

Glaskantenfestigkeit – Beitrag zur Berücksichtigung des Herstellungsprozesses in der Bemessung

Paulina Bukieda, Michael Engelmann, Bernhard Weller

Institut für Baukonstruktion, Technische Universität Dresden

Zusammenfassung: Floatglaskanten erfüllen je nach Ausführung: Schnittschutz, Maßhaltigkeit und Ästhetik. In der Bemessung wird die Kantenfestigkeit über pauschale Beiwerte konservativ angesetzt. Diese decken Streuungen des Herstellungsprozesses ab. Der Beitrag stellt aktuelle Forschungsergebnisse vor und diskutiert einen Vorschlag zur Berücksichtigung der Kantenfestigkeit in der Bemessung auf Basis umfangreicher Bruchversuche und mikroskopischer Oberflächenanalysen.

1 Motivation

In Deutschland wird derzeit für thermisch entspanntes Floatglas, unabhängig der Kantenausführungsart, eine charakteristische Kantenfestigkeit in Höhe von 36 N/mm² angenommen [1]. Die europäische Normung sieht zukünftig eine Regelung der Kantenfestigkeiten in Form von pauschalen Abminderungsbeiwerten in Abhängigkeit der Kantenausführungsart vor, die in den nationalen Anhängen definiert werden sollen [2]. Dabei liegt der Vorschlag vor, polierte Kanten mit einer höheren Festigkeit anzusetzen. Dies entspricht auch der weit verbreiteten – und wissenschaftliche widerlegten – Praxisannahme, dass mit steigendem Grad der optischen Veredlung, von der geschnittenen zur polierten Kante, auch die mechanische Kantenfestigkeit steigt.

Während der Herstellung und Bearbeitung von Glaskanten greifen harte Schneid- und Schleifwerkzeuge in die Glasoberfläche ein und hinterlassen Oberflächendefekte. Diese werden durch anliegende Zugspannungen geöffnet bis es zu einem plötzlichen Bruch der Glasscheibe kommt. Abgeschlossene wissenschaftliche Studien zeigen hohe Streuungen in den Kantenfestigkeiten verschiedener Hersteller, unabhängig von der Kantenausführungsart [3], [4], [5]. Für geschnittene Glaskanten konnten bereits maßgebende Parameter im Schneidprozess detektiert werden, die mit höheren Kantenfestigkeiten einhergehen [6]. Für die weiteren, bearbeiteten Kantenausführungsarten bestehen bisher noch keine

allgemeingültigen Zusammenhänge. Als wesentliche Ursache für die Streuungen der Kantenfestigkeiten werden auch hier Einflüsse aus der Herstellung, also den Schleif- und Polierprozessen vermutet.

Der vorliegende Artikel stellt Untersuchungen der TU Dresden, Institut für Baukonstruktion, zur Kantenfestigkeit mit Fokus auf den Herstellungsprozess vor [7], ordnet diese in bereits vorhandene Forschungsergebnisse ein und leitet daraus einen Vorschlag für die Berücksichtigung der Kantenfestigkeit in der Bemessung ab.

2 Kantenausführungsarten von Glas

2.1 Ausführungsarten und deren Anwendungen

Im Bauwesen erfolgt eine Einteilung in geschnittene (KG), gesäumte (KGS), maßgeschliffene (KMG), geschliffene (KGN) und polierte (KPO) Glaskanten, entsprechend des äußeren Erscheinungsbildes. [8] Abb. 1 stellt diese mit charakteristischen mikroskopischen Oberflächenaufnahmen gegenüber.

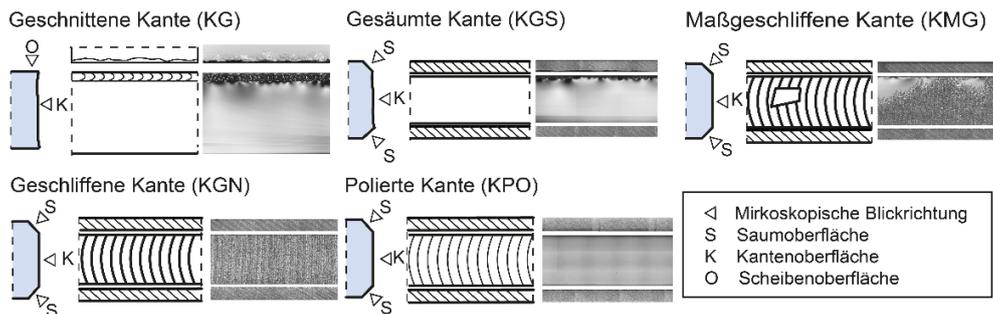


Abbildung 1: Kantenausführungsarten entsprechend der optischen Beschreibung nach DIN 1249-11 [8]. Mikroskopische Aufnahmen nach [7].

Geschnittene Kanten sind scharfkantig. Sie entstehen zwangsläufig im Schneidprozess, während das Glas auf das nötige Format gebracht wird. Anschließend kann eine weitere Bearbeitung der Kanten in Schleif- und Polierprozessen erfolgen. Damit werden weitere Formen und Funktionen der Glaskante geschaffen. Bei der gesäumten Kantenausführungsart wird durch den Abtrag des scharfen, geschnittenen Randes ein Schnittschutz hergestellt. Im Fensterbau kommen häufig geschnittene oder gesäumte Kanten zum Einsatz, da sie in vom Fensterrahmen abgedeckt sind. Mit den fortfolgenden Bearbeitungsstufen wird die Kantenoberfläche bearbeitet. Hier werden schrittweise die Maßhaltigkeit und die optische Erscheinung gesteigert. Polierte Kanten stellen optisch die hochwertigste Ausführung dar und kommen deshalb in sichtbaren Bereichen zur Anwendung.

2.2 Herstellung im Schneid-, Schleif- und Polierprozess

Den Herstellungsprozessen liegt eine gezielte Einbringung und Nutzung von Rissen zugrunde. Die Entstehung der Risse beruht auf dem Sprödverhalten von Glas im Kontakt mit harten und scharfen Werkstücken (siehe Abb. 2). Übt ein hartes Werkzeug Druck auf Glas aus, bildet sich im Kontaktbereich eine minimale Fließzone mit Glasspan aus. Darunter wird es verdichtet und es entsteht ein hydrostatisches Druckspannungsfeld. Mit Steigerung des Drucks erfolgt eine Rissausbreitung im Glas. Das verbleibende Rissssystem besteht aus flachen, schollenförmigen Lateralrissen an der Glasoberfläche, senkrecht zum eingreifenden Werkzeug, und Tiefenrissen in Richtung der Krafteinbringung. Darüber hinaus entstehen Radialrisse quer zur Ritzspur. Das Rissssystem tritt stets gleichzeitig auf.

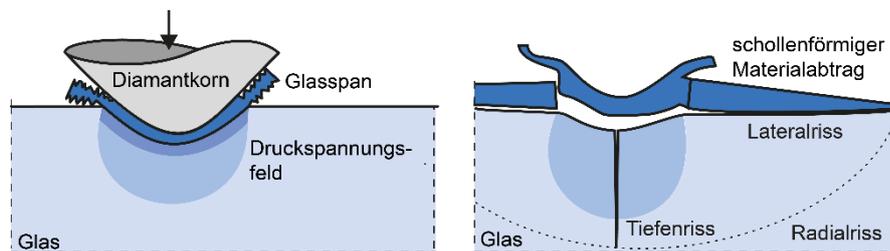


Abbildung 2: Entstehung des Rissystems in Glas bei Druckkontakt mit harten Werkstücken [7].
Links: Krafteinbringung mit hartem Werkstück. Rechts: Rissystem nach Druckentlastung.

Im Schneidprozess wird das Glas mit einem Diamantrad angeritzt. Dabei werden gezielt Tiefenrisse eingebracht, die anschließend durch Biegung geöffnet werden. Resultierend wird das Glas entlang der Ritzspur gebrochen. Die entstehende geschnittene Kante weist auf der angerritzten Seite sichtbare Tiefenrisse auf der Kantenoberfläche und Lateralrisse auf der Scheibenoberfläche auf (siehe Abb. 1, KG).

Im Schleif- und Polierprozess erfolgt ein flächiger Abtrag über die Nutzung der schollenförmigen Lateralrisse. Dabei verbleiben Tiefenrisse senkrecht zur Bearbeitungsrichtung. Hierzu werden rotierende Vielkornwerkzeuge verwendet. Bei Kantenschleifautomaten kommen an mehreren Stationen sogenannte Topfschleifscheiben (siehe Abb. 3, links) mit verschiedenen Härtegraden und Körnungen zum Einsatz. Die eingreifenden Topfschleifscheiben werden hierbei immer feiner und weicher. Grobe Stationen sorgen im Schliff für den Materialabtrag, feine Stationen für eine Oberflächenglättung, also die Politur. Horizontale Topfschleifscheiben bearbeiten die Kantenoberfläche, geneigte Topfschleifscheiben tragen die Ränder ab und erzeugen Saumflächen (siehe Abb. 3, rechts).

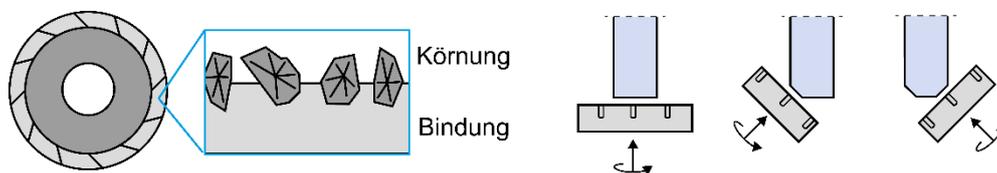


Abbildung 3: Links: Schematische Darstellung einer Topfschleifscheibe mit Oberflächenbeschaffenheit. Rechts: Anordnung von Topfschleifscheiben [7].

In Abhängigkeit der gewünschten Kantenausführungsart werden im Kantenschleifautomat verschiedene Stationen zugestellt. Für die Herstellung einer gesäumten Kante greifen beispielsweise nur die geeigneten Stationen ein. Die Maschinenkonfiguration und die verwendeten Topfschleifscheiben variieren in Abhängigkeit der Hersteller. Sie werden meist einmalig in Abhängigkeit der maximal abzuschleifenden des Abtrags im Werk gewählt und eingestellt. Bei dicken Verbundaufbauten werden größere Topfschleifscheiben benötigt, als bei monolithischen Gläsern. Die Prozesse werden vertieft in [6] und [7] und beschrieben.

3 Kantenfestigkeiten verschiedener Kantenausführungsarten

3.1 Untersuchungsumfang

Um Einflüsse aus dem Herstellungsprozess zu ermitteln, wurde in [5] eine Versuchsmethodik mit mikroskopischen Oberflächenanalysen, Bruchversuche und einer Fehlstellenanalyse entwickelt. Darin werden bruchverursachende Fehlstellen ermittelt, die eine Rückführung auf deren Entstehung im Herstellungsprozess und daraus ableitbare Prozessoptimierungen ermöglichen.

Im ersten Schritt, der Oberflächenanalyse, wurden für jeden Prüfkörper die Kanten-, Saum- und kantennahen Scheibenoberflächen mikroskopiert. Die Oberflächen wurden im Lasteinleitungsbereich der späteren Bruchversuche aufgezeichnet, da hier die höchsten Biegezugspannungen auftreten und somit die Bruchwahrscheinlichkeit am größten ist. Anschließend erfolgten Vierpunkt-Biegeversuche um die starke Achse. Der Versuchsstand und die Versuchsdurchführung haben sich in verschiedenen Studien zur Kantenfestigkeit ([3],[4]) etabliert und orientieren sich an der DIN EN 1288-3 [9]. Im letzten Schritt erfolgte die Fehlstellenanalyse. Dazu wurde die genaue Lage des Bruchurspungs am Bruchstück mikroskopiert und mit den im Voraus aufgezeichneten Bildern verglichen. Das Aussehen der Fehlstelle vor dem Bruch ermöglichte Rückschlüsse auf deren Entstehung und dies ermöglicht wiederum Rückschlüsse auf die Bearbeitungsparameter der Glaskante.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden in Abhängigkeit der Kantenausführungsart verschiedene Prozessparameter bei einem Hersteller (Hersteller 1) variiert, um deren Einfluss auf die Kantenfestigkeit zu ermitteln. Die Untersuchungen fanden iterativ statt, mit dem Ziel, bruchverursachende Fehlstellen durch optimierte Herstellungsprozesse zu reduzieren. Als Prüfkörper wurden Glasträger in Abmessungen von 1100 mm x 125 mm hergestellt. Hierbei wurden geschnittene, gesäumte, maßgeschliffene, geschliffene und polierte Kanten betrachtet. Für die Untersuchung der polierten Kantenausführungsart wurde ein weiterer Hersteller (Hersteller 2) hinzugezogen, der auf die Herstellung von Hochglanzpolituren spezialisiert ist.

3.2 Ermittelte Kantenfestigkeiten

Die Kantenfestigkeit verschiedener Prüfserien wurde nach zweiparametrischer Weibullverteilung ermittelt. Sie entspricht dem 5 %-Fraktilwert und ist im Diagramm (siehe Abb. 4) numerisch angegeben. Für die Ermittlung der Kantenfestigkeit wurden Prüfserien innerhalb einer Kantenausführungsart nach maßgebenden Parametern gruppiert, sofern für

die Parameter kein signifikanter Einfluss festgestellt worden ist. Die wesentlichen Ergebnisse werden in Abb. 4 dargestellt.

Für die geschnittenen Kanten wurde das Schneidrad als maßgebender Prozessparameter festgestellt. Hierbei wurde ein konventionelles Schneidrad *s1* und mikrostrukturiertes Schneidrad *s3*, welches die Glasoberfläche im Anritzvorgang perforiert, untersucht. Beide wiesen einen Schneidenwinkel von 158° auf. Die charakteristische Kantenfestigkeit $f_{k,Kante}$ in Höhe von 36 N/mm^2 wurde bei den Prüfserien mit Schneidrad *s1* unterschritten (KG-s1). Mit dem mikrostrukturierten Schneidrad *s3* wurde ein kleineres Risssystem erzeugt und die Kantenfestigkeit konnte um 65 %, von $31,22 \text{ N/mm}^2$ auf $51,64 \text{ N/mm}^2$ (KG-s3), gesteigert werden. Somit liegt sie über der charakteristischen Biegezugfestigkeit von Floatglas $f_{k,Float}$ in Höhe von 45 N/mm^2 . Folglich ist es im Bereich des Möglichen, die eingangs erwähnten Abminderungsbeiwerte mit Blick auf eine effizientere Konstruktion infrage zu stellen

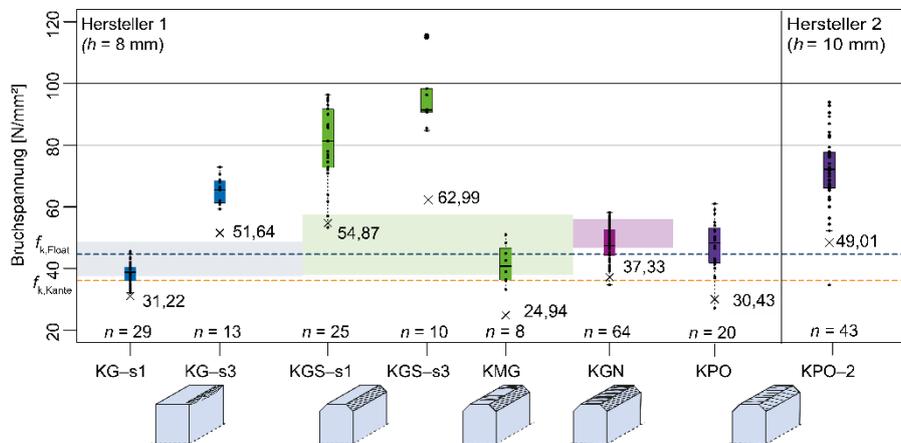


Abbildung 4: Verteilung der ermittelten Bruchspannungen in Abhängigkeit der Kantenausführungsart und maßgebender Prozessparameter. Numerisch angegeben sind die 5 %-Fraktile mit 95 % Ausfallwahrscheinlichkeit nach zweiparametrischer Weibullverteilung.

Ein maßgebender Einfluss des Schneidrads auf die Kantenfestigkeit hat sich auch in der Herstellung der gesäumten Kantenausführungsart bemerkbar gemacht. Die Kantenfestigkeiten der gesäumten Kanten lagen mit $54,87 \text{ N/mm}^2$ und $62,99 \text{ N/mm}^2$ bei Hersteller 1 im Vergleich zu allen anderen Bearbeitungsvarianten am höchsten.

Für die weiteren Bearbeitungsstufen, Maßgeschliffen, Geschliffen und Poliert, konnte bei Hersteller 1 kein Parameter (Einfluss des Schneidrads, Vorschubgeschwindigkeit, Abtragtiefe, Körnungsgröße) mit signifikantem Einfluss auf die Kantenfestigkeit ermittelt werden, hier wurden alle untersuchten Prüfserien zusammengefasst. Für die geschliffene Kante wurde eine Kantenfestigkeit von $37,33 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Für die polierte Kante wurden lediglich $30,43 \text{ N/mm}^2$ festgestellt. Dieser Wert liegt markant unterhalb der genormten charakteristischen Kantenfestigkeit $f_{k,Kante}$ – trotz höchster optischer Veredlungsstufe mit einer makroskopisch einwandfreien, polierten Kantenqualität. Für die polierte Prüfserie von Hersteller 2 (KPO-2) konnte eine Kantenfestigkeit von $49,01 \text{ N/mm}^2$ nachgewiesen werden.

Höhere Kantenfestigkeiten polierter Kanten sind in Abhängigkeit der Herstellung somit möglich, gehen allerdings nicht zwingend mit hohen Festigkeiten einher. Das vorliegende

Beispiel des Herstellers 1 zeigt vielmehr, dass eine mit der Bearbeitung der Kantenoberfläche (ab der maßgeschliffenen Kantenausführungsart) die Kantenfestigkeiten auf einem geringeren Niveau liegen und derzeitige genormte Grenzwerte sogar unterschreiten können.

3.3 Herstellervergleich

Die resultierenden Kantenfestigkeiten von fünf Herstellern einer vorangehenden Studie [3] werden für einen Vergleich in Abb. 4 als schattierte Bereiche für die geschnitten, gesäumt und geschliffen Kantenausführungsarten dargestellt. Die polierte Kantenausführungsart wurde darin nicht untersucht. In der Studie lagen alle ermittelten Werte über der charakteristischen Kantenfestigkeit von 36 N/mm^2 . Für die hier vorgestellten Prüferien der geschnittenen und gesäumten Kante lagen die Kantenfestigkeiten im unteren und oberen Bereich der Streuungen. Eine gezielte und mikroskopisch nachgewiesene Rissreduzierung im Herstellungsprozess ging dabei mit höheren Kantenfestigkeiten einher.

Für die untersuchte geschliffene Kantenausführungsart lag die ermittelte Kantenfestigkeit deutlich unter dem Wertebereich der vorangegangenen Untersuchung. Informationen zu den darin verwendeten Prozessparametern des Schleifprozesses liegen nicht vor.

Ein Vergleich der Prozessparameter zur Herstellung der polierten Kantenausführungsart der eigenen Untersuchungen bei Hersteller 1 und Hersteller 2 zeigt, dass die Korngrößen der materialabtragenden Stationen im Schliff wesentliche Unterschiede aufwiesen. Hersteller 1 erzeugt den Materialabtrag mit vier Stationen, die eine Diamantkörnung von $231 \mu\text{m}$, $181 \mu\text{m}$, $126 \mu\text{m}$ und $107 \mu\text{m}$ aufweisen und trägt dabei 2 mm der Kantenoberfläche ab. Hersteller 2 trägt 1 mm Material mit drei Topfschleifscheiben ab, die eine Körnung von $151 \mu\text{m}$, $76 \mu\text{m}$ und $54 \mu\text{m}$ aufweisen. Es besteht die Annahme, dass der angreifenden Diamanten, das Dreifache seines Durchmessers als Tiefenrissen ins Glas einbringt [10].

Darauf beruhend und unter der Annahme, dass einzelne Stationen so auf einander abgestimmt sind, dass sie die eingebrachten Tiefenrisse der vorangegangenen Station abtragen, verbleiben bei Hersteller 1 rechnerisch $321 \mu\text{m}$ und bei Hersteller 2 rechnerisch $162 \mu\text{m}$. Da die weichen Topfschleifscheiben für die Politur die Oberflächen glätten, allerdings keine tiefen Fehlstellen beseitigen können, wird die Annahme getroffen, dass die hohe Festigkeit von Hersteller 2 auf die feineren Topfschleifscheiben im Schliff zurückzuführen ist.

3.4 Detektierte Bruchursachen und Empfehlungen zur Herstellung

In Abhängigkeit der Kantenausführungsart ließen sich verschiedene bruchverursachende Fehlstellen lokalisieren und in „im Herstellungsprozess entstanden“ oder „nachträglich eingebrachte“ Fehlstellen kategorisieren. Im Herstellungsprozess entstandene Fehlstellen wurden in weiteren Optimierungsschritten gezielt verringert. Nach der Herstellung eingebrachte Fehlstellen, die sich dadurch auszeichnen, dass sie nicht mit den Charakteristiken des Zuschnitts oder Schliffs einhergehen, sind auf die Handhabung oder den Transport zurückzuführen.

Basierend auf den Untersuchungen lassen sich zur Umsetzung einer hohen Kantenfestigkeit folgende Empfehlungen für die Herstellung von Glaskanten geben:

- KG: Verwendung mikrostrukturierter Schneidräder zur geringeren Rissbildung von Lateralrissen. Die Schneid- und Brechkraft soweit reduzieren, dass gerade

Schnittkanten ohne Ober- und Unterbrüche hergestellt werden, um eine Nachbearbeitung durch Maßschliff zu vermeiden. Der Einfluss weiterer Schneidparameter ist in [4] ausführlich untersucht.

- KGS: Vollständiger Abtrag von Tiefen- und Lateralrissen der geschnittenen Kante und Herstellung eines homogenen Saums im Kantenschleifautomat.
- KMG: Eine teilweise Bearbeitung auf der Kantenoberfläche verringert die Kantenfestigkeit.
- KGN, KPO: Eingreifende Korngrößen so fein wie möglich wählen und den Materialabtrag auf mehrere Stationen verteilen. Gegebenenfalls anvisierten Materialabtrag in zwei Schleifschritten mit geringeren Abtragstiefen ausführen.
- Für alle Kantenbearbeitungsarten gilt es Kantenschutzmaßnahmen während Logistik und Handhabung vorzusehen.

4 Ansatz von Kantenfestigkeiten in der Bemessung

Sollten Hersteller mit hohen Reklamationen von Floatglaskanten konfrontiert sein oder aufgrund von anspruchsvollen Projekten hohe Kantenfestigkeiten nachweisen müssen, wird empfohlen die Herstellungsprozesse der geforderten Kantenausführungsart individuell zu untersuchen und hinsichtlich der Kantenfestigkeit zu optimieren. Auch der Einsatz von vorgespannten Glaskanten kann eine deutlich höhere Kantenfestigkeiten ermöglichen, allerdings gehen damit höhere Herstellungskosten und ein verändertes Bruchverhalten einher, sodass dies nicht zwangsläufig zielführend ist.

Um höhere Kantenfestigkeiten in Deutschland nachzuweisen, bleibt aus baurechtlicher Sicht derzeit lediglich die Möglichkeit bei der DiBt einen Kombibescheid der Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) zur Definition der Produkteigenschaften und einer Allgemeinen Bauartgenehmigung (aBG) für den Ansatz in der Bemessung anzustreben.

Die derzeitigen Bemessungswerte der Kantenfestigkeit von Floatglas gelten als untere Grenzwerte der auf dem Markt verfügbaren Qualitäten. Die vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass diese Werte sowohl unterschritten werden als auch innerhalb eines Herstellungsprozesses stark streuen können. Vor allem die Herstellung von geschliffenen und polierten Kanten ruft Fehlstellen hervor, die einen starken Einfluss auf die Kantenfestigkeit haben. Hier konnten noch keine allgemeingültigen Prozessparameter definiert werden, die mit hohen Kantenfestigkeiten einher gehen. Zukünftig werden Einsatzempfehlungen mit minimalen Korngrößen von Schleifwerkzeugen notwendig.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Streuung von herstellungsbedingten Glaskantenfestigkeiten kann nicht über pauschale Beiwerte in Abhängigkeit der (optischen) Kantenausführungsart abgebildet werden. Aufgrund der vorhandenen Unterschiede sind individuelle Betrachtungen von Glaskanten notwendig, die experimentell in Abhängigkeit der Kantenausführungsart zu ermitteln sind.

Normative Mindestwerte sollten daher auf einer fundierten Datenbasis beruhen und an definierte Prozesskriterien oder experimentelle Nachweise gebunden sein. Es ist davon auszugehen, dass die Reduzierung der Risstiefen während der Schleif- und Polierprozesse auch positive Effekte auf vorgespannte Glaskanten hat.

Danksagung

Die Ergebnisse sind in den Forschungsprojekten „Saum 2.0 – Entwicklung eines neuen Schleifprozesses für Bauteile aus Glas“ (FKZ 4123712TA7) und „Kante 4.0 – Floatgläser mit definierter Kantenfestigkeit für den Einsatz im Fassadenbau.“ (FKZ 4123721HF9) entstanden. Beide Projekte wurden im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (heute BMWK) gefördert. Ein besonderer Dank gilt den Projektpartnern für die gute Zusammenarbeit, technische Unterstützung und die Herstellung von Prüfkörpern.

Literatur

- [1] DIN 18008: Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen. Beuth Verlag, Berlin 2020.
- [2] CEN/TS 19100-1: Design of glass structures -- Part 1: Basis of design and materials. Europäisches Komitee für Normung CEN/TC 250, 2021.
- [3] KLEUDERLEIN, J.; ENSSLEN, F., SCHNEIDER, J.: Untersuchung zur Kantenfestigkeit von Floatglas in Abhängigkeit der Kantenbearbeitung. In: Weller, B., Tasche, S. (Hrsg.) Glasbau 2016, Ernst&Sohn, Berlin, 2016, S. 149-159.
- [4] LINDQVIST, M.: Structural Glass Strength Prediction Based on Edge Flaw Characterization. Dissertation. EPFL Lausanne, 2013.
- [5] VANDEBROEK, M.: Thermal Fracture of Glass. Dissertation. Ghent University, University of Antwerp, 2014.
- [6] MÜLLER-BRAUN, S.: Rissystem und Festigkeit der geschnittenen Kante von Floatglas. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2021.
- [7] BUKIEDA, P.: Einfluss des Schleifprozesses auf die Kantenfestigkeit von Floatglas. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2023. *In Veröffentlichung.*
- [8] DIN 1249-11: Flachglas im Bauwesen, Teil 11: Glaskanten - Begriffe, Kantenformen und Ausführung, Beuth Verlag, Berlin 2017.
- [9] DIN EN 1288-3: Glas im Bauwesen - Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas - Teil 3: Prüfung von Proben bei zweiseitiger Auflagerung (Vierschneiden-Verfahren). Beuth Verlag, Berlin 2000.
- [10] HAYASHIDA, K., KING, G.-L., TESYNSKI, J., WITTENBURG, D.: Rationale for windshield glass system specification requirements for shuttle orbiter. Space Devision, North American Rockwell, 1972.