



Fachverband Konstruktiver Glasbau e.V.

Merkblatt FKG 01/2019

Die visuelle Qualität von Glas im Bauwesen – Anisotropien bei thermisch vorgespanntem Flachglas

Datum: Mai 2019

Disclaimer – Haftungsausschluss

Alle Informationen in diesem Merkblatt sind nach bestem Wissen und Gewissen zusammengestellt. Wir weisen jedoch darauf hin, dass wir keine Haftung für die Richtigkeit, Aktualität und Vollständigkeit der Informationen übernehmen. Insbesondere ersetzt der Inhalt dieses Merkblattes keine technische Beratung im Einzelfall.

Fachverband Konstruktiver Glasbau e.V.

Wüllnerstraße 113 | 50931 Köln | Tel.: +49 (0)221.94887.14 | Fax: +49 (0).221.94887.15

www.glas-fkg.org | info@glas-fkg.org

1. Einleitung

Der Begriff der „Anisotropien“ in Verbindung mit thermisch vorgespannten Flachgläsern beschäftigt Architekten, Glasveredler, Fassadenbauer und Bauherren. Auch wenn Anisotropien (Irisationen) im Sinne der Produktnormen und visuellen Beurteilungsrichtlinien keinen berechtigten Mangel darstellen, empfinden Architekten, Bauherren, Fassadenberater und zunehmend Nutzer von Gebäuden diesen Effekt als optische Beeinträchtigung (Bild 1). Daher wird der Verringerung von Anisotropien verstärkt Aufmerksamkeit gewidmet und das Thema bildet auf nationalen und internationalen Fachtagungen einen Schwerpunkt bei Seminaren und Vorträgen. Ein weiterer Grund hierfür sind neuartige Inline-Messmethoden (Scanner) zur Erfassung und Visualisierung von Anisotropien.



Bild 1 Anisotropien unter (teil)-polarisiertem Tageslicht am 01.08.2017 (Quelle: Hochschule München)

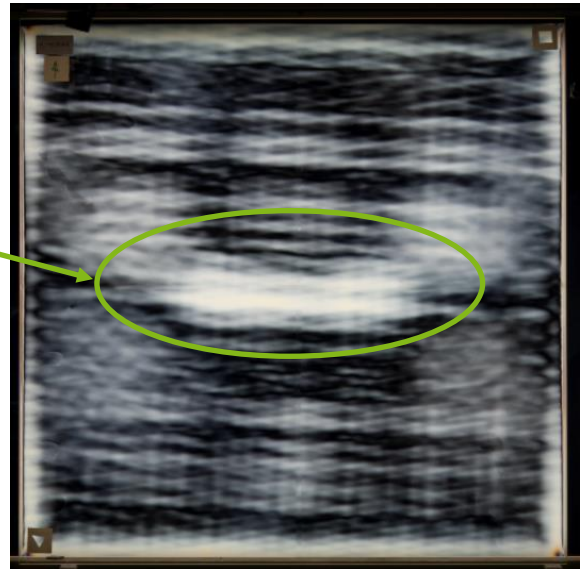


Bild 2 Anisotropien im Polariskop unter maximaler Polarisation (Quelle: Hochschule München)

Durch die Weiterentwicklung zu quantitativen Messsystemen wird Schritt für Schritt der Weg zur objektiven Bewertung von Anisotropien ermöglicht werden. Aktuelle und abgeschlossene kooperative Forschungsvorhaben der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH), der Hochschule München (HSM) und der Technischen Universität Darmstadt (TUD) sowie die Verbandsarbeiten im Fachverband Konstruktiver Glasbau e. V. (FKG) tragen zu diesem Fortschritt maßgeblich bei [1].

2. Anisotropie in Normen und Regelwerken

In nationalen und internationalen Produktnormen und Regelwerken [2 - 5] zur Beurteilung der visuellen Qualität von Glas werden Anisotropien nicht als Fehler und Defekte bezeichnet, sondern als sichtbare Effekte bzw. Charakteristika von vorgespannten Gläsern, die von der Beurteilung der visuellen Qualität ausgeschlossen sind.

3. Was sind Anisotropien?

Glas wird aufgrund seiner transparenten Optik gerne als Werkstoff im Bauwesen eingesetzt. Grundsätzlich ist Glas ein isotropes Material, dessen physikalische Eigenschaften in allen Richtungen gleich sind. Innere (thermisch induzierte) und äußere (lastinduzierte) Spannungen verwandeln Glas jedoch in ein doppelbrechendes Material mit optisch richtungsabhängigen (anisotropen) Eigenschaften. Trifft nun polarisiertes Licht auf ein thermisch ungleichmäßig vorgespanntes Glas, können optische Irregularitäten in Form von grauen, weißen oder regenbogenfarbigen Flecken, Ringen, Streifen als charakteristisches Muster (Bild 1) in der Fassade sichtbar werden. Dieses Phänomen wird als Anisotropien bezeichnet und kann mithilfe der Spannungsoptik [6] erklärt werden.

4. Wie entstehen Anisotropien?

4.1 Allgemeines

Anisotropien sind das Resultat nicht vollkommen homogen eingebrachter Eigenspannungen aus dem Herstellprozess thermisch vorgespannter Gläser, die unter polarisiertem Licht und spezieller Betrachtung für das menschliche Auge sichtbar werden. Trifft ein polarisierter Lichtstrahl (siehe Kap 4.3) auf eine Glasscheibe, wird dieser beim Eintritt in das Glas in zwei Richtungen parallel der Hauptspannungen σ_1 und σ_2 aufgespalten. Sind diese Hauptspannungen nicht gleich groß, erfahren die beiden Teilstrahlen unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten im Glas, wodurch sich nach Austritt der Lichtstrahlen eine Wegdifferenz einstellt. Die Wegdifferenz wird als Gangunterschied s bezeichnet. Da das menschliche Auge den Gangunterschied als Interferenzfarben (Bild 3) wahrnimmt, steht dieser im direkten Zusammenhang mit sichtbaren Anisotropien. Durch die Variation der Gangunterschiede / Interferenzfarben über die Fläche der Glasscheibe ergibt sich dann das typische Anisotropiebild (Bild 2).



Bild 3 Interferenz-Farbskala nach Michel-Lévy (analytisch berechnet) [7]

Der Gangunterschied s ist von der spannungsoptischen Konstante C des Glases und dem Integral der Differenz der Hauptspannungen $\sigma_1 - \sigma_2$ über die Dicke der Scheibe d abhängig.

$$s = C \int_d (\sigma_1(z) - \sigma_2(z)) dz$$

s	Gangunterschied [nm]
C	Spannungsoptische Konstante in [TPa ⁻¹]
$\sigma_1 - \sigma_2$	Differenz der Hauptspannungen in [N/mm ²]
d	Glasdicke in [mm]

Formel 1: Gangunterschied [7]

4.2 Inhomogenitäten bei der Herstellung von thermisch vorgespanntem Glas

Durch den thermischen Vorspannprozess werden die mechanische Festigkeit und die Temperaturwechselbeständigkeit verbessert. Dies geschieht in der Regel, indem eine Glasscheibe in einem Vorspannofen auf ca. 620 °C erhitzt wird, wobei das Glas auf horizontalen Keramikrollen liegend in den Ofen eingefahren wird und während des Aufheizvorgangs ständig in Bewegung (Oszillation) ist. Anschließend wird das Glas im Abkühlbereich, dem sogenannten "Quenchbereich" des Ofens, schnell auf Umgebungstemperatur abgekühlt, wodurch gewollt Eigenspannungen in das Glas eingebracht werden. Abkühlsysteme bestehen typischerweise aus einer Reihe von Walzen und Kühldüsen. Ziel des Vorspannprozesses ist, das Glas von beiden Seiten gleichmäßig zu erhitzen und abzukühlen. Die große Anzahl von Kühldüsen und die Oszillation der Scheibe während des Vorspannprozesses sollen einen gleichmäßigen Wärmeübergang und damit ein homogenes Eigenspannungsprofil (Bild 4) in der gesamten Glasscheibe unabhängig von der Richtung gewährleisten. Dies kann jedoch nicht gänzlich gelingen, da

- einige Bereiche der Glasscheibe (z.B. Kanten, Ecken und Bohrungen) schneller als andere Bereiche (z.B. Fläche, Mitte, Bedruckungen) abkühlen.
- bedingt durch den unvermeidbaren Kontakt zwischen Glasoberfläche und Walzen sowie die Anordnung der Rollen und Luftdüsen im Ofen die Aufheizung und Abkühlung der Glasscheiben nicht völlig homogen erfolgen kann.

Je höher der Temperaturunterschied in der Scheibenfläche (Bild 5), desto höher sind die resultierenden Spannungsdifferenzen und die optischen Anisotropien. Eine Herstellung komplett ohne Anisotropien ist in diesem Verfahren nicht möglich.

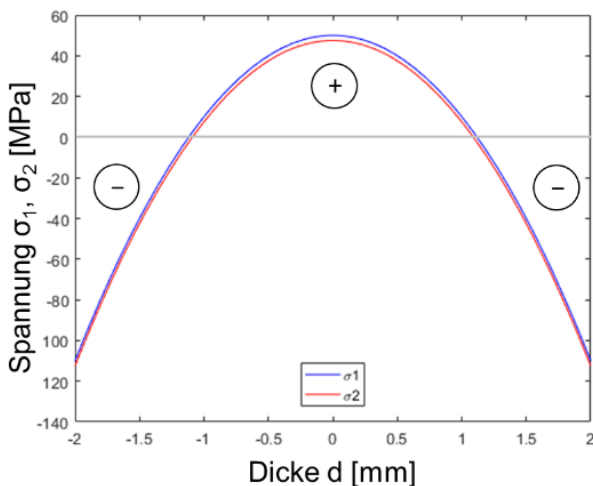


Bild 4 exemplarisches Vorspannprofil mit Spannungsdifferenzen von 2,5 MPa an einem diskreten Punkt in der Glasfläche (Quelle: HSM)

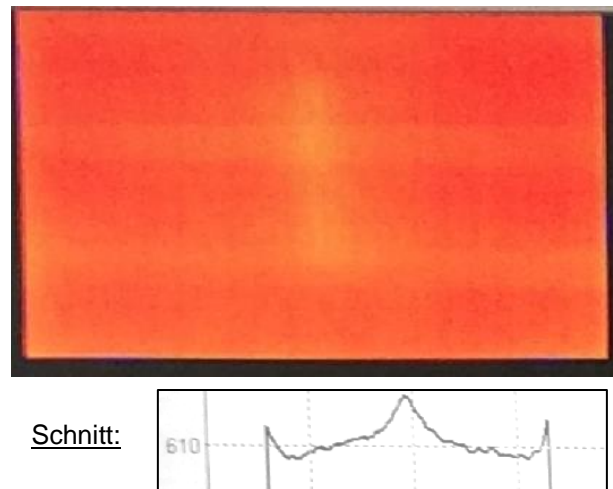


Bild 5 exemplarischer Scan der Oberflächentemperatur vor dem Abkühlen mit erhöhten Temperaturen in Scheibenmitte (Quelle: anonym)

4.3 Polarisiertes Licht

Polarisiertes Licht ist Licht, das als elektromagnetische Welle in einer bestimmten Richtung schwingt. Im normalen Tageslicht sind Anteile an polarisiertem Licht enthalten. Dieses entsteht durch Streuung des Sonnenlichts an Luftmolekülen in der Atmosphäre (Rayleigh-Streuung) oder durch Reflexion des Lichts an dielektrischen Medien, wie z.B. großflächigen Gewässern oder umgebenden Gebäuden mit großem Glasanteil. Durch Reflexion des Lichtes in einem bestimmten Einstrahlwinkel, dem sogenannten Brewster-Winkel α_B (Bild 6), wird dieses senkrecht zur Strahlrichtung linear polarisiert [8].

Polarisiertes Licht wird je nach Schwingungsart in linear, elliptisch und zirkular polarisiertes Licht unterschieden [6]. Linear polarisiertes Licht schwingt nur in einer definierten Richtung. Wird die Schwingrichtung auf die Lichteinfallsebene bezogen, kann diese in die zwei Vektoren senkrecht und parallel zur Strahlrichtung des polarisierten Lichts unterteilt werden. Zirkular polarisiertes Licht rotiert zudem in Ausbreitungsrichtung. In natürlichem Licht kommt hauptsächlich die Mischform, elliptisch polarisiertes Licht, vor. Der Anteil an polarisiertem Licht im Tageslicht wird Polarisationsgrad [%] genannt.

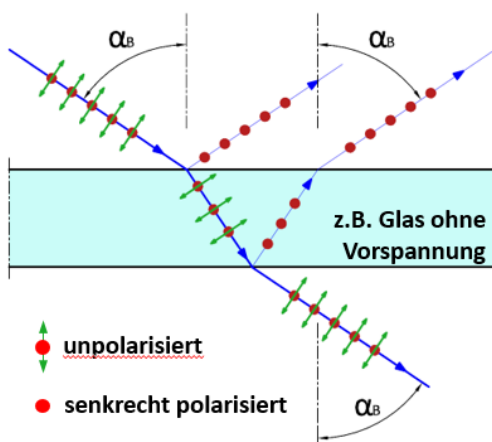


Bild 6 Entstehung von polarisiertem Licht unter dem Brewster-Winkel α_B (Quelle: HSM in Anlehnung an [8])

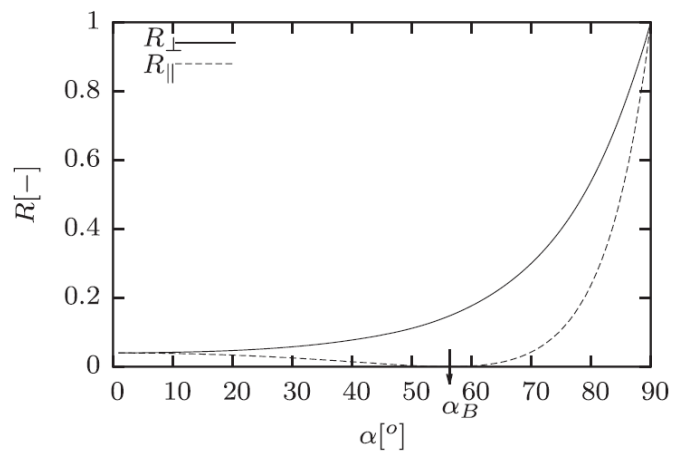


Bild 7 Reflexionskoeffizient R in Abhängigkeit des Einfallswinkels α [8]

4.4 Wahrnehmung von Anisotropie-Effekten

Auf Grundlage der Spannungsoptik [6] muss für die Wahrnehmung von Anisotropien neben polarisiertem Licht und doppelbrechendem Medium ein Analysator vorhanden sein. Ohne optische Hilfsmittel, wie z.B. Polarisationsfilter oder Sonnenbrillen mit polarisierenden Gläsern als Analysatoren hängt die Wahrnehmung von Irisationen in natürlicher Umgebung stark von dem Betrachtungswinkel ab. Im sogenannten Brewster-Winkel α_B , der bei Glas $\sim 56^\circ$ beträgt, ist die Intensität des reflektierenden parallelen Lichtstrahls nahe Null (Bild 7). Anisotropie-Effekte sind daher aufgrund der reduzierten Reflexion am deutlichsten in einem Winkel nahe dem Brewster-Winkel bei parallel polarisiertem Licht sichtbar (Bild 8).

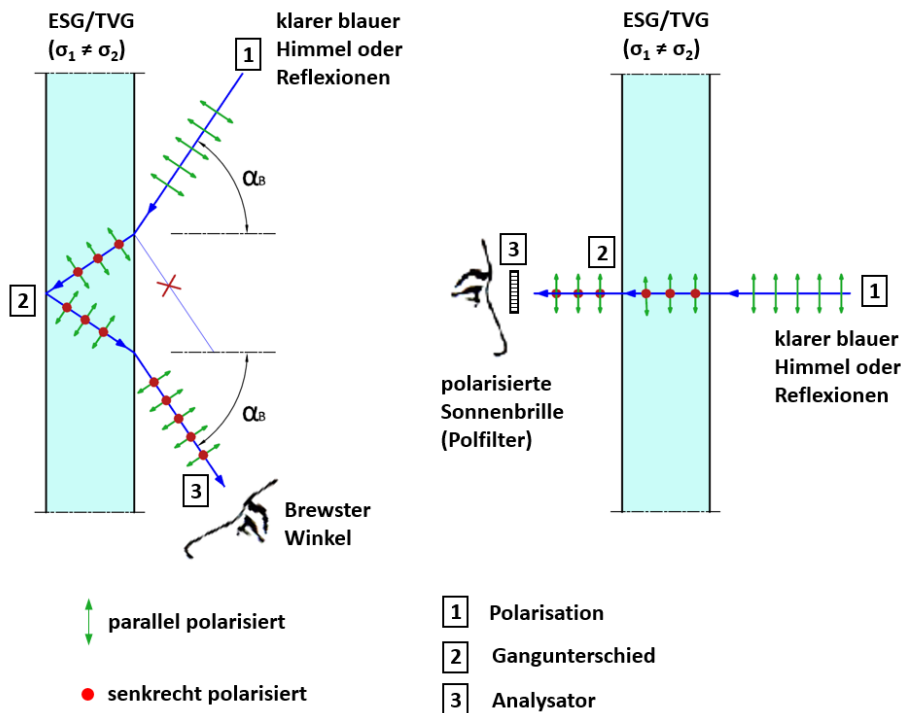


Bild 8 Szenarien, bei denen Anisotropien sichtbar werden (Quelle: HSM)

5. Parameter, die die Wahrscheinlichkeit der visuellen Wahrnehmbarkeit von Anisotropien beeinflussen

Einen großen Einfluss auf die visuelle Wahrnehmbarkeit von Anisotropien haben neben den in Kapitel 4 genannten Entstehungsvoraussetzungen auch die nachfolgend genannten Parameter (Bild 9). Je mehr Aspekte oder Effekte gleichzeitig vorhanden sind, desto wahrscheinlicher ist es, dass Anisotropien in einer Fassade sichtbar werden.

5.1 Glasart

Anisotropien treten nur bei thermisch vorgespannten Gläsern (ESG/TVG) auf. Bei Floatglas (ohne Vorspannung) besteht in der Regel keine Gefahr, dass der Effekt auftritt. Wie bereits erwähnt, spielt die Qualität des Vorspannprozesses eine wichtige Rolle. Die Möglichkeit, die Sichtbarkeit der Anisotropien zu reduzieren, wird allerdings durch die weiteren technischen Eigenschaften der Glasprodukte, z. B. Bruchbild und mechanische Festigkeit, welche normbedingt erfüllt werden müssen, eingeschränkt.

5.2 Glasaufbau und Glasdicke

Bei der Verarbeitung von vorgespanntem Glas zu weiteren Glasprodukten, u. a. Verbundsicherheitsglas (VSG), Mehrscheibenisolierverglasung (MIG) oder beschichtetem Glas erhöht sich die visuelle Wahrnehmbarkeit von Anisotropien u.a. durch folgende Parameter:

- mit zunehmender Dicke der Glasscheiben
- mit Veränderung der Transmission und der Reflexion (z.B. bei Beschichtungen)
- mit zunehmender Anzahl von vorgespannten Scheiben, die in einem Glasprodukt verbaut sind
- bei speziellen Geometrieformaten, insbesondere spitzen Winkeln, Ausnehmungen und Bohrungen
- unter Umständen bei Verwendung von steifen Verbundschichten

5.3 Gebäudeumgebung

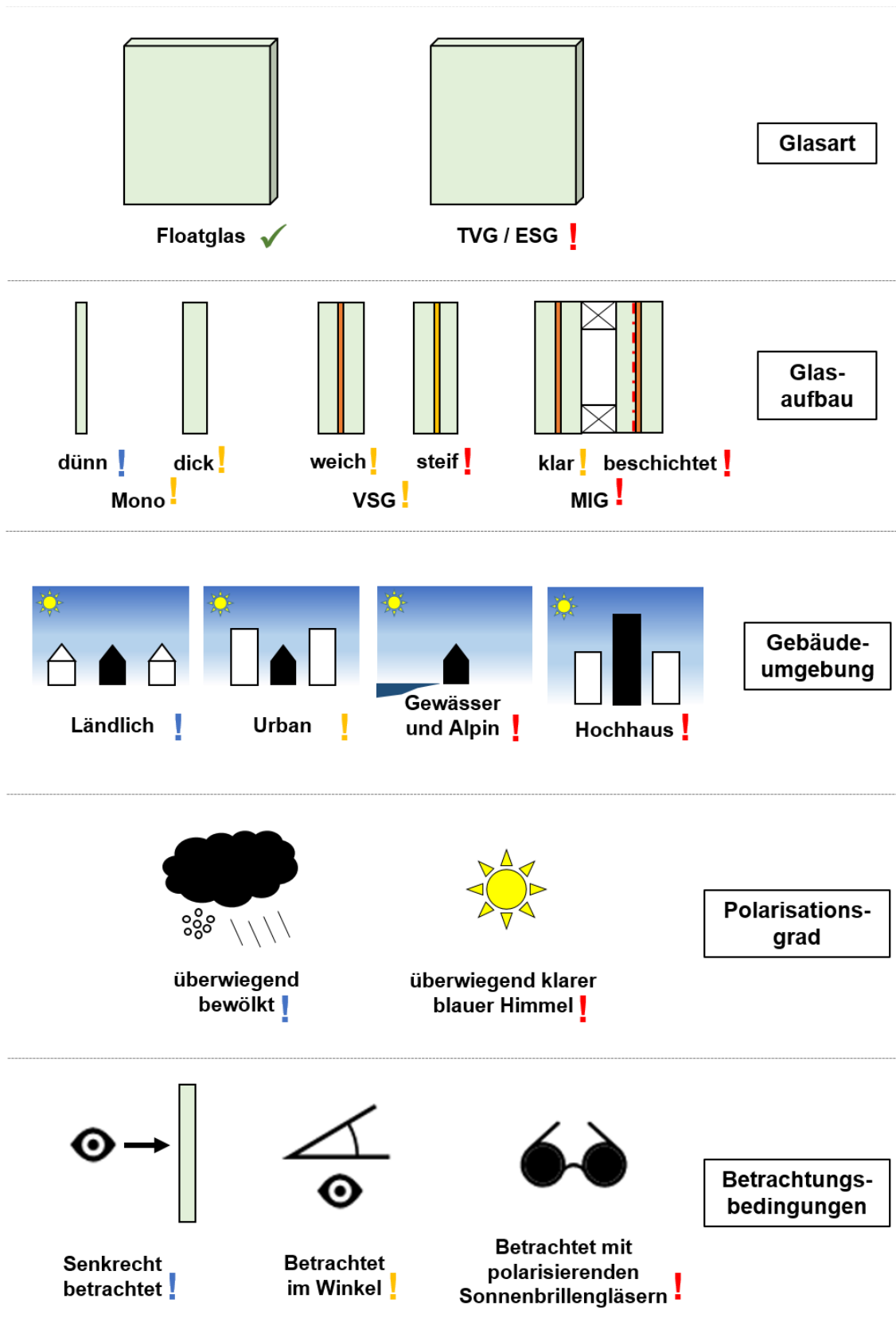
Die Lage und der Kontext im Sinne der natürlichen oder städtischen Umgebung des Gebäudes spielen eine wichtige Rolle und können die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass Anisotropien sichtbar werden. Durch Reflexion des Tageslichts (vgl. Abschnitt 5.4) kann der polarisierte Anteil (Polarisationsgrad) des Lichts und damit die Sichtbarkeit von Anisotropien erhöht werden. Befindet sich das Gebäude in unmittelbarer Nähe des Meeres, eines Sees, eines Flusses, schneebedeckten Flächen oder einer anderen stark reflektierenden Oberfläche, so kann die Polarisation des natürlichen Lichts verstärkt und vorhandene Anisotropien deutlicher wahrgenommen werden. Auch bei Hochhäusern, bei denen die Fassaden direkt dem Sonnenlicht / Himmel ausgesetzt sind, ist die Wahrscheinlichkeit der Sichtbarkeit von Anisotropien höher. Dies liegt zum einen am höheren Anteil von teilpolarisiertem Tageslicht aus der Rayleigh-Streuung (vgl. 5.4) und zum anderen an der höheren Wahrscheinlichkeit, dass ein Teil der Fassadengläser vermehrt unter dem Brewster-Winkel (vgl. 5.5 und Bild 8) betrachtet werden.

5.4 Polarisationsgrad des einfallenden Lichts

In Kapitel 4.3 ist die Entstehung von polarisiertem Licht beschrieben. Die Höhe des Polarisationsgrads aus der Rayleigh-Streuung variiert mit dem Lichteinfallswinkel sowie mit der relativen Position der Sonne zur Verglasung [8]. An Tagen mit einem sehr klaren, blauen Himmel ist dieser höher als an Tagen mit Bewölkung. Zudem sind bei einem niedrigen Sonnenstand die Anteile an polarisiertem Licht aus Streuung in der Atmosphäre am höchsten. Der Polarisationsgrad von Lichtstrahlen, die an einem dielektrischen Medium (z.B. Glas und Wasseroberfläche) reflektiert wurden, richtet sich nach dem Einfallswinkel des unpolarisierten Lichts und erreicht sein Maximum unter dem Brewster-Winkel (Bild 6 und Bild 7).

5.5 Betrachtungsbedingungen

Die Wahrnehmung von Anisotropien hängt wie bereits erwähnt stark von dem Betrachtungswinkel ab. Somit werden diese eher sichtbar, wenn die Glasfassade unter einem flacheren Winkel betrachtet wird, als wenn die Betrachtung senkrecht erfolgt. Die Verwendung von Sonnenbrillen mit polarisierten Gläsern verstärkt die Sichtbarkeit von Anisotropien und reduziert Reflexionen, so dass der Effekt unabhängig vom Betrachtungswinkel intensiver wahrgenommen wird (vgl. 4.4).



Legende:

- ✓ kein Risiko
- ! geringes Risiko
- ! mittleres Risiko
- ! hohes Risiko

Bild 9 Übersicht der Parameter, welche die Wahrscheinlichkeit der visuellen Wahrnehmung beeinflussen

6. Möglichkeiten zur Messung von Anisotropien im Produktionsprozess

Neben forschungsbasierten Messsystemen [10], mit denen die im Anhang beschriebenen Versuche durchgeführt wurden, existieren mittlerweile industrielle Messsysteme für die Quantifizierung von Gangunterschieden, die im Zusammenhang mit Anisotropien stehen [vgl. 4.3.1]. Der Grad dieser kann erfasst werden, indem man die Homogenität der eingeprägten Eigenspannungen nach dem Vorspannen zu TVG oder ESG erfasst. Idealerweise erfolgt dies mittels einer Inline-Messmethode (Anisotropiescanner), wenn die Scheiben den Kühlbereich des Vorspannofens verlassen (Bild 10). Hierdurch können die Anisotropien stets unter gleichen Umgebungsbedingungen bewertet werden. Forschungen der Hochschulen, Fachverbänden und der Industrie empfehlen diese Verfahren zur Messung von optischen Gangunterschieden.

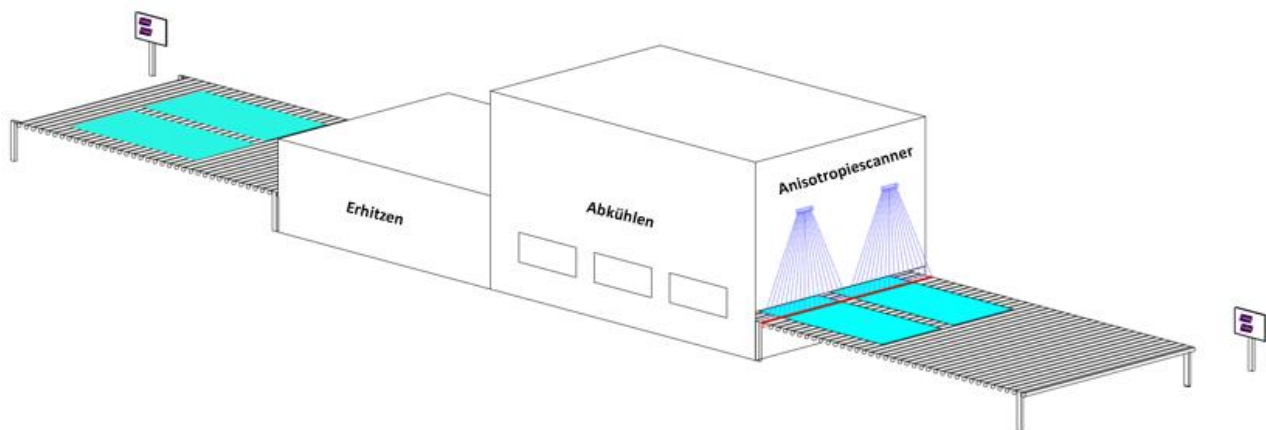


Bild 10 Prinzipskizze der Anordnung eines Inline – Anisotropiescanners am Ausgang des Vorspannofens (Quelle: HSM)

7. Bewertung der Sichtbarkeit von Anisotropien

Da die Umgebung Einfluss auf die Wahrnehmbarkeit von Anisotropien hat, sollte diese bei der visuellen Beurteilung der "Anisotropie-Sichtbarkeit" so weit wie möglich einbezogen werden. Es wird deshalb empfohlen, die Begutachtung der Musterfassade im spezifischen Bezug zum Projektstandort durchzuführen. Die Betrachtungsbedingungen müssen im Vorfeld zwischen den am Bau Beteiligten (Architekten, Bauherren, Berater, Fassadenplaner, Fassadenbauunternehmen, Generalunternehmer, Glasveredlungsbetriebe) vereinbart und bei der Bemusterung dokumentiert werden. Die am Projekt beteiligten Personen können so bereits zu einem frühen Zeitpunkt anhand der Musterfassade das Risiko der Sichtbarkeit der Anisotropien erkennen und dokumentieren.

Für die Scheiben der Musterfassade und auch für die Projektscheiben kann mit dem Glasverarbeiter als objektives Bewertungskriterium zusätzlich die quantitative Erfassung mittels Inline- oder Offline-Messsystemen vereinbart werden (vgl. Abschnitt 6). Sollte es bei der Projektabschluss zur Uneinigkeit bei der Bewertung der Anisotropien kommen, können die Messergebnisse gemeinsam mit dem Glasverarbeiter verglichen werden.

Anhang A ...

Die Teilnehmer des Projekts „Anisotropie“ im Arbeitskreis Fassadentechnik des FKG nahmen Mitte 2016 ihre Arbeit auf. Der hier dargestellte Zwischenstand gibt einen Einblick in bisherige Untersuchungsergebnisse.

A.1 Start und Beschreibung der experimentellen Untersuchungen

Unter den Teilnehmern bestand Einigkeit, dass eine übergeordnete Bewertungsrichtlinie nur gefunden werden kann, wenn von einer einheitlichen, objektiven Grundlage für die Bewertung auszugehen ist. Daher wurde von den beteiligten Forschungseinrichtungen vorgeschlagen, Musterscheiben zu produzieren und diese mit geeigneten, quantifizierbaren Messmethoden an den Hochschulen (RWTH, HSM) zu untersuchen und anschließend im Arbeitskreis zu diskutieren. Die Teilnehmer waren sich einig, dass als erster Schritt monolithische unbeschichtete Glasscheiben begutachtet werden sollen. Folgende Matrix (Tabelle 1) zur Probekörperherstellung wurde erstellt:

Tabelle 1 Matrix für Probekörper (Breite x Höhe = 1,0m x 1,0m)

Glasveredler:	7
Glasart:	clear Float + low Iron
Glasdicke:	6 mm + 12 mm
Vorspannung	TVG + ESG
Kantenbearbeitung:	KGN
Anzahl pro Typ:	2 Stk.
Gesamtanzahl:	$7 * 2 * 2 * 2 * 2 = 112$ Stk.



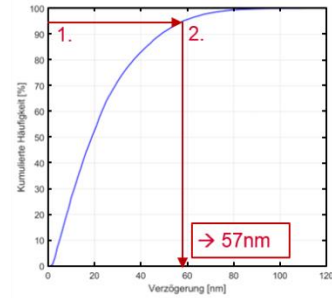
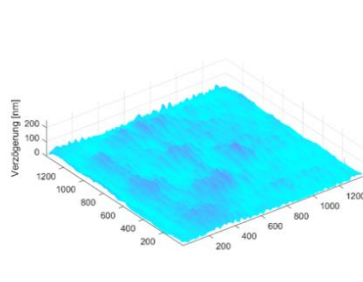
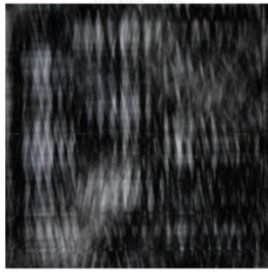
Die an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen und der Hochschule München entwickelten vollflächigen Messverfahren zur Erfassung von Anisotropien basieren auf den physikalischen Grundlagen der Spannungsoptik [6] und der Weiterentwicklung der digitalen Bildverarbeitung [9]. In der Spannungsoptik werden im Polariscope unter Verwendung von optischen Filtern (Polfilter und Verzögerungsplatten) Spannungsdifferenzen in doppelbrechenden Medien vollflächig sichtbar gemacht. Erst durch die Verwendung von zirkularen Polfiltern [6] kann aus den digital akquirierten Aufnahmen (sog. Isochromatenbilder) der Gangunterschied (Verzögerung) extrahiert werden.

Isochromatenbilder liefern aufgrund Ihrer Richtungsunabhängigkeit objektive und reproduzierbare Ergebnisse unter hundertprozentiger Polarisierung. Die HSM und die RWTH sind im Besitz von stationären Offline-Messsystemen, mit denen thermisch vorgespannte Gläser durch die Messung von Gangunterschieden und unter Verwendung stochastischer Verfahren beurteilt werden können. Eine ausführliche Beschreibung der beiden Messverfahren findet sich in [7] und [10]. Das Schema der Verfahren nach der Aufnahme der Isochromatenbilder ist wie folgt:

1. Polfilteraufnahme

2. Analyse Pixel

3. Statistische Auswertung



- Einlesen einer Polfilteraufnahme
- Algorithmen analysieren jeden Pixel → Zuordnung der Verzögerung
- Statistische Auswertung über die Summenhäufigkeiten

Bild 11 Schema Funktionsweise der Algorithmen und statistische Auswertung

Die Messmethoden beinhalten die pixelgenaue Erfassung des Gangunterschieds (Verzögerung) in der gesamten Glasfläche und die Auswertung mithilfe statistischer Methoden. Zur Beurteilung der Gläser wurde der 95% Quantilwert herangezogen. Dieser besagt, dass 95 % der analysierten Fläche einen Gangunterschied [nm] kleiner dieses Wertes aufweisen. Je weniger Anisotropie eine Scheibe aufweist, desto geringer ist ihr entsprechender Quantilwert.

A.2 Stand der experimentellen Untersuchungen

Wie im vorherigen Punkt beschrieben wurden 112 unbeschichtete Probekörper mit den Abmessungen 1,0m x 1,0m von den Forschungseinrichtungen untersucht. Im Nachgang wurden nochmals 36 weitere Proben (Hersteller X) messtechnisch erfasst. Die Ergebnisse aller ausgewerteten Proben sind in Bild 12 dargestellt.

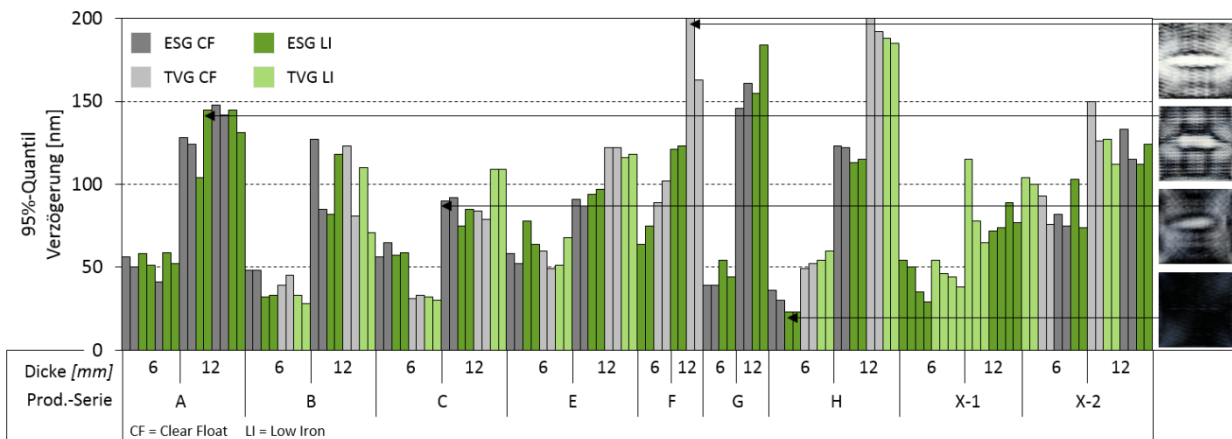


Bild 12 Übersicht der unbeschichteten Proben (1,0m x 1,0m) – KEINE REFERENZWERTE

Folgende Gesetzmäßigkeiten wurden während der Versuche festgestellt:

- Unterschiede je nach Glasveredler (Quantilwert und Muster)
- Dickenabhängigkeit: Je dicker die Glasscheibe, desto höher der Gangunterschied (Verzögerung)
- Es konnte zwischen der Höhe des Vorspanngrades (teilverspanntes Glas oder Einscheibensicherheitsglas) und den Gangunterschiedswerten kein eindeutiger Zusammenhang festgestellt werden.

A.3 Erste visuelle Bewertung der untersuchten Proben

In der 4. Sitzung des Arbeitskreises Fassadentechnik des Projekts „Anisotropie“ in Plattling wurden die in Bild 12 dargestellten Ergebnisse vorgestellt und anhand einer visuellen Gegenüberstellung bei Tageslicht verglichen.

Die Voraussetzung für einen hohen Grad an polarisiertem Licht war am Tag der Sitzung gegeben. Die visuelle, subjektive Untersuchung fand ab 10:15 Uhr bei wolkenfreiem, blauem Himmel statt (siehe Bild 13).

Es wurden vorab neun verschiedene thermisch vorgespannte Gläser der Herstellerserie A, B, C und X ausgewählt und in die mobilen Musterfassadenstände der Firma Interpane eingebaut. Zur Bewertung der Gläser konnte der Stand mit Hilfe eines Staplers verfahren und somit der Einfallswinkel des Sonnenlichtes und der Betrachtungswinkel variiert werden.



Bild 13 Subjektive Bewertung ohne optische Hilfsmittel

Die Bewertung fand unter Beobachtung aus dem Brewster-Winkel statt. Bei der subjektiven Bewertung wurde in "auffällige" und "gute" Gläser eingeteilt. Diese Einteilung der visuellen Klassifizierung in der subjektiven Bewertung korreliert mit den vorher quantifizierten Messwerten. Diese Erkenntnis ist in Bild 14 dokumentiert.

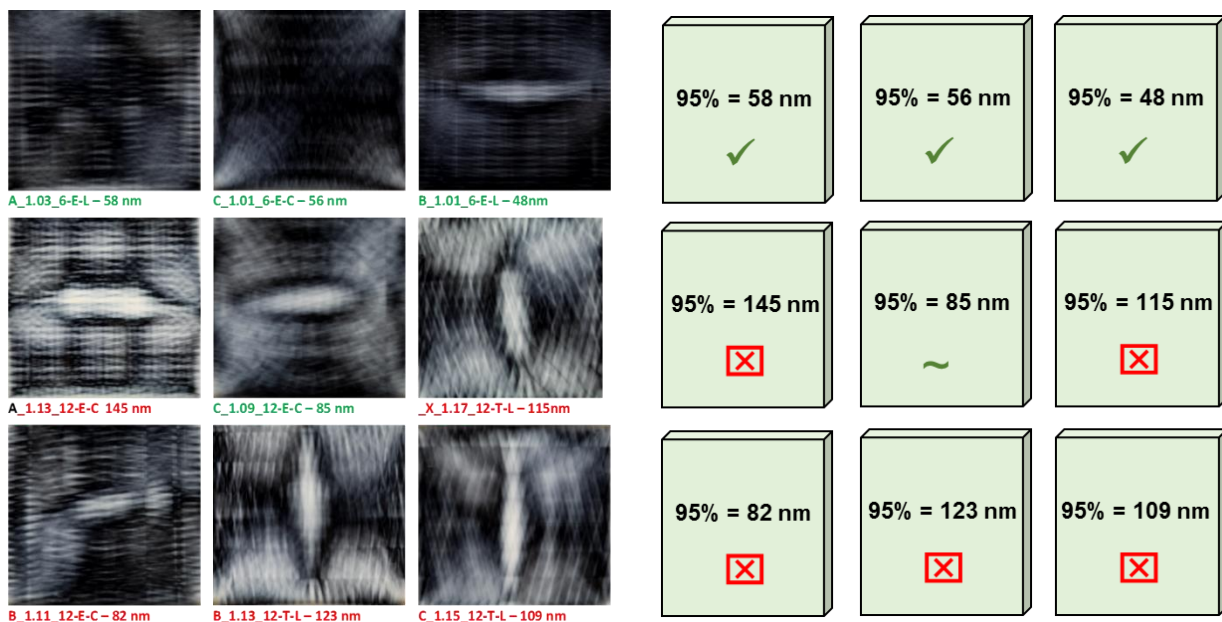


Bild 14 Quantitative Messung (links) versus subjektive Bewertung (rechts)

Literatur

- [1] Schuler, C., Feldmann, M. et al.: Anisotropieeffekte an Fassaden mit thermisch vorgespanntem Glas – neue Messmethoden. In: Fassade: Technik und Architektur. Verlagsanstalt Handwerk GmbH, Düsseldorf, 10/2017.
- [2] EN 1863: Glas im Bauwesen – Teilvorgespanntes Kalknatronglas, 2011.
- [3] EN 12150: Glas im Bauwesen – Einscheibensicherheitsglas, 2015.
- [4] ASTM C 1048-04: Standard Specification for Heat-Treated Flat Glass
- [5] Hadamar - Guideline to Assess the Visible Quality of Glass in Buildings. 2009
- [6] Föppl, L.; Mönch, E.: Praktische Spannungsoptik. Springer-Verlag Berlin, 3. Auflage, ISBN 978-3-540-05534-1, 1972
- [7] Feldmann, M.; Schuler, C. et al.: Methoden zur Erfassung und Analyse von Anisotropien bei thermisch vorgespannten Glasprodukten. In: Konstruktiver Ingenieurbau. Bundesanzeiger Verlag GmbH Köln, 01/2017.
- [8] Illguth, M.; Schuler, C.; Bucak, Ö.: The effect of optical anisotropies on building glass façades and its measurement methods. Frontiers of Architectural Research, DOI 10.1016/j.foar.2015.01.004, 2015.
- [9] Ramesh, K.: Digital Photoelasticity: Advanced Techniques and Applications. Springer Verlag, Berlin und New York, ISBN 978-3-54066-795-7, 2000.
- [10] Feldmann, M., Schuler, C. et al.: Flächige und zerstörungsfreie Qualitätskontrolle mittels spannungsoptischer Methoden. In: Glasbau 2017, Weller, B., Tasche, S.(Hrsg.), Berlin: Ernst und Sohn, April 2017. ISBN: 978-3433-03171-1

Diese Richtlinie wurde erarbeitet vom AK Fassadenbau des Fachverbands Konstruktiver Glasbau e.V.

Dabei mitgewirkt und/oder Probekörper zur Verfügung gestellt haben:

BGT Bischoff Glastechnik AG, Dipl. Ing. Stefan Goeddertz, Hochschule München - Munich University of Applied Sciences, INTERPANE Glasgesellschaft mbH, Josef Gartner GmbH, Okalux GmbH, Kuraray Europe GmbH, RWTH Aachen University, Saint-Gobain Eckelt Glas GmbH, sedak GmbH & Co. KG, Sencoglas GmbH, Technische Universität Darmstadt, Verrotec GmbH