

Bernhard Weller / Silke Tasche (Hrsg.)

Glasbau 2020

- anwenderfreundliche Richtlinien und praxisnahe Ausführungsregelungen
- zur flexiblen Raum-Gestaltung bei Neu- und Umbauten

Der konstruktive Glasbau ist einer der dynamischsten Bereiche des Ingenieurbaus. Namhafte Autoren beschreiben in diesem jährlich erscheinenden Buch den aktuellen Wissensstand in Theorie und Praxis.



2020 · 394 Seiten · 262 Abbildungen ·
24 Tabellen
Softcover
ISBN 978-3-433-03291-6 € 39,90*

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3291

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt.

WILEY

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

WILEY  **Ernst & Sohn**
A Wiley Brand

ÜBER DAS BUCH

Das vorliegende Buch präsentiert in zahlreichen Beiträgen renommierter Autoren den aktuellen Stand der Technik im konstruktiven Glasbau. Die Planung und die Ausführung wegweisender Glasarchitektur werden ausführlich erläutert, die Bemessung und die Konstruktion tragender Glasbauteile praxisgerecht erklärt.

Die Optimierung zukunftsfähiger Gebäudehüllen wird in gleicher Tiefe behandelt wie die energetische Sanierung denkmalgeschützter Fassaden. Nicht zuletzt vermitteln die jüngsten Ergebnisse anerkannter Forschungseinrichtungen einen zuverlässigen Einblick in die Leistungsfähigkeit des gesamten Glasbaus.

BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
.....	978-3-433-03291-6	Glasbau 2020	€ 39,90*

Privat

Geschäftlich

Firma _____ UST-ID Nr. _____

Name, Vorname _____ Telefon _____ Fax _____

Straße, Nr. _____

PLZ/Ort/Land _____ E-Mail _____

Datum/Unterschrift _____

Irrtum und Änderungen vorbehalten Stand: 5/2020

www.ernst-und-sohn.de/3291

Vorwort

Das Glasbau 2020 Jahrbuch berichtet in über dreißig Beiträgen zu aktuellen Fragestellungen des konstruktiven Glasbaus und der heutigen Fassadentechnik. Glasfassaden, ihre Gestaltung, ihre Formoptimierung, ihre technische Umsetzung als effiziente und nachhaltige Gebäudehüllen gehören zu den wichtigsten Themen der Architektur.

Der Teil „Bauten und Projekte“ zeigt Herausforderungen und Entwicklungsmöglichkeiten der Glasfassade im 21. Jahrhundert. Zahlreiche nationale und internationale Projekte werden in Entwurf und Planung, in Konstruktion und Detaillierung vorgestellt. Sonderverglasungen gehen dabei weit über die Regelverglasungen hinaus.

Der Teil „Bemessung und Konstruktion“ berichtet zuerst über die überarbeiteten Teile 1 und 2 der DIN 18008. Weiterhin sind die Glaskantenfestigkeit wie auch das Tragverhalten von Verbundgläsern Gegenstand der Berichterstattung. Berechnung und Bemessung von Klebverbindungen und Folienlaminaten werden vorgestellt.

Der Teil „Forschung und Entwicklung“ vermittelt in nachvollziehbaren Beiträgen den Stand des Wissens zur Glasbearbeitung, Glasveredelung und Glaskonstruktion: von der experimentellen und numerischen Untersuchung des Kaltbiegens von Monoglas bis zum Digital Workflow der Analyse von beweglichen Systemen aus Dünnglas.

Der Teil „Bauprodukte und Bauarten“ diskutiert Entwicklung und Planung smarter Fassaden im Sinne der Zukunftsfähigkeit vor dem Hintergrund gesellschaftlicher und klimatischer Veränderungen. Vorgestellt werden auch aktuelle Verbundfolien (EVA) für die Produktion von Verbundgläsern mittels moderner Laminationstechnologien.

Ein herzliches Dankeschön gilt den Autoren, die ihr Wissen oft neben dem Tagesgeschäft mit viel Einsatz formulieren. Vielen Dank sagen wir den Mitgliedern des Wissenschaftlichen Beirats für die Anregungen und Wertungen. Großer Dank gilt Frau Stürmer und Frau Rechlin bei Ernst & Sohn für die fruchtbare Zusammenarbeit.

Abschließender Dank gebührt den Mitgliedern des Bundesverbandes Flachglas e. V., die Forschung und Entwicklung im Glasbau immer wieder anregen und vorantreiben. Der Bundesverband Flachglas e. V. hat die Herstellung des Glasbau 2020 Jahrbuches in entscheidendem Umfang unterstützt.

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

Dr.-Ing. Silke Tasche

Dresden, März 2020

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *V*

Bauten und Projekte

Großflächige Fassade für das ICONSIAM in Bangkok *1*

*Thomas Spitzer, Christoph Bauchinger, Stefan Peters,
Stephan Engelsmann, Christoph Dengler, Christian Fischer*

Morland Mixité Capitale: Glas als unendlich reflektierendes Objekt *13*

Klaas De Rycke, Jean-Rémy Nguyen, Justin Jégorel

Eine Seilnetzfassade mit gebogenem Glas – Hudson Yards Art Wall *25*

Michael Stein, Eoin Casserly

**Zylindrisch gebogene multifunktionale Gläser ... neue Turmfassade
des Universitätsklinikums Münster** *37*

Jürgen Einck

**Altmarktgarten – Verwaltungsgebäude mit integriertem Dachgewächshaus,
Oberhausen** *51*

Friedhelm Haas

Der Arnulfparksteg – Glas als Berührungsschutz und Gestaltungselement *63*

Barbara Siebert, Tobias Herrmann

Glassphäre für das Academy Museum of Motion Pictures *71*

Felix Schmitt, Stefan Zimmermann

Großformatige Glastüren in Erdbebengebieten *81*

Michael Engelmann, Helmut Schumacher, Stephan Schwenkkreis

**Glasfassaden: Neue Herausforderungen und Entwicklungsmöglichkeiten
im 21. Jahrhundert** *93*

Lucio Blandini

Bemessung und Konstruktion

Möglichkeiten und Verantwortung durch überarbeitete Teile 1 und 2 der DIN 18008 103

Geralt Siebert

Aktuelle Erkenntnisse des Arbeitskreises Kantenfestigkeit des Fachverbandes Konstruktiver Glasbau e.V. 115

Frank Schneider, Michael Elstner, Steffen Müller-Braun, Johannes Franz

Bauen mit Glas – Tageslicht effizient nutzen 125

Michael Elstner, Daniel Pauk

Festigkeit 3D-gedruckter Fassadenelemente 145

Frank Heyder, Franziska Pauli

Vereinfachte rechnerische Last-Verformungsvorhersage von Klebfugen mit hyperelastischem Verhalten im Konstruktiven Glasbau 157

Carl Richter, Björn Abeln, Benjamin Schaaf, Markus Feldmann

Ressourceneffiziente Planung großflächiger Holz-Glas-Fassaden | Ökologische und energetische Bewertung 169

Alireza Fadai, Daniel Stephan

Simulation von Verbundsicherheitsglas aus Einscheibensicherheitsglas im gebrochenen Zustand 183

Alexander Pauli, Michael Kraus, Michael Drass, Geralt Siebert

Semi-probabilistische Bemessung tragender Silikonverklebungen mit Teilsicherheitsbeiwerten 195

Michael Drass, Michael A. Kraus

Tragverhalten gebrochener Verbundglasscheiben 205

Frank Wellershoff, Marcus Illguth

Polymere Werkstoffe im konstruktiven Glasbau – Vorschläge zur nichtlinearen Berechnung 217

Christian Scherer, Thomas Scherer, Thomas Schwarz, Wolfgang Wittwer, Ernst Semar

Forschung und Entwicklung

Experimentelle und numerische Untersuchungen des Kaltbiegens liniengelagerter Monoverglasung 233

Maximilian Laurs, Pietro Di Biase, Benjamin Schaaf, Markus Feldmann

Verbundfestigkeit von Glas-Metall-Verbindungen mit strukturellem PVB 245

Christian Louter, Manuel Santarsiero

**Untersuchungen zu Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln
als Sandwichelement** 259
Thorsten Weimar, Sebastián Andrés López

**Natürliche Lüftung – energetische Betrachtung eines automatisierten
Fassadensystems** 273
Leonie Scheuring, Bernhard Weller

**Herstellung individueller Strukturen aus silikatischen Werkstoffen
mittels Wire-Laser Additive Manufacturing** 287
Fabian Fröhlich, Jörg Hildebrand, Jean Pierre Bergmann

**Der Einfluss des Nachschleifens auf den thermischen Vorspannungszustand
an der Glaskante** 299
Katharina Lohr, Bernhard Weller

Belastbarkeit von Flachglas in Abhängigkeit der Oberflächenbehandlung 317
Tobias Rist, Alexander Kott, Günter Kleer

**Anwendung faseroptischer Dehnungsmessung für die experimentelle
Untersuchung von Verbundglas** 325
Thorsten Weimar, Christian Hammer

Einfluss von Polierscheiben auf die Oberflächenqualität der Glaskante 337
Paulina Bukieda, Katharina Lohr, Jens Meiberg, Bernhard Weller

„Digital Workflow“ der Analyse von beweglichen Systemen aus Dünnglas 355
*Jürgen Neugebauer, Markus Wallner-Novak, Marco Baumgartner, Simon Kalteis, Irma
Kasumovic*

Bauprodukte und Bauarten

Smarte Fassaden – im Fokus steht der Mensch 365
Winfried Heusler, Ksenija Kadija

**Verwendbarkeit von Verbundfolien auf Basis von Ethylen-Vinylacetat-
Copolymeren (EVA) für die Produktion von Verbundgläsern mittels moderner
Laminationstechnologien** 377
Steffen Bornemann, Nishanth Thavayogarajah, Kristin Riedel, Jasmin Weiß

Autoren 387

Schlagwörter 389

Keywords 391

Inserentenverzeichnis 393

Aktuelle Erkenntnisse des Arbeitskreises Kantenfestigkeit des Fachverbandes Konstruktiver Glasbau e.V.

Frank Schneider¹, Michael Elstner², Steffen Müller-Braun³, Johannes Franz¹

¹ Okalux GmbH, Am Jöspershecklein 1, 97828 Marktzeuln, Deutschland

² INTERPANE Entwicklungs- und Beratungsgesellschaft mbH, Sohnreystraße 21, 37697 Lauenförde, Deutschland

³ Technische Universität Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion, Franziska-Braun-Straße 3, 64287 Darmstadt, Deutschland

Abstract

2009 wurde im Fachverband Konstruktiver Glasbau e. V. der Arbeitskreis „Kantenfestigkeit“ gegründet, um Aufschluss zu erhalten, inwieweit die Kantenfestigkeit von Floatglas durch unterschiedliche Bearbeitungsarten der Glaskante beeinflusst wird. Seither wurden zahlreiche Kantenfestigkeitsuntersuchungen im Vierschneiden-Biegeversuch durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass eine optisch gute Kantenqualität nicht zwingend eine gute Kantenfestigkeit aufweist. Folglich wurde die mittels Schneidrädchen industriell geschnittene Kante, welche die Basis für weitere Schritte der Kantenbearbeitung darstellt, im Arbeitskreis über Jahre untersucht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse, insbesondere der Zusammenhang zwischen Schneiddruck, Schneidrädchen und Kantenfestigkeit, werden in diesem Beitrag vorgestellt und sind auch Bestandteil im Merkblatt Kantenfestigkeit des FKG.

Current results of the Working Group Edge Strength of the Fachverband Konstruktiver Glasbau e.V. In 2009 the Fachverband Konstruktiver Glasbau e.V founded the working group “Edge Strength” to investigate the impact of the edge processing types on the edge strength of float glass. Since then scores of investigations of edge strength with a four-point-bending test set-up were performed. It could be determined that an optical nice-looking edge not necessarily has a more resistant edge strength than an optical bad-looking one. Therefore, the working group have investigated the “cut edge”, which is the basic of the glass edge processing types, in detail for years. The results of these investigations, in particular the relation between cutting pressure, cutting wheel and edge strength are presented in this article and they are integral part of the Technical Note by Fachverband Konstruktiver Glasbau e.V.

Schlagwörter: *Glaskante, Glasschneiden, Kantenfestigkeit, optische Untersuchung, Rissystem*

Keywords: *glass edge, cutting of glass, edge strength, optical examination, crack system*

1 Einleitung

Der Einsatz von Floatglas spielt heute in der Architektur eine bedeutende Rolle. Dabei werden die Konstruktionen immer komplexer und die Abmessungen der Verglasungen immer größer. Verbunden damit sind neue und zusätzliche Belastungen des Materials beim Einsatz in Fenstern und Fassaden. Die Bedeutung der Glaskante ist dabei ganz wesentlich, da Glas als kerbempfindliches sprödes Material bei einer kritischen Kerbspannung unmittelbar versagt. Daher ist es erforderlich, nicht nur die Oberflächenfestigkeit des „normal gekühlten“ Floatglases (ohne den Einfluss der Kante) zu ermitteln, sondern eben auch die Kantenfestigkeit quantifizierbar zu machen, um diese bei ingenieurmäßigen Betrachtungen z. B. zum thermisch induzierten Glasbruch, berücksichtigen zu können.

Hierzu wurde im Fachverband Konstruktiver Glasbau (FKG) in 2009 ein Arbeitskreis „Kantenfestigkeit“ gegründet. Seit 2013 wurden mehr als 1000 Probekörper der Abmessung 8 mm × 125 mm × 1100 mm untersucht und die Kantenfestigkeit im Vierschneiden-Biegeversuch in Anlehnung an DIN EN 1288-3 um die starke Achse bestimmt (Bild 1). Bei der Bestimmung der Biegezugfestigkeit nach DIN EN 1288-3 werden normalerweise Probekörper der Abmessung 360 mm × 1100 mm im Vierschneiden-Biegeversuch um die schwache Achse geprüft. Dadurch treten die maximalen Zugspannungen an den beiden Rändern (vgl. Bild 2) und der Glasoberfläche auf. Je nachdem, wo der Bruchursprung auftritt, wird daher entweder eine Kantenfestigkeit oder eine Oberflächenfestigkeit des Glases geprüft. Bei diesem modifizierten „FKG“-Versuchsaufbau steht hingegen die geschnittene Glaskante (vgl. Bild 2) über eine Länge von 200 mm unter maximaler Zugspannung. Daher ist der Vierschneiden-Biegeversuch um die starke Achse besser dazu geeignet, eine Aussage über die Kantenfestigkeit zu liefern. Die sog. „starke“ Achse ist die Ebene, bei der das Glas über die Höhe der Scheibe (hochkant) belastet wird. Die sogenannte „schwache“ Achse ist die Ebene, bei der das Glas über die Glasdicke belastet wird.

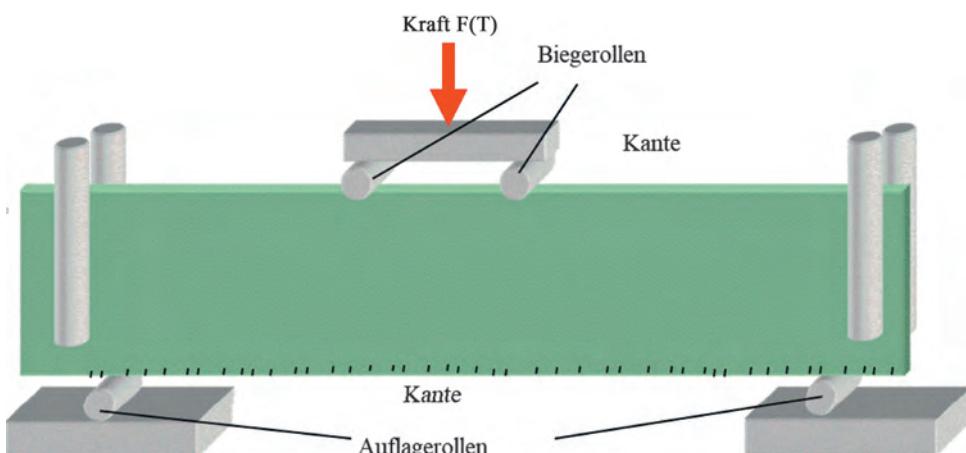


Bild 1 Systematische Darstellung des Vierschneiden-Biegeversuchs um die starke Achse
(Quelle: Weißmann, Erlangen)

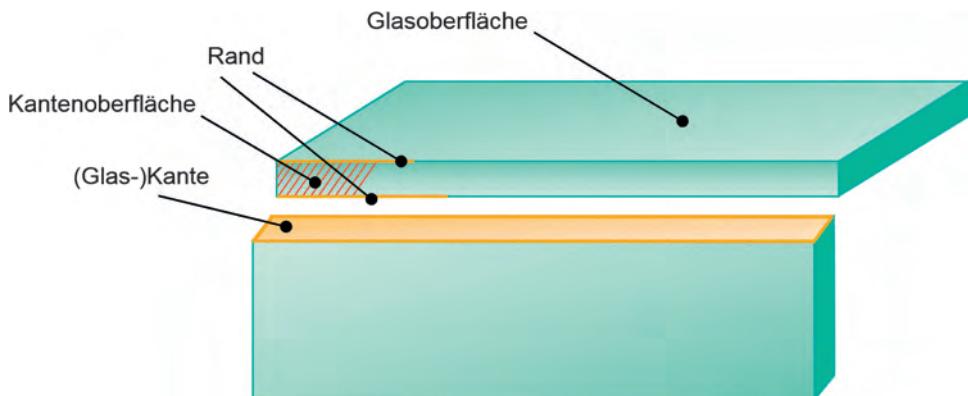


Bild 2 Bezeichnung der für die Kantenfestigkeit relevanten Geometrien in Anlehnung an DIN 1249-11:2017

Im Rahmen der Kantenfestigkeitsversuche des FKG wurden zudem bei einigen Untersuchungsreihen die Lateral- und Tiefenrisse mikroskopisch vermessen [1]. Die Definition der Lateral- und Tiefenrisse ist in Bild 3 dargestellt.

2 Schneidvorgang und Rissystem

2.1 Allgemein

Das „Schneiden“ von Glas ist im Prinzip ein handwerklicher Prozess, bei dem die Glasoberfläche, mit einem „härteren“ Material als Glas selbst, angeritzt und anschließend gebrochen wird. Zu Beginn erfolgte dies mit einem Diamanten als Glasschneider. Das Trennen von Glas ist somit ein mechanischer Vorgang, an dessen Ende die sogenannte Schnittkante (KG nach DIN 1249-11) als Resultat vorliegt. Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden industrielle Schneidprozesse entwickelt, die eine genauere Vorgabe der Parameter und somit eine bessere Reproduzierbarkeit der Kantenqualität, resultierend aus dem Schneidprozess, ermöglichen. Hierbei kommen zum Anritzen der Glasoberfläche meist Schneidräder in unterschiedlicher Ausführung zum Einsatz.

2.2 Tiefenriss

Wird eine Glasoberfläche mit einem Glasschneider „geschädigt“, entsteht das in Bild 3 dargestellte typische dreidimensionale Rissystem [2]. Die durch den Anriss entstehenden Tiefenrisse verlaufen idealerweise senkrecht in die Glasoberfläche (xz-Ebene in Bild 3). Für das anschließende Brechen ist vorwiegend die Ausprägung dieses Tiefenrisses verantwortlich. Eine externe Zugspannung, wie sie beim Brechvorgang erzeugt wird, führt zum Rissfortschritt der Tiefenrisse in der xz-Ebene. Sobald die Rissfront die gegenüberliegende Glasoberfläche erreicht, ist der Riss vollständig geöffnet und das Glas geteilt. Tiefer Risse erleichtern den Brechvorgang und führen häufig zu einer optisch ansprechenderen Glaskante.

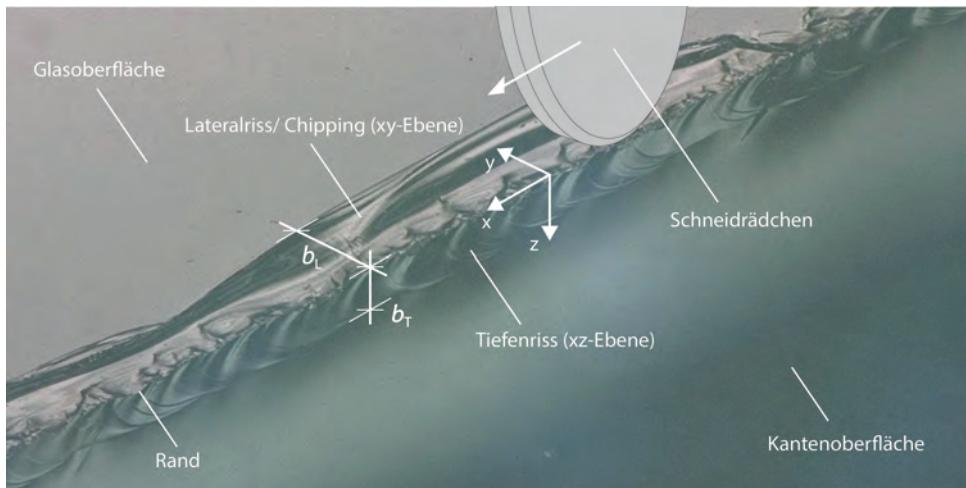


Bild 3 3D-Darstellung des Rissystems der geschnittenen Glaskante

2.3 Lateralriss

Seitlich der Anrissspur verlaufen beidseitig die sogenannten Lateralrisse. Deren Rissfront verläuft zunächst hauptsächlich in der xy-Ebene parallel zur Glasoberfläche (Bild 3). Der Rissfortschritt kann sich zeitabhängig auch zur Kantenoberfläche hin entwickeln, sodass sich einzelne Glasschollen aus der Kratzspur herauslösen können. Direkt unterhalb des Eindringkörpers (Schneidrads) existiert ein verdichteter Bereich aus einer fragmentierten Glasmatrix, der horizontal Druckspannungen aufbaut. Dies kann dazu führen, dass die Schollen aufgrund der Federwirkung aus der Kratzspur herauspringen. Dieser Vorgang wird auch als Chipping bezeichnet.

2.4 Radialriss

Aus bruchmechanischen Betrachtungen müssen zudem Risse vorhanden sein, deren Rissspitze senkrecht zur Bruchfläche, d. h. in der yz-Ebene (Bild 3) verlaufen. Diese sogenannten Radialrisse sind aufgrund ihrer Kerbwirkung bei zur Kante parallelen Zugspannung maßgeblich für den Wert der Kantenfestigkeit. Bei Überschreitung der materialspezifischen Bruchzähigkeit an solch einer Rissspitze, kommt es zum Bruch des Glases ausgehend von der Glaskante, wie es häufig z. B. bei Thermobruch eines Glases beobachtet werden kann. Im Gegensatz zu den oben erläuterten Lateral- und Tiefenrissen können die für den Kantenbruch verantwortlichen Risse bis jetzt nicht visuell nachgewiesen werden. Daher wurde im Rahmen des FKG untersucht, ob es einen Zusammenhang zwischen Kantenfestigkeit und Länge der Lateral- und Tiefenrisse gibt, um durch eine nichtzerstörende Prüfung die Kantenfestigkeit qualitativ zu beurteilen.

3 Untersuchungen „Geschnittene Kante“

Im Rahmen dieser Veröffentlichung sollen die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen des Arbeitskreises seit 2016 dargestellt werden. In [1] bis [3] wurden bereits verschiedene Schneidparameter und deren Einfluss auf die Kantenfestigkeit betrachtet. Hierbei stellten sich die Parameter „Schneidrad“ und „Schneiddruck“ als wesentlich heraus, wobei weitere Parameter wie Schneidflüssigkeit oder Schneidgeschwindigkeit nicht zu vernachlässigen sind. Folglich lag der Fokus bei den weiteren Untersuchungen auf den beiden wesentlichen Parametern „Schneidrad“ und „Schneiddruck“. Es wurden hierfür insgesamt 20 Serien à 30 Probekörper untersucht. In Tabelle 1 sind die Serien sowie die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Betrachtet wurde ausschließlich 8 mm dickes Glas, das mit zwei verschiedenen Schneidradtypen geschnitten wurde. Die Auswahl der zwei Typen erfolgte aufgrund von Herstellerangaben

Tabelle 1 Übersicht und Ergebnisse der aktuellen Untersuchungen

Serie	Schneidrädchen (Ø × t × Achse; Winkel)	Schneid- druck [bar]	Basis- glas	Festigkeit (Mittelwert der Serie) [MPa]	Mittlerer Tiefenriss (Mittelwert der Serie) [µm]	Maximaler Lateralriss (Mittelwert der Serie) [µm]
A-12	A	1,2	H1	74,7	333	170
A-13	(5,6 mm × 1,08 mm ×	1,3		75,7	357	147
A-14	1,42 mm; 156°)	1,4		76,4	400	161
A-16		1,6		67,8	462	182
A-16a		1,6		70,8	458	201
A-18		1,8		60,7	531	228
A-22		2,2		53,8	629	427
A-22a		2,2	H2	43,0	652	641
A-26		2,6	H1	41,1	728	673
A-26a		2,6	H2	38,0	711	778
A-30		3,0		36,5	824	881
A-34		3,4		38,0	889	832
B-06	B	0,6	H1	85,2	233	97
B-08	(4,1 mm × 1,08 mm ×	0,8		75,2	321	151
B-10	1,42 mm; 150°)	1,0		83,1	313	135
B-12		1,2		47,4	461	466
B-14		1,4		44,0	506	546
B-14a		1,4		42,9	528	640
B-16		1,6		42,0	576	595
B-18		1,8		42,2	635	664

sowie den Voruntersuchungen im Rahmen des Arbeitskreises. Der Bereich der Schneidrädchen wurde in Abhängigkeit des Schneidrädchen so gewählt, dass bei dem geringssten Schneiddruck der Schnitt gerade noch geöffnet werden konnte und bei dem höchsten Schneiddruck eine sehr starke Schädigung der Glasoberfläche mit bloßem Auge erkennbar war. Von den 20 Serien wurden 16 Serien mit Basisgläsern (Tabelle 1, H1) aus derselben Glashütte hergestellt. Für die restlichen 4 Serien (Tabelle 1, H2) musste aufgrund des Umfangs der Untersuchungen auf Basisgläser einer anderen Glashütte zurückgegriffen werden. Alle anderen Schneidparameter wurden konstant gehalten. Je Serie wurden 30 Probekörper geschnitten, wobei bei der Serie A-12 aufgrund von ungerade verlaufenden Schnittöffnungen 17 Probekörper für die Untersuchungen zur Verfügung standen.

Wie oben beschrieben, wurden die Probekörper mittels eines Vierschneiden-Biegeversuchs hochkant zerstörend geprüft. Zuvor wurden je Serie 3 bis 4 Probekörper mikroskopisch untersucht. Die mikroskopischen Untersuchungen sowie die Auswertung erfolgten wie in [2] beschrieben. Als Ergebnis werden je Probekörper der minimale, der maximale und der gemittelte Wert der Tiefe der Tiefenrisse sowie der Breite der Lateralrisse angeben. Es wurden je Probekörper 5 cm geschnittene Kante betrachtet. Die Definitionen der Breite der Lateralrisse b_L und der Tiefe der Tiefenrisse b_T ist in Bild 3 dargestellt.

Die Ausprägungen der Lateral- und Tiefenrisse sind in Abhängigkeit der verwendeten Schneidparameter unterschiedlich, wie Bild 4 verdeutlicht. So sind für das Schneidrädchen Typ B bei sehr geringem Schneiddruck (Serie B-06) keine Lateralrisse zu beobachten und der Tiefenriss ist deutlich kleiner als bei einem höheren Schneiddruck (Serie B-14a). Zudem sind bei Serie B-14a sehr deutliche Lateralrisse zu erkennen.

In Bild 5 sind die Ergebnisse grafisch aufbereitet. Es sind jeweils die Mittelwerte der Bruchspannungen, der Lateralrisse und der Tiefenrisse eingetragen. Zudem wurden für die Lateralrisse und Tiefenrisse die maximalen und minimalen Werte dargestellt. Anzumerken ist, dass die Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen durch Bildung des Mittelwertes je Serie zusammenfassend in Bild 5 dargestellt sind. In Tabelle 1 sind die Einzelwerte der Bruchspannung je Serie sowie als die relevantesten Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen, Mittelwert der Tiefenrisse und Maximalwert der Lateralrisse eingetragen.

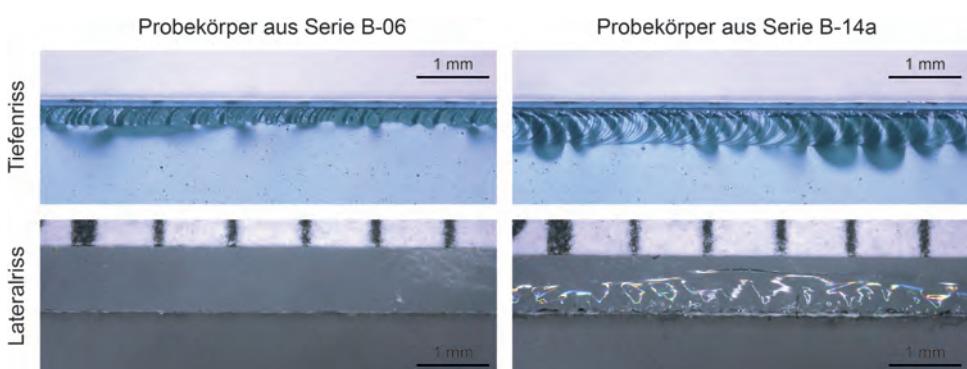


Bild 4 Exemplarische Darstellung der mikroskopischen Aufnahmen der Tiefen- und Lateralrisse

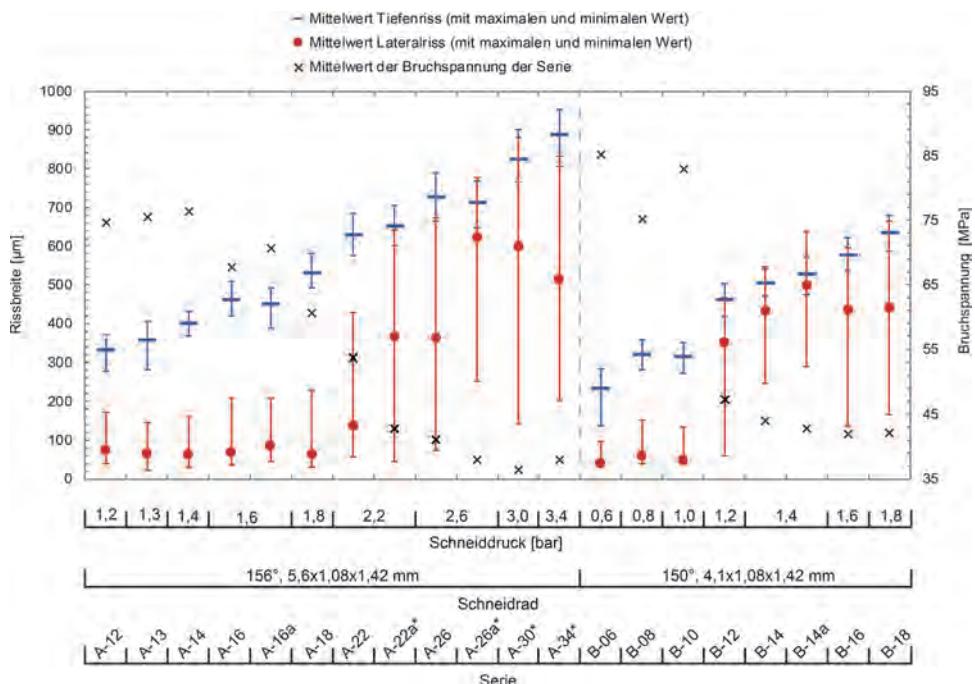


Bild 5 Versuchsergebnisse – Rissbreiten und Festigkeiten (*Basisglas H2)

Für beide Schneidradtypen ist deutlich zu erkennen, dass mit steigendem Schneiddruck die Bruchspannung geringer wird. Zudem zeigt sich bei geringen Schneiddrücken ein oberes Niveau für die Festigkeit und bei hohen Schneiddrücken ein unteres Niveau für die Festigkeit (Bruchspannung). Die Tiefenrisse steigen kontinuierlich mit steigendem Schneiddruck. Für die Lateralrisse zeigt sich ein gegenläufiges Verhalten im Vergleich zur Festigkeit. So nimmt die Breite des Lateralrisses ab einem bestimmten Schneiddruck sprunghaft zu (Serie A bei 2,2–2,6 bar und Serie B bei 1,2 bar). Für geringe Schneiddrücke stellt sich ein unteres Niveau für die Breite der Lateralrisse ein. Dem entsprechend stellt sich für hohe Schneiddrücke ein oberes Niveau für die Breite der Lateralrisse ein. Hieraus ist ein Zusammenhang zwischen Lateralriss und Festigkeit ersichtlich. Es ist anzumerken, dass bei geringen Werten der Lateralrissbreite (ca. < 150 µm) kein Lateralriss zu erkennen ist und Werte unterhalb dieser „Grenze“ vielmehr die Breite des fragmentierten Bereichs darstellen.

Bei Betrachtung der beiden unterschiedlichen Basisgläser lässt sich bei gleichen Schneidparametern (Serien A-22 und A-22a bzw. A-26 und A-26a) feststellen, dass die Festigkeiten der Serien mit dem Basisglas H2 unter denen des Basisglases H1 liegen, sodass ein Einfluss des Basisglases vorliegt. Die Ergebnisse lassen sich aber dennoch sehr gut in den kausalen Zusammenhang zwischen Lateralrissbreite und Festigkeit einsortieren.

4 Erkenntnisse aus den Untersuchungen

4.1 Generell

Die im Rahmen der FKG-Versuche ermittelten Kantenfestigkeitswerte erfolgten an Probekörpern im Vierschneiden-Biegeversuch um die starke Achse (hochkant) wie in Abschnitt 1 beschrieben. Inwieweit diese Werte der Kantenfestigkeit mit den Werten gemäß DIN EN 1288-3 Vierschneiden-Biegeversuch um die schwache Achse übereinstimmen, da sich die Form und Länge unter Zugbeanspruchung stehender Kanten in beiden Versuchsaufbauten unterscheiden, wird derzeit im Rahmen eines Forschungsprojektes statistisch untersucht.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen an der „geschnittenen Kante“ können unterschiedliche Erkenntnisse zur Kantenfestigkeit von Floatglas abgeleitet werden.

4.2 Einfluss auf die Kantenfestigkeit

Die in Fachkreisen verbreitete Meinung, dass eine optisch ansprechende Schnittkante eine gute Kantenfestigkeit aufweist, konnte mit den Untersuchungen nicht belegt werden. Vielmehr muss davon ausgegangen werden, dass die optische Qualität der Schnittkante keine generellen Rückschlüsse auf die Kantenfestigkeit von Floatglas zulässt. Zudem geben die derzeitigen Untersuchungsergebnisse keinen Hinweis darauf, dass die 80% der charakteristischen Biegezugfestigkeit von Floatglas für unter Zugbeanspruchung stehende Kanten nach DIN 18008-1:2010 nicht sicher angewendet werden kann. Es ist festzustellen, dass die Kantenfestigkeit maßgeblich vom Verarbeiter und dessen technischer Ausstattung sowie den gewählten Schneidparametern abhängig ist.

4.3 Einfluss der Schneidparameter

Die resultierende Zugfestigkeit der Kanten von Floatglas ist von zahlreichen Parametern des Herstellprozesses abhängig, welche im Arbeitskreis „Kantenfestigkeit“ systematisch seit 2009 untersucht wurden. Hieraus konnten nach [3] für die Festigkeit der Glaskante unter anderem folgende Parameter als bedeutsam eruiert werden:

- Schneidtechnik (manuell, halb- oder vollautomatisch),
- Schneidrädchen (Durchmesser, Geometrie, Winkel, Material, Alter),
- Schneiddruck und -geschwindigkeit,
- Schneidflüssigkeit (Art und Zusammensetzung),
- Alter der Schnittkante.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Kantenfestigkeit mit den „richtigen“ Einstellungen der Schneidparameter signifikant gesteigert werden kann. Die „richtigen“ Schneidparameter führen zu quantitativ reproduzierbaren Ergebnissen hinsichtlich der Kantenfestigkeit und der Rissgeometrie (mikroskopisch), siehe Bild 5, sofern sich die Basisgläser kaum unterscheiden bezüglich Alter, Floatglasrezeptur der jeweiligen Hütte, deren Herstellprozess und der eingestellten Parameter.

Generell führen niedrige Schneiddrücke zu einer höheren Kantenfestigkeit. Damit geht jedoch ein höherer Aufwand beim Brechen einher und die Kantenqualität wird optisch beeinträchtigt (makroskopisch). Die „optimalen“ Schneidparameter müssen für

jeden Schneideanlagentyp und jede Glasdicke ermittelt werden. Zudem müssen die „richtigen“ Schneidparameter für jeden Schneideanlagentyp und jede Glasdicke und jeden Glashersteller ermittelt werden. Auch die Wahl der richtigen Schneidflüssigkeit hat einen positiven Einfluss auf die Kantenfestigkeit von Floatglas.

Die Art, Stärke und Tiefe der Vorschädigung durch das Anreißen mittels Schneidrädchen bestimmen maßgeblich die Kantenfestigkeit. Das anschließende Brechen hat nach derzeitigem Wissenstand keinen signifikanten Einfluss auf die Kantenfestigkeit.

4.4 Lateral- und Tiefenrisse

Insbesondere die vorgestellten Untersuchungen in Bild 5 zeigen einen kausalen Zusammenhang zwischen den ausgewerteten Lateral- und TiefenrisSEN (Definition siehe Bild 3) und der im modifizierten Vierschneiden-Biegeversuch gemessenen Kantenfestigkeit (Versuchsaufbau siehe Bild 1). Die Lateralrisse können ab einer Risslänge von ca. $b_L > 150 \mu\text{m}$ optisch (mikroskopisch) detektiert werden. Zunehmende Lateralrisse indizieren eine maßgebliche Reduzierung der Kantenfestigkeit mit einem charakteristischen Festigkeitsabfall. Mit zunehmendem Schneiddruck nehmen die Lateralrisse zu. Auch die Tiefe des Tiefenrisses ist abhängig vom aufgebrachten Schneiddruck. Ein Ansteigen des Tiefenrisses indiziert ebenfalls eine Reduzierung der Kantenfestigkeit.

4.5 Interpretation und Deutung

Durch die oben beschriebenen Erkenntnisse und die Darstellung der Ergebnisse der Untersuchungen in Bild 5 kann ein systematischer qualitativer Zusammenhang zwischen Schneiddruck, Risslänge und Kantenfestigkeit für 8 mm Floatglas gedeutet werden, welcher im Diagramm (Bild 6) dargestellt ist.

Bei geringen Werten des Schneiddrucks existiert ein Plateau erhöhter Festigkeit, welches bei steigendem Schneiddruck zunächst lokal stark abfällt und anschließend mit dem Schneiddruck weiter absinkt. Im Verlauf der Festigkeit ist insbesondere der Einfluss der Breite der Lateralrisse deutlich ablesbar. Der Verlauf der Breite verhält sich der Lateralriss fast antiproportional zum Verlauf der Festigkeit und zeigt ebenfalls einen

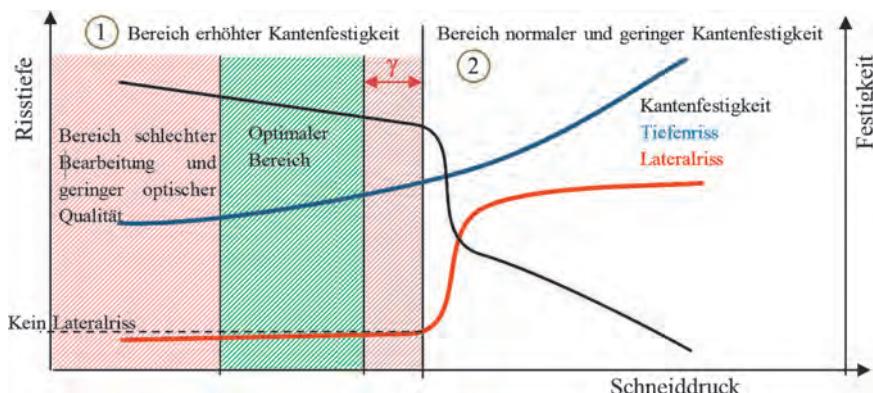


Bild 6 Qualitativer Zusammenhang zwischen Schneiddruck, Risslänge und Kantenfestigkeit

charakteristischen „Sprung“ an gleicher Stelle wie die abfallende Festigkeit. Die Breite der Lateralrisse stellt daher einen guten Indikator für die zu erwartende Kantenfestigkeit dar.

Die Tiefe des Tiefenrisses nimmt ebenfalls mit dem Schneiddruck zu. Der Verlauf ist jedoch stetig und ohne signifikante Steigerung im Bereich des Festigkeitsabfalls. Bei zu geringer Tiefe des Tiefenrisses lässt sich der Riss nur mit hohem Kraftaufwand öffnen und es verschlechtert sich die optische Qualität der Kante. Häufig entstehen Über- und Unterbrüche. Daher muss ein Schneiddruck gefunden werden, der einen ausreichenden Sicherheitsabstand γ vom Bereich des Festigkeitsabfalls hat und dennoch ein praktikables Öffnen des Risses ermöglicht.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Üblicherweise werden die Schneidparameter lediglich hinsichtlich einer optisch ansprechenden Schnittkantenqualität optimiert. Dies bedeutet jedoch nicht zwingend eine höhere Kantenfestigkeit im Vergleich zu einer optisch nicht ansprechenden Schnittkantenqualität. Hierfür müssen vielmehr die oben genannten Einflussparameter des Schneidprozesses entsprechend angepasst werden. Sollte sich der im Diagramm in Bild 6 dargestellte Zusammenhang zwischen Risstiefe und Kantenfestigkeit bei zukünftigen Untersuchungen mit anderen Glasdicken, Schneidradgeometrien, usw. bestätigen, könnte hieraus ein Bemessungsmodell abgeleitet werden. Zum Nachweis einer erhöhten Kantenfestigkeit müsste dann zum Beispiel sichergestellt werden, dass man immer im Bereich 1 der erhöhten Kantenfestigkeit liegt. Als Indikator kann z. B. die Breite der Lateralrisse dienen, der sich optisch (mikroskopisch) messen lässt. Ziel der zukünftigen Forschung ist es, ein solches Bemessungskonzept mit den zugehörigen Qualitätssicherungsmaßnahmen zu entwickeln.

6 Literatur

- [1] Ensslen, F.; Müller-Braun, S. (2017) Kantenfestigkeit von Floatglas in Abhängigkeit von wesentlichen Schneidprozessparametern. Glasbau 2017, S. 219–232.
- [2] Müller-Braun, S. et al. (2018) Optische Merkmale der Glaskante nach Glaszuschnitt mit Schneidrädchen. Glasbau 2018, S. 99–111.
- [3] Kleuderlein, J.; Ensslen, F.; Schneider, J. (2016) Untersuchung zur Kantenfestigkeit von Floatglas in Abhängigkeit der Kantenbearbeitung. Glasbau 2016, Vol. 1.
- [4] DIN 1249-11: Flachglas im Bauwesen – Glaskanten, Begriffe, Kantenformen und Ausführung, Beuth Verlag, Berlin (2017).