

ICS 17.180.99; 81.040.20

Messung und Bewertung von optischen Anisotropie-Effekten bei thermisch vorgespanntem Glas

Measurement and evaluation methods for optical anisotropic effects in thermally toughened glass

Gesamtumfang 23 Seiten

Dieses Dokument wurde durch die im Vorwort genannten Verfasser erarbeitet und verabschiedet.



Inhalt

	Seite
Vorwort	4
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Prüfung an thermisch vorgespanntem Glas	10
5 Messung	10
5.1 Allgemeines	10
5.2 Anforderungen	10
5.3 Aufbau	10
5.3.1 Verfahren A — Kalibrierte Polarimeter	10
5.3.2 Verfahren B — Kalibrierte Polariskope	11
5.4 Prüfbedingungen	11
5.5 Relevante Messgrößen	11
5.5.1 Gangunterscheid	11
5.5.2 Azimutwinkel (Optional)	11
5.6 Kalibrierung	11
5.7 Messunsicherheit	11
5.8 Auswertung/Bewertungskriterien	12
5.8.1 Bewertungszonen	12
5.8.2 Auswertungsmethoden	13
5.8.3 Weitere zusätzliche Auswertemethoden	13
5.9 Einschränkungen	13
6 Qualitätsklassen	14
6.1 Allgemeines	14
6.2 Qualitätsklassen	14
7 Prüfbericht	14
Anhang A (informativ) Hinweise zu Verifizierung der Messgenauigkeit der Scanner	16
A.1 Allgemeines	16
A.2 Verfahren 1 — Verzögerungsplatten	16
A.3 Verfahren 2 — Kalibrierscheibe	16
A.4 Verfahren 3 — Babinet-Soleil-Kompensator	16
Anhang B (informativ) Beurteilung der Wahrscheinlichkeit und Häufigkeit der Sichtbarkeit von optischen Anisotropie-Effekten am Einbauort	17
B.1 Allgemeines	17
B.2 Glas	17
B.2.1 Glasart	17
B.2.2 Beschichtungen	17
B.2.3 Glasdicke und Glasaufbau	17
B.3 Betrachtungsbedingungen vor Ort	17
B.3.1 Betrachtungswinkel und -richtung	17
B.3.2 Gebäudelage und Umgebung	18
B.3.3 Gebäudenutzung bzw. Hintergrund der Verglasung	18
Anhang C (informativ) Visuelle Beurteilung am Einbauort	20
C.1 Allgemeines	20
C.2 Prüfbedingungen	20
C.3 Best-Case-Szenario	20
C.4 Worst-Case-Szenario	20
Anhang D (informativ) Hinweise zu Bewertung von nicht-monolithischen Aufbauten	22
D.1 Hinweise	22
Literaturhinweise	23

Bilder

Bild 1 — Bewertungszone 12

Tabellen

Tabelle 1 — Messbereich, Fehlergrenze und Reproduzierbarkeit der Messsysteme 12
Tabelle 2 — Qualitätsklassen auf Basis der Methode A ($x_{0,95}$) 14
Tabelle 3 — Qualitätsklassen auf Basis der Methode B (ISO75) 14
Tabelle B.1 — Übersicht der Parameter, welche die Wahrscheinlichkeit der Sichtbarkeit der optischen Anisotropie-Effekte erhöhen 18

Vorwort

Diese DIN SPEC wurde nach dem PAS-Verfahren erarbeitet. Die Erarbeitung von DIN SPEC nach dem PAS-Verfahren erfolgt in DIN-SPEC-Konsortien und nicht zwingend unter Einbeziehung aller interessierten Kreise.

Die vorliegende DIN SPEC ging aus dem Projekt „BeNAF — Bewertungskriterien zur Normung von Anisotropie-Effekten bei thermisch vorgespanntem Flachglas“ im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Initiative „WIPANO (Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen) (Förderkennzeichen 03TNH011G)“ hervor.

Die Erarbeitung und Verabschiedung des Dokuments erfolgte durch die nachfolgend genannten Initiatoren und Verfasser:

— Hochschule München, Labor für Stahl- und Leichtmetallbau

Herr Prof. Dr.-Ing. Christian Schuler, Herr Steffen Dix, Frau Lena Efferz

— Technische Universität Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion

Herr Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider, Frau Kerstin Thiele

— BGT Bischoff Glastechnik AG

Frau Ulrike Gromnitza

— Flintermann Glasveredelungs GmbH

Herr Reinhard Gruber

— INTERPANE Entwicklungs- und Beratungsgesellschaft mbH, INTERPANE Glasgesellschaft mbH Plattling

Herr Michael Elstner, Herr Andreas Strobel, Herr Luis Hidalgo

— Arcon Flachglas-Veredlung GmbH & Co.

KGHerr Hermann Dehner

Für dieses Thema bestehen derzeit keine Normen im Deutschen Normenwerk.

DIN SPEC sind nicht Teil des Deutschen Normenwerks.

Für diese DIN SPEC wurde kein Entwurf veröffentlicht.

Trotz großer Anstrengungen zur Sicherstellung der Korrektheit, Verlässlichkeit und Präzision technischer und nicht-technischer Beschreibungen kann das DIN-SPEC-Konsortium weder eine explizite noch eine implizite

Gewährleistung für die Korrektheit des Dokuments übernehmen. Die Anwendung dieses Dokuments geschieht in dem Bewusstsein, dass das DIN-SPEC-Konsortium für Schäden oder Verluste jeglicher Art nicht haftbar gemacht werden kann. Die Anwendung der vorliegenden DIN SPEC entbindet den Nutzenden nicht von der Verantwortung für eigenes Handeln und geschieht damit auf eigene Gefahr.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Die kostenfreie Bereitstellung dieses Dokuments als PDF-Version über den Beuth WebShop wurde im Vorfeld finanziert.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Einleitung

Der Begriff der „Anisotropie-Effekte“ in Verbindung mit thermisch vorgespannten Flachgläsern beschäftigt Architekten, Glasveredler, Fassadenbauer und Bauherren. Auch wenn Anisotropie-Effekte (Irisationen) im Sinne der Produktnormen und visuellen Beurteilungsrichtlinien keinen berechtigten Mangel darstellen, empfinden Architekten, Bauherren, Fassadenberater und zunehmend Nutzende von Gebäuden diesen Effekt als optische Beeinträchtigung [1].

In nationalen und internationalen Produktnormen und Regelwerken wie DIN EN 1863 (alle Teile), DIN EN 12150 (alle Teile), DIN EN 14179 (alle Teile), ASTM C 1279, 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.

Glas wird aufgrund seiner transparenten Optik gern 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 [2] [3].

Bisher existieren keine objektiven Maßstäbe, um die optische Qualität in Bezug auf Anisotropie-Effekte zu beschreiben. Dieses Dokument widmet sich dieser Problematik.

Die Festlegung der Qualitätsklassen ist das Resultat des im Vorwort erwähnten Forschungsvorhabens (Förderkennzeichen 03TNH011G), bei dem zahlreiche Glasscheiben mit unterschiedlich ausgeprägten Anisotropie-Effekten in Anisotropie-Scannern gemessen und zusätzlich unter realen Bedingungen bewertet wurden.

Dieses Dokument beschränkt sich auf monolithische Aufbauten. Die Bewertungsmethoden lassen sich zwar auch auf nicht monolithische Verglasungsaufbauten (Mehrfach-Verbund- und Verbundsicherheitsgläser oder auch Mehrscheiben-Isolierglas, etc.) übertragen. Durch eine Überlagerung von mehreren vorgespannten Gläsern ist jedoch eine Verstärkung der Sichtbarkeit der Anisotropie-Effekte zu erwarten. Hierbei spielen allerdings noch weitere Effekte eine Rolle, die bisher nicht vollständig quantifiziert werden konnten.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument stellt Anforderungen zur reproduzierbaren Bewertung von optischen Anisotropie-Effekten an thermisch vorgespanntem Glas bereit. Dafür werden Qualitätsklassen zur Bewertung der optischen Anisotropie-Effekte aufbauend auf unterschiedlichen Prüfverfahren und Bewertungsmethoden festgelegt.

Am Markt befinden sich unterschiedliche Messsysteme zur spannungsoptischen Untersuchung von vorgespanntem Glas. Dieses Dokument legt Anforderungen an die Messsysteme fest und beschreibt den Aufbau, relevante Messgrößen, die Kalibrierung sowie die Messgenauigkeit. Zudem werden Methoden vorgegeben, die eine reproduzierbare Bewertung der optischen Anisotropie-Effekte ermöglichen. Basierend auf Bewertungszonen und den Auswertemethoden werden Qualitätsklassen für monolithische Glasaufbauten definiert.

Die hier beschriebenen Anforderungen und Klassifizierungen beziehen sich auf optische, visuell wahrnehmbare Eigenschaften von Anisotropie-Effekten. Die technischen Eigenschaften (z. B. die charakteristische Festigkeit und das Bruchbild), die in den Produktnormen DIN EN 1863 (alle Teile), DIN EN 12150 (alle Teile) und DIN EN 14179 (alle Teile) vorgegeben werden, werden von diesem Dokument nicht behandelt. Weitere optische Qualitätsanforderungen, z. B. Flecken, Kratzer, etc., bleiben von diesem Dokument unberührt.

2 Normative Verweisungen

Es gibt keine normativen Verweisungen in diesem Dokument.

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

DIN und DKE stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>
- DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1

Analysator

meist drehbarer Polarisationsfilter zwischen Probekörper und Betrachter, welcher nach Austritt der Lichtwellen aus dem doppelbrechenden Material diejenigen Lichtwellen abhängig von seiner Polarisationsrichtung filtert

3.2

Anisotropie-Effekt

Irisieren

Effekt, durch den ein Gangunterschied in polarisiertem Licht sichtbar werden kann, der durch eine Doppelbrechung im Glas verursacht wird, die durch Spannungsfelder hervorgerufen wird, welche durch das Einbringen von Zonen mit unterschiedlicher Spannung im Querschnitt des Glases beim thermischen Vorspannen entstehen

3.3

Anisotropie-Scanner

Messsysteme für die Quantifizierung von Gangunterschieden, die im Zusammenhang mit Anisotropie-Effekten stehen

3.4

Azimutwinkel

Isoklinenwinkel

Winkel zwischen der Orientierung der Hauptspannungen und einem festgelegten Koordinatensystem

3.5

Babinet-Soleil-Kompensator

optischer Kompensator, der aus verschieblichen Quartzkeilen besteht und der für die lokale Ermittlung von Gangunterschieden in Polariskopen oder Polarimetern genutzt werden kann

3.6

Brechungsindex

Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit (genauer der Phasengeschwindigkeit) im Vakuum zu derjenigen in einem gegebenen Medium

[QUELLE: DIN 58629-1:2006-01, 2.32]

3.7

Brewster-Winkel

Winkel, in dem die Intensität des reflektierenden parallelen Lichtstrahls nahe null ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Brewster-Winkel beträgt für Glas etwa 56° .

Anmerkung 2 zum Begriff: Anisotropie-Effekte sind aufgrund der reduzierten Reflexion am deutlichsten in einem Winkel nahe dem Brewster-Winkel sichtbar. Fällt unpolarisiertes Licht im Brewster-Winkel auf die Grenzfläche zweier Medien, so ist das reflektierte Licht senkrecht zur Einfallsebene polarisiert.

3.8

Doppelbrechung

Optische Eigenschaft eines optisch anisotropen Werkstoffs mit richtungsabhängigen Brechzahlen, die zu unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Licht in unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen führt

[QUELLE: DIN EN 61757-1-1:2017-11, 3.22, modifiziert —Anmerkungen zum Begriff gestrichen]

3.9

Gangunterschied

optische Wegdifferenz von Lichtwellen nach Austritt aus (spannungs-) doppelbrechenden Materialien abhängig von der Hauptspannungsdifferenz, welche mit Anisotropie-Scannern quantitativ messbar und qualitativ als Interferenzfarben sichtbar ist

3.10

Isochromaten

zu Linien verbundene Punkte oder Bereiche mit gleicher Hauptspannungsdifferenz, gleichem Gangunterschied und gleicher Interferenzfarbe

3.11

Isoklinen

zu Linien verbundene Punkte, in denen die Hauptspannungsrichtungen den Richtungen der (linearen) Polarisationsfilter entsprechen

Anmerkung 1 zum Begriff: Isoklinen treten bei Verwendung von zirkularen Polarisationsfiltern nicht auf.

3.12

Sénarmont-Kompensation

Methode zur Messung des Gangunterschieds mithilfe von linear polarisiertem Licht und einer Viertelwellenplatte durch Drehung des Analysators um bis zu 180°

3.13

Tardy-Kompensation

Methode zur Messung des Gangunterschieds mithilfe von zirkular polarisiertem Licht und einer Viertelwellenplatte durch Drehung des Analysators um bis zu 180° , unabhängig von der Probenausrichtung

3.14**Polarisationsfilter**

optisches Bauteil, welches die nicht parallel zur optischen Achse des Filters schwingenden Komponenten der Lichtwellen absorbiert

Anmerkung 1 zum Begriff: Lineare Polarisationsfilter erzeugen polarisierte Lichtwellen, welche sich lediglich linear in einer Schwingungsebene ausbreiten. Zirkulare Polarisationsfilter bestehend aus einem linearen Polarisationsfilter und einer Viertelwellenplatte erzeugen polarisierte Lichtwellen, deren Feldvektoren kreisförmig um eine Achse schwingen.

3.15**polarisiertes Licht**

Licht, dessen Schwingungen in bestimmten Richtungen zu einem gegebenen Zeitpunkt teilweise oder komplett unterdrückt sind

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Schwingungsvektor kann eine lineare, kreisförmige oder elliptische Form beschreiben.

[QUELLE: DIN 58629-1:2006-01, 2.87.1]

3.16**Spannungsoptik**

Teilgebiet der Optik, in dem die Bestimmung des Spannungszustands in doppelbrechenden Materialien durch die Auswertung von Isoklinen und Isochromaten ermöglicht wird

3.17**thermisch vorgespanntes Glas**

Glas, das auf eine festgelegte Temperatur erhitzt und dann kontrolliert abgekühlt wird, wodurch über die grundlegende mechanische Festigkeit hinaus eine dauerhafte Spannungsverteilung im Glas entsteht, die ihm eine wesentlich erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen mechanische und thermische Spannungen und das vorgeschriebene Bruchverhalten verleiht

[QUELLE: DIN EN 12150-1:2020-07, 3.1, modifiziert — Anmerkung 1 zum Begriff gestrichen]

3.17.1**flaches, thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas**

thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas, dem bei der Herstellung keine vorher mit Absicht festgelegte Form gegeben wurde

[QUELLE: DIN EN 12150-1:2020-07, 3.2]

3.17.2**gebogenes, thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas**

thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas, dem während der Herstellung mit Absicht eine festgelegte Form gegeben wurde

[QUELLE: DIN EN 12150-1:2020-07, 3.3, modifiziert — Anmerkung 1 zum Begriff gestrichen]

3.17.3**flaches teilvorgespanntes Kalknatronglas**

teilvorgespanntes Kalknatronglas, dem bei der Herstellung keine vorher mit Absicht festgelegte Form gegeben wurde

[QUELLE: DIN EN 1863-1:2012-02, 3.5]

3.17.4

gebogenes teilvorgespanntes Kalknatronglas

teilvergespanntes Kalknatronglas, dem bei der Herstellung mit Absicht eine feste Form gegeben wurde

[QUELLE: DIN EN 1863-1:2012-02, 3.1]

4 Prüfung an thermisch vorgespanntem Glas

Die Prüfung der visuellen Qualität hinsichtlich optischer Anisotropie-Effekte sollte zerstörungsfrei an monolithischen vorgespannten Flachgläsern und thermisch gebogenem Glas stattfinden. Eine Prüfung des gesamten Verglasungsaufbaus (z. B. Mehrscheiben-Isolierglas) ist in diesem Dokument nicht vorgesehen. Hinweise zur Bewertung von nicht-monolithischen Aufbauten befinden sich in Anhang D.

Die Prüfung muss nach Abschluss des Vorspannprozesses erfolgen. Der Vorspannprozess gilt als abgeschlossen, sobald das Glas den Abkühlbereich des Vorspannofens verlässt. Eine Messung ist direkt im Anschluss des Abkühlbereichs (Online) oder aber auch unabhängig davon (Offline) möglich.

5 Messung

5.1 Allgemeines

Die Messung erfolgt über Anisotropie-Scanner. Grundlegend besteht ein Anisotropie-Scanner aus Lichtquelle, optischen Polarisations-elementen sowie digitalen Sensoren (Kamera, Linearsensor, usw.). Die Quantifizierung von optischen Anisotropie-Effekten kann mittels Polarimeter oder mittels Polariskop erfolgen.

Auf Grundlage der Spannungsoptik und Hochgeschwindigkeitsbildverarbeitung messen die Anisotropie-Scanner ortsaufgelöst den optischen Gangunterschied in Nanometer (nm) und optional den Azimutwinkel in Grad (°). Die Ergebnisse werden als Falschfarbenbilder mit einer Skala des Bereichs der Messwerte ausgegeben. Aus diesen können mithilfe der Methoden und Kriterien aus 5.8 die Gläser bewertet werden.

Neben planen Glasscheiben können auch gebogene Glasscheiben analysiert werden. Die maximal akzeptable Abweichung vom senkrechten Lichteinfall ist bei gebogenen Scheiben gleichermaßen zu berücksichtigen.

5.2 Anforderungen

Der Anisotropie-Scanner muss so ausgelegt sein, dass reproduzierbare, von der Ausrichtung des Glases unabhängige Werte des optischen Gangunterschiedes erfasst werden. Die optischen Komponenten der Scanner müssen dem Wellenlängenbereich der Lichtquelle entsprechen. Den Methoden sollte ein von der Senkrechten nur eingeschränkt abweichender Lichteinfall zugrunde liegen. Um ein größeres Messfeld abzudecken, müssen gegebenenfalls mehrere Sensoren oder Kameras verwendet werden. Die notwendige Anzahl hängt von der gewünschten Bildauflösung in Pixel je Millimeter (px/mm) und der für die jeweilige Messmethode akzeptablen Abweichung vom senkrechten Lichteinfall ab. Der Berechnung der Messgrößen aus 5.5 muss eine Bildauflösung von mindestens 0,5 px/mm zugrunde liegen.

Der Messbereich der Systeme, sollte 0 nm bis 300 nm in der relevanten Bewertungszone abdecken. Dies stellt sicher, dass Gangunterschiede in monolithisch thermisch vorgespannten Baugläsern von 4 mm bis 15 mm Dicke erfasst werden können. Ist der Messbereich eines Scannersystems eingeschränkt, muss die erfassbare Glasdicke reduziert werden oder mit redundanten Maßnahmen sichergestellt werden, dass die Gangunterschiede in den Proben den Messbereich nicht überschreiten.

5.3 Aufbau

5.3.1 Verfahren A — Kalibrierte Polarimeter

Ein Polarimeter misst den optischen Gangunterschied und die Orientierung der Spannung (Azimut) mittels einer polarisationsempfindlichen Matrix oder eines Zeilenscan-Detektors („Polarisationskamera“) unter Verwendung von quasi-monochromatischem, zirkular polarisiertem Licht. Anstelle eines mechanischen oder

elektrooptischen rotierenden Analysators, wie er aus dem Polarimeter-Aufbau von Sénarmont oder Tardy bekannt ist, reicht es aus, eine Anzahl diskreter Polarisierungsebenen zu analysieren, typischerweise 0° , 45° , 90° und 135° .

Proprietäre Polarisationskameras können mehrere Sensoren (einen für jede Polarisationsrichtung) oder einen unterteilten Sensor (einen Quadranten für jede Polarisationsrichtung) in Kombination mit einer geeigneten Strahlteilungsoptik enthalten. Alternativ kann jeder Pixel der Kamera mit individuellen Mikro-Polarisatoren ausgestattet werden (ähnlich den Farbfiltern einer RGB-Kamera mit einem Sensor).

Da der Messbereich physikalisch auf einen bestimmten Bruchteil der Wellenlänge der Beleuchtung begrenzt ist, kann der Messbereich z. B. durch Analyse mehrerer Wellenlängen und anschließender mathematischer Korrelation erweitert werden.

5.3.2 Verfahren B — Kalibrierte Polariskope

Mit geeigneter Kalibrierung von Zirkularpolariskopen können Gangunterschiede aus Isochromatenbildern quantifiziert werden. Aufgrund der Anordnung der optischen Polarisierungselemente werden von der Ausrichtung des Messobjektes unabhängige maximale optische Gangunterschiede in Zirkularpolariskopen ermittelt.

Es existieren verschiedene Ansätze, in denen aus den vom digitalen Sensor gemessenen Intensitätswerten (oder Farbwerte) Gangunterschiede berechnet werden können. Ein Ansatz ist es, eine Kalibrierung des Messsystems mithilfe eines Babinet-Soleil-Kompensators durchzuführen. Mit der aufgenommenen Kalibriertabelle, welche den Bezug zwischen Intensitätswert (oder RGB-Farbe) und Gangunterschied herstellt, sind alle Informationen vorhanden, um mithilfe eines Auswertalgorithmus ein neues Bild mit Gangunterschied (in nm) je Pixel zu berechnen.

5.4 Prüfbedingungen

Der Betreiber muss den Anisotropie-Scanner in Übereinstimmung mit den vom Hersteller empfohlenen Verfahren verwenden.

5.5 Relevante Messgrößen

5.5.1 Gangunterscheid

Optischer Gangunterschied in nm.

5.5.2 Azimutwinkel (Optional)

Azimutwinkel in $^\circ$ (Definition einer Bezugskante ist erforderlich).

5.6 Kalibrierung

Das Ausmaß der Kalibrierung ist abhängig vom verwendeten Verfahren. Grundsätzlich sind die Vorgaben des Scannerherstellers zu beachten. Durch geeignete Kalibriermethoden wird sichergestellt, dass während der Lebensdauer der Apparatur konstante Messwerte unter den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, Vibration und Staub) erzielt werden.

Der Betreiber muss sicherstellen, dass die Kalibrierung und Überprüfung in Übereinstimmung mit den vom Gerätehersteller empfohlenen Praktiken durchgeführt wird.

5.7 Messunsicherheit

Je nach Gerätetyp und Glasanwendung können die technischen Möglichkeiten des Polarimeters oder Polariskops variieren. In Tabelle 1 werden die Mindestanforderungen an Messbereich und Fehlergrenze angegeben. Empfohlene Verfahren zur Verifizierung der Genauigkeit sind Anhang A zu entnehmen.

Tabelle 1 — Messbereich, Fehlergrenze und Reproduzierbarkeit der Messsysteme

Glasdicke	Minimaler Messbereich Gangunterschied		Fehlergrenze		Reproduzierbarkeit Abweichung
	Von	Bis	Gangunterschied	Azimutwinkel	
<10 mm	0 nm	120 nm	±10 nm	Optional	±5 %
10 mm bis 19 mm	0 nm	300 nm	±10 nm	Optional	±5 %

Für eine Anwendung zur Simulation von Anisotropie-Effekten in Gebäudefassaden wird eine höhere Fehlergrenze von ±5 nm und ±4° empfohlen.

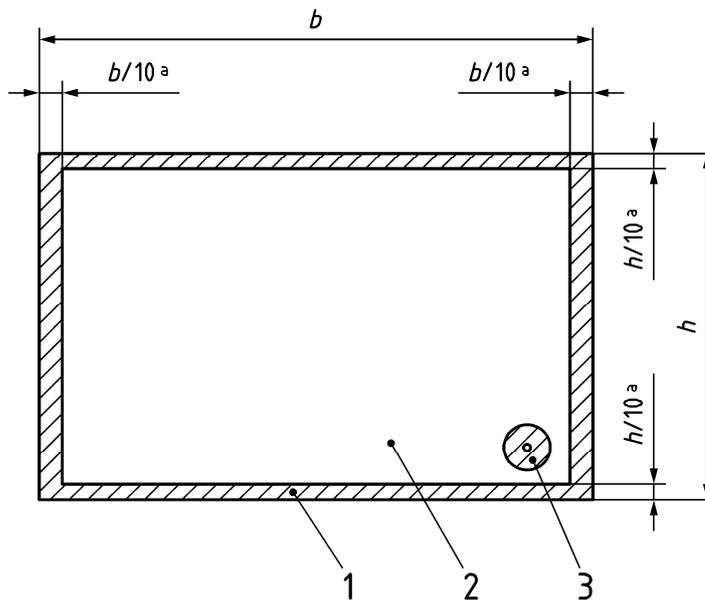
5.8 Auswertung/Bewertungskriterien

5.8.1 Bewertungszonen

Für die Auswertung der Gangunterschiedsbilder werden Bewertungszonen nach Bild 1 eingeführt. Notwendig sind diese, da bestimmte Bereiche (Kanten, Ecken und im Bereich von Bohrungen) sehr hohe Gangunterschiede aufweisen, welche aufgrund der physikalischen Randbedingungen bei vorgespanntem Glas unvermeidbar sind.

ZONE E und ZONE H: Diese Bereiche werden von der Bewertung ausgeschlossen.

ZONE M: Die Auswertung erfolgt ausschließlich in dieser Zone.



Legende

- 1 Zone E: Ausgeschlossener Bereich am Rand mit umlaufend 10 % der jeweiligen lichten Breiten- und Höhenmaße
- 2 Zone M: Auswertungszone
- 3 Zone H: Ausgeschlossener Bereich an Bohrungen mit Zonenradius = $6 \times$ Glasdicke + Bohrungsradius

b Breitenmaß

h Höhenmaß

Ausgeschlossener Bereich

^a Minimal 50 mm und maximal 200 mm für Glasdicke $t \leq 8$ mm und maximal 350 mm bei $t \geq 10$ mm.

Bild 1 — Bewertungszone

5.8.2 Auswertungsmethoden

5.8.2.1 Allgemeines

Die Auswertung erfolgt auf Grundlage der relevanten Messgrößen aus Zone M. Für die Einteilung der Probe in die Qualitätsklassen aus Abschnitt 6 ist mindestens eine der beiden Auswertungsmethoden, A oder B, verpflichtend anzuwenden.

5.8.2.2 Auswertung nach Methode A — 95 %-Quantilwert

Die Berechnung erfolgt auf Grundlage aller Gangunterschiedswerte und anhand der daraus ermittelten empirischen kumulativen Verteilungsfunktion. Der 95 %-Quantilwert besagt, dass 95 % der gemessenen Gangunterschiede kleiner als der ermittelte Wert sind. Die Einheit des 95 %-Quantilwerts ist Nanometer.

5.8.2.3 Auswertung nach Methode B — Isotropiewert mit Schwelle 75 nm

Der Wert wird auf der Grundlage von Gangunterschiedswerten ohne und mit Berücksichtigung der Orientierung ermittelt. Der Isotropiewert ist ein Schwellenwert, dem eine Schwelle zugrunde gelegt werden muss. Als Schwellenwert können Gangunterschiede bis zu 75 nm gewählt werden, da ab diesem Wert erfahrungsgemäß optische Anisotropie-Effekte im natürlichen Licht wahrgenommen werden können. Der Isotropiewert ist der flächenmäßige Anteil an Gangunterschieden, der oberhalb der gewählten Schwelle liegt. Die Einheit des Isotropiewertes ist Prozent.

ANMERKUNG Mit Berücksichtigung der Orientierung der Spannung (Azimut) können höhere Isotropiewerte entstehen.

5.8.3 Weitere zusätzliche Auswertemethoden

Weitere Methoden, wie z. B. verschiedene Merkmale der Texturanalyse können zusätzlich ermittelt werden, siehe [3] und [4]. Für die Einteilung in die Qualitätsklassen werden sie derzeit nicht verwendet.

5.9 Einschränkungen

Die Messung mittels Scanner kann nicht für alle am Markt vorhandenen Glasarten angewendet werden. Folgende Gläser sind ausgenommen:

- Glas mit lichtstreuender Oberfläche (z. B. satiniertes Glas, Strukturgläser);
- Glas, das nicht transparent ist (z. B. emailliertes oder bedrucktes Glas).

Die Messergebnisse werden von einer Reihe weiterer Faktoren beeinflusst. Diese FAKTOREN sollen entweder vermieden oder dokumentiert werden, um zu erklären, wie sie die Ergebnisse beeinflussen.

- Die LICHTDURCHLÄSSIGKEIT der Probe, bei der(den) Wellenlänge(n), die zur Messung der optischen Verzögerung verwendet wird(werden), sollte mit den Angaben des Geräteherstellers übereinstimmen.
- Die Abweichung von der EBENHEIT des Glases nach dem Wärmebehandlungsprozess (z. B. Roller Waves) kann die Messung beeinflussen.
- Die TEMPERATURDIFFERENZ zwischen Probe und Umgebungstemperatur zum Zeitpunkt der Messung kann ungewollte äußere Spannungen in der Probe hervorrufen und die Messergebnisse beeinflussen.
- Generell sollte beachtet werden, dass während der Messung keine MECHANISCHEN SPANNUNGEN in die Probe eingeleitet werden.

6 Qualitätsklassen

6.1 Allgemeines

Zur Einteilung in Qualitätsklassen werden die Bewertungszonen und Auswertemethoden aus 5.8 auf die Ergebnisse (Gangunterschiedsbilder mit oder ohne Berücksichtigung der Orientierung) der im Anisotropiescanner gemessenen Proben angewendet. Je nach Anwendung der Auswertemethode A oder B ist die Probe in eine Qualitätsklasse nach Tabelle 2 oder Tabelle 3 einzuteilen.

6.2 Qualitätsklassen

Den Grenzwerten aus Tabelle 2 und Tabelle 3 liegen Referenzversuche an unbeschichtetem Flachglas zugrunde.

Tabelle 2 — Qualitätsklassen auf Basis der Methode A ($x_{0,95}$)

Glasdicke	Qualitätsklasse		
	A	B	C ^a
≤ 6 mm	≤ 70 nm	> 70 nm und ≤ 95 nm	> 95 nm
8 mm	≤ 80 nm	> 80 nm und ≤ 120 nm	> 120 nm
10 mm	≤ 95 nm	> 95 nm und ≤ 140 nm	> 140 nm
12 mm	≤ 115 nm	> 115 nm und ≤ 165 nm	> 165 nm
15 mm	b	b	b

^a Für Grenzwerte, die höher als die angegebenen Werte sind, und für Gläser ohne Messung.
^b Keine Referenzwerte vorhanden; Grenzwerte sind mit Glashersteller abzustimmen.

Tabelle 3 — Qualitätsklassen auf Basis der Methode B (Iso75)

Glasdicke	Qualitätsklasse		
	A	B	C ^a
≤ 6 mm	≥ 95 %	< 95 % und ≥ 85 %	< 85 %
8 mm	≥ 90 %	< 90 % und ≥ 68 %	< 68 %
10 mm	≥ 85 %	< 85 % und ≥ 52 %	< 52 %
12 mm	≥ 70 %	< 70 % und ≥ 30 %	< 30 %
15 mm	b	b	b

^a Für Grenzwerte, die niedriger als die angegebenen Werte sind, und für Gläser ohne Messung.
^b Keine Referenzwerte vorhanden; Grenzwerte sind mit Glashersteller abzustimmen.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss die folgenden Angaben beinhalten:

- Verweisung auf dieses Dokument, einschließlich Ausgabedatum
- Proben-Identifikation (z. B. Chargen-, Serien- oder Auftragsnummer);
- Datum und Uhrzeit der Messung;
- Glasabmessung und -dicke;

- e) Qualitätsklasse;
- f) Ergebnis der Bewertung nach Auswertemethode A, in nm, oder B, in %;
- g) Bildauflösung des Anisotropie-Scanners, in px/mm;
- h) Messbereich des Anisotropie-Scanners, in nm.

Darüber hinaus kann im Prüfbericht angegeben werden:

- i) Art und Bezeichnung des Glases;
- j) Gangunterschiedsbild mit Skala, in nm, mit Angabe der analysierten Fläche, Breite × Höhe, in mm;
- k) Weitere Auswerteergebnisse, wie Mittelwert, Maximum, 95 %-Quantilwert, Isotropiewert, usw.;
- l) Scannerhersteller, Modell und Softwareversion.

Anhang A (informativ)

Hinweise zu Verifizierung der Messgenauigkeit der Scanner

A.1 Allgemeines

In regelmäßigen, vom Messsystemhersteller festgelegten Abständen muss die in Tabelle 1 geforderte Anforderung an die Fehlergrenze eines eingesetzten Scanners überprüft werden. Die nachfolgenden Verfahren werden für die Verifizierung empfohlen. Die Durchführung der Prüfung muss mehrmals, in verschiedenen Drehwinkeln (0°, 45°, 90°, 135°) und über die gesamte Scanbreite verteilt erfolgen. Bei der Durchführung der Prüfung ist aufgrund der spannungsoptischen Empfindlichkeit der Prüfmittel auf gleichbleibende Prüfbedingungen zu achten. Die durchgeführte Verifizierung ist durch ein Prüfprotokoll zu bestätigen.

A.2 Verfahren 1 — Verzögerungsplatten

Verzögerungsplatten¹ aus Kunststoff, mit mindestens drei vorbestimmten Gangunterschiedsgrößen (z. B. 50 nm, 75 nm, 100 nm, 150 nm), können zur Verifizierung herangezogen werden.

A.3 Verfahren 2 — Kalibrierscheibe

Eine Kalibrierscheibe aus thermisch vorgespanntem Glas, die den Messbereich des Scanners abbildet und vom Messsystemhersteller mit verifizierten Werten freigegeben wurde, wird zur Überprüfung verwendet.

A.4 Verfahren 3 — Babinet-Soleil-Kompensator

Die Verifizierung erfolgt mittels Babinet-Soleil-Kompensator, der in den Strahlengang des Scanners eingefügt wird, und indem vorbestimmte Gangunterschiedswerte überprüft werden.

¹ Informationen zum Bezug von Verzögerungsplatten können bei DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Burggrafenstraße 6, 10785 Berlin, eingeholt werden.

Anhang B (informativ)

Beurteilung der Wahrscheinlichkeit und Häufigkeit der Sichtbarkeit von optischen Anisotropie-Effekten am Einbauort

B.1 Allgemeines

Die in den nachfolgenden Abschnitten genannten Parameter haben einen Einfluss auf die Wahrnehmung der optischen Anisotropie-Effekte. Je mehr Aspekte oder Effekte gleichzeitig vorhanden sind, desto wahrscheinlicher ist es, dass optische Anisotropie-Effekte in einer Fassade sichtbar werden. Tabelle B.1 stellt alle Parameter mit Einstufung des Risikos gegenüber.

B.2 Glas

B.2.1 Glasart

Anisotropien treten nur bei thermisch vorgespannten Gläsern (Einscheibensicherheitsglas [ESG], Teilvorgespanntes Glas [TSG]) auf. Bei Floatglas (ohne Vorspannung und ohne äußere Belastung) besteht in der Regel keine Gefahr, dass der Effekt auftritt. Die Qualität des Vorspannprozesses spielt eine wichtige Rolle. Die Möglichkeit, die Sichtbarkeit der Anisotropien zu reduzieren, wird allerdings durch die weiteren technischen Eigenschaften der Glasprodukte, z. B. Bruchbild wie in [5] bis [13] und mechanische Festigkeit [5] bis [13], welche erfüllt werden müssen, eingeschränkt.

B.2.2 Beschichtungen

Die Verwendung von vorspannbaren Beschichtungen verursacht einen diffizil zu steuernden Vorspannprozess, der in der Regel zu höheren Gangunterschieden im Glas führt.

ANMERKUNG Beschichtungen verändern generell das optische Erscheinungsbild des Glases. Durch die Beschichtung wird das Reflexionsverhalten maßgeblich beeinflusst.

B.2.3 Glasdicke und Glasaufbau

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

- mit zunehmender Dicke der Glasscheiben;
- mit zunehmender Anzahl von vorgespannten Scheiben, die in einem Glasprodukt verbaut sind;
- bei speziellen Geometrien, insbesondere spitzen Winkeln, Ausnehmungen und Bohrungen.

B.3 Betrachtungsbedingungen vor Ort

B.3.1 Betrachtungswinkel und -richtung

Optische Anisotropie-Effekte werden bei Betrachtung unter einem flacheren Winkel nahe dem Brewster-Winkel wesentlich stärker sichtbar als bei senkrechter Betrachtung. Je nach Betrachtungsrichtung und Sonnenstand können Anisotropie-Effekte weniger oder stärker wahrgenommen werden.

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. Das dabei wahrnehmbare Bild der Verglasung kann in der Regel jedoch nicht mit den eigentlichen Anisotropien verglichen werden, da je nach Polarisationsfilterrichtung die Effekte verfälscht werden.

B.3.2 Gebäudelage und Umgebung

Die Lage und der Kontext im Sinne der natürlichen oder städtischen Umgebung des Gebäudes haben Einfluss auf die Sichtbarkeit von Anisotropien. Je nach Höhe des vorhandenen Anteils an polarisiertem Licht im natürlichen Tageslicht (Polarisationsgrad) sind die optischen Effekte stärker oder schwächer ausgeprägt. Die Höhe des Polarisationsgrads aus der Rayleigh-Streuung in der Atmosphäre variiert mit dem Lichteinfallswinkel sowie mit der relativen Position der Sonne zur Verglasung. 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.

Die Umgebung hat ebenfalls einen erheblichen Einfluss. Durch Reflexion des Tageslichts kann der polarisierte Anteil des Lichts erhöht werden. Befindet sich das Gebäude in unmittelbarer Nähe des Meeres, eines Sees, eines Flusses, schneebedeckter Flächen oder einer anderen stark reflektierenden Oberfläche, so können die Polarisation des natürlichen Lichts verstärkt und vorhandene Anisotropien deutlicher wahrgenommen werden. Auch bei Hochhäusern mit hohem Fassadenanteil, bei denen sich das Blau des Himmels in der Reflexion widerspiegelt, ist die Wahrscheinlichkeit der Sichtbarkeit von Anisotropien höher.

B.3.3 Gebäudenutzung bzw. Hintergrund der Verglasung

Bei dunklem Hintergrund, wie zum Beispiel im Bauzustand oder bei dunklem Fussbodenbelag, sind die optischen Anisotropie-Effekte deutlicher sichtbar als bei Büronutzung mit hellem Hintergrund.

Tabelle B.1 — Übersicht der Parameter, welche die Wahrscheinlichkeit der Sichtbarkeit der optischen Anisotropie-Effekte erhöhen

Parameter		Wahrscheinlichkeit				
		Geringes Risiko	Mittleres Risiko	Hohes Risiko		
Glas	Glasart	Floatglas	x			
		TVG/ESG		x		
	Beschichtungen bei vorgespannten Gläsern	keine		x		
		nicht vorspannbar			x	
		vorspannbar			x	
	Glasaufbau	Mono	allgemein		x	
			dünn	x		
			dick		x	
		VSG	Mit Floatglas	x		
			dünne vorgesp. Gläser		x	
			dicke vorgesp. Gläser			x
		MIG	mit Floatglas	x		
			dünne vorgesp. Gläser		x	
dicke vorgesp. Gläser					x	

Tabelle B.1 (fortgesetzt)

	Parameter		Wahrscheinlichkeit		
			Geringes Risiko	Mittleres Risiko	Hohes Risiko
Betrachtung	Betrachtungswinkel	senkrechte Betrachtung	x		
		Betrachtung im Winkel			x
		Betrachtung mit polarisierenden Sonnenbrillengläsern			x ^a
	Polarisationsgrad vor Ort/Gebäudelage	überwiegend bewölkt	x		
		überwiegend klarer, blauer Himmer			x
	Gebäudeumgebung	Ländlich		x	
		Urban		x	
		Gewässer			x
		Alpin			x
		Hochhaus			x
	Gebäudenutzung/ Hintergrund	Heller Hintergrund (z. B. Büronutzung)	x		
		Dunkler Hintergrund (z. B. Bauzustand)			x
^a Bei Verwendung von Analysatoren (Polfiltern) sind Anisotropie-Effekte bei vorhandenem polarisiertem Licht immer sichtbar. Die dadurch sichtbaren Anisotropie-Effekte sind künstlich verstärkt und verzerrt. Ohne Analysator können die Effekte stark abweichen.					

Anhang C (informativ)

Visuelle Beurteilung am Einbauort

C.1 Allgemeines

Zur objektiven Bewertung müssen die monolithischen Glasscheiben vorab nach 5.8 bewertet und in eine Qualitätsklasse eingeteilt worden sein.

Die visuelle Wahrnehmung von Anisotropie-Effekten in natürlicher Umgebung hängt wesentlich von den Bedingungen aus Anhang B ab. Die Faktoren, die in einer visuellen Beurteilung unabhängig vom Glas von Wichtigkeit sind, sind der vorherrschende Polarisationsgrad des einfallenden Lichts, der Betrachtungswinkel sowie die Betrachtungsrichtung in Abhängigkeit von der Fassadenausrichtung und des Sonnenstandes.

Daher wird empfohlen, die visuelle Beurteilung am Einbauort an einem Prüfstand unter verschiedenen Prüfzenarien (best-case and worst-case) durchzuführen. Die Benutzung von Analysatoren, wie z. B. Polfilter oder Sonnenbrillen (mit Polfiltern) ist nicht vorteilhaft, da bei falscher Benutzung Anisotropie-Effekte verfälscht werden und nicht die Realität abgebildet wird.

C.2 Prüfbedingungen

Die Prüfbedingungen müssen bei der Bewertung dokumentiert werden. Diese sind:

- Datum, Uhrzeit und Ort der Beurteilung,
- Polarisationsgrad,
 - ANMERKUNG Der Polarisationsgrad lässt sich durch Messung oder durch Abschätzung über den Bewölkungsgrad des einfallenden Lichts bestimmen.
- Ausrichtung der Glasscheibe nach Himmelsrichtung,
- Einbauhöhe der Glasscheibe,
- Stand der Sonne zur betrachtenden Glasscheibe,
- Betrachtungswinkel (senkrecht oder Brewster-Winkel),
- Hintergrund der Glasscheibe.

Die Merkmale, welche mit dem Anisotropie-Scanner festgestellt wurden, dürfen nicht besonders gekennzeichnet sein.

C.3 Best-Case-Szenario

Ein Best-Case-Szenario, bei dem Anisotropie-Effekte nur schwach wahrgenommen werden, wäre beispielhaft unter Tageslicht mit einem vollständig bewölkten Himmel, bei einem senkrechten Betrachtungswinkel und einem hellen Hintergrund der Verglasung.

C.4 Worst-Case-Szenario

Ein Worst-Case-Szenario, bei dem Anisotropie-Effekte verstärkt wahrgenommen werden, wäre beispielhaft unter Tageslicht mit einem vollständig klaren, blauen Himmel, bei einer Ausrichtung der Glasscheibe 90° zur

Sonne, einem Betrachtungswinkel unter dem Brewster-Winkel sowie einem dunklen Hintergrund der Verglasung.

Anhang D (informativ)

Hinweise zu Bewertung von nicht-monolithischen Aufbauten

D.1 Hinweise

Nicht-monolithische Glasaufbauten können aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Gläsern bestehen. Daher ist es aktuell nicht möglich, hierfür Qualitätsklassen festzulegen.

In vereinzelt Fällen, bei denen eine Bewertung von nicht-monolithischen Verglasungen gewünscht ist, kann folgendes Vorgehen empfohlen werden:

- Bewertung und Einteilung der monolithischen Einzelscheiben nach diesem Dokument;
- in Ausnahmefällen: Anisotropie-Scan der gesamten Glasscheibe an einem Offline-Anisotropie-Scanner;
- visuelle Beurteilung am Einbauort, siehe Anhang C.

Literaturhinweise

- [1] FKG, „Merkblatt FKG 01/2019 — Die visuelle Qualität von Glas im Bauwesen — Anisotropien bei thermisch vorgespanntem Glas“, 2019.
- [2] M. Feldmann, R. Kasper, P. Di Biase, B. Schaaf, C. Schuler, S. Dix, M. Illguth, „Flächige und zerstörungsfreie Qualitätskontrolle mittels spannungsoptischer Methoden“ in Glasbau 2017, B. Weller und S. Tasche, Hg., Berlin: Ernst & Sohn, 2017, S. 327–338, doi: 10.1002/cepa.27.
- [3] S. Dix, P. Müller, C. Schuler, S. Kolling und J. Schneider, „Digital image processing methods for the evaluation of optical anisotropy effects in tempered architectural glass using photoelastic measurements“, Glass Struct Eng, Jg. 11, Nr. 6, S. 10, 2021.
- [4] L. Hidalgo, M. Elstner: Anisotropic Effects in Architectural Glass. In: FACADE TECTONICS. 2018. Los Angeles: 12.03.-13.03.2018, pp. 3–22.
- [5] DIN EN 1863 (alle Teile), *Glas im Bauwesen — Teilvorgespanntes Kalknatronglas*
- [6] DIN EN 12150 (alle Teile), *Glas im Bauwesen — Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas*
- [7] DIN EN 14179 (alle Teile), *Glas im Bauwesen — Heißgelagertes thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas*
- [8] DIN EN 572-1, *Glas im Bauwesen — Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas — Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften*
- [9] DIN EN 572-2, *Glas im Bauwesen — Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas — Teil 2: Floatglas*
- [10] DIN EN 1096 (alle Teile), *Glas im Bauwesen — Beschichtetes Glas*
- [11] DIN EN 1279 (alle Teile), *Glas im Bauwesen — Mehrscheiben-Isolierglas*
- [12] DIN EN 14449, *Glas im Bauwesen — Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas — Konformitätsbewertung/Produktnorm*
- [13] ASTM C 1048, *Standard Specification for Heat-Strengthened and Fully Tempered Flat Glass*
- [14] DIN 58629-1:2006-01, *Optik und optische Instrumente — Begriffe für die Mikroskopie — Teil 1: Lichtmikroskopie*
- [15] DIN EN 1863-1:2012-02, *Glas im Bauwesen — Teilvorgespanntes Kalknatronglas — Teil 1: Definition und Beschreibung; Deutsche Fassung EN 1863-1:2011*
- [16] DIN EN 12150-1:2020-07, *Glas im Bauwesen — Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas — Teil 1: Definition und Beschreibung; Deutsche Fassung EN 12150-1:2015+A1:2019*
- [17] DIN EN 61757-1-1:2017-11, *Lichtwellenleitersensoren — Teil 1-1: Dehnungsmessungen — Dehnungssensoren basierend auf Faser-Bragg-Gatter (IEC 61757-1-1:2016); Deutsche Fassung EN 61757-1-1:2017*
- [18] ASTM C 1279, *Standard Test Method for Non-Destructive Photoelastic Measurement of Edge and Surface Stresses in Annealed, Heat-Strengthened, and Fully Tempered Flat Glass*