation, a concept is developed which allows an assignment to an edge strength class by visual examination of the cut edge.

Résumé

Lors de sa fabrication et son traitement ultérieur le verre doit être découpé. Les connaissances actuelles partent généralement du principe que la solidité au niveau de l'arête de la coupe par rapport à la surface est réduite par le processus de découpe. Le mécanisme sur lequel repose ce principe n'est cependant pas entièrement compris. C'est justement là le rôle du présent travail qui aborde d'une part le système de fissures dans le contexte du processus de découpe et d'autre part démontre qu'une réduction générale de la solidité n'est pas nécessaire. Parallèlement, il met en évidence des propriétés optiques qui peuvent être utilisées pour l'assurance qualité.

Les relations fondamentales sont mises en évidence et étudiées par des réflexions théoriques et des examens expérimentaux. Sous la molette de coupe s'établit une zone fragmentée et comprimée, à partir de laquelle la fissure médiane s'étend verticalement dans le verre. Cette fissure médiane est l'élément du système de fissures nécessaire à l'opération de concassage qui suit. En tant que phénomène concomitant, des fissures latérales peuvent apparaître à partir de la trace de coupe, parallèlement et à peine sous la surface du verre. La nouvelle connaissance essentielle réside dans la caractérisation des dites fissures radiales secondaires, qui peuvent être observées lors d'essais de pénétration au moyen de molettes de coupe. Celles-ci s'étendent en biais de la trace de coupe et en raison de leur orientation peuvent être tenues responsables de la diminution de la solidité. L'apparition de ces fissures est observée exclusivement en même temps qu'avec celle des fissures latérales.

Des contrôles destructifs étendus servent à examiner et à optimiser les paramètres de coupe quant à leur influence sur la solidité des arêtes. La géométrie de la molette de coupe et la pression de coupe sont ainsi identifiées comme les principaux facteurs d'influence. En outre, grâce à un réglage approprié des paramètres, il est possible d'augmenter la solidité des arêtes de coupe de manière durable et reproductible. Des observations microscopiques permettent de conclure que la taille des fissures latérales à l'arête de la coupe constitue un critère décisif pour évaluer la qualité mécanique. Plus la fissure latérale est grande, plus la solidité de l'arête est faible. Sur la base de résultats d'essais étendus et de leur évaluation statistique, un concept est élaboré, qui permet d'attribuer une classe de solidité des arêtes par des examens optiques de l'arête de coupe.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Stand der Forschung	3
1.3 Zielsetzung.....	6
1.4 Aufbau der Arbeit	7
1.5 Begriffsklärung	8
2 Grundlagen	11
2.1 Werkstoff Glas.....	11
2.1.1 Eigenschaften von Glas im Bauwesen.....	11
2.1.2 Versagen von Glas.....	13
2.1.3 Herstellung und Weiterverarbeitung von Floatglas.....	17
2.2 Zuschnitt von flachen Glasprodukten	20
2.2.1 Allgemeines.....	20
2.2.2 Schneiden durch Anritzen und Brechen	20
2.2.3 Wasserstrahlschneiden	21
2.2.4 Laserschneiden	22
2.3 Kantenbearbeitung von Floatglas.....	25
2.4 Optische Untersuchungsmethoden.....	28
2.4.1 Fraktografie	28
2.4.2 Spannungsoptik	31
2.5 Statistische Methoden	35
3 Industrieller Glaszuschnitt mittels Schneidrädchen	43
3.1 Industrieller Schneidprozess	43
3.2 Eigenschaften des Schneidrädchens.....	45
3.3 Mechanik des Brechvorgangs.....	48
3.4 Eigenschaften ausgewählter Schneidparameter	52
3.4.1 Schneidkraft	52
3.4.2 Schneidgeschwindigkeit.....	52
3.4.3 Schneidflüssigkeit	53
3.4.4 Schneidunterlage	54

3.4.5	Umgebungsbedingungen	55
3.5	Einfluss des Glases auf den Schneidprozess	55
4	Risssystem der geschnittenen Glaskante	57
4.1	Bestandteile des Risssystems	57
4.1.1	Zusammenfassende Darstellung des Risssystems	57
4.1.2	Fragmentierte Zone	59
4.1.3	Medianriss	60
4.1.4	Lateralriss	60
4.1.5	Radialriss	61
4.1.6	Sekundärer Radialriss	62
4.2	Analytische Betrachtung der Spannungsverteilung im Glas unterhalb des Schneidrädchens	62
4.3	Geometrische Beschreibung des Eindrucks des Schneidrädchens in die Glasoberfläche	74
4.4	Betrachtung der Eigenspannungen im Risssystem mittels Polfilteraufnahmen	79
4.5	Rissfrontlinien des Medianrisses	83
4.6	Welligkeit des Medianrisses	84
4.7	Zeitabhängiges Wachstum der Lateralrisse	88
4.8	Einfluss des Schnittöffnens auf das Risssystem	91
4.9	Eindringversuche mittels Schneidrädchen	92
4.9.1	Ziel der Eindringversuche	92
4.9.2	Versuchsaufbau	93
4.9.3	Prüfprogramm	94
4.9.4	Ergebnisse	95
4.9.5	Auswertung der Härte	101
4.10	Bruchversuche an durch Eindruck mit Schneidrädchen vorgeschädigtem Floatglas	104
4.10.1	Ziel der Bruchversuche	104
4.10.2	Versuchsumfang und Durchführung	105
4.10.3	Ergebnisse	107
4.11	Zusammenfassung	110
5	Untersuchungen zur Festigkeit der geschnittenen Glaskante	113
5.1	Zerstörende Festigkeitsprüfungen	113
5.1.1	Vorarbeiten und Überlegungen zum Umfang der zerstörenden Festigkeitsprüfungen	113
5.1.2	Umfang der zerstörenden Festigkeitsprüfungen	122
5.1.3	Versuchsaufbau und Durchführung	126
5.1.4	Ergebnisse	129
5.2	Bruchspiegelanalysen	142

5.2.1	Motivation für die Bruchspiegelanalysen	142
5.2.2	Umfang und Durchführung der Bruchspiegelanalysen	143
5.2.3	Ergebnisse	147
5.3	Zusammenfassung	151
6	Optische Untersuchungen der geschnittenen Glaskante	153
6.1	Motivation für die optischen Untersuchungen	153
6.2	Optische Charakteristika der geschnittenen Glaskante	153
6.3	Aufnahmesetup und Auswertung der optischen Untersuchungen.....	155
6.3.1	Allgemeines zu den durchgeführten Untersuchungen	155
6.3.2	Aufnahmesetup und Auswertungsmethode A	157
6.3.3	Aufnahmesetup und Auswertungsmethode B	159
6.4	Umfang der optischen Untersuchungen	161
6.5	Ergebnisse der optischen Untersuchungen.....	164
6.5.1	Abhängigkeiten Medianriss.....	164
6.5.2	Abhängigkeiten Lateralriss.....	168
6.5.3	Einfluss der Schneidflüssigkeit auf die Auswertung	171
6.6	Korrelative Betrachtung der Festigkeit und optischer Auswertung	173
6.7	Optische Festigkeitsklassen	177
6.8	Zusammenfassung	182
7	Fazit und Ausblick	185
	Literaturverzeichnis	189
	Anhang	197
A.1	Eindringversuche mittels Schneidrädchen	197
A.1.1	Dokumentation der mikroskopischen Aufnahmen	197
A.1.2	Versuchsergebnisse	203
A.2	Bruchversuche an durch Eindruck mit Schneidrädchen vorgeschädigtem Floatglas.....	207
A.2.1	Dokumentation der mikroskopischen Aufnahmen	207
A.2.2	Versuchsergebnisse	211
A.3	Zerstörende Festigkeitsprüfungen	212
A.4	Bruchspiegelanalysen	215
A.5	Ergebnisse der optischen Untersuchungen.....	218

Abkürzungen und Formelzeichen

AK	Arbeitskreis
ESG	Einscheibensicherheitsglas
EVA	Ethylenvinylacetat
FKG	Fachverband Konstruktiver Glasbau e.V.
HM	Hartmetall
KFK	Kantenfestigkeitsklasse
KG	geschnittene Kante
KGN	geschliffene Kante
KGS	gesäumte Kante
KMG	maßgeschliffene Kante
KPO	polierte Kante
LBM	Lichtbildmikroskop
MPA	Materialprüfanstalt
PKD	Polykristalliner Diamant
PMMA	Polymethylmethacrylat
PVB	Polyvinylbutyral
REM	Rasterelektronenmikroskop
SCALP	Scattered Light Polariscopes
SR	Schneidrad
TVG	Teilvorgespanntes Glas
VG	Verbundglas
VSG	Verbundsicherheitsglas
WP	WIPANO (Förderprogramm Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen)
a	Kontaktradius des Eindrucks
A	Fläche
$A_{E,p}$	projizierte Kontaktfläche des Eindrucks
A_h	Bruchspiegelkonstante bezogen auf den Übergang "mist"- "hackle"
A_m	Bruchspiegelkonstante bezogen auf den Übergang "mirror"- "mist"

b_E	Eindringbreite
c	Risstiefe
$c_{f, \text{inert}}$	kritische Risstiefe unter inerten Bedingungen
c_i	Initialrisstiefe
C	Spannungsoptische Konstante
d	Glasdicke
d_{SR}	Schneidradbohrungsdurchmesser
D_{SR}	Schneidradaußendurchmesser
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft, Prüfkraft
F_E	Eindringkraft
f_k	charakteristische Festigkeit
h_E	Eindringtiefe
$h_{E,g}$	gesamte Eindringtiefe inklusive elastischer Verformung
$h_{E,p}$	bleibende Tiefe des Eindrucks
H_{IT}	Eindringhärte
HK	Härte nach Knoop
HV	Härte nach Vickers
k_D	Drehfedersteifigkeit
K	Spannungsintensitätsfaktor
K_I	Spannungsintensitätsfaktor für Modus I
K_{10}	Ermüdungsschwelle
K_{Ic}	Bruchzähigkeit
l_E	Eindringlänge
L	Lateralrisbreite
M	Medianrisstiefe
n	Probenanzahl
n_B	Brechungsindex
N	Risswachstumsparameter
p_m	mittlere Kontaktspannung
P_f	Versagenswahrscheinlichkeit
r_{BU}	Abstand des Bruchursprungs entlang der Glasoberfläche zum geschnittenen Rand
r_h	Bruchspiegelradius bezogen auf den Übergang "mist"- "hackle"
r_m	Bruchspiegelradius bezogen auf den Übergang "mirror"- "mist"
R^2	Bestimmtheitsmaß
s	Standardabweichung

s_e	Standardfehler der Schätzung
S	Gangunterschied
t	Zeit
$t_{f,s}$	Lebensdauer
t_{SR}	Schneidraddicke
u	Verformung
v	Rissgeschwindigkeit
v_0	Initialrissgeschwindigkeit
Y	Geometriefaktor
α	Temperaturausdehnungskoeffizient
β	Lageparameter der Weibullverteilung
γ	untere Grenze der dreiparametrischen Weibull-Verteilung
δ_{SR}	Schneidradwinkel
ε	Residuum
ε_s	standardisiertes Residuum
κ	Wärmeleitfähigkeit
λ	Formparameter der Weibullverteilung
λ_L	Wellenlänge
μ	Erwartungswert
ν	Querdehnzahl
ρ	Dichte
σ	Spannung
σ_0	Eigenspannung/ Vorspannung
σ_1	erste Hauptspannung
σ_2	zweite Hauptspannung
σ_f	Bruchspannung
$\sigma_{f,inert}$	inerte Bruchspannung
$\sigma_{f,s}$	statische Zeitstandfestigkeit
τ	Schubspannung

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Zuschnitt von Flachglas stellt einen wesentlichen Prozessschritt bei der Bearbeitung von Glas im Bauwesen dar. Das etablierteste Verfahren ist der Zuschnitt mittels Schneidrädchen. Weitere Verfahren wie Laserschneiden oder Wasserstrahlschneiden spielen im Bauwesen eine untergeordnete Rolle. Eine rein geschnittene Kante (Abbildung 1.1 b)) ist die einfachste Art der Kantenbearbeitung. Weitere Bearbeitungsschritte können Säumen der Ränder, Schleifen oder Polieren sein (Abbildung 1.1 a)).

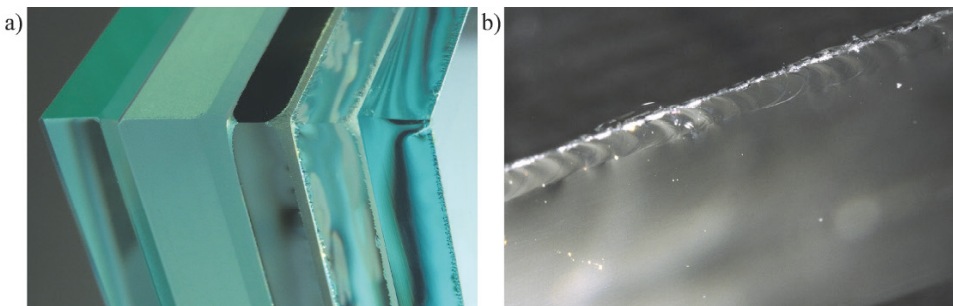


Abbildung 1.1 a) Verschiedene Arten der Kantenbearbeitung: von links nach rechts: poliert (KPO), geschliffen (KGN), gesäumt (Hersteller A) (KGS), gesäumt (Hersteller B) (KGS), geschnitten (KG), b) Mikroskopaufnahme einer geschnittenen Kante eines 4 mm dicken Glases

Insbesondere bei Isoliergläsern kommt vorzugsweise nicht vorgespanntes Floatglas mit nicht weiter bearbeiteter, geschnittener Kante zum Einsatz. Im eingebauten Zustand sind hier die Kanten in der Regel verdeckt und es besteht kein Verletzungsrisiko. Zudem spielt hier die optische Qualität der Kante eine untergeordnete Rolle. Steht die Kante jedoch bei Belastung unter einer Zugspannung muss hierauf ein besonderes Augenmerk gelegt werden. Eine Beanspruchung der Kante auf Zug ist zum Beispiel bei zweiseitiger Lagerung oder bei thermischen Einwirkungen zu berücksichtigen.

Gerade im Fall von thermischen Einwirkungen kommt es immer wieder zu Schadensfällen (Abbildung 1.2), die neben der teilweise ungeklärten Einwirkungsseite

oder nicht sachgemäßen Einbaus ihren Ursprung in der Schädigung durch die Kantenbearbeitung haben können.



Abbildung 1.2 Typisches Bruchbild bei Versagen infolge thermisch induzierter Spannungen

Es ist allgemein bekannt, dass die Bearbeitung der Kante die Festigkeit beeinflusst. So wird normativ in der Regel für die Bemessung bei thermisch nicht vorgespanntem Floatglas die Zugfestigkeit der Kante gegenüber der Flächenfestigkeit abgemindert. Gemäß DIN 18008-1 (2010) beträgt diese Abminderung 20%. Der aktuelle Entwurf des Eurocode für die Bemessung von Glas (CEN-TS Structural Glass) schlägt eine Abminderung der Flächenfestigkeit für geschnittene und gesäumte Kanten von 30%, für geschliffene Kanten von 20% und für polierte Kanten von 10% vor. Grundsätzlich zeigt dies, dass die Problematik einer verminderten Kantenfestigkeit schon lange bekannt ist und Berücksichtigung findet.

Bei der Verwendung von thermisch vorgespanntem Glas (TVG, ESG) ist keine Abminderung nötig, da hier die durch den Vorspannprozess eingebrachte Druckeigenspannung die Zugfestigkeit bestimmt und die Schädigungen an der Kante eine untergeordnete Rolle spielen. Der Vorspannprozess ist jedoch sehr energieintensiv und es können zudem qualitätsmindernde Erscheinungen wie roller waves oder Anisotropien auftreten.

Aktuell liegt der Fokus beim industriellen Schneiden auf der Optimierung eines stabilen Prozesses mit dem Ziel eines möglichst geringen Ausschusses aufgrund mangelnder optischer Qualität der Kante. Aufgrund des geringen Wissens hinsichtlich der Festigkeit der geschnittenen Kante wird dies im industriellen Prozess aktuell nicht berücksichtigt. Einige wissenschaftliche Veröffentlichungen beschäftigen sich mit der Kantenfestigkeit von Floatglas, wobei hier die Glaskanten mit unterschiedlichen Bearbeitungsarten und ohne genauere Differenzierung der jeweiligen Prozessparameter betrachtet werden. Der Prozess des Glasschneidens in Bezug auf die Festigkeit ist noch

nicht in der Tiefe untersucht, weshalb dies in der Praxis keine Verwendung findet. Da der Zuschnitt des Glases den ersten Prozessschritt in der Kantenbearbeitung darstellt muss dieser zunächst so detailliert verstanden werden, dass Untersuchungen zu weiteren Bearbeitungsschritten bezüglich der Kantenfestigkeit darauf aufbauen können.

Der Arbeitskreis "Kantenfestigkeit" des Fachverbandes Konstruktiver Glasbau e.V. (FKG) beschäftigt sich mit der Fragestellung, inwieweit eine erhöhte Kantenfestigkeit durch eine gezielte Steuerung der Prozessparameter erreicht werden kann. Erste Ergebnisse zeigten, dass die Festigkeiten der unterschiedlichen Kantenbearbeitungen stark streuen und vom Hersteller abhängig sind. Weiterhin konnte beobachtet werden, dass bei der geschnittenen Kante einige Hersteller bessere Kantenfestigkeiten liefern konnten als andere. Mit diesem Hintergrund entstanden durch die Mitarbeit im Arbeitskreis die Fragestellung und Motivation zu dieser Arbeit.

Das Verständnis inwieweit das Rissystems der geschnittenen Kante mit der Festigkeit zusammenhängt ist von zentraler Bedeutung. Mit diesem Wissen können optische Methoden dazu genutzt werden zerstörungsfreie Prüfungen zu entwickeln. Da die Prozessparameter die Steuermöglichkeit für die Eigenschaften der Kante darstellen, ist der Zusammenhang hierzu von besonderem Interesse.

1.2 Stand der Forschung

Im Hinblick auf die geschnittene Kante, das Rissystem und den Bezug zur Festigkeit werden im Folgenden die wesentlichen, wissenschaftlichen Veröffentlichungen kurz dargestellt.

Für das Verständnis des Rissystems können zunächst Eindringversuche ohne Bewegung des Eindringkörpers auf der Oberfläche betrachtet werden. LAWN et al., 1980 untersuchten dies mittels eines Vickersdiamanten (Pyramidenförmiger Eindringkörper). Hierbei wurden Medianrisse, die direkt unterhalb des Eindringkörpers senkrecht zur Glasoberfläche entstehen sowie Radialrisse, die ebenfalls senkrecht zur Glasoberfläche jedoch seitlich vom Eindringkörper entstehen, beobachtet und zudem durch bruchmechanische Ansätze beschrieben. MARSHALL et al., 1982 ergänzen diese Untersuchung mit der Beschreibung von Lateralissen, die parallel zur Glasoberfläche und etwas unterhalb der Glasoberfläche ebenfalls bei einem Eindringversuch mittels Vickersdiamant entstehen. Auch hier wurden bruchmechanische Ansätze diskutiert. COOK & ROACH, 1986 beobachteten ebenfalls mit einem Vickersindenter, dass diese Lateralisse wachsen können. Insbesondere bei hohen Indentationslasten ist dieses Risswachstum verstärkt festzustellen. Wie gezeigt werden konnte, steht das Rissystem unter Eigenspannungen welche durch dieses Risswachstum auch wieder abgebaut werden. Sind hohe Eigenspannungen vorhanden, so ist die Bruchspannung bei zerstörenden Prüfungen geringer. Nach Abbau dieser Eigenspannungen konnten höhere Bruchspannungen

festgestellt werden. COOK & PHARR, 1990 beschrieben zudem das zuvor erläuterte Rissssystem ganzheitlich und stellten dieses klar strukturiert dar. Zudem wurden hier "sekundäre Radialrisse" beschrieben. SCHULA, 2015 betrachtete zudem das Verhalten wenn ein Eindringkörper, unter anderem in Form von verschiedenen Diamantspitzen, über die Glasoberfläche bewegt wird und ein Kratzer entsteht. Das hierbei entstehende Rissssystem lässt sich durch die zuvor erwähnten Risse gut erklären. LEVENGOOD, 1958 verwendete zusätzlich zu einem Diamanten ein Schneidrad zur Schädigung der Glasoberfläche. Er untersuchte dabei den Zusammenhang zwischen dem entstehenden Medianriss und der Bruchspannung im Dreipunkt-Biegeversuch. Er konnte feststellen, dass sich bei diesen großen Schädigungen dieser Zusammenhang linear annähern lässt. Im Vergleich dazu ergab sich aus bruchmechanischer Sicht bei sehr kleinen Schädigungen ein exponentieller Zusammenhang mit dem Exponenten $-1/2$. Zudem stellte er Rissheilungseffekte in Abhängigkeit des umgebenden Mediums fest.

Betrachtet man die geschnittene Kante, so haben HOLLAND & TURNER, 1937 Untersuchungen zur Festigkeit beim Schneiden mittels Diamanten, wiederhergerichtetem Diamanten und Schneidrad durchgeführt. Zur Bruchspannungsermittlung wurde ein Dreipunkt-Biegeversuch verwendet und die Proben wurden flach geprüft. Hierbei wurde beobachtet, dass das Schneidrad die tiefsten Medianrisse erzeugt und gleichzeitig die niedrigste Festigkeit liefert. Neben der geschnittenen Kante wurden hier auch geschliffene, polierte und feuerpolierte Kanten untersucht. Weiterhin stellten JONES & BLAIR, 1938 bezüglich des Schneidvorgangs fest, dass die Zeit zwischen Schneiden und Schnittöffnung Einfluss auf die Durchführbarkeit der Schnittöffnung hat. Je mehr Zeit vergeht, umso schlechter lässt sich der Schnitt öffnen. Der Schnitt "erkaltet". Zudem wurde berichtet, dass der Druck auf den Diamanten beim Schneiden ebenfalls Einfluss auf die Durchführbarkeit der Schnittöffnung hat. In dem Bericht wurde folglich von einem "günstigen Ritzdruck" geschrieben. Eine umfassende Darstellung des Schneidvorgangs mit Diamant und Schneidradchen wurde von JEBSEN-MARWEDEL & VON STÖSSER, 1939 veröffentlicht. Das grundsätzlich entstehende Rissssystem mit Lateralriss und Medianriss wurde aufgezeigt. Zudem wurde in optisch guten und schlechten Schnitt unterteilt und es wurde auf die erwähnte Durchführbarkeit der Schnittöffnung eingegangen. Insbesondere wurden Mechanismen diskutiert, die zu einem seitlichen Weglaufen des Schnittes beim Öffnungsvorgang führen können. Weiterhin wurden die Eigenspannungen im Rissystem und deren Abbau durch das Wachstum des Lateralrisses beschrieben. Durch zerstörende Prüfungen konnte hier gezeigt werden, dass der Schneidvorgang wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit hat. Ebenfalls wurden Unterschiede bei einer händisch geschnittenen Kante im Vergleich zu einer maschinell geschnittenen Kante hinsichtlich der Festigkeit festgestellt. Verschiedene Glasdicken und unterschiedliche Schneidflüssigkeiten (Wasser und Petroleum) fanden Berücksichtigung. Insgesamt wurden folglich in dieser Arbeit viele Parameter festgestellt, wobei deren Einflüsse nicht vollumfänglich bestimmt werden konnten. Diese Ergebnisse wurden von O. V., 1939 aufgegriffen und für die

Gläserausbildung zusammengefasst, was deren Aussagekraft untermauert. JEBSEN-MARWEDEL, 1951 ging darauf ein, dass im Schnitt ein Spannungssystem verbleibt. Er beschrieb einen guten Schnitt mit "glatten Schnittufern", sowie einen schlechten Schnitt mit "zerklüfteten Schnittufern". An den zerklüfteten Schnittufern berichtete er über Spannungshöfe an Muschelbruchstrukturen mit dem Hinweis, dass hierdurch das Abirren des Schnittes beim Öffnen zurückzuführen sei und auch eine erhöhte Bruchgefahr davon ausgeht. RAMSAUER, 1953 beschrieb, dass ein Einfluss des Schneiddrucks auf die Biegefestigkeit vorhanden ist. Laut seinen Beobachtungen kann eine geeignete Schneidflüssigkeit den Riss "offen" halten. Eine weiterführende vertiefende Beschreibung der Entstehung des Medianrisses mittels Glasschneider ist in SWAIN, 1981 zu finden. In JEBSEN-MARWEDEL & BRÜCKNER, 2011 sind die zuvor genannten Erkenntnisse bezüglich dem Schneiden von Glas nochmals zusammengetragen. Hier wurde zudem darauf hingewiesen, dass der Schneiddruck eine wesentliche Rolle bei diesem Prozess spielt.

Neuere Veröffentlichungen betrachteten neben der geschnittenen Kante auch weiterverarbeitete Kanten. GULATI & ROE, 2001 untersuchten hierbei die Festigkeiten von vier verschiedenen Kantenbearbeitungsarten. Es wurden geschliffene Kanten sowie verschiedene Arten der Wärmebehandlung betrachtet, mit dem Ergebnis, dass insbesondere eine geeignete Wärmebehandlung zu höheren Bruchspannungen führen kann. SGLAVO et al., 2007 betrachteten geschnittene, von Hand gesäumte, maschinengesäumte und polierte Kanten, wobei keine Variationen in den jeweiligen Prozessen untersucht wurden. Es konnte beobachtet werden, dass der Einfluss der geschnittenen Kante bei den gesäumten Proben noch sichtbar war, bei den polierten Proben jedoch nicht mehr. Das Thema der Kantenfestigkeit wurde von LINDQVIST, 2013, aufgegriffen mit dem Ziel über mikroskopische Untersuchungen der Glaskante Aussagen zur Festigkeit machen zu können. Hierbei wurden verschiedene Kantenbearbeitungsarten betrachtet und versucht, die kritische Schädigung zu identifizieren. Ist die kritische Schädigung gefunden, kann mit bruchmechanischen Zusammenhängen die Festigkeit vorhergesagt werden. Bei diesen Untersuchungen konnte zudem eine starke Herstellerabhängigkeit festgestellt werden (LINDQVIST et al., 2011). VANDEBROEK, 2014 beschäftigte sich ebenfalls im Rahmen seiner Arbeit zu thermisch induzierten Spannungen in Gebäudeverglasungen mit der Kantenfestigkeit. Auch hier wurden verschiedene Kantenbearbeitungsarten betrachtet und bekannte Einflussparameter auf die Zugfestigkeit von Glas, wie Belastungsgeschwindigkeit, Belastungsgeschichte und Größeneffekt mit zerstörenden Prüfmethoden untersucht. Insgesamt wurde hier eine große Streuung der Festigkeiten festgestellt (VANDEBROEK et al., 2011). KLEUDERLEIN et al., 2014 (KLEUDERLEIN et al., 2016) stellten ebenfalls eine starke Abhängigkeit der Kantenfestigkeit, unabhängig von der Bearbeitungsart der Kante, vom Hersteller fest.

Im Rahmen dieser Arbeit sind zudem einige Beiträge veröffentlicht worden. ENSSLEN & MÜLLER-BRAUN, 2017 zeigten, dass die Kantenfestigkeit durch Variation der Schneidparameter reproduzierbar beeinflusst werden kann. In MÜLLER-BRAUN et al.,

2018 lag der Fokus auf den optischen Merkmalen der geschnittenen Kante und deren Zusammenhang mit der Festigkeit. Eine Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern, den optischen Merkmalen sowie den Erkenntnissen zum Rissssystem erfolgte mit MÜLLER-BRAUN et al., 2019. Weitere Ergebnisse zu den Prozessparametern in Bezug zur Kantenfestigkeit stellten SCHNEIDER et al., 2020 dar. Der FACHVERBAND KONSTRUKTIVER GLASBAU E.V., 2019 veröffentlichte zudem ein Merkblatt, in dem die Erkenntnisse des Arbeitskreises "Kantenfestigkeit" dargestellt wurden, die auch zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Abschließend sind aufgrund der industriellen Relevanz des Themas Hinweise und Empfehlungen von Herstellern oder Verbänden zu nennen. PPG INDUSTRIES, 2002 stellte hierbei die optische Qualität der geschnittenen Kante mit Beispielbildern dar und gab Empfehlungen, wie eine Kante optisch zu beurteilen ist. Der VFF VERBAD FENSTER + FASSADE, 2012 wies in Bezug auf thermische Beanspruchungen hin, dass Kantenbeschädigungen vermieden werden müssen. HERMANN, 2015 stellte im Namen der MDI Advanced Processing GmbH, eine allgemeine Abhandlung zum Glasschneiden mit Empfehlungen zu bestimmten Prozessparametern vor. Insbesondere wird auf das Penett® Rädchen eingegangen, welches eine besonders gute Kantenqualität liefern soll. In BOHLE AG, 2010 sind ebenfalls Empfehlungen zu bestimmten Schneidprozessparametern enthalten. Insgesamt ist anzumerken, dass die Empfehlungen der Hersteller u. A. auf eigenen Untersuchungen und Erfahrungswerten basieren, mit besonderem Augenmerk auf einen sicheren Schneidprozess und Kundenzufriedenheit.

1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, das Rissssystem der geschnittenen Kante im Zusammenhang mit der Festigkeit umfassend darzustellen. Neben theoretischen Betrachtungen werden vor allem durch experimentelle Untersuchungen diese Zusammenhänge belegt. Durch die Ausführungen in dieser Arbeit soll es zudem ermöglicht werden aufgrund von optischen Merkmalen an der geschnittenen Kante auf die mechanische Qualität rückschließen zu können. Dies kann zu einer zerstörungsfreien Überprüfung einer erhöhten Kantenfestigkeit genutzt werden.

Neben dieser zunächst von der Ursache für die Entstehung des Rissystems unabhängigen Betrachtung wird auf die Einflüsse aus dem Schneidprozess eingegangen. Es soll dargestellt werden, welche Parameter das Rissystem in welcher Art beeinflussen. Sind diese Abhängigkeiten ausreichend belegt kann der Zusammenhang zwischen Rissystem und Festigkeit genutzt werden um die Parameter des Schneidprozesses zu optimieren.

1.4 Aufbau der Arbeit

Zum Erreichen der zuvor genannten Ziele werden in dieser Arbeit zunächst in Kapitel 2 die benötigten Grundlagen kurz beschrieben. Hierzu gehört der Werkstoff Glas im Allgemeinen. Die Herstellung und Bearbeitung insbesondere die Kante betreffend werden beschrieben. Zudem wird auf die theoretischen Grundlagen in Hinblick auf Fraktografie, Bruchmechanik und Statistik eingegangen.

Der für diese Arbeit zentrale Schritt im Herstellprozesses, der Zuschnitt mittels Schneidrädchen, wird in Kapitel 3 genauer beschrieben. Die einzelnen Prozessschritte werden erläutert und es wird auf die bekannten Einflussparameter eingegangen.

Im Kapitel 4 wird detailliert auf das Risssystem, welches beim Schneidprozess entsteht, eingegangen. Hierzu ist eine Untergliederung in die einzelnen Bestandteile des Risssystems für das bessere Verständnis zielführend. Neben des Studiums der einschlägigen Literatur wurden ergänzende experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Diese sollen zum einen das in der Literatur vorhandene Wissen verdeutlichen und zum anderen darüber hinaus neue Erkenntnisse zum Risssystem liefern. Analytisch bestimmte Spannungsverteilungen unterhalb des Schneidrädchens sollen zudem die Entstehung des Risssystems begründen. Abschließend wird auf den Eigenspannungszustand im Risssystem, welcher dieses stark beeinflussen kann, eingegangen und der Einfluss des Brechvorgangs wird diskutiert.

Festigkeiten der geschnittenen Kante wurden experimentell im Rahmen eines Forschungsprojektes und des Arbeitskreises Kantenfestigkeit des FKG sehr umfangreich in Abhängigkeit von den zuvor beschriebenen Prozessparametern durch die MPA Darmstadt bestimmt. In Kapitel 5 werden diese Versuche und deren Ergebnisse umfassend dargestellt. Ergänzend wurden hier Bruchspiegel von ausgewählten Probekörpern untersucht und zum einen für die Validierung der durchgeführten Prüfungen und zum anderen für die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Risssystem und Festigkeit verwendet.

Die Versuche aus Kapitel 5 stellen die Grundlage für die optischen Untersuchungen in Kapitel 6 dar. Es werden die Zusammenhänge zwischen optischen Merkmalen und der Festigkeit der geschnittenen Kante aufgezeigt. Hierzu werden die verwendeten optischen Merkmale und die statistische Auswertung beschrieben. Abschließend werden Festigkeitsklassen, die optisch geprüft werden können, vorgeschlagen.

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.3 mit Darstellung der theoretischen und experimentellen Teile zusammenfassend dargestellt.

Kapitel	Theorie	zerstörend	Experiment	optisch
2. Grundlagen	Literatur			
3. Schneiden	Literatur			
4. Rissystem	Literatur	Schneidversuche und Indentation Variation Schneidparameter		optische Untersuchungen Rissystem
5. Festigkeit		zerstörende Prüfungen Variation Schneidparameter		optische Untersuchungen Bruchspiegel
6. Optische Klassifizierung				optische Untersuchungen Lateral- und Tiefenriss

Abbildung 1.3 Aufbau der Arbeit

1.5 Begriffsklärung

Im Folgenden werden ausgewählte Begriffe kurz erläutert. Zum einen soll hierdurch die Verwendung in dieser Arbeit eindeutig definiert werden und zum anderen sollen in der Literatur und dieser Arbeit synonym verwendete Begriffe aufgezeigt werden.

Glaskante

Der Begriff *Glaskante* wird in dieser Arbeit in Anlehnung an DIN 1249-11, 2017 verwendet. Der gesamte Randbereich einer Glasscheibe wird grundsätzlich als *Glaskante* definiert. Für eine eindeutige Beschreibung wird diese weiter in ihre Bestandteile unterteilt, wobei die Norm nicht zwischen geschnittenem und nicht geschnittenem Rand unterscheidet. Für diese Arbeit werden die in Abbildung 1.4 dargestellten Bezeichnungen verwendet, welche die Definition nach Norm um den geschnittenen Rand erweitern.

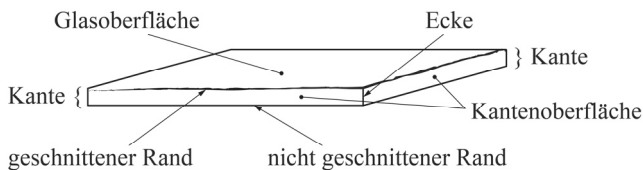


Abbildung 1.4 Begriffsdefinitionen der geschnittenen Glaskante in Anlehnung an DIN 1249-11, 2017

Schneidrad

Das *Schneidrad* ist der elementare Bestandteil des Schneidprozesses. Neben dem Begriff *Schneidrad* wird auch *Schneidrädchen* verwendet. Beides beschreibt dasselbe Bauteil. Das Diminutiv verdeutlicht hierbei die sehr geringe Größe.

Glasschneiden

Schneiden ist definiert als das Zerteilen von Werkstücken zwischen zwei Schneiden, die sich aneinander vorbeibewegen. Für das *Glasschneiden* trifft diese Definition nicht zu. Hierbei handelt es sich um den Prozess des Biegebrechens mit vorheriger definierter Schädigung. Aufgrund der weitverbreiteten und gängigen Bezeichnung für das allgemeine Trennen von Glasscheiben wird in dieser Arbeit ebenfalls der Begriff *Schneiden* bzw. *Glasschneiden* verwendet.

Fissur

Das Schneidrädchen hinterlässt auf der Glasoberfläche unter Einwirkung einer gewissen Kraft eine mit dem bloßen Auge sichtbare *Schädigung*. In der Regel wird die *Schädigung* durch *Chipping* – das Herausplatzen kleiner Glasplättchen aus der Glasoberfläche – sichtbar. In dieser Arbeit werden die Begriffe *Fissur*, *Schädigung*, *Schnittspur* und *Ritzspur* synonym verwendet.

Medianriss

In der Literatur werden sowohl *Medianriss* als auch *Tiefenriss* verwendet um den Teil des Rissystems zu beschreiben, der senkrecht zur Glasoberfläche in das Glas hinein verläuft. In dieser Arbeit wird ausschließlich der Begriff *Medianriss* verwendet.

Floatglas

Grundsätzlich beschreibt *Floatglas* Flachglas, welches durch das Floatglasverfahren hergestellt wurde. In der Literatur wird auch *Spiegelglas* synonym verwendet. In dieser Arbeit wird der Begriff *Floatglas* im Sinne der DIN EN 572-2, 2012 für thermisch entspanntes Kalk-Natron-Silikatglas verwendet.