

# **Zur Festigkeit emaillierter Gläser**

About the Strength of Enamelled Glass

An der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) vorgelegte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Philipp Krampe

geboren am 09.07.1976 in Soest.

Erster Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller Technische Universität Dresden
Zweiter Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Frank Wellershoff Hafencity-Universität Hamburg

Tag der Verteidigung 18.12.2013

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

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

Philipp Krampe

**Zur Festigkeit emaillierter Gläser**

Dissertation. Dresden: Technische Universität, 2013

© 2013 Philipp Krampe

Technische Universität Dresden  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Institut für Baukonstruktion

D-01062 Dresden

Telefon +49 351 463 34845  
Telefax +49 351 463 35039

[www.bauko.bau.tu-dresden.de](http://www.bauko.bau.tu-dresden.de)





## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit beinhaltet einen Erklärungsversuch zur Festigkeitsminderung von Emailen auf Glas im Detail. Die Idee und Motivation zu dieser Arbeit entstand aus einer Anfrage aus der Wirtschaft zur Darlegung des Phänomens.

Die Arbeit entstand während meiner Beschäftigung am Institut für Baukonstruktion. In dieser Tätigkeit wurde mir seitens des Institutsleiters Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller die Möglichkeit zur Promotion geboten und nahegelegt. Auf die Unterstützung und Motivierung meines Doktorvaters zur Vervollständigung der Arbeit konnte ich immer zählen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Wellershoff von der Hafencity Universität Hamburg danke ich für seine Tätigkeit als Zweitgutachter.

Vielfach konnte ich auf die Unterstützung verschiedener Personen zurückgreifen. So gilt mein Dank der Firma Interpane für die Herstellung der Proben und für den wertvollen Austausch bezüglich des industriellen Herstellungsprozesses sowie der Firma Wolbring für hilfreiche Angaben und Hinweise zu Emailen als Grundstoff des Drucks.

In der Versuchsdurchführung und -auswertung wurde ich dankenswerterweise von Mirko Köhler, Theresa Leschik und Katharina Lohr tatkräftig unterstützt. Meinen Kollegen am Institut möchte ich für den Austausch in Sachfragen danken, ganz besonders aber Jasmin Fischer für das sehr intensive Lektorieren und vielen sachdienlichen Anmerkungen.



## **Kurzfassung**

Emaillierte Scheiben finden seit sehr langer Zeit ihre Anwendung im Bauwesen als opake Fassadenpaneele in System- oder vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden. Mit Mustern in Form von Punkten, Streifen oder Quadraten wird ein teilweiser Sonnen- beziehungsweise Blendschutz realisiert. Ebenso ist seit langem eine festigkeitsmindernde Wirkung einer solchen Bedruckung auf Glasbauteilen bekannt. Die Gründe dafür sind nicht geklärt, und es existieren mehrere Erklärungsversuche, die ihre Belastbarkeit aber noch nicht bewiesen haben. Ebenso beruhen die Normangaben zu bedruckten, vorgespannten Glasprodukten auf empirischen Untersuchungen ohne weitere wissenschaftliche Basis.

Daher wird in dieser Arbeit das Ziel verfolgt, eine in der Fachliteratur genannte mögliche Ursache der Festigkeitsminderung genauer zu untersuchen. Neben einer Bewertung der bereits vorhandenen, wenigen Erklärungsversuche wird die in der Literatur geäußerte und auch durch Versuche im Rahmen von Qualitätskontrollen der Glasveredler berechnete Annahme der Festigkeitsminderung auf Grund geänderter Temperaturverhältnisse während des Abkühlvorgangs durch die Emailleschicht besonders untersucht. Dieser Annahme wird mit spannungsoptischen Messmethoden und in Bruchversuchen nachgegangen. Mit Streulichtmessungen werden mögliche Veränderungen im Eigenspannungsverlauf über die Glasdicke quantitativ ermittelt. Mit Bruchversuchen in einem modifizierten Doppelring-Biegeversuch können dann unter Ansatz der ermittelten Vorspannung im Glas Rückschlüsse auf mögliche strukturelle Veränderungen der Glasoberfläche beziehungsweise größere Defekte geschlossen werden.

Mittels numerischer Simulationen des Vorspannprozesses von bedruckten und unbedruckten Scheiben kann auch die Auswirkung verschiedener thermischer Ausdehnungskoeffizienten genauer bestimmt werden. In praktischen Versuchen kann eine solche mögliche Auswirkung nicht untersucht werden, da die Emaille als Überzugsmaterial als handelsübliches Produkt verwendet und nicht frei konfektioniert wird. Daher können nur die thermischen Ausdehnungskoeffizienten im Versuch berücksichtigt werden, die sich im handelsüblichen Produkt einstellen.



## Summary

Enamelled glass panes have been used for a long time as elements in standard and ventilated façade systems a long time. A partial sun protection or a glare shield is achieved by certain patterns either in points, stripes or squares.

The weakening effect of such printing upon structural glass has also been long known. The reasons for this effect, however, have not yet been comprehensively investigated. There are several theories and explanations which have not yet shown their reliability under specific testing. Moreover, the characteristic strength as given in the Norms for such printed, pre-stressed glass products based only on empirical research without further study of scientific causes.

Hence, the main focus of this work is to examine a possible reason for the strength degradation as mentioned in literature. In addition to the evaluation of already existing nevertheless limited explanation attempts, the theories mentioned in the literature concerning strength reduction due to changes in thermal conditions during the tempering process will be investigated in particular. This possible explanation is also supported through tests done within the scope of the glass manufacturer quality control.

This theory is pursued by means of stress optical measuring methods and breakage tests. Possible alterations in the residual stress distribution over the thickness will be quantitatively tested by means of scattered light measurements. Considering the measured distribution breaking tests done with a modified coaxial ring test allow for conclusions in terms of structural alterations within the surface or larger defects.

By means of numerical simulations of the tempering process of printed and non-printed specimens the effect of different thermal expansion coefficients is able to be determined more accurately. Such an effect cannot be investigated in practical tests due to the fact, that the enamel as coating is used as provided by the manufacturer and not specially mixed or composed. Therefore, only the thermal expansion coefficients as available in existing products will be investigated.



## Inhalt

1	Problemstellung	1
1.1	Begriffsbestimmungen	3
1.1.1	Fachbegriffe zur Emaille	3
1.1.2	Festigkeitsbegriffe für Glas	5
1.2	Stand der Wissenschaft und Technik	7
1.2.1	Metallemaillierungen	7
1.2.2	Glasmaillierungen	8
1.3	Abgeleitete Fragestellungen	22
1.4	Lösungsansätze	23
2	Grundlagen der Werkstoffe	27
2.1	Viskosität	27
2.2	Spektrale Eigenschaften und Farbgebung	30
2.3	Glas	36
2.3.1	Mechanische Eigenschaften	36
2.3.2	Thermische Eigenschaften	37
2.4	Emaille / Glasfluss	45
2.4.1	Aufbau / Struktur / Zusammensetzung	45
2.4.2	Mechanische Eigenschaften	48
2.4.3	Thermische Eigenschaften	50
2.5	Emailliertes Glas	52
3	Thermische Vorspannung	56
3.1	Prinzip der thermischen Vorspannung	56
3.2	Mechanismus der thermischen Vorspannung	57
3.3	Mechanik der thermischen Vorspannung	60
3.3.1	Temperaturverlauf	61
3.3.2	Spannungsrelaxation	65
3.3.3	Strukturrelaxation	68
3.3.4	Zusammenfassung und Spannungsverlauf	71
4	Prüfungen und Prüfgeräte – Grundlagen	74
4.1	Optische Untersuchungen	74
4.1.1	Grundlagen der Spannungsoptik	74
4.1.2	Streulichtmessungen	75
4.1.3	Diskussion weiterer Verfahren	79
4.1.4	Anwendung Messgerät SCALP	81
4.1.5	Spektralmessung	86
4.2	Bruchversuche	87
4.2.1	Doppelring-Biegeversuche nach DIN EN 1288	88
4.2.2	Modifizierter Doppelring-Biegeversuch	90
4.2.3	Bestimmung der Versuchsgeometrie	93
4.3	Auswertung und Statistik	97
5	Prüfungen – Durchführung und Auswertung	100

5.1	Parameterzusammenstellung	100
5.2	Form und Art der Probekörper	103
5.3	Optische Untersuchungen	109
5.3.1	Überprüfung der bedruckten Seite	109
5.3.2	Differential-Refraktographie	109
5.3.3	Streulichtmessungen	110
5.3.4	Spektralmessung	117
5.3.5	Zusammenfassung optische Untersuchungen	119
5.4	Bruchversuche	120
5.4.1	Unbedruckte Proben	123
5.4.2	Schwarz bedruckte Proben	124
5.4.3	Weiß bedruckte Proben	126
5.4.4	Zusammenfassung Bruchversuche	127
5.5	Überlagerung Spannungsoptik und Bruchversuch	128
6	Numerische Simulationen	134
6.1	Simulation des Vorspannprozesses	134
6.1.1	Grundlagen	134
6.1.2	Numerische Modellierung	135
6.1.3	Temperaturprofil	137
6.1.4	Vorspannprozess für unbedrucktes Glas	140
6.1.5	Vorspannprozess für bedrucktes Glas	147
6.2	Parameterstudien	150
6.2.1	Auswirkung der Emailleschichtstärke	152
6.2.2	Auswirkung der Ausdehnungsdifferenz	155
6.2.3	Zusammenfassung numerische Simulation	158
7	Zusammenfassung und Ausblick	160
7.1	Zusammenfassung und Diskussion	160
7.2	Ausblick	170
8	Verzeichnisse	174
8.1	Bezeichnungen	174
8.1.1	Formelzeichen	174
8.1.2	Abkürzungen	177
8.2	Literaturverzeichnis	178
8.2.1	Allgemein über Glas und allgemeine Parameter	178
8.2.2	Emaille	178
8.2.3	Vorspannung	180
8.2.4	Mechanik und Festigkeit	183
8.2.5	Bruchversuche und Statistik	184
8.2.6	Optik und Spannungsoptik	185
8.2.7	Normen und Richtlinien	186
8.3	Abbildungsverzeichnis	188





## 1 Problemstellung

Im Bauwesen werden mit Emaille bedruckte Bauteile sowohl im Bereich des Fassaden- als auch Innenausbaus verwendet. Die Trägermaterialien sind Metallbleche oder Glas. Derzeit erfährt emailliertes Glas als Mittel zur Fassadengestaltung einen Aufschwung. Dazu tragen Weiterentwicklungen in den Auftragsverfahren, die neben vollflächigen Bedruckungen auch Muster und photorealistische Motive ermöglichen, wesentlich bei.



**Bild 1** Vollflächig emailliertes Glas als gestaltbildender Bestandteil einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassade



**Bild 2** Partieller Siebdruck als Sonnenschutz und Gestaltungselement

Emailliertes Glas besteht aus einem Basisglas mit einer Bedruckung aus einem eingebrannten, glasartigen Material. Das Basisglas ist in aller Regel handelsübliches, unveredeltes Floatglas. Ornamentglas mit Emaille-Bedruckungen ist nicht bekannt. Auf Grund des Herstellungsprozesses bei einer Einbrenntemperatur von etwa 870 – 920 K (600 °C – 650 °C) sind emaillierte Gläser in aller Regel mindestens

teilvorgespannte Gläser.<sup>1</sup> Es entsteht ein monolithischer Verbundwerkstoff, in dem sich die Einzelbestandteile Glas und Emaille nach Herstellung nicht mehr trennen lassen. Allerdings kann eine unzureichende Herstellung dazu führen, dass bei einer Haftzug- oder Scherbeanspruchung der Überzug vom Substratglas abgerissen werden kann.<sup>2</sup>

Durch die Emaillierung selbst entsteht eine witterungsbeständige und mechanisch sowie chemisch widerstandsfähige Oberfläche auf dem Basisglas. Mit bestimmten Zusätzen lassen sich mattierte oder hochglänzende Schichten herstellen. Im Vergleich zum unbedruckten Glas ist die Oberfläche emaillierter Gläser rau. Auf Grund der Erhabenheit der Bedruckung, besonders bei Teilbedruckungen, und rauerer Oberflächentextur der Emaille kann sich organisches Material besser festsetzen und somit zu einer Veralgung führen. Daher werden emaillierte Oberflächen in einem Verbundglas meist zur Zwischenschicht und bei monolithischem ESG zur Innenseite hin ausgerichtet.<sup>3</sup>

Auf Grund der vielfältigen Herstellungs- und Gestaltungsmöglichkeiten lassen sich opake Blindpaneele oder im Sieb- oder Digitaldruck mit Mustern versehene Gläser darüber hinaus als Sonnenschutz, als Gestaltungselement oder als Kombination aus beidem einsetzen. Dabei sind der Farbgebung solcher Elemente nur durch einen möglichen Verzicht auf Schwermetalle Grenzen gesetzt.<sup>4</sup>

Gegenüber den unbedruckten Basisgläsern besitzen emaillierte Produkte eine reduzierte Festigkeit, unabhängig vom Vorspanngrad der Scheiben.<sup>5</sup> Die Ursachen dieser Festigkeitsminderung sind noch nicht zufriedenstellend erforscht.

<sup>1</sup> Daher muss vor dem Einbrand eine Kantenbearbeitung wie für unbedruckte vorgespannte Gläser erfolgen.

<sup>2</sup> In allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (abZ) sind für auf der Emailleseite geklebte Gläser besondere Qualitätskontrollen durchzuführen. Diese umfassen die Ritzhärte, die Ermittlung der Porosität und des Glanzgrades (vergleiche u.a. abZ Z-70.1-75).

<sup>3</sup> Eine Anordnung von Bedruckungen zur Verbundfolie ist im Rahmen von abZ zulässig.

<sup>4</sup> Auf Grund bestimmter Verordnungen sind Schwermetalle (beispielsweise Blei und Cadmium) nicht uneingeschränkt verwendbar. Vergleiche auch Kapitel 2.4 und Fußnote 107.

<sup>5</sup> Wegen dieser Festigkeitsminderung sind nach TRAV und DIN 18008-4 Gläser mit festigkeitsreduzierenden Oberflächenbehandlungen nicht zulässig.

Bislang sind die Festigkeiten von emaillierten Gläsern normativ geregelt, allerdings werden die Gründe für die Festigkeitsminderung in der Fachliteratur kaum behandelt. Um die Festigkeit bedruckter Gläser verbessern zu können, müssen die festigkeitsmindernden Vorgänge bekannt sein. Dazu einen Beitrag zu liefern ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Allerdings kann auf Grund der Komplexität des gesamten Sachverhalts und aus Ermangelung an aussagekräftigen, bereits vorhandenen Vorarbeiten<sup>6</sup> keine abgeschlossene Begründung und Theorie zur Festigkeitsminderung dargestellt werden. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung einer bestimmten, möglichen Ursache als Teilaspekt mit dem Charakter einer Erstuntersuchung.

Im Folgenden wird bei glasigen oder keramischen Überzügen von einer Bedruckung gesprochen. Beschichtungen bezeichnen im Vergleich dazu dünne Metallschichten mit bauphysikalischen Funktionen wie Wärme- oder Sonnenschutz.

## 1.1 Begriffsbestimmungen

### 1.1.1 Fachbegriffe zur Emaille

In der Literatur finden sich bisweilen abweichende Definitionen beziehungsweise die gleichen Definitionen unter anderen Bezeichnungen. Daher müssen die wesentlichen Begriffe und Sachverhalte eindeutig in ihrem Bedeutungs- und Anwendungsspektrum festgelegt werden.<sup>7</sup>

Emaille<sup>8</sup>: „Eine durch völliges oder teilweises Schmelzen entstandene glasartige Masse mit einer anorganischen, im Wesentlichen aus Oxiden bestehenden Zusammensetzung, die in einer oder mehreren Schichten mit verschiedenen Zusätzen auf metallische oder Glasgegen-

<sup>6</sup> Arbeiten, die Teilaspekte intensiv untersucht haben, stammen aus den 80er Jahren und sind heute wegen der Weiterentwicklung der Emaille nicht vollumfänglich übertragbar (vergleiche Röpke 1981, Emonts 1985 und Röcker 1987). Andere Arbeiten haben empirisch lediglich Bruchversuche vorgenommen, ohne Anspruch auf Ausarbeitung einer Theorie zur Festigkeitsminderung (vergleiche Krohn 2002-1, Krohn 2002-2 und Krohn 2002-3).

<sup>7</sup> Entnommen Röpke 1981 und Petzold 1992. Bei unterschiedlichen Begriffsbezeichnungen in der Literatur werden immer die Definitionen nach Petzold 1992 verwendet.

<sup>8</sup> Definition von Emaille nach RAL 2007.

stände aufgetragen und danach bei Temperaturen über 450 °C geschmolzen wird oder wurde." Als Emaille wird die endgültige Bedruckung bezeichnet.

- Emaillierung:** Fest haftender, anorganisch-glasiger Überzug auf einem Trägerwerkstoff, beziehungsweise das Verfahren zu dessen Herstellung.
- Gemenge:** Rohstoffmischung zur Glasfrittenherstellung.
- Glasfluss:** Oder auch Glasemaille. Dieser ist der Grundkörper der Bedruckung und besteht aus gemahlene Glasfritten. Die wesentlichen Eigenschaften der Bedruckung werden durch den Glasfluss gesteuert. Er ist in aller Regel farblos. Eine Färbung wird durch weitere Zusatzstoffe (Pigmente) erzeugt.
- Glasfritte:** Grundstoff und wesentlicher Bestandteil für den Glasfluss. Teilaufgeschmolzenes und abgeschrecktes Glas mit einer inhomogenen, porösen Struktur.
- Paste:** Auftragsfertige Suspension bestehend aus gemahlene Glasfritten, Farbkörpern, Bindemitteln und Additiven. Sie wird in ihrem rheologischen Verhalten den Auftragsverfahren angepasst. Sie wird durch Tauchen, Walzen oder Sprühen (On- oder Offline-Verfahren), Sieb- oder Digitaldruck (Offline-Verfahren) auf das Trägermaterial aufgebracht.
- Pigmente:** Stoff zur Färbung in Glasflüssen oder Glasemaille. Die Farbgebung wird durch Metalloxide und ihre Salze erzielt. Entweder werden die Pigmente dem Glasfluss in der Suspension zugesetzt oder direkt dem leichtschmelzenden Glas zur anschließenden Weiterverarbeitung zu Fritten. Pigmente sollen die Festigkeit des emaillierten Glases beeinflussen.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Vergleiche Röpke 1981, Seiten 25 und 80 ff.

Trübungsmittel:

Mittel zur Trübung und Opafizierung des Glasflusses. Solche Mittel finden bei der Metall-emaillierung Anwendung und sind bei der Emaillierung von Glas unüblich, da die Transparenz des Glasflusses erhalten bleiben soll.

Versatz: Formulierung der Rohstoffmischung für die Glasfritten.

### 1.1.2 Festigkeitsbegriffe für Glas

Im Gegensatz zu anderen Werkstoffen muss bei Glas und Glasprüfungen die jeweils ermittelte Festigkeit in ihrer Charakteristik genau angegeben werden.<sup>10</sup> Eine reine Zugbelastung tritt in Glasbauteilen selten auf. Glas wird meist als plattenartiges Bauteil mit einer Biegebeanspruchung senkrecht zu seiner Plattenebene genutzt. Daher ist die maßgebende Festigkeit beziehungsweise der am treffendsten umschreibende Begriff die Biegezugfestigkeit. Diese bezeichnet die im Biegeversuch ermittelte Festigkeit des spröden Werkstoffs Glas ausschließlich unter der Spannungsänderung aus anliegender Prüflast.

Bei der Festigkeitsprüfung und der Begriffsbestimmung der Festigkeit bei vorgespannten Gläsern hingegen muss die eingeprägte Oberflächendruckspannung berücksichtigt werden. Die im Bruchversuch ermittelte Bruchspannung ist nicht mit der Biegezugfestigkeit im obigen Sinne gleichzusetzen. Die eingeprägte Druckvorspannung muss erst durch die äußere Belastung abgebaut werden, bevor das Grundmaterial selbst auf Zug beansprucht wird und eine Rissaufweitung erfolgt. Der Biegezugfestigkeit wird somit das additive Element der Druckvorspannung hinzugefügt. Es wird dabei nicht die Biegezug-, sondern die Prüfbiegefestigkeit ermittelt.

$$\sigma_{\text{Prüf,bB}} = \sigma_{\text{bB}} + \sigma_{\text{V}}$$

Gleichung 1

$\sigma_{\text{Prüf,bB}}$  Prüfbiegefestigkeit des Glases [ N/mm<sup>2</sup> ]

$\sigma_{\text{bB}}$  Biegezugfestigkeit des Glases [ N/mm<sup>2</sup> ]

<sup>10</sup> Vergleiche Exner 1986, Seite 267. Im Folgenden wird die dort verwendete Nomenklatur übernommen.

$\sigma_V$  Eigen- bzw. Vorspannung im Glas [ N/mm<sup>2</sup> ]<sup>11</sup>

Die Bestimmung der Biegezugfestigkeit von vorgespannten Gläsern ist bei Unkenntnis des Eigenspannungszustands in der Regel nicht möglich. Es kann nur die Prüfbiegefestigkeit angegeben werden. Bei einer Ermittlung der Vorspannung mit geeigneten Messgeräten vor oder nach der Prüfung, kann der Anteil der Eigenspannung bestimmt und bei der Prüfbiegefestigkeit berücksichtigt werden. Eine Angabe der Biegezugfestigkeit ist somit wieder möglich. Allerdings setzt dieses voraus, dass die Vorspannung betragsmäßig gleich und gleichmäßig verteilt ist. Eine einfache Addition der einzelnen Anteile gemäß Gleichung 1 ist auf Grund der statistischen Unabhängigkeit beider Anteile gerechtfertigt.<sup>12</sup>

Im Rahmen dieser Arbeit reicht die Angabe der Prüfbiegefestigkeit als Bewertungsmaßstab nicht aus, da Veränderungen in der Vorspannung auf Grund veränderter thermischer Verhältnisse beim Anblasen durch die Bedruckung, Zwangsspannungen aus Differenzen der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Glas und Emaille und die Zunahme von strukturellen Defekten auf Grund des Einbrands für die Festigkeitsreduzierung wahrscheinlich sind. Die Ursachen können einzeln oder in beliebiger Kombination auftreten. Gleichung 1 nimmt dann unter Beachtung dieser möglichen Einflüsse folgende Form an:

#### Gleichung 2

$$\sigma_{\text{Prüf,bb}} = \sigma_{\text{bb}} + \sigma_V - \sigma_{\text{TV}} - \sigma_{\text{TA}} - \sigma_{\text{SD}}$$

Dabei stammen die Reduktionen

$\sigma_{\text{TV}}$  auf Grund thermischer Veränderungen [ N/mm<sup>2</sup> ]

$\sigma_{\text{TA}}$  auf Grund Ausdehnungsdifferenz [ N/mm<sup>2</sup> ]

$\sigma_{\text{SD}}$  auf Grund struktureller Defekte [ N/mm<sup>2</sup> ].

Ohne weitere Unterscheidung wird bei Zwang von allen oder einzelnen Anteilen der Reduktion gesprochen. Die Untersuchung zur Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffi-

<sup>11</sup> Bei normalgeköhltem Floatglas ist  $\sigma_V = 0$  N/mm<sup>2</sup> (praktisch; geringe Eigenspannungen sind in der Regel vorhanden, vergleiche Schneider 2011). In der Gleichung muss die Druckspannung mit einem negativen Vorzeichen eingegeben werden.

<sup>12</sup> Der Nachweis für diese Annahme wurde in Laufs 2000, Seite 112 geführt.

zienten kann wegen der Verwendung handelsüblicher Farbsysteme mit konstanten thermischen Ausdehnungskoeffizienten nur numerisch vorgenommen werden. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung der veränderten thermischen Verhältnisse. Die Verläufe und Größe der Eigenspannungen in den Scheiben werden vor dem Biegebruchversuch aufgezeichnet, womit eine Aussage zu  $\sigma_V$  besonders im Vergleich zu Messungen an Referenzproben möglich ist.

## **1.2 Stand der Wissenschaft und Technik**

### **1.2.1 Metallemaillierungen**

Die Emaillierung von Metallgegenständen ist eine seit langem angewandte Technik und ausführlich erforscht und beschrieben. Je nach Metall sind abgestimmte Emaillesysteme bestehend aus Grund- und Deckemaillen erforderlich. Diese Emaillierungen werden bis heute in der Regel in der chemischen Industrie und im Apparatebau sowie als Fassadenelement verwendet. Als Überzug von Haushaltgegenständen hat es gegenüber anderen Werkstoffen an Bedeutung verloren. Die erhältliche Fachliteratur<sup>13</sup> befasst sich ausschließlich mit Metallemaillierungen. Es werden ausführlich die Beschaffenheit und Zusammensetzung der Grundbestandteile und ihr Zusammenwirken unter verschiedenen Gesichtspunkten wie mechanische, chemische und thermische Eigenschaften im Verbund behandelt.

Die Normung für Metallemaillierungen umfasst Aspekte der Gebrauchstauglichkeit wie beispielsweise Abriebfestigkeit, Ausdünstung von Schwermetallen und elektrischer Widerstand. Mechanische Kennwerte und thermische Eigenschaften werden nicht geregelt. Einzig die Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten für Emailleüberzüge von Metallen ist in DIN 51177 vereinheitlicht erfasst.

<sup>13</sup> Vergleiche u. a. Dietzel 1981 und Petzold 1992.

### 1.2.2 Glasemaillierungen

Emaillierungen auf Glas werden dagegen in der Fachliteratur<sup>14</sup> selten behandelt. Vergleichbar umfassende Literatur wie bei der Metallemaillierung liegt für Glasemaillen nicht vor, und eine Übertragung bestimmter Einzeleffekte auf das Glas ist wegen der Unterschiedlichkeit der Trägerwerkstoffe nur bedingt oder gar nicht möglich. Wesentliche Unterschiede bestehen in den thermischen Eigenschaften und den Haftungsmechanismen zwischen Emaille und Trägerwerkstoff. Bei Metallen erfolgt die Verbindung über Valenz- oder Van-der-Waals-Bindungen, die über eine Oxidschichtbildung als Grenzschicht ermöglicht wird<sup>15</sup>. Bei Glas erfolgt eine Ionen-Bindung über die SiO-Baugruppen.

Es ist seit langem bekannt, dass eine Bedruckung die mechanische Festigkeit beziehungsweise Beanspruchbarkeit gegenüber dem jeweiligen Basisglas reduziert. Die charakteristischen Festigkeiten sind in den entsprechenden Regelwerken festgeschrieben<sup>16</sup>. Die Differenz der Festigkeit zwischen unbedrucktem und emailliertem Glas beträgt etwa 35 %, nahezu unabhängig vom Vorspanngrad. Diese Differenz konnte auch für normalgekühltes, teilbedrucktes Floatglas mittels Spannungsoptik nachgewiesen werden<sup>17</sup>.

**Tafel 1** Zusammenstellung der Beanspruchbarkeit von Glas-Emaille-Verbunden

Glas [ / ]	Wert [ / ]	emailliert	unbedruckt	Abweichung [ % ]
ESG <sup>18</sup>	$f_k$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	75	120	37,5
	$f_k$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	75	120	37,5
	zul. $\sigma$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	30	50	40,0
TVG <sup>19</sup>	$f_k$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	45	70	35,0
	zul. $\sigma$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	18	29	38,0

Tafel 1 zeigt die einzelnen Werte unter Angabe zulässiger

<sup>14</sup> Vergleiche Wörner 2001, Seiten 49 f. und Fröhler 2005, Seiten 355 f.

<sup>15</sup> Vergleiche Dietzel 1981, Seiten 119 ff. und Petzold 1992, Seiten 63 ff. Allerdings gibt es nach den Autoren noch keine endgültige Erklärung für gesamten Haftungsmechanismus.

<sup>16</sup> Vergleiche DIN 18516-4, DIN EN 1863-1, DIN EN 12150-1 und TRLV. Emailliertes Floatglas ist nicht geregelt.

<sup>17</sup> Vergleiche Weller 2010-2.

<sup>18</sup> Nach DIN EN 12150-1, DIN 18516-4 und TRLV.

<sup>19</sup> Nach DIN EN 1863-1 und TRLV.

oder charakteristischer Werte je nach technischer Regel. In der TRLV und den jeweiligen abZ wird noch zwischen Emaille auf der Biegezug- und -druckseite unterschieden. Dieses entfällt bei DIN EN 12150-1 und DIN EN 1863-1.<sup>20</sup> Konkrete Beschreibungen oder weitere Hinweise zu emaillierten Gläsern gibt es in diesen Vorschriften nicht.

Die Datenbasis dieser Werte besteht aus Ergebnissen, die im Rahmen der europäischen Normungsarbeit im CEN in breit angelegten Untersuchungen gewonnen wurden. Dabei wurden Doppelring-Biegeversuche an in ihrem Vorspanngrad nicht weiter spezifizierten, schwarz und silbern bedruckten Proben durchgeführt.<sup>21</sup> Die Proben waren rund mit einem Durchmesser von 100 mm und besaßen eine Stärke von 6 mm. Angaben zur Prüffläche und zu den Schichtdicken sind nicht gegeben. Ebenso weicht die Belastungsrate von den Vorgaben der DIN EN 1288 ab. In den Versuchen wurde die Belastung weggesteuert mit einer Rate von 0,5 mm/min aufgebracht. Tafel 2 stellt die Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Untersuchungen als Grundlage der normativen Regelung dar.

Glas [ / ]	Anzahl [ / ]	Mittelwert [ N/mm <sup>2</sup> ]	Stabw [ N/mm <sup>2</sup> ]	5%-Fraktile [ N/mm <sup>2</sup> ]
unbedruckt	123	137,1	39,8	71,0
Schwarz	531	82,3	24,7	41,5
Silber	55	76,9	15,0	51,7

**Tafel 2** Ergebnisse aus einer breit angelegten Studie zur Biegezugfestigkeit von emaillierten Scheiben

Die 5%-Fraktile zeigt, dass offenbar Gläser in der Güte von TVG verwendet worden sind. Allerdings liegt der Wert der charakteristischen Festigkeit für die schwarzen Proben noch unterhalb des Normwertes. Daher kann die verwendete Glasart nicht abschließend angegeben werden, zumal auch der Variationskoeffizient der unbedruckten Proben mit 29 % einen ungewöhnlich hohen Betrag aufweist. Die Normwerte nach DIN EN 12150 ergaben sich dann dadurch, dass die relative Abminderung der Festigkeit zwischen den bedruck-

<sup>20</sup> In den Normen wird nur allgemein geregelt, dass die emaillierte Seite unter Spannung steht, ohne Angabe der Art der Spannung.

<sup>21</sup> Die Angaben stammen aus einer Privatkorrespondenz mit dem Obmann des entsprechenden Normenausschusses. Die Daten sind anonym. Der Hersteller ist dem Autor nicht bekannt.

ten und unbedruckten Proben in diesem Versuch auf TVG und ESG übertragen worden ist. Weiterhin wird an Hand der Ergebnisse seitens der Autoren vermutet, dass die Porosität der Emaille und die daraus resultierenden Defekte ursächlich für die Festigkeitsminderung seien.

In der Literatur wird meist nur die Herstellung und Anwendung von emaillierten Gläsern beschrieben ohne weitere Behandlung der Ursachen der Festigkeitsminderung. Diese wird auf vier mögliche Effekte zurückgeführt.<sup>22</sup>

- Differenzen im thermischen Ausdehnungskoeffizient,
- Mahlfeinheit, Einbrand und Porosität der Emaille,
- Auslaugungsprozesse und
- Änderung der thermischen Verhältnisse während des Einbrenn- und Vorspannvorgangs.

### **Differenzen im thermischen Ausdehnungskoeffizienten**

Unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten von Basisglas und dem pigmentierten Glasfluss im Abkühlungsprozess sollen zu erheblichen Zwangsspannungen  $\sigma_{TA}$  führen. Derartige Dehnungsdifferenzen führen bei Metallemaillierungen zu erheblichen Zwangsspannungen.<sup>23</sup> Allerdings ist eine Übertragbarkeit auf das Glas wegen der geringeren Differenz der Ausdehnungskoeffizienten<sup>24</sup> und des großen Dickenverhältnisses zwischen Emaille und Glas nur bedingt möglich. Darüber hinaus wird bei emaillierten Gläsern versucht, die Ausdehnungskoeffizienten zur Vermeidung von Zwangsspannungen weitestgehend anzugleichen.

Die Anpassung der beiden Ausdehnungskoeffizienten wurde in anderen Untersuchungen in Frage gestellt.<sup>25</sup> Diese ergaben, dass gleiche Werte noch keinen spannungsfreien Verbund gewährleisten. Vielmehr reduzierte sich die Festig-

<sup>22</sup> Vergleiche Röpke 1981, Emonts 1986, Röcker 1987 und Petzold 1990, Seite 48.

<sup>23</sup> Vergleiche Dietzel 1962, Dietzel 1981, Seiten 132 ff., Oel 1965 und Petzold 1992, Seiten 73 ff. und 344. Der Effekt lässt sich mit dem Verhalten eines Bimetallstreifens unter Erwärmung vergleichen.

<sup>24</sup> Der für Metallemaillierungen gebräuchliche Trägerwerkstoff ist Stahl mit einem Ausdehnungskoeffizienten von  $\alpha_{T,(20)} = 12 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Dagegen besitzt Emaille nach Herstellerangaben ein  $\alpha_{T,(50-300)} = 8 - 9 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

<sup>25</sup> Vergleiche Röcker 1987, Seite 18.

keitsabnahme mit Abnahme des Ausdehnungskoeffizienten der Emaille gegenüber dem des Glases.<sup>26</sup>

Allerdings wurde in den bisherigen Untersuchungen diese Annahme nur qualitativ ohne mechanisch-mathematische Beschreibung getroffen. Ein direkter mathematischer Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten hinsichtlich des Aufbaus von Zwangsspannungen und einhergehenden Festigkeitsminderungen wie für Metallemaillierungen<sup>27</sup> wurde nicht formuliert.

### **Mahlfeinheit, Einbrand und Porosität der Emaille**

Eine zweite mögliche Ursache gründet sich auf den Gesamtkomplex der Mahlfeinheit und den Einbrandbedingungen mit Auswirkungen auf die Porosität der Emaille<sup>28</sup>. Diese Vermutung wurde ebenfalls von den Autoren der breit angelegten Untersuchung im Rahmen der Normungsarbeit zur DIN EN 12150 geäußert.<sup>29</sup> Der Glasfluss besteht aus gemahlenden und anschließend dispergierten Grundstoffen mit einer Einlagerung von Metalloxiden als Farbpigmente.<sup>30</sup> Je nach Einbrandbedingungen wie Temperatur und Dauer des Einbrands wird ein größerer oder kleinerer Anteil der granulierten Bestandteile aufgeschmolzen.

Unter bruchmechanischen Aspekten wirken diese Körner oder teilkristallinen Bereiche nach Ansicht der Autoren je nach Größe als Fehlstelle im Gefüge des Materials und somit als Kerbstelle. Auch haben rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen gezeigt, dass die Emailleschicht ein bisweilen sehr poröses Gefüge mit zahlreichen Fehlstellen aufweist. Die dort getroffene Annahme, dass die Herstel-

<sup>26</sup> Für eine optimale Festigkeit sollte der Ausdehnungskoeffizient der Emaille nach Emonts 1985, Seite 122 derart eingestellt sein, dass die Emailleschicht unter leichter Druckvorspannung steht. Bei Emonts 1985, Seite 80, wurde das Verhältnis  $\alpha_E / \alpha_G$  zwischen Werten von 0,84 bis 1,12 variiert.

<sup>27</sup> Die Berechnungsmethoden für Metallemaillierungen unterliegen allerdings vereinfachten Annahmen, die nur teilweise zutreffend sind. Vergleiche Dietzel 1962, Seite 39 und Dietzel 1981 Seite 137.

<sup>28</sup> Emonts 1985 ist diesem Sachverhalt sehr intensiv nachgegangen.

<sup>29</sup> Angaben aus Privatkorrespondenz mit dem Obmann des Normenausschusses. In Röpke 1981, Seiten 52 ff. wird dazu auch ausführlich Bezug genommen, allerdings lässt sich der Bruchursprung auf den Abbildungen nicht deutlich genug erkennen.

<sup>30</sup> Vergleiche Abschnitt 2.4.1.

lungsbedingungen einen Festigkeitseinfluss besitzen, und dass die Emailleschicht als Bruchursprung angesehen werden kann, ist daher naheliegend. Allerdings widerspricht diese Annahme der Theorie der Differenz der Ausdehnungskoeffizienten, da wegen der hohen, mit zunehmender Differenz weiter steigenden Druckspannungen ein Bruchursprung in der Emaille ausgeschlossen sein sollte.

Allerdings muss dieser Sachverhalt unter Beachtung der kritischen Risstiefe  $a_c$  hinterfragt werden. Die Nassschichtstärken von Emailierungen betragen häufig etwa nur  $40 \mu\text{m}$ <sup>31</sup> und sind somit ebenfalls geringer als die kritische Risstiefe. Darüber hinaus beträgt die Körnung der Emaille nach dem Mahlen für alle Farben außer dem Digitaldruck  $8 - 15 \mu\text{m}$ . Weiter wurden auch hier nur qualitative Vermutungen geäußert, ohne dass diese Sachverhalte bruchmechanisch begründet oder hergeleitet worden sind. Die kritische Risstiefe  $a_c$  kann nach Gleichung 3 bruchmechanisch bestimmt werden. Die Berechnung ist allerdings quantitativ exakt nicht auswertbar, da die zu Grunde liegenden Parameter von der jeweiligen Umgebungsbedingung beziehungsweise der Schädigungsart abhängen.<sup>32</sup>

### Gleichung 3

$$a_c = \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma \cdot Y} \right)^2$$

$a_c$  kritische Risstiefe [ mm ]

$\sigma$  von außen anliegende Spannung [  $\text{N}/\text{mm}^2$  ]

$K_{Ic}$  kritischer Spannungsintensitätsfaktor [  $\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{1/2}$  ]

$Y$  Form- oder Geometriefaktor [ / ]

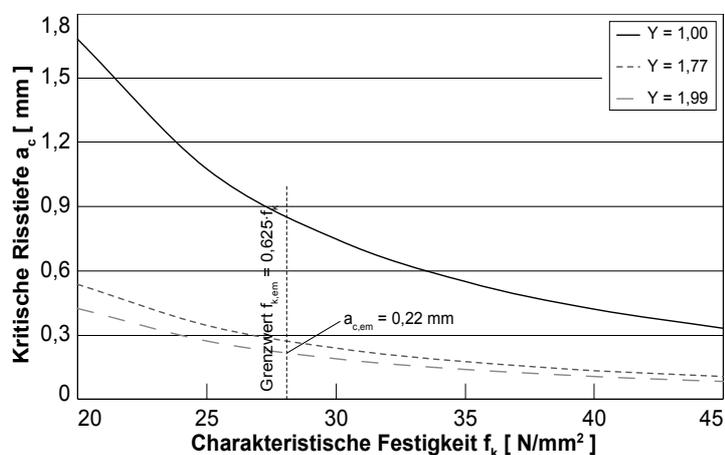
**Tafel 3** Kritische Intensitätsfaktoren und Geometriefaktoren für verschiedene Schädigungsarten

Umgebung	$K_{Ic}$ [ $\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{1/2}$ ]	Schädigung	$Y$ [ / ]
Wasser 25 °C	0,82	Glas auf Glas	1,00
In Luft	0,78	Schleifpapier	1,77
Wasser 23 °C	0,77	Gebrauch	1,99

<sup>31</sup> Diese Schichtdicke gilt für übliche Auftragsverfahren des Sieb- und Digitaldrucks. Beim Walzenauftrag oder Gießvorhang sind größere Schichtstärken die Regel. Emonts 1985 verwendete einen halbautomatischen Auftragsautomaten, welcher Schichtstärken von  $15 - 25 \mu\text{m}$  erzielte (Seite 68).

<sup>32</sup> Die Werte stammen aus verschiedenen Veröffentlichungen. Die Werte der Tabelle sind in der Form aus Wörner 2001, Seiten 64 f. entnommen.

Bei gewöhnlichem Gebrauch ergibt sich unter Beachtung von  $\sigma = f_k$  (anliegende Spannung ist gleich der charakteristischen Festigkeit) eine kritische Risstiefe von  $a_c = 76 \mu\text{m}$ . Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass während des Einbrennvorgangs kein gewöhnlicher Gebrauch, sondern eher eine Glas-auf-Glas-Schädigung vorliegt, vergrößert sich die kritische Risstiefe auf etwa  $a_c = 330 \mu\text{m}$ . Gemäß Bild 3 wird deutlich, dass bei alleiniger Annahme von strukturellen Defekten die kritische Risstiefe bei  $Y = 1,99$  mindestens  $a_c = 220 \mu\text{m}$  beträgt. Dabei wird die Festigkeitsminderung um 37,5 % einzig auf die charakteristische Grundfestigkeit bezogen.



**Bild 3** Kritische Risstiefen  $a_c$  in Abhängigkeit der charakteristischen Festigkeit und Rissgeometrie mit  $K_{Ic} = 0,82 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{m}^{1/2}$

Eine Fehlstellenbildung als bruchauslösender Defekt durch nicht aufgeschmolzene Glasflussbestandteile oder Pigmente erscheint daher nach den vorliegenden Untersuchungen basierend auf den derzeitigen Kenntnissen zur Bruchmechanik für den Werkstoff Glas unwahrscheinlich. Darüber hinaus wurden in den Veröffentlichungen nur Vermutungen geäußert, ohne dass genauer beschrieben wurde, wie solche Defekte im Herstellprozess entstehen.<sup>33</sup>

Die Mahlfeinheit der Bestandteile besitzt weiterhin nur geringen Einfluss auf die Festigkeit.<sup>34</sup> Ähnliche Beobachtungen

<sup>33</sup> Vergleiche Krohn 2002-3, Seite 2512. Dort wurden kritische Risstiefen basierend auf einem gewöhnlichen Oberflächendefekt aus den Versuchswerten berechnet und fraktographisch bestätigt. Allerdings muss zur Erzielung solcher Risstiefen ein subkritisches Risswachstum vorausgesetzt werden, da die kritische Risstiefe durch die Emailleschichtdicke begrenzt ist.

<sup>34</sup> Vergleiche Röcker 1987, Seite 41 und Paulus 1991, Seite 41.

werden auch an anderer Stelle gemacht.<sup>35</sup> Dort wird weiter festgestellt, dass die Mahlfineinheit das Schmelzverhalten nicht beeinflusst, aber positive Auswirkungen auf die homogene Blasenverteilung in der eingebrannten Emaille und das Deckvermögen besitzt.

In diesem Zusammenhang spielt auch die Pigmentierung eine gewisse Rolle.<sup>36</sup> Allerdings ist eine Beeinflussung der Festigkeit nicht so sehr vom verwendeten Stoff zur Farbgebung abhängig, sondern ebenfalls von der Mahlfineinheit dieser Substanzen. Nicht vollständig aufgeschmolzene Pigmente werden ebenso wie kristalline Trübungsmittel als Inhomogenitäten und somit Kerbstellen im Gefüge angesehen.<sup>37</sup> Allerdings setzt die Annahme solcher Fehlstellen im bruchmechanischen Sinne voraus, dass sich in der Emailleschicht auftretende Risse über die Grenzschicht hinweg in das Glas ausbreiten können. Fraktographische Aufnahmen nach Biegezugversuchen an emaillierten Scheiben haben dieses vermuten lassen. Es wurde aber bruchmechanisch ermittelt, dass die kritische Risstiefe größer als die Emailleschichtstärke sein müsste. Daraus wurde geschlussfolgert, dass eine andere Rissgeometrie vorliegen müsse.<sup>38</sup> Diese muss dann aber größere Geometriefaktoren  $Y$  ergeben, als nach gewöhnlichem Gebrauch zu erwarten wäre.

Diese Grenzflächenüberschreitung des Risses ist aber bei einem Festigkeitsunterschied zwischen Glas und Emaille unwahrscheinlich. Bei einer geringeren Emaillefestigkeit würde eine Rissausbreitung an der Grenzfläche blockiert, wenn das Glas vor allem als vorgespanntes Produkt eine größere Festigkeit aufweist. Die Emailleschicht weist dann einen Riss auf, der sich nicht weiter in das Glas ausbreiten kann. Der Ansatz, dass ein Bauteil an seiner schwächsten Stelle – in diesem Fall die Emailleschicht – versagt, ist hier nicht zutreffend. Es wird vielmehr deutlich, dass das relative Festigkeitsverhältnis zwischen der Emaille als Grundwerkstoff und dem Substrat eine eher untergeordnete Rolle

<sup>35</sup> Vergleiche Emonts 1985, Seiten 40 und 114.

<sup>36</sup> Vergleiche Röpke 1981, Seiten 80 ff.

<sup>37</sup> Vergleiche Röcker 1987, Seiten 19 ff. und 29.

<sup>38</sup> Vergleiche Krohn 2002-3, Seiten 2511 f.

spielt, da emailliertes TVG und ESG die gleiche relative Festigkeitsminderung aufweisen.

Darüber hinaus wird erwähnt, dass die Emaille der elastischere Verbundpartner, das heißt, derjenige mit dem geringeren E-Modul sei.<sup>39</sup> Dies steht im Widerspruch zu den vorgenannten Aussagen, dass ein Bruchsprung in der Emaille versagensursächlich sei. Selbst bei einem spannungsfreien Verbund wären unter einer äußeren Beanspruchung die Spannungen in der Emaille auf Grund des geringeren E-Moduls kleiner als die des Glases.

In den bisherigen Arbeiten zur Bestimmung der Festigkeit von emaillierten Gläsern wurde jeweils nur der kleine Doppelring-Biegeversuch nach DIN EN 1288-5 verwendet. Aussagefähige Werte für die Anwendung im Bauwesen werden durch diesen Versuch wegen der geringen Prüffläche von  $1,13 \text{ cm}^2$  beziehungsweise  $2,54 \text{ cm}^2$  nur bedingt erzielt. Die Flächenabhängigkeit der Festigkeit von Glas wird nicht zufriedenstellend erfasst.

Darüber hinaus wurden zum Vergleich der einzelnen Teileinflüsse auf die Festigkeit die Mittelwerte und Standardabweichungen der Messreihen gegenüber gestellt. Belastbare Ergebnisse ergeben sich dadurch nicht. Der angemessene Vergleichswert ist der 5%-Fraktil-Wert. Als Verteilungsfunktion wurde die Normalverteilung nach Gauß verwendet. Allerdings hat sich neben der logarithmischen Normalverteilung die Weibull-Verteilung als eine geeignete Verteilungsfunktion für die Festigkeit von Glas und Keramik durchgesetzt.<sup>40</sup> Deshalb besteht keine Vergleichbarkeit dieser Ergebnisse mit den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit auch wegen der Verwendung von blei- und cadmiumhaltigen Emailen.<sup>41</sup>

Weiter wurde keine Untersuchung von Eigenspannungen beziehungsweise Zwangsspannungen mit geeigneten span-

<sup>39</sup> Vergleiche Röpke 1981, Seite 76.

<sup>40</sup> Vergleiche Schmitt 1987, Seiten 116 ff., Woelk 1979, Seite 22, Siebert 2001, Seiten 25 ff., Sedlacek 1999, Seiten 27 ff. und Wörner 2001, Seite 176. Mehr dazu in Abschnitt 4.3.

<sup>41</sup> Bei Röcker 1981, Seite 20 betragen die Bleigehalte 40 – 60 %.

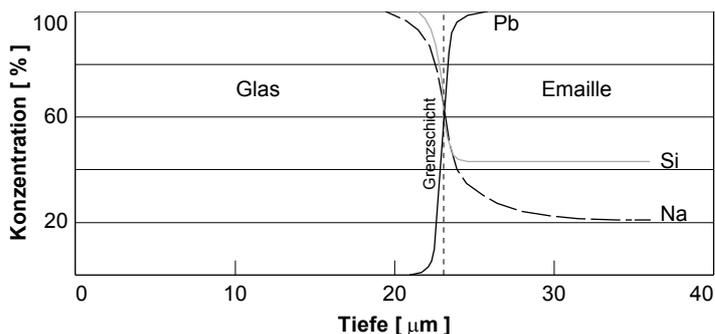
nungsoptischen Methoden vorgenommen.<sup>42</sup> Daher kann allenfalls eine Prüfbiegefestigkeit angegeben werden, ohne eine Aussagemöglichkeit, ob tatsächlich die Biegezugfestigkeit des Basisglases herabgesetzt worden ist. Dieses wird aber durch die Annahme der Festigkeitsminderung wegen der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten, der Auslaugungsprozesse und der Porosität der Emaille unterstellt.

Verfahrenstechnische Aspekte des Einbrennens und Vorspannens blieben in diesen Arbeiten unberücksichtigt. Allerdings liegt die Vermutung nahe, dass die Emaillierung auf Grund anderer optischer und thermischer Eigenschaften als das Basisglas zu einem veränderten Abkühlverhalten gegenüber unbedruckten, transparenten Gläsern führt.

### Auslaugungsprozesse

Als weitere Ursache werden Auslaugungsprozesse in der Grenzschicht des Glases zur Emaille auf Grund von Konzentrationsunterschieden verschiedener Elemente, hauptsächlich Natrium, beschrieben. Der Glasfluss oder die Emaille haben teilweise signifikant unterschiedliche chemische Zusammensetzungen als das Basisglas besessen, obwohl beide den glasigen Werkstoffen zuzuordnen sind. Der Nachweis der Diffusionsvorgänge und damit einhergehenden Auslaugung von Natrium-Ionen aus dem Glas wurde in verschiedenen Arbeiten geführt und bestätigt.<sup>43</sup>

**Bild 4** Gemessene Konzentrationsgefälle in der Grenzschicht zwischen Glas und Emaille



<sup>42</sup> Spannungsoptische Messverfahren sind in Kapitel 4.1 genauer beschrieben.

<sup>43</sup> Diese Tatsache wurde von Röpke 1981 zuerst erwähnt und ist auch von Emonts 1985 bestätigt worden.

An Hand dieser Ergebnisse und Messungen wurde vermutet, dass eine Auslaugung strukturelle Veränderungen im molekularen Gefüge bewirkt, die wahrscheinlich mit einer Veränderung von Eigenschaften wie des thermischen Ausdehnungskoeffizienten in der Grenzschicht einhergeht. Diese Änderung führt in der Folge dann zu einer Zunahme der Zwangsspannungen aus Längenkontraktionsdifferenzen.

Andere Untersuchungen ließen diesen Schluss allerdings nicht zu.<sup>44</sup> Unter bruchmechanischen Aspekten ist dieses ebenfalls nicht wahrscheinlich für die Festigkeitsminderung, da die kritische Risstiefe  $a_c$  wie beschrieben bei handelsüblichem Glas etwa  $76 \mu\text{m} - 330 \mu\text{m}$  beträgt.<sup>45</sup> Die gemessenen Grenzschichtdicken, in denen ein signifikantes Konzentrationsgefälle des Natriums verzeichnet werden kann, betragen etwa  $20 \mu\text{m} - 30 \mu\text{m}$ <sup>46</sup> und sind somit wesentlich dünner als die kritische Risstiefe. Die Grenzfläche kann daher unter bruchmechanischer Betrachtung als Defektzone ausgeschlossen werden. Somit ist die Festigkeitsminderung zumindest nicht allein durch diesen Effekt begründet.

Andere, fortführende Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Auslaugung vielmehr eine Oberflächenvergütung bei unbedruckten Gläsern erzeugt.<sup>47</sup> Bei bedruckten Gläsern kommt dieser günstige Effekt allerdings nicht zum Tragen.

Weiterhin wird eine gegenseitige Ionenwanderung von Natrium aus dem Glas in die Emaille und von Blei aus der Emaille in das Glas beschrieben.<sup>48</sup> Ein solcher Diffusionsprozess würde eher zu einer weiteren Veredelung der Glasoberfläche führen, da ein Austausch von Ionen mit geringem Durchmesser durch solche mit einem größeren Durchmesser einer chemischen Vorspannung mit sehr hohen Oberflächendruckspannungen entspricht.

<sup>44</sup> Vergleiche Röcker 1987, Seite 157. Die Ergebnisse von Röpke können durch Röcker nicht bestätigt werden.

<sup>45</sup> Vergleiche Sedlacek 1999, Seite 41, Wörner 2001, Seite 65 und Seite 11 dieser Arbeit.

<sup>46</sup> Vergleiche Röpke 1981, Seiten 64 ff. und Emonts 1985, Seiten 126 ff.

<sup>47</sup> Vergleiche Röpke 1981, Seiten 69 ff. Dieser Sachverhalt wurde nur empirisch und qualitativ erfasst.

<sup>48</sup> Vergleiche Röpke 1981, Seiten 60 ff. Bei den heutigen bleifreien Emailen trifft dieses nicht mehr zu.

Bei heutigen Emailen entfällt diese Erklärung wegen der Schwermetallfreiheit. Der Glasfluss und das Glas besitzen die gleichen Bestandteile, wenn auch vielleicht in etwas anderen Konzentrationen. Auslaugungsprozesse, wie sie in der Literatur beschrieben sind, sollten somit nicht mehr stattfinden und entfallen somit als Erklärungsversuch. Ebenso ist eine Wanderung der Pigmente unwahrscheinlich. Entsprechende Konzentrationsgefälle wurden auch nicht aufgezeichnet. Darüber hinaus liegen die Metallpigmente in größerer Körnung als der Glasfluss vor und schmelzen während des Einbrands nicht auf. Somit erscheint der physikalische Vorgang der Diffusion für solche Partikel als unmöglich.

### Veränderung in den thermischen Verhältnissen

Die vierte mögliche Ursache beschreibt geänderte thermische Verhältnisse während des Einbrennens auf Grund der Bedruckung.<sup>49</sup> Die Festigkeit thermisch vorgespannter Gläser setzt sich aus den Anteilen der Grundfestigkeit des Basisglases – meist Floatglas – und der Vorspannung als in die Oberflächen eingeprägte Druckspannung zusammen.

In allen vorliegenden Arbeiten wurde eine solche Unterscheidung der jeweiligen Festigkeitsanteile nicht vorgenommen. Somit ist es nicht ersichtlich, ob strukturelle Ursachen mit dem Betrag  $\sigma_{SD}$  oder eine um den Betrag  $\sigma_{TV}$  verminderte Vorspannung vorliegen. Dass strukturelle Schädigungen nicht die alleinige Ursache der Festigkeitsminderung sein können, kann mit einer kurzen Berechnung gezeigt werden. Gleichung 4 stellt das Verhältnis der Festigkeiten von bedruckten zu unbedruckten Gläsern dar. Dabei ist die Festigkeit der vorgespannten Gläser in die Einzelanteile Biegezugfestigkeit Basisglas und Vorspannung aufgespalten (hier für ESG, vergleiche auch Abschnitt 1.1.2).

#### Gleichung 4

$$v = \frac{f_{k,ESG,em}}{f_{k,ESG}} = \frac{\sigma_{bB,em} + \sigma_V}{\sigma_{bB} + \sigma_V}$$

$\sigma_{bB}$  Biegezugfestigkeit unbedrucktes Floatglas [ N/mm<sup>2</sup> ]

$\sigma_{bB,em}$  Biegezugfestigkeit bedrucktes Glas [ N/mm<sup>2</sup> ]

<sup>49</sup> Vergleiche Petzold 1990, Seite 48. In Woelk 1979, Seite 21 wird eine gleiche Vermutung geäußert.

$\sigma_V$  Druckvorspannung in den Oberflächen [ N/mm<sup>2</sup> ]

Eine Umformung und Zusammenfassung ergibt

$$\sigma_{bB,em} = v \cdot (\sigma_{bB} + \sigma_V) - \sigma_V = f_{k,em} - \sigma_V$$

$f_{k,em}$  charakt. Festigkeit bedrucktes Glas [ N/mm<sup>2</sup> ]

**Gleichung 5**

Eine Auswertung für die verschiedenen vorgespannten Gläser basierend auf genormten Festigkeitswerten ergibt unter Berücksichtigung einer charakteristischen Festigkeit des unbedruckten Basisglases<sup>50</sup> von 45 N/mm<sup>2</sup> folgendes:

Glas [ / ]	Norm [ / ]	$f_{k,em}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_V$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{bB,em}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]
ESG	DIN EN 12150-1	75	120 – 45 = 75	0,00
TVG	DIN EN 1863-1	45	70 – 45 = 25	20,00

**Tafel 4** Festigkeiten des Basisglases bei alleiniger struktureller Schädigung als Ursache der Festigkeitsminderung

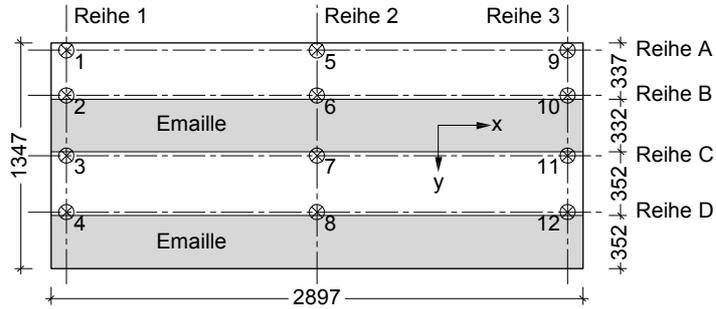
Besonders beim ESG ist erkennbar, dass basierend auf den genormten Werten strukturelle Schädigungen durch Auslaugungen, Porosität oder anderen Mechanismen nicht die alleinige Ursache darstellen können. Veränderungen in der Vorspannung besitzen einen offensichtlich nicht unerheblichen Teileinfluss auf den gesamten Themenkomplex. Allerdings stellen diese Veränderungen ebenfalls nicht die alleinige Ursache dar, da ansonsten im Fall des TVG die komplette Vorspannung aufgebraucht sein müsste, um die entsprechende charakteristische Festigkeit zu erhalten.

Eine gutachterliche Stellungnahme über mögliche Eigenspannungen aus dem kontrollierten Abkühlungsprozess nach dem thermischen Biegen von teilemaillierten Scheiben lieferte weitere Hinweise auf mögliche Ursachen der Festigkeitsminderung.<sup>51</sup> In dieser Stellungnahme wurde die Messung der Eigenspannungsverläufe nach der Streulichtmethode mit dem Messgerät SCALP 04 vorgenommen.

<sup>50</sup> Nach DIN EN 572-1 für Floatglas als Basisglas.

<sup>51</sup> Vergleiche Weller 2010-2. Durch den Heißbiegeprozess mit einer Aufheizung oberhalb  $T_g$  relaxieren die eingepprägten Spannungen. Die Aufgabe bestand in der Ermittlung möglicher Eigenspannungen durch die Abkühlung bei natürlicher Konvektion. Die Auswertung der Spannungsmessung folgt dem im Kapitel 4.1.4 beschriebenen Schema, allerdings mit einem Polynom 5. Ordnung ( $n = 5$ ) und nur  $\delta(0) = 0$  wegen der alleinigen Einstrahlung von einer Seite.

**Bild 5** Spannungsmessungen an teilweise bedruckten, heißgebogenen Scheiben



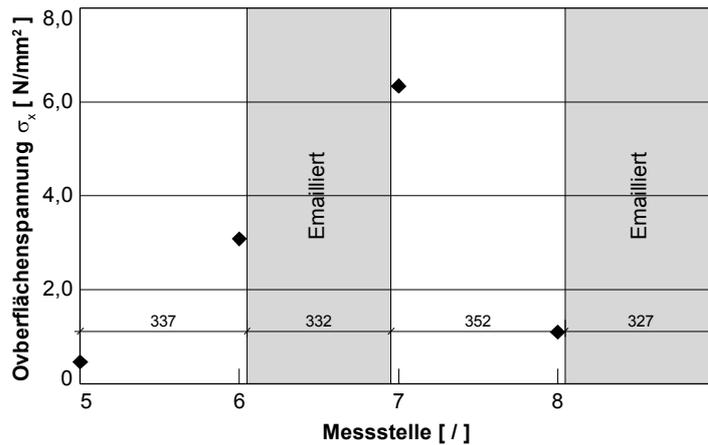
Dort ergab sich im Rahmen der stichprobenartigen Untersuchung der Restspannungen, dass die Zugspannungen im Glas zur Emaillierung hin zugenommen haben. In der Auswertung ist allerdings zu beachten, dass das Messgerät unterhalb von 20 N/mm<sup>2</sup> eine Genauigkeit von ± 2,0 N/mm<sup>2</sup> aufweist. Darüber hinaus waren die Messbedingungen hinsichtlich der erforderlichen Verdunkelung nicht optimal. Es ergeben sich daher teilweise keine physikalisch interpretierbaren Spannungsverläufe. Deswegen sind alle Ergebnisse nur qualitativ zu verstehen.

**Tafel 5** Ergebnisse der Spannungsmessungen

Die Spannungen sind Mittelwerte über maximal sieben Prüfkörper.

Stelle [ / ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\sigma_x$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	1,4	4,2	5,0	0,9	0,5	3,1	6,3	1,1	3,3	2,1	5,8	2,7
$\sigma_y$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	0,9	-4,9	-5,4	-4,3	-2,3	-0,5	-3,1	-4,4	-2,6	-4,0	-5,4	-4,5

**Bild 6** Ergebnisse der Spannungsmessungen als Mittelwerte entlang Reihe 2 für  $\sigma_x$



Es liegt der Verdacht nahe, dass Zwangsspannungen resultierend aus Temperaturdifferenzen innerhalb der Glasfläche

für die Festigkeitsminderung ursächlich sind. Diese können mit einer weiteren Berechnung nachgewiesen werden. Für flächige Bauteile mit Temperaturdifferenzen innerhalb ihrer Fläche kann die Spannung wie folgt bestimmt werden.<sup>52</sup>

$$\sigma_x = \alpha_T \cdot E \cdot \Delta T.$$

Gleichung 6

Unter Zugrundelegung der maximalen Spannungsdifferenz an Stelle 11 ergibt sich eine Temperaturdifferenz von<sup>53</sup>

$$\Delta T = \frac{\Delta \sigma_x}{\alpha_T \cdot E} = \frac{5,8 + 5,4}{9,0 \cdot 10^{-6} \cdot 70000} = 17,8 \text{ K.}$$

Einer transparenten, vorgespannten Scheibe wird eine homogene, mit in beiden Hauptspannungsrichtungen gleicher Vorspannung unterstellt. Daher können die Spannungen  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  im Rahmen dieser Betrachtung aufsummiert werden.

Diese Temperaturdifferenz annähernd zwischen einem opaken Streifen und umgebenden transparenten Material deckt sich unter Beachtung aller Messgenauigkeiten gut mit Angaben aus der Literatur.<sup>54</sup> Allerdings ist ein quantitativer Vergleich ungeeignet, da einerseits in der Literatur von einem vollständig opaken Material ausgegangen wird, wogegen Informationen über die Opazität der geprüften Scheiben nicht vorlagen. Andererseits sind die Begrenzungen durch das Messgerät SCALP bei geringen Spannungen zu beachten. Es ergibt sich dennoch daraus, dass durch eine teilweise aufgebrauchte Bedruckung kein homogenes Temperaturfeld über die Bauteilfläche mehr vorhanden ist. Darauf aufbauend kann angenommen werden, dass sich ebenfalls kein symmetrisches Temperaturprofil über die Glasdicke ergibt, sondern an der emaillierten Oberfläche eine höhere Temperatur als an der unbedruckten Seite vorliegt.

<sup>52</sup> Vergleiche Timoshenko 1970, Seiten 439 ff.

<sup>53</sup> Da Glas auch bei natürlicher Konvektion immer unter einer leichten Druckspannung ( $\sim 6,0 \text{ N/mm}^2$ ) steht, muss die Summe beider Anteile gebildet werden (vergleiche auch Fußnote 11). Dabei wird vorausgesetzt, dass ohne Bedruckung die Hauptspannungen  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  aus der Vorspannung den gleichen Betrag aufweisen.

<sup>54</sup> Vergleiche Gardon 1958, Seite 207, Abbildungen 7 und 8. Unabhängig von einer erzwungenen oder langsamen Kühlung ergibt sich aus der Simulationen eine Temperaturdifferenz von etwa 22 K.

Ebenso basiert die Berechnung einschränkend nur auf einer teilweise bedruckten Scheibe. Die Verhältnisse des Spannungsaufbaus sind daher nicht auf vollflächig emaillierte Proben zu übertragen. Dennoch zeigt dieses Beispiel, dass eine Bedruckung die Temperaturverhältnisse während des Herstellprozesses maßgeblich beeinflussen kann. Unterstellt man, dass durch die Bedruckung ein Wärmetransport durch Strahlung in der Emaille unterbunden wird, so dient Bild 55 auf Seite 139 ebenfalls zur Unterstützung dieser Annahme.

Als wesentliches Merkmal zur Beschreibung dieses Effektes kann die Opazität oder Transluzenz der Bedruckung angenommen werden. Man kann daher vermuten, dass, je opaker die Bedruckung auf Grund des Zusammenwirkens von Schichtstärke und Pigmentierung ist, die Festigkeit im entsprechenden Maße abnimmt.

Diese These kann durch Auswertungen der Biegezugfestigkeit von emaillierten Gläsern im Rahmen von werkseigenen Kontrollen zur Qualitätssicherung bei Glasveredlern untermauert werden. Bei einfachen Schichtstärken im Siebdruck (Stärke etwa 25  $\mu\text{m}$ ) ist keine Festigkeitsminderung erkennbar. Bei doppelter Schichtstärke wurde die charakteristische Biegezugfestigkeit von unbedrucktem ESG nur noch schwer erreicht.<sup>55</sup> Dieser Sachverhalt wurde auch anderweitig erkannt, aber nicht weiter vertieft untersucht.<sup>56</sup>

### 1.3 Abgeleitete Fragestellungen

Für emaillierte Gläser und ihre Festigkeit ergeben sich unter Berücksichtigung der oben genannten Zusammenhänge folgende wesentliche Fragestellungen, denen im Rahmen dieser Arbeit nachgegangen wird:

- 1 Wie wirken sich unterschiedliche mechanische und thermische Eigenschaften der Verbundpartner auf das mechanische Gesamtverhalten aus?

<sup>55</sup> Angaben beruhen auf privater Korrespondenz mit verschiedenen Glasveredlern. Die entsprechenden Daten unterliegen der Geheimhaltung.

<sup>56</sup> Vergleiche Emonts 1985, Seite 27.

- 2 Welcher Spannungsverlauf stellt sich beim vorgespannten emaillierten Glas unter Beachtung der Antwort zu Frage 1 ein?
- 3 Wie überlagern sich mögliche Zwangs- und Eigenspannungen basierend auf dem Spannungsverlauf nach Frage 2?
- 4 Welchen Einfluss hat der opake Überzug auf das gesamte thermische Verhalten?

Die Beantwortung der Fragen erfolgt unter besonderer Beachtung der Möglichkeit der veränderten thermischen Verhältnisse während des Vorspannens. Diese Annahme stellt die Hauptthese dieser Arbeit dar.

Spannungsoptische Untersuchungen an emaillierten Flachgläsern mit der Streulichtmethode sind offensichtlich noch nicht vollumfänglich vorgenommen worden, da in der Literatur solche Messungen nicht beschrieben sind. Daher kann eine generelle Anwendung dieser Methode nicht zwangsläufig als geeignet angesehen werden. Vielmehr muss die Anwendungsfähigkeit dieser Messmethode ebenfalls hinsichtlich ihrer Eignung bewertet werden. Ebenso stellt die Verwendung eines modifizierten Doppelring-Biegeversuchs keine Normanwendung dar und muss ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit bezüglich seiner Eignung bewertet werden. Beides sind erforderliche Nebenziele zur Untersuchung der Hauptthese.

#### **1.4 Lösungsansätze**

Die gewählten Lösungsansätze berücksichtigen die Veränderung der thermischen Verhältnisse während des Vorspannens als mögliche Ursache. Dieser Annahme wird besonders nachgegangen, auch wenn die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen eine teilweise Bewertung der anderen genannten Ursachen ermöglicht.

Zur Beantwortung der aufgeführten Fragen unter besonderer Beachtung der getroffenen Annahme der Ursache zur Festigkeitsminderung werden folgende Versuche, Untersuchungen und Simulationen vorgenommen:

- Spannungsoptische Messungen zur Ermittlung von Spannungsverläufen über die Scheibendicke,
- Festigkeitsmessungen mit einem modifizierten Doppelring-Biegeversuch,
- numerische Simulation zum Vorspannprozess mit Parametervariationen.

Spannungsoptische Messungen des Spannungszustands vor dem Bruchversuch ermöglichen die Bestimmung des tatsächlichen Spannungsverlaufs in den emaillierten Scheiben. Mögliche Abweichungen auf Grund von Zwängungen können identifiziert und quantifiziert werden. Weiterhin erlauben die spannungsoptischen Messungen auf Grund der Kenntnis der Eigenspannungen eine Bestimmung der Biegezugfestigkeit des Glases. Darüber hinaus erfolgt eine gesonderte Betrachtung hinsichtlich der Durchführung und Auswertung der Messungen zur Erzielung im Rahmen der technischen Möglichkeiten möglichst optimaler Ergebnisse einschließlich einer Bewertung der Übertrag- und Anwendbarkeit der Messmethodik für emaillierte Gläser.

Die Prüfbiegefestigkeit emaillierter Gläser kann direkt aus dem Doppelring-Biegeversuch ermittelt werden. Allerdings erlaubt dieses keine direkten Rückschlüsse auf die Biegezugfestigkeit des Grundmaterials im Falle von vorgespannten Glasprodukten.<sup>57</sup> Aus dem Bruchversuch ergibt sich immer die Festigkeit als Summe aus der Biegezugfestigkeit des Basisglases und der Vorspannung. Direkte Ergebnisse zur Bewertung des Sachverhalts der Festigkeitsminderung ergeben sich im Vergleich der Bruchspannungen der verschiedenen bedruckten Proben untereinander und zum unbedruckten ESG als Referenzprobe. Die Bruchversuche stellen aber immer nur ein indirektes Indiz für die eine oder andere Ursache dar und sind daher generell im Kontext der spannungsoptischen Messungen zu beurteilen.

Allerdings ist anzunehmen, dass Eigenspannungen aus dem planmäßigen Vorspannungsprozess mit Zwangspannungen auf Grund der Abkühlung zweier Materialien mit unterschiedlichen Temperaturendeckungskoeffizienten oder anderer

<sup>57</sup> Vergleiche Exner 1986, Seite 266.

mechanischer oder optischer Ursachen überlagert werden. Daher müssten solche Untersuchungen auch an emaillierten, normalgekühlten Gläsern durchgeführt werden. Dann lassen sich die Einzelteile aus Vorspannung und Zwangsspannung entsprechend isolieren. Aus solchen getrennten Betrachtungen lassen sich auch Rückschlüsse über eine mögliche thermische Blockerfunktion der Emailleschicht während des Vorspannprozesses ziehen. Eine solche Untersuchung gestaltet sich aber schwierig, da bedruckte Gläser meist in industriellen Serienverfahren mit einer planmäßigen Vorspannung produziert werden. Eine technische Kühlung mit einer Entspannung der Gläser ist in solchen Betrieben in der Regel nicht durchführbar beziehungsweise ergibt nicht die gewünschten Resultate.<sup>58</sup> Ein möglicher Weg besteht in der Entspannung in Ofen zum Heißbiegen von Floatglas. Allerdings wird Heißbiegen und Emaillieren selten an einem Standort und vor allem nicht im gleichen Ofen vorgenommen. Da in dieser Arbeit der Herstellereinfluss ausgeschlossen werden soll, werden alle Proben von einem Hersteller aus dem gleichen Vorspannofen bezogen. Somit sind die technischen Parameter zur Herstellung bekannt und konstant. Mit einer erneuten Aufheizung und normalen Kühlung in Heißbiegeöfen sind neben einer Entspannung der Proben weitere Beeinflussungen struktureller oder thermischer Art nicht vollständig auszuschließen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit auf diese Möglichkeit verzichtet. Stattdessen sind solche Untersuchungen an entspannten Gläsern als Ausblick für zukünftige Forschung zu verstehen.

Mit an Hand der durchgeführten Versuche validierten numerischen Modellen werden Parameteruntersuchungen vorgenommen. Dabei erfolgt im Wesentlichen eine Variation der Emailleschichtstärke unter besonderer Beachtung der Hauptthese der Arbeit. Allerdings kann auf Grund einer fehlenden, entsprechenden Datenbasis nur mit einer konstanten optischen Dichte unabhängig von der Schichtstärke selbst beziehungsweise Opazität gerechnet werden. Der Einfluss einer optisch dichten Schicht mit teils zum Basisglas abweichenden mechanischen Materialeigenschaften kann dennoch zur Klärung diverser Sachverhalte herangezogen werden. Insbesondere die Frage der Auswirkung unter-

<sup>58</sup> Vergleiche Weller 2012, Seite 13.

schiedlicher Ausdehnungskoeffizienten kann somit als Nebenziel hinsichtlich seiner Relevanz gesondert bewertet werden.

Sofern der Erklärungsansatz der veränderten thermischen Verhältnisse zutreffend sein sollte, wird basierend auf diesen Erkenntnissen die Angabe geeigneter mechanisch-mathematischer Formulierungen dieses Mechanismus angestrebt. Dadurch erscheint es möglich, dass in einer weiteren Entwicklung mittels abgestimmter Abkühlprozesse – sofern die Annahme thermischer Ursachen sich als korrekt erweist – eine Optimierung emaillierter Gläser hinsichtlich ihrer Festigkeit erzielt werden kann.

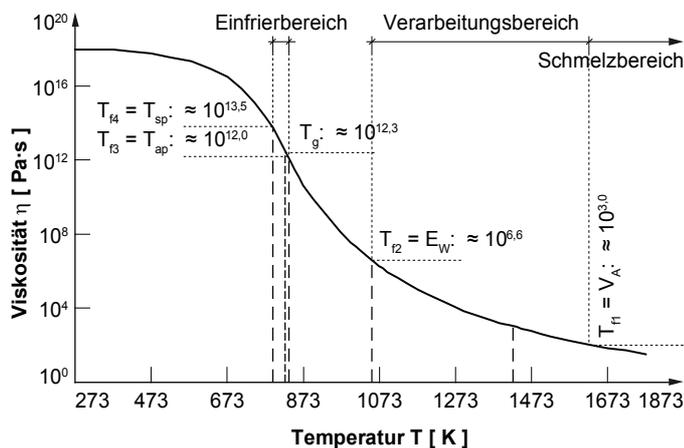
## 2 Grundlagen der Werkstoffe

Um die wesentlichen Vorgänge bei der thermischen Vorspannung mit und ohne einer Bedruckung erläutern zu können, müssen einige grundsätzliche Prinzipien vorangestellt werden. Die Viskosität ist die bestimmende Größe zur Beschreibung der Vorspannmechanismen, weil von ihr die Relaxationsvorgänge maßgeblich gesteuert werden.

### 2.1 Viskosität

Eine wesentliche Eigenschaft zur Beschreibung des Glasverhaltens bei höheren Temperaturen ist die Viskosität. Bei Zimmertemperatur beträgt die Viskosität des Glases etwa  $\eta = 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  und entspricht einem spröden Körper.<sup>59</sup> Die Viskosität ist bei den meisten Stoffen temperaturabhängig.

Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität folgt keinem linearen Verlauf, sondern nimmt mit steigender Temperatur erst langsam ab, um dann im Transformationsbereich<sup>60</sup> stark abzufallen und mit weiterer Temperaturzunahme wieder flacher auszulaufen. Je nach Spannweite der Temperaturen des Transformationsbereichs spricht man von kurzen oder langen Gläsern. Bei einem kurzen Intervall liegt ein kurzes Glas vor, bei einem Weiten ein Langes.<sup>61</sup> Diese Unterscheidung hat praktische Bedeutung für den Vorspannprozess.



**Bild 7** Temperatur-Viskositätsverlauf nach DIN ISO 7884-1

<sup>59</sup> Vergleiche Scholze 1988, Seite 41.

<sup>60</sup> Bei Blank 1979-1, Seite 7 entspricht dieser etwa dem Einfrierbereich.

<sup>61</sup> Das Temperaturintervall wird zwischen den Viskositäten  $\eta = 10^6$  und  $\eta = 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  bestimmt. Vergleiche Kiefer 1984, Seite 225 und Scholze 1988, Seite 41.

Die T- $\eta$ -Kurven unterscheiden sich je nach Zusammensetzung der Schmelze. Eine einheitliche, physikalisch hergeleitete Formel zur Beschreibung der Viskosität über den gesamten Temperaturbereich liegt für Glas nicht vor. Analytische Ansätze gelten nur für Bereiche sehr hoher und sehr geringer Viskosität. Ein Ansatz zur Berechnung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität wurde mit der Arrhenius-Gleichung vorgenommen.<sup>62</sup>

**Gleichung 7**

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\frac{\Delta H}{R \cdot T}}$$

$\eta$  Viskosität [ Pa·s ]  
 $\Delta H$  Aktivierungsenergie [ mol/J ]  
 $R$  Ideale Gaskonstante [ J/(mol·K) ]  
 $T$  Temperatur [ K ]

Diese Gleichung setzt allerdings eine konstante Aktivierungsenergie über den gesamten Temperaturbereich voraus, was bei Gläsern auf Grund der strukturellen Änderungen im viskoelastischen Übergangsbereich nicht der Fall ist. Die Arrhenius-Gleichung kann daher nur die Bereiche außerhalb des Transformationsbereichs für nicht zu große Temperaturintervalle hinreichend genau beschreiben.<sup>63</sup>

Dennoch wird die Arrhenius-Gleichung in manchen technischen Anwendungen bei Gläsern weiterhin, wenn auch in modifizierter Form, verwendet. Zur mathematischen Beschreibung der Vorgänge der Strukturrelaxation im viskoelastischen Übergangsbereich basiert der derzeit anerkannte Ansatz auf einer modifizierten Arrhenius-Gleichung.<sup>64</sup>

**Gleichung 8**

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\frac{x \cdot \Delta H}{R \cdot T} + \frac{(1-x) \cdot \Delta H}{R \cdot T_f}}$$

<sup>62</sup> Vergleiche Schneider 2001, Seite 20 oder Loch 1994, Seite 2. Bei Scholze 1988, Seiten 43 ff. wird die Gleichung aber als Boltzmann-Ansatz bezeichnet.

<sup>63</sup> Vergleiche Scholze 1988, Seite 44, und Schneider 2001, Seite 21.

<sup>64</sup> Vergleiche unter anderem Narayanaswamy 1978, Seiten 147 ff. und Loch 1994, Seite 20.

In diese Gleichung wurde die fiktive Temperatur zur Beschreibung der Strukturrelaxation und die Konstante  $x$  zur Berücksichtigung des Stabilisierungsgrades eingeführt.<sup>65</sup>

Die Arrhenius-Gleichung reicht zur vollständigen Beschreibung des Temperatur-Viskosität-Verlaufs nicht aus. Daher wird dieser meist mit empirisch ermittelten Funktionen dargestellt. Oberhalb der Transformationstemperatur  $T_g$  kann das Verhalten mit der Vogel-Fulcher-Tammann-Gleichung (VFT-Gleichung) sehr gut abgebildet werden.<sup>66</sup> Im Prinzip entspricht dieser Ansatz der Arrhenius-Gleichung mit Hinzunahme einer weiteren Konstanten und der anschließenden Darstellung im dekadischen Logarithmus.

$$\log \eta = A + \frac{B}{T - C}$$

**Gleichung 9**

- A Konstante in Art einer Viskosität [ dPa·s ]  
 B Konstante in Art einer Temperatur [ °C ]  
 C Konstante in Art einer Temperatur [ °C ]

Die Ermittlung der Konstanten erfolgt durch Versuche an bestimmten Viskositätsfixpunkten nach DIN ISO 7884.

Bezeichnung Temperatur	Temperatur [ K ]	bei Viskosität $\eta$ [ Pa·s ]
Verarbeitungstemperatur $T_{f1}$	873 – 1873	$\approx 10^{3,61}$
Verarbeitungstemperatur $T_{f1}$	1073 – 1473	$\approx 10^{3,61}$
Erweichungstemperatur $T_{f2}$	643 – 1273	$\approx 10^{6,61}$
Obere Kühltemperatur $T_{f3}$ Untere Kühltemperatur $T_{f4}$	573 – 2073	$\approx 10^{12,2}$ $\approx 10^{13,7}$
Transformationstemperatur $T_g$	623 – 2073	$\approx 10^{12,3}$

**Tafel 6** Bestimmung der  $T$ - $\eta$ -Kurve nach DIN ISO 7884

Für Kalk-Natronsilikatglas existieren Literaturangaben mit konkreten Werten für die verschiedenen Fixpunkte.<sup>67</sup> Im Rahmen dieser Arbeit wird auf diese zurückgegriffen.

<sup>65</sup> Eine detaillierte Beschreibung der Vorgänge erfolgt in Abschnitt 3.3.3.

<sup>66</sup> Vergleiche Scholze 1988, Seite 44.

<sup>67</sup> Vergleiche Pfaender 1997, Seite 27 in Verbindung mit Öksoy 1994, Seite 192, Glas Nr. 2 für die Zahlenwerte der Temperatur. In Schneider 2001, Seite 59 erfolgte die Spannungsberechnung u. a. mit diesem Glas.

**Tafel 7** Fixpunkttemperaturen mit Viskositäten und Temperaturen für weitere Zwecke im Rahmen der Arbeit

Bezeichnung Temperatur	Temperatur [ K ]	bei Viskosität $\eta$ [ Pa·s ]
Verarbeitungstemperatur $V_A$ (working point)	1300	$10^3$
Erweichungstemperatur $E_W$ (softening point)	1000	$10^{6,6}$
Obere Kühltemperatur $T_{ap}$ (annealing point)	825	$10^{12}$
Transformationstemperatur $T_g$	800	$10^{12,3}$
Untere Kühltemperatur $T_{sp}$ (strain point)	780	$10^{13,5}$

Die Betrachtung der Viskosität ist nicht nur für die Formgebung von hoher Bedeutung, sondern auch zur Beschreibung der Relaxationsvorgänge während der thermischen Vorspannung. Bei diesen ist die Dauer der Einstellung eines neuen Spannungs- oder Strukturgleichgewichts, die Relaxationszeit, von der Viskosität abhängig.

**Gleichung 10**

$$\tau(T) = \frac{\eta(T)}{G}$$

$\tau$  Relaxationszeit [ s ]

$G$  Schubmodul [ N/mm<sup>2</sup> ]<sup>68</sup>

Bei niedriger Viskosität stellt sich nahezu sofort bei äußerer Einwirkung ein neues Spannungs- und Strukturgleichgewicht ein. Mit zunehmender Viskosität benötigt die Struktur auf Grund der eingeschränkten Beweglichkeit einen längeren Zeitraum zur Ausbildung des neuen Gleichgewichts.

## 2.2 Spektrale Eigenschaften und Farbgebung

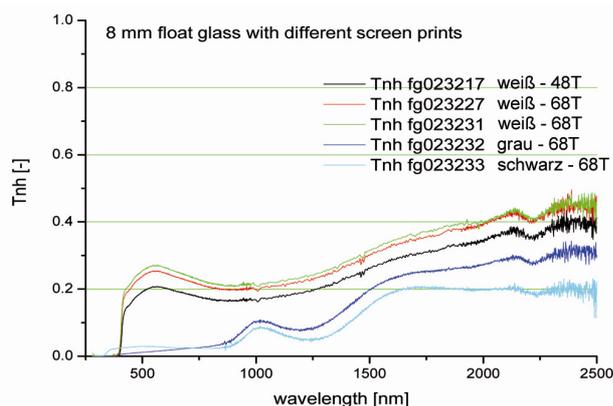
Transmission tritt sowohl in transparenten wie transluzenten flachen Körpern und Medien auf. Die Unterscheidung besteht in der Streuung des Lichts in diesen Materialien.<sup>69</sup> Transparente Körper streuen das Licht nur sehr gering, wo-

<sup>68</sup> Streng genommen ist auch der Schubmodul temperaturabhängig. Die Änderung liegt im betrachteten Temperaturintervall aber bei etwa 10 %. Da sich die Viskosität mit mehreren Zehnerpotenzen ändert, ist diese Vernachlässigung unerheblich. Vergleiche Schneider 2001, Seite 31.

<sup>69</sup> Nach Definition der DIN 1349-2 tritt im trüben Medium neben der Absorption auch Volumenstreuung auf. Körper mit einer gegenüber der Absorption vernachlässigbaren Streuung sind optisch klare Medien.

raus sich ein nahezu ungestörtes und nicht durch Streuung abgeschwächtes Bild ergibt. Transmissionsverluste entlang des Weges ergeben sich nur durch Absorption. Vor dem Eintreten des Lichts in das Medium wird zusätzlich ein Anteil an den Grenzschichten reflektiert. In optisch trüben Medien tritt neben der Absorption noch diffuse Volumenstreuung auf. Die Schwächung des Lichtstrahls setzt sich dann aus den Anteilen der Absorption und Streuung zusammen.

Die Stärke des durchlaufenden Lichtstrahls wird mit der Transmission angegeben. Bei transluzenten Stoffen ist in der Regel die Opazität als Kehrwert der Transmission die maßgebende Eigenschaft. Je nach mathematischer Darstellung oder physikalischer Angabe der Werte findet auch der Begriff der optischen Dichte oder der Extinktion Verwendung. Die Extinktion ist dabei der dekadische Logarithmus der Opazität. Der spektrale Absorptions- und der spektrale Streukoeffizient sind dabei wellenlängen- und temperaturabhängig.<sup>70</sup> Transparentes Flachglas weist üblicherweise eine Transmission im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 2800 nm von 90 % auf. In transparentem Glas ist bei Raumtemperatur und im Spektrum des sichtbaren Lichts die Extinktion vernachlässigbar. Zwischen Wellenlängen von 2800 nm und 4500 nm ist die Transmission stark reduziert, und bei Wellenlängen größer als 4500 nm ist Glas vollständig opak. Bild 8 zeigt exemplarisch die wellenlängenabhängige Transmission von bedruckten Proben bei Raumtemperatur.<sup>71</sup>



**Bild 8** Transmission von Gläsern verschiedener Farbgebung aber gleicher Schichtdicken

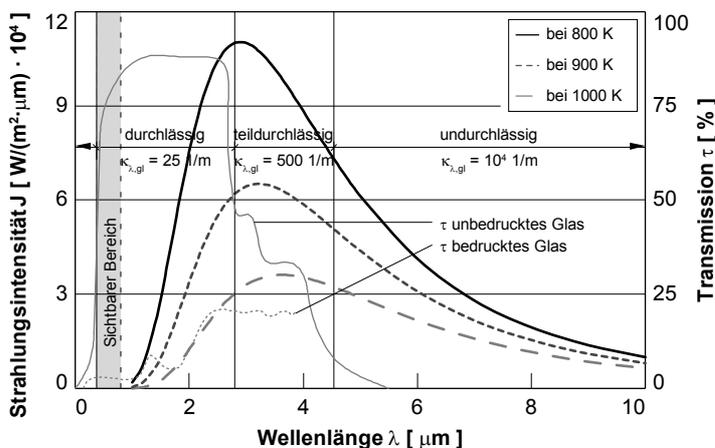
<sup>70</sup> Vergleiche Bild 12, Seite 35 und Nölle 1997, Seite 36.

<sup>71</sup> Die vermessenen Proben stammen zwar vom gleichen Hersteller, aber aus verschiedenen Werken mit unterschiedlichen Öfen. Dennoch wird von einer Übertragbarkeit der Ergebnisse ausgegangen.

Aus den Messkurven ist zum einen der Einfluss der Farbgebung erkennbar und zum anderen, dass die Transmission im sonst für Glas fast vollkommen durchlässigen Bereich sehr stark reduziert ist.<sup>72</sup> Die Farbgebung besitzt insofern einen Einfluss, dass die Metalle als Farbpigmente unterschiedliche optische Eigenschaften speziell der Extinktion aufweisen. Je nach Schichtdicke und Farbgebung ergeben sich andere Werte für die Transmission beziehungsweise Opazität. Daher scheinen bedruckte Scheiben mehr oder weniger stark durch.<sup>73</sup> Eine helle Farbgebung bewirkt ein stärkeres Durchscheinen von hinter der Verglasung angeordneten Bauteilen oder Gegenständen als dunkle Bedruckungen.<sup>74</sup> Es kann angenommen werden, dass dunkle Proben schneller aufheizen als helle oder unbedruckte. Bild 9 stellt die wellenlängen- und temperaturabhängige Strahlungsintensität eines idealen schwarzen Strahlers sowie die Transmissionskurven von unbedrucktem Glas (Wellenlänge von 0,28 bis 5,5  $\mu\text{m}$ ) und schwarz siebbedrucktem Glas (Wellenlänge von 0,28 bis 2,5  $\mu\text{m}$ ) dar.

**Bild 9** Strahlungsintensität eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit der Temperatur und Wellenlänge

Die rechte Ordinate zeigt die Transmission von Glas beziehungsweise einer schwarz bedruckten Scheibe (Messwerte allerdings nur bis 2,50  $\mu\text{m}$ ).



Gemäß des Planckschen Strahlungsgesetzes besitzt die Strahlungsintensität ein ausgeprägtes temperatur- und well-

<sup>72</sup> Eine detailliertere Auswertung und Diskussion erfolgt in Abschnitt 5.3.4. Das Diagramm entstammt Fraunhofer 2010, Seite 18.

<sup>73</sup> Opazität oder Extinktion ist nicht mit der Deckkraft beziehungsweise dem Deckvermögen gleichzusetzen. Das Deckvermögen beschreibt die Überdeckung eines Farbstoffs mit einem anderen. Bei emaillierten Gläsern ist dieses bei der Überdeckung der Glaseigenfarbe oder der Farbe von Beschichtungen von Bedeutung. Vergleiche BF 2002.

<sup>74</sup> Vergleiche BF 2002, Seite 1.

lenlängenabhängiges Verhalten. Mit zunehmender Temperatur verschiebt sich das Intensitätsmaximum zu kürzeren Wellenlängen. Für Glas gilt näherungsweise das gleiche Verhalten, da dieses als grauer Strahler, das heißt, die Kurve ist mit dem Emissionsgrad skaliert, angenommen wird. Es ist ersichtlich, dass bei unbedrucktem Glas auch bei Vorspanntemperatur die Transmission sehr hoch ist, so dass ein Großteil der Wärmestrahlung ungehindert oder nur schwach absorbiert durch das Glas hindurchdringt. Bei den bedruckten Proben liegt im Bereich der Intensitätsmaxima eine wesentlich geringere Transmission vor<sup>75</sup>, so dass die Wärmestrahlung in der Emailleschicht stärker geschwächt wird und so zur Aufheizung der Scheibe wesentlich beiträgt.

Versuche an schwarz und weiß bedruckten und transparenten Scheiben haben dieses Verhalten bestätigt.<sup>76</sup> Solch ein Verhalten sollte sich dann auch in thermographischen Aufnahmen zeigen. Im Produktionsprozess ist zwischen Ofen und Abkühlleinheit ein Thermo-Linienscanner angeordnet. Diese Vorrichtung dient in erster Linie der Qualitätssicherung und -kontrolle. Da die Scheiben im Vorspannofen nie vollständig auf eine Ofentemperatur von etwa 973 K (700 °C) erhitzt, sondern bei einer Glastemperatur von etwa 900 K (630 °C) bezogen auf transparente Scheiben abgekühlt werden<sup>77</sup>, sollten sich größere Ausheiztemperaturen  $T_0$  mit Auswirkungen auf die Vorspannung im Endprodukt in den bedruckten Proben ergeben. Die Temperaturdifferenzen zwischen bedruckten und unbedruckten Bereichen in einer Verglasung wie in Abschnitt 1.2.2 erläutert können ebenfalls von einer stärkeren Aufheizung in den bedruckten Bereichen bei gleichem Abkühlungsverhalten herrühren.

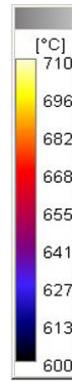
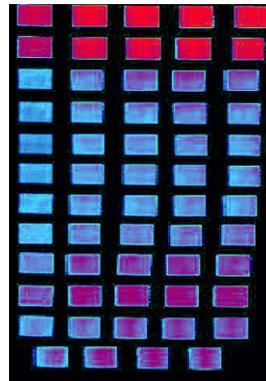
<sup>75</sup> Die Transmissionskurve ist aus Fraunhofer 2010, Bild 18, Seite 18, Probe fg023233. Die Messungen wurden nur im Wellenlängenbereich 280 nm bis 2500 nm durchgeführt. Allerdings trägt eine größere Transmission bei großen Wellenlänge wegen der weit geringeren Intensität nur untergeordnet zum gesamten Energieeintrag bei.

<sup>76</sup> Angabe der Fa. Wolbring nach privater Korrespondenz. Die Versuche wurden in einem Laborofen bis 200 °C durchgeführt.

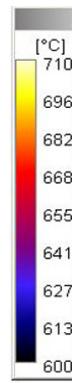
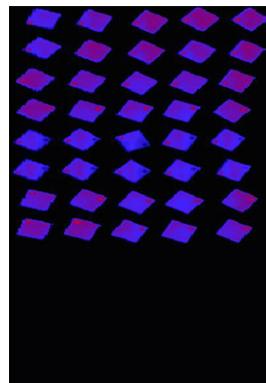
<sup>77</sup> Bei einer Temperatur von 970 K ist die Viskosität so gering, dass negative Effekte wie ein Durchhang zwischen den Transportrollen auftreten können. Ebenso wird die Verweilzeit im Ofen aus Produktivitätsgründen gerade so eingestellt, dass die Normvorgaben hinsichtlich des Endprodukts eingehalten sind.



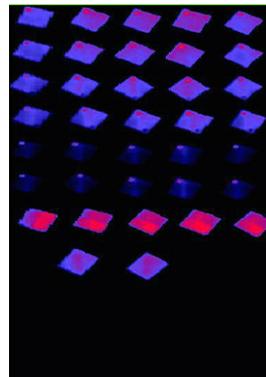
6-0-0 ESG  
 6-1-3 DD TM  
 6-1-3 DD  
 6-1-3 SD TM  
 6-1-3 SD  
 6-2-1 DD TM



6-1-1 DD  
 6-1-2 DD  
 6-2-3 DD  
 6-1-1 SD



6-1-2 SD  
 6-2-1 SD  
 6-2-3 SD  
 Kontrollschei-  
 ben



DD Digitaldruck  
 SD Siebdruck

TM Trennmittel

Probenbezeichnung nach Abschnitt 5.1, Seite 103 f.

**Bild 10** Beladung des Vorspannofens

Von oben nach unten, immer zwei Scheibenreihen

Oberes Bild  
 Probentyp 2

Untere Bilder  
 Probentyp 3

Demnach sollten die unbedruckten Scheiben der 2. Serie an der vordersten Position die geringste Oberflächentemperatur aufweisen. Dieses ist offensichtlich nicht der Fall. Die gleiche Darstellung ergibt sich bei den Proben der 3. Serie. Dieses widersprüchliche Resultat zwischen dem schnelleren Aufheizen schwarzer Proben und der gemessenen Oberflächentemperatur müssen durch genauere Messungen im

Zeitverlauf in Einklang gebracht werden. Zeitlich punktuelle Aufnahmen erlauben solches nicht. Ebenso ist ein schnelleres oder langsames Abkühlen im Anschluss an das Aufheizen von bedruckten gegenüber unbedruckten Proben nicht ableitbar. An dieser Stelle besteht der Bedarf an genaueren Messungen und Untersuchungen.

Es ist allerdings ebenfalls erkennbar, dass die Farbsysteme schon im getrockneten Zustand andere Erscheinungsbilder aufweisen. Die digitalbedruckten glänzen in der Oberfläche stärker als die siebbedruckten (vergleiche Bild 10 oberste Reihe mit nur digitalbedruckten Proben in der Beladung). Ebenso sind in den thermographischen Aufnahmen die transparenten Stellen sehr deutlich und die Stellen mit dem Trennmittel weniger gut zu erkennen. Unterschiedlich beschaffene Oberflächen – mattiert oder glänzend – weisen verschiedene Emissionsgrade auf. Dieser Sachverhalt wird bei Metallen sehr deutlich. Oxidiertes Kupfer weist einen 38fachen Emissionsgrad gegenüber poliertem Kupfer auf. Da die Temperaturwerte in Thermographie-Aufnahmen an Referenzoberflächen skaliert werden, ergeben sich zwangsläufig quantitativ und qualitativ unkorrekte Messergebnisse für Oberflächen mit abweichenden strahlungstechnischen Eigenschaften.

Neben der Farbgebung ist die durch das Auftragsverfahren erzielte Schichtdicke von wesentlicher Bedeutung. Bedruckungen im Siebdruckverfahren oder Digitaldruck besitzen systembedingt geringere Schichtdicken als eine Auftragung im Gieß- oder Walzverfahren mit entsprechend stärkeren Auswirkungen hinsichtlich des Durchscheinens (Bild 16). Ein mehrmaliges Überdrucken mit mehreren Schichten mindert diesen Effekt, bedeutet aber mehr Arbeitsschritte im Verhältnis zu Emailen mit dunkler Farbgebung.

Schlussfolgernd aus diesen Aufnahmen gilt, dass die Bedruckungen auf Grund ihrer anderen optischen und thermischen Eigenschaften gegenüber dem transparenten Glas Auswirkungen auf den Vorspannprozess besitzen. Die Aufnahmen erlauben zwar keine quantitativen Aussagen, aber qualitativ lassen sich Unterschiede feststellen, denen mit geeigneten Messmethoden oder Auswerteverfahren genauer nachgegangen werden muss.

## 2.3 Glas

Glas ist nach der DIN 1259-1 als

„anorganisches nichtmetallisches Material, das durch völliges Aufschmelzen einer Mischung von Rohmaterialien bei hohen Temperaturen erhalten wird, wobei eine homogene Flüssigkeit entsteht, die dann bis zum festen Zustand abgekühlt wird, üblicherweise ohne Kristallisation“

Definiert.<sup>78</sup> Mit dieser Definition wird die wesentliche Aussage zum molekularen Gefüge des Glases getroffen, dass nämlich keine kristalline Molekularstruktur vorliegt. Diese Eigenschaft ermöglicht erst verschiedene Anwendungen und Veredelungen von Glas.

Im Rahmen dieser Dissertation werden nur die für das Forschungsziel relevanten Eigenschaften des Glases behandelt. Die molekulare Struktur des Glases und die daraus folgenden Eigenschaften werden als bekannt vorausgesetzt beziehungsweise an den Stellen aufgeführt, wo sie relevant sind. Für weitergehende Studien des Werkstoffes sei auf die einschlägige Literatur verwiesen.<sup>79</sup>

### 2.3.1 Mechanische Eigenschaften

Glas ist ein ideal elastischer, aber auf Grund seiner strukturellen Beschaffenheit spröder Werkstoff. Die Festigkeit von Glas lässt sich nicht als Materialkennwert wie bei anderen Werkstoffen definieren. Sie ist von der Größe und Form der Kerben, Fehlstellen und Risse in der zugbeanspruchten Oberfläche abhängig. Somit ist die Oberflächenqualität wesentlich für die Festigkeit von Glas. Es werden die Parameter nach der DIN EN 572-1 und nicht nach DIN 18008 verwendet, da sich die Untersuchungen auf den Werkstoff und nicht auf Anwendungen beziehen.

**Tafel 8** Mechanische Eigenschaften von Glas nach DIN EN 572-1

Festigkeit $f_k$ <sup>80</sup> [ N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung $\epsilon$ [ % ]	E-Modul E [ N/mm <sup>2</sup> ]	Poisson-Zahl $\mu$ [ / ]
45	0,10	70000	0,20

<sup>78</sup> Im Wesentlichen entspricht diese Definition der von Tamann 1932.

<sup>79</sup> Vergleiche Petzold 1990, Scholze 1988, Vogel 1979 und andere.

<sup>80</sup> Gemeint ist die Gebrauchsfestigkeit als charakteristische Festigkeit des Grundmaterials ohne Vorspannung nach DIN EN 572-1.

### 2.3.2 Thermische Eigenschaften

Zu den wesentlichen thermischen Eigenschaften des Glases gehören im Rahmen dieser Arbeit die effektive Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{eff}}$  als Summe der Wärmeleitung und der Wärmestrahlung, der thermische Ausdehnungskoeffizient  $\alpha_T$  und die spezifische Wärmekapazität  $c_p$ . Die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität sind unabdingbar für die Berechnung der Temperaturverteilung innerhalb des Glases bei der Abkühlung im thermischen Vorspannprozess und somit relevant für die Bestimmung der Vorspannung. Generell weisen alle thermischen Eigenschaften ein temperaturabhängiges Verhalten auf. Im baupraktischen Temperaturbereich kann eine Konstanz dieser vorausgesetzt werden.<sup>81</sup> Bei der Betrachtung der thermo-mechanischen Vorgänge während des Glasherstellungsprozesses kann diese Temperaturabhängigkeit aber nicht vernachlässigt werden.

Thermischer Ausdehnungskoeffizient $\alpha_T$ [ K <sup>-1</sup> ] (20 – 300 °C)	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [ W/(m·K) ]	Wärmekapazität $c_p$ [ J/(kg·K) ]
9,0·10 <sup>-6</sup>	1,00	720

**Tafel 9** Thermische Eigenschaften von Glas nach DIN EN 572-1

Bei Temperaturen unterhalb der Transformationstemperatur  $T_g$  erfolgen die Eigenschaftsänderungen wie Volumenzunahme oder lineare thermische Ausdehnung auf Grund größerer Schwingungsamplituden der Atome um ihre Ruhelage. Die Zunahme des Volumens oder der Dehnung erfolgt quasi linear mit steigender Temperatur mit einer Geradensteigung  $\alpha_{pg}$ .<sup>82</sup> Im Transformationsbereich beginnen die atomaren Bindungen nach und nach aufzubrechen und bilden wegen der erhöhten Bewegungsfreiheit offenere Strukturen. Die Steigung der Kurve nimmt im Transformationsbereich kontinuierlich zu, bis die Gerade oberhalb  $T_g$  mit der konstanten Steigung  $\alpha_{pl}$  weiter ansteigt (vergleiche Bild 25). In der Regel ist  $\alpha_{pl}$  etwa dreimal so groß wie  $\alpha_{pg}$ ,<sup>83</sup> wobei diese Eigen-

<sup>81</sup> Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient nach Norm gilt daher nur für einen Temperaturbereich von 20 °C – 300 °C.

<sup>82</sup> Das „p“ im Index steht allgemein für eine beliebige Eigenschaft, das „g“ für glassy – fest. Oberhalb  $T_g$  nimmt die Viskosität von Glas stark zu. Diese Phase wird mit dem Index „l“ liquid – flüssig – bezeichnet. Die Variable  $\alpha$  bezieht sich hier nicht auf den Ausdehnungskoeffizienten, sondern folgt der Nomenklatur nach Schneider 2001, Seiten 40 ff.

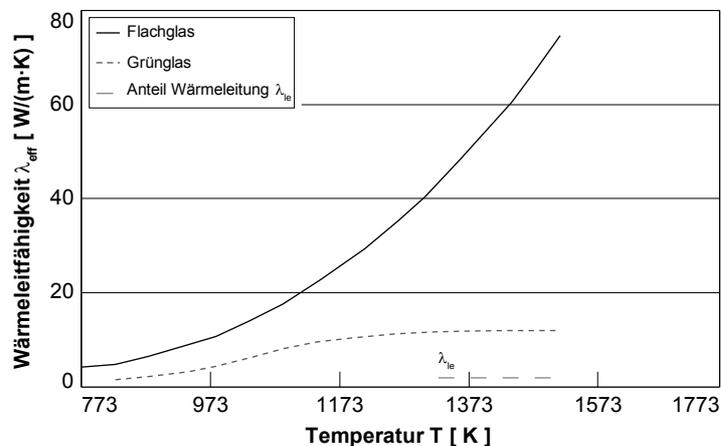
<sup>83</sup> Vergleiche Scholze 1988, Seite 171.

schaftsänderung auf die Dichte, den Ausdehnungskoeffizienten, den Brechungsindex und weitere Eigenschaften bezogen werden kann.<sup>84</sup>

### Wärmeleitfähigkeit

Bei transparenten Werkstoffen findet neben der Wärmeleitung (Konduktion) ebenfalls eine Wärmeübertragung durch Strahlung statt. Dabei erfolgt die Abgabe der Wärmestrahlung im Glas nicht nur wie bei den Metallen und meisten elektrischen Nichtleitern von seiner Oberfläche, sondern von jedem Punkt in seinem Volumen.<sup>85</sup> Dieser Vorgang erschwert die Bestimmung der „wahren“ Konduktion. Bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit eines transparenten Materials überlagern sich die Wärmetransportvorgänge aus Leitung und Strahlung. Eine Trennung dieser beiden Vorgänge ist nur schwer zu realisieren. Daher wird meist nur eine scheinbare oder effektive Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{eff}}$  gemessen. Diese Tatsache wurde häufig unter dem Begriff „Strahlungsleitung“ oder im Englischen besser ausgedrückt als „radiant conductivity“ bezeichnet.<sup>86</sup> Der Anteil der Strahlung am Wärmetransportvorgang ist sehr stark temperaturabhängig.

**Bild 11** Effektive Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{eff}}$  von Glas in Abhängigkeit der Temperatur mit Darstellung des Anteils der reinen Wärmeleitung  $\lambda_{\text{le}}$



Allerdings erscheint es so, dass dieser Umstand selbst in neueren Publikationen nicht genau unterschieden worden ist. Zur Anpassung von theoretisch hergeleiteten Gleichun-

<sup>84</sup> Vergleiche unter anderem Scholze 1988, Seite 169 und Schneider 2001, Seite 40.

<sup>85</sup> Vergleiche Bähr 2008, Seiten 591 und 640.

<sup>86</sup> Gardon 1958 geht detailliert auf diesen Umstand ein. Er unterscheidet zwischen der „wahren“ Konduktion und der „radiant conductivity“.

gen zur Spannungsberechnung an vorhandene Versuchsergebnisse musste die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  variiert werden. Dabei ergab sich mit  $\lambda = 1,45 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  ein größerer Wert als bei Raumtemperatur.<sup>87</sup> Diese Abweichung liegt sehr wahrscheinlich in der Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit der thermo-mechanischen Eigenschaften begründet, zumal im viskosen und viskoelastischen Übergangsbereich der Wärmetransport durch Strahlung gegenüber der Leitung dominiert.<sup>88</sup>

Die Wärmeleitfähigkeiten aus Leitung und Strahlung können getrennt basierend auf atomistischen Betrachtungen berechnet werden.<sup>89</sup> Dabei nimmt die Leitfähigkeit aus Leitung  $\lambda_{le}$  ab einer bestimmten Temperatur quasi konstante Werte an. Dieses liegt in der proportionalen Kopplung der Konduktion an die spezifische Wärmekapazität begründet. Diese strebt einem Grenzwert zu, der von der Anzahl der an der maßgeblichen Bindung beteiligten Atome – beim  $\text{SiO}_2$  drei Bindungen – und der Schwere der Atome abhängt.<sup>90</sup> Der Grenzwert der spezifischen Wärme von beispielsweise Kieselglas wird bei etwa 1270 K (1000 °C) erreicht.

$$\lambda_{le} = \frac{1}{3} \cdot c_p \cdot v_p \cdot l_p$$

Gleichung 11

$c_p$  Spezifische Wärmekapazität [ J/(kg·K) ]

$v_p$  Geschwindigkeit der Phononen [ / ]

$l_p$  Freie Weglänge der Phononen<sup>91</sup> [ / ]

Der Wärmetransport durch Strahlung kann durch die sogenannte Rosseland-Approximation beschrieben werden.

<sup>87</sup> Vergleiche Kiefer 1984, Seite 224.

<sup>88</sup> Vergleiche Bild 11. Diagramm entnommen Scholze 1988, Seite 336. Die Berechnung und Darstellung mit weiteren Glasarten stammt aus Genzel 1953-2, Seite 71.

<sup>89</sup> Vergleiche Genzel 1953, Seite 69, und Scholze 1988, Seiten 335 ff. Dabei wird die Absorption über den relevanten Wellenlängenbereich als konstant angenommen.

<sup>90</sup> Vergleiche Scholze 1988, Seite 331. Kalk-Natronsilicatgläser zeigen einen Sprung in der spezifischen Wärmekapazität im Transformationsbereich. Oberhalb  $T_g$  steigt  $c_p$  nur noch sehr gering an. Vergleiche Bild 13.

<sup>91</sup> Phononen sind theoretische Teilchen der Festkörperphysik zur Beschreibung von Gitterschwingungen in Kristallen. Streng genommen gilt diese Annahme für amorphe Körper wie Glas nicht, allerdings kann bei sehr großen Wellenlängen gegenüber dem Atomabstand diese Theorie auch für Glas übernommen werden.

## Gleichung 12

$$\lambda_{\text{st}} = \frac{16}{3} \cdot \sigma_s \cdot n^2 \cdot T^3 \cdot l_{\text{st}}$$

$\sigma_s$  Stefan-Boltzmann-Konstante [ W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>) ]

$n$  Brechzahl [ / ]

$T$  Absolute Temperatur [ K ]

$l_{\text{st}}$  Freie Weglänge der Photonen [ / ]

In anderer Schreibweise ergibt sich<sup>92</sup>

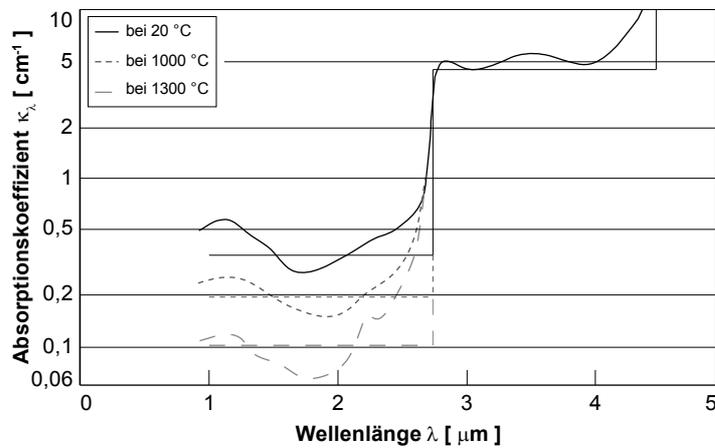
## Gleichung 13

$$\lambda_{\text{st}} = \frac{16}{3} \cdot \sigma_s \cdot \frac{n^2}{\kappa_b} \cdot T^3$$

$\kappa_b$  Absorptionskoeffizient [ / ]<sup>93</sup>

Diese Gleichung eignet sich aber nur bedingt zur Bestimmung der Strahlungsleitfähigkeit von Glas, da zu ihrer Anwendung wesentliche, die Realität nicht beachtende Vereinfachungen getroffen werden. Die wesentliche Einschränkung neben anderen besteht darin, dass der Absorptionskoeffizient als wellenlängenunabhängig angenommen wird. Damit wird unterstellt, dass Glas ein idealer grauer Strahler sei.<sup>94</sup>

**Bild 12** Spektraler Absorptionskoeffizient von Glas in Abhängigkeit der Wellenlänge mit Darstellung einer möglichen Stufenfunktion



Es existieren dennoch Verfahren, die diese Einschränkung dahingehend umgehen, dass für die Absorptionskoeffizienten eine Stufenfunktion angewendet gemäß Bild 12 und

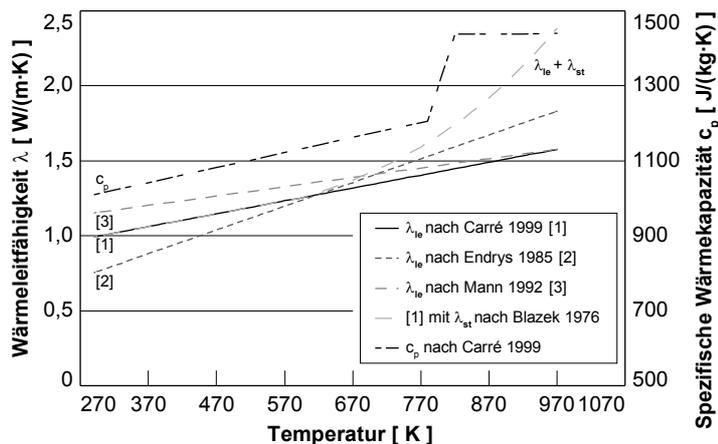
<sup>92</sup> Vergleiche Schumacher 2002, Seite 162.

<sup>93</sup> Häufig findet sich in der Literatur die Bezeichnung  $\alpha$  als Absorptionskoeffizient. Vergleiche Nölle 1997, Seite 46.

<sup>94</sup> Dieses entspricht aber nicht der Realität. Ebenda.

Gleichung 13 abschnittsweise ausgewertet wird.<sup>95</sup> Dennoch wird auf eine Weiterverwendung dieser Gleichung verzichtet und stattdessen auf Messwerte der Strahlungsleitung zurückgegriffen.

Die Wärmeleitfähigkeit auf Grund von Strahlung ist bei niedrigen Temperaturen wegen der Abhängigkeit von der Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma_s$  vernachlässigbar. Allerdings steigt die Strahlungsleitfähigkeit  $\lambda_{st}$  nach Gleichung 12 mit der dritten Potenz der Temperatur an. Eine merkliche Änderung des Verlaufs der effektiven Leitfähigkeit  $\lambda_{eff}$  von der reinen Wärmeleitung  $\lambda_{re}$  tritt ab etwa 670 – 770 K (400 – 500 °C) (Bild 11) auf und besitzt somit auch beim Einbrennen der Emaille und beim Vorspannen eine gewisse Bedeutung. Bild 13 zeigt die Temperaturabhängigkeit der thermischen Parameter. Es ist deutlich, dass die Wärmestrahlung erst ab etwa 700 K einen nennenswerten Beitrag zur effektiven Wärmeleitfähigkeit beiträgt.



**Bild 13** Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität nach verschiedenen Literaturangaben

### Thermischer Ausdehnungskoeffizient und Dichte

Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient wird aus den Messergebnissen eines Glases der Zusammensetzung 15 Na<sub>2</sub>O, 10 CaO und 75 SiO<sub>2</sub> berechnet.<sup>96</sup> Dieses Glas entspricht in seiner Zusammensetzung hinsichtlich der wesentlichen Bestandteile einem Kalk-Natronsilicatglas nach

<sup>95</sup> Vergleiche Genzel 1953-2, Seite 71.

<sup>96</sup> Vergleiche Scholze 1988, Seite 171, Tabelle 21. Die Berechnung und Zusammenstellung der Werte ist in Anhang A4.1 aufgeführt.

DIN EN 572-1. Die numerischen Berechnungen erfolgen allerdings mit geringfügig anderen Werten aus der Literatur.<sup>97</sup>

Für die Dichte existieren in der Literatur keine expliziten, temperaturabhängigen Werte. Diese müssen vielmehr aus den Dilatationskurven zur Ermittlung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten abgeleitet werden. Die Dichte ist über den folgenden Zusammenhang mit der kubischen, thermischen Ausdehnung gekoppelt.<sup>98</sup>

Gleichung 14

$$\frac{V(T)}{V_0} = \frac{\rho_0}{\rho(T)} = 1 + \beta_T(T) \cdot (T - T_0) \quad \rightarrow$$

$$\rho(T) = \frac{\rho_0}{1 + 3 \cdot \alpha_T(T) \cdot (T - T_0)}$$

$\rho_0$  Dichte bei Bezugstemperatur [ kg/m<sup>3</sup> ]

$\rho(T)$  Dichte bei einer beliebigen Temperatur [ kg/m<sup>3</sup> ]

$T_0$  Bezugstemperatur [ K ]

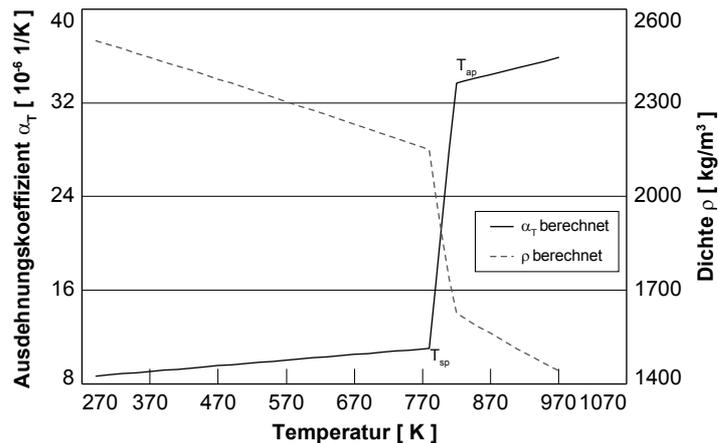
$T$  Beliebige Temperatur [ K ]

$\alpha_T(T)$  Thermischer Ausdehnungskoeffizient [ K<sup>-1</sup> ]

$\beta_T(T)$  Kubischer Ausdehnungskoeffizient [ K<sup>-1</sup> ]

Die temperaturabhängige Dichte basiert auf der Funktion des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten nach Tafel 10. Dabei wird angenommen, dass der kubische Ausdehnungskoeffizient  $\beta_T$  wegen der Isotropie des Materials den dreifachen Wert des linearen Koeffizienten  $\alpha_T$  annimmt.

**Bild 14** Temperaturabhängigkeit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten und der Dichte



<sup>97</sup> Vergleiche Carré 1999, Seite 675.

<sup>98</sup> Vergleiche Nölle 1997, Seite 28.

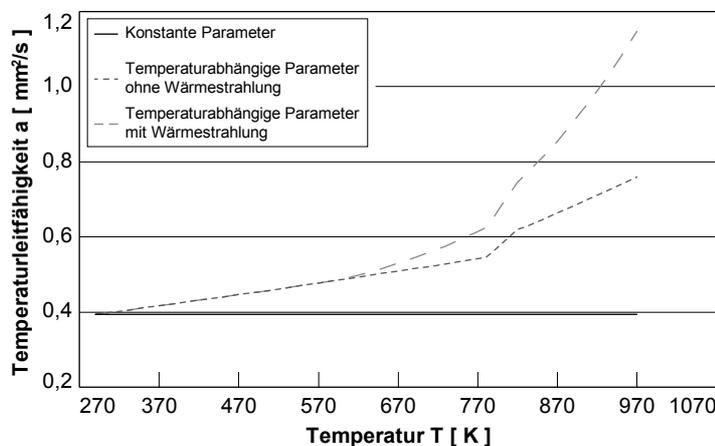
## Temperaturleitfähigkeit

Die Beschreibung des Abkühlvorgangs beziehungsweise dessen Geschwindigkeit erfolgt mit der Temperaturleitfähigkeit  $a$ , welche ein Maß für die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Temperaturfelds darstellt. Die Temperaturleitfähigkeit  $a$  ergibt sich zu

$$a(T) = \frac{\lambda_{\text{eff}}(T)}{c_p(T) \cdot \rho(T)}$$

Gleichung 15

Alle Einzelparameter sind wiederum temperaturabhängig. Der Knick in den Verläufen ergibt sich durch die strukturellen Änderungen im Transformationsbereich. Es ist deutlich erkennbar, dass die Temperaturleitfähigkeit mit zunehmender Temperatur ansteigt. Als Schlussfolgerung ergibt sich daraus, dass der Wärmetransport aus dem Inneren des Glases schneller erfolgt als beim Ansatz konstanter Parameter angenommen. Die Temperaturabhängigkeit der thermischen Parameter kann nicht unberücksichtigt bleiben. Darüber hinaus bewirkt die Wärmestrahlung besonders oberhalb von  $T_g$  eine starke Zunahme der Temperaturleitung.



**Bild 15** Temperaturabhängigkeit der Temperaturleitfähigkeit  $a$

## Zusammenfassung

Tafel 10 fasst die wesentlichen thermischen Parameter mit Funktionen zu ihrer Temperaturabhängigkeit zusammen. Der thermische Ausdehnungskoeffizient ergibt sich nach der obigen Berechnung. Allerdings ist dieser für die viskoelastischen Simulationsberechnung nicht erforderlich, da für die Eingabeparameter der Tool-Narayanaswamy-Shift-Funktion

Werte aus der Literatur verwendet werden.<sup>99</sup> Für den Wärmetransport aus Leitung  $\lambda_{le}$  und die Wärmekapazität  $c_p$  kann auf Verlaufsfunktionen aus der Literatur zurückgegriffen werden.<sup>100</sup> Der Anteil des Wärmetransports durch Strahlung wird aus den Messwerten von Blazek berechnet.<sup>101</sup> Abweichend von Gleichung 12 ergab sich eine geeignetere Regression bei Ansatz eines Polynoms vierter Ordnung.

**Tafel 10** Temperaturabhängigkeit der thermischen Eigenschaften von Glas

<b>Thermischer Ausdehnungskoeffizient <math>\alpha_{T,gl}</math> [ K<sup>-1</sup> ]</b>	$\alpha_{T,gl} = 0,0048 \cdot T + 7,28$
<b>Thermischer Ausdehnungskoeffizient <math>\alpha_{T,lj}</math> [ K<sup>-1</sup> ]</b>	$\alpha_{T,lj} = 3 \cdot \alpha_{T,gl}$
<b>Wärmekapazität <math>c_{p,gl}</math> [ J/(kg·K) ]</b>	$c_{p,gl} = 893 + 0,4 \cdot T - 1,8 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$
<b>Wärmekapazität <math>c_{p,li}</math> [ J/(kg·K) ]</b>	$c_{p,l} = 1433 + 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot T$
<b>Wärmeleitfähigkeit <math>\lambda_{le}</math> [ W/(m·K) ]</b>	$\lambda_{le} = 0,741 + 8,58 \cdot 10^{-4} \cdot T$
<b>Wärmeleitfähigkeit <math>\lambda_{st}</math> [ W/(m·K) ]</b>	$\lambda_{st} = 2,207 \cdot T^4 - 1,152 \cdot T^3 - 0,138 \cdot T^2 + 0,021 \cdot T$ T in 10 <sup>-3</sup> K

Der thermische Ausdehnungskoeffizient und die spezifische Wärmekapazität ändern sich im Transformationsbereich sehr stark (vergleiche Bild 13 und Bild 25). Für diesen Übergangsbereich liegen keine Daten oder Verlaufsfunktionen vor. Daher wird zur Kopplung der Funktionsverläufe im glasigen und flüssigen Zustand eine lineare Funktion verwendet. Der Transformationsbereich ist durch die untere ( $T_{f4} = T_{sp}$ ) und obere Kühltemperatur ( $T_{f3} = T_{ap}$ ) begrenzt. Für diese Parameter ergeben sich basierend auf den Literaturangaben andere Werte als nach DIN EN 572-1 (Tafel 9). Der Ausdehnungskoeffizient nach der obigen Formel ergibt sich als mittlerer Ausdehnungskoeffizient zwischen 20 – 300 °C zu  $9,36 \cdot 10^{-6}$  1/K. Ebenso liegt die spezifische Wärmekapazität etwas höher.

<sup>99</sup> Es werden die Parameter nach Carré 1999 verwendet. Vergleiche Abschnitt 6.1.4, Seite 136f.

<sup>100</sup> Aus Daudeville 1998, Seite 676 und Carré 1999, Seite 915. Die Formel für die Wärmeleitfähigkeit wurde auf die Einheit Kelvin umgestellt.

<sup>101</sup> Blazek 1976, Seite 79, Glas 10. Die Berechnung und Zusammenstellung der Werte ist in Anhang A4.1 aufgeführt.

## 2.4 Emaille / Glasfluss

Emaille ist kein eigenständiger Werkstoff, sondern liegt als Überzug immer im Verbund mit anderen Trägermaterialien wie Metallen oder Glas vor. Emaille wird definitionsgemäß von anderen Überzügen wie Lacken und Farben abgegrenzt, andererseits wird Emaille aber auch nicht den Gläsern gleichgestellt. Die stoffliche Zusammensetzung der Emaille-Überzüge ergibt sich aus dem geplanten Anwendungsbereich für chemische Apparate, als Sonnenschutz oder als Dekorelement.

In der Literatur werden in der Regel einzig Metallemaillierungen behandelt. Eine Beschreibung für Glasemailen liegt nicht vor, allerdings lassen sich bestimmte Begebenheiten auf Grund der Gleichheit der Zusammensetzung übertragen. Dennoch gibt es wesentliche Unterschiede zwischen den beiden Anwendungen. So finden bei Glasemailen Trübungsmittel keine Verwendung, da die eingebetteten Farbpigmente sichtbar bleiben sollen.

### 2.4.1 Aufbau / Struktur / Zusammensetzung

Eine Emaille setzt sich aus dem Grundkörper – dem Glasfluss – und je nach Anwendung als Glas- oder Metallemaillierung Trübungsmitteln und Farbkörpern zusammen. Der Glasfluss besteht traditionell für Metallemaillierungen aus leichtschmelzenden Blei-Borosilikatgläsern. Dabei werden die wesentlichen chemischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften anwendungsbezogen über die Zusammensetzung des Glasflusses beeinflusst und gesteuert.

Auf Grund der Vielfalt an möglichen Bestandteilen und Zusammensetzungen ist eine systematische Einteilung von Emailen schwer durchführbar.<sup>102</sup> Es hat sich eine Kategorisierung der Emaillebestandteile in drei Gruppen nach ihren Eigenschaftsmerkmalen, den Resistenzmitteln I und II und den Flussmitteln, als sinnvoll erwiesen.<sup>103</sup> Die Resistenzmittel I erhöhen die chemische Widerstandsfähigkeit und die Viskosität, die Resistenzmittel II erhöhen dagegen nur den chemischen Widerstand. Die Flussmittel setzen die Oberflä-

<sup>102</sup> Dieses kann mit ein Grund sein, weshalb Emaillezusammensetzungen nicht normativ geregelt sind.

<sup>103</sup> Diese Einteilung ist von Dietzel 1981 vorgenommen worden.

chenspannung herab und erlauben somit eine bessere Benetzbarkeit des Trägermaterials. Tafel 11 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der einzelnen Gruppen und deren Substanzen.<sup>104</sup> Die Angaben stammen zwar aus Quellen zu Metallemaillierungen, besitzen aber die gleiche Aussagekraft, da sich diese auf den Glasfluss beziehen. Bei Glase-maillen entfallen dann einige Bestandteile.

**Tafel 11** Einteilung der Emaillierrohstoffe nach ihren Eigenschaftsmerkmalen – Auszug

Die in Glasemaillen unüblichen Bestandteile sind kurz-siv markiert.

Resistenzmittel I	Resistenzmittel II	Flussmittel
Siliziumoxid $\text{SiO}_2$	<i>Magnesiumoxid <math>\text{MgO}</math></i>	Bortrioxid $\text{B}_2\text{O}_3$
Aluminiumoxid $\text{Al}_2\text{O}_3$	Calciumoxid $\text{CaO}$	<i>Phosphoroxid <math>\text{P}_2\text{O}_5</math></i>
<i>Zirkoniumoxid <math>\text{ZrO}_2</math></i>	Zinkoxid $\text{ZnO}$	Natriumoxid $\text{Na}_2\text{O}$

Ein großer Anteil der Bestandteile des Glases bildet ebenfalls die Grundstoffe von Emaille. Daher lassen sich viele Erkenntnisse hinsichtlich der Glaseigenschaften auf Email-len übertragen. Allerdings ist eine Emaille auf Grund der bisweilen höheren Anforderungen an chemischer Resistenz und anderer Eigenschaften durch Zugabe weiterer Zu-schlagstoffe komplexer als Glas aufgebaut. Der Glasfluss für Glasemaillierungen setzt sich prinzipiell chemisch wie folgt zusammen.<sup>105</sup> Für den Digitaldruck ist die Zusammensetzung zwar bei entsprechenden Stellen für Zulassungen hinterlegt, unterliegt aber der strikten Geheimhaltung. Die Zusammensetzung und die Bestandteile des Glasflusses gehen noch über die für den Siebdruck hinaus.<sup>106</sup>

**Tafel 12** Chemische Bestandteile und ihr Anteil für den Glasfluss im Siebdruck und Digitaldruck

Bestandteil	Chemisches Zeichen	Siebdruck [ % ]	Digitaldruck [ % ]
Siliziumoxid	$\text{SiO}_2$	30 – 50	Betriebsgeheimnis – keine Angaben erhältlich
Aluminiumoxid	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,5 – 5	
Bortrioxid	$\text{B}_2\text{O}_3$	15 – 25	
Natriumoxid	$\text{Na}_2\text{O}$	5 – 10	
Zinkoxid	$\text{ZnO}_2$	13 – 23	

<sup>104</sup> Vergleiche Dietzel 1981, Seite 39.

<sup>105</sup> Die Angaben stammen aus einer Privatkorrespondenz mit einem Hersteller und Lieferanten von Emaillefarben.

<sup>106</sup> Dennoch wird – auch in Ermangelung konkreter Angaben – davon ausgegangen, dass die wesentlichen Eigenschaften der Emaille für den Digitaldruck nicht wesentlich von der des Siebdrucks abweichen.

Weitere Bestandteile kommen zur Steuerung bestimmter Eigenschaften je nach Bedarf in Mindermengen hinzu. Die chemischen Grundstoffe werden aus Quarz, Feldspat, Soda, Borax und anderen gewonnen. In den letzten Jahren haben sich immer mehr schwermetallfreie Emaillen, besonders Bleifreie, aus Gesundheits- und Umweltschutzgründen durchgesetzt. Schwermetalle sind nach einigen Verordnungen verboten.<sup>107</sup> Grundsätzlich fällt auch Cadmium unter diese Regelungen, allerdings ist Cadmium in Verbindungen wie Cadmiumsulphonit und Cadmiumsulphoselinit oder als Einschlusspigment nicht kennzeichnungspflichtig. In der Serie FERRO Line 140+ sind je nach Farbgebung – meist kräftige Gelb- und Rottöne – bis zu 10 % Cadmium enthalten. Manche Glasflüsse beinhalten ebenfalls Blei (FERRO Line 34). Das Blei liegt dort als inerte Einschluss vor und ist somit ebenfalls nicht kennzeichnungspflichtig. Dennoch wird auf Blei wo möglich verzichtet. Einzig zur Erzielung kräftiger Blautöne (Kobaltblau) und bei Emaillen auf Borosilikatglas und Glaskeramik wird wegen des geringeren beziehungsweise sogar negativen Temperatursdehnungskoeffizienten Blei im Glasfluss eingesetzt. Weitere Zusatzstoffe sind Pigmente auf metallischer Basis zur Farbgebung und Additive und Verdüner zur Verarbeitung. Die Farbgebung der Emaille wird mit Pigmenten meist auf der Basis von Metalloxiden, ihren Verbindungen oder Salzen erzielt.<sup>108</sup> Die einzelnen Farben werden dabei analog denjenigen wie für durchgefärbte Gläser hergestellt. Die Farben werden meist durch eine Mischung verschiedener Pigmente erzielt.<sup>109</sup>

Farbton	Farbkörper
Gelb	$V_2O_5 + ZrO_2 + (TiO_2) / ZrSiO_4 + Pr_2O_3 / Cd$
Rot	Meist auf Cadmiumbasis
Blau	$CoO + Al_2O_3 + ZnO / V_2O_4 + ZrSiO_4 / Pb$
Grün	Mischung aus Blau und Gelb / $Fe_2O_3 + CuO$
Schwarz	$CoO + NiO + CuO + Fe_2O_3 + Cr_2O_3 + MnO_2$

**Tafel 13** Farbpigmente – Auszug

<sup>107</sup> Nach Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV) und Restriction of (the use of certain) Hazardous Substances (ROHS).

<sup>108</sup> Organische Farbstoffe sind wegen der hohen Einbrandtemperatur nicht geeignet. Weiter sind anorganische Farbkörper UV-beständiger. Neuerer Entwicklungen umfassen aber organische Farben für Digitaldruck.

<sup>109</sup> Vergleiche Dietzel 1981, Seiten 154 ff. und Petzold 1992, Seiten 110 ff.

Die endgültige Zusammensetzung der Emailen für die jeweiligen Auftragsverfahren ergibt sich dann gemäß Tafel 14. Die Angaben zum Digitaldruck stammen aus den Sicherheitsdatenblättern des Herstellers DipTech, die für den Siebdruck aus privater Korrespondenz.

**Tafel 14** Chemische Bestandteile und ihr Anteil für Emailen im Siebdruck und Digitaldruck

<b>Bestandteil</b>	<b>Siebdruck [ % ]</b>	<b>Digitaldruck [ % ]</b>
Glasfritte	40 – 75	30 – 65
Pigment	1 – 2	10 – 30
Bindemittel / Additive	5 – 25	k. A.
Verdünner	20 – 38	34 – 70

Der Verdünner dient der Einstellung der Viskositätseigenschaften für die Verarbeitung und ist im eingebrannten Zustand vollständig verflüchtigt. Er besteht aus organischen Lösungsmitteln und bei bestimmten Anwendungen gegebenenfalls aus Wasser. Das Bindemittel beziehungsweise die Additive bestehen meist aus Cellulose, die eine Anfangshaftung auf dem Glassubstrat zur Handhabung gewährleisten soll. Diese verbrennt während des Einbrands vollständig.

Die Struktur des Glasflusses ist vergleichbar mit der des Kalk-Natronsilikatglases. Das Gerüst aus Siliziumdioxid-Tetraedern wird durch alkalische Bestandteile aufgesprengt. Es ergibt sich keine kristalline Struktur, sondern durch die Anwesenheit von Netzwerkwandlern bildet sich ein unregelmäßiger, aber isotroper Aufbau. Trotz der stofflichen und strukturellen Vergleichbarkeit und Ähnlichkeit zu Kalk-Natronsilikatgläsern weichen die jeweiligen chemischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften teilweise stark ab.<sup>110</sup>

#### **2.4.2 Mechanische Eigenschaften**

Wegen der Strukturgleichheit der Emaille mit dem Glas gelten hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften qualitativ gleiche Verhältnisse. Die Emaille ist ebenfalls ein spröder Werkstoff, dessen Festigkeit in einem hohen Maße von dem Zusammenwirken von Zugspannung und Defektgröße ab-

<sup>110</sup> In Petzold 1992 wird darauf sehr ausführlich Bezug genommen.

hängig ist.<sup>111</sup> Die Angaben in Tafel 15 stammen aus Fachliteratur zu Metallemaillierungen, sind aber auch auf Glasmaillen übertragbar.

Festigkeit $f_{em}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung $\varepsilon$ [ % ]	E-Modul E [ N/mm <sup>2</sup> ]	Poisson-Zahl $\mu$ [ / ]
~80 <sup>112</sup>	0,12 – 0,30	60000 – 70000	0,22 – 0,25

**Tafel 15** Mechanische Eigenschaften von Emaille als Grundstoff

Die Zugfestigkeit ist gegenüber herkömmlichen Gläsern im Zahlenwert höher, welches auf Grund der Zusammensetzungs- und Strukturähnlichkeit unwahrscheinlich erscheint. Dieser Umstand wird in der Literatur nicht weiter erläutert. Ein Grund kann darin liegen, dass nur die Mittelwerte von Messergebnissen angegeben worden sind. Bei kleinformatischen Probekörpern liegt der Mittelwert immer höher als bei Proben mit einer größeren Prüffläche.<sup>113</sup> Allerdings kann unter Beachtung bruchmechanischer Begebenheiten möglicherweise eine andere Kerbgrundgeometrie beziehungsweise ein anderer Spannungsintensitätsfaktor angenommen werden. Als Materialkennwert ist auch dieser sehr wahrscheinlich von der Zusammensetzung abhängig.<sup>114</sup> Weiter beziehen sich diese Angaben auf Emailen für Metallüberzüge, die in ihrer Zusammensetzung nicht denjenigen für Glasemailierungen entsprechen müssen. Allerdings gelten die gleichen Zahlenwerte für Glasemailen, auch wenn diese Parameter planmäßig nicht im Rahmen von Kontrollen überprüft werden.<sup>115</sup> Daher sind die Angaben für Bemessungszwecke wenig belastbar. Für die Betrachtung von Emaille im Verbund mit Glas ist die Zug- oder Biegezugfestigkeit nicht weiter von Bedeutung, da die übrigen Materialparameter, vor allem der Ausdehnungskoeffizient so eingestellt werden, dass die Emaille stets unter Druckspannungen steht.

<sup>111</sup> Vergleiche Petzold 1992, Seiten 332 ff. und Dietzel 1981, Seiten 76 ff. Angaben zu den Glasemailen stammen aus privater Korrespondenz.

<sup>112</sup> Bei Petzold 1992 wird zwischen Zugfestigkeit und Biegezugfestigkeit unterschieden. Die Werte für die Zugfestigkeit liegen bei 50 – 120 N/mm<sup>2</sup> und für die Biegezugfestigkeit bei 80 – 200 N/mm<sup>2</sup>.

<sup>113</sup> Besonders deutlich wird dieses beim Vergleich der Mittelwerte von Messergebnissen aus dem kleinen und großen Doppelring-Biegeversuch.

<sup>114</sup> Die Zusammensetzungsabhängigkeit des Spannungsintensitätsfaktors wird in der Literatur nicht behandelt. Allerdings erscheint diese Annahme ein sinnvoller Erklärungsversuch zu sein.

<sup>115</sup> Aussage aus privater Korrespondenz mit einem Hersteller.

Die angegebenen Festigkeiten unterstützen nicht die an anderer Stelle getroffenen Aussagen, dass der Bruchursprung in der Emaille wegen der dort vorliegenden, größeren Fehlstellen auf Grund von kristallinen Einschlüssen und Blasenbildung anzunehmen ist.<sup>116</sup> Das würde bedeuten, dass die mechanische Festigkeit im Versuch an Emaillestäbchen herabgesetzt wäre. Dieses ist offensichtlich nicht der Fall, beziehungsweise kann dieses nicht überprüft werden, da nur sehr wenige Literaturangaben zur Festigkeit der Emaille selbst existieren.

Die Druckfestigkeit ist wie bei Glas etwa um den Faktor 10 größer als die Zugfestigkeit. Auch hier tritt der Bruch nicht auf Grund eines Druckversagens, sondern auf Grund von resultierenden Querkzugspannungen ein. Wegen der hohen Druckfestigkeit wird bei Metallemaillierungen der Ausdehnungskoeffizient so eingestellt, dass die Emailleschicht immer unter einer moderaten Druckspannung steht. Diese beugt möglichen Rissen in der Oberfläche vor.<sup>117</sup>

Der E-Modul und die Poisson-Zahl werden in der gleichen Größenordnung wie beim Glas angenommen. Dabei ist der Wert in den meisten Fällen geringer als der des Basisglases. Der geringere E-Modul wird als positiv für die Spannungsverteilung angesehen. Die Emaille wird als der „weiche“ Verbundpartner bezeichnet und wäre somit in der Lage, größere Dehnungen aufzunehmen.<sup>118</sup> Gemäß dem Hookeschen Gesetz bewirkt ein geringerer E-Modul bei gleicher Dehnung geringere Spannungen. Auch dieses scheint nicht die getroffenen Aussagen zu unterstützen, dass der Bruchursprung in der Emailleschicht anzunehmen ist<sup>119</sup> beziehungsweise dass ein Riss von der Emaille auf das Glas überspringen kann.

### 2.4.3 Thermische Eigenschaften

Der thermische Ausdehnungskoeffizient stellt für die Qualität des Endprodukts bei Metallemaillierungen die wesentliche

<sup>116</sup> Vergleiche Röpke 1981, Seiten 52 ff. und Röcker 1987, Seite 168.

<sup>117</sup> Allerdings darf diese Druckvorspannung nicht zu hoch ausfallen, da sonst Abplatzungen die Folge sind.

<sup>118</sup> Vergleiche Röpke 1981, Seite 97.

<sup>119</sup> Dass der Bruch in der Emailleschicht erfolgt, ist durch die Versuche von Krohn 2002-3, Seite 2511, nahegelegt worden.

thermische Eigenschaft dar. Dieser beeinflusst den Spannungsaufbau bei Abkühlung maßgeblich. Auf Grund der Differenz der Ausdehnungskoeffizienten von Emaille und Metall bauen sich Zwangsspannungen im Verbundwerkstoff auf.<sup>120</sup> Die Differenz wird meist so eingestellt, dass der Ausdehnungskoeffizient des Überzugs geringer ist als der des Metalls. Dadurch wird bei Gebrauchstemperatur eine permanente Druckspannung in die Emaille eingeprägt. Diese beugt Rissen in der Bedruckung vor. Diese Aussage trifft bei Glas nicht in gleichem Maße zu, da die Werte der thermischen Ausdehnungskoeffizienten die gleiche Größenordnung aufweisen, und größere Dickenverhältnisse zwischen Glas und Emaille vorliegen.<sup>121</sup> Die folgende Tabelle listet die wesentlichen thermischen Parameter auf.<sup>122</sup>

Thermischer Ausdehnungskoeffizient $\alpha_T$ [ $K^{-1}$ ] – (50 – 300 °C)	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [ W/(m·K) ]	Wärmekapazität $c_p$ [ J/(kg·K) ]
8,0 – 9,5 · 10 <sup>-6</sup> SD 7,7 · 10 <sup>-6</sup> DD	0,80 – 1,00	800 – 1100

**Tafel 16** Thermische Eigenschaften von Emaille als Grundstoff

Die Temperatur-Ausdehnungskurve von Emailen ist denen der Gläser qualitativ gleichartig. Der Unterschied besteht in den niedrigeren Werten für  $T_g$ , was auch mit leichtschmelzenden Emailen auf Grund der besseren, erforderlichen Benetzbarkeit der Substratoberfläche erreicht werden soll. Auf Grund der strukturellen Gleichartigkeit ergeben sich keine weiteren Unterschiede. Ebenso kann ein analoger Viskositäts-Temperaturverlauf zum Glas angenommen werden. Die Gleichungen der Temperatur-Eigenschaftsverläufe können analog zum Glas zusammengestellt werden.<sup>123</sup>

<sup>120</sup> Vergleiche Dietzel 1962, Dietzel 1981 und Petzold 1992.

<sup>121</sup> Vergleiche Kapitel 6.2.2. Allerdings wird dennoch eine Übertragbarkeit unterstellt. Vergleiche Röpke 1981, Emonts 1985 und Röcker 1987. Für Bedruckungen auf Borosilikatglas mit  $\alpha_T < 6,0 \cdot 10^{-6} 1/K$  müssen bleihaltige Systeme verwendet werden, da es sonst zur Rissbildung in der Emailleschicht kommt.

<sup>122</sup> Vergleiche Petzold 1992, Seiten 345 und 351, und Herstellerangaben Ferro 2006 und DipTech 2013 (für Ausdehnungskoeffizient). Der lineare Ausdehnungskoeffizient für den Digitaldruck ist für den Bereich 20 -300 °C angegeben.

<sup>123</sup> Die Bestimmung der Gleichungen erfolgt in Anhang A4.2.

**Tafel 17** Temperaturabhängigkeit der thermischen Eigenschaften von Emaille basierend auf der Strukturgleichheit zum Glas

<b>Thermischer Ausdehnungskoeffizient</b> $\alpha_{T,gl}$ [ $K^{-1}$ ]	$\alpha_{T,gl} = 0,0048 \cdot T + 5,85$
<b>Thermischer Ausdehnungskoeffizient</b> $\alpha_{T,li}$ [ $K^{-1}$ ]	$\alpha_{T,li} = 3 \cdot \alpha_{T,gl}$
<b>Wärmekapazität</b> $c_{p,gl}$ [ J/(kg·K) ]	$c_{p,gl} = 683 + 0,4 \cdot T - 1,8 \cdot 10^{-7} / T^2$
<b>Wärmekapazität</b> $c_{p,li}$ [ J/(kg·K) ]	$c_{p,li} = 1223 + 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot T$
<b>Wärmeleitfähigkeit</b> $\lambda_{le}$ [ W/(m·K) ]	$\lambda_{le} = 0,548 + 8,58 \cdot 10^4 \cdot T$

Die Wärmeleitfähigkeit weicht bei Raumtemperatur nur gering von denen des Kalk-Natronsilikatglases ab. Ebenso ist die Abhängigkeit von der Zusammensetzung nur schwach ausgeprägt.<sup>124</sup> Allerdings besitzt der Porengehalt der aufgebraunten Emaille eine starke Auswirkung auf die Wärmeleitfähigkeit. Mit steigendem Porenvolumen nimmt diese ab, womit der untere Wert für  $\lambda_{le}$  erklärt werden kann. Daher können sich je nach Porosität des Glasflusses Verschiebungen in der Temperaturverteilung ergeben, welche zu festigkeitsmindernden Zwangsspannungen führen können. Allerdings wird seitens der Hersteller ein homogener Einbrand angestrebt, so dass eine ungleichmäßige Porenverteilung ausgeschlossen werden kann. Ebenso liegen die Porengrößen als Resultat aus dem Verbrennen der Haftvermittler auf Cellulosebasis bei nur etwas 3  $\mu m$ . Zur Strahlungsleitfähigkeit der Emaille liegt keine Information in der Literatur vor.

## 2.5 Emailliertes Glas

Zur Herstellung eines glasartigen Überzugs müssen die Grund- und Rohstoffe zunächst verarbeitungsfähig aufbereitet werden. Bei Temperaturen von rund 1470 K (1200 °C) wird ein Gemenge aus Quarz, Feldspat, Borax, Soda, Pottasche, Aluminiumoxid und haftungsbildenden Metalloxiden (bei Metallemaillierungen) geschmolzen. Dieser Schmelzprozess kann in rotierenden Trommelöfen oder kontinuierlich in großen Wannenöfen geschehen. Anschließend wird die fließfähige und heiße, aber nicht zwangsläufig vollständig aufgeschmolzene Masse in Wasser abgeschreckt. Dadurch entsteht die Fritte als poröses, granuliertes und inhomoge-

<sup>124</sup> Vergleiche Petzold 1992, Seite 351.

nes Teilchen. Andere Verfahren kühlen die Masse des Glasflusses unter einem Wasserstrahl oder leiten diese durch Walzen, wodurch sich schuppenartige Fritten ergeben.

Zur Aufbereitung einer auftragsfähigen Masse werden die Glasfritten unter Zusatz von Ton, Quarzmehl und Wasser gemahlen. Sofern der Glasfluss selbst nicht eingetrübt oder gefärbt ist, werden in diesem Schritt die Trübungs- und Farbmittel hinzugegeben. Die Mahlfeinheit hat einen direkten Einfluss auf die Einbrennbedingungen und zu erzielenden Eigenschaften der Emaille. Eine wesentliche Verbesserung tritt in der Homogenität der Pigmentverteilung einhergehend mit einem höheren Deck- beziehungsweise Absorptionsvermögen auf. Auf das eigentliche Schmelzverhalten besitzt die Mahlfeinheit wohl keinen Einfluss.<sup>125</sup> Allerdings ist dieses in Frage zu stellen, da der Fluss für GlasemalLEN gegenüber dem Substratglas keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich des Viskositätsverhaltens besitzt. Das schnellere Aufschmelzen des Glasflusses ergibt sich aus der größeren Oberfläche und somit der Mahlfeinheit des Granulats.<sup>126</sup>

Diese so gewonnene Paste als dispersionsfähige Masse muss einige Tage ruhen, bis sie durch Tauchen, Walzen oder Sprühen auf das Trägermaterial aufgebracht wird. In der Regel wird die Farbe vom Hersteller beziehungsweise Zwischenhändler je nach Anwenderanforderung hinsichtlich des Auftragsverfahrens mit der Zugabe von Verdünnern in seiner Viskosität eingestellt. Beim Sprühen und Gießen ist Wasser als Lösungsmittel möglich, beim Siebdruck und Walzen trocknet diese zu schnell aus und ist somit ungeeignet. Der Anwender unternimmt dann nur noch die Feineinstellung der Farbe passend zu seinem System. Die Mahlfeinheit beziehungsweise Körnung der Farbe ist für alle Auftragsverfahren abgesehen vom Digitaldruck gleich. Die Körnung liegt bei etwa 8 – 15  $\mu\text{m}$ . Die Körnung der Farben für den Digitaldruck ist etwa eine Größenordnung geringer.

Das Aufbringen des Überzugs erfolgt im On- oder Offline-Verfahren. Dabei sind im Online-Verfahren nur vollflächige Emaillierungen möglich, bei denen der Glasfluss direkt auf

<sup>125</sup> Vergleiche Emonts 1985, Seite 114.

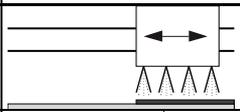
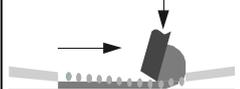
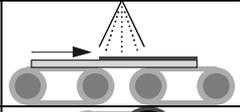
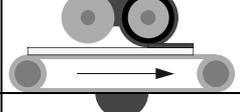
<sup>126</sup> Der Glasfluss besitzt auch eine geringere Transformationstemperatur. Allerdings ist dieser Unterschied nicht sehr groß und eher unbedeutend.

das noch heiße Glasband aufgesprüht und eingebrannt wird. Das gängigere Verfahren ist das Offline-Verfahren. Bei diesem sind vollflächige Emaillierungen, Muster, teilweise aufgebraute Emaillierungen im Siebdruckverfahren<sup>127</sup> und photorealistic Motive im Digitaldruck möglich. Meist werden regelmäßige und standardisierte Muster in Form von Streifen, Punkten und Quadraten im Siebdruck aufgebracht. Allerdings sind auch komplexere Muster und mehrfarbige Bedruckungen in mehreren Arbeitsgängen herstellbar.<sup>128</sup> Der Druck erfolgt aus optischen Gründen und auf Grund einer besseren Haftung auf der Atmosphärenseite des Glases.

Die Schichtdicken unterscheiden sich hinsichtlich des Auftragsverfahrens.<sup>129</sup> Dabei beziehen sich diese Werte auf die Nassschichtdicke, welche etwas größer als die Trockenschichtdicke ist. Eine Schichtdickenmessung erfolgt aus technischen Gründen immer im nassen Zustand. Im Rahmen dieser Arbeit sind alle Angaben Nassschichtdicken.

**Bild 16** Auftragsmethoden der Paste auf das Basismaterial

Die oberen Werte sind Angaben von FERRO, die unteren von Johnson-Matthey

Verfahren	Symboldarstellung	Schichtstärke [ $\mu\text{m}$ ]
Digitaldruck		15 – 20
Siebdruck		25 – 35 20 – 40
Sprühen		10 – 250 100 – 350
Walzen		30 – 150 80 – 120
Gießen		150 – 350 k. A.

<sup>127</sup> Beim Siebdruck wird die Paste durch ein Sieb aufgetragen. Die Verteilung der Masse erfolgt mit einer Rakel. Durch die Gestaltung oder Abdeckung der Maschen im Sieb werden die Muster erzeugt.

<sup>128</sup> Bei mehrfarbigen Drucken werden die Farben nacheinander aufgetragen. Zwischen zwei Aufträgen wird die Farbe zunächst getrocknet. Diese besitzt dann eine Anfangsfestigkeit, mit der dann weitere Arbeitsschritte durchführbar sind. Der Einbrand erfolgt einmal für alle Farben.

<sup>129</sup> Vergleiche Sakoske 2007, Seite 13 und Johnson 2010. Allerdings wird nicht angegeben, ob es sich dabei um die Nassschicht- oder Trockenschichtdicke handelt.

Diese Überzüge werden auf das kalte Glas aufgebracht und bei einer Temperatur von 440 – 460 K (170 – 190 °C) getrocknet. Schon beim Trocknungsvorgang kann die endgültige Qualität des Produktes hinsichtlich von Fehlstellen (sogenannten Pin Holes) gesteuert werden. Durch die Trocknung sollen sich die Lösungsmittel verflüchtigen. Erfolgt dieser Verdampfungsprozess nur unzureichend, entstehen beim endgültigen Einbrand kleine Löcher. Diese ergeben sich aus Ansammlungen von Gasen in Blasen und einem Aufplatzen dieser. Der endgültige Einbrand erfolgt im Vorspannofen bei einer Temperatur von etwa 600 – 650 °C mit gleichzeitiger thermischer Vorspannung des Glases.<sup>130</sup> Bei einer Temperatur von 470 – 620 K (200 – 350 °C) verbrennt die Cellulose. Ein Teil der Verbrennungsgase entweicht aus dem Überzug, ein anderer ist in Form von kleinen Blasen in der Emaille eingebettet. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen haben gezeigt, dass diese Blasen eine Größe von etwa 3 µm aufweisen. Als Defekt im bruchmechanischen Sinne zur Erklärung der Festigkeitsminderung sind diese daher nicht anzunehmen.

In den letzten Jahren hat sich der Digitaldruck als Auftragsverfahren immer mehr durchgesetzt. Bei diesem Verfahren wird die Farbe wie in einem großen Tintenstrahl-Drucker aufgetragen. Somit sind photorealistische Motive mit einer Farbschichtstärke von etwa 15 µm möglich. Das Verfahren erlaubt auch ein mehrfaches Überdrucken zur Erzielung eines größeren Deckvermögens. Hinsichtlich der Farbe unterscheidet sich diese zu den anderen Auftragsverfahren dahingehend, dass die Körnung und Mahlfeinheit sehr viel feiner und die Zusammensetzung anders ist. Einerseits muss die Farbe durch feine Düsen aufgetragen werden, andererseits dürfen diese durch Abrasion nicht zu schnell abgenutzt werden.

<sup>130</sup> Die tatsächliche Einbrenntemperatur richtet sich nach der erforderlichen Aufheiztemperatur für das thermische Vorspannen.

### 3 Thermische Vorspannung

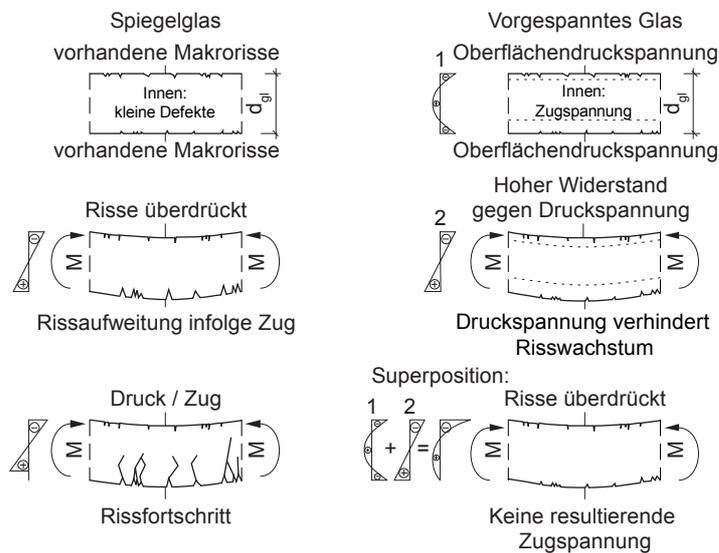
Zur Steigerung der Beanspruchbarkeit von Glas ist die thermische Vorspannung das heute im großtechnischen Prozess hauptsächlich genutzte Verfahren. Andere Methoden wie die chemische Vorspannung sind sehr aufwendig, zeintensiv und besitzen Umweltrisiken wegen der verwendeten Stoffe und werden in Sonderfällen angewandt.

Emaillierte Gläser werden in der Regel auf Grund des Herstellungsprozesses vorgespannt. Die Einbrenntemperatur ist gleich der Vorspanntemperatur. Dieses besitzt den Vorteil des schnelleren und somit effizienteren Durchlaufs der Produkte durch die entsprechenden Maschinen. Nach dem Einbrand muss das bedruckte Glas nicht langwierig technisch gekühlt werden, sondern kann wie unbedrucktes Glas angeblasen werden. Daher ist zum Verständnis der Festigkeitsminderung durch die Emaillierung die Betrachtung des Vorspannprozesses qualitativ wie auch quantitativ unabdingbar.

#### 3.1 Prinzip der thermischen Vorspannung

Allen Methoden der Vorspannung von Glas und Glasprodukten ist gemein, dass eine Druckvorspannung in die Oberflächen des Glases eingepreßt wird.<sup>131</sup>

**Bild 17** Prinzip der Vorspannung



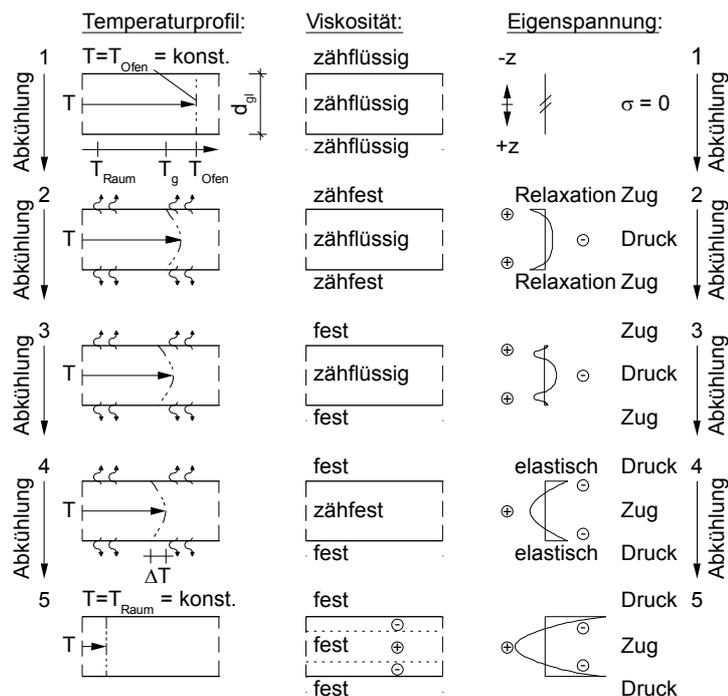
<sup>131</sup> Vergleiche Laufs 2000, Seite 10.

Wird einem vorgespannten Glasbauteil eine Biegebeanspruchung aufgeprägt, muss erst die Vorspannung überwunden werden, um das Glas strukturell zu beanspruchen.

### 3.2 Mechanismus der thermischen Vorspannung

Zunächst soll der Vorspanprozess hinsichtlich seines Mechanismus dargestellt werden. Eine quantitative Beschreibung der ablaufenden physikalischen und mechanischen Vorgänge wird im folgenden Kapitel vorgenommen.

Generell gilt, dass zu jedem Zeitpunkt und zu jeder Temperatur ein Eigenspannungszustand vorliegt.<sup>132</sup> Dieser ist dadurch charakterisiert, dass diese Spannungen keine äußeren Schnittgrößen erzeugen. Das heißt, die Summe aller Spannungen ist über den Querschnitt gesehen immer Null.



**Bild 18** Spannungsaufbau während des Vorspanprozesses

Während des Vorspanprozesses durchläuft das Glas drei verschiedene Zustände. Bei der Aufheiztemperatur ist das Glas mit  $\eta = 10^8$  Pa·s niedrigviskos mit einem viskosen Materialverhalten, und eventuelle Spannungen werden durch Relaxationsvorgänge unmittelbar abgebaut. Unterhalb der Transformationstemperatur ist das Glas ein elastischer

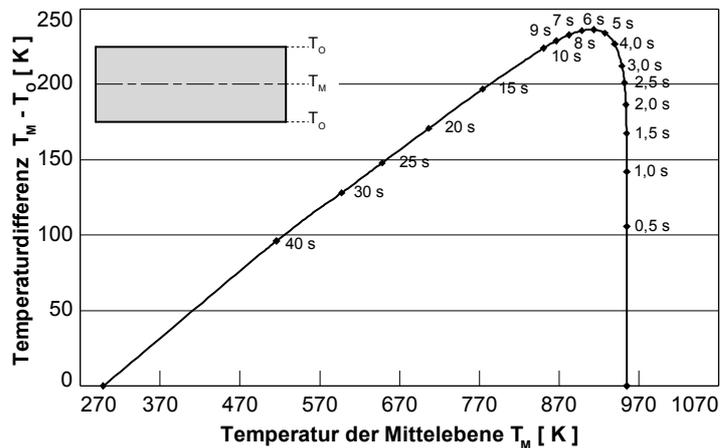
<sup>132</sup> Vergleiche Laufs 2000, Seite 17.

Festkörper. In diesem Zustand finden keine Relaxationsvorgänge statt<sup>133</sup>, und der eigentliche, wesentliche Spannungsaufbau erfolgt. Im Zwischenbereich liegt das Glas in einem viskoelastischen Zustand vor. In diesem werden die Relaxationsvorgänge maßgeblich durch die Änderung der Temperatur und Viskosität beeinflusst. Auf diese Vorgänge wird in den Abschnitten 3.3.2 und 3.3.3 zur Spannungs- und Strukturrelaxation genauer eingegangen. Aus diesem Bereich resultieren in Abhängigkeit der Abkühlgeschwindigkeit bleibende Spannungen.

Thermisch vorgespanntes Glas wird durch eine rasche Abkühlung der Oberflächen von erhitzten Scheiben erzielt. Die Aufheiztemperatur der Scheibe liegt etwa 100 K oberhalb der Transformationstemperatur  $T_g$  des Glases.

**Bild 19** Temperaturdifferenz zwischen Kern ( $T_M$ ) und Oberfläche ( $T_O$ ) im Verhältnis zur Kerntemperatur

$$\begin{aligned} d_{gl} &= 7,18 \text{ mm} \\ \alpha_k &= 349 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)} \\ T_0 &= 958 \text{ K / } 685 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_L &= 302 \text{ K / } 29 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$



Durch das Anblasen kühlt die Oberfläche zunächst schneller aus als der Kern bis je nach Ansatz der thermischen Eigenschaften zu einer maximalen Temperaturdifferenz von 250 K zwischen Kern und Oberfläche, abhängig vom Wärmeübergangskoeffizienten und der Temperaturleitfähigkeit.<sup>134</sup> Während die Oberfläche direkt gekühlt wird und sofort ihre Wärme überträgt, kann die Wärme aus dem Kern nur durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung abgeführt werden.

<sup>133</sup> Vergleiche Blank 1979-1, Seite 5 f.

<sup>134</sup> Ebenda, Seite 3. Das Diagramm wurde basierend auf den gegebenen thermischen und geometrischen Randbedingungen neu berechnet, unter Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit der beteiligten Parameter. Eine kritische Diskussion dieses Ansatzes erfolgt in Abschnitt 3.3.1 und 6.1.3.

Der Aufbau der maximalen Temperaturdifferenz erfolgt etwa in den ersten sechs Sekunden nach dem Beginn des Anblasens. Diese resultiert in unterschiedlichen Kontraktionen der einzelnen Scheibenebenen, wobei sich die oberflächennahen Schichten stärker kontrahieren als die im Kern. Dadurch bauen sich anfänglich Zugspannungen an der Oberfläche auf, die mit Druckspannungen im Scheibeninneren im Gleichgewicht stehen. Ein signifikanter Spannungsaufbau ergibt sich auf Grund von Relaxationsvorgängen oberhalb der Einfriertemperatur<sup>135</sup>  $T_E$  im viskoelastischen Bereich nicht. Die Viskosität des Glases ist zur Einstellung neuer thermodynamischer Gleichgewichte niedrig genug.

Etwa sechs Sekunden nach Abkühlungsbeginn kühlen sich Oberflächen und Kern gleichschnell ab, dann nimmt die Abkühlrate des Kerns gegenüber der Oberfläche zu, und die Temperaturdifferenz wird bis zum Erreichen der Endtemperatur kontinuierlich abgebaut. Ab der Abkühlungsgeschwindigkeitsumkehrung ziehen sich die Schichten im Kern stärker zusammen als die in den Oberflächen. Dadurch bauen sich Zugspannungen im Kern und Druckspannungen an den Oberflächen auf. Erfolgt die Abkühlungsgeschwindigkeitsumkehrung noch oberhalb der Einfriertemperatur  $T_E$  im viskoelastischen Bereich, werden die anfänglichen Zugspannungen in den Oberflächen durch Relaxationsvorgänge abgebaut. Für die Erzielung der gewünschten Vorspannung ist die Starttemperatur daher von großer Bedeutung. Wird die Aufheiztemperatur zu niedrig gewählt, ergibt sich eine zu kurze Verweilzeit im viskoelastischen Bereich mit der Folge, dass die anfänglichen Zugspannungen in den Oberflächen bei Unterschreitung der Einfriertemperatur  $T_E$  noch nicht vollständig abgebaut sind. Die gewünschte Vorspannung stellt sich nicht ein.

Unterhalb der Einfriertemperatur  $T_E$  steigt die Viskosität so stark an, dass sich kein neuer thermodynamischer Gleichgewichtszustand in der zur Verfügung stehenden Zeit ein-

<sup>135</sup> Nach Jenkel 1953, Seite 64, ist die „Einfriertemperatur  $T_E$  die Temperatur, bei der „der Ausdehnungskoeffizient und die spezifische Wärme sich fast sprunghaft ändern. In der Kunststoffindustrie wird die Transformationstemperatur  $T_g$  häufig mit dieser gleichgesetzt. Nach Blank 1979-1, Seite 3, sind  $T_g$  und  $T_E$  zwei verschiedene Größen.

stellen kann.<sup>136</sup> Die gegenwärtige molekulare Struktur des Glases wird eingefroren. Daher spricht man beim Glas von einer unterkühlten Flüssigkeit, weil kein thermodynamischer Gleichgewichts-, sondern ein strukturell metastabiler Zustand vorliegt. Das Glas besitzt eine strukturelle Ordnung, die nicht der vorliegenden Temperatur, sondern einer je nach Abkühlgeschwindigkeit höheren entspricht. In diesem Bereich stellt sich der eigentliche und gewollte Druckspannungsaufbau an den Oberflächen ein. Zugspannungen im Kern sind wegen der dort vorliegenden kleineren Defekte beziehungsweise der Aufweitung von zwei Rissspitzen nicht weiter erheblich. Es kann dort von einer höheren Festigkeit ausgegangen werden. Allerdings wird die maximale Druckvorspannung in den Oberflächen durch die Überlagerung der Zugspannungen mit den im Kern vorliegenden strukturellen Defekten in Form von Kerben, Rissen oder Einschlüssen begrenzt.<sup>137</sup>

### 3.3 Mechanik der thermischen Vorspannung

Mathematisch beschreibbare Erklärungen für den Vorgang der Vorspannung und die Vorhersage der Größe der Vorspannung bei Kenntnis der wesentlichen Parameter sind schon lange Gegenstand der Forschung.<sup>138</sup> Die verschiedenen Modelle wurden auf Grund gewisser Unzulänglichkeiten immer weiter verfeinert<sup>139</sup>, aber an den prinzipiellen Grundlagen und der generellen Vorgehensweise hat sich nichts geändert. Zur Berechnung der Vorspannung müssen die folgenden thermischen und mechanischen Randbedingungen bekannt sein beziehungsweise korrekt abgebildet werden:

- Temperaturverlauf über den Querschnitt zu jedem Zeitpunkt,
- Spannungsrelaxation und
- Strukturrelaxation.

Für Relaxationsvorgänge werden in dieser Arbeit die qualitativen Grundlagen ohne mathematische Herleitung erläutert.

<sup>136</sup> Rheologisch formuliert bedeutet dieses einen hohen Anstieg der Relaxationszeit im Verhältnis zur realen Zeit.

<sup>137</sup> Vergleiche Kiefer 1984, Seite 224, und Kiefer 1987, Seite 33.

<sup>138</sup> Vergleiche Tool 1946.

<sup>139</sup> Vergleiche Narayanaswamy 2001.

Eine zusammenfassende, mathematische Beschreibung der Vorgänge und die Implementierung der entsprechenden Gleichungen in ein Finite-Element-Programm kann der Fachliteratur entnommen werden.<sup>140</sup> Wesentliche Einflussparameter zur Steuerung des Vorspanngrades sind die Glasstärke, die Anfangstemperatur und von ganz entscheidender Bedeutung die Wärmeübergangszahl vom Glas auf das kühlende Medium. Darüber hinaus ist zur Beschreibung des Temperaturprofils die Temperaturleitfähigkeit  $a$  erforderlich. Allerdings wurde in Veröffentlichungen diese als konstant über den relevanten Temperaturbereich vorausgesetzt, was nicht gerechtfertigt erscheint.<sup>141</sup> Ein Strahlungsaustausch der aufgeheizten Scheibe mit der Umgebung wird ebenso wie ein nicht konstantes Temperaturprofil am Ende des Aufheizvorgangs vernachlässigt.

### 3.3.1 Temperaturverlauf

Durch das Anblasen mit Luft einer bestimmten Temperatur gibt die Oberfläche Wärme an das Kühlmedium durch konvektiven Wärmeübergang ab. Der für diesen Vorgang wesentliche Parameter ist die Wärmeübergangszahl (oder auch Wärmeübergangskoeffizient)  $\alpha_K$ .<sup>142</sup> Bei natürlicher Konvektion, das heißt, wenn das Glas kontrolliert bei normaler Umgebung abkühlt, ist  $\alpha_K \approx 12,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Beim Anblasen mit Luft liegt  $\alpha_K$  bei maximal  $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , beim Tauchen in Flüssigkeiten ist  $\alpha_K$  noch eine Potenz größer.<sup>143</sup>

Innerhalb eines opaken<sup>144</sup> Festkörpers erfolgt der Wärmetransport durch Wärmeleitung auf Grund des Temperaturgradienten zwischen dem Kern und der Oberfläche. Der Temperaturverlauf ist zu jedem Zeitpunkt und für jeden Ort des Querschnitts berechenbar. Physikalisch liegt ein zeitlich veränderliches (instationäres) Temperaturfeld ohne Wärme-

<sup>140</sup> Vergleiche Laufs 2000, Loch 1994, Schneider 2001.

<sup>141</sup> Vergleiche Blank 1979-1, Seite 3, Laufs 2000, Seiten 24 ff., Schneider 2001, Seite 28 und Abschnitt 2.3.2.

<sup>142</sup> Der Index und die Bezeichnung des Wärmeübergangskoeffizienten variiert in der Literatur. In dieser Arbeit wird immer K als Index für Konvektion verwendet, auch wenn sich der Wärmeübergang aus mehreren Einzelvorgängen wie Konvektion und Strahlung zusammensetzt.

<sup>143</sup> Vergleiche Kiefer 1984, Seite 228, und Kiefer 1987, Seite 41 und Schneider 2001, Seite 28.

<sup>144</sup> Opak heißt wellenlängenabhängige Undurchlässigkeit des Werkstoffs für Strahlung.

quellen vor. Mathematisch wird der Fall durch die Fouriersche Differentialgleichung der Wärmeleitung ausgedrückt:

**Gleichung 16**

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{c_p \cdot \rho} \cdot \nabla^2 T = a \cdot \nabla^2 T .$$

$\lambda_{\text{eff}}$  effektive Wärmeleitfähigkeit [ W/(m·K) ]  
 $c_p$  spezifische Wärmekapazität [ J/(kg·K) ]  
 $\rho$  Dichte [ kg/m<sup>3</sup> ]  
 $a$  Temperaturleitfähigkeit [ mm<sup>2</sup>/s ]

Diese Differentialgleichung kann mit geeigneten Ansatzfunktionen und Randbedingungen mit einer sehr großen Genauigkeit unter Berücksichtigung konstanter thermischer Parameter gelöst werden (lineare Berechnung).<sup>145</sup>

**Gleichung 17**

$$T(x, t) = 2 \cdot (T_0 - T_L) \sum \frac{\sin \delta_k}{\delta_k + \sin \delta_k \cos \delta_k} \cdot e^{\delta_k \cdot \frac{4 \cdot a \cdot t}{d^2}} \cdot \cos(\delta_k \cdot \frac{2 \cdot z}{d})$$

$\delta_k$  Werte der transzendenten Funktion [ / ]  
 $T_0$  Aufheiztemperatur [ K ]  
 $T_L$  Temperatur des Kühlmediums [ K ]  
 $d$  Dicke des Glases [ mm ]  
 $z$  Laufvariable über die Dicke des Glases [ mm ]

Die Werte der sich ergebenden transzendenten Gleichung können Tafeln entnommen oder berechnet werden.

**Gleichung 18**

$$\cot \delta_k = 2 \cdot \frac{\delta_k \cdot \lambda_{\text{eff}}}{\alpha_K \cdot d}$$

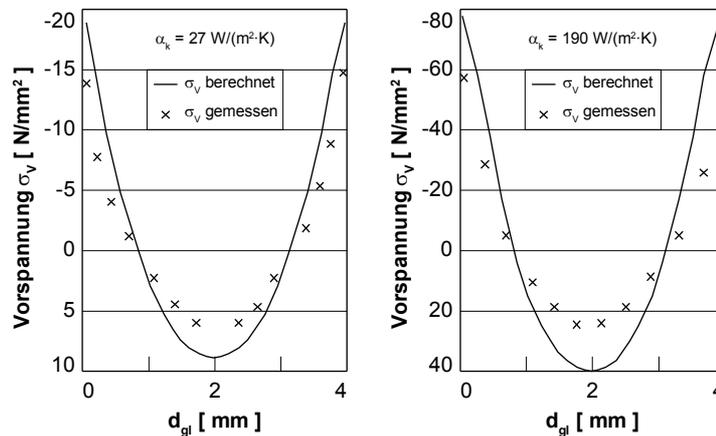
$\alpha_K$  Wärmeübergangskoeffizient [ W/(m<sup>2</sup>·K) ]

Bei dieser Betrachtung wird ein Wärmetransport durch Strahlung vernachlässigt. Dieses ist für opake Materialien ein zutreffender Ansatz, allerdings ergeben sich bei transparenten oder diathermanen<sup>146</sup> Werkstoffen abweichende Temperaturverteilungen. Dadurch, dass Wärmestrahlung bei transparenten Materialien im Gegensatz zu opaken eine Erscheinung des Kontinuums und nicht nur der Oberflächen

<sup>145</sup> Zur Lösung der Fourierschen Differentialgleichung ergeben sich zwei geometrische und eine zeitliche Grenzbedingung sowie drei Ansatzfunktion als Sinus-, Kosinus- und Exponentialfunktion. Damit ist das Problem sehr genau lösbar. Vergleiche Gröber 1988, Seiten 44 ff.

<sup>146</sup> Diatherman heißt durchlässig für Wärmestrahlung. Das trifft für Glas nicht vollständig zu, da Glas langwellige Infrarotstrahlung absorbiert.

ist<sup>147</sup>, wird Wärme zum Teil direkt aus inneren Bereichen in die Umgebung abgegeben. Ein anderer Teil der Strahlung wird wieder vom Glas absorbiert beziehungsweise an der Grenzfläche zur Umwelt reflektiert. Diese Vorgänge bewirken, dass der Temperaturverlauf mit dem entsprechenden maximalen Gradienten zwischen Kern und Oberfläche, wie er sich aus der Fourierschen DGL ergibt, zu einem bestimmten Teil geglättet und ausgeglichen wird. Ein kompletter Ausgleich ergibt sich nicht, der maximale Gradient zwischen Kern und Oberfläche nimmt aber ab. Zwischen dem Temperatur- und Eigenspannungsprofil kann von einem proportionalen Zusammenhang ausgegangen werden.<sup>148</sup> Spannungsberechnungen mit der FEM zeigen einen Unterschied zwischen gemessenen und berechneten Spannungen.<sup>149</sup>



**Bild 20** Unterschiede in den gemessenen und berechneten Spannungsprofilen

Die Kreuze markieren die Ergebnisse spannungsoptischer Untersuchungen

Die gemessenen Spannungsprofile fallen völliger als nach der Berechnung aus, welche einen spitzen Verlauf zeigen. Die Spannungsberechnung wurde mit einem Temperaturverlauf unter Ausschluss der Wärmestrahlung mit konstanten thermischen Parametern vorgenommen. Daher können die Unterschiede neben Unsicherheiten in den zu Grunde gelegten Material- und Berechnungsparametern auch aus einem nicht zutreffenden Temperaturprofil stammen.<sup>150</sup>

<sup>147</sup> Vergleiche Gardon 1956, Seite 279, Gardon 1958, Seite 202, Field 1990, Seite 2047.

<sup>148</sup> Vergleiche Blank 1979-1, Seite 6, Kiefer 1984, Seite 224, Kiefer 1987, Seite 33 und Weißmann 1989, Seite III/19.

<sup>149</sup> Vergleiche Oel 1984, Seite 5.

<sup>150</sup> Diese Annahme wird von Oel 1984, Seite 6 nicht geteilt. Danach besitzt die Variation der Temperaturleitfähigkeit eine untergeordnete Wirkung auf die Ergebnisse.

In der Fourierschen Differentialgleichung ist ein Wärmetransport durch Strahlung nicht enthalten. Dieser Sachverhalt wurde unter Beachtung von Emission, Absorption und Remission innerhalb des Glasvolumens genauer untersucht. Bezieht man die Wärmestrahlung in die Gesamtbilanz der Wärmeübertragung ein, wird die Fouriersche Differentialgleichung der Wärmeleitung entsprechend um den Anteil der Wärmestrahlung erweitert.<sup>151</sup>

**Gleichung 19**

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial F}{\partial z}$$

Die Gleichung 19 ist schon auf den eindimensionalen Fall des Wärmetransports über die Dicke der Scheibe bezogen. Eine Berücksichtigung der Strahlungsverhältnisse ist komplex und erfordert eine genaue Kenntnis der strahlungsoptischen, in der Regel wellenlängenabhängigen Parameter. Da die Arbeit nicht primär die thermodynamische Beschreibung des Vorspannprozesses behandelt, wird an dieser Stelle auf eine weitere Ausführung verzichtet. Stattdessen wird zur Erfassung der Wärmestrahlung mit der temperaturabhängigen Strahlungsleitfähigkeit gerechnet. Dieser Ansatz ist gerechtfertigt, da die zu Grunde liegenden Werte aus Ergebnissen experimenteller Untersuchungen stammen.<sup>152</sup>

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Unterschiede der Temperaturverteilung mit und ohne Berücksichtigung der Strahlung untersucht.<sup>153</sup> Ein wesentliches Ergebnis besteht in dem Nachweis, dass die maximalen Temperaturgradienten zwischen Kern und Oberfläche bei transparenten Materialien auf Grund des Temperatenausgleichs durch Strahlung bei gleicher Wärmeübergangszahl geringer als bei opaken Werkstoffen ist. Somit ist es ersichtlich, dass dieses bei Bauteilen mit unterschiedlichen optischen und strahlungstechnischen Eigenschaften in seiner Fläche zu unterschiedlichen Temperaturverteilungen in dieser führen wird. Dieses erscheint ursächlich für den Aufbau von Zwangspannungen in emaillierten Gläsern und ist Gegenstand vertiefter Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit. Ebenso werden conse-

<sup>151</sup> Vergleiche Field 1990, Seite 226.

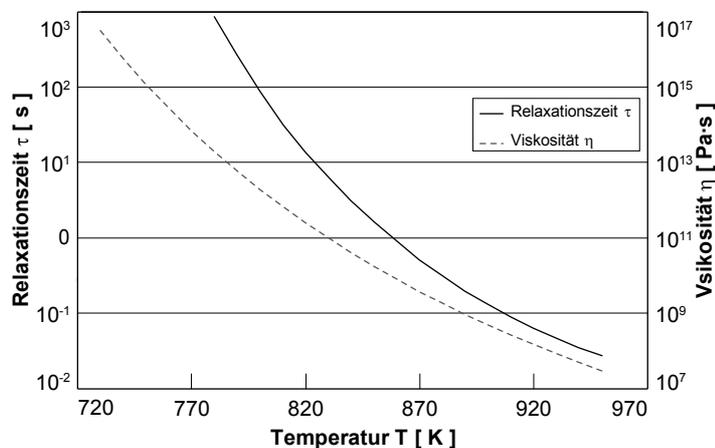
<sup>152</sup> Die Werte für die Strahlungsleitfähigkeit stammen aus Blazek 1976. Eine detaillierte Betrachtung erfolgt in Abschnitt 2.3.2.

<sup>153</sup> Vergleiche Abschnitt 6.1.3.

quent bei allen Simulationen – sofern es sich nicht um eine Modellvalidierung handelt – die erforderlichen Materialparameter als temperaturabhängig berücksichtigt. Somit ist zumindest unter Annahme einer gleichmäßigen Aufheizung über die Glasdicke eine sehr realitätsnahe Berechnung des transienten Temperaturfelds möglich.

### 3.3.2 Spannungsrelaxation

Bei einer äußeren Einwirkung mit einer Kraft oder Dehnung reagiert ein Körper mit einer Antwort in Form von Verformungen oder Spannungen. Ein elastischer Körper begegnet diesem dabei sofort ohne zeitliche Verzögerung mit einer Einstellung eines neuen Kraft-, Spannungs- oder Dehnungsgleichgewichtszustands. Relaxation tritt nicht auf. Ebenso stellt sich ein solches Gleichgewicht nahezu sofort bei niedrigviskosen Stoffen ein. Der diesen Vorgang kennzeichnende Parameter ist die Relaxationszeit  $\tau$ , die proportional zur Viskosität des Stoffes ist (vergleiche Gleichung 10). Je höher die Temperatur, das heißt, je niedriger die Viskosität, desto schneller verlaufen die Relaxationsvorgänge. Bei niedrigviskosem Materialverhalten ist die Relaxationszeit gering gegenüber der realen Versuchszeit.<sup>154</sup>



**Bild 21** Relaxationszeiten bei Schubspannungsrelaxation und Viskosität basierend auf der VFT-Gleichung

Viskoelastische Materialien dagegen besitzen Relaxationszeiten in einem weiten Intervall von sehr geringen Zeiträumen bis sehr langen. Auf Grund des Zusammenhangs des Schubmoduls mit der Viskosität lassen sich die Relaxations-

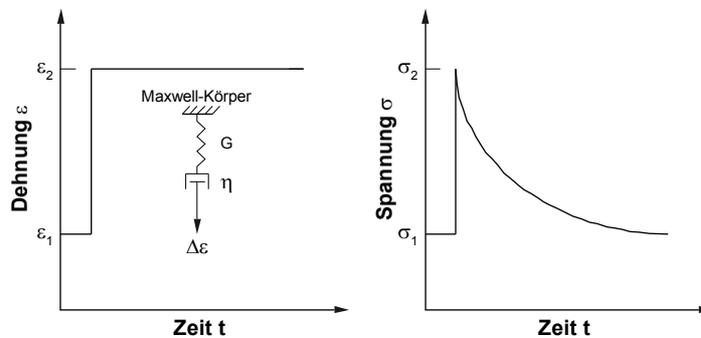
<sup>154</sup> Wasser als Newtonsche Flüssigkeit besitzt eine Relaxationszeit von  $\tau = 10^{-12}$  s. Daher stellt sich dort bei äußerer Einwirkung ein neues Gleichgewicht im Prinzip sofort ein. Vergleiche Scholze 1988, Seite 43.

zeiten in Abhängigkeit der Viskosität darstellen. Für das Diagramm wurde abweichend von Gleichung 10, Seite 30 der Schubmodul als temperaturabhängig berücksichtigt.<sup>155</sup>

Das rheologische Modell zur Beschreibung der Viskoelastizität ist der Maxwell-Körper, bestehend aus einer mit einem Dämpfer in Reihe geschalteten Feder. Die Feder bildet dabei den Anteil der sofortigen Formänderung bei einer äußeren Einwirkung ab, der Dämpfer den zeitlich verzögerten Anteil. Der Körper antwortet mit resultierenden Spannungen, die mit exponentieller Abnahme auf Grund von Schubspannungsrelaxation einem Endwert zustreben.

**Bild 22** Schubspannungsrelaxation bei viskosen Materialverhalten nach einem Dehnungssprung

Die Volumenrelaxation lässt sich mit einem linearen Standardkörper abbilden.



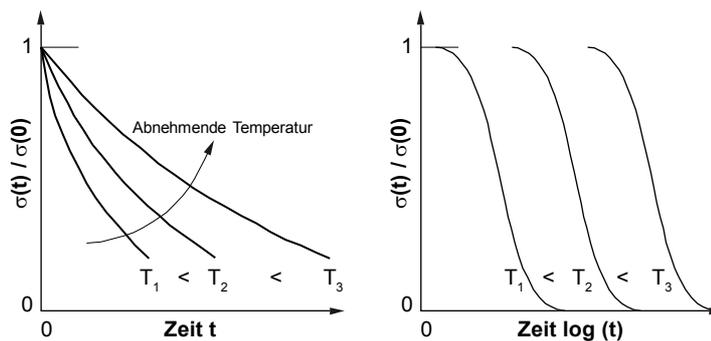
Allerdings lassen sich vorhandene Ergebnisse aus Versuchen an Glas nicht mit einem einfachen Maxwell-Ansatz abbilden. Daher wird zur Beschreibung der Schubspannungsrelaxation im Glas eine Summe von gewichteten Relaxationsfunktionen mit unterschiedlichen Relaxationszeiten verwendet. Im Modell entspricht dieses einer bestimmten Anzahl von parallel geschalteten Maxwell-Körpern.<sup>156</sup> Die Temperaturabhängigkeit der Relaxationszeit über die Viskosität ist bei diesem Ansatz auf Grund der direkten, experimentellen Ermittlung der Relaxationszeiten erfasst.

Bei der kontinuierlichen Abkühlung des Glases wird nicht einmalig ein neuer Dehnungszustand aufgebracht, sondern mit jedem infinitesimalen Zeitschritt ändert sich die äußere

<sup>155</sup> Die Daten zur VFT-Gleichung stammen aus Öksoy 1994, Seite 192, Tabelle 5, Glas 2. Die Daten des temperaturabhängigen E-Moduls ergeben sich aus McGraw 1952, Seite 27. Die Querkontraktionszahl wurde als konstant angenommen.

<sup>156</sup> In der Regel reichen sechs verschiedene Relaxationszeiten aus, wobei die kürzeste und die längste Relaxationszeit im Verhältnis von etwa  $10^4$  stehen sollten. Vergleiche Carré 1999, Seite 915, Laufs 2000, Seite 32, Schneider 2001, Seiten 31 ff.

Beanspruchung auf Grund anderer Temperaturen und daraus anderer Dehnungen. Es müssen daher viele inkrementelle Dehnungszuwächse superponiert werden. Die Überlagerung von verschiedenen Relaxationsvorgängen auf Grund veränderlicher Spannungs- und Dehnungszustände wurde von Boltzmann formuliert. Das Ergebnis der Überlagerung von kontinuierlich veränderlichen Dehnungsverläufen führt zum Boltzmannschen Faltungsintegral.



**Bild 23** Thermorheologische Einfachheit bei Glas

Trägt man verschiedene Relaxationsfunktionen bei unterschiedlichen Temperaturen einfach-logarithmisch auf, so ergeben sich gleichartige Kurven, die entlang der logarithmierten Zeitachse verschoben sind. Dieser Effekt wird thermorheologische Einfachheit genannt und erlaubt die Rückführung aller Relaxationsfunktionen auf eine Hauptkurve mittels einer Verschiebungsfunktion. Die Referenztemperatur  $T_r$  der Hauptkurve ist zunächst frei wählbar, sollte aber im viskoelastischen Übergangsbereich liegen. Die tatsächlichen Relaxationszeiten sind dann ein Vielfaches der Hauptkurve. Mit dem Verhältnis aus tatsächlicher Relaxationszeit  $\tau$  und Relaxationszeit  $\tau_r$  der Hauptkurve kann die tatsächliche Zeit  $t$  aus der reduzierten Zeit  $\xi$  berechnet werden. „Die reduzierte Zeit  $\xi$  ist also die Zeit, die das Material bei  $T_r$  benötigen würde, um im gleichen Maße zu relaxieren wie dasselbe Material zur Zeit  $t$  bei der Temperatur  $T$ .“<sup>157</sup> Unter Berücksichtigung der  $n$ -fachen Maxwell-Körper, der kontinuierlichen Dehnungsaufbringung und der thermorheologischen Einfachheit kann die Spannungsrelaxation in drei Gleichungen zusammengefasst werden.<sup>158</sup>

<sup>157</sup> Aus Schneider 2001, Seite 38.

<sup>158</sup> Vergleiche Loch 1994, Seite 14.

$$\sigma(t) = \int_0^t G(\xi(t) - \xi(t')) \cdot \dot{\varepsilon}(t') dt' \quad \text{mit}$$

$$G(t) = \sum_{k=1}^n \omega_k \cdot e^{-\frac{t}{\tau_k}} \quad \text{und} \quad \sum_{k=1}^n \omega_k = 1.$$

$\sigma(t)$  Spannung zum Zeitpunkt  $t$  [ N/mm<sup>2</sup> ]

$\dot{\varepsilon}(t')$  Inkrementeller Dehnungssprung zum Zeitpunkt  $t'$  [ / ]

$\tau_k$  Relaxationszeiten [ s ]

$\omega_k$  Wichtungsfaktoren der Relaxationsfunktionen [ / ]

$\xi$  reduzierte Zeit [ / ]

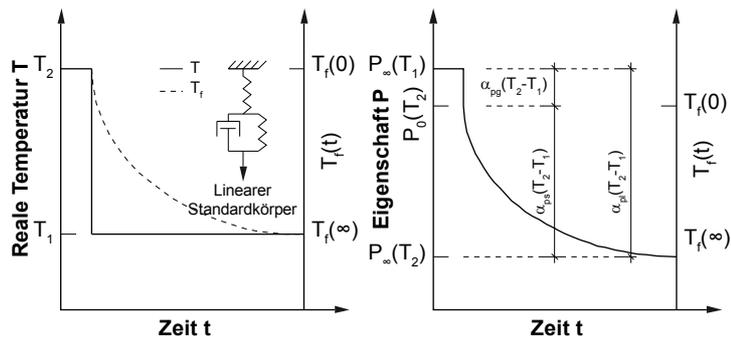
Für den Kompressionsmodul ergibt sich ein analoger Vorgang, nur betragen die Wichtungsfaktoren und Relaxationszeiten andere Werte. In einer numerischen Simulation viskoelastischen Materialverhaltens müssen beide Parametersätze bekannt sein.

Dehnungssprünge resultieren aus den infinitesimalen, transienten Temperaturänderungen. Allerdings sind diese Dehnungssprünge, die dann zur Spannungsrelaxation führen, nicht einfach das Ergebnis der Temperaturdifferenz und des Ausdehnungskoeffizienten wie bei einem einfachen elastischen Werkstoff. Vielmehr liefert die Strukturrelaxation einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zur effektiven Größe dieses Dehnungssprungs. Für die Strukturrelaxation ergeben sich analoge Verfahren und Verhältnisse wie für die Schubspannungsrelaxation.

### 3.3.3 Strukturrelaxation

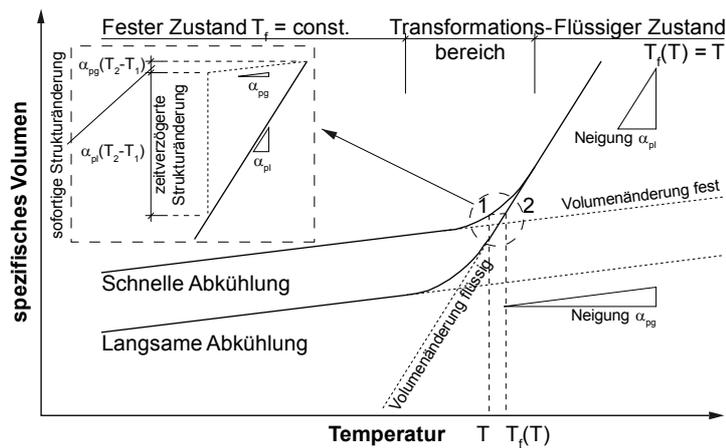
Eine Abkühlung des Glases korreliert immer mit einer Veränderung der Struktur, das heißt, bei veränderten Temperaturen stellt sich ein neues strukturelles Gleichgewicht ein. Die Zeit, bis das neue Gleichgewicht vollständig erreicht ist, ist vergleichbar mit einer Relaxationszeit, hier nur für strukturelle Veränderungen. Diese Relaxationszeit  $\lambda_p$  ist aber neben der Viskosität und daher der Temperatur auch noch vom Stabilisierungsgrad der Schmelze abhängig.<sup>159</sup>

<sup>159</sup> Vergleiche Moynihan 1991, Seite 420.



**Bild 24** Strukturrelaxation nach einem Temperatursprung

Das zu Grunde liegende rheologische Modell besteht aus dem linearem Standardkörper mit einem parallelen Feder- und Dämpferelement (Kelvin-Voigt-Element), die mit einer weiteren Feder in Reihe geschaltet sind.<sup>160</sup> Beim volumenändernden Vorgang der Strukturrelaxation kann neben dem hydrostatischen Spannungszustand eine äußere Belastung auch in einem Temperatursprung bestehen.<sup>161</sup>



**Bild 25** Abhängigkeit einer physikalischen Eigenschaft p (hier spezifisches Volumen) von der Temperatur T

Der Stabilisierungsgrad lässt sich mit dem Modell der fiktiven Temperatur beschreiben. Kühlt man ein Glas schlagartig ab<sup>162</sup>, befindet sich die Struktur nicht bei der aktuellen Temperatur T am Punkt 1 im Gleichgewicht, sondern bei einer fiktiven Temperatur  $T_f$  am Punkt 2. Die zunehmende Viskosität verhindert, dass sich das Glas auf einen neuen struktu-

<sup>160</sup> Die Reihenschaltung einer Feder mit einem Kelvin-Voigt-Element ist gleichwertig einer Parallelschaltung des Maxwell-Körpers mit einer Feder. Vergleiche Gross 2011, Seite 339.

<sup>161</sup> Vergleiche Loch 1994, Seite 16 und Laufs 2000, Seite 39.

<sup>162</sup> Der Wert von  $T_g$  hängt von der Abkühlgeschwindigkeit ab. Je größer die Abkühlung desto höher ist die Temperatur  $T_g$ . Dieses wird durch die zwei Abkühlkurven im Diagramm dargestellt.

rellen Zustand einstellen kann. Das Verhältnis zwischen aktueller und fiktiver Temperatur stellt den Stabilisierungsgrad dar, das heißt, wie stark sich die gekühlte Schmelze dem neuen Gleichgewicht angeglichen hat. Die Relaxationszeit  $\lambda_p$  hängt vom Stabilisierungsgrad derart ab, dass sich bei einer Temperaturerhöhung die Relaxationszeiten verkürzen werden, je mehr sich  $T_f$  an  $T$  annähert, das heißt, je höher der Stabilisierungsgrad ist. Bei einer Abkühlung werden sich die Relaxationszeiten vergrößern. Dieser Effekt wird auf die Abhängigkeit der Viskosität von dem aktuellen strukturellen Zustand und somit der fiktiven Temperatur zurückgeführt. Mit abnehmender Viskosität nimmt die Beweglichkeit der Molekülteilchen zu. Somit können diese sich dann schneller neu ordnen. Die Viskosität wird mit einer modifizierten Arrhenius-Gleichung erfasst, in der der strukturelle Anteil über eine Erweiterung des Exponenten mit der fiktiven Temperatur berücksichtigt wird (Gleichung 8).

Wie bei der Schubspannungsrelaxation lassen sich auch bei der Strukturrelaxation die Relaxationsfunktionen auf eine Hauptkurve zurückführen. Allerdings ist die Hauptkurve davon abhängig, welche Eigenschaft gerade betrachtet wird. Eine Übertragung einer für den Brechungsindex ermittelten Hauptkurve auf die thermische Längenausdehnung würde zu nicht zutreffenden Ergebnissen führen. Trotzdem kann ebenfalls eine reduzierte Zeit  $\xi$  für die Strukturrelaxation eingeführt werden.

Ebenso sind bei der Strukturrelaxation die Zusammenhänge komplexer, als dass sie nur mit einer Relaxationsfunktion beschrieben werden könnte. Auch hier wird auf eine Summe von gewichteten Funktionen zurückgegriffen, wobei die Relaxationszeiten gegenüber der Spannungsrelaxation um den Faktor 9 – 20 größer sind. Daher leistet die Strukturrelaxation auch deutlich oberhalb von  $T_g$  einen wesentlichen Beitrag zum Spannungsaufbau. Die Strukturrelaxation kann in drei Gleichungen zusammengefasst werden.<sup>163</sup>

<sup>163</sup> Vergleiche Loch 1994, Seite 21.

$$\dot{\varepsilon}_T(t) = \alpha_{pg} \cdot \dot{T}(t) + (\alpha_{pl} - \alpha_{pg}) \cdot \dot{T}_f(t) \quad \text{mit}$$

$$T_f(t) = \sum_{k=1}^n v_k \cdot T_{fk}(t) \quad \text{und} \quad \sum_{k=1}^n v_k = 1.$$

Gleichung 21

$\dot{\varepsilon}_T(t)$  Thermischer Dehnungssprung zum Zeitpunkt  $t$  [ / ]

$\dot{T}(t)$  Sprung der Temperatur zum Zeitpunkt  $t$  [ K ]

$\dot{T}_f(t)$  Sprung der fiktiven Temperatur zum Zeitpunkt  $t$  [ K ]

$\alpha_{pl}$  Wert der Eigenschaft  $p$  in der Schmelze [ / ]

$\alpha_{pg}$  Wert der Eigenschaft  $p$  im glasigen Festkörper [ / ]

$T_{fk}$  Fiktive Temperatur der  $k$ -ten Funktion [ K ]

$v_k$  Wichtungsfaktoren der Relaxationsfunktionen [ / ]

Dabei stellt der erste Term der Dehnungsgleichung den reinen elastischen Anteil aus Temperaturdifferenz und Ausdehnungskoeffizient dar. Der zweite Term ergibt sich aus dem viskoelastischen Materialverhalten unter Beachtung der Strukturrelaxation.

### 3.3.4 Zusammenfassung und Spannungsverlauf

Zur Simulation der thermischen Vorspannung sind die beschriebenen Vorgänge unbedingt zu erfassen. Ohne Relaxationsvorgänge oder Viskoelastizität von Glas gäbe es keine thermische Vorspannung. Aus den Bedingungen lässt sich auch ableiten, dass es eine Sättigungstemperatur geben muss, ab der eine weitere Zunahme der Aufheiztemperatur keine Veränderungen mehr im Wert der Vorspannung bewirkt. Oberhalb des Transformationsbereichs relaxieren aufgebrauchte Dehnungen in Abhängigkeit der Viskosität. Zum einen muss daher die Starttemperatur hoch genug sein, damit die anfänglichen Zugspannungen vollständig relaxieren. Zum anderen relaxieren bei einer sehr hohen Temperatur ebenfalls die gewollten Druckspannungen nach der Vorzeichenumkehrung. Somit gibt es eine optimale Starttemperatur, bei der die anfänglichen Zugspannungen nach Verlassen des viskoelastischen Bereichs gerade relaxiert sind.

Der Verlauf der Eigenspannungen lässt sich mit einem parabol-förmigen Ansatz hinreichend genau annähern. Allerdings besteht hinsichtlich des Exponenten Uneinigkeit. Vereinfacht wird an einigen Stellen ein Exponent von  $n = 2,00$

angegeben<sup>164</sup>, obwohl genauere Untersuchungen den Wert des Exponenten mit  $n = 2,20$  ergeben haben. Diese Abweichung wird mit Dichteunterschieden in oberflächennahen Bereichen qualitativ und quantitativ erklärt.<sup>165</sup> Durch das schnellere Abkühlen der Oberflächen im Gegensatz zum Kern ist die Einfriertemperatur  $T_E$  in den Oberflächen höher, beziehungsweise werden die Relaxationsvorgänge dort schneller gestoppt, das heißt dem System steht weniger Zeit zur Neuordnung zur Verfügung. Somit wird an diesen Stellen der viskoelastische Bereich schneller verlassen. Daraus resultiert eine offenere, eingefrorene Struktur, welche diesen Dichteunterschied erklärt. Der Verlauf der Eigenspannung lässt sich mit Gleichung 22 angeben.<sup>166</sup>

**Gleichung 22**

$$\sigma(z) = C_1 \cdot z^n - C_2$$

$\sigma(z)$  Wert der verteilten Spannung [ N/mm<sup>2</sup> ]

$C_i$  Konstanten

Die Beträge der Druck- und Zugspannungen stehen im Verhältnis von etwa 2,00, das heißt, die Druckvorspannung ist doppelt so groß wie die zum Gleichgewicht notwendige Zugspannung.<sup>167</sup> Unter Beachtung dieses Verhältnisses können die Konstanten nach Gleichung 22 bestimmt, und die Gleichung entsprechend umgeformt werden.<sup>168</sup>

**Gleichung 23**

$$\sigma(\zeta) = \sigma_0 \cdot (1 - 3 \cdot \zeta^n)$$

mit  $\zeta = \frac{2 \cdot z}{d_{gl}}$

$\sigma_M$  Zugspannung in Scheibenmitte [ N/mm<sup>2</sup> ]

$\sigma$  Wert der verteilten Spannung [ N/mm<sup>2</sup> ]

$z$  Laufvariable der Scheibenstärke [ mm ]

$d_{gl}$  Scheibenstärke [ mm ]

Unter der Annahme einer parabelförmigen Eigenspannungsverteilung mit dem Exponenten  $n = 2,00$  ergibt sich

<sup>164</sup> Vergleiche Wörner 2001, Seite 10.

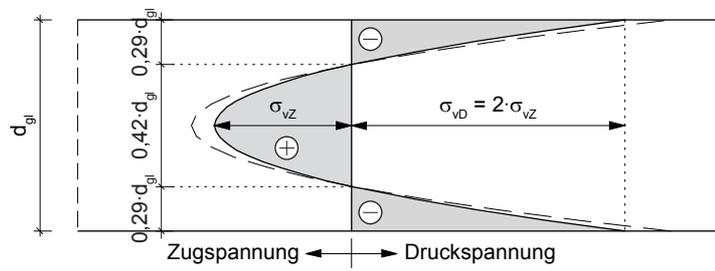
<sup>165</sup> Vergleiche Blank 1979-1, Seite 13.

<sup>166</sup> Ebenda.

<sup>167</sup> Ebenda, Seite 11, Tabellen 5 und 6. Vergleiche auch Warren 2001, Seite 390. Nach Laufs 2000, Seiten 67 ff. ergibt sich ein Verhältnis von 2,20. Das Verhältnis wird im Rahmen der eigenen spannungsoptischen Messungen stets untersucht.

<sup>168</sup> Gleichung nach Wörner 2001, Seite 10 und Warren 2001, Seite 389.

der in Bild 26 dargestellte Verlauf. Der Vollständigkeit halber ist der Verlauf mit  $n = 2,20$  ebenfalls dargestellt.



**Bild 26** Eigenspannungen bei thermisch vorgespannten Gläsern

## 4 Prüfungen und Prüfgeräte – Grundlagen

Zur Bestimmung der tatsächlichen Biegezugfestigkeit emailierter Gläser und ihrer Eigenspannungs- beziehungsweise Zwangsspannungsverteilung müssen zerstörungsfreie und zerstörende Versuche vorgenommen werden. Zur zerstörungsfreien Messung der eingepprägten Eigenspannungen aus planmäßiger Vorspannung und Zwängungen auf Grund des unterschiedlichen Materialverhaltens von Glas und Emaille steht ein Messgerät SCALP-04 des Herstellers GlasStress zur Verfügung. Dieses Gerät arbeitet nach der Streulichtmethode und erlaubt somit die Aufzeichnung eines Spannungsprofils über die Dicke der untersuchten Scheibe.

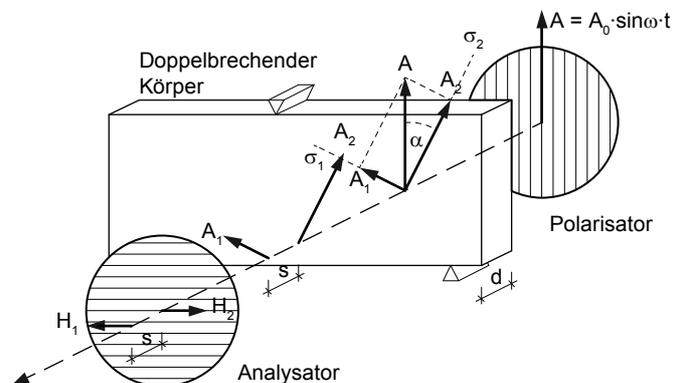
Die Bruchversuche zur Festigkeitsmessungen werden mit einem vom Autor konstruierten Versuchsstand für einen modifizierten Doppelring-Biegeversuch in Anlehnung an DIN EN 1288 vorgenommen.

Auf beide Untersuchungsmethoden und ihre jeweiligen physikalischen und mechanischen Grundlagen beziehungsweise Randbedingungen wird im Folgenden eingegangen.

### 4.1 Optische Untersuchungen

#### 4.1.1 Grundlagen der Spannungsoptik

**Bild 27** Spannungsdoppelbrechung in spannungsoptischen Körpern



Zur Beschreibung der spannungsoptischen Effekte ist zunächst unerheblich, ob monochromatisches oder weißes Licht betrachtet wird.<sup>169</sup> Der Anschaulichkeit halber und we-

<sup>169</sup> Monochromatisches Licht ist Licht mit einer bestimmten Wellenlänge. Weißes Licht dagegen besteht aus elektromagnetischen Wellen des gesamten sichtbaren Spektrums.

gen der häufigen Nutzung von monochromatischem Licht in Form von Lasern wird dieser Fall betrachtet.

Das monochromatische Licht wird zunächst durch einen Polarisator geleitet. Dort wird die Schwingungsrichtung der Welle in eine Richtung ausgerichtet. Anschließend wird der Strahl beim Durchgang durch das Medium spannungsoptisch doppelt gebrochen. Dabei spaltet sich der Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen auf, die in Richtung der Hauptspannungsachsen des ebenen Spannungszustands ausgerichtet sind. Beide Wellen bewegen sich auf Grund der Doppelbrechung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$  weiter fort. Am Ende der Messstrecke  $d$  (in der Regel die Glasdicke) ergibt sich ein Gangunterschied oder eine Phasenverschiebung  $\delta$  zwischen den beiden Wellen, die direkt proportional zur Hauptspannungsdifferenz ist.<sup>170</sup>

$$\delta = \frac{C \cdot d}{\lambda} \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)$$

**Gleichung 24**

- $\delta$  Phasenverschiebung [ / ]  
 $C$  Spannungsoptische Konstante [  $\text{mm}^2/\text{N}$  ]<sup>171</sup>  
 $d$  Messstrecke, Dicke des Prüfkörpers [ mm ]  
 $\lambda$  Wellenlänge des Lichts [ mm ]  
 $\sigma_1 - \sigma_2$  Hauptspannungsdifferenz [  $\text{N}/\text{mm}^2$  ]

Die Gleichung 24 wird als Grundgleichung der Spannungsoptik bezeichnet und bildet die Basis für die folgenden Untersuchungsmethoden.

#### 4.1.2 Streulichtmessungen

Basierend auf der Gleichung 24 sind nur die Hauptspannungsdifferenzen entlang der Messstrecke bestimmbar. Bei Eigenspannungszuständen beträgt die Phasenverschiebung und somit die Hauptspannungsdifferenz aufsummiert über den Messweg Null. Aussagen über die Spannungsverteilung

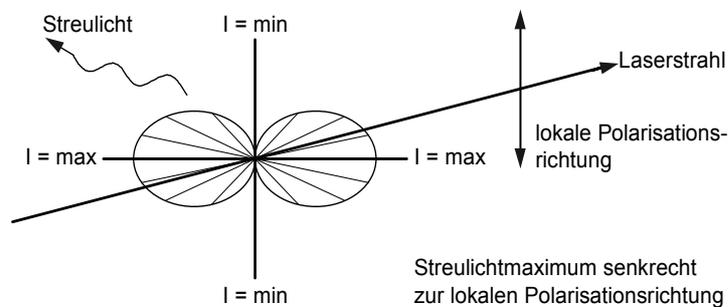
<sup>170</sup> Zu den Grundlagen der Spannungsoptik vergleiche Föppl 1972, Wolf 1976 und Aben 1993.

<sup>171</sup> Abweichend der Nomenklatur nach DIN 52314 zur Bestimmung des spannungsoptischen Koeffizienten wird wie im Schrifttum üblich der Buchstabe „C“ verwendet. Die Größenordnung der spannungsoptischen Konstanten für Kalk-Natronsilikatglas liegt bei  $C = 2,72 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$ .

sind nicht möglich. Dieser Nachteil kann mit der Streulichtmethode<sup>172</sup> vermieden werden.

Die Streulichtmethode basiert auf den physikalischen Grundlagen des Tyndall-Effekts und der Mie-Strahlung<sup>173</sup>. Ein polarisierter Lichtstrahl trifft beim Durchgang durch ein transparentes Medium auf ein Teilchen. Dieses wird in Richtung der Schwingungsebene des Lichts angeregt und sendet dabei eine Welle senkrecht zur Polarisationsrichtung des Primärstrahls aus. Die Intensität ist abhängig von der Beobachtungsrichtung und besitzt bei einer Betrachtung senkrecht zur Schwingungsebene des Primärstrahls sein Maximum. Parallel zur Schwingungsebene ergibt sich kein Streulicht.

**Bild 28** Streulichtintensitätsverteilung senkrecht zum Primärstrahl

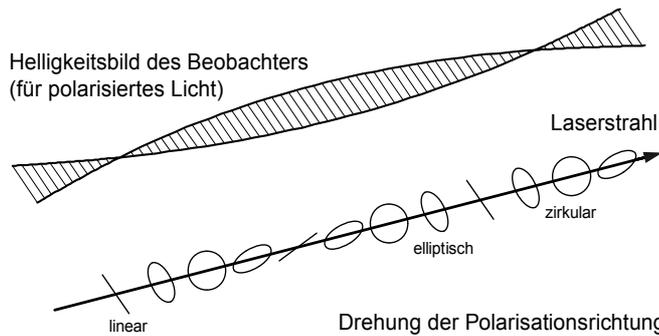


Der Primärstrahl kann über die Kante oder die Fläche in das Glas eingekoppelt werden. Bei einer Beleuchtung über die Fläche muss ein Prisma vorgeschaltet werden, um eine geneigte Einkopplung zu erzielen. Besonders bei großformatigen Scheiben ist dieses die gebräuchliche und geeignete Methode, da bei einer Einkopplung in die Kante über die Weglänge die Intensität des Primärstrahls auf Grund von Absorption und Reflektion abnimmt. Allerdings lässt sich das zu Grunde liegende Prinzip an Hand der Einkopplung über

<sup>172</sup> Die Grundlagen zum Streulichtverfahren als spannungsoptisches Messverfahren wurden bereits 1939 von R.J. Weller gelegt. Durch D.C. Drucker und H.T. Jessop wurde die Theorie hinter diesem Verfahren vervollständigt. Wegen der schwachen Darstellung des Streulichts von normalem Licht war eine Anwendung dieser Methode lange Zeit nicht möglich. Erst mit der Entwicklung des Lasers mit einer hohen Lichtintensität und von hochauflösenden Kameras wurde die Streulichtmethode praktisch anwendbar.

<sup>173</sup> In manchen Veröffentlichungen wird die Mie-Strahlung im Kontext der Streulichtmessungen als Rayleigh-Streuung bezeichnet. Beide Effekte beschreiben Streuungen elektromagnetischer Wellen an Teilchen. Dabei sind bei der Mie-Strahlung Wellenlänge und Teilchengröße etwa gleich, bei der Rayleigh-Streuung sind die Teilchen klein gegenüber der Wellenlänge des Lichts. Vergleiche DIN 1349-2.

die Kante einfacher erläutern. Die Übertragung auf eine geneigte Einstrahlung ist dann nur ein weiterer Schritt. Die folgende Herleitung gilt für monochromatisches, polarisiertes Licht mit einer geraden Einkopplung entlang einer bekannten Hauptspannungsrichtung.<sup>174</sup>



**Bild 29** Streulichtintensitätsverteilung entlang des Primärstrahls nach Doppelbrechung

Auf Grund der Doppelbrechung wird die Polarisationsrichtung des Laserstrahls gedreht. Bei einer gleichbleibenden Betrachtungsrichtung variiert die Streulichtintensität je nach Drehung der Polarisationsrichtung des Primärstrahls sinuswellenförmig. Bei einer konstanten Spannung über den Messweg ergibt sich ein periodisches Bild der Intensitätsverteilungen. Aus der Wellenlänge dieser Verteilung kann die Hauptspannungsdifferenz berechnet werden. Da die Spannung  $\sigma_3$  in Dickenrichtung gegen den Wert Null tendiert, und der Lichtstrahl parallel zur zweiten Hauptspannung eingekoppelt ist, kann auf diese Weise die Spannung  $\sigma_1$  direkt bestimmt werden.

$$\sigma_1 = \frac{\lambda}{C \cdot l}$$

$l$  Wellenlänge der Intensitätsverteilung [ mm ]

$\sigma_1$  Hauptspannung in Richtung 1 [ N/mm<sup>2</sup> ]

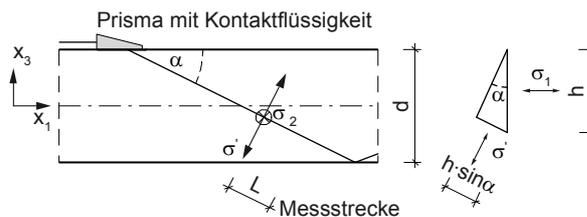
**Gleichung 25**

Dieser Ansatz gilt nur bei einer konstanten Spannung entlang der Messstrecke. Bei einer veränderlichen Spannung – wie im Fall des Eigenspannungszustands – wird zur Erhöhung der Messgenauigkeit die Schwingungsrichtung des Primärstrahls planmäßig mit einer konstanten Winkelge-

<sup>174</sup> Bei thermisch vorgespannten, rechteckigen Gläsern können die Hauptspannungsrichtungen parallel zu den Kanten angenommen werden. Bei Ausrichtung des Geräts parallel zu einer Kante ist die Hauptspannungsrichtung  $\sigma_2$  parallel zum Primärstrahl und erzeugt somit keine Doppelbrechung.

schwindigkeit rotiert. Dabei verändert sich die Streulichtintensität nicht nur hinsichtlich des Ortes, sondern auch während der Zeit. Betrachtet man zwei Punkte mit einem bekannten Abstand, so verändert sich die Intensität periodisch mit der Zeit. Die Phasenverschiebung der Intensitäten ist über die Zeit konstant und kann somit mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden.

**Bild 30** Geometrische Verhältnisse bei geneigter Einkopplung



Bei einer geneigten Einkopplung muss der Winkel  $\theta$  zwischen der Glasoberfläche und der Ausbreitungsrichtung des Primärstrahls in den Formeln zur Auswertung berücksichtigt werden. Sind die Hauptspannungsrichtungen für  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  bekannt, und wird der Primärstrahl in die Ebenen  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  beziehungsweise  $\sigma_2$ - $\sigma_3$  eingeleitet, können mit den Phasenverschiebungen  $\delta_i$  aus zwei Messungen mit zwei Gleichungen die Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  bestimmt werden.

**Gleichung 26**

$$\sigma_1 = \frac{\lambda}{C} \cdot \frac{\delta_1 + \delta_2 \cdot \sin^2 \theta}{1 - \sin^4 \theta}$$

$$\sigma_2 = \frac{\lambda}{C} \cdot \frac{\delta_2 + \delta_1 \cdot \sin^2 \theta}{1 - \sin^4 \theta}$$

$\delta_i$  Phasenverschiebung der Messung  $i$  [ / ]

$\theta$  Neigungswinkel der Einstrahlung [ ° ]

Bei einer isotropen Vorspannung ist die Vorspannung in beiden Hauptspannungsrichtungen gleich, und somit gilt für die Phasenverschiebung  $\delta_1 = \delta_2$ . Die Gleichung 26 vereinfacht sich dadurch zu

**Gleichung 27**

$$\sigma = \frac{\lambda \cdot \delta}{C} \cdot \frac{1}{1 - \sin^2 \theta}$$

### 4.1.3 Diskussion weiterer Verfahren

Neben dem Streulichtverfahren bestehen weitere Möglichkeiten zur spannungsoptischen Untersuchung an Glasbauteilen. Mit diesen ist allerdings die Aufzeichnung eines Spannungsprofils nicht ohne weitere Hilfsmaßnahmen möglich. Zu den weiteren Methoden gehören die

- Kompensationsmethode nach Senármont und
- die Differential-Refraktographie.

Die Kompensationsmethode ist nur dann bei vorgespannten Scheiben anwendbar, wenn das Licht über die Kanten eingeleitet wird. Eine Beleuchtung senkrecht zur Ebene entspricht einer Polarisationsfilteraufnahme. Im Ergebnis ergibt sich wegen des Eigenspannungszustands kein Bild. Bei einer Beleuchtung über die Kanten wird die Messung einerseits durch die Kantenmembrandruckspannung und andererseits durch die Absorption über die Messlänge gestört. Daher sollten solche Messungen an kleinen Proben mit einer bestimmten Mindestgröße vorgenommen werden.<sup>175</sup>

Im Falle der vorliegenden Proben könnten die Bruchstücke nach dem Bruch untersucht werden. Dafür müssen diese den gleichen Spannungszustand wie die unzerstörte Scheibe aufweisen. In der Praxis ist das aber nicht der Fall.<sup>176</sup>

Diese Theorien gehen davon aus, dass sich die Bruchstücke nach dem Bruch vollständig beziehungsweise teilweise entspannen. Die Ursache liegt darin begründet, dass in den bruchflächennahen Bereichen die Spannung auf Grund des Energieerhaltungssatzes abgebaut wird. Bei der Rissbildung ist Energie zur Bildung zweier neuer Oberflächen (Oberflächenenergie) erforderlich. Darüber hinaus wird Energie in kinetische und akustische Energie umgewandelt.<sup>177</sup> Bei ei-

<sup>175</sup> Vergleiche Soltész 1981, Seite 17. Soltész leitet die Ursachen zunächst mechanisch her und bestätigt die Theorie mit experimentellen Untersuchungen. Demnach sollte die Probenhöhe mehr als das 2,5-fache und die Länge mehr als das siebenfache der Glasdicke betragen. Solche Abmessungen sind bei vorgespannten Gläsern unwahrscheinlich.

<sup>176</sup> Vergleiche Dietrich 2011, Seite 65 und Warren 2001, Seiten 390 ff.

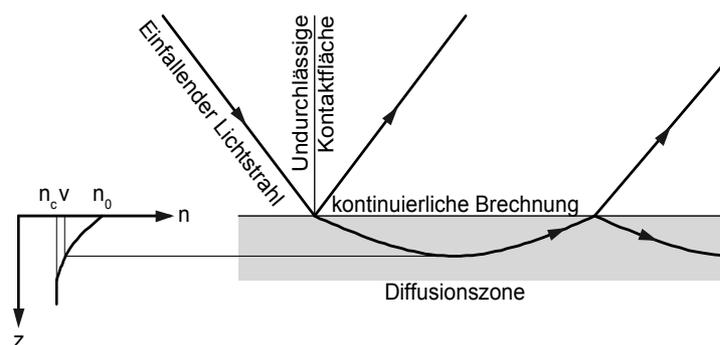
<sup>177</sup> Die theoretischen Ausarbeitungen zur Thematik der Spannungsfreisetzung beim Bruch von vorgespannten Gläsern und der theoretischen Bestimmung der Bruchstückgröße weisen vereinfachende und experimentell noch nicht bestätigte Annahmen auf. Daher entsprechen die Theorien noch nicht den realen Begebenheiten und sind daher mit Einschränkung zu betrachten. Vergleiche Dietrich 2011, Seite 64 ff.

ner teilweisen Spannungsabgabe wird angenommen, dass sich eine spannungsfreie Randzone in Verbindung mit einem ungestörten Spannungszustand im Inneren einstellt. Dieser Ansatz trifft aber keine Aussagen darüber, wie der Übergang vom spannungsfreien in den vorgespannten Zustand erfolgt. Ebenso ist die Tiefe der Randzone mit vielen Unsicherheiten behaftet, und kann nur experimentell mit entsprechenden Rückrechnungen bestimmt werden.

Aber unabhängig von den theoretischen Unzulänglichkeiten scheitert eine solche angedachte Untersuchungsmethode der oberflächenparallelen Einstrahlung in jedem Fall. Entspannt sich das Bruchstück vollständig, erübrigt sich auch eine Untersuchung. Ist es nur teilweise entspannt, können zwar Messergebnisse gewonnen werden, aber eine quantitative Auswertung ist wegen der Unkenntnis der Randzonen-tiefe und des Spannungsgradienten zwischen entspannten und voll vorgespannten Bereich nicht möglich. Eine solche Untersuchungsmethode scheidet somit aus.

Die Differential-Refraktographie nutzt den Effekt der Diffusion von Zinn in das Glas auf Grund des Floatglas-Herstellungsprozesses.<sup>178</sup> Die Zinnkonzentration nimmt mit zunehmender Tiefe in das Glas ab. Durch diese Diffusion und der Einlagerung von Zinn ergeben sich Änderungen im Brechungsindex, der ebenfalls mit der Tiefe in Abhängigkeit der Zinnkonzentration abnimmt. Auf Grund dieses Brechungsindexgradienten ergibt sich ein sogenannter Mirage-Effekt.<sup>179</sup>

**Bild 31** Mirage-Effekt auf Grund eines Gradienten im Brechungsindex

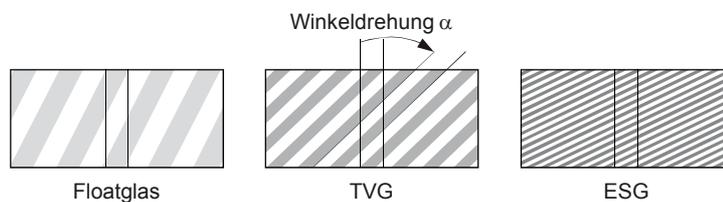


Unabhängig vom Mirage-Effekt tritt Spannungsdoppelbrechung beim Durchlaufen der oberflächennahen Schicht auf.

<sup>178</sup> Vergleiche Weller 2013, Seiten 182 ff.

<sup>179</sup> Vergleiche Aben 1993, Seiten 139 ff.

Die austretenden Lichtstrahlen verlaufen parallel, besitzen aber einen Gangunterschied. Als Analysator wird ein sogenannter Babinet-Kompensator verwendet.<sup>180</sup> Im Fall eines spannungsfreien Mediums besteht das sich ergebende Bild aus senkrechten Linien, bezogen auf den Kompensator. Bei Spannungsdoppelbrechung neigt sich das Bild, und der Neigungswinkel  $\alpha$  ist direkt proportional zur vorhandenen Spannung. Als weitere Konstanten gehen die spannungsoptische Konstante, eine Konstante zur Berücksichtigung des Babinet-Kompensators und der Einstrahlungswinkel mit ein.



**Bild 32** Auswertung der Oberflächenspannung. Der Neigungswinkel  $\alpha$  ist direkt proportional zur Spannung.

Das Verfahren wird zur Auswertung der Phasenverschiebungskurven – Bestimmung des Polynomgrades der Ausgleichsfunktion – aus der Streulichtmessung angewandt.

#### 4.1.4 Anwendung Messgerät SCALP

Für die Spannungsmessungen steht das Messgerät SCALP-04 zur Verfügung. Es arbeitet nach der Streulichtmethode mit einem Laser der Wellenlänge  $\lambda = 635 \text{ nm}$  mit einer Ausgangsleistung von 5 mW.

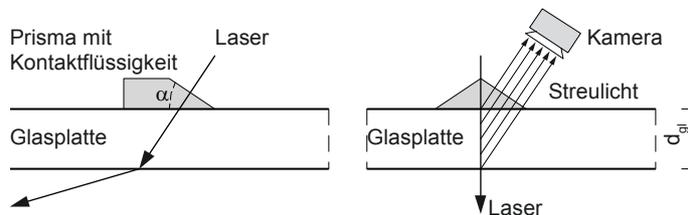


**Bild 33** Spannungsmessgerät SCALP-04

<sup>180</sup> Ein Babinet-Kompensator besteht aus zwei spannungsdoppelbrechenden Quarzkeilen.

In das Gerät ist eine hochauflösende Kamera zur Aufnahme des Streulichts integriert. Die Beobachtungsrichtung ist konstant senkrecht zum Primärstrahl unter einem  $45^\circ$ -Winkel.

**Bild 34** Strahlengang und Beobachtungsrichtung beim Messgerät SCALP-04



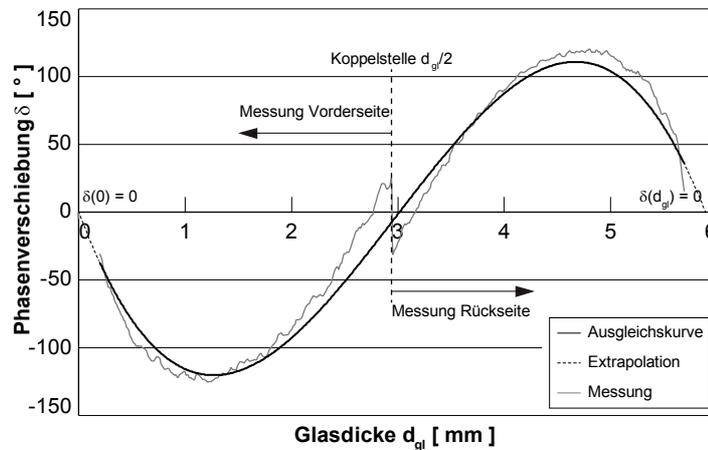
Die punktweise gemessenen Phasenverschiebungen  $\delta_i$  werden mit einer Regressionskurve ausgeglichen. Die mitgelieferte Software bietet verschiedene Möglichkeiten der Regression an. Die Ausgleichskurve basierend auf fünf Stützpunkten<sup>181</sup> setzt einen Eigenspannungsverlauf voraus, der nicht immer als gegeben vorausgesetzt werden kann. Als am besten geeignet hat sich eine globale Regression herausgestellt.<sup>182</sup> Alternativ besteht die Möglichkeit des Exports der Messdaten und einer „manuellen“ Regression.

Praxiserfahrungen mit dem Messgerät haben gezeigt, dass besonders bei inhomogenen Spannungsverläufen Messungen über die halbe Glasdicke hinaus zunehmend fehlerbehaftet sind. Dieses liegt zum einen an störenden Reflektionen an der hinteren Grenzschicht und Lichteinfall von der Rückseite. Zum anderen nimmt die Intensität des Lichtstrahls mit zunehmender Messtiefe auf Grund von Absorption ab. Aus diesem Grund wird eine Messung von beiden Seiten mit einer Kopplung der Messkurven in der Glasmitte vorgeschlagen.<sup>183</sup> Eine exakte Überlagerung beider Teilverläufe an dieser Stelle stellt aber eher die seltene Ausnahme dar. Aus dieser Phasenverschiebungskurve (retardation distribution) werden die Spannungen gemäß der Gleichung 26 beziehungsweise Gleichung 27 berechnet. Praktisch erfolgt die Auswertung derart, dass die Phasenverschiebung mit ihren Messwerten exportiert wird.

<sup>181</sup> Vergleiche SCALP, Seite 12 ff. Darüber hinaus gelten Messungen mit einer Ausschlussrate von weniger als 20 % und einem absoluten Fehler der Regression von weniger als 10 als ausreichend genau.

<sup>182</sup> Vergleiche Feldmann 2012, Seite 80.

<sup>183</sup> Die Messung sollte über die volle Tiefe erfolgen, die Auswertung dagegen nur bis zur Mittelebene. Vergleiche Feldmann 2012, Seite 80.



**Bild 35** Darstellung Koppelung und Auswertung Streulichtmessung am Beispiel der Probe 6-0-0-1

Auf vorinstallierte Auswertungsmethoden der Messsoftware wird verzichtet. Als Regressionsfunktion findet ein Polynom dritter Ordnung Verwendung<sup>184</sup>, da aus physikalischen Erwägungen die erste Ableitung als Funktion der Spannung einen parabelförmigen Verlauf erhält. Darüber hinaus wird diese Annahme durch zusätzliche spannungsoptische Messungen mit der Differential-Refraktographie bestätigt. Die Spannung berechnet sich aus der ersten Ableitung der gekoppelten Funktion der Phasenverschiebung.

$$\sigma(z) = \frac{\sqrt{2}}{C} \cdot (3 \cdot A_3 \cdot z^2 + 2 \cdot A_2 \cdot z + A_1) = \frac{\sqrt{2}}{C} \cdot \sum_{i=1}^n i \cdot A_i \cdot z^{i-1}$$

**Gleichung 28**

$A_i$  Konstanten der Regressionsfunktion  
 $z$  Laufvariable [ mm ]

Die Ordnung der Polynomfunktion würde sich gemäß eines parabelförmigen Eigenspannungsverlaufs auf Grund dieser physikalischen Begebenheit zu einer kubischen Funktion ergeben. Allerdings zeigen Polynome höherer Ordnung wegen der größeren Anzahl an Freiheitsgraden eine bessere Anpassung mit der Folge teilweise stark abweichender Spannungsverläufe nur auf Grund der Wahl der Ordnung des Polynoms. Daher sind weitere Informationen zur Bestimmung der Polynomordnung erforderlich. Diese werden mit der Differential-Refraktographie gewonnen. Diese Messmethode

<sup>184</sup> Bei einem Eigenspannungsverlauf aus thermischer Vorspannung trifft dieses zu. Für die Auswertung in Kapitel 1.2.2 ist eine Anpassung mit einem Polynom 3. Ordnung zu ungenau. Dieses liegt einerseits an dem wenig ausgeprägten Spannungsverlauf und an der einseitigen Messung über die gesamte Glasdicke.

liefert einen zusätzlichen Stützwert für die Auswertung der Streulichtmessung. Dadurch, dass nur die Zinnbadseite so vermessen werden kann, eignet sich die Methode besonders bei den emaillierten Scheiben mit der Bedruckung auf der Atmosphärenseite. Dabei wird nicht der exakte Wert der Messung in der weiteren Auswertung berücksichtigt, sondern es wird lediglich die Größenordnung der Oberflächen-druckspannung als Stützstelle ermittelt.

Dabei startet die Regressionsfunktion an der Einstrahlungsoberfläche immer mit dem Wert Null, da physikalisch gesehen an dieser Stelle noch keine Doppelbrechung aufgetreten sein kann. Gleiches gilt auch für die Rückseite, so dass  $\delta(0) = \delta(d_{gl}) = 0$ . Die Regressionsfunktion besitzt daher zwei Fixpunkte. Die Regressionskonstanten  $A_0$  und  $A_1$  werden durch den Ansatz der Stützstellen  $\delta(0) = \delta(d_{gl}) = 0$  eliminiert. Es verbleibt somit eine Funktion mit zwei Freiheitsgraden, deren Regressionskonstanten  $A_2$  und  $A_3$  in Gleichung 29 nach der Methode der Summe der kleinsten Quadrate bestimmt werden.<sup>185</sup>

#### Gleichung 29

$$\delta(z) = A_3 \cdot (z^3 - d_{gl}^2 \cdot z) + A_2 \cdot (z^2 - d_{gl} \cdot z).$$

Für die Konstanten  $A_1$  und  $A_0$  gilt

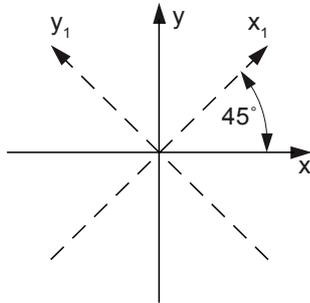
$$A_1 = -(A_3 \cdot d_{gl}^2 + A_2 \cdot d_{gl}) \text{ und } A_0 = 0.$$

Als Bestimmtheitsmaß der Regression wird ein Wert von mehr als 98 % angestrebt. Die Werte bis zu einer Tiefe von 0,20 mm gemessen von der Vorder- und Rückseite entfallen wegen der Störeffekte beim Eintritt in das Glas.

Wegen der möglichen Überlagerung von Eigenspannungen aus dem Vorspannprozess mit Zwangsspannungen aus dem gestörten Abkühlungsverlauf auf Grund der Emaillierung kann weder die Richtung der Hauptspannungen parallel zu den Glaskanten noch eine symmetrische Spannungsverteilung über die Glasdicke angenommen werden. Eine Berechnung nach Gleichung 27 scheidet daher aus. Bei Unkenntnis der Hauptspannungsrichtungen erlauben insge-

<sup>185</sup> Die Berechnung und Auswertung erfolgt mit der Software Statistica.

samt vier Messungen an einem Punkt unbekannter Richtungen die die Berechnung der Hauptspannungen.



**Bild 36** Koordinatensysteme zur Bestimmung der Hauptspannungen in einem beliebigen Punkt bei unbekannter Hauptspannungsrichtung.

Dazu wird zunächst ein orthogonales Koordinatensystem mit den Achsen  $x$  und  $y$  festgelegt. Ein zweites System mit den Achsen  $x_1$  und  $y_1$  wird in einem bestimmten Winkel – der Einfachheit halber um  $45^\circ$  – zum ersten System angeordnet. Mit den ersten beiden Messungen in Richtung  $x_1$  und  $y_1$  lässt sich die Schubspannung im System  $x/y$  berechnen.

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{x_1} - \sigma_{y_1})$$

**Gleichung 30**

$\tau_{xy}$  Schubspannung im System  $x/y$  [ N/mm<sup>2</sup> ]  
 $\sigma_{x_1}, \sigma_{y_1}$  gemessene Spannungen im System  $x_1/y_1$  [ N/mm<sup>2</sup> ]

Mit der Schubspannung und zwei Messungen im System  $x/y$  kann die Drehung der Hauptspannungsrichtung relativ zur  $x$ -Achse des Systems  $x/y$  ermittelt werden.

$$\tan 2\varphi = \frac{2 \cdot \tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

**Gleichung 31**

$\varphi$  Hauptspannungsrichtung relativ zum System  $x/y$  [ / ]  
 $\sigma_x, \sigma_y$  gemessene Spannungen im System  $x/y$  [ N/mm<sup>2</sup> ]

Die Hauptspannungen ergeben sich zu

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

**Gleichung 32**

Die Hauptspannungen und ihre Richtung relativ zum beliebig gewählten Koordinatensystem  $x/y$  sind somit bekannt.

#### 4.1.5 Spektralmessung

Mit spektralen Messungen werden die optischen und strahlungstechnischen Eigenschaften eines Werkstoffs ermittelt. Zu diesen Eigenschaften zählen die Reflektion, die Transmission und die Absorption in transparenten Medien. Bei transluzenten beziehungsweise optisch trüben Körper kommt noch die Volumenstreuung und die Opazität beziehungsweise Extinktion hinzu. Die Opazität bestimmt sich aus dem Verhältnis des eintretenden und des transmittierten Lichtstroms und stellt den Kehrwert der Transmission dar.

Gleichung 33

$$O = \frac{I_0}{I} = \frac{1}{\tau}$$

O Opazität [ / ]

$I_0$  eintretender Lichtstrom [ lm ]

I transmittierter Lichtstrom [ lm ]

$\tau$  Transmission [ / ]

Die Opazität kann bei geringer Transmission sehr große Werte annehmen. Daher kann die Angabe des dekadischen Logarithmus zweckmäßig sein, welcher dann als Extinktion oder optische Dichte bezeichnet wird. Reflektionen an den Grenzflächen sind in der Bestimmung von  $I_0$  enthalten. Bei optisch trüben Medien wird zwischen Absorption und Streuung hinsichtlich einer Schwächung des Lichtstroms unterschieden. Das absorbierte und gestreute Licht kann innerhalb des Körpers wieder remittieren und erneut absorbiert und gestreut werden. Der dabei aus dem Medium wieder austretende Lichtanteil ist dann entweder in der Transmission oder in der Reflektion je nach Betrachtungsrichtung enthalten. Somit ist die Absorption zur Beschreibung der Schwächung ausreichend.

Zur Messung muss die austretende Strahlung über den gesamten Halbraum gemessen und integriert werden. Dieses geschieht in der Praxis über sogenannte Ulbricht-Kugeln, welche aber eine bestimmte Größe aufweisen müssen. Das zu vermessende Bauteil sollte am zweckmäßigsten in eine solche Kugel vollständig hineinpassen. Dieses schränkt eine Anwendung im Rahmen dieser Arbeit dahingehend ein, als dass solche Messvorrichtungen nicht uneingeschränkt zur Verfügung stehen.

Es wird erwartet, dass Opazitätsmessungen besonders im Spektrum des sichtbaren Lichts bis hin zum Infrarot zusätzlich Informationen über eine mögliche Veränderung des Temperaturfelds in der Scheibe auf Grund einer Blockierung des Strahlungsdurchgangs liefert. Weiterhin wird unterstellt, dass Pigmente zur dunklen Farbgebung eine größere Opazität bei gleicher Schichtstärke beziehungsweise einen größeren Schwächungskoeffizienten aufweisen und somit einen stärkeren Einfluss auf die Festigkeit besitzen als helle. Unter dieser Annahme kann bei unveränderten Schichtdicken die vorgeschlagene Erklärung, dass Farbgebung oder Farbpigmente festigkeitsbeeinflussend sind, überprüft beziehungsweise konkretisiert werden.<sup>186</sup>

Durch Variation der Schichtstärke in Verbindung mit verschiedenen Farben kann ein möglicher Zusammenhang zwischen der Festigkeit und einer physikalisch messbaren und definierbaren Größe hergestellt werden.

#### 4.2 Bruchversuche

Zur Festigkeitsprüfung von Glas wurden seit den 50er Jahren verschiedene Verfahren entwickelt und modifiziert beziehungsweise optimiert.<sup>187</sup> Die Verfahren sind so beschaffen, dass sie die wesentlichen Einflussfaktoren der Festigkeit im ausreichenden Maße abbilden können. Allen Methoden sind daher zwei wesentliche Kriterien gemein.<sup>188</sup>

- die Zugspannungen sollen in dem untersuchten Oberflächenbereich zur direkten Ermittlung der bruchauslösenden Spannung möglichst homogen sein,
- der mit diesen Zugspannungen beaufschlagte Bereich sollte möglichst groß sein, um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines schweren Defekts statistisch zu erhöhen.

Mit den Prüfverfahren nach der Normenreihe DIN EN 1288 werden die genannten Anforderungen weitgehend mit ausreichender und angemessener Genauigkeit erfüllt. Die zwei-

<sup>186</sup> Vergleiche Röpke 1981, Seite 97.

<sup>187</sup> Vergleiche Schmitt 1983, Seite 397. Das Doppelring-Verfahren wurde erstmals von Vitman angewendet. Vergleiche Vitman 1963.

<sup>188</sup> Vergleiche Kao 1971, Blank 1983 und DIN EN 1288-1.

te Vorgabe trifft allerdings beim kleinen Doppelring-Biegeversuch nach Teil 5 der Norm nicht uneingeschränkt zu. Bei den Verfahren muss zwischen Versuchen zur Bestimmung der Oberflächenfestigkeit (Normenteile 2 und 5) und zur Bestimmung der Festigkeit unter Einschluss der Glaskanten (Normenteil 3) unterschieden werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein modifizierter, nicht genormter Doppelring-Biegeversuch angewendet. Für die Bewertung und Auswertung dieses Versuchs kann auf Fachliteratur zurückgegriffen werden.<sup>189</sup>

Bei Floatglas besitzt die Belastungsdauer einen wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer beziehungsweise Beanspruchbarkeit. Geringere Spannungsraten der Laststeigerung bewirken geringere charakteristische Festigkeiten.<sup>190</sup> In der Normenreihe DIN EN 1288 wird die Belastungsgeschwindigkeit mit einer einheitlichen Spannungsrate von

Gleichung 34

$$\sigma = 2,00 \pm 0,4 \text{ N/mm}^2$$

geregelt.

Da subkritisches Risswachstum unter Dauerbelastung nur bei nicht vorgespannten Gläsern auftritt<sup>191</sup> und emaillierte Gläser in der Regel vorgespannt sind, sowie dass die Spannungsrate nach Norm geregelt ist, entfällt eine weitere Berücksichtigung der Festigkeit unter Dauerbeanspruchung.

#### 4.2.1 Doppelring-Biegeversuche nach DIN EN 1288

Prinzipiell ist der große Doppelring-Biegeversuch mit seinem Lastringdurchmesser von 600 mm für die Untersuchung der Oberflächenfestigkeit von emaillierten Gläsern am geeignetsten. Insbesondere der Einfluss gemusterter Oberflächen kann zielführend untersucht werden.

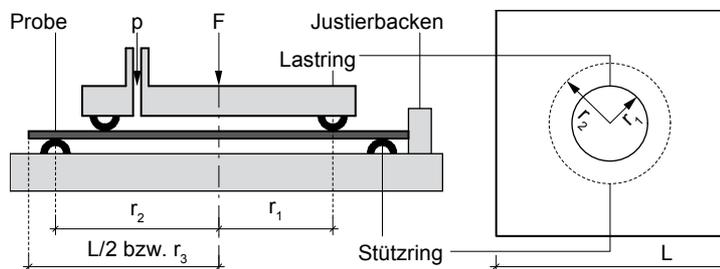
Ein wesentlicher Vorteil der Doppelring-Biegeversuche besteht darin, dass auf Grund der besonderen konzentrischen

<sup>189</sup> Vergleiche Kao 1971, Woelk 1979 und Schmitt 1983.

<sup>190</sup> Vergleiche Exner 1986, Seiten 268 ff.

<sup>191</sup> Dies gilt genau genommen nur solange, wie durch die äußere Belastung die Vorspannung in der Oberfläche noch nicht kompensiert ist. Wird das Grundmaterial mit einer einhergehenden Rissaufweitung beansprucht, tritt subkritisches Risswachstum auf.

Versuchsanordnung mit dem Last- und Stützring und dem Überstand der Probe die Glasfestigkeit ohne Kanteneinfluss ermittelt werden kann.<sup>192</sup> Andere bruchauslösende Ursachen wie eine Kantenbearbeitung können daher ausgeschlossen werden. Allerdings darf der Überstand nicht zu gering ausfallen. Ein Verhältnis von  $\rho_{32} = r_3/r_2 = 1,10$  kann in einer signifikanten Anzahl von Brüchen ausgehend von der Kante resultieren.<sup>193</sup> Der Versuch erlaubt bei einer Einhaltung ausreichender geometrischer Verhältnisse direkte Rückschlüsse auf die Oberflächenfestigkeit von Glasbauteilen und somit einen direkten Vergleich der mechanischen Eigenschaften zwischen emaillierten und unbehandelten Gläsern.



**Bild 37** Aufbau großer Doppelring-Biegeversuch nach DIN EN 1288-2. Der Aufbau mit konzentrischen Ringen für den kleinen und modifizierten Doppelring-Biegeversuch ist analog, nur ohne Luftdruckeinleitung p.

Der Versuchsaufbau der Doppelring-Biegeversuche besteht aus einem Stützring mit einem Radius  $r_2$ , auf dem ein quadratischer Prüfkörper mit einer Kantenlänge L oder ein runder mit dem Radius  $r_3$  aufgelegt wird. Die Last wird mit einem konzentrischen Lastring mit einem Radius  $r_1$  aufgebracht. Unter größer werdenden Lastringradien  $r_1$  bei konstantem Verhältnis  $\rho_{21} = r_2/r_1$  beziehungsweise abnehmenden Verhältnissen  $\rho_{21}$  bei konstantem Radius  $r_2$  wirken sich geometrisch nichtlineare Effekte resultierend in Membranspannungen bei immer geringeren Verformungen und Spannungen nachteilig aus. Die erste Vorgabe der Biegezugfestigkeitsmessung mit einem homogenen Zugspannungsfeld ist dann nicht mehr gegeben. Für den großen Doppelring-Biegeversuch wird sich derart beholfen, dass die Ringlast

<sup>192</sup> Zwischen Last- und Stützringring fallen die Radialspannungen stark ab. Außerhalb des Stützrings sind die Spannungen und somit die Bruchwahrscheinlichkeit gering. Ein Bruchursprung an der Kante ist somit nicht anzunehmen.

<sup>193</sup> Vergleiche Woelk 1979, Seite 17. Dort traten bei dem Verhältnis  $\rho_{32} = r_3/r_2 = 1,10$  30 % Kantenbrüche auf. Schmitt 1983, Seiten 400 ff. gibt verschiedene Begrenzungskriterien an, mit denen das Spannungsverhältnis  $\sigma_{\text{Rand}}/\sigma_{\text{Mitte}}$  konstant gehalten beziehungsweise in Abhängigkeit der Radienverhältnisse ermittelt werden kann.

gleichzeitig mit einer Flächenlast überlagert wird.<sup>194</sup> Dieser Versuchsaufbau erfordert eine komplexe Steuerung. Ein solcher Versuchsaufbau ist im Rahmen dieser Arbeit nicht verfügbar. Daher fällt der große Doppelring-Biegeversuch als Untersuchungsinstrument aus.

Der kleine Doppelring-Biegeversuch zeichnet sich dadurch aus, dass auf Grund des kleinen Lastringdurchmessers und dem Verhältnis zum Stützringdurchmesser geometrisch nichtlineare Effekte bis zum Bruch der Probe vernachlässigbar sind. Allerdings bedeutet dieses auch den wesentlichen Nachteil dieser Methode, da die Lastringdurchmesser mit 45 mm beziehungsweise 30 mm zu gering ausfallen, um auch gemusterte Proben zielführend untersuchen zu können. Darüber hinaus ist die Forderung nach einer möglichst großen Fläche unter homogenen Zugspannungen nicht mehr erfüllt. Daher sind die kleinen Doppelring-Biegeversuche für die Bruchversuche ungeeignet.

Einen geeigneten Kompromiss kann man mit einem modifizierten Doppelring-Biegeversuch erzielen. Allerdings ist dieser nicht genormt, bietet aber die Möglichkeit einer in Abhängigkeit der Glasdicke optimierten Versuchsgeometrie.

#### **4.2.2 Modifizierter Doppelring-Biegeversuch**

Der wesentliche Vorteil gegenüber dem großen Doppelring-Biegeversuch besteht neben der einfacheren Handhabung in der direkten analytischen Auswertung der Ergebnisse auf Grund des Ausschlusses geometrisch nichtlinearer Effekte. Im Gegensatz zum kleinen Versuch sind größere Prüfflächen möglich, womit eine wesentliche Forderung der Festigkeitsprüfung wieder beziehungsweise besser erfüllt ist. Generell steigen unter dem Lastring die Radialspannungen bei großen Verformungen auf Grund von Membranspannungen überproportional an, und die Forderung nach einem homogenen Zugspannungsfeld ist nicht mehr erfüllt. Besonders mit größer werdendem Lastringdurchmesser, abnehmender Probendicke und zunehmender Prüfbiegefestigkeit nehmen diese Auswirkungen stark zu. Bei einer Berechnung nach der linearen Biegetheorie würden sich dann zu hohe Werte

<sup>194</sup> Vergleiche DIN EN 1288-2, Schmitt 1982, Schmitt 1987 und Peeken 1982.

ergeben, welche in einer Überschätzung der Festigkeiten resultieren.<sup>195</sup>

Die genaue Grenze der Verformung, ab der sich geometrisch nichtlineare Effekte signifikant auf die Spannungsverteilung auswirken, ist vom Verhältnis der Ringradien abhängig. Als Faustwert werden Durchbiegungen größer als die Hälfte der Probendicke angegeben.<sup>196</sup>

In Fachveröffentlichungen wird ausgehend von Gleichungen 35 und 36<sup>197</sup> ein ähnlicher Weg gegangen, indem der Durchmesser des Lastring in Abhängigkeit der erwarteten Prüfbiegefestigkeit und der Probenstärke begrenzt wird. In diesem Zusammenhang spielt das Ringverhältnis  $\rho_{21} = r_2/r_1$  eine eher untergeordnete Rolle.<sup>198</sup> Zur Bestimmung der Grenze des quasilinearen Bereichs wurde ein Fehler von 2,5 % bei der Spannungsermittlung zugelassen. Die daraus resultierende Verformung im Verhältnis zur Probenstärke wurde basierend auf einer weiteren Veröffentlichung berechnet.<sup>199</sup>

Dort wurde die rechnerische Auswertung solcher Versuche unter Einbeziehung geometrisch nichtlinearer Effekte bei großen Verformungen vorgenommen. Das Ergebnis der Nachrechnungen war, dass bereits bei einer Verformung von der Hälfte der Probendicke Abweichungen von 7 % zwischen einer geometrisch linearen und nichtlinearen Berechnung auftreten.<sup>200</sup>

Mit den gegebenen Gleichungen lassen sich die Spannungen im Bruchzustand auf Grund der Versuchsgeometrien

<sup>195</sup> Zusätzlich sind die Radial- und Tangentialspannungen wie bei einer linearen Berechnung nicht mehr gleich.

<sup>196</sup> Schmitt 1983, Seite 403. Nach Kao 1971, Seite 570 und Woelk 1979, Seite 17 ist die Grenze abhängig vom Verhältnis der Ringdurchmesser. Bei einem Verhältnis von 1:2 beträgt die Grenze  $w = 0,30 \cdot d$  und bei einem Verhältnis von 1:5  $w = 1,0 \cdot d$ , aus Woelk 1979, Seite 17, mit zulässigem Fehler von 2,5 %.

<sup>197</sup> In der Veröffentlichung von Woelk 1979 werden andere Variablen benutzt. An dieser Stelle wird die Nomenklatur nach Norm verwendet.

<sup>198</sup> Vergleiche Kao 1971, Seite 569. Danach ist die Maximalspannung unter dem Lastring nahezu unabhängig vom Ringdurchmesser Verhältnis.

<sup>199</sup> Ebenda.

<sup>200</sup> Ebenda, Seite 571.

und den Anforderungen an die Probekörper analytisch nach der linearen Biegetheorie ermitteln.<sup>201</sup>

**Gleichung 35**

$$\sigma_{\text{Prüf,bb}} = \frac{3}{2 \cdot \pi} \left[ (1 - \mu) \cdot \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot r_{3m}^2} + (1 + \mu) \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \right] \cdot \frac{F_{\text{Prüf}}}{d^2}$$

**Gleichung 36**

$$w_0 = \frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{8 \cdot \pi} \left[ \frac{r_2}{r_1} \cdot \left( 1 + \frac{1 - \mu}{1 + \mu} \cdot \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot r_{3m}^2} \right) - 1 - \ln \frac{r_2}{r_1} \right] \cdot \frac{r_1^2}{d^3} \cdot \frac{F_{\text{Prüf}}}{E}$$

$r_i$  geometrische Abmessungen nach Bild 37

$d$  Probendicke

$F_{\text{Prüf}}$  Prüfkraft, bei Bruch  $F_{\text{Prüf}} = F_{\text{max}}$

$w_0$  Mittenverformung

Die ersten Terme können zu konstanten Werten  $K_1$  und  $K_2$  zusammengefasst werden, da in diesen einzig geometrische und materielle Parameter enthalten sind.<sup>202</sup>

**Gleichung 37**

$$\sigma_{\text{Prüf,bb}} = K_1 \cdot \frac{F}{d^2} \text{ mit}$$

$$K_1 = 0,191 \cdot (\rho_{21}^2 - 1) \cdot \rho_{13}^2 + 0,573 \cdot \ln \rho_{21}$$

**Gleichung 38**

$$w_0 = K_2 \cdot \frac{r_1^2}{d^3} \cdot \frac{F}{E} \text{ mit}$$

$$K_2 = 0,115 \cdot \left[ \rho_{21}^2 \cdot (1 + 0,333 \cdot (\rho_{21}^2 - 1) \cdot \rho_{13}^2) - 1 - \ln \rho_{21} \right].$$

$\rho_{21}$  Ringverhältnis  $r_2/r_1$

$\rho_{13}$  Geometrieverhältnis  $r_1/r_{3m}$

In den Konstanten  $K_1$  und  $K_2$  sind nur noch Geometrieparameter als Variablen enthalten. Die Probenform – rund oder quadratisch – geht in den Radius  $r_{3m}$  mit ein. Um gleiche Verhältnisse zwischen runden und quadratischen Proben zu

<sup>201</sup> Vergleiche Woelk 1979, Seiten 16 ff., Schmitt 1983, Seite 399 und DIN EN 1288-1. Dabei ist ein konsistenter Bezug auf entweder die Radien oder die Durchmesser zu beachten. Im Rahmen dieser Arbeit wird alles auf die Radien bezogen, wodurch sich abweichende Vorfaktoren gegenüber Woelk 1979 ergeben.

<sup>202</sup> Berechnung mit  $\mu = 0,20$  nach DIN EN 572-1. Nach DIN 18008-1 ist für die Bemessung  $\mu = 0,23$  anzusetzen. Allerdings beziehen sich die Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit auf den Werkstoff und nicht auf die Bemessung. Daher wird der Wert nach DIN EN 572-1 verwendet.

erzielen, muss im Falle von quadratischen Proben der Radius  $r_3$  wie folgt modifiziert werden.<sup>203</sup>

$$r_{3m} = \frac{(1 + \sqrt{2})}{4} \cdot L = 0,604 \cdot L.$$

Gleichung 39

Dadurch, dass der geometrisch quasi-lineare Bereich nicht verlassen wird, bleibt bis zum Bruch ein homogenes Spannungsfeld mit gleichen Beträgen für die Radial- und Tangentialzugspannungen erhalten. Die erste wesentliche Anforderung an Prüfverfahren für Glas ist somit erfüllt. Die zweite Forderung nach einer möglichst großen, zugbeanspruchten Oberfläche wird probendickenabhängig optimiert.

Die Laststeigerung wird wie bei allen anderen Versuchen zur Festigkeitsprüfung nach DIN EN 1288 mit der konstanten Spannungsrate nach Gleichung 34 vorgenommen.

#### 4.2.3 Bestimmung der Versuchsgeometrie

Mit den oben dargelegten analytischen Formulierungen wird eine Vorberechnung einer in Frage kommenden Geometrie vorgenommen. In einem Schritt erfolgt die Überprüfung der Annahmen beziehungsweise der Nachweis ausreichend geringer Membranspannungen unterhalb des Lastring. Die Abweichung der Spannung in der Mitte der Probe zu der unter dem Lastring wird auf unter 5 % begrenzt.

Eine Umstellung der Gleichung 37 nach der Prüfkraft  $F_{\text{Prüf}}$  und Einsetzen in Gleichung 38 ergibt unter Beachtung des Beiwerts  $c = w_0/d$  (bezogene Probenverformung) folgende Formulierung des maximalen Lastringradius.

$$r < d \cdot \sqrt{c \cdot \frac{K_1}{K_2}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{Prüf,bB}}}} = d \cdot \beta$$

Gleichung 40

In dem Quotienten  $K_1/K_2$  sind einzig die geometrischen Parameter und die Querkontraktionszahl  $\mu$  enthalten. Unter Beachtung der maximalen bezogenen Probenverformung in

<sup>203</sup> Der Radius  $r_{3m}$  bestimmt sich aus dem arithmetischen Mittel zwischen halber Kantenlänge und halber Länge der Diagonalen; Schmitt 1983, Seite 400 und DIN EN 1288-1.

Abhängigkeit des Radienverhältnis  $\rho_{21}$ <sup>204</sup> ergibt sich ein annähernd konstanter Wert von  $\beta \approx 0,30$ .

Zur Vorbemessung erfolgt die Berechnung nach den analytischen Formeln, um geeignete Radienverhältnisse unter dem Aspekt einer möglichst großen Prüffläche einhergehend mit quasi-linearer Spannungsverteilung zu ermitteln. Anschließend wird das gefundene System zur Überprüfung der Annäherungen mit der FE-Methode in einer geometrisch nichtlinearen Berechnung nachgewiesen. Es ist aus Gleichung 40 ersichtlich, dass die Größe der Prüfbiegefestigkeit  $\sigma_{\text{Prüf,bB}}$  einen Einfluss auf die geeignete Probengeometrie besitzt. Je größer die Prüfbiegefestigkeit, desto geringer wird die Prüffläche unter einer quasi-linearen, homogenen Spannungsverteilung. Es gilt daher, die zu erwartende Biegefestigkeit realitätsnah abzuschätzen. Dazu besteht die Möglichkeit der Auswertung von Biegezugfestigkeitsprüfungen an ESG im Rahmen von werkseigenen Kontrollen, die am Institut turnusmäßig vorgenommen werden.<sup>205</sup>

Zur Bestimmung des 95%-Quantils als obere Grenze der zu erwartenden Biegezugfestigkeit liegen für die 6 mm dicken Scheiben 89 Ergebnisse und für die 8 mm dicken Scheiben 88 Ergebnisse vor. Mit diesen Werten lässt sich das 95%-Quantil basierend auf einer logarithmischen Normalverteilung mit 95%-iger Aussagewahrscheinlichkeit bestimmen. Für beide Dicken ergibt sich ein Wert von etwa 200 N/mm<sup>2</sup>. In diesem Bereich bewegen sich ebenfalls die Maximalwerte der einzelnen Versuchsergebnisse.<sup>206</sup> Die Mittelwerte liegen bei etwa 170 N/mm<sup>2</sup> (6 mm) und 161 N/mm<sup>2</sup> (8 mm).

Es ist allerdings zu beachten, dass diese Ergebnisse im Vierpunkt-Biegeversuch nach DIN EN 1288-3 ermittelt worden sind. Daher sind Versuche enthalten, bei denen der Bruchsprung an der Kante und in der Oberfläche aufgetre-

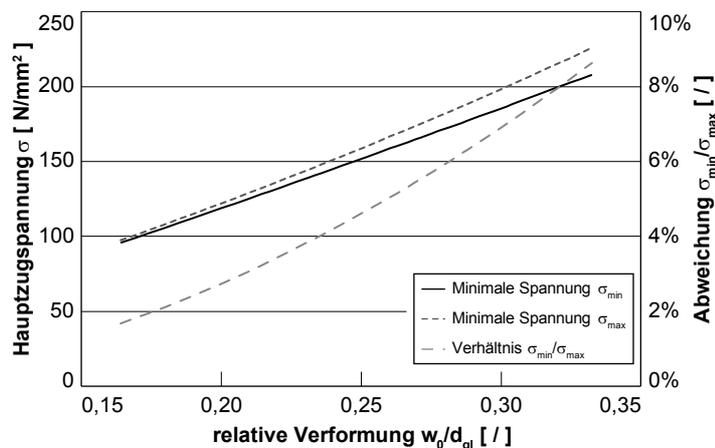
<sup>204</sup> Berechnung mit  $c = 0,30$ -d für  $\rho_{21} = r_2/r_1 = 2,0$  und  $c = 1,00$ -d für  $\rho_{21} = r_2/r_1 = 5,0$ . Zwischenwerte wurden linear interpoliert. Vergleiche Woelk 1979, Seite 17.

<sup>205</sup> Es liegen mehrere Versuchsreihen über einen Zeitraum von etwa drei Jahren vor. Die Prüfungen erfolgten nach DIN EN 1288-3.

<sup>206</sup> Es ergeben sich Quantilwerte von  $\sigma_{\text{Prüf,bB}} = 199,51$  N/mm<sup>2</sup> (6 mm) und von  $\sigma_{\text{Prüf,bB}} = 199,81$  N/mm<sup>2</sup> (8 mm). Die Maximalwerte der Einzelmessungen betragen  $\sigma_{\text{Prüf,bB}} = 198,99$  N/mm<sup>2</sup> beziehungsweise  $\sigma_{\text{Prüf,bB}} = 197,12$  N/mm<sup>2</sup>.

ten sein kann.<sup>207</sup> Es ist also möglich, dass die Festigkeit wegen des Ausschlusses des Kanteneinfluss beim modifizierten Doppelring-Biegeversuch höher ist. Dem gegenüber steht, dass nach Norm die Biegezugfestigkeit von emaillierten Oberflächen reduziert ist, welches bei den vorliegenden Prüfungen und Werte nicht vorliegt. Beide Effekte sind entgegengerichtet, so dass von einer Gültigkeit der getroffenen Annahmen weitestgehend ausgegangen werden kann.

In der analytischen Vorbemessung hat sich ein Ringradienverhältnis von  $\rho_{21} = 1,6$  mit einem Lastringradius von 50 mm als geeignet herausgestellt. Die Bestimmung und Begrenzung der maximalen Abweichung der Spannung in der Probenmitte und unter dem Lastring auf Grund der geometrisch nichtlinearen Effekte wird an den Mittel- und 95%-Quantilwerten der vorhandenen Versuchsergebnisse von ESG vorgenommen. In Bild 38 sind die wesentlichen Ergebnisse der geometrisch nichtlinearen FE-Berechnung in Abhängigkeit von der relativen Verformung  $w_0/d$  dargestellt.



**Bild 38** Spannungsentwicklung in Probenmitte und unter dem Lastring in Abhängigkeit der bezogenen Verformung für ein Glas mit einer Stärke von 6 mm in einer geometrisch nichtlinearen Berechnung. Auf der rechten Ordinate ist die prozentuale Abweichung der Spannungswerte aufgetragen.

Erst ab einer Verformung von größer als etwa  $0,15 \cdot d_{gl}$  nehmen die Auswirkungen der Membranspannung merklich zu. Unterhalb dieser Grenze erübrigt sich eine Darstellung der prozentualen Abweichung, da diese weniger als 1 % beträgt und somit im Bereich der numerischen Genauigkeit liegt. An den bezeichneten Stellen der Biegezugfestigkeit ergeben sich folgende Absolutwerte der Spannungsabweichung.

<sup>207</sup> Bei der Auswertung der Versuche wurde nicht zwischen Kanten- und Oberflächenfestigkeit unterschieden.

**Tafel 18** Maximale Absolutwerte der Spannungsabweichung zwischen Probenmitte und Lastring bei verschiedenen Biegezugfestigkeiten

Spannung	Abweichung	
	Glas $d_{gl} = 6$ mm	Glas $d_{gl} = 8$ mm
170 N/mm <sup>2</sup>	5,79 %	1,68 %
200 N/mm <sup>2</sup>	7,99 %	2,44 %

Für die Glasdicke 8 mm wird von einem linearen Kraft-Spannungsverhältnis bis zur Bruchspannung ausgegangen. In der Auswertung der Bruchversuche wird die lineare Spannungstheorie für die Proben angewendet, deren Spannung nach dieser Berechnung unterhalb von 200 N/mm<sup>2</sup> liegen. Damit werden zu große Ungenauigkeiten in der Auswertung vermieden. Im Umkehrschluss könnten die Ringradien bei den 8 mm starken Proben vergrößert werden. Bei beiden Glasdicken wird allerdings die gleiche Versuchsgeometrie verwendet, um den Größeneinfluss in der Biegezugfestigkeitsprüfung auszuschließen. Die Probengröße von 300 x 300 mm ergibt sich aus der technischen Grenze der industriellen Fertigung, welche explizit in der Untersuchung berücksichtigt werden soll. Es kommen nur quadratische Proben in Frage, und das minimale Fertigungsmaß beträgt auf Grund der Transportrollenabstände 300 x 300 mm.<sup>208</sup> Die Kantenzugspannungen betragen 23,09 N/mm<sup>2</sup> (6 mm) beziehungsweise 33,61 N/mm<sup>2</sup> (8 mm). Bei diesen Werten ist ein Bruchsprung an der Kante für vorgespannte Gläser unwahrscheinlich. Zusammengefasst besitzt der modifizierte Doppelring-Biegeversuch die folgenden Abmessungen.

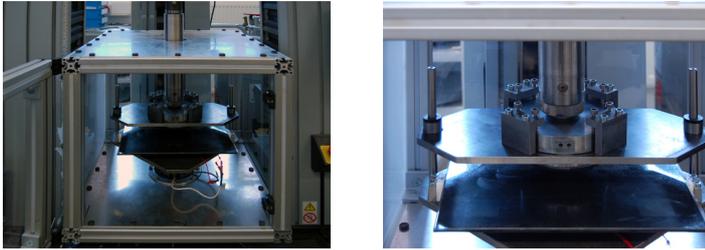
**Tafel 19** Geometrische Abmessungen des modifizierten Doppelring-Biegeversuchsstands

$r_1$ [ mm ]	$r_2$ [ mm ]	$r_{3m}$ [ mm ]	$K_1$ [ / ]
50	80	181	0,29

Die weiteren Vorgaben der DIN EN 1288 hinsichtlich der Doppelring-Biegeversuche werden beachtet. Bezüglich der Auflagerelastomere sind diese abweichend mit 5 mm Breite breiter als gefordert und mit einer Shore Härte 50 etwas härter.<sup>209</sup> Da aber alle Versuche in dieser Konfiguration durchgeführt werden, sind die Abweichungen hinnehmbar.

<sup>208</sup> Vergleiche Interpane 2011, Seite 179. Nach GlasHandbuch 2011, Seite 184 sind Minimalabmessungen von 50 x 50 mm möglich.

<sup>209</sup> Die in der Norm geforderten Elastomere mit einer Härte von 40 ± 10 IRHD sind schwer erhältlich.

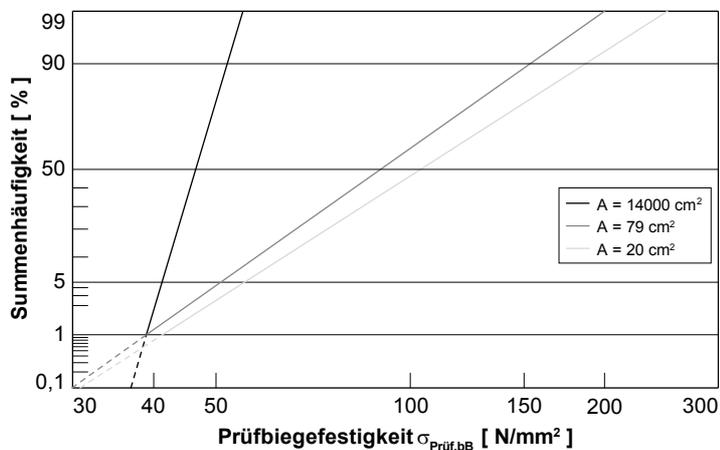


**Bild 39** Modifizierter Doppelring-Biegeversuch in UPM

Links: Versuchsstand  
Rechts: Eingebaute Probe

### 4.3 Auswertung und Statistik

In den letzten Jahren haben sich die logarithmische Normalverteilung und die Weibull-Verteilung als geeignete Verteilungsfunktion zur Auswertung von Festigkeitsuntersuchungen von Glas durchgesetzt. Der Vorteil dieser Verteilungen gegenüber einer Normalverteilung besteht darin, dass keine negativen Festigkeitswerte auftreten können.<sup>210</sup> Beiden Verteilungsfunktionen ist die Darstellung der Messergebnisse im logarithmischen Wahrscheinlichkeitsnetz gemein. Hinsichtlich der Extrapolation von Festigkeitswerten mit geringer Bruchwahrscheinlichkeit ergeben sich Unterschiede zwischen der logarithmischen Normalverteilung und der Weibull-Verteilung.<sup>211</sup>



**Bild 40** Vergleich der Ergebnisse von Biegezugfestigkeitsprüfungen mit unterschiedlich großen Prüfflächen im logarithmischen Wahrscheinlichkeitsnetz

<sup>210</sup> Vergleiche Wörner 2001, Seite 176.

<sup>211</sup> Nach Schmitt 1987, Seite 135 f. weichen bei einer Extrapolation die Ergebnisse teils erheblich ab. Die Weibull-Verteilung liefert dabei geringere Werte als die Lognormalverteilung. Allerdings kann nicht festgelegt werden, welcher Verteilung der Vorzug gegeben werden soll (ebenda, Seite 94).

Ein Vergleich von Versuchsergebnissen aus dem großen und dem kleinen Doppelring-Biegeversuch zeigt, dass die Messwerte des kleinen Versuchs im Wahrscheinlichkeitsnetz entlang der Abszisse zu höheren Werten hin verschoben sind, und dass die Ausgleichsgerade eine geringere Steigung aufweist.<sup>212</sup> Eine Verschiebung entlang der Abszisse ist gleichbedeutend mit größeren Mittelwerten (MW) und die geringere Neigung der Ausgleichsgeraden mit einer größeren Standardabweichung (Stabw) der Messergebnisse. Beide Effekte resultieren direkt aus der Flächenabhängigkeit der Glasfestigkeit, da die statistische Wahrscheinlichkeit des Auftretens von schwerwiegenden Defekten mit der geprüften Fläche ansteigt. Beim großen Doppelring-Biegeversuch kann davon ausgegangen werden, dass der maximale Defekt mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 100 % auftritt, wogegen beim kleinen Doppelring-Biegeversuch der maximale Defekt nicht zwangsläufig in der Prüffläche vorhanden sein muss.

Einige Veröffentlichungen versuchen daher, den Flächeneinfluss in der Biegezugfestigkeitsprüfung über eine geeignete statistische Auswertung zu eliminieren. Das Ziel ist es, den in der Durchführung einfacheren kleinen Doppelring-Biegeversuch zur direkten Bestimmung der Glasfestigkeit heranzuziehen. Es kann eine Umrechnung der Ergebnisse aus dem kleinen Doppelring-Biegeversuch auf große Prüfflächen einerseits basierend auf der Weibull-Verteilung und ihrer Parameter<sup>213</sup> oder unter Berücksichtigung stochastische Gesetzmäßigkeiten ohne Beachtung einer Verteilungsfunktion<sup>214</sup> erfolgen. Da in der Arbeit stets der modifizierte Doppelring-Biegeversuch mit einer konstanten Prüffläche verwendet wird, erübrigt sich eine weitergehende Betrachtung des Flächeneinflusses.

Der Auswertung der Bruchversuche liegt stets eine logarithmische Verteilungsfunktion zu Grunde. Zwischen der Lognormal- und der Weibull-Verteilung wurden keine wesentli-

<sup>212</sup> Vergleiche Woelk 1979, Seite 19, Petzold 1990, Seite 48. Das Diagramm basiert auf Woelk 1979, Bild 9b, Seite 19. Die Einzelmesswerte sind nicht dargestellt.

<sup>213</sup> Vergleiche Schmitt 1987, Seiten 116 ff., Durchholz 1995, Seite 254, Sedlacek 1999, Seiten 33 ff. und Siebert 2001, Seiten 33 ff.

<sup>214</sup> Vergleiche Scheidler 1977, Seite 219.

chen qualitativen Unterschiede bezüglich der Ausgleichsgeraden ermittelt.<sup>215</sup> Daher wird die Lognormalverteilung wegen ihrer besonderen Erwähnung in der GrubeBau<sup>216</sup> verwendet. Die 5%-Fraktile wird mit einer 95%-igen Aussagewahrscheinlichkeit bestimmt.<sup>217</sup>

Jede Versuchsserie wird hinsichtlich möglicher Ausreißer nach oben und unten überprüft. Gemäß DIN 53804-1 wird ein Test nach Dixon für eine Probenanzahl  $n < 30$  vorgenommen. Allerdings regelt die Norm den Test nur für normalverteilte Zufallswerte. Da bei der Lognormalverteilung die logarithmierten Zufallswerte normalverteilt sind, wird der Ausreißertest nach Dixon auf die transformierten Messwerte bezogen. Ausreißer werden gekennzeichnet und aus der weiteren Auswertung entfernt.

<sup>215</sup> Vergleiche Schmitt 1987, Seite 94.

<sup>216</sup> Vergleiche GrubeBau, Seite A2-2.

<sup>217</sup> Diese Auswertung entspricht den Vorgaben der BRL, Anhang 11.5, und der GrubeBau, Abschnitt 2.3.2.8, Seite 2-7. Die Quantilfaktoren sind der GrubeBau, Tabelle A2.1 entnommen.

## 5 Prüfungen – Durchführung und Auswertung

### 5.1 Parameterzusammenstellung

Die folgenden Parameter besitzen einen möglichen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit emaillierter Gläser.

- verschiedene Dicken der Emailleschicht;
- verschiedene Dicken des Glases;
- verschiedene Farben der Emailleschicht;
- Füllgrad der Bedruckung (gemusteter Siebdruck);
- verschiedene Ausdehnungskoeffizienten zwischen Glas und Emaille;
- verschiedene Vorspanngrade;
- Körnung der Emaille (abhängig vom Auftragsverfahren);
- Auslaugung nichtemaillierter Gläser (Diffusion von Natrium);
- Ausrichtung der Oberfläche (Bad- oder Atmosphärenseite).

In der industriellen Praxis unterliegen manche möglichen Einflüsse keiner Variation und stellen somit konstante Parameter dar. So sind der Ausdehnungskoeffizient und die Körnung der Emaille im Rahmen dieser Untersuchung konstant beziehungsweise in ihrem Parameterbereich eingeschränkt, da alle Glasveredler die Emaille beziehungsweise zumindest den Glasfluss von zwei großen Herstellern – Ferro und Johnson-Matthey<sup>218</sup> – beziehen. Bei einem Zwischenhändler wird dann eine Voreinstellung der Paste hinsichtlich der Viskosität bezüglich des verwendeten Auftragsverfahrens vorgenommen. Darüber hinaus werden noch weitere Additive zur besseren Handhabung hinzugefügt.

Die Variation der Auftragsverfahren ermöglicht die Untersuchung unterschiedlicher Körnungen. Wegen des Auftrags der Farbe beim Digitaldruck durch feine Düsen ist dort eine größere Mahlfeinheit als bei den anderen Verfahren erforderlich.

<sup>218</sup> Für Glasanwendungen im Bauwesen werden meistens Produkte von Ferro verwendet, wohingegen Johnson-Matthey seinen Schwerpunkt im Maschinenbausektor besitzt. Ausnahme bildet der Digitaldruck, da der Hersteller dieser Farben – DipTech – seinen Glasfluss von Johnson-Matthey bezieht und selber weiterverarbeitet.

derlich. Für alle anderen Auftragsverfahren sind die Emaille-zusammensetzung und die Körnung gleich.

Ebenso wird auf eine Variation verschiedener Vorspanngrade verzichtet, da die Festigkeitsminderungen nach technischen Regeln annähernd gleiche Relativverhältnisse unabhängig vom Vorspanngrad aufweisen. Daher wird dieser Einfluss als nicht relevant betrachtet, zumal es nicht wahrscheinlich erscheint, dass eine mögliche Veränderung der thermischen Verhältnisse während des Vorspannens nicht vom zu erzielenden Vorspanngrad abhängt. Weiterhin entfällt eine Untersuchung der Ausrichtung der bedruckten Oberfläche, da planmäßig immer die Atmosphärenseite bedruckt wird. Eine Bedruckung auf der Zinnbadseite bewirkt einerseits geringere Bruchfestigkeiten<sup>219</sup> und Haftzugfestigkeiten gegenüber einem Druck auf der Atmosphärenseite und ruft andererseits optische Störungen hervor.<sup>220</sup> Dennoch wird vor den Bruchversuchen die Lage der bedruckten Seite untersucht.

Obwohl eine Variation der thermischen Ausdehnungskoeffizienten nicht vorgenommen werden kann, ermöglicht die Variation der Glas- und Emailleschichtdicken eine Aussage über die Auswirkung der Differenz von  $\alpha_T$ . Dazu erscheint die Bildung des Verhältnisses  $d_{gl} / d_{em}$  zweckmäßig, denn je geringer die Emailleschichtstärke beziehungsweise je größer die Glasdicke sind, sollten die Spannungen aus einer solchen Zwängung abnehmen. Für dieses Verhältnis ist eine möglichst große Bandbreite unter Beachtung handelsüblicher Einzelschichtdicken angestrebt. Gängige Glasdicken liegen zwischen 6 mm und 8 mm<sup>221</sup>; die Schichtdicke der Bedruckung ergibt sich aus dem jeweiligen Auftragsverfahren. Aus den jeweiligen Kombinationen ergeben sich folgende mögliche Dickenverhältnisse:

<sup>219</sup> Nach Krohn 2002-2, Seiten 1779 f. weist eine Bedruckung auf der Zinnbadseite eine geringere Festigkeit auf. Vergleiche Wörner 2001, Seite 50.

<sup>220</sup> Angaben nach privater Korrespondenz mit Vertretern und Mitarbeitern verschiedener Glasveredler.

<sup>221</sup> Vergleiche GlasHandbuch 2011, Seite 67. Weitere Glasdicken von 5 mm bis 19 mm sind ebenfalls möglich. Andere Hersteller geben als Produktionsspektrum einen Bereich von 4 mm bis 19 mm an. Bei allen Herstellern ist das Endprodukt in der Regel ESG. TVG stellt eher eine Ausnahme dar, ist aber in den gleichen Dicken wie unbedrucktes Glas erhältlich.

**Tafel 20** Parameterzusammenstellung der Verhältnisse  $d_{gl} / d_{em}$

$d_{em}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_{gl} / d_{em}$ für $d_{gl} = 6 \text{ mm}$ [ / ]	$d_{gl} / d_{em}$ für $d_{gl} = 8 \text{ mm}$ [ / ]
25	240	320
50	120	160
100	60	80

Die angegebenen Schichtstärken geben nur die mittleren erreichbaren Stärken an. Im Rahmen der Versuche beziehungsweise während der Produktion werden die Schichtstärken vermessen.<sup>222</sup> Die Maßhaltigkeit der Auftragsstärken wurde durch der eigentlichen Produktion vorlaufende Bedruckungsversuche gewährleistet. Die Herstellung des Digital- und Siebdrucks erfolgte dann durchgehend mit den so getroffenen Einstellungen des Druckers beziehungsweise des so festgelegten Siebes und der Auftragsmenge. Die Schichtstärken wurden kontinuierlich kontrolliert aber nicht aufgezeichnet.

Als Auftragsverfahren werden die des Digitaldrucks und des Siebdrucks untersucht. Die unterschiedlichen Emailschichtstärken ergeben sich durch mehrmaliges Überdrucken. Damit ist im Digitaldruck eine Schichtstärke bis etwa 100  $\mu\text{m}$  möglich. Mit einer Verwendung von Sieben mit größeren Maschen kann die Schichtstärke im Siebdruck gesteuert werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht die einfache Variation des Schichtdickenverhältnisses  $d_{gl} / d_{em}$  und der Mahlfineinheit beziehungsweise Korngröße der Emaille.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die wesentlichen Ursachen einer Festigkeitsminderung untersucht werden. Diese Ursachen werden als herstellerunabhängig angesehen. Dennoch stammen alle Proben von einem Hersteller von einer Produktionsstätte aus dem gleichen Vorspannofen, um mögliche, weitere dem Thema nicht dienliche, nur der Herstellung zu schuldende Einflüsse auszuschließen. Entsprechende Wechsel der Öfen können bei unbedruckten Gläsern auch unter Beibehaltung der gleichen Ofen- und Vorspannparameter zu Schwankungen in der Vorspannung führen.<sup>223</sup>

<sup>222</sup> Dabei beziehen sich alle Angaben auf die Nassschichtstärke.

<sup>223</sup> Ein ähnlicher Einfluss der Öfen ist bei gebogenen Gläsern zu beobachten. Dort beziehen sich die abZ zu diesen Produkten auf bestimmte be-

Die wesentlichen Variationsparameter sind somit die Glas- und Emailleschichtdicke, die Farbe, sowie das Auftragsverfahren. Die Probenbezeichnung richtet sich nach den jeweiligen Variationsparametern wie folgt:

Glasdicke – Farbe – Emailleschichtstärke – Probe – Auftrag.

Die Zuordnung ist Tafel 21 zu entnehmen. Die Glasdicke beträgt 6 mm.<sup>224</sup>

Ziffer [ / ]	Farbe [ / ]		Ziffer [ / ]	Schichtdicke [ $\mu\text{m}$ ]
0	ohne		0	0
1	schwarz		1	25
2	weiß		2	50
			3	100

**Tafel 21** Zuordnung der Probenbezeichnung

DD Digitaldruck

SD Siebdruck

Die Probenbezeichnung 6-1-3-1 SD bedeutet die erste Probe einer Serie von schwarzen Scheiben mit einer Dicke von 6 mm und einer Bedruckungsstärke von 100  $\mu\text{m}$  im Siebdruck. In einer Serie ergeben sich mehrere Variationen hinsichtlich des Auftragsverfahrens und der Verwendung des Trennmittels, welches in Abschnitt 5.3.3, Seite 105 genauer beschrieben ist. Alle gleichartigen Proben einer Serie sind in einer Probengruppe zusammengefasst. Die Probengruppengröße umfasst planmäßig 10 Proben. Eine Übersicht aller durchgeführten Versuche ist in Tafel 22 und Tafel 23 dargestellt. Die Beschreibung der Probenformen erfolgt im folgenden Kapitel.

## 5.2 Form und Art der Probekörper

Die Streulichtmessungen und die Bruchversuche wurden an insgesamt drei verschiedenartigen Proben (Proben Typ 1 bis 3) vorgenommen. Die Probentypen ergaben sich zu jeder Serie geringfügig anders, da die Versuchsdurchführung hinsichtlich ihrer Optimierung nach jeder Serie neu bewertet

zeichnete Öfen im Herstellbetrieb. Nur in diesen dürfen zulassungskonforme Scheiben gebogen werden.

<sup>224</sup> 8 mm starke Proben werden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, sondern auf zukünftige Forschung verschoben.

worden ist. Die Messungen erfolgen nach dem in Abschnitt 4.1.4 beschriebenen Verfahren mit vier Messungen an jeder Stelle. Wenn die Messungen zeigen, dass die Hauptspannungen kantenparallel ausgerichtet sind, erfolgen die weiteren Messungen zur Ermittlung der Spannungsprofile nur in kantenparalleler Richtung.

Im Folgenden bezieht sich die Bezeichnung Rückseite immer auf die bedruckte Seite der Probe. Die Proben besitzen immer die nominellen Abmessungen 300 x 300 x 6 mm. Die bedruckte Seite ist immer die zugbeanspruchte Seite, da sich eine Festigkeitsminderung nur bei Zugbeanspruchung einstellt.<sup>225</sup> Im Falle von Druckspannungen überdrücken diese mögliche Festigkeitsminderungen. Eine Unterscheidung dieser beiden Seiten wird daher nicht vorgenommen.

### **Proben Typ 1**

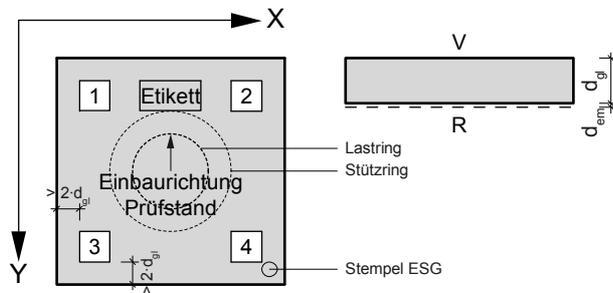
Die Proben des Typs 1 wurden mit transparenten Stellen in den vier Ecken der Probe hergestellt, da einerseits eine rückseitige Emaillierung starke Lichtstörungen während der Messung hervorruft und andererseits eine beidseitige Messung nicht möglich wäre. Diese transparenten Stellen sind so bemessen, dass eine einwandfreie Messung mit dem Gerät SCALP möglich ist. Der Abstand vom Rand ist derart gewählt, dass eine Beeinflussung der Kante durch die dort vorliegende inhomogene Vorspannung ausgeschlossen ist.<sup>226</sup> Die beiden Serien des Typs 1 dienen vorrangig der Überprüfung der gewählten Versuche und Versuchsdurchführungen. Dazu werden schwarz emaillierte Scheiben mit einer Schichtstärke von 100  $\mu\text{m}$  (Serie 6-1-3 DD) und weiß emaillierte Scheiben mit einer Schichtstärke von 25  $\mu\text{m}$  (Serie 6-2-1 DD) verwendet. Damit sind die Proben mit der voraussichtlich geringsten und höchsten Extinktion für bedruckte Scheiben erfasst.<sup>227</sup> Die Etikettierung der Proben gibt die Messreihenfolge für die spannungsoptischen Messungen der ersten Versuchsreihe vor. Ebenso dienen die Etiketten zum systematischen Einbau in den modifizierten

<sup>225</sup> Vergleiche TRLV.

<sup>226</sup> Die Tiefe des Kanteneinflusses gemessen von der freien Kante beträgt 1,0·d und der ECKEINFLUSS gemessen von den Kanten beträgt 2,0·d. Vergleiche Laufs 2000, Seite 138.

<sup>227</sup> Vergleiche Abschnitt 5.3.4, Seite 114 ff.

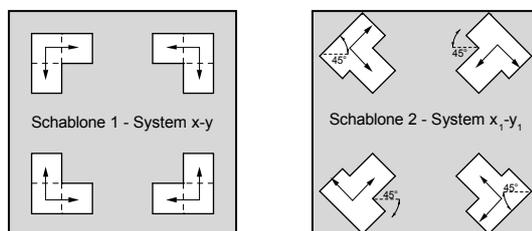
Doppelring-Biegeversuchsstand. An Hand dieser Vorgehensweise lassen sich die Bruchsprünge später genau kartieren und vergleichen.



**Bild 41** Proben mit Reihenfolge der Messstellen und Einbaulage im Doppelring-Biegeversuchsstand

Probe Typ 1

Die praktische Durchführung wird so vorgenommen, dass die Probekörper in einer Schablone fixiert werden. Die Schablone ist mit einer dunklen, matten Oberfläche versehen, um störende Lichteinträge und -reflektionen zu minimieren. Darüber hinaus erfolgt eine Abdeckung der Probe mit einer Platte, die an den Messstellen in der jeweiligen Messrichtung Öffnungen in der Größe des Messgeräts aufweisen. Somit kann eine Messung an immer den gleichen Stellen und in die gleichen Richtungen gewährleistet werden.



**Bild 42** Probengeometrie und Schablone zur spannungsoptischen Messung. Die Pfeile geben die Einstrahlungsrichtung des Lasers an.

## Proben Typ 2

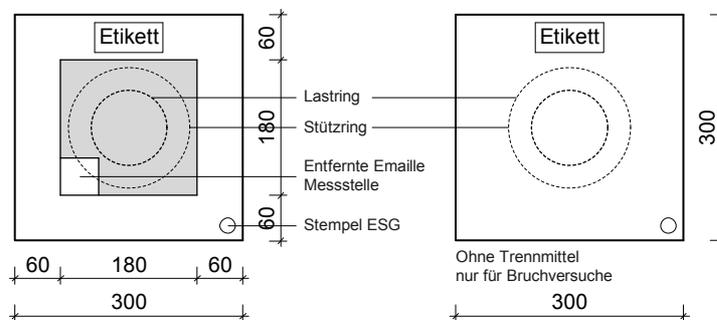
Anstatt von fest fixierten, bereits in der Herstellung berücksichtigten transparenten Bereichen wurde ein Trennmittel auf Boron-Nitrite-Basis<sup>228</sup> gemäß Bild 43 aufgetragen, um die Emaille nachträglich vom Glas entfernen zu können (Typ 2a). Damit werden die thermischen Verhältnisse wenn, dann nur geringfügig beeinflusst, da die Emaille als mögliche Strahlungsblockerschicht weiterhin vorhanden ist. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Messung an jedem belie-

<sup>228</sup> Der Einsatzbereich des Trennmittels ist mit bis zu 700 °C angegeben. Ein Hersteller wird nicht explizit genannt. Das Produkt ist im Fachhandel für das Glashandwerk erhältlich.

bigen Punkt der Probe. Die Farbfentfernung musste schonend erfolgen, da durch den Entfernungsprozess keine Kratzer und Schäden entstehen dürfen, die die Messung verfälschen oder stören. Als Schleifmedien kamen Schleiflappen des Herstellers 3M in den Körnungen „fine“ und „ultrafine“ und Reinigungsschaber zum Einsatz. Durch diese Werkzeuge war eine einwandfreie Messdurchführung mit dem Messgerät gewährleistet. Da trotz dieser schonenden Vorgehensweise Kratzer und Beschädigungen, die die Festigkeit nachteilig beeinflussen, in den Oberflächen eingebracht werden können, wird die Emaille außerhalb der Lastring- und nach Möglichkeit auch außerhalb der Stützringfläche entfernt.

**Bild 43** Proben mit Trennmittel (graue Fläche) zur nachträglichen Entfernung der Emaille

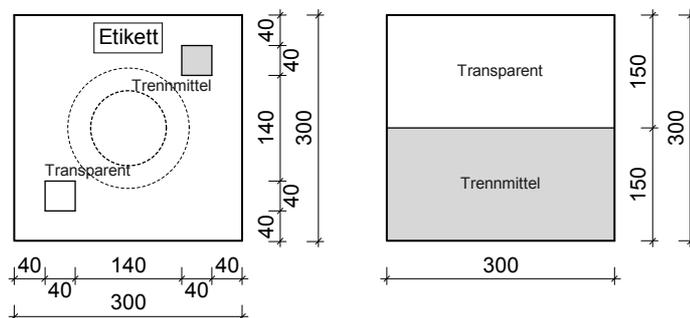
Links Probe Typ 2a  
Rechts Probe Typ 2b



Um eine Auswirkung des Trennmittels auf die Prüfbiegefestigkeiten zu überprüfen, wurden auch Proben ohne Trennmittel hergestellt (Typ 2b).

### Proben Typ 3

Nach Durchführung der Bruchversuche an den Proben des Typs 2 ergab sich das Ergebnis, dass das Trennmittel nicht nur einen möglichen Einfluss auf die Streulichtmessung besitzt, sondern auch auf die Biegezugfestigkeit. Zur Eliminierung möglicher Fehlerquellen wurden Proben eines dritten Typs verwendet. Diese stellen im Grunde eine Mischung der ersten beiden dar, mit einem transparenten Bereich und einem Bereich mit Trennmittel. Dieses Vorgehen erlaubte eine direkte Bestimmung eines möglichen Einflusses des Trennmittels auf die spannungsoptischen Messungen. Darüber hinaus wurden unbedruckte Scheiben hergestellt, die zur Hälfte mit dem Trennmittel versehen waren, um den Einfluss des Trennmittels direkt zu ermitteln.



**Bild 44** Proben mit transparentem Teilbereich (umrandete, weiße Fläche) und Trennmittel (graue Fläche) zur nachträglichen Entfernung der Emaille sowie halbseitig mit dem Trennmittel versehenes, unbedrucktes ESG

Links Probe Typ 3  
Rechts Kontrollscheiben

Bei diesen Proben wurde darauf geachtet, dass der mit dem Trennmittel versehene Bereich außerhalb des Stütz- und Lastrings immer an der gleichen Stelle mit der gleichen Größe angeordnet ist. Mögliche festigkeitsmindernde Einflüsse auf Grund des Trennmittels sind somit ausgeschlossen.

### Kontrollscheiben

Zwischen den Ergebnissen der Proben Typ 1 und Typ 2 für die gleichen Serien ergaben sich verhältnismäßig große Abweichungen. Daher wurde die Auswirkung des Trennmittels auf die Vorspannung gesondert untersucht. Dafür wurden Scheiben halbseitig mit dem Trennmittel ohne Bedruckung versehen und dem normalen Vorspannprozess unterzogen (vergleiche Bild 44 rechts).

### Zusammenfassung und Zuordnung der Serien

In Tafel 22 und Tafel 23 sind die verschiedenen Probentypen den jeweiligen Versuchsserien zugeordnet.

Serie [ / ]	Gruppe [ / ]	Typ [ / ]	Auftrag [ / ]	Farbe [ / ]	$d_{em}$ [ $\mu m$ ]
6-0-0	1 – 10	ohne	ohne	ohne	ohne
6-1-1	1 – 10	3	DD	schwarz	25
	11 – 20	3	SD	schwarz	25
6-1-2	1 – 10	3	DD	schwarz	50
	11 – 20	3	SD	schwarz	50
6-1-3	1 – 10	1	DD	schwarz	100
	11 – 20	2a	DD	schwarz	100
	21 – 30	2b	DD	schwarz	100
	31 – 40	2a	SD	schwarz	100
	41 – 50	2b	SD	schwarz	100

**Tafel 22** Zuordnung der Probenbezeichnung

Tafel 22 Fortsetzung

Serie [ / ]	Gruppe [ / ]	Typ [ / ]	Auftrag [ / ]	Farbe [ / ]	d <sub>em</sub> [ μm ]
6-2-1	1 – 10	1	DD	weiß	25
	11 – 20	2a	DD	weiß	25
	21 – 30	3	SD	weiß	25
6-2-3	1 – 10	3	DD	weiß	100
	11 – 20	3	SD	weiß	100

DD Digitaldruck

SD Siebdruck

Der direkte Vergleich von gleichartigen Proben mit und ohne Trennmittel ermöglicht die Überprüfung eines möglichen Einflusses des Trennmittels.

Tafel 23 Zuordnung der Probentypen zu den jeweiligen Versuchsserien

Typ [ / ]	Probenform [ / ]	Serie [ / ]	Probengruppe [ / ]
1		6-1-3 DD	1 – 10
		6-2-1 DD	1 – 10
2a		6-1-3 DD	11 – 20
6-1-3 SD		31 – 40	
6-2-1 DD		11 – 20	
2b		Ohne Trennmittel	
		6-1-3 DD	21 – 30
		6-1-3 SD	41 – 50
3		6-1-1 DD	1 – 10
		6-1-1 SD	11 – 20
		6-1-2 DD	1 – 10
		6-1-2 SD	11 – 20
		6-2-1 SD	21 – 30
		6-2-3 DD	1 – 10
		6-2-3 SD	11 – 20

Mit den Serien 6-1-3 DD, Proben 21 – 30 und 6-1-3 SD, Proben 41 – 50 (Typ 2b) wurden nur Bruchversuche und keine spannungsoptischen Messungen vorgenommen.

### 5.3 Optische Untersuchungen

#### 5.3.1 Überprüfung der bedruckten Seite

Vor den Bruchversuchen wurde die Bedruckungsseite mit einem Zinnbadseitentester von Bohle überprüft. Generell sollen die Bedruckungen von Werk aus auf der Atmosphärenseite aufgebracht sein. Die Ergebnisse der Einzelmessungen sind in Anhang A1.4 aufgeführt.

Serie [ / ]	Typ [ / ]	Probengruppe [ / ]	Zinnbadseite [ % ]	Atmosphäre [ % ]
6-1-1	3	1 – 10	0	100
	3	11 – 20	0	100
6-1-2	3	1 – 10	0	100
	3	11 – 20	0	100
6-1-3	1	1 – 10	0	100
	2a	11 – 20	0	100
	2b	21 – 30	0	100
	2a	31 – 40	0	100
	2b	41 – 50	0	100
6-2-1	1	1 – 10	20	80
	2a	11 – 20	0	100
	3	21 – 30	0	100
6-2-3	3	1 – 10	0	100
	3	11 – 20	0	100

**Tafel 24** Ergebnisse der Überprüfung der Bedruckungsseite nach den einzelnen Serien

Die Messungen haben ergeben, dass die Proben mehrheitlich auf der Atmosphärenseite bedruckt waren. Allerdings gab es zwei Proben, bei denen dieses nicht der Fall war.

#### 5.3.2 Differential-Refraktographie

Zur Bestätigung des Ansatzes einer kubischen Funktion als Ausgleichsfunktion der Phasenverschiebung aus den Streulichtmessungen wurden an den Serien 6-1-1, 6-1-2, 6-2-1 und 6-2-3 zusätzlich Messungen mit dem Messgerät Laser-GASP vorgenommen. Dieses Gerät ermöglicht die Ermitt-

lung der Oberflächendruckspannung auf der Zinnbadseite und liefert eine weitere Stützstelle zur Regression. Die einzelnen Messergebnisse sind in Anhang A1.3 aufgeführt.

**Tafel 25** Ergebnisse der Messungen mit der Differential-Refraktographie

Die oberen Werte sind an der Stelle mit dem Trennmittel gemessen, die unteren an den transparenten Stellen.

Serie [ / ]	6-1-1	6-1-2	6-2-1	6-2-3
<b>MW DD</b> [ N/mm <sup>2</sup> ]	-109,44 -113,55	-111,43 -114,89	Keine Messungen	-109,06 -112,31
<b>MW SD</b> [ N/mm <sup>2</sup> ]	-115,58 -116,65	-111,50 -114,62	-109,27 -112,12	-108,34 -108,62

DD Digitaldruck

SD Siebdruck

Die Ergebnisse zeigen, dass zwischen den transparenten und den mit dem Trennmittel versehenen Stellen keine wesentlichen Unterschiede bestehen. Die Unterschiede ergeben sich aus der Sensibilität des Messverfahrens, wobei die Skalenwerte immer nur in ganzen Zahlen abgelesen werden können. In dem entsprechenden Wertebereich bedeutet der Unterschied eines Skalenteils einen Spannungsunterschied von 6 – 7 N/mm<sup>2</sup>.

Es fällt weiter auf, dass zumindest auf der Zinnbadseite kein Unterschied in der Vorspannung bezüglich des Auftragsverfahrens besteht. Unabhängig von der Farbe und vom Verfahren liegen alle Ergebnisse mit geringen Abweichungen im gleichen Wertebereich. Für die Auswertung der Streulichtmessungen hinsichtlich des Grades der Ausgleichsfunktion bedeutet dieses, dass sich Oberflächendruckspannungen auf der Zinnbadseite im Bereich von  $110 \pm 10 \text{ N/mm}^2$  ergeben sollten.

### 5.3.3 Streulichtmessungen

Mit den ersten Streulichtmessungen soll die Richtung der Hauptspannungen überprüft werden, ob diese wie bei unbedruckten Gläsern kantenparallel verlaufen. Bei vollflächig emaillierten Scheiben ist dieses anzunehmen, bei Proben mit Mustern, die nicht parallel zu den Kanten ausgerichtet sind, ist davon zunächst nicht auszugehen.<sup>229</sup>

<sup>229</sup> Gemusterte Proben sind in dieser Arbeit ausgenommen. Für diese müssen gesonderte Untersuchungen vorgenommen werden.

## Proben Typ 1

Die Messungen an fünf Proben der ersten Versuchsreihe haben die Annahme der kantenparallelen Hauptspannungsrichtungen bestätigt. Die Auswertung erfolgte unter der Maßgabe  $\delta(0) = \delta(d_{gl}) = 0$ , wobei aber nur eine Messung von der Rückseite erfolgte. Daher bezieht sich die Auswertung nur auf die Rückseite. Die Messergebnisse (Anhang A1.1) liegen unabhängig von der jeweiligen Messrichtung in der gleichen Größenordnung. Eine Auswertung der Hauptspannungen ergibt eine maximale Abweichung von 5,21 % (Probe 6-1-3-5 y-Richtung) beziehungsweise von 4,18 % (Probe 6-2-1-5 y-Richtung) zwischen den als Hauptspannungen angenommenen Werten  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  und den berechneten Werten  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$ .<sup>230</sup>

Die weiteren Messungen auch aller anderen Probentypen wurden dann jeweils parallel zu den Kanten durchgeführt. In den Tabellen Tafel 26 bis Tafel 33 sind nur die Oberflächenspannungen auf der bedruckten Seite ausgewertet.

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	MW [ N/mm <sup>2</sup> ]	Stabw [ N/mm <sup>2</sup> ]	Var [ % ]	5%- Fraktile [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-1-3 DD	1 – 10	-124,25	2,94	2,37	-115,61
6-2-1 DD	1 – 10	-120,31	2,17	1,81	-113,56

**Tafel 26** Ergebnisse der Streulichtmessungen an den Proben Typ 1

Messungen in x-Richtung-  
Auswertung Rückseite

Einzelmessungen in Anhang  
A2.10 und A2.13

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	MW [ N/mm <sup>2</sup> ]	Stabw [ N/mm <sup>2</sup> ]	Var [ % ]	5%- Fraktile [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-1-3 DD	1 – 10	-125,07	1,66	1,32	-120,14
6-2-1 DD	1 – 10	-121,58	2,43	2,00	-114,05

**Tafel 27** Ergebnisse der Streulichtmessungen an den Proben Typ 1

Messungen in y-Richtung-  
Auswertung Rückseite

Einzelmessungen in Anhang  
A2.10 und A2.13

Es hat sich herausgestellt, dass zwischen den beiden Oberflächen hinsichtlich der Vorspannung offensichtlich keine Unterschiede bestehen. Zur Untersuchung dieses Sachverhalts, dessen Ursache in der beidseitigen Transparenz und somit einer Nichtbeeinflussung durch die Emaille angenom-

<sup>230</sup> Die Probe 6-1-3-5 DD weicht in der Messung in x-Richtung an der Stelle 4 am stärksten ab. Die Spannung  $\sigma_{x1}$  wird als Ausreißer betrachtet. Eine Abweichung von weniger als 5% zwischen  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  zu  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  wird auf Grund der Genauigkeit des Messgeräts SCALP hingenommen.

men wurde, erfolgten die weiterführenden spannungsoptischen Untersuchungen an modifizierten Proben des Typs 2.

### Proben Typ 2a

Für die generelle Versuchsdurchführung an den Proben des Typs 2a gelten die gleichen Randbedingungen wie für Proben Typ 1. Hier wurde aber von Beginn an die Kantenparallelität der Hauptspannungen basierend auf den Ergebnissen aus den Messungen an Proben Typ 1 vorausgesetzt. Die Proben des Typs 2b konnten wegen des fehlenden Trennmittels spannungsoptisch nicht vermessen werden.

**Tafel 28** Ergebnisse der Streulichtmessungen an den Proben Typ 2a

Messungen in x-Richtung – Auswertung Rückseite

Einzelmessungen in Anhang A2.1, A2.11, A2.12 und A2.14

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	MW [ N/mm <sup>2</sup> ]	Stabw [ N/mm <sup>2</sup> ]	Var [ % ]	5%- Fraktile [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-0-0	1 – 10	-109,73	8,77	7,99	-86,70
6-1-3 DD	11 – 20	-116,19	7,26	6,25	-96,69
6-1-3 SD	31 – 40	-114,36	5,50	4,81	-99,32
6-2-1 DD	11 – 20	-119,48	7,06	5,91	-99,72

**Tafel 29** Ergebnisse der Streulichtmessungen an den Proben Typ 2a

Messungen in y-Richtung – Auswertung Rückseite

Einzelmessungen in Anhang A2.1, A2.11, A2.12 und A2.14

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	MW [ N/mm <sup>2</sup> ]	Stabw [ N/mm <sup>2</sup> ]	Var [ % ]	5%- Fraktile [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-0-0	1 – 10	-123,82	7,59	6,13	-103,41
6-1-3 DD	11 – 20	-110,78	2,73	2,46	-103,09
6-1-3 SD	31 – 40	-112,73	7,52	6,67	-92,65
6-2-1 DD	11 – 20	-106,15	6,92	6,52	-86,93

Offenbar ist die Vorspannung von der Ausrichtung im Ofen und somit von der Anblasrichtung abhängig. Es zeigen sich Unterschiede in der Vorspannung zwischen den beiden Messrichtungen. Tendenzen hinsichtlich einer verminderten Vorspannung lassen sich nicht erkennen. Die unterschiedlichen Farben weisen untereinander und auch gegenüber den unbedruckten Referenzproben keine eindeutige Auswirkung auf. Eine mögliche Festigkeitsminderung um den Anteil  $\sigma_{TV}$  gemäß Abschnitt 1.1.2 lässt sich an Hand dieser Ergebnisse nicht unterstützen.

### Proben Typ 3

Die Versuchsdurchführung erfolgte wie vor.

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	MW [ N/mm <sup>2</sup> ]	Stabw [ N/mm <sup>2</sup> ]	Var [ % ]	5%- Fraktile [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-1-1 DD	1 – 10	-106,73	4,80	4,50	-93,54
6-1-1 SD	11 – 20	-108,00	3,76	3,48	-97,12
6-1-2 DD	1 – 10	-107,35	1,97	1,84	-101,74
6-1-2 SD	11 – 20	-109,63	2,69	2,45	-102,05
6-2-1 SD	21 – 30	-110,40	3,78	3,42	-99,88
6-2-3 DD	1 – 10	-109,25	2,42	2,21	-102,41
6-2-3 SD	11 – 20	-110,45	6,10	5,53	-93,90

**Tafel 30** Ergebnisse der Streulichtmessungen an den Proben Typ 3

Messungen in x-Richtung –  
Auswertung Rückseite

Stelle mit Trennmittel

Einzelmessungen in Anhang  
A2.3, A2.5, A2.7, A2.9,  
A2.16, A2.18 und A2.20

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	MW [ N/mm <sup>2</sup> ]	Stabw [ N/mm <sup>2</sup> ]	Var [ % ]	5%- Fraktile [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-1-1 DD	1 – 10	-106,31	3,90	3,67	-95,48
6-1-1 SD	11 – 20	-109,21	3,70	3,39	-98,49
6-1-2 DD	1 – 10	-108,70	2,44	2,24	-101,81
6-1-2 SD	11 – 20	-106,36	1,76	1,66	-101,34
6-2-1 SD	21 – 30	-98,24	5,06	5,15	-84,45
6-2-3 DD	1 – 10	-108,78	3,15	2,89	-99,95
6-2-3 SD	11 – 20	-90,69	3,78	4,17	-80,26

**Tafel 31** Ergebnisse der Streulichtmessungen an den Proben Typ 3

Messungen in y-Richtung –  
Auswertung Rückseite

Stelle mit Trennmittel

Einzelmessungen in Anhang  
A2.3, A2.5, A2.7, A2.9,  
A2.16, A2.18 und A2.20

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	MW [ N/mm <sup>2</sup> ]	Stabw [ N/mm <sup>2</sup> ]	Var [ % ]	5%- Fraktile [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-1-1 DD	1 – 10	-113,70	3,04	2,67	-105,17
6-1-1 SD	11 – 20	-116,68	3,59	3,08	-106,64
6-1-2 DD	1 – 10	-113,88	2,11	1,85	-107,88
6-1-2 SD	11 – 20	-115,73	2,81	2,43	-107,79
6-2-1 SD	21 – 30	-110,49	3,94	3,57	-99,53
6-2-3 DD	1 – 10	-109,18	5,23	4,79	-94,88
6-2-3 SD	11 – 20	-113,66	4,44	3,91	-100,89

**Tafel 32** Ergebnisse der Streulichtmessungen an den Proben Typ 3

Messungen in x-Richtung –  
Auswertung Rückseite

Transparente Stelle

Einzelmessungen in Anhang  
A2.2, A2.4, A2.6, A2.8,  
A2.15, A2.17 und A2.19

**Tafel 33** Ergebnisse der Streulichtmessungen an den Proben Typ 3

Messungen in y-Richtung–  
Auswertung Rückseite

Transparente Stelle

Einzelmessungen in Anhang  
A2.2, A2.4, A2.6, A2.8,  
A2.15, A2.17 und A2.19

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	MW [ N/mm <sup>2</sup> ]	Stabw [ N/mm <sup>2</sup> ]	Var [ % ]	5%- Fraktile [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-1-1 DD	1 – 10	-108,26	3,58	3,30	-98,29
6-1-1 SD	11 – 20	-113,02	2,92	2,58	-104,81
6-1-2 DD	1 – 10	-109,42	1,54	1,40	-105,03
6-1-2 SD	11 – 20	-112,03	1,50	1,34	-107,74
6-2-1 SD	21 – 30	-104,97	4,43	4,22	-92,76
6-2-3 DD	1 – 10	-107,14	5,96	5,57	-90,98
6-2-3 SD	11 – 20	-103,32	7,42	7,18	-82,92

Die gleiche Richtungsabhängigkeit der Vorspannung ist analog zu der der Proben Typ 2 ebenfalls hier erkennbar. Dabei wirkt sich diese aber bei den weiß bedruckten verhältnismäßig stärker aus als bei den schwarz bedruckten. Ansonsten sind auch bei diesen Proben keine eindeutige Tendenzen oder Signifikanzen mit Bezug auf den Festigkeitsanteil  $\sigma_{TV}$  erkennbar. Die schwarzen Proben weisen mit zunehmender Schichtstärke eine höhere Vorspannung auf, und ein Vergleich der jeweiligen Minimal- und Maximalwerte zwischen den unbedruckten und schwarzen Proben zeigt, dass die schwarzen Proben eine in der Regel höhere Vorspannung aufweisen. Allerdings gilt für beides, dass diese Zunahme einerseits im Rahmen der messtechnischen Genauigkeit liegt und zum anderen bei den weißen Proben in der Art nicht vorhanden ist.

### Kontrollscheiben

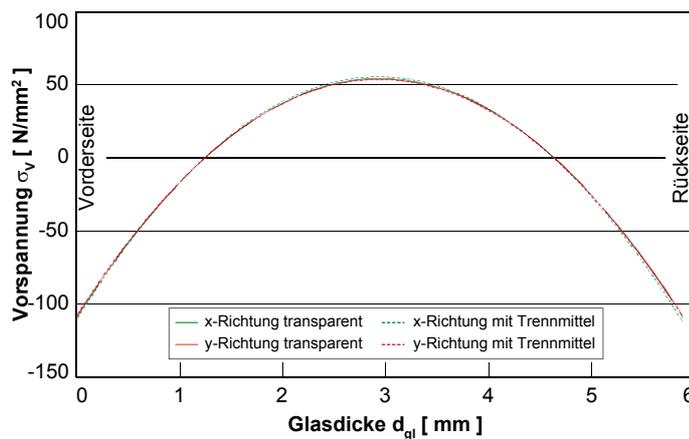
Die Messungen an den Kontrollscheiben wurden zur Prüfung des alleinigen Einflusses des Trennmittels und seiner Entfernung auf die spannungsoptischen Messungen vorgenommen.

**Tafel 34** Ergebnisse der Streulichtmessungen an den Kontrollscheiben

Einzelmessungen in Anhang  
A1.2

Stelle [ / ]	Richtung [ / ]	MW [ N/mm <sup>2</sup> ]	Stabw [ N/mm <sup>2</sup> ]	Var [ % ]
Transparent	x	-110,39	1,15	1,04
	y	-108,48	1,15	1,06
Trennmittel	x	-111,81	0,61	0,54
	y	-107,55	1,71	1,59

Wegen der geringen Stichprobenanzahl von  $n = 4 - 5$  nach dem Ausreißertest erübrigt sich die Angabe einer 5%-Fraktile. Generell ist erkennbar, dass das Trennmittel offenbar keine Auswirkung auf die Streulichtmessungen besitzt. Alle korrespondierenden Werte liegen sehr nah beieinander. Bild 45 zeigt nahezu deckungsgleiche Kurvenverläufe, Daher wird ein Einfluss des Trennmittels auf die spannungs-optischen Messungen als vernachlässigbar eingestuft.



**Bild 45** Ergebnisse der Messungen an den Kontrollscheiben

### Auswertung

Allen Messungen mit Ausnahme denen der Proben Typ 1 ist gemein, dass die Mittelwerte der Oberflächendruckspannung auf der bedruckten Seite aller Serien im Rahmen der Genauigkeit von  $\pm 5\%$  im Messbereich<sup>231</sup> den gleichen Wert aufweisen. Bei den Proben Typ 1 liegen die Mittelwerte und 5%-Fraktile über den Werten des unbedruckten Glases. Da sich dieses bei den folgenden Messungen und Probentypen nicht wiederholt hat, liegt die Vermutung nahe, dass die Vorspannung mit unterschiedlichen Ofenparametern erfolgte. Für die Probentypen 2 und 3 liegen die Ofenparameter vor und weichen hinsichtlich der Temperaturen nur geringfügig voneinander ab. Für den Probentyp 1 gibt es keine expliziten Angaben. Daher sollten die Ergebnisse des Probentyps 1 mit Vorbehalt betrachtet werden. Bei allen Proben ergeben sich erst bei der Berechnung der 5%-Fraktile größere Abweichungen auf Grund unterschiedlicher Standardabweichungen. Es ist erkennbar, dass Serien mit den geringsten 5%-Fraktile die größten Variationskoeffizienten aufweisen.

<sup>231</sup> Vergleiche SCALP, Seite 5.

Generell ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede, ob die Vorspannung an den transparenten oder den mit dem Trennmittel versehenen Stellen gemessen worden ist. Die Abweichungen sind im Rahmen der Messgenauigkeit gering, wobei keine Korrelation in der Richtung der Abweichung vorliegt. Auch bei der Probe mit der geringsten gemessenen Vorspannung (Serie 6-2-3 SD) ist dieses der Fall. Die verhältnismäßig geringe Vorspannung kann darin begründet liegen, dass diese mehr zum Rand des Ofens platziert war. Es ist allgemein bekannt, dass die besten Vorspannergebnisse an in der Mitte liegenden Scheiben erzielt werden.

Einerseits zeigen die sehr konsistenten Mittelwerte, dass sich die Vorspannung nach dieser Messmethode unabhängig von der Bedruckungsart, der Schichtdicke oder Farbe gleichmäßig um 6 % geringer gegenüber den unbedruckten Proben ergibt. Dieses unterstützt die Annahme der Abhängigkeit der Vorspannung von der Lichtdurchlässigkeit der Bedruckung. Eine direkte Auswirkung auf  $\sigma_{TV}$  ist erkennbar. Dennoch lassen sich die 37,5 % Festigkeitsminderungen damit noch nicht vollständig erklären, und auch die Unabhängigkeit von der Farbgebung deutet auf weitere Effekte wie beispielsweise der strukturellen Defekte  $\sigma_{SD}$  hin.

Der Variationskoeffizient kann einerseits prozess- oder materialabhängig sein und andererseits ein Maß für die Präzision der Messungen darstellen. Übliche Variationskoeffizienten für Glasprüfungen beispielsweise bei der Biegezugfestigkeitsprüfung im Vierpunkt-Biegeversuch ergibt Variationskoeffizienten von etwa 10 %.<sup>232</sup> Diese liegen darin begründet, dass die Glasfestigkeit wegen der statistisch zufälligen Überlagerung von Defekt und Spannung nur als Grad der Oberflächenqualität angesehen werden kann. Der Vorspannprozess stellt ein kontrolliertes industrielles Verfahren dar, bei dem die Herstellparameter mit einer hohen Präzision gleichbleibend eingestellt werden können.<sup>233</sup> Daher liegen die

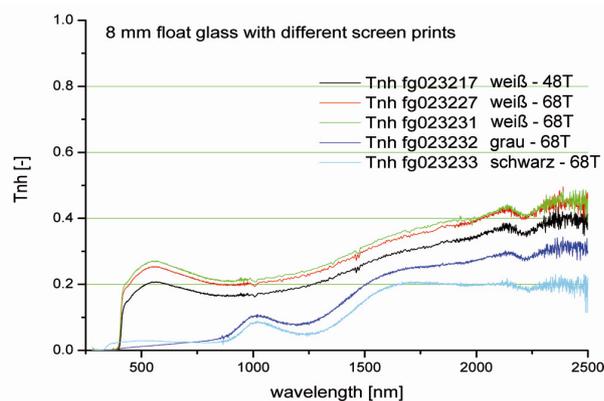
<sup>232</sup> Die in Abschnitt 4.2.3 zur Bestimmung der zu erwartenden Biegezugspannung angesprochenen Prüfungen im Rahmen der Fremdüberwachung ergeben Variationskoeffizienten von 8 % (6 mm) beziehungsweise 11 % (8 mm).

<sup>233</sup> Gleiches ist die Grundlage für die verschiedenen Materialteilsicherheitsbeiwerte für Floatglas und vorgespannten Gläsern. Bei vorgespannten Gläsern ergibt sich ein hoher Festigkeitsanteil aus einem kontrollierbaren Herstellprozess. Daher nimmt der Variationskoeffizient ab.

Werte der Variationskoeffizienten für die Streulichtmessungen im üblichen und zu erwartenden Bereich und zeigen eine korrekte Durchführung der Messungen.

### 5.3.4 Spektralmessung

Dadurch, dass die vorlaufenden Streulichtmessungen eine Bestätigung der These der asymmetrischen Spannungsprofile auf Grund veränderter thermischer Bedingungen nicht vermuten lassen, sind eigene Opazitätsmessungen unterblieben. Zur Auswertung der Versuche und Bewertung des Themenkomplexes wird auf anderenorts vorgenommene Messungen zurückgegriffen.<sup>234</sup> Im Auftrag von Interpane wurden am Fraunhofer ISE umfangreiche, spektrale Messungen an Glasproben mit unterschiedlichen Bedruckungen und Beschichtungen durchgeführt. Dabei wiesen alle Proben die gleichen geometrischen Abmessungen von 198 x 298 x 8 mm auf. Es ist anzunehmen, dass allen Proben das gleiche Glas zu Grunde liegt, das heißt, dass der Eisenanteil gleich ist. Alle Proben stammen von einem Hersteller. Als Sieb für den Siebdruck wurde eines mit einer Maschenweite von 68T beziehungsweise 48T verwendet. Die jeweiligen Schichtstärken sind nicht angegeben. Die Messungen und Berechnungen erfolgten nach der DIN EN 410. Es wird jeweils zwischen der Licht- und Energietransmission, sowie der Licht- und Energiereflektion unterschieden.



**Bild 46** Transmission von Gläsern verschiedener Farbgebung aber gleicher Schichtdicken

In den Ergebnissen zeichnet sich bezüglich der Lichttransmission ein eindeutiger Trend ab. Aus dem Transmissionsverlauf über der Wellenlänge im Spektrum von 280 bis 2500

<sup>234</sup> Vergleiche Fraunhofer 2010.

nm ist erkennbar, dass die Transmissionskurven umso geringere Werte zeigen, je dunkler die Farbgebung ist.<sup>235</sup> Allerdings ergibt sich in der rechnerischen Auswertung der Verlaufskurven, dass die graue Probe fg023232 die geringste Lichttransmission, allerdings eine größere Energietransmission gegenüber der schwarzen Probe fg023233 aufweist.

**Tafel 35** Ergebnisse der spektralen Transmissionsmessungen an verschiedenfarbig bedruckten Proben

Prüfkörper [ / ]	Bedruckung [ / ]	$\tau_L$ [ / ]	$\tau_e$ [ / ]
fg023217	Weiß – 48T	0,201	0,181
fg023227	Weiß – 68T	0,247	0,219
fg023231	Weiß – 68T	0,264	0,232
fg023232	Grau – 68T	0,015	0,054
fg023233	Schwarz – 68T	0,028	0,049

Der Unterschied zwischen den Proben fg023227 und fg023231 besteht im Lieferdatum. Hinsichtlich der Reflektion ergeben sich gleiche Tendenzen, wobei aber keine Korrelation zwischen Transmission und Reflektion zu erkennen ist.

**Tafel 36** Ergebnisse der spektralen Reflektion an verschiedenfarbig bedruckten Proben

Prüfkörper [ / ]	Bedruckung [ / ]	$\rho_{L,out}$ [ / ]	$\rho_{e,out}$ [ / ]
fg023217	Weiß – 48T	0,572	0,366
fg023227	Weiß – 68T	0,543	0,351
fg023231	Weiß – 68T	0,526	0,342
fg023232	Grau – 68T	0,171	0,140
fg023233	Schwarz – 68T	0,050	0,056

Unter Beachtung des Gesetzes, dass sich die Anteile von Transmission, Reflektion und Schwächung (Anteile aus Absorption und Streuung in optisch trüben Medien) zum Wert Eins aufaddieren, ergibt sich die Absorption aus einer Subtraktion von der Transmission und Reflektion vom Wert Eins. Gemäß Gleichung 33 wird der in das Medium eintretende Lichtstrom gleich um die Reflektion bereinigt. Dieses wurde in den vorliegenden Messungen allerdings nicht vorgenommen, vielmehr wurde die Reflektion explizit bestimmt.

<sup>235</sup> Ebenda Bild 18.

Prüfkörper [ / ]	Bedruckung [ / ]	$\tau_L$ [ / ]	$\rho_{L,out}$ [ / ]	$\mu_L$ [ / ]
fg023217	Weiß – 48T	0,201	0,572	0,227
fg023227	Weiß – 68T	0,247	0,543	0,210
fg023231	Weiß – 68T	0,264	0,526	0,210
fg023232	Grau – 68T	0,015	0,171	0,814
fg023233	Schw. – 68T	0,028	0,050	0,922

**Tafel 37** Absorption der verschiedenen Proben, berechnet aus

$$\mu_L = 1 - \tau_L - \rho_L \quad \text{mit}$$

$$\mu_L = \alpha_L + s_L$$

Wie schon in Abschnitt 2.2 erwähnt, weisen die verschiedenen Bedruckungsfarben unterschiedliche optische Eigenschaften hinsichtlich der Schwächung beziehungsweise Extinktion auf. Daher kann die Annahme, dass die Pigmentierung im Zusammenhang mit den veränderten thermischen Verhältnissen einen Einfluss auf den Gesamtkomplex besitzt, unterstützt werden. Allerdings erlauben die Versuchsergebnisse keine Beurteilung dahingehend, in welcher Art die Bedruckungsstärke diese Eigenschaften beeinflusst.

### 5.3.5 Zusammenfassung optische Untersuchungen

In allen Fällen haben sich im Rahmen der Messgenauigkeit gleiche Oberflächendruckvorspannungen auf der Bad- und Atmosphärenseite eingestellt. Bei den schwarz bedruckten weisen die siebbedruckten Proben tendenziell eine größere Vorspannung gegenüber den digitalbedruckten auf. Bei weiß bedruckten Scheiben ist diese Tendenz umgekehrt. Dabei ist auch unerheblich, ob die Proben mit dem Trennmittel versehen waren oder nicht. Ergänzende Untersuchungen haben ergeben, dass das Trennmittel nur einen unwesentlichen Einfluss auf die Messungen besitzt.<sup>236</sup> Gegenüber den unbedruckten Referenzproben ergeben sich teils geringere Vorspannwerte, die in ihrem Betrag keine Abweichung von 37,5 % ergeben. An anderen Stellen liegen die Vorspannwerte etwas höher, was möglicherweise auf die höhere Vorspanntemperatur zurückgeführt werden kann. Allerdings lässt sich eine eindeutige Tendenz nicht erkennen. Somit ist zwar ein Einfluss erkennbar, aber nicht in der zur Erklärung der Festigkeitsminderung erforderlichen Größenordnung.

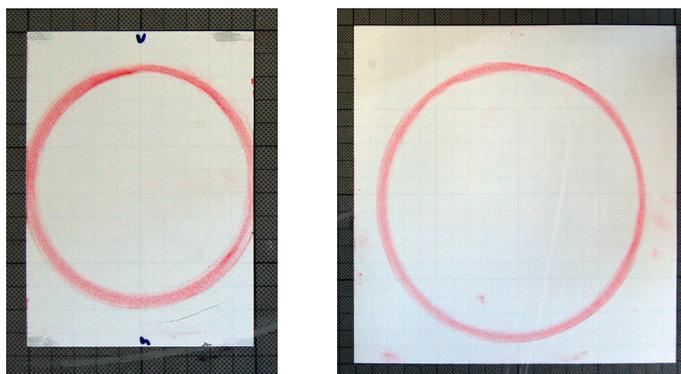
<sup>236</sup> Vergleiche Anhang A1.2 und Tafel 34, Seite 112.

Neben den Messergebnissen zum Vorspannungsprofil lassen sich zudem weitere Erkenntnisse zur Versuchsdurchführung und Auswertung gewinnen. Für diese hat sich der Ansatz der beidseitigen Messung und Kopplung in der Probenmitte als unter den gegebenen Umständen und Randbedingungen optimale Vorgehensweise herausgestellt.<sup>237</sup> Bezüglich der Auswertung kann zwar aus physikalischen Erwägungen von einer kubischen Ausgleichsfunktion ausgegangen werden, allerdings erlaubt das Messverfahren selbst keine Aussage darüber, welche Funktion den realen Verlauf abbildet. Zur Festlegung der Regression sind weitere Informationen erforderlich, die mittels der Differential-Refraktographie gewonnen werden können. Diese Methode liefert einen Wert der Druckvorspannung auf der Zinnbadseite. Unter Annahme der Korrektheit beider Verfahren müssen sich im Rahmen ihrer Messgenauigkeit gleiche Spannungen ergeben. Dieses ermöglicht dann wieder die Bestimmung des Grades der Ausgleichsfunktion für die Phasenverschiebung.

#### 5.4 Bruchversuche

Die Bruchversuche werden mit dem in erläuterten modifizierten Doppelring-Biegeversuch in der am Institut vorhandenen Universalprüfmaschine UPM 5581 von Instron vorgenommen. Dabei erfolgt im ersten Schritt eine Überprüfung der Geometrie hinsichtlich der Konzentrität und der Planparallelität der Ringe. Dafür kommen drucksensitive Folien von Fuji in einem Druckspannungsbereich von 25 – 100 bar<sup>238</sup> zum Einsatz. Die Konzentrität wurde ausgemessen.

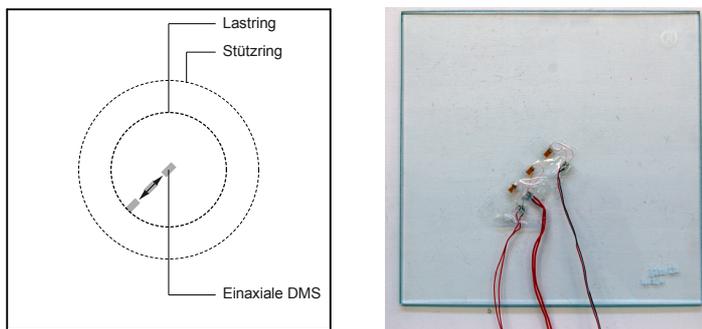
**Bild 47** Spannungsverteilung auf den Ringen



<sup>237</sup> Vergleiche Feldmann 2012, Seite 80 und Fußnote 182.

<sup>238</sup> Das entspricht einer Spannung von 2,5 – 10 N/mm<sup>2</sup>; beziehungsweise einer Kraft von etwa 3,93 – 15,70 kN bezogen auf den Lastring.

An Hand der Druckverteilung ist von einer Planparallelität der Ringoberflächen mit hinreichender Genauigkeit auszugehen. Darüber hinaus wurde als Minimum vor der Prüfung einer neuen Probengruppe die Planparallelität mit diesen Folien untersucht. Gegebenenfalls wurde die Versuchsvorrichtung angepasst, um planparallele Verhältnisse zu erzielen. Im zweiten Schritt erfolgt eine Kalibrierung beziehungsweise Überprüfung der Versuchsvorrichtung an Hand der analytischen und numerischen Berechnung unter Belastung.

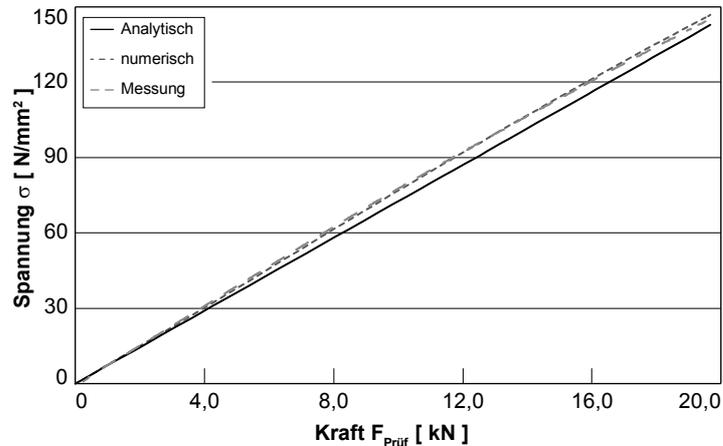


**Bild 48** Proben aus ungedrucktem ESG zur Kalibrierung des Versuchsstands und der Spannungsrate

Dazu werden ungedruckte, vorgespannte Scheiben gemäß Bild 48 mit drei Dehnmessstreifen versehen. Die Dehnungen werden über einen externen Messverstärker aufgezeichnet. In das Versuchsgestänge lässt sich keine weitere Kraftmessdose einbauen, so dass eine simultane Aufzeichnung der Messwerte in einem System nicht möglich ist. Allerdings wird die Aufzeichnungsfrequenz beider Messsysteme auf 10 Hz eingestellt, so dass eine Gegenüberstellung der aufgezeichneten Kraft und der gemessenen Dehnungen ausgehend von den Maximalwerten möglich ist. Bei der Auswertung des ebenen Spannungszustands werden im geometrisch quasi-linearen Bereich gleiche Dehnungen in radialer und tangentialer Richtung vorausgesetzt.

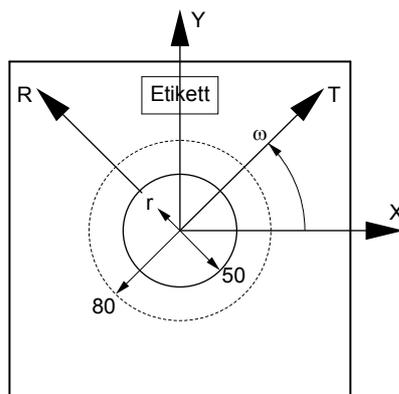
Bild 49 zeigt, dass die theoretischen Betrachtungen und die Messwerte gut übereinstimmen. Es kann daher eine im Rahmen der Genauigkeit ausreichende lineare Kraft-Spannungsbeziehung vorausgesetzt werden. Verformungen besitzen hinsichtlich der vorliegenden Fragestellungen keine Bedeutung. Daher unterbleibt eine Messung und Aufzeichnung dieser. Die Spannungsrate wurde wegen der Kraftsteuerung der Maschine ebenfalls überprüft. Die Krafrate für eine 6 mm dicke Scheibe beträgt  $14500 \text{ N/min} = 242 \text{ N/s}$ .

**Bild 49** Vergleich der gemessenen Spannung in Ringmitte mit der analytischen und numerischen Lösung zur Kalibrierung



Mit dem so festgelegten und kalibrierten Versuchsaufbau werden die Bruchversuche vorgenommen. Um einen möglichen Einfluss des Trennmittels auf die Biegezugfestigkeit zu bestimmen, wurden drei gleiche Serien (6-1-3 DD, 6-1-3 SD und 6-2-1 DD) einmal mit und ohne Trennmittel geprüft (Probentyp 2a und 2b). Da keine eindeutige Tendenz erkennbar ist (vergleiche Tafel 39), wurde beim Probentyp 3 (Bild 44) darauf geachtet, dass die zugbeanspruchte Oberfläche frei vom Trennmittel ist, und somit mögliche störende Nebeneffekte werden ausgeschlossen sind. Für die Prüfung werden die Proben bezüglich der Messstellen aus der spannungsoptischen Untersuchung immer gleichartig in die Versuchsvorrichtung eingebaut. Dabei weist das Etikett immer nach oben (Bild 41). Die Einzelwerte der Versuche sind in Anhang A3 aufgeführt. Zusätzlich zur Bruchkraft wird der Bruchsprung vermessen.

**Bild 50** Bruchsprung und Hauptspannungsrichtung der Vorspannung



Zusätzlich zu dem statistischen Ausreißertest nach Abschnitt 4.3 werden alle Proben, deren Bruchsprung außerhalb des

Lastring liegt, das heißt  $r > 50$  mm, aus der weiteren Auswertung entfernt.

#### 5.4.1 Unbedruckte Proben

Zur Referenzwertbildung wurden ebenfalls unbedruckte, vorgespannte Proben geprüft, da die Festigkeit vorgespannter Gläser nach DIN EN 1863-1 und DIN EN 12150-1 im Vierpunkt-Biegeversuch nach DIN EN 1288-3 ermittelt wird. Dabei beeinflusst die Kante mit ihrer möglichen geringeren Festigkeit die Ergebnisse. Im angewandten modifizierten Doppelring-Biegeversuch ist der Kanteneinfluss planmäßig ausgeschlossen. Daher können die Versuchsergebnisse nicht direkt mit den Normwerten verglichen werden.

Die unbedruckten Proben werden immer mit der Zugbeanspruchung auf Atmosphärenseite geprüft, um auch hier die Analogie zu den bedruckten Proben zu gewährleisten. Die betreffende Seite wurde vorab mit dem Zinnbadseitentester von Bohle ermittelt. Die Spannungen überschreiten in manchen Einzelwerten die in Abschnitt 4.2.3 gewählte Grenze von  $200 \text{ N/mm}^2$ . Dadurch ergeben sich größere Abweichungen zwischen der Spannung im Mittelpunkt und der unter dem Lastring. Eine Nachrechnung ergab eine Maximalabweichung von 10 %. Da die Mehrzahl der Bruchsprünge mehr als 40 mm vom Mittelpunkt entfernt war, und somit nahe am Lastring, wurde auf eine Anpassung der Werte verzichtet, da die Maximalspannungen auf Grund des geometrisch nichtlinearen Verhaltens unter dem Lastring auftreten.

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	MW [ $\text{N/mm}^2$ ]	Stabw [ $\text{N/mm}^2$ ]	Var [ % ]	5%- Fraktile [ $\text{N/mm}^2$ ]
6-0-0	1 – 10	217,68	25,04	11,50	154,89

**Tafel 38** Bruchspannungen im modifizierten Doppelring-Biegeversuch an unbedruckten Proben

Einzelwerte in Anhang A3.1

Wie zu erwarten liegen die Bruchspannungswerte über den geforderten Normwerten. Die wesentliche Ursache liegt darin, dass die Festigkeit von vorgespannten Gläsern im Vierpunkt-Biegeversuch mit Kanteneinfluss geprüft wird.<sup>239</sup> Durch Verwendung des modifizierten Doppelring-Biegeversuchs entfällt dieser Kanteneinfluss. Da die Ober-

<sup>239</sup> Vergleiche Bucak 2009, Seite 24 und Fußnote **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

flächenfestigkeit größer als die Kantenfestigkeit ist, erklären sich die hohen Bruchspannungen im unbedruckten ESG. Die absoluten Werte der Biegezugfestigkeit stimmen mit anderen Ergebnissen unter Berücksichtigung des Kanteneinflusses gut überein.<sup>240</sup>

#### 5.4.2 Schwarz bedruckte Proben

An den schwarz bedruckten Proben wurden die umfangreichsten Versuche mit dem größten Parameterspektrum durchgeführt.

**Tafel 39** Bruchspannungen im modifizierten Doppelring-Biegeversuch an schwarz bedruckten Proben

Einzelwerte in Anhang A3.2 – A3.5 und A3.7 – A3.10

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	Typ [ / ]	MW [ N/mm <sup>2</sup> ]	Stabw [ N/mm <sup>2</sup> ]	Var [ % ]	5%- Fraktile [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-1-1 DD	1 – 10	3	169,01	6,71	3,97	150,45
6-1-1 SD	11 – 20	3	131,60	3,57	2,71	121,56
6-1-2 DD	1 – 10	3	149,67	9,80	6,55	123,45
6-1-2 SD	11 – 20	3	113,73	3,89	3,42	102,89
6-1-3 DD	11 – 20	2a	163,69	3,89	2,38	152,27
6-1-3 DD	21 – 30	2b	150,46	6,85	4,56	131,65
6-1-3 SD	31 – 40	2a	113,68	2,63	2,31	105,95
6-1-3 SD	41 – 50	2b	117,32	3,64	3,11	106,21

Die Probengruppe 1 – 10 der Serie 6-1-3 DD (Probentyp 1) ist in ihren Einzelwerten im Anhang A3.6 aufgeführt. Allerdings hatten sich in der Versuchsdurchführung besonders im Hinblick auf die Wahl der geeigneten Elastomere Schwierigkeiten ergeben, so dass diese Gruppe nicht als repräsentativ betrachtet werden kann. Sie wird daher in den weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt.

Auffällig ist die starke Festigkeitsreduzierung in der Oberfläche der siebbedruckten gegenüber den unbedruckten Pro-

<sup>240</sup> Nach Laufs 2000, Seite 116, Tabelle 6.8 ergibt sich für den Mittelwert  $\sigma_{\text{Prüf,bb}} = 165,8 \text{ N/mm}^2$  und für die 5%-Fraktile  $\sigma_{\text{Prüf,bb,5\%}} = 138,3 \text{ N/mm}^2$ . Mit dem Faktor 0,80 bei Kantenbeanspruchung nach DIN 18008-1 ergeben sich Werte von  $\sigma_{\text{Prüf,bb}} = 207,3 \text{ N/mm}^2$  beziehungsweise von  $\sigma_{\text{Prüf,bb,5\%}} = 172,9 \text{ N/mm}^2$ . Allerdings sind diese Werte mit Vorsicht zu betrachten, da der entsprechende Faktor von 0,80 noch nicht endgültig wissenschaftlich bestätigt ist.

ben.<sup>241</sup> Dabei ist es unerheblich, ob die Proben mit dem Trennmittel versehen waren. Mögliche Festigkeitsbeeinflussungen auf Grund des Trennmittels, wie sie an Hand der Ergebnisse der digitalbedruckten Proben anzunehmen sind, wirken sich dort nicht aus. Vielmehr scheint der Einfluss der Farbe im Siebdruck selbst solche Effekte zu überlagern. Allerdings ist auffällig, dass die Serien mit Trennmittel unabhängig vom Auftragsverfahren einen geringeren Variationskoeffizienten aufweisen. Möglicherweise ergibt sich beim Siebdruck eine analoge planmäßige Vorschädigung, wie sie aus der Korundberieselung nach BRL bekannt ist<sup>242</sup>, wobei der Vorschädigungsgrad selbst nicht zunimmt. Im Gegensatz dazu ist es aber an Hand der Ergebnisse beim Digitaldruck erforderlich, dass das Trennmittel andererseits auch festigkeitsmindernde Einflüsse der Farbe blockiert. Sonst ergäbe sich nicht der Unterschied im 5%-Fraktil des Probentyps 2a zu 2b (Probengruppe 11 – 20 zur Gruppe 21 – 30), wobei die mit dem Trennmittel versehene Gruppe (Typ 2a) die größere Festigkeit aufweist.

Allerdings ist die relative Abnahme der Festigkeit im Digitaldruck weit geringer als die Reduzierung nach Norm in Höhe von 37,5 %. Unter Zugrundelegung des geringeren Wertes der Serie ohne Trennmittel liegt die Reduzierung bei 17,5 %. Ein Ansatz der Normwerte führt an dieser Stelle zu einer Unterschätzung des wahren Tragvermögens. Die Norm unterscheidet allerdings nicht zwischen den verschiedenen Farbsystemen und Auftragsverfahren. Bei den siebbedruckten Scheiben mit einer Schichtstärke von 100  $\mu\text{m}$  fällt die Reduzierung dagegen weit stärker aus und liegt im Verhältnis der Normangaben. Daraus lässt sich eher auf einen Einfluss der Mahlfineinheit von Glasfluss und Farbkörper als auf eine Änderung der thermischen Verhältnisse schließen. Beide sind beim Digitaldruck um eine Größenordnung geringer. Allerdings gibt es keine Aussagen darüber, inwiefern die Körnung der Pigmente das Absorptionsverhalten beeinflusst. Referenzmessungen zur Opazität von Digitaldruckfarben liegen nicht vor. Darüber hinaus nimmt der Variationskoeffi-

<sup>241</sup> Die Ergebnisse zum Siebdruck decken sich verhältnismäßig gut mit den Angaben in Ferro 2006, Seite 14. Dort werden typische Ergebnisse im kleinen Doppelring-Biegeversuch mit  $f_k = 117 \text{ N/mm}^2$  angegeben. Das geprüfte Farbsystem hat die Nummer 144001.

<sup>242</sup> Vergleiche BRL 2013, Anlage 11.5 und Durchholz 1995.

zient der siebbedruckten gegenüber den digitalbedruckten Proben ab. Dieser ist bei beiden Auftragsverfahren gegenüber den unbedruckten Proben weit geringer, was zunächst für eine Zunahme struktureller Defekte beziehungsweise für eine gleichmäßigere Vorschädigung spricht.

#### 5.4.3 Weiß bedruckte Proben

Gegenüber den schwarz bedruckten Proben wurden weniger Parameter mit den weiß bedruckten untersucht. Das wesentliche Ziel bestand darin zu ermitteln, ob die Farbgebung und somit die Pigmentierung beziehungsweise das Material der Farbkörper einen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit besitzt. Daher wurde das Dickenverhältnis  $d_{gl} / d_{em}$  nicht im gleichen Umfang variiert. Für die Probengruppe 1 – 10 der Serie 6-2-1 DD (Typ 1) (Anhang A3.11) gilt gleiches wie bei den schwarzen Proben der Serie 6-1-3, Gruppe 1 – 10. Die Ergebnisse fließen nicht weiter in die Auswertung mit ein.

**Tafel 40** Bruchspannungen im modifizierten Doppelring-Biegeversuch an weiß bedruckten Proben

Einzelwerte in Anhang A3.12 – A3.15

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	Typ [ / ]	MW [ N/mm <sup>2</sup> ]	Stabw [ N/mm <sup>2</sup> ]	Var [ % ]	5%- Fraktile [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-2-1 DD	11 – 20	2a	166,43	11,92	7,16	133,64
6-2-1 SD	21 – 30	3	124,03	3,83	3,09	113,31
6-2-3 DD	1 – 10	3	142,92	7,34	5,13	122,93
6-2-3 SD	11 – 20	3	93,44	4,17	4,46	81,98

Generell ist erkennbar, dass die Proben im Siebdruck geringere Festigkeiten bei geringerer Standardabweichung beziehungsweise geringeren Variationskoeffizienten aufweisen. Dabei ergibt sich für die Serie 6-2-3 SD ein 5%-Fraktilewert, der nah an dem Normwert von  $f_k = 75 \text{ N/mm}^2$  liegt. Offensichtlich ergibt sich beim Siebdruck eine gleichmäßigere Schädigung, die sowohl in einer geringeren Vorspannung als auch in größeren strukturellen Defekten begründet liegen kann. Für die These der veränderten Vorspannung spricht, dass die Bedruckungsstärke in diesem Fall einen Einfluss besitzt. Die Ergebnisse liegen leicht unterhalb der Herstellerangaben zu im kleinen Doppelring-Biegeversuch durchgeführten Tests von  $\sigma_{\text{Prüf,bb,5\%}} = 123 \text{ N/mm}^2$  beziehungsweise

$\sigma_{\text{Prüf,bB,5\%}} = 147 \text{ N/mm}^2$ .<sup>243</sup> Gegenüber den unbedruckten Referenzproben nach Tafel 38 beträgt die Festigkeitsminderung beim Digitaldruck 13,7 % beziehungsweise 20,6 % und beim Siebdruck 26,8 % beziehungsweise 47,0 %. Der letzte Wert liegt über dem der Norm nach Tafel 1 mit 37,5 %.

#### 5.4.4 Zusammenfassung Bruchversuche

Die Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit von Auftragsverfahren und somit von der Farbe beziehungsweise ihrer Mahlfineinheit und Zusammensetzung ist offensichtlich. Die siebbedruckten Scheiben zeigen in allen Fällen geringere Festigkeiten als die digital bedruckten. Die relativen Festigkeitsminderungen bezogen auf die Referenzserie 6-0-0 betragen für den Siebdruck 21,5 % bis 47,0 % und für den Digitaldruck 2,9 % bis 20,6 %. Generell weist der Siebdruck geringere Variationskoeffizienten als digital bedruckte Proben auf.

Tendenziell lässt sich bei beiden Farben eine Abhängigkeit von der Bedruckungsstärke sowohl beim Digital- als auch beim Siebdruck erkennen. Dieses spricht für die These der geänderten thermischen Verhältnisse. Einzig die Serie 6-1-2 stellt bei beiden Verfahren in der Art eine Ausnahme dar, dass die Festigkeitsabnahme nicht kontinuierlich oder proportional zur Schichtdickenzunahme verläuft. Dem gegenüber steht die Tatsache, dass beim Siebdruck die geringeren Variationskoeffizienten vorliegen, was auf eine gleichmäßigere Schädigung der biegezugbeanspruchten Oberfläche schließen lässt. Dieses stellt dann ein Indiz für strukturelle Defekte dar.

Die sehr geringen Biegezugfestigkeiten der siebbedruckten weißen Serie 6-2-3 erfordern eine genauere Betrachtung. Abweichungen im Vorspannprozess können ausgeschlossen werden, da diese Serie gemeinsam mit zwei weiteren in einer Ofencharge hergestellt wurden, obwohl deutlich ist, dass die Oberflächentemperatur beim Übergang in die Abkühlleinheit gegenüber den anderen Proben anders war.<sup>244</sup>

<sup>243</sup> Vergleiche Fußnote 241. Das geprüfte Farbsystem hat die Nummer 194002 beziehungsweise 194020.

<sup>244</sup> Vergleiche Bild 10, Seite 45, untere Zeile. Allerdings gilt einschränkend zu dieser Aussage die in Abschnitt 2.2 beschriebene Tatsache der Referenzabhängigkeit von thermographischen Aufnahmen.

Eine Erklärung ist auf Grund des vorliegenden Materials nicht möglich. Einzig ein Wechsel der Ofenparameter zwischen den beiden Beladungen ist auszuschließen. Daher müssen die Ursachen in der Sache selbst und nicht in den äußeren Herstellbedingungen und -parametern liegen. Allerdings trifft die Annahme der Opazität nicht zu, da gerade die größere Opazität und somit geringere optische Dichte der weißen Proben – wie aus Abschnitt 5.3.4 ersichtlich – die Vorspannung begünstigen sollte. Bei dieser Probe liegen die Standardabweichung und der Variationskoeffizient im gleichen Bereich wie bei allen Serien auch. Daher kann die These der größeren Defekte nur unter der Annahme aufrecht erhalten bleiben, dass die zusätzlichen Defekte oder die zusätzliche Defektverstärkung gleichmäßig verteilt vorliegen. Die größeren Defekte bewirken den geringen Mittelwert und die gleichmäßige Verteilung die geringe Standardabweichung.

Schlussfolgernd gilt, dass endgültige Aussagen einzig auf den Bruchversuchen basierend nicht zielführend sind. Zur genaueren Ermittlung der Ursachen der Festigkeitsminderung müssen weitere Informationen aus den spannungsoptischen Untersuchungen herangezogen werden.

### 5.5 Überlagerung Spannungsoptik und Bruchversuch

Durch Subtraktion der Vorspannung aus den spannungsoptischen Messungen von den Bruchspannungen kann auf die Festigkeit des nicht vorgespannten Werkstoffs geschlossen werden.<sup>245</sup> Diese sollte den Wert von  $f_k = 45 \text{ N/mm}^2$  als 5%-Fraktilwert nach DIN EN 572-1 annehmen<sup>246</sup>, wenn sich die Festigkeitsminderung allein auf Grund veränderter thermischer Verhältnisse und reduzierter Vorspannung ergeben sollte. Allerdings kann die Minderung ebenfalls – unter der Annahme, dass die Grundfestigkeit  $f_k$  nicht vermindert ist – aus der Differenz der Ausdehnungskoeffizienten zwischen Glas und Emaille und somit als Zwangsspannung interpretiert werden. Im Fall von einer reduzierten Grundfestigkeit  $f_k$

<sup>245</sup> Vergleiche Gleichung 1, Seite 24.

<sup>246</sup> Zum Vergleich der Grundfestigkeiten sind die Ergebnisse des modifizierten Doppelring-Biegeversuchs unter Ausschluss der Kante uneingeschränkt verwendbar, da die Festigkeit von Floatglas ohne Kanteneinfluss ermittelt wird. Vergleiche Bucak 2009, Seite 24 und Fußnote **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

scheinen dann eher nicht genauer spezifizierte strukturelle Defekte ursächlich für die Festigkeitsminderung zu sein.

Wegen der Ortsabhängigkeit der Bruchspannungen im modifizierten Doppelring-Biegeversuch auf Grund der Überlagerung der Zugspannung mit einem Oberflächendefekt und wegen der kantenparallelen Ausrichtung der Vorspannung erfolgt eine Umrechnung der Vorspannung auf die Wirkungsrichtung der Bruchtangential- oder -radialspannung. Dieses wird mit der Gleichung 41 in Verbindung mit Bild 50 vorgenommen, wobei vorausgesetzt wird, dass die gemessenen Vorspannungen im Glas die Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  darstellen.

$$\sigma_{v,T} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos 2\omega$$

Gleichung 41

Die Berechnung von  $\sigma_{bB}$  sollte an jeder Einzelprobe mit anschließender statistischer Auswertung erfolgen. Es tritt aber der Fall auf, dass bei einigen Proben die Vorspannung höher als die Bruchspannung ausfällt. Mögliche Erklärungen können neben der Messgenauigkeit darin bestehen, dass die Vorspannung nicht wie angenommen homogen verteilt ist oder dass andere, mit dem Messgerät nicht zu verzeichnenden Spannungsverhältnisse vorlagen. Ähnliche Resultate traten auch bei anderen Untersuchungen auf, ohne dass dort außer einer Infragestellung der Gültigkeit von Gleichung 1 genauer auf die Ursachen eingegangen worden ist.<sup>247</sup>

Des Weiteren ergeben sich bei dieser Form der Auswertung sehr hohe Variationskoeffizienten mit einhergehenden sehr geringen Grundfestigkeiten  $\sigma_{bB}$ , die nicht als der Realität entsprechend angenommen werden können. Dieses resultiert daraus, dass bei der Subtraktion einer Konstanten von den Stichprobeneinzelwerten – hier die Vorspannung  $\sigma_v$  von der Prüfbiegefestigkeit  $\sigma_{Prüf,bB}$  – die Standardabweichung konstant bleibt, während der Mittelwert abnimmt. Durch die Division von Standardabweichung zu Mittelwert als Variati-

<sup>247</sup> Vergleiche Veer 2009, Seiten 23 ff. und Tabelle 5. Allerdings wurde dort die Vorspannung in der Scheibenmitte gemessen, und die Probe anschließend mit Biegung um die starke Achse geprüft, so dass eine vollständige Kantenbeanspruchung vorlag. Daher sind diese Verhältnisse nicht vergleichbar.

onskoeffizient steigt dieser an, je geringer der Mittelwert bei konstanter Standardabweichung ausfällt.<sup>248</sup> Daher erscheint das Vorgehen berechtigt, nur die 5%-Fraktilen von  $\sigma_{\text{Prüf,bB}}$  und  $\sigma_V$  in Abzug zu bringen. Dieses ist ebenfalls deswegen gerechtfertigt, da die einzelnen Festigkeitsanteile statistisch unabhängig voneinander sind.<sup>249</sup> Die Vorspannung wird weiterhin gemäß Gleichung 41 umgerechnet. Die Ergebnisse der Überlagerung  $\sigma_{\text{bB},5\%} = \sigma_{\text{Prüf,bB},5\%} - \sigma_{V,T,5\%}$  für die unbedruckte Referenzserie sind in Tafel 41 dargestellt.

**Tafel 41** Biegezugfestigkeit des Basisglases der unbedruckten Probe als Referenzwert

5%-Fraktilen

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	$\sigma_{\text{Prüf,bB},5\%}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{V,T,5\%}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{\text{bB},5\%}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-0-0	1 – 10	154,89	98,56	56,32

Die 5%-Fraktile von  $\sigma_{\text{bB}}$  für ESG nach Abzug des tangentialen Anteils der Vorspannung  $\sigma_{V,T}$  stimmt unter Beachtung der jeweiligen Variationskoeffizienten gut mit dem Wert für Floatglas von 45 N/mm<sup>2</sup> nach DIN EN 572-1 überein. Eine Auswertung der Einzelwerte wie oben beschrieben ergibt einen 5%-Fraktilewert der Biegezugfestigkeit von  $\sigma_{\text{bB}} = 42,11$  N/mm<sup>2</sup> bei einem Variationskoeffizienten von 29 % (die Variationskoeffizienten für  $\sigma_{\text{Prüf,bB}}$  und  $\sigma_V$  betragen 11,50 % beziehungsweise 7,99 %). Die Werte decken sich unter Beachtung der Messgenauigkeit ebenfalls gut mit Literaturangaben.<sup>250</sup> Dort wird für die Glasfestigkeit ein 5%-Fraktilewert von  $\sigma_{\text{bB},5\%} = 51,1$  N/mm<sup>2</sup> angegeben. Für die bedruckten Proben ergeben sich die Werte der Biegezugfestigkeit nach Tafel 42 und Tafel 43.

**Tafel 42** Biegezugfestigkeit des bedruckten Glases

5%-Fraktilen – geordnet nach Bedruckungsstärke und Farbe

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	Typ [ / ]	$\sigma_{\text{Prüf,bB},5\%}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{V,T,5\%}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{\text{bB},5\%}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-1-1 DD	1 – 10	3	150,45	98,34	52,12
6-1-1 SD	11 – 20	3	121,56	107,66	13,90
6-1-2 DD	1 – 10	3	123,45	102,80	20,65
6-1-2 SD	11 – 20	3	102,89	108,48	-5,59

<sup>248</sup> Zum Beweis sind der Verschiebungssatz und die Rechenregeln für Reihen erforderlich. An dieser Stelle wird auf eine Herleitung verzichtet.

<sup>249</sup> Der Nachweis wurde in Laufs 2000, Seite 112 erbracht.

<sup>250</sup> Vergleiche Laufs 2000, Seite 116, Tabelle 6.8.

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	Typ [ / ]	$\sigma_{\text{Prüf,bb,5\%}}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{\text{V,T,5\%}}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{\text{bb,5\%}}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-1-3 DD	11 – 20	2a	152,27	103,13	49,14
6-1-3 DD	21 – 30	2b	131,65	95,30	36,34
6-1-3 SD	31 – 40	2a	105,34	100,41	4,93
6-1-3 SD	41 – 50	2b	106,21	99,19	7,02
<hr/>					
6-2-1 DD	11 – 20	2a	133,64	86,26	47,38
6-2-1 SD	21 – 30	3	113,31	93,70	19,60
6-2-3 DD	1 – 10	3	122,93	96,83	26,09
6-2-3 SD	11 – 20	3	81,98	91,59	-9,61

Tafel 42 Fortsetzung

Tafel 43 stellt die gleichen Versuchsergebnisse geordnet nach dem Auftragsverfahren und Farbsystem dar.

Serie [ / ]	Proben- gruppe [ / ]	Typ [ / ]	$\sigma_{\text{Prüf,bb,5\%}}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{\text{V,T,5\%}}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{\text{bb,5\%}}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-1-1 DD	1 – 10	3	150,45	98,34	52,12
6-1-2 DD	1 – 10	3	123,45	102,80	20,65
6-1-3 DD	11 – 20	2a	152,27	103,13	49,14
6-1-3 DD	21 – 30	2b	131,65	95,30	36,34
6-2-1 DD	11 – 20	2a	133,64	86,26	47,38
6-2-3 DD	1 – 10	3	122,93	96,83	26,09
<hr/>					
6-1-1 SD	11 – 20	3	121,56	107,66	13,90
6-1-2 SD	11 – 20	3	102,89	108,48	-5,59
6-1-3 SD	31 – 40	2a	105,34	100,41	4,93
6-1-3 SD	41 – 50	2b	106,21	99,19	7,02
6-2-1 SD	21 – 30	3	113,31	93,70	19,60
6-2-3 SD	11 – 20	3	81,98	91,59	-9,61

Tafel 43 Biegezugfestigkeit des bedruckten Glases

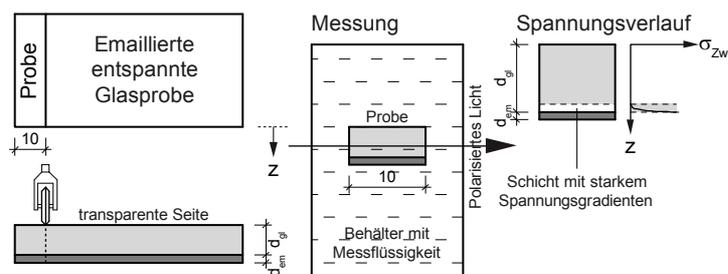
5%-Fraktilen – geordnet nach Auftragsverfahren

Es ergeben sich teilweise negative Festigkeiten, welche mechanisch gesehen unmöglich sind. Die Ursachen können in Messfehlern während der Versuchsdurchführung oder in einer ungeeigneten Wahl der spannungsoptischen Messver-

fahren selbst begründet liegen. Von der korrekten Durchführung der Bruchversuche wird ausgegangen, da die Randbedingungen der Norm hinsichtlich der Elastomere (Härte, Breite und Dicke), der Belastungsrate und der Probenvermessungen weitestgehend eingehalten worden sind.<sup>251</sup> Darüber hinaus wurden die geometrischen Verhältnisse regelmäßig überprüft – die Planparallelität mit drucksensitiven Folien – beziehungsweise waren Veränderungen in der Konzentrität durch geführte Bauteile ausgeschlossen.

Durchgeführte spannungsoptische Messungen mit der Kompensationsmethode an emaillierten Streifen mit 10 mm Breite in Floatglasqualität haben gezeigt, dass in der Grenzschicht vom Glas zum Emaille ein starker Spannungsgradient mit hohen Zugspannungen vorhanden ist.<sup>252</sup> Dabei fällt die Dicke dieser Gradientenschicht so gering aus, dass sie mit dem Messgerät SCALP-04 nicht aufgezeichnet werden kann. Andere Messungen an digitalbedruckten Proben zeigen zwar eine Zunahme der Zugspannung zur Grenzschicht in einem sehr kurzen Bereich, allerdings ist der absolute Zahlenwert der Zugspannung zu gering, um als Erklärung für die Festigkeitsabnahme geeignet zu sein. Einschränkend gilt aber, dass nicht bekannt ist, welche Stärke der Digitaldruck aufwies. An Hand der Bruchversuche ist erkennbar, dass dünne Emailleschichten im Digitaldruck nur sehr geringe Festigkeitsreduzierungen hervorrufen.

**Bild 51** Durchgeführte spannungsoptische Messungen mit dem Transmission Polariscope AP zur Qualitätsprüfung von Behälterglas



<sup>251</sup> Einzig die Elastomerhärte wich von den Vorgaben ab. Vergleiche Abschnitt 4.2.3, Seite 98.

<sup>252</sup> Angaben nach privater Korrespondenz mit dem Hersteller des Messgeräts, GlasStress Ltd. Die Messungen wurden mit dem Transmission Polariscope AP zur Qualitätsprüfung von Behälterglas vorgenommen. Gleiche Untersuchungen wurden für DipTech an Proben mit Digitaldruck vorgenommen. Vergleiche GlasStress 2013.

Bei sehr dünnen Schichten beziehungsweise sehr starken Spannungsgradienten wie beispielsweise bei chemisch vorgespanntem Glas liefert das Messgerät SCALP bauartbedingt keine verwertbaren Ergebnisse.<sup>253</sup> Auf Grund dieses Effektes kann geschlussfolgert werden, dass zwar Zwangsspannungen – deren Ursprung erst einmal nicht weiter von Belang ist – vorliegen, aber mit den vorhandenen Messmethoden nicht bestätigt werden können.<sup>254</sup>

Auffallend ist auch, dass das Trennmittel bei der Serie 6-1-3 DD eine Festigkeitssteigerung gegenüber den unbehandelten Proben ergibt. Die Vorspannung ist in beiden Fällen annähernd gleich (vergleiche Tafel 42). Beim Siebdruck ist dieser Einfluss auf die Prüfbiegefestigkeit nicht erkennbar (vergleiche Tafel 39).

Unabhängig davon führt eine Bedruckung im Siebdruck generell zu geringeren Festigkeiten als im Digitaldruck bei gleicher Nassschichtstärke. Dieses spricht dafür, dass offensichtlich die Mahlfeinheit – von unterschiedlichen Zusammensetzungen des Glasflusses abgesehen – einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss besitzt. Allerdings kann nicht zwangsläufig auf größere Defekte auf Grund der Korngrößen als Ursache der Festigkeitsminderung geschlussfolgert werden. Die Korngrößen beziehungsweise die Größe nicht aufgeschmolzener Bestandteile besitzen ebenfalls einen Einfluss auf die optischen Eigenschaften hinsichtlich Brechung und Streuung.

Zusammenfassend gilt, dass auf Grund der durchgeführten Untersuchungen allein keine Bestätigung oder eine Verwerfung der grundsätzlichen These dieser Arbeit vorgenommen werden kann.

<sup>253</sup> Vergleiche SCALP, Seite 19.

<sup>254</sup> Mittlerweile existiert eine neuere Version des Messgeräts SCALP auf dem Markt, welche durch eine Änderung der Bauart solche starken Gradienten aufzeichnen kann. Allerdings kam die Markteinführung zu spät, als dass es in der Arbeit hätte berücksichtigt werden können.

## 6 Numerische Simulationen

Mit numerischen Berechnungen sollen einerseits die jeweiligen Vorspannprozesse mit und ohne Bedruckung an Hand der untersuchten Proben modelliert, eine Parameterstudie zur Dickenvariation und andererseits die Auswirkung unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten auf die Spannungen im Verbundwerkstoff untersucht werden.

### 6.1 Simulation des Vorspannprozesses

#### 6.1.1 Grundlagen

Für die Simulation des Vorspannprozesses bietet das FE-Programm Ansys leistungsfähige Elemente an. Diese berücksichtigen viskoelastisches Materialverhalten in einer gekoppelten thermo-mechanischen Berechnung. Das numerische Modell wird mit stufenweiser Zunahme des Komplexitätsgrads aufgebaut. Am Ende eines jeden Schrittes erfolgt eine Validierung des Modells. Der Aufbau erfolgt dabei in der folgenden Reihenfolge:

- Temperaturberechnung mit Parametervariationen;
- Simulation der Vorspannung basierend auf Literaturangaben für unbedrucktes Glas<sup>255</sup>;
- Validierung des Modells an eigenen Ergebnissen;
- Erweiterung des Modells mit Bedruckung;
- Parameterstudien zu thermischen Randbedingungen.

Für die Emaille existieren keine Angaben über die Temperaturabhängigkeit der technischen Parameter. Da der Überzug aber größtenteils aus dem Glasfluss besteht, der große strukturelle Ähnlichkeiten mit dem Glas aufweist, werden die Temperaturabhängigkeiten beim Glas auf die Emaille in skaliert Form übertragen. Als Skalierungsfaktor dient das Verhältnis der Werte bei Raumtemperatur. Dennoch verbleibt ein Unsicherheitsfaktor, da diese Annahme nicht durch andere Angaben bestätigt werden kann. Bei den Parametern zu den Relaxationsvorgängen werden diese vom Glas in Ermangelung belastbarer Literaturangaben ebenfalls für die Emaille übernommen. Dieses Vorgehen entspricht sehr wahrscheinlich auf Grund der Einbettung metallischer Pigmente keiner realitätsnahen Abbildung. Allerdings werden

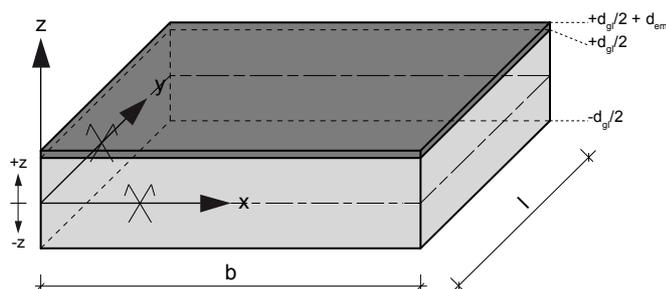
<sup>255</sup> Im Wesentlichen basierend auf Schneider 2001, Seiten 57 ff.

die so bedingten Fehler auf Grund der verhältnismäßig geringen Stärke der Emailleschicht als vernachlässigbar eingeschätzt. Es wird nur die Simulation des Vorspannprozesses betrachtet. Die Erläuterung der Nachrechnung des modifizierten Doppelring-Biegeversuchs zur Ermittlung der optimalen Ringverhältnisse erfolgt nicht, da dieses nur eine Überprüfung der analytisch ermittelten Ergebnisse darstellt.

### 6.1.2 Numerische Modellierung

Die Simulationsberechnungen werden mit dem Programm Ansys, Version 14.5 durchgeführt. Mit dieser Software sind gekoppelte thermo-mechanische Berechnungen hinsichtlich der Implementierung einfach durchzuführen. Allerdings wurde auf die Nutzung der Workbench in Ansys verzichtet und stattdessen auf Mechanical APDL zurückgegriffen.

Die numerischen Simulationen basieren auf einer Platte mit dickenabhängigen Abmessungen, wobei sowohl die Glasdicke als auch die Emailleschichtstärke Variationsparameter darstellen. Das Modell wird konsequent mit kubischen Volumenelementen vernetzt. Zur korrekten Abbildung des sehr starken Temperaturgradienten in den oberflächennahen Schichten auf Grund des Anblasens besonders in den ersten Sekunden wird eine vierfache Elementverdichtung zu den Oberflächen vorgenommen. Die Anzahl  $n$  der Elemente ist wiederum dickenabhängig. Dabei wird berücksichtigt, dass die Elemente an den Oberfläche nicht zu flach ausfallen, was numerische Probleme auf Grund eines ungünstigen Seitenverhältnisses begünstigen kann.



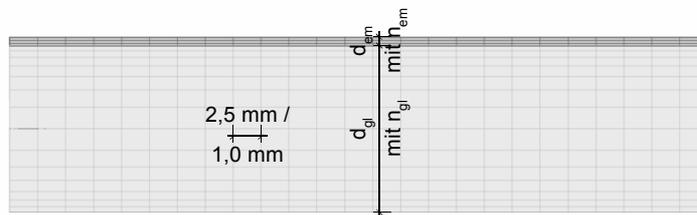
**Bild 52** Modell für die numerische Simulation

Bei den transparenten ESG-Scheiben entfällt die Schicht der Emaille.

Die transiente Temperaturfeldberechnung erfolgt mit den Elementen SOLID90. In der strukturmechanischen Berechnung wird einzig der Elementtyp automatisch bei gleichbleibenden Elementen und Knoten in SOLID186-Elemente getauscht. Beides sind 20-Knoten-Quaderelemente.

**Bild 53** Vernetzung für  $d_{gl} = 6$  mm mit 14 Elementen über der Dicke und Elementverdichtung zum Rand

Darstellung geschichtetes Modell mit  $d_{em} = 300$   $\mu$ m.



Die maximale Elementgröße beträgt bei der Simulation des ESG 2,50 mm und beim geschichteten Modell 1,00 mm auf Grund der sonst sehr ungünstigen Elementabmessungsverhältnisse. Für die Geometrie und die Anzahl der Elemente über die Glasdicke beziehungsweise Emailleschicht ergeben sich dickenabhängig die folgenden Werte.<sup>256</sup>

**Tafel 44** Dickenabhängige Modellierungsparameter

Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$b = l$ [ mm ]	$n_{gl}$ [ / ]	Dicke $d_{em}$ [ $\mu$ m ]	$n_{em}$ [ / ]
< 8,0	25	14	$\leq 100$	1
$8,0 \leq d_{gl} \leq 10$	50	26	$150 \leq d_{em} \leq 200$	2
> 10	60	40	$\geq 250$	3

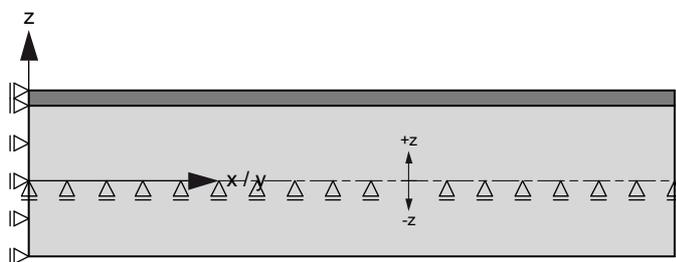
Es werden drei Lastschritte implementiert. Zur Abbildung des anfänglich sehr starken Temperaturabfalls und Erfassung des viskoelastischen Materialverhaltens unter Beachtung der Relaxationsvorgänge oberhalb  $T_{sp}$  besteht der erste Lastschritt bis zu der Zeit, bei der  $T_{sp}$  für alle Punkte des Querschnitts unterschritten ist, aus Einzelschritten mit einer Schrittweite von 0,10 Sekunden. Danach liegt die Temperatur an jeder Stelle im Körper unterhalb  $T_{sp}$  und der Körper verhält sich rein elastisch. Daher wird das Zeitintervall bis 100 s in Zeitschritten von 10 s fortgesetzt und danach bis zum Simulationsende bei 500 Sekunden auf 50 s verlängert. Die Spannungen werden immer für den Zeitpunkt  $t = \infty$  ausgewertet, das heißt, der Körper besitzt die Endtemperatur.

Abweichend von der Vorgehensweise in der Literatur und der üblichen Ausnutzung von Symmetriebedingungen zur Reduzierung der Rechenzeit<sup>257</sup> wird im Rahmen dieser Arbeit auch bei symmetrischen Verhältnissen stets das Modell

<sup>256</sup> Nach Laufs 2000, Seite 43 sollte die Größe des Modellierungsbereichs der Zone 1 mindestens  $2 \cdot d_{gl}$  betragen. Da in Laufs 2000 nur die halbe Scheibenstärke aus Symmetriegründen simuliert worden ist, betragen die seitlichen Abmessungen in dieser Arbeit mindestens  $4 \cdot d_{gl}$ .

<sup>257</sup> Vergleiche Schneider 2001, Seite 57.

mit der vollen Bauteilstärke als 3D-Modell berechnet. Da das Modell immer weiter basierend auf dem Vorgänger weiterentwickelt wird, ergibt sich zwangsläufig ein unsymmetrischer Aufbau mit einer emaillierten Oberfläche. Seitliche Symmetrierandbedingungen werden durch entsprechende Lagerrandbedingungen erfasst. Die Symmetriebedingungen in Ansys sperren die Freiheitsgrade der Verschiebung der betrachteten Fläche und die Rotationen. Da die gewählten Elemente SOLID90 beziehungsweise SOLID186 einzig die drei Verschiebungen und nicht die Rotationen als Freiheitsgrad berücksichtigen, wird keine Symmetrie gewählt, sondern es werden gelenkige Auflager vorgesehen.<sup>258</sup>



**Bild 54** Lagerungsbedingungen des Modells mit Ausnutzung der seitlichen Symmetrie

### 6.1.3 Temperaturprofil

Im ersten Schritt wird das zeitlich veränderliche Temperaturprofil in einer transienten Temperaturfeldberechnung unter konstanten thermischen Parametern nach Tafel 9 ermittelt. Die Validierung der Berechnung kann an Hand der analytischen Auswertung der Fourierschen DGL und Literaturangaben<sup>259</sup> vorgenommen werden. Als Randbedingungen der thermisch linearen Berechnung werden die in der Literatur angegebenen verwendet. Das berechnete Temperaturprofil stimmt mit der analytischen Berechnung und der Literatur (vergleiche Bild 19) überein. Die Temperaturrandbedingungen in Form einer Konvektion mit der Wärmeübergangszahl  $\alpha_K$  werden nur auf den Oberflächen aufgebracht. An den Kanten erfolgt wegen des Ausschnitts aus einer unendlich langen Scheibe keine Wärmeübertragung. Da in den experimentellen Untersuchungen einzig Werte für die Oberflächen ermittelt worden sind, wird das Modell als Ausschnitt aus einem Ganzen betrachtet.

<sup>258</sup> Das gleiche Vorgehen wurde in Laufs 2000, Seite 43 gewählt.

<sup>259</sup> Nach Blank 1979-1, Seite 3.

Bei den derzeit vorliegenden Modellen zur Spannungsbe-  
rechnung wird in der Regel die Wärmestrahlung nicht be-  
trachtet beziehungsweise als nicht relevant vernachläs-  
sigt.<sup>260</sup> Gerade oberhalb des viskoelastischen Übergangsbe-  
reiches erscheint diese Vernachlässigung als nicht zutref-  
fend. Die übertragene Wärmemenge durch Strahlung steigt  
mit der vierten Potenz der Temperatur an, das heißt, der  
Wärmestrom aus Strahlung wird sehr dominant gegenüber  
der Leitung. Analoges gilt für den Wärmeübergangskoeffi-  
zienten  $\alpha_K$ , der sich aus dem konvektiven Wärmeüber-  
gang<sup>261</sup> und einem Strahlungsanteil in Wechselwirkung mit  
dem Umfeld ergibt. Eine Trennung der Einzelanteile ist nur  
schwer vorzunehmen. Daher stellt der Wärmeübergangsko-  
effizient in der Regel einen Variationsparameter in der Mo-  
dellvalidierung dar, das heißt, der Wärmeübergangskoeffi-  
zient wird auf die Messergebnisse angepasst.<sup>262</sup>

Daher finden abweichend von den bisherigen Modellen die  
Temperaturabhängigkeit der thermischen Parameter und  
zusätzlich der Wärmetransport durch Strahlung in einer  
thermisch nichtlinearen Berechnung Berücksichtigung. Al-  
lerdings bietet Ansys keine Möglichkeit, Wärmestrahlung als  
Volumeneigenschaft zu erfassen. Einzig die Strahlungsüber-  
tragung zwischen Oberflächen oder von Oberflächen in den  
Raum ist möglich. Daher wird der Effekt der Volumenstrah-  
lung über Messergebnisse der effektiven Wärmeleitfähigkeit  
– Addition von Konduktion und Strahlung – aus der Literatur  
approximiert, sofern eine Strahlungsleitfähigkeit in den je-  
weiligen Berechnungen erfasst werden soll. Bild 13 in Ab-  
schnitt 2.3 zeigt verschiedene Ansätze und Funktionen der  
thermischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Temperatur.  
Die jeweiligen Funktionen der thermischen Parameter wer-  
den nach Tafel 10 übernommen. Ansonsten folgt das Modell

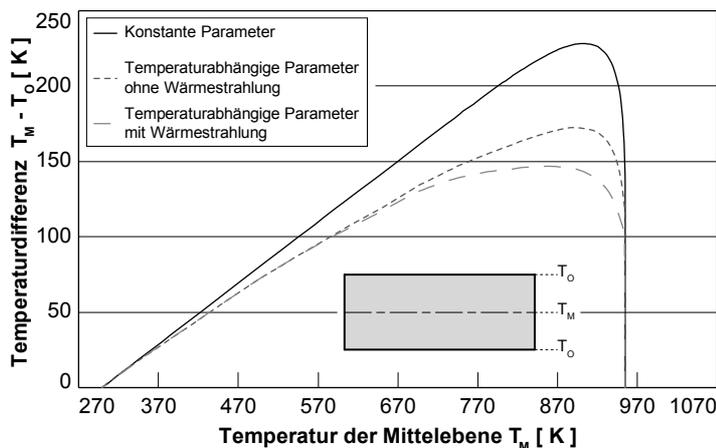
<sup>260</sup> Vergleiche Blank 1979-1, Seite 8 und Schneider 2001, Seite 29.

<sup>261</sup> Der konvektive Wärmeübergang erfolgt derart, dass die Wärme an der  
Bauteiloberfläche durch Leitung auf die Teilchen des angeströmten Flu-  
ides übertragen und dann abtransportiert wird. Vergleiche Gröber 1988,  
Seiten 139 ff. und Herwig 2006, Seiten 15 f. und 53 ff.

<sup>262</sup> Die Messergebnisse können einerseits aus der gemessenen Vorspan-  
nung im Glas resultieren. Andererseits sind vielfältige Versuche unter-  
nommen worden, um den Wärmeübergangskoeffizienten experimentell  
und mittels Simulationen zu bestimmen. Vergleiche u.a. Oel 1984, Sei-  
ten 4 f., Carré 1998, Seiten 684 f. und Lochegnies 2005, Seiten 2 f.

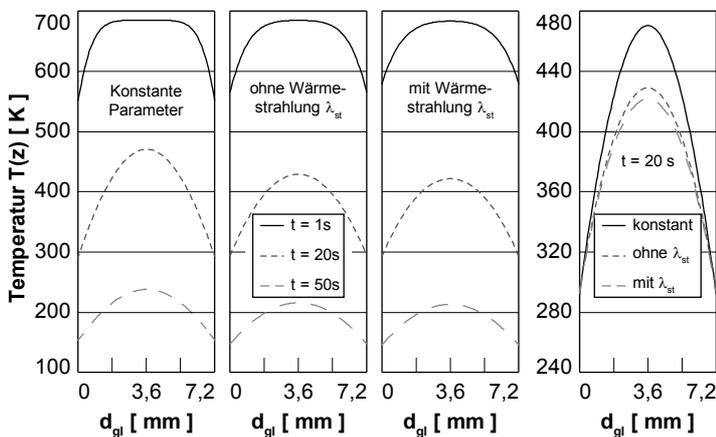
den Parametern, die dem Diagramm in Bild 19, Abschnitt 3.2 zu Grunde liegen.

In Bild 55 wurde die Berechnung analog Bild 19 ebenfalls mit temperaturabhängigen Parametern wiederholt.<sup>263</sup> Es ist ersichtlich, dass die Maximaldifferenz zwischen der Kern- und Oberflächentemperatur geringer ausfällt, je größer die Temperaturleitfähigkeit wird. In Bild 56 sind die Temperaturprofile zu ausgewählten Zeitpunkten dargestellt.



**Bild 55** Berechnete Temperaturprofile unter Beachtung verschiedener thermischer Parameter

Bild 56 stellt die Auswertung des Temperaturprofils von Bild 55 zu verschiedenen Zeitpunkten dar.



**Bild 56** Berechnete Temperaturprofile unter Beachtung verschiedener thermischer Parameter zu ausgewählten Zeitpunkten

Nach 20 s weist das Profil unter Beachtung konstanter Parameter ein wesentlich steileres Temperaturprofil auf. Dieses

<sup>263</sup> Für die Berechnung und ihre Randbedingungen vergleiche Blank 1979-1, Seite 3 und Fußnote 134.

ergibt sich aus der konstanten Temperaturleitfähigkeit, welche in den nichtlinearen Berechnungen temperaturabhängig ist. Daher wird besonders in den ersten Sekunden die Wärme langsamer aus dem Kern an die Oberflächen abgeleitet, und das Profil fällt steiler aus. Dieses kann eine Ursache dafür darstellen, dass Simulationsberechnungen zur thermischen Vorspannung nicht die gewünschte Genauigkeit aufweisen<sup>264</sup>, zumal analytische Lösungen von einer direkten Proportionalität zwischen der Temperaturdifferenz zwischen Kern und Oberfläche und der Vorspannung ausgehen.<sup>265</sup>

Die Erweiterung des Modells um die Emailleschicht mit den daraus resultierenden Folgen für das transiente Temperaturprofil wird in Abschnitt 6.1.5 ab Seite 147 vorgenommen.

#### 6.1.4 Vorspannprozess für unbedrucktes Glas

Im zweiten Schritt werden für jeden einzelnen Zeitschritt der Temperaturfeldberechnung die Spannungen unter Beachtung der Spannungsgeschichte und des viskoelastischen Materialverhaltens berechnet. Um die Vergleichbarkeit mit der Literatur zu gewährleisten, wird die Simulation zunächst mit den thermischen Parametern vorgenommen, die in den jeweiligen Quellen verwendet wurden.<sup>266</sup> Für alle folgenden Berechnungen – an bedruckten und unbedruckten Scheiben sowie zur Validierung des Modells – werden jeweils die gleichen Werte für die verschiedenen Relaxationsfunktionen verwendet.<sup>267</sup> Die Wichtungsfaktoren der Volumenrelaxation summieren sich nicht auf den Wert 1, da der Kompressionsmodul nicht vollständig relaxiert.<sup>268</sup> Die Summe der Wichtungsfaktoren der Schubspannungsrelaxation ergibt sich auf Grund von Rundungsfehlern nicht exakt zu 1,0. Daher weichen die tatsächlich genutzten Werte in der fünften Dezimalstelle geringfügig von den Literaturwerten ab.

<sup>264</sup> Vergleiche Oel 1984, Seite 5 und Schneider 2001, Bild 5.2, Seite 58.

<sup>265</sup> Vergleiche Fußnote 148.

<sup>266</sup> Vergleiche Oel 1984, Seite 5, Laufs 2000, Seiten 45 ff., Schneider 2001, Seiten 57 ff. und weitere.

<sup>267</sup> Entnommen Carré 1999, Seite 915, Tabelle 2. Die Zahlenwerte der Wichtungsfaktoren sind durch den Schubmodul geteilt. Vergleiche auch Schneider 2001, Seite 35.

<sup>268</sup> Vergleiche Schneider 2001, Seite 35.

Glieder Nr. [ / ]	Schubspannungsrelaxation bei 596 °C / 869 K		Volumenrelaxation bei 596 °C / 869 K	
	$\omega_k$ [ / ]	$\tau_k$ [ s ]	$\omega_k$ [ / ]	$\tau_k$ [ s ]
1	0,05523	$6,658 \cdot 10^{-5}$	0,018211	$5,009 \cdot 10^{-5}$
2	0,08202	$1,197 \cdot 10^{-3}$	0,018360	$9,954 \cdot 10^{-4}$
3	0,12150	$1,514 \cdot 10^{-2}$	0,023534	$2,022 \cdot 10^{-3}$
4	0,22860	0,1672	0,175224	$1,925 \cdot 10^{-2}$
5	0,28600	0,7497	0,323280	0,1199
6	0,22650	3,2920	0,261504	2,0330

**Tafel 45** Parameter der Relaxationsfunktionen für Schubspannungs- und Volumenrelaxation

Für die Strukturrelaxation ergibt sich ebenfalls eine Reihenentwicklung mit gewichteten Relaxationszeiten, die allerdings über mehr Ordnungen verlaufen als die der Spannungsrelaxationen.

Glieder Nr. [ / ]	$\omega_k$ [ / ]	$\tau_k$ [ s ]
1	0,05523	$5,965 \cdot 10^{-4}$
2	0,08202	$1,077 \cdot 10^{-2}$
3	0,12150	$1,362 \cdot 10^{-1}$
4	0,22860	1,505
5	0,28600	6,747
6	0,22650	29,63

**Tafel 46** Parameter der Relaxationsfunktionen für Strukturrelaxation

Zur Abbildung der Viskoelastizität mit der Tool-Narayananswamy-Shift-Funktion sind noch weitere Eingabeparameter erforderlich.<sup>269</sup>

Parameter [ / ]	Bezeichnung [ / ]	Wert
$\Delta H/R$	Aktivierungsenergie	55000 K
x		0,5
$\alpha_{gl}$	Ausdehnung unterhalb $T_g$	$9,10 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{li}$	Ausdehnung oberhalb $T_g$	$25,1 \cdot 10^{-6}$

<sup>269</sup> Allesamt mit Ausnahme von x entnommen Carré 1999, Seite 675. x nach Schneider 2001. Seite 53.

Für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten liegt keine Funktion der Temperaturabhängigkeit vor. Ansys erlaubt zwar die Eingabe dieser Werte als Polynomfunktion, allerdings bietet die Literatur keine Angaben zu den erforderlichen Parametern und Konstanten. Daher wird mit konstanten Werten für  $\alpha_{gl}$  und  $\alpha_{ij}$  gerechnet. Der Faktor zwischen beiden Werten beträgt 2,76 und liegt knapp unterhalb des pauschalen Wertes von 3,0.<sup>270</sup> Mögliche Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Spannungswerten können zu einem bestimmten Grad in dieser Tatsache begründet liegen. Allerdings wird diesem im Rahmen dieser Arbeit keine weitere Bedeutung zugemessen, da das Modell an den Messergebnissen über eine Variation des Wärmeübergangskoeffizienten kalibriert wird. Mit diesem Vorgehen sind auch solche Effekte abgedeckt.

Für unbedruckte, vorgespannte Gläser existieren einige Angaben in der Literatur über gleichartige Berechnungen<sup>271</sup> und auch durchgeführte spannungsoptische Messungen.<sup>272</sup> In Tafel 47 sind alle Eingabedaten für den Vorspannprozess aus den Literaturangaben aufgeführt. An Hand dieser Werte können die Validierungsberechnungen mit den in Abschnitt 2.3.2 aufgeführten thermischen Parametern für das Modell vorgenommen werden. Dabei ist nicht immer ersichtlich, welche Werte als Materialeigenschaften angesetzt wurden.<sup>273</sup> In diesem Fall erfolgt eine Eingrenzung der möglichen Parameter basierend auf Angaben der DIN EN 572-1 beziehungsweise nach den Angaben in Abschnitt 2.3.2.

**Tafel 47** Parameter zur Simulation des Vorspannprozesses basierend auf Literaturangaben

Prozess Nr. Quelle	$T_0$ [ K ]	$T_L$ [ K ]	$\alpha_K$ [ W/(m <sup>2</sup> ·K) ]	$d_{gl}$ [ mm ]
1 [Carré 1999]	923 1011	295	280,1 221,5	6,10
2 [Laufs 2000]	923	293	200	10,0 15,0
3 [Oel 1984]	900 901 918	293	27 107 190	4,00

<sup>270</sup> Vergleiche Fußnote 84.

<sup>271</sup> Vergleiche Carré 1999, Seite 678, Oel 1984, Seite 5, Laufs 2000, Seite 44 f. und Schneider 2001, Seite 59.

<sup>272</sup> Vergleiche Oel 1984, Seite 5.

<sup>273</sup> Ebenda.

Eine exakte Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus der Literatur ergibt sich nicht, da dort andere thermische Eigenschaften verwendet wurden. In dieser Arbeit wird den Messergebnissen mehr Gewicht als den Ergebnissen aus Simulationsrechnungen zugewiesen. Daher werden die Angaben von Oel 1984 als erste Validierungsgrundlage verwendet.

In Tafel 48 und Tafel 49 sind die Ergebnisse aus der Literatur den Ergebnissen der eigenen Simulationsberechnungen gegenübergestellt. Die Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_k$  für die Nachrechnungen von Oel 1984 wurden aus der dort angegebenen Wärmeübergangszahl  $b$  unter Beachtung einer Variation der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  bestimmt.

$$b = \frac{\alpha_k}{\rho \cdot c_p} \rightarrow \alpha_k = b \cdot \rho \cdot c_p$$

**Gleichung 42**

$b$  bezogene Wärmeübergangszahl

Dabei wird im ersten Fall mit  $c_p = 720 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  nach DIN EN 572-1 und im zweiten Fall mit  $c_p = 1010 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  nach Carré 1999 gerechnet. Es werden nur die Ergebnisse aufgeführt, die mit den Literaturangaben besser übereinstimmen.

<b>Dicke <math>d_{gl}</math></b> [ mm ]	4,0		
<b><math>\alpha_k</math></b> [ W/(m <sup>2</sup> ·K) ]	27,8	113,6	202
<b><math>T_0</math></b> [ K ]	900	901	928
<b><math>\sigma_D</math></b> [ N/mm <sup>2</sup> ]	<b>-11,5</b> -14,0	<b>-39,9</b> -46,0	<b>-74,3</b> -58,0
<b><math>\sigma_z</math></b> [ N/mm <sup>2</sup> ]	<b>5,9</b> 6,0	<b>22,1</b> 19,0	<b>40,1</b> 27,0
<b>Quelle</b>	Oel 1984 mit $c_p = 1010 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$		

**Tafel 48** Vergleich der eigenen Berechnungsergebnisse mit Angaben aus der Literatur unter Berücksichtigung konstanter Materialparameter

Die oberen Werte sind eigene Ergebnisse, die unteren sind Literaturangaben.

Die gleichen Berechnungen wurden mit den temperaturabhängigen Parametern nach Tafel 10 durchgeführt.

**Tafel 49** Vergleich der eigenen Berechnungsergebnisse mit Angaben aus der Literatur unter Berücksichtigung temperaturabhängiger Materialparameter

Die oberen Werte sind eigene Ergebnisse, die unteren sind Literaturangaben.

<b>Dicke <math>d_{gl}</math></b> [ mm ]	4,0		
<b><math>\alpha_K</math></b> [ W/(m <sup>2</sup> ·K) ]	27,8	113,6	202
<b><math>T_0</math></b> [ K ]	900	901	928
<b><math>\sigma_D</math></b> [ N/mm <sup>2</sup> ]	<b>-6,3</b> -14,0	<b>-24,3</b> -46,0	<b>-43,5</b> -58,0
<b><math>\sigma_z</math></b> [ N/mm <sup>2</sup> ]	<b>3,2</b> 6,0	<b>13,2</b> 19,0	<b>23,5</b> 27,0
<b>Quelle</b>	Oel 1984 mit $c_p = 1010 \text{ J/(kg·K)}$		

Es ist ersichtlich, dass manche Berechnungen besser mit den Literaturangaben übereinstimmen. Die wesentliche Ursache ist darin zu sehen, dass bei einigen Simulationen konstante (Laufs 2000) und bei anderen temperaturabhängige Materialparameter (Daudeville 1998 und Carré 1999) verwendet wurden (Oel 1984). Während die Ergebnisse der eigenen Berechnung unter Ansatz konstanter Parameter mit den Messwerten von Oel 1984 relativ gut übereinstimmen, weichen diese bei Verwendung temperaturabhängiger Parameter ab. Die Unterschiede ergeben sich dadurch, dass die Wärmeübergangszahl  $b$ <sup>274</sup> zwar experimentell aber unter Annahme einer konstanten Temperaturleitfähigkeit  $a$  bestimmt wurde.<sup>275</sup> Die Dichte  $\rho$  und die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  sind temperaturabhängig. Somit ist auch die Wärmeübergangszahl  $\alpha_K$  nach Gleichung 42 temperaturabhängig. Die bezogene Kenngröße  $b$  stellt lediglich einen messtechnisch erforderlichen Parameter dar. Da bei zunehmender Leitfähigkeit  $a$  sich das Temperaturfeld schneller ausbreitet, ergibt sich auch ein schnellerer Ausgleich zwischen der Kern- und Oberflächentemperatur und es stellt sich erst keine vergleichbar große Differenz ein.<sup>276</sup> Zur Erzielung gleicher Temperaturprofile wie bei konstanten Eigenschaften ist eine größere Wärmeübergangszahl  $\alpha_K$  erforderlich.

<sup>274</sup> In Oel 1984, Seite 2 ist die Wärmeübergangszahl  $b$  das Verhältnis von  $\alpha_K$  zur Dichte und spezifischen Wärmekapazität.

<sup>275</sup> Ebenda, Seite 5 in Verbindung mit Seite 2.

<sup>276</sup> Vergleiche Abschnitt 2.3.2, Bild 15 und Abschnitt 6.1.3, Bild 55.

Mit einer Variation der Wärmeübergangszahl  $\alpha_K$  erfolgt eine Nachrechnung der gelieferten ESG-Scheiben. Die so ermittelten Randbedingungen in Form der Aufheiztemperatur und der Wärmeübergangszahl bilden dann die Basis der weiteren Berechnungen an bedruckten Modellen. Die Materialparameter sind dabei temperaturabhängig. Als Zielwert dient der Mittelwert aus den Streulichtmessungen für die unbedruckten Gläser nach Abschnitt 5.3.3 und Anhang A2.1.

Serie [ / ]	$d_{gl}$ [ mm ]	$\sigma_z$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_D$ [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-0-0	5,86	54,8	-109,7

**Tafel 50** Werte aus den Streulichtmessungen zur Bestimmung der Wärmeübergangszahl  $\alpha_K$

Es sind zwar die Ofenober- und -untertemperaturen bekannt, womit eine Variation der Aufheiztemperatur entfallen könnte. Allerdings werden die Scheiben schon aus dem Ofen geholt, bevor sie eine gleichmäßige Erwärmung in Höhe dieser Temperatur aufweisen. In der Regel beträgt die Oberflächentemperatur etwa 910 – 920 K (640 – 650 °C). Wegen der Aufheizung beginnend von den Oberflächen ist eine gleichmäßige Erwärmung über die Glasdicke nicht gegeben. Eine Simulation des Aufheizprozesses wäre in Form einer transienten Berechnung zwar möglich, allerdings fehlen dazu die Angaben über die Aufheizmethode, ob diese konvektiv, mittels Strahlung oder kombiniert aus beidem erfolgt. Ebenso sind die Parameter zur Abbildung der Umgebung zur Strahlungsinteraktion in Form von Emissivität und Reflektion unbekannt. Daher kann nur mit einer gleichmäßigen Temperatur als Startprofil gerechnet werden. In Tafel 51 und Bild 57 sind die Ergebnisse der Variation der Wärmeübergangszahl  $\alpha_K$  dargestellt.

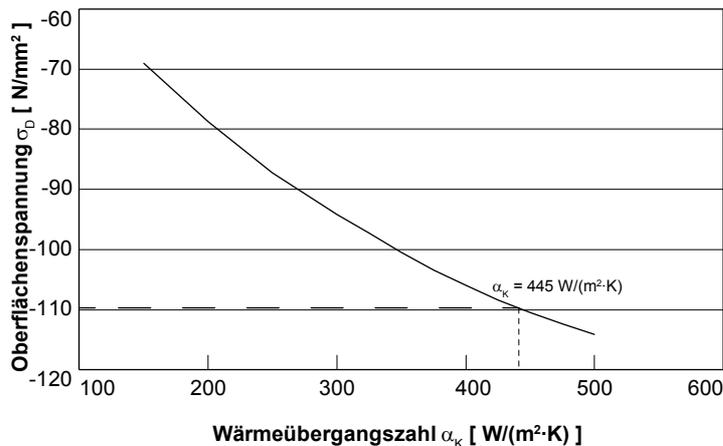
$\alpha_K$ [ W/(m <sup>2</sup> ·K) ]	$\sigma_z$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_D$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\alpha_K$ [ W/(m <sup>2</sup> ·K) ]	$\sigma_z$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_D$ [ N/mm <sup>2</sup> ]
150	34,1	-69,1	375	55,5	-103,4
200	39,1	-78,7	400	57,5	-106,0
250	44,1	-87,2	425	59,4	-108,4
300	48,9	-94,2	450	61,3	-110,5
325	51,2	-97,3	475	63,0	-112,4
350	53,4	-100,5	500	64,8	-114,1

**Tafel 51** Variation der Wärmeübergangszahl  $\alpha_K$  unter Beachtung temperaturabhängiger Materialparameter

$d_{gl} = 5,86$  mm  
 $T_0 = 923$  K / 650 °C  
 $T_L = 293$  K / 20 °C

**Bild 57** Oberflächendruckvorspannung in Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl  $\alpha_K$  unter Beachtung temperaturabhängiger Materialparameter

$$\begin{aligned} d_{gl} &= 5,86 \text{ mm} \\ T_0 &= 923 \text{ K} / 650 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_L &= 293 \text{ K} / 20 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$



Unter der Kombination  $\alpha_K = 445 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  und  $T_0 = 923 \text{ K}$  ( $650 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ergibt sich eine rechnerische Oberflächendruckvorspannung, die mit den gemessenen Spannungswerten für das ESG gut übereinstimmen (vergleiche Abschnitt 5.3.3, Tafel 28, Serie 6-0-0). Verglichen mit anderen Literaturangaben<sup>277</sup> erscheint der Wert für  $\alpha_K$  verhältnismäßig hoch, auch unter dem Aspekt, dass die Vorspannung bei konstanter Wärmeübergangszahl mit zunehmender Bauteildicke ansteigt. Somit ist zwar zum ersten erklärbar, weshalb dieser Wert nicht mit denen für die Gläser mit  $d_{gl} = 6,10 \text{ mm}$  übereinstimmt. Wegen der geringeren Bauteilstärke muss die Wärmeübergangszahl höher ausfallen. Allerdings ist der Dickenunterschied nicht so groß, als dass dieser die Differenz von  $\Delta\alpha_K = 445 - 280 = 165 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  vollumfänglich erklären könnte. Vielmehr liegt der Unterschied zum zweiten darin, dass das Modell dieser Arbeit konsequent mit temperaturabhängigen Materialparametern aufgebaut ist. Dieses ist bei den Referenzangaben aus der Literatur nicht so.<sup>278</sup> Eine zunehmende Wärmeleitfähigkeit erfordert eine Zunahme der Wärmeübergangszahl zur Erzielung des ausreichenden Temperaturgradienten zwischen Kern und Oberflächen.

Eine analytische Bestimmung der Wärmeübergangszahl ergibt für die Übertragung auf Grund von Konvektion etwa

<sup>277</sup> Insbesondere Carré 1999, Seite 677 und Laufs 2000, Seite 44.

<sup>278</sup> Carré 1999 und Laufs 2000 berücksichtigen zwar die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität, aber nicht die der Dichte. Diese besitzt aber einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Temperaturleitfähigkeit (vergleiche Abschnitt 2.3.2, Gleichung 15, Seite 35).

$\alpha_K = 200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Der Wärmeübergang durch Strahlung beläuft sich auf  $\alpha_S = 180 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .<sup>279</sup> In Summe ergibt sich dann  $\alpha_{K+S} = 380 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , was unterhalb der erforderlichen Wärmeübergangszahl liegt. Die Differenz lässt sich damit begründen, dass das Modell an Hand der Wärmeübergangszahl kalibriert worden ist und das Modell nicht alle realen Randbedingungen wie das nicht konstante Temperaturprofil bei Abkühlungsbeginn berücksichtigt. Daher ist das Simulationsmodell nur für Berechnungen an den Proben geeignet, die im gleichen Ofen mit gleichen Parametern hergestellt worden sind und mit denen die Modellkalibrierung vorgenommen worden ist. Eine Allgemeingültigkeit des Modells ist nicht pauschal anzunehmen.<sup>280</sup> Darüber hinaus ist die Wärmeübergangszahl ebenfalls temperaturabhängig, was in dieser Konsequenz nicht erfasst, allerdings auf Grund des Charakters als Kalibrierparameter gerechtfertigt ist.

Darauf basierend wird die Parameterstudie für die bedruckten Scheiben vorgenommen, wobei die Wärmeübergangszahl konstant mit  $\alpha_K = 445 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  angenommen wird.<sup>281</sup> Lediglich die homogene Aufheiztemperatur wird variiert, da auf Grund der Bedruckung sich das Absorptionsverhalten der Proben ändert. Gegenüber den unbedruckten Scheiben weisen die bedruckten andere Oberflächentemperaturen auf.<sup>282</sup> Daher erfolgt die erste Parametervariation bezüglich der Aufheiztemperatur.

### 6.1.5 Vorspannprozess für bedrucktes Glas

Die wesentliche Erweiterung für die numerische Simulation des Spannungsaufbaus in bedruckten Gläsern besteht neben der Ergänzung einer dünnen Schicht mit abweichenden Materialeigenschaften weniger in einer Variation der Materialparameter im zweiten Schritt der Spannungsberech-

<sup>279</sup>  $\alpha_K$  berechnet nach Martin 2006, Seite GK2, Gleichung 8,  $\alpha_S$  nach Herwig 2006, Seite 168, Gleichung 8-37. Die Berechnungen sind in Anhang A4.3 durchgeführt.

<sup>280</sup> Eine analoge Diskussion der Genauigkeit der numerischen Simulation erfolgt in Schneider 2001, Seite 56. Dort werden die Berechnungen nur für vergleichende Aussagen als ausreichend angesehen.

<sup>281</sup> Tatsächlich ist die Wärmeübergangszahl besonders auf Grund der Abgabe von Wärme durch Strahlung ebenfalls temperaturabhängig.

<sup>282</sup> Vergleiche Abschnitt 2.4.3, Seite 51.

nung<sup>283</sup>, als vielmehr in einer genaueren Erfassung des zeitlich und örtlich veränderlichen Temperaturprofils.

Dazu muss zur Abbildung der Emailleschicht eine geeignete Auswahl der Elemente vorgenommen werden. Da im weiteren Verlauf Spannungsberechnungen durchgeführt werden, bieten sich Schalenelemente mit einer Berücksichtigung von viskoelastischem Materialverhalten und thermischen Freiheitsgraden an. Allerdings erfolgt die Berechnung der Temperaturen bei diesen Elementen nur an den Elementmittelflächen, und der Verlauf über die Schichtdicke wird linear interpoliert. Eine realitätsnahe Abbildung des Temperaturgradienten ergibt sich nicht. Daher werden weiterhin Volumenelemente verwendet, obwohl diese wegen der sehr geringeren Schichtstärke eine ungünstige Elementgeometrie aufweisen. Dieses lässt sich aber durch eine kleinere Elementgröße kompensieren, auch wenn dadurch der Rechenaufwand wegen der zunehmenden Anzahl an Elementen steigt. Für die Schichtstärke von 25 µm würde dieses Verfahren allerdings zu einer unverhältnismäßig hohen Anzahl von Elementen führen, so dass an dieser Stelle planmäßig ungünstige Verhältnisse in Kauf genommen werden. Die Emailleparameter können Tafel 52 entnommen werden.<sup>284</sup>

**Tafel 52** Parameterzusammenstellung zur Berechnung der Spannungen im Schichtwerkstoff

Werkstoff [ / ]	E [ N/mm <sup>2</sup> ]	μ [ / ]	α <sub>T</sub> [ 1/K ]	d [ mm ]
Glas	70000	0,20	9,4 · 10 <sup>-6</sup>	6,00
Emaille	60000	0,23	8,0 · 10 <sup>-6</sup>	variabel

Eine weitere Schwierigkeit besteht in der sinnvollen und zielführenden Approximation des Wärmetransports aus Strahlung. Die in Ansys implementierten Elemente für Strahlungsberechnungen berücksichtigen einzig die Strahlungs-

<sup>283</sup> Trotzdem werden die zur Simulation erforderlichen Materialparameter als temperaturabhängige Eigenschaften verwendet.

<sup>284</sup> Die Literaturangaben zu den jeweiligen Ausdehnungskoeffizienten beziehen sich auf unterschiedliche Temperaturbereiche. Für die Berechnung wird α<sub>T</sub> auf einen Bereich von 50 – 300 °C, wie er für die Emaille gültig ist, bezogen. Vergleiche Tafel 9 und Tafel 16. Die Parameter des Glases ergeben sich nach DIN EN 572-1, die für die Emaille nach Dietzel 1981, Seite 134. Die Werte sind für die Emaille durch den Hersteller (Ferro) bestätigt.

wechselwirkung an beziehungsweise von Oberflächen.<sup>285</sup> Wärmestrahlung ist aber in transparenten Medien ein Volumen- und kein Oberflächenphänomen. Jeder Punkt im Körper kann Strahlung aussenden, aber auch absorbieren und wieder emittieren.<sup>286</sup> Vereinfacht wird dieses Verhalten in der Strahlungsleitfähigkeit, welche auf Messergebnissen beruht, erfasst. Zur Modellierung der emaillierten Scheiben und zur Abbildung der Blockierung des Strahlungsdurchgangs durch die Emailleschicht wird diese mit den thermischen Parametern nach Abschnitt 2.4.3 ohne Strahlungsanteile abgebildet. Die Kontaktfläche zwischen Glas und Emaille wird als voller thermischer Kontakt berücksichtigt. In einem ersten Schritt erfolgt die Überprüfung der Wärmeübergangszahl  $\alpha_K$  mittels einer Nachrechnung der geprüften Scheiben. Die Nachrechnung der Vorspannung der bedruckten Proben erfolgt mit den Serien 6-1-3 DD und 6-2-1 DD.

Serie [ / ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ mm ]	$\sigma_{D,VS}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_Z$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{D,RS}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-1-3 DD	5,92 / 0,100	-110,3	55,3	-110,8
6-2-1 DD	5,86 / 0,025	-107,9	53,5	-106,2

**Tafel 53** Werte aus den Streulichtmessungen zur Modellvalidierung

Die Nachrechnung der Scheiben der Serie 6-1-3 und 6-2-1 erfolgt unter Variation der Aufheiztemperatur. Für die Vorspannung reichen die gleichen Randbedingungen wie für ESG ( $\alpha_K = 445 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  und  $T_0 = 923 \text{ K}$ ) aus. Die Ergebnisse fallen auf der bedruckten Seite etwas geringer aus als die spannungsoptisch vermessen. Die Differenz bewegt sich aber im Rahmen der messtechnischen Genauigkeit. Relativ gesehen weichen die Zugspannungen im Inneren stärker ab. Dieses liegt darin begründet, dass mit einer homogenen und konstanten Temperaturverteilung zum Simulationsbeginn gestartet worden ist.

Serie [ / ]	$\sigma_{D,VS}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_Z$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{D,RS}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{em}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]
6-1-3 DD	-112,9	61,5	-107,4	-99,9
6-2-1 DD	-109,7	60,2	-108,6	-96,5

**Tafel 54** Ergebnisse der numerischen Simulation

<sup>285</sup> Diese Wechselwirkung kann dabei zwischen zwei Oberflächen oder dem Raum erfolgen.

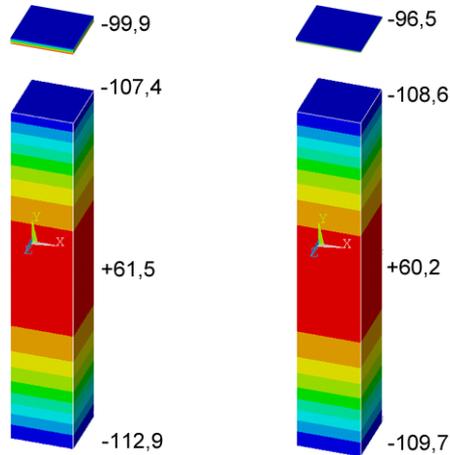
<sup>286</sup> Vergleiche Abschnitt 3.3.1.

**Bild 58** Oberflächendruckvorspannung im Glas und der Emaille unter Beachtung temperaturabhängiger Materialparameter

$T_0 = 923 \text{ K} / 650 \text{ °C}$   
 $T_L = 293 \text{ K} / 20 \text{ °C}$   
 $\alpha_K = 445 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Links Probe 6-1-3  
 Rechts Probe 6-2-1

Emalleschicht zur besseren Darstellung abgetrennt



## 6.2 Parameterstudien

Das validierte Modell erlaubt weitergehende Parameterstudien, welche versuchstechnisch mit großem Aufwand verbunden sind. Wesentlicher Schwerpunkt ist dabei der Einfluss der Schichtdicke der Emaille und eine Variation der Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf die resultierende Biegezugfestigkeit. Dabei erfolgt die Untersuchung rein numerisch, da analytische Verfahren zu starke Vereinfachungen schon für Metallemaillierungen aufweisen.

Für Metallemaillierungen liegen Angaben zur Spannungsbeziehung vor.<sup>287</sup> Allerdings sind analytische Berechnungen besonders von frei gelagerten Werkstücken nicht mit der geforderten Genauigkeit und Ergebnissicherheit möglich<sup>288</sup> beziehungsweise sind die getroffenen Modellannahmen nicht uneingeschränkt gültig. Neuere Veröffentlichungen befassen sich mit einer rechnerischen Simulation mittels Finiter Elemente Methode, um den Spannungsaufbau in emaillierten Gegenständen darzustellen.<sup>289</sup>

Grundsätzlich könnten diese analytischen Berechnungsmethoden auch auf andere Grundwerkstoffe angewendet werden, da die grundlegenden Annahmen der Isotropie der Ma-

<sup>287</sup> Vergleiche Dietzel 1962, Dietzel 1981, Petzold 1992.

<sup>288</sup> Gegenüber zwangsweise plangehaltenen Platten ist bei diesen Werkstücken die Spannungsverteilung nicht mehr konstant.

<sup>289</sup> Vergleiche Spang 1994, Seite 39 ff.

terialien, der langsamen Abkühlung<sup>290</sup> und der Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes<sup>291</sup> auch auf Glas übertragbar wären. Einschränkungen in der Gültigkeit und Genauigkeit des Verfahrens bestehen darin, dass spannungsoptische Untersuchungen an glasierten Glasstreifen gezeigt haben, dass sich kein linearer Spannungsverlauf einstellt.<sup>292</sup> Trotzdem wurden Formeln für die Berechnung von Zwei- und Mehrschichtsystemen analytisch mit Energieansätzen unter Annahme einer linearen Dehnungs- und Spannungsverteilung hergeleitet.<sup>293</sup>

Bei emaillierten Flachgläsern ergibt sich darüber hinaus zusätzlich noch eine Abhängigkeit vom Abkühlungsprozess mit einem mehr oder weniger ausgeprägten Temperaturgradienten über die Werkstoffdicke besonders durch Anblasen bei der thermischen Vorspannung.<sup>294</sup> Ebenso wird das viskoelastische Materialverhalten der glasigen Werkstoffe nicht erfasst. Somit ergibt sich oberhalb von  $T_g$  ein wesentlicher Spannungsabbau durch Relaxationsvorgänge.

Ein weiterer wesentlicher, nachteiliger Aspekt bei der Übertragung auf Glasemailen besteht im Verlauf der Temperaturendeckungskoeffizienten unter Temperaturerhöhung. Während dieser Verlauf für metallische Werkstoffe im betrachteten Temperaturbereich linear verläuft, weist er bei glaskeramischen Materialien im Bereich der Transformations-temperatur  $T_g$  einen Knick mit einem steileren Verlauf oberhalb  $T_g$  auf.<sup>295</sup> Zusammenfassend gilt, dass qualitative aussagekräftige Berechnungen von Spannungen mit den hergeleiteten analytischen Gleichungen im Verbundwerkstoff nicht möglich sind. Daher wird der Sachverhalt einzig mit numerischen Methoden untersucht.

<sup>290</sup> Bei vorgespannten Glasprodukten trifft diese Annahme nicht mehr zu.

<sup>291</sup> Vergleiche Dietzel 1962, Seite 39, Oel 1966, Seite 1728 und Dietzel 1981, Seite 138. Weitere Voraussetzungen sind die Annahme einer linearen Spannungsverteilung, der Ausschluss eines Temperaturgradienten über den Querschnitt und eine Verwölbung der Platte zu einer Halbschale mit nicht zu großer Krümmung.

<sup>292</sup> Vergleiche Bijl 1952, Seite 999, und Dietzel 1962, Seite 39.

<sup>293</sup> Vergleiche Oel 1965, Seite 32 und Oel 1966, Seiten 1728 ff.

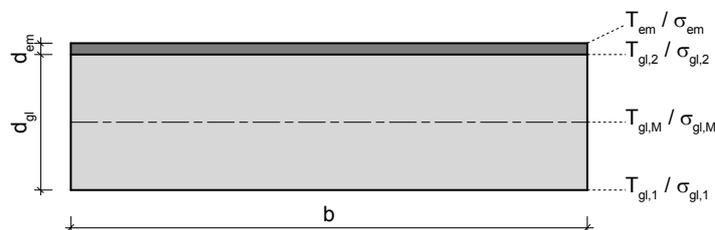
<sup>294</sup> Durch diesen Umstand ist eine weitere, wesentliche Voraussetzung der Berechnungsverfahren nicht mehr eingehalten. Vergleiche Dietzel 1962, Seite 39.

<sup>295</sup> Von manchen Autoren wird dieses als Ausdehnungsanomalie bezeichnet. Vergleiche Emonts 1985, Seite 81 und Röcker 1987, Seiten 45 ff. Die Ursachen liegen in Strukturänderungen oberhalb  $T_g$  begründet. Vergleiche Bild 14.

### 6.2.1 Auswirkung der Emailleschichtstärke

Basierend auf einer 6 mm beziehungsweise 10 mm dicken Glasscheibe erfolgt eine Berechnung der Temperaturverläufe mit dem besonderen Augenmerk auf mögliche Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Glasoberflächen. In einer anschließenden strukturemechanischen Berechnung wird die Auswirkung dieser sehr wahrscheinlich verschobenen Temperaturprofile hinsichtlich der Auswirkungen auf die Vorspannung untersucht. Dabei werden die gleichen Randbedingungen verwendet, wie sie in Abschnitt 6.1.4, Seite 146 ermittelt worden sind. Die Zuordnung der einzelnen Berechnungsstellen sind Bild 59 zu entnehmen.

**Bild 59** Kennzeichnung der Lage der verschiedenen Temperaturen in Tafel 55 und Spannungen in Tafel 56



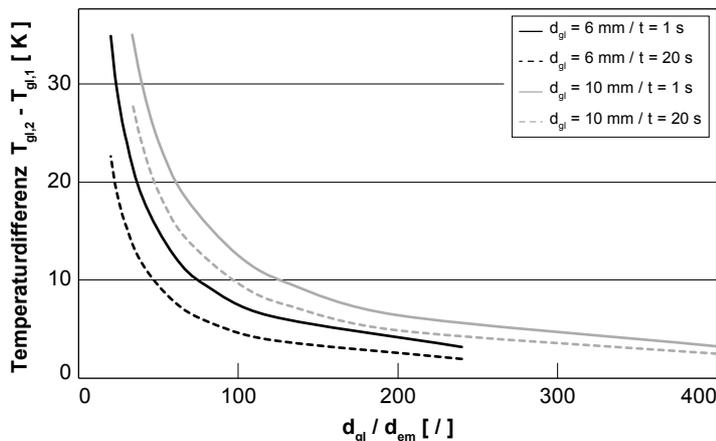
**Tafel 55** Temperaturen in den bedruckten Scheiben bei veränderlicher Emailleschichtstärke

$d_{gl} = 6 \text{ mm}$   
 $d_{em} = \text{variabel}$

$T_0 = 923 \text{ K} / 650 \text{ °C}$   
 $T_L = 293 \text{ K} / 20 \text{ °C}$   
 $\alpha_K = 445 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$t_1 = 1 \text{ s}$   
 $t_2 = 20 \text{ s}$

$d_{em}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Zeitpunkt [ / ]	$T_{gl,1}$ [ K ]	$T_{gl,M}$ [ K ]	$T_{gl,2}$ [ K ]	$T_{em}$ [ K ]
25	$t_1$	794,79	918,50	797,74	793,26
	$t_2$	496,81	603,46	498,62	496,47
50	$t_1$	794,79	918,58	800,65	791,78
	$t_2$	497,35	604,62	500,96	496,67
75	$t_1$	794,79	918,65	803,50	790,33
	$t_2$	497,87	605,77	503,28	496,86
100	$t_1$	794,79	918,73	806,32	788,92
	$t_2$	498,40	606,90	505,58	497,04
150	$t_1$	794,79	918,88	811,81	786,22
	$t_2$	499,43	609,14	510,14	497,40
200	$t_1$	794,79	919,15	817,11	783,62
	$t_2$	500,46	611,35	514,64	497,74
250	$t_1$	794,79	919,40	822,25	781,17
	$t_2$	501,46	613,53	519,08	498,07
300	$t_1$	794,79	919,28	827,22	778,86
	$t_2$	502,46	615,68	523,47	498,38



**Bild 60** Temperaturdifferenz zwischen den Glasoberflächen auf Grund des verminderten Wärmetransports durch die Emaillerschicht

$d_{em}$  = variabel

$T_0$  = 923 K / 650 °C

$T_L$  = 293 K / 20 °C

$\alpha_K$  = 445 W/(m<sup>2</sup>·K)

Es ist offensichtlich, dass die Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächen zunimmt. Die Auswirkungen einer solchen Differenz hinsichtlich der Spannungsverteilung werden in einer folgenden Berechnung genauer untersucht. Dabei werden zur Ausschaltung weiterer Einflüsse die thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_{T,gl}$  und  $\alpha_{T,em}$  gleichgesetzt.

$d_{em}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\sigma_{gl,1}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{gl,M}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{gl,2}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{em}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]
25	-112,9	61,7	-111,7	-99,3
50	-113,5	61,9	-111,0	-99,9
75	-114,1	62,1	-110,2	-100,7
100	-114,7	62,4	-109,2	-101,5
150	-116,0	62,8	-107,1	-102,6
200	-117,4	63,3	-104,5	-104,4
250	-118,9	63,8	-101,5	-105,9
300	-120,4	64,2	-98,3	-107,9

**Tafel 56** Spannungen in den bedruckten Scheiben bei veränderlicher Emaillenschichtstärke

$d_{gl}$  = 6 mm  
 $d_{em}$  = variabel

$\alpha_{T,gl} = \alpha_{T,em} = 9,1 \cdot 10^{-6}$  1/K

$T_0$  = 923 K / 650 °C

$T_L$  = 293 K / 20 °C

$\alpha_K$  = 445 W/(m<sup>2</sup>·K)

Das emaillierte Glas zeigt an Hand dieser Simulation prinzipiell qualitativ das gleiche Verhalten wie emaillierte Metalle. Auch bei diesen nehmen die Spannungen in den Blechen mit steigender Emaillenschichtstärke zu. Ein direkter Vergleich ist aber wegen des unterschiedlichen Materialverhaltens unter hohen Temperaturen nicht herzustellen.

**Bild 61** Spannungsentwicklung an ausgewählten Stellen in Abhängigkeit der Emailleschichtstärke

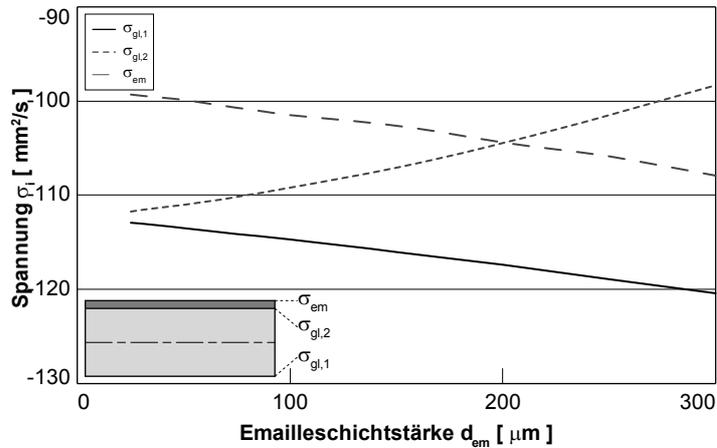
$$d_{gl} = 6 \text{ mm}$$

$$\alpha_{T,gl} = \alpha_{T,em} = 9,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$$

$$T_0 = 923 \text{ K / } 650 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_L = 293 \text{ K / } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\alpha_K = 445 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$



Die Ergebnisse zeigen auch, dass ein verschobenes Temperaturprofil nach dieser Simulation nicht allein ursächlich für die Festigkeitsminderung im Glas sein kann. Signifikante Reduzierungen in der Vorspannung ergeben sich erst ab einer Emailleschichtstärke von 200  $\mu\text{m}$ . Darunter besitzt die Emaille auch einen Einfluss, allerdings ist dieser zur Begründung des festigkeitsreduzierenden Effekts zu gering. Die Zunahme der Druckvorspannung auf der unbedruckten Seite ergibt sich aus dem asymmetrischen Temperaturprofil. Wesentlich für die Größe der erzielten Vorspannung ist die maximale Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Kern. Mit dem blockierten Strahlungsdurchgang durch die Emaille findet ein Wärmestau in der Grenzschicht statt. Der Kern kann nicht so schnell in seiner Temperatur abnehmen, wie es bei transparenten Scheiben mit symmetrischem Wärmetransport der Fall ist. Daher ist die Kerntemperatur zu gleichen Zeitpunkten bei bedruckten Scheiben höher als bei transparenten.

Ebenso können – wie in Abschnitt 5.5 diskutiert – Gesetzmäßigkeiten vorliegen, die mit dem bisherigen numerischen Modell nicht abgebildet werden können beziehungsweise sich möglicherweise nicht simulieren lassen. Solches wird weitergehende Forschung zeigen müssen.

## 6.2.2 Auswirkung der Ausdehnungsdifferenz

Weiterhin soll die Annahme der Einflussnahme unterschiedlicher Temperatureausdehnungskoeffizienten wie in Kapitel 1.2 beschrieben untersucht werden. Durch unterschiedliche Temperatureausdehnungskoeffizienten beider Fügepartner entstehen bei Abkühlung unterschiedliche Kontraktionen, die zu einer Verwölbung führen (Bimetalleffekt). Die Größe dieser Verwölbung hängt von der tatsächlichen Differenz der Ausdehnungskoeffizienten, dem durchlaufenden Temperaturprofil, dem viskoelastischen Verhalten oberhalb der Einfrieretemperatur  $T_E^{296}$ , den Dicken und E-Moduln der jeweiligen Einzelstoffe ab.

Zur Bestimmung der Ausdehnungskoeffizientendifferenz erfolgt eine Berechnung der Temperaturen basierend auf dem Schichtmodell mit konstanter Glasdicke von  $d_{gl} = 6 \text{ mm}$  und konstanter Emailleschichtstärke  $d_{em} = 100 \text{ }\mu\text{m}$ . Mit dieser Temperaturverteilung erfolgt dann die strukturmechanische Berechnung mit und ohne Emailleschicht. Somit erhält man die Spannungsverteilung in der Glasscheibe auf Grund der Differenz der Oberflächentemperaturen mit und unter Vernachlässigung der Ausdehnungskoeffizientendifferenz.

$\alpha_{T,em}$ [ 1/K ]	$\Delta\alpha_T$ [ 1/K ]	$\sigma_{gl,1}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{gl,2}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{em}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]
$7,50 \cdot 10^{-6}$	$1,50 \cdot 10^{-6}$	-112,5	-106,9	-167,8
$7,75 \cdot 10^{-6}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	-112,8	-107,3	-157,4
$8,00 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$	-113,2	-107,7	-147,1
$8,25 \cdot 10^{-6}$	$0,75 \cdot 10^{-6}$	-113,5	-108,0	-136,7
$8,50 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	-113,9	-108,4	-126,4
$8,75 \cdot 10^{-6}$	$0,25 \cdot 10^{-6}$	-114,3	-108,8	-116,0
$9,00 \cdot 10^{-6}$	$0,00 \cdot 10^{-6}$	-114,6	-109,1	-105,7

**Tafel 57** Spannungen in den bedruckten Scheiben bei veränderlicher Emailleschichtstärke

$$d_{gl} = 6 \text{ mm}$$

$$d_{em} = 100 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\alpha_{T,gl} = 9,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$$

$$T_0 = 923 \text{ K} / 650 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_L = 293 \text{ K} / 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

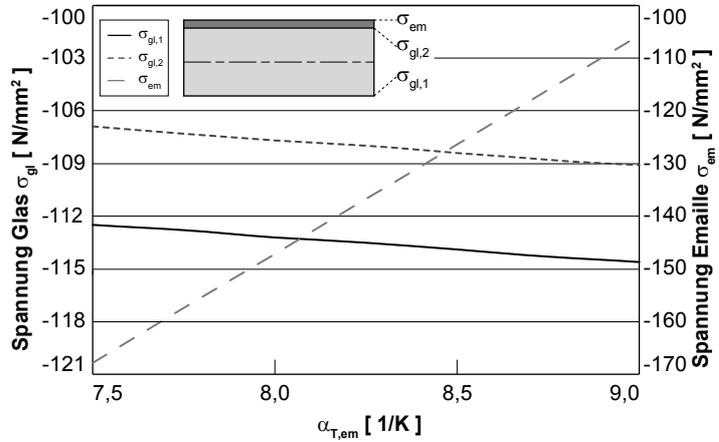
$$\alpha_K = 445 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Die in Abschnitt 1.2.2 geäußerte Annahme, dass eine Emailleschicht auf Grund ihrer geringen Dicke nur unwesentlich zur Spannungsentwicklung im Glas beiträgt, kann an Hand der der Ergebnisse der Berechnung und Bild 62 gezeigt werden.

<sup>296</sup> Vergleiche Fußnote 135.

**Bild 62** Oberflächendruckvorspannung im Glas unter Beachtung temperaturabhängiger Materialparameter in Abhängigkeit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_{T,em}$

$d_{gl} = 6 \text{ mm}$   
 $T_0 = 923 \text{ K} / 650 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $T_L = 293 \text{ K} / 20 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $\alpha_K = 445 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

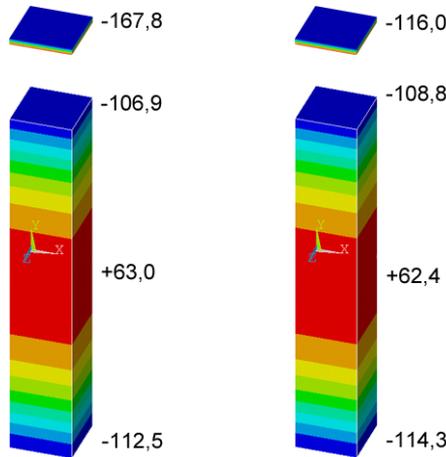


**Bild 63** Oberflächendruckvorspannung im Glas und der Emaille unter Beachtung temperaturabhängiger Materialparameter und Variation des thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_{T,em}$

$d_{gl} = 6 \text{ mm}$   
 $d_{em} = 100 \text{ } \mu\text{m}$   
 $\alpha_{T,gl} = 9,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$   
 $T_0 = 923 \text{ K} / 650 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $T_L = 293 \text{ K} / 20 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $\alpha_K = 445 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

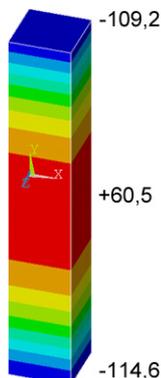
Links  $\alpha_{T,em} = 7,50 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$   
 Rechts  $\alpha_{T,em} = 8,75 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$

Emailleschicht zur besseren Darstellung abgetrennt



Zur Bestimmung der Auswirkung der Differenz erfolgt eine weitere Berechnung unter Ausschluss der Emailleschicht aber mit dem gleichen Temperaturprofil. Es reicht eine Berechnung mit der gleichen Temperaturergebnisdatei aus.

$\alpha_{T,em}$ [ 1/K ]	$\Delta\alpha_T$ [ 1/K ]	$\sigma_{gl,1}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{gl,2}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{em}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]
Ohne Bedeutung		-114,6	-109,2	-



**Bild 64** Oberflächendruckvorspannung im Glas unter Beachtung temperaturabhängiger Materialparameter und Ausschluss der Emailleschicht

$$d_{\text{gl}} = 6 \text{ mm}$$

$$T_0 = 923 \text{ K} / 650 \text{ °C}$$

$$T_L = 293 \text{ K} / 20 \text{ °C}$$

$$\alpha_K = 445 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Die Differenz der Spannungen aus diesem Modell und dem unter Beachtung der Emailleschicht stellt dann den Anteil der Ausdehnungskoeffizientendifferenz dar.

$$\sigma_{\text{TA}} = \sigma_{\text{gl},2,1} - \sigma_{\text{gl},2,2}$$

$\sigma_{\text{TA}}$  Einfluss Ausdehnungsdifferenz [ N/mm<sup>2</sup> ]

$\sigma_{\text{gl},2,1}$  Spannung mit Emailleschicht [ N/mm<sup>2</sup> ]

$\sigma_{\text{gl},2,2}$  Spannung ohne Emailleschicht [ N/mm<sup>2</sup> ].

Als Auswertestelle wird im Glas stets die Grenzschicht zur Emailleschicht herangezogen. Die Aufheiztemperatur beträgt  $T_0 = 923 \text{ K}$  (650 °C) und die Endtemperatur  $T_\infty = T_L = 293 \text{ K}$  (20 °C). Der Faktor zwischen  $\alpha_{\text{pg}}$  und  $\alpha_{\text{pl}}$  beträgt 2,76.

$\alpha_{\text{T,em}}$ [ 1/K ]	$\Delta\alpha_{\text{T}}$ [ 1/K ]	$\sigma_{\text{gl},2,1}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{\text{gl},2,2}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{\text{TA}}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]
$7,50 \cdot 10^{-6}$	$1,50 \cdot 10^{-6}$	-106,9	-114,6	7,7
$7,75 \cdot 10^{-6}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	-107,3	-114,6	7,3
$8,00 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$	-107,7	-114,6	6,9
$8,25 \cdot 10^{-6}$	$0,75 \cdot 10^{-6}$	-108,0	-114,6	6,6
$8,50 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	-108,4	-114,6	6,2
$8,75 \cdot 10^{-6}$	$0,25 \cdot 10^{-6}$	-108,8	-114,6	5,8
$9,00 \cdot 10^{-6}$	$0,00 \cdot 10^{-6}$	-109,1	-114,6	5,5

#### Gleichung 43

**Tafel 58** Spannung resultierend aus der Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten

$$d_{\text{gl}} = 6 \text{ mm}$$

$$d_{\text{em}} = 100 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\alpha_{\text{T,gl}} = 9,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$$

$$T_0 = 923 \text{ K} / 650 \text{ °C}$$

$$T_L = 293 \text{ K} / 20 \text{ °C}$$

$$\alpha_K = 445 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Mit den aufgeführten Parametern ergibt sich eine maximale Auswirkung der Emaille im Glas von  $\sigma_{\text{TA}} = 7,70 \text{ N/mm}^2$  bei  $\alpha_{\text{T}} = 7,50 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ . Unter Beachtung der Ausdehnungskoeffizienten für handelsübliche Emailen ( $\alpha_{\text{T}} \approx 8,00 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ) beträgt die Auswirkung  $\sigma_{\text{TA}} = 6,90 \text{ N/mm}^2$ . Die Festigkeitsmin-

derung um 37,5 % auf Grund der Emaille lässt sich mit diesem Effekt nicht erläutern. Ein Einfluss ist vorhanden, aber betragsmäßig zu gering.

### 6.2.3 Zusammenfassung numerische Simulation

Der Vorspannprozess lässt sich mit numerischen Simulationen gut abbilden. Allerdings sind bei solchen Berechnungen einige Randbedingungen und Annahmen zu beachten, die eine Übertragbarkeit eines einmal erstellten Modells einschränken. Daher sind Simulationsberechnungen prinzipiell nur dann empfehlenswert, wenn auch entsprechende Versuche und Messergebnisse vorliegen, an denen das Modell kalibriert werden kann.

Die Übertragbarkeit wird vor allem auch dadurch eingeschränkt, dass Gläser unterschiedlicher Zusammensetzung auch ein anderes mechanisches Verhalten zeigen. Die viskoelastischen Materialparameter zur Spannungs- und Strukturrelaxation lassen sich zwar auf Masterkurven zurückführen, allerdings nur für Gläser gleicher Zusammensetzung. Liegen für ein spezielles Glas diese Kennwerte nicht explizit vor, kann ein bestehendes Modell nur einzig zu qualitativ vergleichenden Zwecken genutzt werden. Für die in dieser Arbeit vorgenommene Modellierung wurden die benötigten Materialeigenschaften aus verschiedenen Literaturquellen zusammengestellt. Dabei war nicht immer eindeutig, welche Zusammensetzung die jeweiligen Gläser besaßen. Somit besteht eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der Gültigkeit der tatsächlich verwendeten Parameter.

Der übliche Kalibrierungsparameter ist die Wärmeübergangszahl  $\alpha_K$ . Dieser wird solange variiert, bis die Ergebnisse aus Messung und Berechnung übereinstimmen. Dieses liegt vor allem darin begründet, dass die Wärmeübergangszahl versuchstechnisch nur sehr aufwendig bestimmt werden kann. Mit dieser können ebenfalls weitere nicht real erfasste thermische Einflüsse abgedeckt werden. Dazu zählt, dass die Scheiben nicht beginnend mit einer konstanten Temperaturverteilung vorgespannt werden. In den Simulationsberechnungen wird davon ausgegangen, dass die Starttemperatur beziehungsweise Aufheiztemperatur gleichmäßig über die Scheibenstärke und homogen in der Fläche verteilt ist. Dieses liegt in der Realität nicht vor. Vielmehr werden die

Gläser bei einer Temperatur unterhalb der Ofentemperatur vorgespannt. Zu diesem Zeitpunkt liegt ein räumlich veränderliches Temperaturprofil mit einem Temperaturmaximum an den Oberflächen vor. Diese heizen durch Konvektion und Strahlung auf, während das Glasinnere durch den langsameren Prozess der Wärmeleitung erhitzt wird.

Ebenso führt eine Vernachlässigung der Wärmestrahlung zu nicht realistischen Ergebnissen, besonders bei bedruckten Proben. Diese strahlungstechnischen Eigenschaften, speziell die der Volumenstrahlung, lassen sich simulationstechnisch mit der gängigen und handelsüblichen Software nicht abbilden. Allerdings besteht dort die Möglichkeit der Berücksichtigung einer effektiven Wärmeleitfähigkeit.

Unter Beachtung des nicht konstanten Temperaturprofils zum Zeitpunkt des Vorspannbeginns lässt sich der nicht mit den spannungsoptischen Messungen übereinstimmende Eigenspannungsverlauf erklären. In den Simulationsberechnungen ergab sich kein Verlauf mit Druckspannungen doppelt so hoch wie die Zugspannung. Die spannungsoptischen Untersuchungen haben dieses Verhältnis mit  $\sigma_D = -2 \cdot \sigma_Z$  im Rahmen der Messgenauigkeit bestätigt.

Das vorliegende Modell wurde einerseits an Hand von Literaturangaben überprüft und an den Eigenspannungsmessungen über die Wärmeübergangszahl kalibriert. Mit dem so erstellten Modell konnte eine Parameterstudie zum Einfluss der Emailleschichtdicke und der Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten vorgenommen werden. Mit beiden Studien lässt sich über simulationstechnischem Wege die Festigkeitsreduzierung nicht erklären. Ebenso konnte die Annahme, wonach der Ausdehnungskoeffizient der Emaille an Hand von experimentellen Ergebnissen kleiner als der des Glases sein sollte, um eine optimale Festigkeit zu erzielen<sup>297</sup>, nicht unterstützt werden.

<sup>297</sup> Vergleiche Röcker 1987, Seite 169 und Kapitel 1.2, Seite 8.

## **7 Zusammenfassung und Ausblick**

### **7.1 Zusammenfassung und Diskussion**

Die vorliegende Arbeit diskutiert mögliche Ursachen der Festigkeitsminderung bei Gläsern auf Grund einer Bedruckung. Dabei wurde ein besonderer Schwerpunkt auf die Fragestellung nach geänderten thermischen Verhältnissen auf Grund der Emailleschicht während des erzwungenen Abkühlvorgangs gelegt. Andere, in der Literatur erwähnte Ursachen sind angesprochen und, wo nötig, als alleinige Ursache widerlegt worden.

Die Bruchversuche zeigen das erwartete Verhalten der Emaille bezüglich Festigkeitsminderung. Dabei muss zwischen dem Auftragsverfahren beziehungsweise der Emaillezusammensetzung und -körnung unterschieden werden. Digitalbedruckte Proben zeigen nicht die gleich starke Festigkeitsabnahme wie die siebbedruckten. Solch ein Verhalten kann einerseits auf andere Defektgeometrien auf Grund der unterschiedlichen Körnung oder andererseits auf eine Beeinflussung der optischen Eigenschaften durch die Körnung hindeuten. Beide Möglichkeiten können alleine aus den Bruchversuchen weder bestätigt noch abgelehnt werden.

Zur weiteren Informationsgewinnung wurden spannungsoptische Messungen durchgeführt. Die Messungen ergaben gleiche Vorspannwerte auf der bedruckten und unbedruckten Seite. Allerdings wurden diese Spannungen aus Messwerten extrapoliert, die jeweils 0,20 mm unter der Oberfläche auf Grund von zu großen optischen Störungen endeten. Daher können mögliche starke Spannungsgradienten in oberflächennahen Bereichen nicht erfasst werden. Diese scheinen aber nach neuesten Messungen nach der Kompensationsmethode an entspannten, emaillierten Proben vorzuliegen. Daher kann auch allein auf diesen Ergebnissen basierend die Grundthese nicht abgelehnt, aber auch nicht bestätigt werden.

Die Überlagerung der Bruchversuche mit den spannungsoptischen Messungen nach Gleichung 1 liefert konkrete Ergebnisse zur Beurteilung der Hauptthese. Unter Vernachlässigung des Einflusses der Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten verbleiben zur Reduzierung der Festigkeit nach Gleichung 2 die Anteile aus der Veränderung

der thermischen Verhältnisse  $\sigma_{TV}$  und der strukturellen Defekte  $\sigma_{SD}$ . Die spannungsoptischen Messungen zeigen geringfügige Unterschiede in der Vorspannung zwischen den bedruckten Proben und dem unbedruckten ESG. Somit tendiert der Anteil  $\sigma_{TV}$  gegen Null. Allerdings ergab die Differenzbildung  $\sigma_{Prüf,bb} - \sigma_{TV}$  vor allem beim Siebdruck sehr geringe beziehungsweise negative Werte. Das lässt schließen, dass die gemessene Vorspannung zu hoch ausfällt und weitere Veränderungen in der Vorspannung vorliegen müssen, aber mit den vorhandenen Geräten bauartbedingt nicht aufgezeichnet werden können. Somit ist eine Überlagerung von strukturellen Defekten mit Vorspannungsveränderungen aus veränderten thermischen Verhältnissen als Ursache der Festigkeitsminderung sehr wahrscheinlich.

Die ermittelten Ergebnisse erlauben neben der Beurteilung der Hauptthese eine Neubewertung der weiteren Annahmen<sup>298</sup> als mögliche Einzelursachen. Dabei unterstützen einige Resultate die eine oder andere Annahme, andere dagegen widersprechen diesen. Die Zusammenfassung kann Tafel 59 entnommen werden.

Theorie	Pro	Contra
Ausdehnungs- differenz	Dickenabhängigkeit der Festigkeitsabnahme	Annähernd gleiche Zahlenwerte von $\alpha_T$ für Glas und Emaille
Auswirkung: Zwang		Annähernd gleiche Zahlenwerte von $\alpha_T$ für die jeweiligen Farben
		Kein kontinuierlicher Zusammenhang zwischen Schichtdicke und Festigkeitsabnahme
		Streulichtmessungen zeigen gleiche Spannungen auf beiden Oberflächen
		Numerische Berechnungen zeigen nur geringe Auswirkungen

**Tafel 59** Neubewertung der Theorien nach Abschnitt 1.2.2 unter Beachtung der gewonnenen Resultate und Erkenntnisse

<sup>298</sup> Vergleiche Abschnitt 1.2.2, Seite 13.

Theorie	Pro	Contra
Porosität / Mahlfeinheit  Auswirkung: Größere Defekte	Abhängigkeit der Festigkeit von der Emaillefarbe (Körnung)  Bruchspannungen mit und ohne Trennmittel	Abnahme der Festigkeit bei Zunahme Emailleschichtstärke  Kritische Risstiefe $a_c$ größer als Dicke Emailleschicht $d_{em}$ bei Defekt in dieser  Die numerischen Berechnungen zeigen einen Dicken Einfluss
Auslaugung  Auswirkung: Größere Defekte	Dickenabhängigkeit der Festigkeitsabnahme	Annähernd gleiche Zusammensetzung von Glas und Emaille
Geänderte thermische Verhältnisse  Auswirkung: Reduktion der Oberflächen-druckvorspannung	Optische Kennwerte aus spektralen Messungen  Unterschiedliche Aufheizung im Vorspannofen auf Grund der Farbgebung  Dickenabhängigkeit der Festigkeitsabnahme (zunehmende Opazität)  Spannungsoptische Messungen an Behälterglas (Angaben von GlasStress)	Annähernd gleiche Festigkeitsabnahme bei weißen und schwarzen Proben  Ungeklärtes Abkühlverhalten der verschiedenen Farben und Farbsysteme  Abhängigkeit von der Körnung  Kein kontinuierlicher Zusammenhang zwischen Schichtdicke und Festigkeitsabnahme

Die jeweiligen Theorien werden im Folgenden unter den in der Arbeit gewonnenen Ergebnissen neu bewertet. Die Reihenfolge folgt dabei der in Abschnitt 1.2.2.

### Differenzen im thermischen Ausdehnungskoeffizienten

Für solche Zwangsbeanspruchungen spricht die Tatsache, dass die Festigkeitsminderung offensichtlich schichtdickenabhängig ist. Somit kann geschlussfolgert werden, dass je dicker die Emailleschicht ist, desto größer der Zwang ausfällt. Dieses Verhalten wird auch durch ähnliche Bauteile wie Bimetallstreifen und emaillierten Metallen unterstützt und lässt sich auch mechanisch plausibel darstellen.

Allerdings sprechen im Wesentlichen die annähernd gleichen Ausdehnungskoeffizienten von Glas und Emaille da-

gegen. Die Unterschiede sind gering und stimmen für den oberen Grenzwert der Emaille auch überein (vergleiche Anhang A4.1 und A4.2). Darüber hinaus lassen sich mit dieser Annahme nicht die Unterschiede zwischen den jeweiligen Auftragsverfahren (Digital- oder Siebdruck) und der Farbgebung erklären. Die Ausdehnungskoeffizienten sind für alle Systeme fast identisch, allerdings ergeben sich teils erheblich abweichende Prüfbiegefestigkeiten bei fast gleicher Vorspannung (vergleiche Tafel 43).

Ebenso sollten bei einer solchen Zwangsbeanspruchung auf einer Seite des Glases unterschiedliche Druckvorspannungen an den Oberflächen vorliegen. Dieses ist aber nach den durchgeführten Streulichtmessungen nicht der Fall. Vielmehr haben die Messungen nach dieser Methode mit dem Gerät SCALP einen ungestörten Eigenspannungsverlauf gezeigt. Ob allerdings solche Zwangsspannungen nur in einer sehr dünnen Grenzschicht mit einem sehr starken Spannungsgradienten auftreten, kann mit diesem Messgerät bauartbedingt nicht ermittelt werden (vergleiche Abschnitt 5.5).

Die numerischen Berechnungen zur Auswirkung der Ausdehnungskoeffizientendifferenz zeigen nur sehr geringfügige Einflüsse. Betragsmäßig sind diese mit  $\sigma_{TA} = 1,50 \text{ N/mm}^2$  so gering, dass dieser Einfluss kaum einen Effekt besitzt. Die grundsätzliche theoretische Annahme in Abschnitt 1.2.2, dass eine sehr dünne Emailleschicht in dem im Verhältnis dazu dicken Glasbauteil nur geringe Auswirkungen besitzt, konnte mit den numerischen Simulationen bestätigt werden.

Nach den vorliegenden experimentellen Ergebnissen, den numerischen Simulationen und theoretischen Betrachtungen kann diese Ursache als alleinige Erklärung für die Festigkeitsreduzierung ausgeschlossen werden. Diese Zwangsbeanspruchungen werden sehr wahrscheinlich einen Einfluss besitzen, aber nicht in der erforderlichen Größenordnung, wie auch die Simulationsberechnungen gezeigt haben.

### **Mahlfeinheit, Einbrand und Porosität der Emaille**

Die Ergebnisse lassen eine Abhängigkeit der Festigkeit von der Emaillefarbe, in diesem Fall konkreter der Körnung, vermuten. Die Farben der beiden Auftragsverfahren im Sieb- und Digitaldruck zeigen unterschiedliche Prüfbiegefestigkei-

ten bei einer in diesem Maße nicht abweichenden Vorspannung. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Farben besteht in der Mahlfeinheit des Glasflusses und der Pigmente. Die Zusammensetzung des Glasflusses ist hinsichtlich der Bestandteile im Prinzip gleich, von der Zugabe von Wismut bei Digitaldruckfarben abgesehen. Einzig die Mengenverteilung kann unterschiedlich sein, aber auf Grund der geheimgehaltenen konkreten Zusammensetzung der Digitaldruckfarbe nicht verglichen werden.

Die Korngröße beim Digitaldruck beträgt weniger als  $1\ \mu\text{m}$ , was wegen der Abrasion der Sprühdüsen auch für die Farbpigmente gelten muss. Bei den anderen Farbsystemen liegt die Mahlfeinheit des Glasflusses bei  $10\ \mu\text{m}$ , wobei die Pigmente größer sein können. Daher liegt ein Zusammenhang zwischen Korngröße, beziehungsweise Mahlfeinheit und Festigkeit nahe. Allerdings bietet dieser Sachverhalt keine Erklärung dafür, weshalb die Emailleschichtstärke einen Einfluss auf die Festigkeit besitzt. Die Korngröße ist konstant und unabhängig von der gewünschten Schichtstärke. Daher müssen sich bei Annahme der Mahlfeinheit als Ursache gleiche Festigkeiten bei beliebiger Schichtstärke ergeben. Dieses ist aber nicht der Fall. Somit ist diese Theorie als alleiniger Erklärungsversuch der Festigkeitsminderung nicht geeignet. Diese Tatsache wird durch die numerischen Berechnungen unterstützt. Diese zeigen ebenfalls einen dickenabhängigen Einfluss auf die Ergebnisse, allerdings nicht in der zur Erklärung der Festigkeitsreduzierung benötigten Größenordnung.

Ein weiterer Hinweis auf strukturelle Defekte liefern die Bruchversuche der Serie 6-1-3 DD mit und ohne Trennmittel (Probengruppen 11 – 20 und 21 – 30). Der Unterschied in der Bruchspannung ist signifikant. Es ist daher anzunehmen, dass das Trennmittel eine mögliche Defektentstehung durch den Emailleeinbrand unterbindet. Dieser Effekt ist allerdings nur beim Digitaldruck erkennbar. Beim Siebdruck der Serie 6-1-3 mit den Probengruppen 31 – 40 und 41 – 50 tritt dieser Unterschied nicht auf. Eine generelle Übertragbarkeit auf Emailen ist auch auf Grund der geringen Versuchsserie der Proben Typ 2 nicht zutreffend.

Darüber hinaus ist der Sachverhalt der größeren kritischen Risstiefe  $a_c$  gegenüber der Emailleschichtstärke nicht ge-

klärt. Diese Frage wurde aber im Rahmen dieser Arbeit nicht primär gestellt und somit auch nicht weiter untersucht. Dennoch kann eine weitere Betrachtung dieses Sachverhalts diese Theorie entweder bestätigen oder Hinweise zu anderen Ursachen und Mechanismen geben. Ebenso wurde die Frage der geringeren Festigkeit auf der Zinnbadseite nicht weiter untersucht. Aus anwendungspraktischer Sicht sollte ein solcher Fall der Bedruckung auf der Zinnbadseite unabhängig von einer möglichen geringeren Festigkeit nicht vorkommen.

### **Auslaugungsprozesse**

Von den gewonnenen Ergebnissen lässt sich die Dickenabhängigkeit der Festigkeitsreduzierung auf Auslaugungsprozesse hin deuten. Bei Konzentrationsunterschieden ist die absolute Menge an unterschiedlichen Bestandteilen mit zunehmenden Volumen größer. Allerdings bewirkt nicht die absolute Menge an unterschiedlichen Bestandteilen, sondern die Konzentration entsprechende Diffusionsprozesse. Darüber hinaus kann von einer homogenen Verteilung aller Bestandteile ausgegangen werden, das heißt, Konglomerate werden ausgeschlossen. Dann ist ebenfalls die Konzentration im gesamten Volumen gleich, und eine Abhängigkeit der Diffusion von der Schichtdicke erübrigt sich.

Als weiteres wesentliches Argument gegen eine solche Auslaugung spricht, dass auf Grund der gleichen Bestandteile von Glas und Glasfluss kein Austausch von verschiedenen Elementen auftreten kann. Allenfalls ein Ausgleich von unterschiedlichen Konzentrationen gleicher Elemente ist wegen der absoluten Mengenverhältnisse möglich. Allerdings sind die Unterschiede in den Masseprozenten von Natriumoxid und Aluminiumoxid nicht sehr groß. Einzig Bortrioxid und Zinkoxid sind Bestandteile im Glasfluss, die im Glas nicht vorkommen. Allerdings bewirkt die Borkonzentration nicht die Abminderung im Glas, da nach DIN EN 13024-1 für vorgespanntes Borosilicatglas ebenso die gleiche Festigkeitsminderung wie für emaillierte Produkte aus Kalk-Natronsilicatglas festgelegt ist. Ebenso ist die charakteristische Festigkeit  $f_k$  von ESG aus Kalk-Natronsilicatglas und Borosilicatglas nach beiden Produktnormen gleich. Somit besitzt Bor als zusätzlicher Bestandteil auch in unbedruckten Gläsern keinen Festigkeitseinfluss. Abschließend gilt, dass

Diffusionsprozesse nicht ausgeschlossen sind, aber keine Auswirkung auf die Festigkeit besitzen.

### **Änderung der thermischen Verhältnisse**

Die spektralen Messungen bestätigen generell die angenommenen optischen Eigenschaften hinsichtlich der Abhängigkeit der Farbgebung. Schwarze Bedruckungen absorbieren die Wärmestrahlung stärker als weiße oder unbedruckte Proben. Ob allerdings ein Unterschied zwischen den Farbsystemen besteht, geht aus den Unterlagen nicht hervor, da nur siebbedruckte Proben untersucht worden sind. Neben diesen Messungen zeigen auch die thermographischen Aufnahmen aus dem Herstellprozess eine Tendenz der Farbbeziehungsweise Bedruckungsabhängigkeit. In den thermographischen Aufnahmen zeigen die unbedruckten Proben andere Temperaturen als die bedruckten. Dieses wird auch sehr deutlich an den unbedruckten Teilbereichen zur spannungsoptischen Messung sowie den mit dem Trennmittel versehenen Stellen erkennbar.

Eine direkte Schlussfolgerung aus diesen Messungen kann bezüglich der Bruchversuche gezogen werden. Tendenziell weist die Festigkeitsabnahme eine Abhängigkeit von der Schichtdicke der Emaille auf. Somit liegt der Schluss des Einflusses der Opazität beziehungsweise Extinktion nahe. Allerdings erfolgt die Abnahme nicht kontinuierlich oder proportional mit der Schichtdickenzunahme. Ebenso weist die Festigkeitsreduzierung keine ausgeprägte Abhängigkeit von der Farbgebung, sondern vielmehr vom Farbsystem auf. Weiterhin muss dabei beachtet werden, dass die Extinktion hinsichtlich ihres Einflusses auf die Festigkeit einem Grenzwert bezüglich der Emailleschichtstärke zustrebt. Bei vollständiger Opazität bewirkt eine weiter zunehmende Schichtstärke keine weitere Festigkeitsreduzierung.

Daher ist die Biegezugfestigkeit offenbar von der Korngröße des Farbsystems abhängig. Dieses spricht zuerst für eine Zunahme der Defektgrößen, lässt sich aber auch mit dem Effekt der Opazität erklären. Eine feinere Körnung bewirkt eine homogenere Verteilung der Bestandteile und offenbar eine verringerte optische Dichte. Für diese Erklärung muss die Opazität von der Größe der Pigmente und ihrer inhärenten optischen Dichte abhängen. Allerdings sind dahingehend

keine Messergebnisse bekannt, so dass diese Annahme gestützt werden könnte. Zukünftige spektrale Messungen auch an digitalbedruckten Scheiben ermöglichen eine Bestätigung oder Verwerfung dieses Sachverhalts.

### **Bewertung der Fragestellungen**

In Abschnitt 1.3 wurden verschiedene Fragestellungen formuliert, die im Folgenden einzeln bewertet werden sollen:

- 1 Wie wirken sich unterschiedliche mechanische und thermische Eigenschaften der Verbundpartner auf das mechanische Gesamtverhalten aus?

Wesentliche Eigenschaften des Glases bezüglich der thermischen Vorspannung liegen neben dem viskoelastischen Materialverhalten bei hohen Temperaturen in den thermischen Parametern. Auf die räumliche und zeitliche Entwicklung des Temperaturprofils erfolgt eine struktur-mechanische Antwort des Werkstoffs. Da für die Emaille keine expliziten Daten zu den temperaturabhängigen Materialeigenschaften vorliegen, konnten diese nur auf Grund der Strukturgleichheit zum Glas aus diesem abgeleitet werden. Für strahlungsoptische Eigenschaften konnten vorhandene Messungen ausgewertet werden. Es hat sich gezeigt, dass sich durch die Emaille ein asymmetrisches Temperaturprofil einstellt. Allerdings konnte keine quantifizierte Bewertung dieses Effektes hinsichtlich der Vorspannung mit den verwendeten Messmethoden vorgenommen werden. Unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten bewirken nach den numerischen Untersuchungen eine Zwangsbeanspruchung einhergehend mit einer Abnahme der Vorspannung in der Grenzschicht zur Emaille. Allerdings sind die Auswirkungen zu gering, als dass dieses einzig für die Festigkeitsminderung ursächlich sein kann.

- 2 Welcher Spannungsverlauf stellt sich beim vorge-spannten emaillierten Glas ein?

Diese Frage konnte mit den vorgenommenen spannungsoptischen Messungen nach der Streulichtmethode nicht abschließend beantwortet werden, da entweder kein veränderter Spannungsverlauf gegenüber unbedruckten, vorge-spannten Scheiben vorliegt oder mit der gewählten Methode

etwaige Veränderungen nicht aufgezeichnet werden konnten. Diese Möglichkeit sehr starker Spannungsgradienten in der Grenzschicht zur Emaille wurde in Abschnitt 5.5, Seite 132 f. angesprochen und diskutiert.

### 3 Wie überlagern sich mögliche Zwangs- und Eigenspannungen?

Für diese Frage gilt analog das Gleiche wie für Frage 2. Die numerische Simulation hat ergeben, dass die Emailleschicht als untrennbarer Verbundpartner einen Zwang auf Grund der Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten ausübt, welcher aber schichtdickenabhängig nur geringe Auswirkungen besitzt. Die Berechnung ist in Abschnitt 6.2.2, Seite 155 ff. dargestellt und durchgeführt.

Die weiteren Anteile der Festigkeitsreduzierung aus strukturellen Defekten und veränderten thermischen Verhältnissen können aus der Überlagerung der Bruchversuche mit den spannungsoptischen Messungen gewonnen werden. Eine explizite Aufteilung der Einzelanteile ist aber nicht möglich. Vielmehr erlauben die Versuche – vor allem für den Fall, dass  $\sigma_{\text{Prüf,bb}} < \sigma_V$  – die Aussage, dass beide Anteile eine Auswirkung auf die Festigkeitsminderung besitzen.

### 4 Welchen Einfluss hat der opake Überzug auf das gesamte thermische Verhalten?

Der opake Überzug blockiert die Lichttransmission wesentlich durch Absorption und Streuung. Dabei ist die Schwächung von der Farbgebung abhängig. Helle Farben besitzen eine höhere Transmission als dunkle (Abschnitt 5.3.4, Seite 117 ff.). Somit liegt eine Beeinflussung des thermischen Verhaltens bezüglich einer veränderten Aufheizgeschwindigkeit im Vorspannofen vor. Inwiefern diese optischen Eigenschaften ein analoges Verhalten während des erzwungenen Abkühlprozesses aufweisen, konnte nicht abschließend durch Messungen bestätigt werden. Allerdings haben numerische Simulationen mit einer angenommenen vollständigen Blockierung der Wärmestrahlung durch die Emailleschicht ergeben, dass ein nicht unerheblicher Wärmestau in der Grenzschicht zur Emaille entsteht (Abschnitt 6.2, Seite 150 ff.). Es konnte gezeigt werden, dass bei Nichtbeachtung der Emailleschicht, das heißt keine

Zwangsbeanspruchung, dieses asymmetrische Temperaturprofil zu einer asymmetrischen Verteilung der Eigenspannung führt (Abschnitt 6.2.2, Seite 155 ff.). Der Effekt ist aber zu gering, als dass dieses durch ein Aufwölben der Scheiben bemerkbar ist oder die Festigkeitsminderung erklärt werden könnte.

In Abschnitt 1.3 wurden die spannungsoptischen Messungen an emaillierten Proben und der modifizierte Doppelring-Biegeversuch als versuchstechnisch neu beschrieben. Dabei ist die Verwendung des modifizierten Doppelring-Versuchs keine Neuentwicklung, sondern eine Anwendung bereits bekannter technischer Sachverhalte. Die Anwendung dieses Versuchs hat sich in der Arbeit als zielführend und einfach und schnell durchführbar gezeigt.

Bei den spannungsoptischen Messungen muss zunächst zwischen einer optimierten Versuchsanordnung zur bestmöglichen Messung und der anschließenden Auswertung unterschieden werden. In der Messdurchführung selbst müssen die Proben mit transparenten oder mit einem Trennmittel versehenen Stellen entsprechend präpariert sein, um die Messungen technisch durchführen zu können. Durch Bedruckungen kann keine Messung erfolgen. Bei der Festlegung solcher Messstellen ist besonders darauf zu achten, dass ich keine Beeinflussung anderer, folgender Versuche ergibt. Das diesbezügliche Vorgehen in dieser Arbeit hat sich bewährt. Die optimale Durchführung mit Messungen von beiden Seiten und anschließender Kopplung in der Mitte wurde aus der Literatur entnommen.

In der Auswertung wurden bisher in der Literatur beschriebene Vorgehensweisen wesentlich erweitert und ergänzt. Unter Beachtung der Kopplung zweier Messungen in der Mitte besitzt die Regression der Phasenverschiebung an beiden Oberflächen Stützstellen mit dem Wert Null. Zwischen diesen Stützstellen wird mit einer derart angepassten Polynomfunktion die Phasenverschiebung nach der Methode der kleinsten Summe der Fehlerquadrate approximiert. Bei unbekanntem Eigenspannungsverläufen beziehungsweise bei Unkenntnis der Oberflächendruckspannung sollten Validierungsmessungen mit einer weiteren spannungsoptischen Messmethode vorgenommen werden. An Hand dieser so gewonnenen zusätzlichen Stützstelle kann die Ordnung

des Polynoms festgelegt werden. Die gesamte Vorgehensweise der spannungsoptischen Messungen und ihrer Auswertung hat sich bewährt und besitzt Allgemeingültigkeitscharakter für jegliche Messungen solcher Art.

### **Schlussfolgerung**

Keine der bisher in der Literatur aufgeführten Thesen und Theorien zum festigkeitsreduzierenden Einfluss der Emaille bietet eine vollumfängliche und zweifelsfreie Erklärung des gesamten Komplexes. Vielmehr erscheint es so, dass ein Zusammenwirken verschiedener Einflüsse ursächlich ist. Die durchgeführten Untersuchungen haben einen Teilkomplex genauer untersucht, ohne dass die grundsätzlichen Betrachtung bestätigt oder verworfen werden können. Dennoch konnten neue Erkenntnisse generiert werden, die eine zielgerichtete Fortführung der Forschung ermöglichen.

Wesentliche Untersuchungen zur aufgestellten These konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen werden. Mehrheitlich liegt dieses darin begründet, dass für die Untersuchungen dienliche Messgeräte erst zum Ende der Bearbeitung erhältlich waren. Somit müssen die gewonnenen Erkenntnisse bis auf weitere Untersuchungen ihren Thesencharakter bewahren, auch wenn durch andere Betrachtungen diese untermauert werden.

Die Ursache der Festigkeitsminderung muss durch weiterführende Forschung endgültig erbracht werden. Die vorliegende Arbeit liefert aber die Basis, auf der fortführende Forschungen zielgerichtet vorgenommen werden können.

### **7.2 Ausblick**

Die wesentliche Aufgabe in der nahen Zukunft wird es sein, mit den angesprochenen spannungsoptischen Messmethoden den offensichtlich vorhandenen beziehungsweise angenommenen Spannungsgradienten an verschiedenen Proben genauer zu untersuchen, zu lokalisieren und quantitativ zu erfassen. Bei zutreffender Annahme können existierende numerische Modelle entsprechend erweitert werden. In diesem Zusammenhang kann auch eine planmäßige Ausweitung der spektralen Messungen erfolgen, um den Einfluss der verschiedenen Pigmente zu untersuchen. Diese Messungen ergeben aber nur dann einen Sinn, wenn bestätigt

ist, dass veränderte thermische Verhältnisse einen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeitsminderung besitzen.

Die Arbeit konnte nur ein eingeschränktes Spektrum an Parametervariationen vornehmen. So wurden alle Proben von einem Hersteller aus einem Vorspannofen bezogen. Allerdings zeigen weitere Studien, dass in der Glasveredlung der Hersteller- und Bearbeitungseinfluss nicht zu vernachlässigen ist, dieser vielmehr alles überlagert und eine Festlegung der Festigkeiten nicht ermöglicht.<sup>299</sup>

Ebenso wurde nur ESG wegen der Annahme untersucht, dass die Ursachen der Festigkeitsminderung für beide Vorspanngrade zutreffend sind. Allerdings sind Festigkeitsminderungen bei TVG wegen der an ihr gekoppelten Temperaturwechselbeständigkeit (TWB) kritischer zu bewerten, zumal durch dunkle Bedruckungen die Absorption und somit die Temperaturbelastung im Bauteil zunimmt. Seitens der Hersteller und Anwender wird häufiger der Weg gegangen, auf ESG wegen des erforderlichen Heat-Soak-Tests bei bestimmten Anwendungen<sup>300</sup> anstelle von TVG zu verzichten. Eine Nichtberücksichtigung der höheren Temperaturbelastung in Verbindung mit der reduzierten Festigkeit kann schnell zu Schadensfällen führen. Die fortführende Forschung hinsichtlich der emaillierten Gläser auf der Basis der aufgezeigten möglichen Ursachen der Festigkeitsminderung und eine Weiterentwicklung der dargestellten Modelle können dem Planer bezüglich der Korrelation aus höherer Absorption und geringerer TWB detailliertere Werkzeuge zu sicheren Aussagen bieten.

Der derzeit übliche Standard zur Qualitätssicherung mittels thermographischer Aufnahmen liefert nur den Wert für die Oberflächentemperatur, erlaubt aber keinen Rückschluss auf das Temperaturprofil über die Scheibenstärke. Daher wird in Simulationsberechnungen von einer gleichmäßigen

<sup>299</sup> Im Arbeitsrahmen des FKG (Fachverband Konstruktiver Glasbau) wurde eine breit angelegte Untersuchung zu den verschiedenen Kantenbearbeitungen und ihrer Festigkeit vorgenommen. Es ist allerdings keine Aussage möglich, welche Kantengüte die höchste Festigkeit liefert, da der Herstellereinfluss alles überlagert. Die zugehörigen Prüfberichte unterliegen der Geheimhaltung.

<sup>300</sup> Ab Einbauhöhen von 4 m über Verkehrsflächen ist ESG-H für monolithisches ESG vorgeschrieben. Vergleiche DIN 18008-2, 6.2.

Temperatur des gesamten Körpervolumens ausgegangen. Dieses ist aber nicht zutreffend, da die Scheiben nicht bis auf Ofentemperatur erhitzt, sondern vorzeitig abgekühlt werden. Daher liegt ein räumlich veränderliches Temperaturprofil mit einem Temperaturminimum in der Scheibenmitte vor. Dieses kann mit eine Ursache für die bisher nicht sehr hohe Übereinstimmung zwischen Simulation und Vorspannungsmessung sein.

Ein zukünftiger experimenteller Ansatz kann darin bestehen, die Temperaturentwicklung auf der Glasoberfläche während des Aufheizens und Abkühlens messtechnisch zu erfassen. Diese Daten erlauben eine realitätsnahe Bestimmung der beteiligten thermischen Parameter. Besonders die Wärmeübergangszahl würde ihren Charakter als Variationsparameter verlieren. Diese Messungen bieten nicht nur für bedruckte Scheiben mögliche neue Erkenntnisse, sondern auch für die rechnerische Simulation des Vorspannprozesses tragen diese Daten zu einer größeren Genauigkeit und Realitätsnähe bei. Allerdings kann derzeit die Temperaturentwicklung während des Abkühlvorgangs nicht direkt gemessen werden. Im Ofen befindliche Thermographie-Kameras können zwar die Entwicklung der Oberflächentemperatur aufzeichnen, allerdings ist die Genauigkeit der Auswertung geringer als die von direkt auf das Glas applizierten Thermosensoren. Für den betreffenden Temperaturbereich geeignete Sensoren sind erhältlich, allerdings sind die Aufzeichnungsgeräte nicht temperaturbeständig. Für diese muss eine hitzedämmende Hülle geschaffen werden, die gleichzeitig im Vorspannofen mitgeführt werden kann. Auf Grund der sehr engen Verhältnisse wegen des geringen Abstands der Luftdüsen zum Glas gestaltet sich solches schwierig. An dieser Stelle besteht noch weiterer Entwicklungsbedarf. Die Bestimmung der wahren Temperaturverhältnisse während des Herstellprozesses bietet neben der Datenbasis zur Validierung des der Arbeit zu Grunde liegenden Modells der Qualitätssicherung des Glasveredlers zuverlässige Datenmessungen und -aufzeichnungen an.

Neben den ganzen weiteren möglichen spannungsoptischen und optischen Messungen können Bruchspiegelauswertungen eine präzise, zusätzliche Bestätigung der bruchauslösenden Spannung liefern und den Bruchursprung genauer

lokalisieren. Bislang wird davon ausgegangen, dass der Bruchursprung in der Emailleschicht auftritt<sup>301</sup>, was aber auf Grund der theoretischen Überlegungen widersprüchlich erscheint. An dieser Stelle liegt keine endgültige und fundierte Erklärung für diesen Sachverhalt vor. Ergänzende mikroskopische Untersuchungen ermöglichen auch an den bereits geprüften Proben die Ermittlung einer großen Datenbasis zur genaueren Bestimmung dieser Annahme. Ebenso ermöglichen diese mikroskopischen Betrachtungen auch die Bestimmung der bruchauslösenden Defektgröße. Damit lassen sich gezielt bestimmte Annahmen direkt bestätigen oder ablehnen.

<sup>301</sup> Vergleiche Krohn 2002-3, Seite 2512 und Fußnote 33.

## 8 Verzeichnisse

### 8.1 Bezeichnungen

Einige Variablen und Bezeichnungen sind doppelt vergeben. Die Bedeutung ist im textlichen Kontext zu lesen beziehungsweise wird durch Indizes präzisiert.

#### 8.1.1 Formelzeichen

##### Lateinische Buchstaben – klein

a	Risstiefe – Bruchmechanik
a	Temperaturleitfähigkeit – Wärmetransport
$c_p$	spezifische Wärmekapazität
d	Dicke
f	Festigkeit
n	Anzahl
r	geometrische Abmessungen / Radien
s	Standardabweichung aus Stichprobe
t	reale Zeit
w	Verformung
z	Laufvariable – geometrisch

##### Lateinische Buchstaben – groß

A	Fläche
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft
G	Schubmodul
$\Delta H$	Aktivierungsenergie
$K_I$	Spannungsintensitätsfaktor
R	Ideale Gaskonstante
T	Temperatur allgemein

- $T_g$  Transformationstemperatur  
 $Y$  Form- oder Geometriefaktor – Bruchmechanik

**Griechische Buchstaben**

- $\alpha$  Längenausdehnungskoeffizient  
 $\alpha$  Wärmeübergangszahl  
 $\alpha_{pg}$  Eigenschaftsänderung unterhalb  $T_g$   
 $\alpha_{pl}$  Eigenschaftsänderung oberhalb  $T_g$   
 $\beta$  Kubischer Ausdehnungskoeffizient  
 $\delta$  Phasenverschiebung – Spannungsoptik  
 $\varepsilon$  Dehnung  
 $\eta$  Viskosität  
 $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit – Wärmetransport  
 $\lambda$  Wellenlänge des Lichts – Spannungsoptik  
 $\lambda_p$  Relaxationszeit für Strukturrelaxation  
 $\mu$  Poisson-Zahl  
 $\mu$  Schwächungskoeffizient – Optik  
 $\nu$  Verhältnis zweier gleichartiger Werte  
 $\xi$  reduzierte Zeit  
 $\rho$  Dichte  
 $\rho$  Radienverhältnis – Geometrie  
 $\rho$  Reflektion – Optik  
 $\sigma$  Spannung  
 $\tau$  Relaxationszeit für Spannungsrelaxation  
 $\tau$  Transmission – Optik

- υ Wichtungsfaktoren Strukturrelaxationsfunktionen
- ω Wichtungsfaktoren Spannungsrelaxationsfunktionen
- ω Winkel – Geometrie

**Indizes – kleine lateinische Buchstaben**

Sofern die Indizes nicht direkt mit der Variablen verknüpft sind, werden sie hier all-gemeingültig aufgeführt.

- bB Biegezug- – unbedrucktes Glas
- c critical / kritisch
- eff effektiv
- em Emaile / bedrucktes Glas
- f fiktiv
- gl Glas / glassy
- i,j,k Laufvariablen zur Aufzählung
- k charakteristisch (5%-Fraktile) / konvektiv
- li liquid
- le Leitung
- st Strahlung

**Indizes – Lateinische Buchstaben – groß**

- D Druck
- L Luft / Anblasen
- L Licht – Optik
- M Mitte / Mittelpunkt – Geometrie
- O Oberfläche
- Prüf Wert aus Versuch / Prüfung
- SD Strukturelle Defekte
- T Temperatur / thermisch

TA thermische Ausdehnung

TV thermische Veränderung

V Vorspannung

Z Zug

**Indizes – Zahlen**

0 Anfangs- oder Startwert

**8.1.2 Abkürzungen**

abZ allgemeine bauaufsichtliche Zulassung

DD Digitaldruck

k. A. keine Angabe

MW Mittelwert

SD Siebdruck

Stabw Standardabweichung

TWB Temperaturwechselbeständigkeit

Var Variationskoeffizient

RS Rückseite

VS Vorderseite

## 8.2 Literaturverzeichnis

### 8.2.1 Allgemein über Glas und allgemeine Parameter

- [Feldmann 2012] Feldmann, M., Kasper, R., Langosch, K.: Glas für tragende Bauteile. Köln: Werner Verlag 2012
- [Fröhler 2005] Fröhler, A. W.: Lexikon für Glas und Glasprodukte. Schorndorf, Hofmann, 2005
- [GlasHandbuch 2011] GlasHandbuch 2011, herausgegeben vom Flachglas Markenkreis. Gelsenkirchen 2011
- [Interpane 2011] INTERPANE GLAS INDUSTRIE AG: Gestalten mit Glas. Lauenförde, 8. Auflage 2011
- [Kurkjian 1985] Kurkjian, C. (ed.): Strength of inorganic glass. New York: Plenum Press, 1985
- [Nölle 1997] Nölle, G.: Technik der Glasherstellung. Weinheim: Wiley-VCH, 3. Auflage 1997
- [Öksoy 1994] Öksoy, D., Pye, L.D., Boulos, E.N.: Statistical analysis of viscosity-composition data in glassmaking. In: Glastechnische Berichte 67, Heft 7, 1994, Seiten 189 – 195
- [Petzold 1990] Petzold, A., Marusch, H., Schramm, B.: Der Baustoff Glas. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1990
- [Saint-Gobain 2006] Saint-Gobain Glass: sgg Emalit – sgg Seralit. Produktinformation. Aachen, Stand 02/2006
- [Scholze 1988] Scholze, H.: Glas, Natur, Struktur und Eigenschaften. Berlin Heidelberg: Springer, 3. Auflage 1988
- [Pfaender 1997] Pfaender, H.G.: Schott Glaslexikon. Landsberg am Lech: mvg-Verlag, 5. Auflage 1997
- [Sedlacek 1999] Sedlacek, G., Blank, K., Laufs, W., Güsgen, J.: Glas im konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Ernst & Sohn, 1999
- [Siebert 2001] Siebert, G.: Entwurf und Bemessung von tragenden Bauteilen aus Glas. Berlin: Ernst & Sohn, 2001
- [Vogel 1979] Vogel, W.: Glaschemie. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1979
- [Weller 2011] Weller, B., Krampe, P.: Glas. In: Wendehorst Baustoffkunde. Neroth, G. (Hrsg.). Stuttgart Leipzig Wiesbaden: B.G. Teubner, 27. Auflage 2011
- [Weller 2013] Weller, B., Krampe, P., Reich, S.: Glasbau-Praxis – Konstruktion und Bemessung. Band 1: Grundlagen. Berlin: Bauwerk/Beuth, 3. Auflage 2013
- [Wörner 2001] Wörner, J.-D., Schneider, J., Fink, A.: Glasbau, Grundlagen: Berechnung, Konstruktion. Berlin Heidelberg: Springer, 2001
- [Yageman 1982] Yageman, V.D., Matveev, G.M.: Thermal capacity of glasses in the  $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} \cdot 2 \text{SiO}_2$  - system. In: The Soviet Journal of Glass Physics and Chemistry 8, Heft 8, 1982, Seiten 168 – 175

### 8.2.2 Emaille

- [Bijl 1952] Bijl, C., L.: De spannings to es tand In glazuurlagen. In: Chemisch weekblad: Organ van de Koninklijke Nederlandse Chemische Vereniging 48, 1952, Seiten 998 – 1004

- [BF 2002] Richtlinie zur Beurteilung der visuellen Qualität von emaillierten und siebgedruckten Gläsern. Bundesverband Flachglas Großhandel, Isolierglasherstellung, Veredlung e.V.; Fachverband Konstruktiver Glasbau e.V. Stand 03/2002
- [Dietzel 1962] Dietzel, A.: Zum Problem der Emailspannungen und ihrer Berechnung. In: Mitteilungen VDEFa 10, Heft 3, 1962, Seiten 35 – 48
- [Dietzel 1981] Dietzel, A.: Emaillierung. Berlin Heidelberg New York: Springer, 1981
- [DipTech 2013] DipTech: Herstellerinformation zu Green Ink for the GlassJet™, No. CASS\_0005. Kfar Saba, Israel, Stand 06/2013
- [Emonts 1985] Emonts, H.: Emaillierung von Flachglas. Aachen: Dissertation, 1985
- [Ferro 2006] Ferro: Herstellerinformation zu Emaille. Cleveland, Stand 2006
- [Gebhardt 1988] Gebhardt, B., Dannheim, H.: Mechanical and chemical durability of glass enamels. In: Glastechnische Berichte 61, Heft 9, 1988, Seiten 263 – 272
- [Johnson 2010] Johnson Matthey: Herstellerinformation zu den Emaille-Serien 75000 und AF2000. Maastricht, Stand 2010
- [Krohn 2002-1] Krohn, M.H., Hellmann, J.R., Shelleman, D.L., Green, D.J., Sakoske, G.E., Salem, J.A.: Test Methodology for Strength Testing of Soda-Lime-Silica Float Glass Before and After Enameling. In: Journal of Testing and Evaluation 30, Heft 6, West Conshohocken: ASTM International, 2002, Seiten 1 – 8
- [Krohn 2002-2] Krohn, M.H., Hellmann, J.R., Shelleman, D.L., Green, D.J., Pantano, C.G., Sakoske, G.E.: Biaxial Flexure Strength and Dynamic Fatigue of Soda-Lime-Silica Float Glass. In: Journal of the American Ceramic Society 85, Heft 7, 2002, Seiten 1777 – 1782
- [Krohn 2002-3] Krohn, M.H., Hellmann, J.R., Shelleman, D.L., Green, D.J., Pantano, C.G., Sakoske, G.E.: Effect of Enameling on the Strength and Dynamic Fatigue of Soda-Lime-Silica Float Glass. In: Journal of the American Ceramic Society 85, Heft 10, 2002, Seiten 2507 – 2514
- [Krzyszak 2004] Krzyszak, M.: Vergütung von Emailoberflächen durch Sol-Gel-Beschichtung. Clausthal-Zellerfeld: Dissertation, 2004
- [Oel 1965] Oel, H.J., Dietzel, A.: Die Berechnung von Spannungen an aufgebrannten Emails. In: Mitteilungen VDEFa 13, Heft 6, 1965, Seiten 31 – 38
- [Oel 1966] Oel, H.J.: Berechnung der inneren Spannungen von Schichtwerkstoffen. In: VDI-Z. 108, Nr. 35, 1966, Seiten 1727 – 1729
- [Paulus 1991] Paulus, H., Müller, S., Oel, H.: Influence of the grain size of glass frits on the characteristics of glass enamels. In: Glastechnische Berichte 64, Heft 2, 1991, Seiten 39 – 42
- [Petzold 1992] Petzold, A., Pöschmann, H.: Email und Emailiertechnik. Leipzig Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 2. Auflage 1992
- [RAL 2007] RAL-RG 529 A3, Ausgabe: 2007, Email(le) und emaillierte Erzeugnisse Begriffsbestimmungen / Bezeichnungsvorschriften. Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.
- [Röcker 1987] Röcker, H.: Der Verbundwerkstoff Glas-Email, seine mechanische Festigkeit und sein Haftvermögen gegenüber organischen Klebern. Aachen: Dissertation, 1987

- [Röpke 1981] Röpke, H.: Beitrag zur mechanischen Festigkeit emaillierten Flachglases. Aachen: Dissertation, 1981
- [Sakoske 2007] Sakoske, G., E.: Functional Glass Coatings. IMI International Workshop on Scientific Challenges of New Functionalities in Glass. Washington, DC, 2007
- [Spang 1994] Spang, M., D., Hennicke, H., W.: Spannungen in Emailschichten – Ein Beitrag zur Prüfkörperentwicklung für emaillierte Chemieapparate. In: Mitteilungen VDEFa 42, Heft 4, 1994, Seiten 37 – 48
- [Weller 2010-2] Weller, B.: Einfachverglasungen mit gebogenen Scheiben und Siebdruck – Nachweis von Restspannungen aus dem Heiß-Biegeprozess. Dresden: Gutachterliche Stellungnahme Nr. 2010/219, 2010, unveröffentlicht
- [Weller 2012] Weller, B., Krampe, P., Retsch, S.: Verhalten adhäsiver Zwischenschichten auf anorganisch beschichteten Glasoberflächen. Dresden: Forschungsbericht FKG, 2012

### 8.2.3 Vorspannung

- [Dietrich 2011] Dietrich, N.: Nachbruchverhalten von vorgespannten Verglasungen unter zentrischem Zwang. Dresden: Diplomarbeit (unveröffentlicht), 2011
- [Jenkel 1953] Jenkel, E.: Über den Zusammenhang zwischen Schmelztemperatur und Einfrier-temperatur der Gläser. In: Kolloid Zeitschrift 130, Heft 1, 1953, Seiten 64 – 65
- [Laufs 2000] Laufs, W.: Ein Bemessungskonzept zur Festigkeit thermisch vorgespannter Gläser. Aachen: Dissertation, 2000
- [Schneider 2001] Schneider, J.: Festigkeit und Bemessung punktgelagerter Gläser und stoßbeanspruchter Gläser. Darmstadt: Dissertation, 2001
- [Warren 2001] Warren, P. D.: Fragmentation of Thermally Strengthened Glass. In: James R. Varner (Hrsg.): Fractography of glasses and ceramics IV. Proceedings 4<sup>th</sup> Conference on Fractography of Glasses and Ceramics, Alfred, New York. American Ceramic Society, 2001, Seiten 389 – 400

### Wärmetransport

- [Acloque 1961] Acloque, P.: Comparison between Heat Transfer Conditions and Setting up of Strains in Glass during Heat-Treatment. In: Journal of the American Ceramic Society 44, Heft 7, 1961, Seiten 364 – 373
- [Bähr 2008] Bähr, H.D., Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. Berlin Heidelberg New York: Springer, 3. Auflage 2008
- [Blazek 1976] Blazek, A., Endrys, J., Kada, J., Stanek, J.: Strahlungswärmeleitfähigkeit von Glas – Einfluss der Glaszusammensetzung auf seine Wärmedurchlässigkeit. In: Glastechnische Berichte 49, Heft 4, 1976, Seiten 75 – 81
- [Chui 1969] Chui, G. K., Gardon, R.: Interaction of Radiation and Conduction in Glass. In: Journal of the American Ceramic Society 52, Heft 10, 1969, Seiten 548 – 553
- [Field 1990] Field, R. E., Viskanta, R.: Measurement and Prediction of the Dynamic Temperature Distributions in Soda-Lime Glass Plates. In: Journal of the American Ceramic Society 73, Heft 7, 1990, Seiten 2047 – 2053
- [Gardon 1956] Gardon, R.: The Emissivity of Transparent Materials. In: Journal of the American Ceramic Society 39, Heft 8, 1956, Seiten 278 – 287

- [Gardon 1958] Gardon, R.: Calculation of Temperature Distributions in Glass Plates Undergoing Heat Treatment. In: Journal of the American Ceramic Society 41, Heft 6, 1958, Seiten 200 – 209
- [Gardon 1961] Gardon, R.: A Review of Radiant Heat Transfer in Glass. In: Journal of the American Ceramic Society 44, Heft 7, 1961, Seiten 305 – 312
- [Genzel 1953-1] Genzel, L.: Der Anteil der Wärmestrahlung bei Wärmeleitungsvorgängen. In: Zeitschrift für Physik 135, 1953, Seiten 177 – 195
- [Genzel 1953-2] Genzel, L.: Zur Berechnung der Strahlungsleitfähigkeit der Gläser. In: Glastechnische Berichte 26, Heft 3, 1953, Seiten 69 – 71
- [Gröber 1988] Gröber, Erk, Grigull, U.: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2. unveränderter Nachdruck 1988
- [Herwig 2006] Herwig, H., Moschallski, A.: Wärmeübertragung – Physikalische Grundlagen, Illustrierende Beispiele, Übungsaufgaben mit Musterlösungen. Wiesbaden: Vieweg, 2006
- [Kittel 1949] Kittel, C.: Interpretation of the Thermal Conductivity of Glasses. In: Physical Review 75, Heft 6, 1949, Seiten 972 – 974
- [Martin 2006] Martin, H.: Wärmeübergang bei Prallströmung. In: VDI-Wärmeatlas, VDI-Gesellschaft (Hrsg.). Berlin ; Heidelberg: Springer, 10. Auflage 2006, Kapitel GK
- [Schumacher 2002] Schumacher, R.: Wärmetransport bei der Formgebung. HVG Fortbildungskurs Wärmetransportprozesse bei der Herstellung und Formgebung von Glas. Hütten-technische Vereinigung der deutschen Glasindustrie. Offenbach, 2002, Seiten 151 – 178

### Relaxationsvorgänge

- [Duffrene 1997-1] Duffrene, L., Gy, R.: Viscoelastic Constants of a Soda-Lime-Silica Glass. In: Journal of Non-Crystalline Solids 211, 1997, Seiten 30 – 38
- [Duffrene 1997-2] Duffrene, L., Gy, R., Burlet, H., Piques, R.: Viscoelastic Behavior of a Soda-Lime-Silica Glass: Inadequacy of the KWW Function. In: Journal of Non-Crystalline Solids 215, 1997, Seiten 208 – 217
- [Duffrene 1998] Duffrene, L., Gy, R., Masnik, J. E., Kieffer, J., Bass, J. D.: Temperature Dependence of the High-Frequency Viscoelastic Behavior of a Soda-Lime-Silica Glass. In: Journal of the American Ceramic Society 81, Heft 5, 1998, Seiten 1278 – 1284
- [Falenty 2010] Falenty, K., Webb, S. L.: Shear modulus, heat capacity, viscosity and structural relaxation time of  $\text{Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  and  $\text{Na}_2\text{O-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  melts. In: Phys. Chem. Minerals 37, Heft 3, 2010, Seiten 613 – 634
- [Gardon 1970] Gardon, R., Narayanaswamy, O. S.: Stress and Volume Relaxation in Annealing Flat Glass. In: Journal of the American Ceramic Society 53, Heft 7, 1970, Seiten 380 – 385
- [Gy 1994] Gy, R., Duffrene, L., Labrot, M.: New Insights into the Viscoelasticity of Glass. In: Journal of Non-Crystalline Solids 175, 1994, Seiten 103 – 117
- [Hsueh 1986] Hsueh, C.-H.: Mathematical Model of Viscosity Measurements for Viscoelastic Solids. In: Communications of the American Ceramic Society 69, Heft 3, 1986, Seiten C-48 – C-49

- [Loch 1994] Loch, H.: Viskoelastizität und Viskoplastizität - Relaxationsvorgänge in Glas. Seminarunterlage ANSYS Seminar Viskoelastizität. München 1994
- [Markovsky 1984] Markovsky, A., Soules, T. F.: An Efficient and Stable Algorithm for Calculating Fictive Temperatures. In: Communications of the American Ceramic Society 67, Heft 4, 1984, Seiten C-56 – C-57
- [Mauch 1994] Mauch, F., Jäckle, J.: Thermoviscoelastic Theory of Freezing of Stress and Strain in a Symmetrically Cooled Infinite Glass Plate. In: Journal of Non-Crystalline Solids 179, 1994, Seiten 73 – 86
- [Moynihan 1976] Moynihan, C. T., Easteal, A. J., DeBolt, M. A.: Dependence of the Fictive Temperature of Glass on Cooling Rate. In: Journal of the American Ceramic Society 59, Heft 1-2, 1976, Seiten 12 – 16
- [Moynihan 1991] Moynihan, C. T., Crichton, S. N., Opalka, S. M.: Linear and Non-Linear Structural Relaxation. In: Journal of Non-Crystalline Solids 131-133, 1991, Seiten 420 – 434
- [Narayanaswamy 1971] Narayanaswamy, O. S.: A Model of Structural Relaxation in Glass. In: Journal of the American Ceramic Society 54, Heft 10, 1971, Seiten 491 – 498
- [Narayanaswamy 1978] Narayanaswamy, O. S.: Stress and Structural Relaxation in Tempering Glass. In: Journal of the American Ceramic Society 61, Heft 3-4, 1978, Seiten 146 – 152
- [Narayanaswamy 1988] Narayanaswamy, O. S.: Thermorheological Simplicity in the Glass Transition. In: Journal of the American Ceramic Society 71, Heft 10, 1988, Seiten 900 – 904
- [Ritland 1956] Ritland, H. N.: Limitations of the Fictive Temperature Concept. In: Journal of the American Ceramic Society 39, Heft 12, 1956, Seiten 403 – 406
- [Scherer 1982-1] Scherer, G. W., Rekhson, S. M.: Viscoelastic-Elastic Composites: I, General Theory. In: Journal of the American Ceramic Society 65, Heft 7, 1982, Seiten 352 – 360
- [Scherer 1982-2] Scherer, G. W., Rekhson, S. M.: Model of Structural Relaxation in Glass with Variable Coefficients. In: Communications of the American Ceramic Society 65, Heft 6, 1982, Seiten C-94 – C-96
- [Sellier 2007] Sellier, M., Hann, C. E., Siedow, N.: Identification of Relaxation Function by Mean of a Simple Experiment. In: Journal of the American Ceramic Society 90, Heft 9, 2007, Seiten 2980 – 2983
- [Tool 1946] Tool, A. Q.: Relation between Inelastic Deformability and Thermal Expansion of Glass in its Annealing Range. In: Journal of the American Ceramic Society 29, Heft 9, 1946, Seiten 240 – 253
- [van den Brink 1996] van den Brink, J. P.: Master Stress Relaxation Function of Silica Glasses. In: Journal of Non-Crystalline Solids 131-133, 1991, Seiten 420 – 434
- [Weymann 1962] Weymann, H. D.: A Thermoviscoelastic Description of the Tempering of Glass. In: Journal of the American Ceramic Society 45, Heft 11, 1962, Seiten 517 – 522

### Spannungsberechnung

- [Aronen 2008] Aronen, A., Karvinen, R.: How to Affect Residual Stresses in Glass Tempering. In: Proceedings Challenging Glass, Delft, 2008, Seiten 303 – 312
- [Blank 1979-1] Blank, K.: Thermisch vorgespanntes Glas 1. In: Glastechnische Berichte 52, Heft 1, 1979, Seiten 1 – 13
- [Blank 1979-2] Blank, K.: Thermisch vorgespanntes Glas 2. In: Glastechnische Berichte 52, Heft 2, 1979, Seiten 51 – 54
- [Carré 1999] Carré, H., Daudeville, L.: Load-Bearing Capacity of Tempered Structural Glass. In: Journal of Engineering Mechanics 125, Heft 8, 1999, Seiten 914 – 921
- [Daudeville 1998] Daudeville, L., Carré, H.: Thermal Tempering Simulation of Glass Plates: Inner and Edge Residual Stress. In: Journal of Thermal Stresses 21, 1998, Seiten 667 – 689
- [Gardon 1988] Gardon, R.: Tempering Glass with Modulated Cooling Schedules. In: Journal of the American Ceramic Society 71, Heft 10, 1988, Seiten 876 – 878
- [Kiefer 1984] Kiefer, W.: Thermisches Vorspannen von Gläsern niedriger Wärmeausdehnung. In: Glastechnische Berichte 57, Heft 9, 1984, Seiten 221- 228
- [Kiefer 1987] Kiefer, W.: Thermisches Vorspannen von Gläsern niedriger Wärmeausdehnung. In: Werkstoff Glas (Hrsg. Lohmeyer, S.), Expert-Verlag, 1987, Seiten 27- 44
- [Lee 1965] Lee, E. H., Rogers, T. G., Woo, T. C.: Residual Stresses in a Glass Plate Cooled Symmetrically from Both Surfaces. In: Journal of the American Ceramic Society 48, Heft 9, 1965, Seiten 480 – 487
- [Lochegnies 2005] Lochegnies, D. et al.: Measurement of Complete Residual Stress Fields in Tempered Glass Plates. In: Proceedings Glass Processing Days, Tampere, 2005, Seiten 1 – 4
- [Narayanaswamy 1968] Narayanaswamy, O. S., Gardon, R.: Calculation of Residual Stresses in Glass. In: Journal of the American Ceramic Society 52, Heft 10, 1968, Seiten 554 – 558
- [Narayanaswamy 2001] Narayanaswamy, O. S.: Evolution of Glass Tempering Models. In: Proceedings Glass Processing Days, Tampere, 2001, Seiten 83 – 86
- [Oel 1984] Oel, H., Helland, G., Dannheim, H.: Thermisches Vorspannen von Glasscheiben. In: Glastechnische Berichte 57, Heft 1, 1984, Seiten 1 – 6
- [Sinha 1969] Sinha, N. K.: Stress State in Tempered Glass Plate and Determination of Heat-transfer Rate. In: Experimental Mechanics 18, Heft 1, 1978, Seiten 25 – 34
- [Soules 1987] Soules, T. F., Busbey, R. F., Rekhson, S. M., Markovsky, A., Burke, M. A.: Finite-Element Calculation of Stresses in Glass Parts Undergoing Viscous Relaxation. In: Journal of the American Ceramic Society 70, Heft 2, 1987, Seiten 90 – 95

### 8.2.4 Mechanik und Festigkeit

- [Durchholz 1995] Durchholz, M.: Method of reproducibly predamaging float glass as a basis to determine the bending strength. In: Glastechnische Berichte 68, Heft 8, 1995, Seiten 251 – 258
- [Exner 1986] Exner, G.: Abschätzung der erlaubten Biegespannung in vorgespannten Glasbauteilen. In: Glastechnische Berichte 59, Heft 9, 1986, Seiten 259 – 271

- [Gross 2011] Gross, D., Hauger, W., Wriggers, P.: Technische Mechanik 4. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 8.Auflage 2011
- [HVG 2001] Festigkeit von Glas – Grundlagen und Messverfahren. HVG Fortbildungskurs. Hüttentechnische Vereinigung der deutschen Glasindustrie. Offenbach, 2. Auflage 2003
- [Kerkhof 1970] Kerkhof, F.: Bruchvorgänge in Gläsern. Frankfurt: Verlag der deutschen glas-technischen Gesellschaft, 1970
- [Kerkhof 1975] Kerkhof, F.: Bruchmechanische Analyse von Schadensfällen an Gläsern. In: Glastechnische Berichte 48, Heft 6, 1975, Seiten 112 – 124
- [Schneider 2011] Schneider, J.: Bauen mit gebogenen Gläsern – Herstellung, Eigenschaften, Tragverhalten. VDI-Berichte; 2084. Aus: Bauen mit innovativen Werkstoffen. 2. VDI-Tagung, Köln, 3. und 4. November 2009. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure -VDI-, Gesellschaft Bautechnik, Düsseldorf, VDI Verlag 2009, Seiten 13 – 22
- [Timoshenko 1959] Timoshenko, S. P., Woinowsky-Krieger, S.: Theory of Plates and Shells. International, McGraw-Hill, 2<sup>nd</sup> edition 1959
- [Timoshenko 1970] Timoshenko, S. P., Goodner, J. N.: Theory of Elasticity. International, McGraw-Hill, 3<sup>rd</sup> edition 1970
- [Veer 2009] Veer, F. A., Louter, P. C., Bos, F. P.: The strength of annealed, heat-strengthened and fully tempered float glass. In: Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 32, Heft 1, 2009, Seiten 18 – 25
- [Wiederhorn 1976] Wiederhorn, S. M. et al.: An Error Analysis of Failure Prediction Techniques Derived From Fracture Mechanics. In: Journal of the American Ceramic Society 59, Heft 9-10, 1976, Seiten 403 – 410

### 8.2.5 Bruchversuche und Statistik

- [Blank 1983] Blank, K., Schmitt, R. W., Troeder, Chr.: Ein modifiziertes Doppelringverfahren zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit großformatiger Glasplatten. In: Glastechnische Berichte 56K, Band 1, 1983, Seiten 414 – 419
- [Blank 1994] Blank, K., Dürkop, D., Durchholz, M., Grüters, H., Helmich, G., Senger, W.: Strength Tests of Flat Glass by means of Four-Point-Bending. In: Glastechnische Berichte 67, Heft 1, 1994, Seiten 9 – 15
- [Bucak 2009] Bucak, Ö., Feldmann, M., Kasper, R., Bues, M., Illguth, M.: Das Bauprodukt „warm gebogenes Glas“ – Prüfverfahren, Festigkeiten und Qualitätssicherung. In: Stahlbau Spezial 2009 – Konstruktiver Glasbau, Seiten 23 – 28
- [Fessler 1984] Fessler, H., Fricker, D. C.: A Theoretical Analysis of the Ring-On-Ring Loading Disk Test. In: Journal of the American Ceramic Society 67, Heft 9, 1984, Seiten 582 – 588
- [Hartung 1999] Hartung, J.: Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. München Wien: Oldenbourg, 12.Auflage 1999
- [Kao 1971] Kao, R., Perrone, N., Capps, W.: Large-Deflection Solution of the Coaxial-Ring-Circular-Glass-Plate Flexure Problem. In: Journal of the American Ceramic Society 54, Heft 11, 1971, Seiten 566 – 571
- [Peeken 1982] Peeken, H.: Bruchfestigkeitsuntersuchungen an quadratischen Floatgläsern der Kantenlänge 1000 mm nach der Doppelringmethode mit überlagertem Gasdruck. Bericht Nr. 10-82, RWTH Aachen, 1982

- [Scheidler 1977] Scheidler, H.: Verletzlichkeit und technische Festigkeit von Glas. In: Glastechnische Berichte 50, Heft 9, 1977, Seiten 214 – 222
- [Schmitt 1982] Schmitt, R. W.: Die Doppelringmethode mit überlagertem Gasdruck als Prüfverfahren zur Bestimmung der Bruchspannungen von großformatigen ebenen Glasplatten kleiner Dicke. Diplomarbeit am Institut für Maschinenelemente und -gestaltung, RWTH Aachen, 1982
- [Schmitt 1983] Schmitt, R. W. . Blank, K. . Schönbrunn, G.: Experimentelle Spannungsanalyse zum Doppelringverfahren. In: Sprechsaal 116 Heft 5 und Druckfehlerberichtigung Sprechsaal 116, Heft 8, 1983, Seiten 397 – 405
- [Schmitt 1987] Schmitt, R. W.: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Glas und Aspekte der statistischen Behandlung der gewonnenen Messwerte. Dissertation, RWTH Aachen, 1987
- [Stahn 1978] Stahn, D.: Zur Erfassung der technischen Festigkeit von Glas. In: Glastechnische Berichte 51, Heft 9, 1978, Seiten 226 – 234
- [Storm 2007] Storm, R.: Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle. Leipzig: Hanser, 12.Auflage 2007
- [Vitman 1963] Vitman, F.F., Pukh, V.P.: A method for determining the strength of sheet glass. In: Zavodskaya Laboratoriya 29, 1963, Seiten 863 – 867. Englische Übersetzung in: Ind. Lab. 29, 1963, Seiten 925 – 930
- [Woelk 1979] Woelk, H, Elsenheimer, K.: Biegebruchspannung von Floatglas und thermisch vorgespanntem Floatglas. In: Glastechnische Berichte 52, Heft 1, 1979, Seiten 14 – 24

### 8.2.6 Optik und Spannungsoptik

- [Aben 1993] Aben, H., Guillemet, C.: Photoelasticity of glass. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1993
- [Anton 2003] Anton, J., Aben, H.: A Compact Scattered Light Polariscope for Residual Stress Measurements in Glass Plates. In: Proceedings Glass Processing Days, Tampere, 2003, Seiten 86 – 88
- [Bateson 1966] Bateson, S., Hunt, J. W., Dalby, D. A., Sinha, N. K.: Stress Measurements in Tempered Glass Plates by Scattered Light Method with a Laser Source. In: Ceramic Bulletin 45, Heft 2, 1966, Seiten 193 – 198
- [Bradshaw 1966] Bradshaw, W.: Stress profile determination in chemically strengthened glass using scattered light. In: Journal of Material Science 14, 1979, Seiten 2981 – 2988
- [Fraunhofer 2010] Wilson, H. R., Kuhn, T., Hanek, J.: Spectral measurements of glass samples with ceramic frit and low-e coatings and calculations of technical values for Interpane Plattling. Freiburg: Report TAG3-HRW-1005-E04, im Auftrag von Interpane Plattling, 2010, unveröffentlicht
- [Föppl 1972] Föppl, L., Mönch, E.: Praktische Spannungsoptik. Berlin Heidelberg New York: Springer, 3.Auflage 1972
- [GlasStress 2013] GlasStress Ltd. Residual Stress Measurement in Dip-Tech Enameled Strips. Durchgeführte Messungen im Auftrag von DipTech, Kfar, Saba, Israel. 04/2013
- [Hosemann 2007] Hosemann, H.-J., Hof, P.: Bruchanalyse an Hohlgläsern. In: Materialwissenschaft. u. Werkstofftechnik 38, Heft 5, 2007, Seiten 398 – 401

- [Hundhammer 2002] Hundhammer, I., Lenhart, A., Pontasch, D., Weißmann, R.: Stress measurement in transparent materials using scattered laser light. In: Glastechnische Berichte 75, Heft 5, 2002, Seiten 236 – 242
- [SCALP] Scattered Light Polariscope, Instruction Manual Version 4.1.0.0, Herausgeber Hersteller GlasStress, Tallin, Estland
- [Soltész 1981] Soltész, U.: Zur spannungsoptischen Messung von Eigenspannungsverteilungen in vorgespannten Gläsern an Schlißproben. In: Glastechnische Berichte 54, Heft 1, 1981, Seiten 12 – 17
- [Wolf 1976] Wolf, H.: Spannungsoptik. Berlin Göttingen Heidelberg: Springer, 2.Auflage 1976

### 8.2.7 Normen und Richtlinien

Sofern nicht explizit angegeben beziehen sich alle Normen und Richtlinien auf die jeweilige aktuelle beziehungsweise gültige Ausgabe.

- [ASTM C 978] ASTM C 978-04: Standard Test Method for Photoelastic Determination of Residual Stress in a Transparent Glass Matrix Using a Polarizing Microscope and Optical Retardation Compensation Procedures. West Conshohocken: ASTM International, 2008
- [ASTM C 1279] ASTM C 1279-05: Standard Test Method for Non-Destructive Photoelastic Measurement of Edge and Surface Stresses in Annealed, Heat-Strengthened, and Fully Tempered Flat Glass. West Conshohocken: ASTM International, 2005
- [ASTM F 218] ASTM F 218-05: Standard Test Method for Measuring Optical Retardation and Analyzing Stress in Glass. West Conshohocken: ASTM International, 2005
- [BRL 2013] Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C. DIBt Mitteilungen, Ausgabe: 2013/1. Berlin: Ernst & Sohn, 2013
- [DIN 1259-1] DIN 1259-1: Glas – Teil 1: Begriffe für Glasarten und Glasgruppen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2001
- [DIN 1259-2] DIN 1259-2: Glas – Teil 2: Begriffe für Glaserzeugnisse. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2001
- [DIN 1349-2] DIN 1349-2: Durchgang optischer Strahlung durch Medien – Optisch trübe Stoffe – Begriffe. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1975
- [DIN 18008-1] DIN 18008-1: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Begriffe und allgemeine Grundlagen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2010
- [DIN 18008-2] DIN 18008-2: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Linienförmig gelagerte Verglasungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2010
- [DIN 18516-4] DIN 18516-4: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet – Teil 4: Einscheiben-Sicherheitsglas – Anforderungen, Bemessung, Prüfung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1990
- [DIN 51177] DIN 51177: Emails und Emailierungen – Herstellung von Emailproben und Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2008
- [DIN 52314] DIN 52314: Prüfung von Glas – Bestimmung des spannungsoptischen Koeffizienten im Zugversuch. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1977

- [DIN 53804-1] DIN 53804: Statistische Auswertungen – Teil 1: kontinuierliche Merkmale. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2002
- [DIN 55303-7] DIN 55303-7: Statistische Auswertung von Daten – Teil 7: Schätz- und Testverfahren bei zweiparametrischer Weibull-Verteilung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1996
- [DIN EN 410] DIN EN 410: Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kennwerten von Verglasungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2011
- [DIN EN 572-1] DIN EN 572-1: Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalknatronsilikatglas – Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2012
- [DIN EN 1288-1] DIN EN 1288-1: Glas im Bauwesen – Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas – Teil 1: Grundlagen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000
- [DIN EN 1288-2] DIN EN 1288-2: Glas im Bauwesen – Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas – Teil 2: Doppelring-Biegeversuch an plattenförmigen Proben mit großen Prüfflächen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000
- [DIN EN 1288-3] DIN EN 1288-3: Glas im Bauwesen – Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas – Teil 3: Prüfung von Proben bei zweiseitiger Auflagerung (Vierschneiden-Verfahren). Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000
- [DIN EN 1288-5] DIN EN 1288-5: Glas im Bauwesen – Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas – Teil 5: Doppelring-Biegeversuch an plattenförmigen Proben mit kleinen Prüfflächen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000
- [DIN EN 1863-1] DIN EN 1863-1: Glas im Bauwesen – Teilvorgespanntes Kalknatronglas – Teil 1: Definition und Beschreibung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2012
- [DIN EN 12150-1] DIN EN 12150-1: Glas im Bauwesen – Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas – Teil 1: Definition und Beschreibung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2012
- [DIN EN 13024-1] DIN EN 13024-1: Glas im Bauwesen – Thermisch vorgespanntes Borosilicat-Einscheibensicherheitsglas – Teil 1: Definition und Beschreibung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2012
- [DIN ISO 7884-1] DIN ISO 7884-1: Glas – Viskosität und viskosimetrische Festpunkte – Teil 1: Grundlagen für die Bestimmung der Viskosität und der viskosimetrischen Festpunkte. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1998
- [TRAV 2003] Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen; Fassung Januar 2003; DIBt Mitteilungen 2/2003, S. 58 ff. Berlin: Ernst und Sohn, 2003
- [TRLV 2006] Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen (TRLV); Fassung August 2006. DIBt Mitteilungen 3/2007, Seiten 110 ff. Berlin: Ernst und Sohn, 2007
- [GrubeBau] Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren. IfBt (DIBt), Fassung Mai 1986

### 8.3 Abbildungsverzeichnis

Bild 1 Konduktives Förderzentrum, Oberföhring; Architekten: RPM Architekten, München. © Sto AG, Photograph Guido Erbring, Köln.

Bild 4 Nach Röpke 1981

Bild 5 Nach Weller 2010-2

Bild 7 Nach Weller 2011

Bild 8 Entnommen Fraunhofer 2010 nach Bereitstellung von Interpane

Bild 10 Bilder aufgenommen von Interpane zur Dokumentation des Herstellprozesses

Bild 11 Nach Genzel 1953-2

Bild 12 Nach Nölle 1997

Bild 16 Nach Sakoske 2007

Bild 17 Nach Laufs 2000

Bild 18 dito

Bild 19 Nach Blank 1979-1

Bild 20 Nach Oel 1984

Bild 23 Nach Schneider 2001

Bild 24 Nach Moynihan 1991

Bild 25 Nach Laufs 2000

Bild 26 Nach Wörner 2001

Bild 27 Nach Föppl 1972

Bild 28 Nach Aben 1993

Bild 29 dito

Bild 30 Nach Laufs 2000

Bild 31 Nach Aben 1993

Bild 32 Nach Schneider 2001

Bild 33 © TU Dresden, Photograph Stefan Unnewehr

Bild 34 Nach SCALP

Bild 36 dito

Bild 37 Nach DIN EN 1288-2

Bild 40 Nach Woelk 1979

Bild 46 Siehe Bild 10

Alle nicht aufgeführten Bilder stammen aus dem Archiv des Autors.

## A1 Kontrollmessungen

Mittels zweier Kontrollmessungen sollen einerseits die Annahme der Kantenparallelität der Eigenspannungen bestätigt und andererseits der Grad der Ausgleichsfunktion für die Auswertung der Streulichtmessungen bestimmt werden.

### A1.1 Kontrolle der Hauptspannungsrichtung

Alle Spannungen sind in der Einheit [ N/mm<sup>2</sup> ]. Die Überprüfung erfolgte an jeweils 5 Proben der Serien 6-1-3 und 6-2-1 nach Bild 41 und Bild 42 der Hauptarbeit. Die Messungen und die Auswertung wurden nur an der Rückseite nach der Vorschrift  $\delta(0) = \delta(d_{gl}) = 0$  vorgenommen.

#### A1.1.1 Serie 6-1-3

##### Prüfkörper 6-1-3-1

		Stelle 1	Stelle 2	Stelle 3	Stelle 4
$\sigma_x$	gemessen	-116,13	-111,32	-116,36	-95,30
$\sigma_{x1}$		-118,03	-118,99	-115,57	-107,03
$\sigma_y$		-121,09	-110,83	-106,02	-117,91
$\sigma_{y1}$		-123,46	-111,52	-104,10	-110,35
$\sigma_1$	berechnet	-114,93	-114,82	-118,91	-95,18
$\sigma_2$		-122,29	-107,34	-103,47	-118,03

##### Prüfkörper 6-1-3-2

		Stelle 1	Stelle 2	Stelle 3	Stelle 4
$\sigma_x$	gemessen	-115,43	-121,63	-114,41	-114,67
$\sigma_{x1}$		-117,38	-115,17	-117,56	-117,04
$\sigma_y$		-122,30	-120,31	-118,28	-115,48
$\sigma_{y1}$		-122,36	-113,96	-119,58	-122,93
$\sigma_1$	berechnet	-114,62	-121,86	-114,16	-112,10
$\sigma_2$		-123,11	-120,07	-118,53	-118,05

##### Prüfkörper 6-1-3-3

		Stelle 1	Stelle 2	Stelle 3	Stelle 4
$\sigma_x$	gemessen	-117,01	-125,49	-122,67	-118,19
$\sigma_{x1}$		-117,58	-118,34	-113,97	-105,93
$\sigma_y$		-108,63	-115,64	-114,61	-114,70
$\sigma_{y1}$		-116,46	-115,86	-115,30	-113,67
$\sigma_1$	berechnet	-117,04	-125,64	-122,73	-120,69
$\sigma_2$		-108,59	-115,49	-114,56	-112,20

A2

**Prüfkörper 6-1-3-4**

		<b>Stelle 1</b>	<b>Stelle 2</b>	<b>Stelle 3</b>	<b>Stelle 4</b>
$\sigma_x$	gemessen	-105,42	-119,34	-113,76	-102,07
$\sigma_{x1}$		-108,13	-119,54	-113,12	-105,33
$\sigma_y$		-112,02	-112,20	-108,03	-121,62
$\sigma_{y1}$		-112,20	-115,70	-106,16	-100,57
$\sigma_1$	berechnet	-104,84	-119,83	-115,40	-101,79
$\sigma_2$		-112,60	-111,72	-106,39	-121,90

**Prüfkörper 6-1-3-5**

		<b>Stelle 1</b>	<b>Stelle 2</b>	<b>Stelle 3</b>	<b>Stelle 4</b>
$\sigma_x$	gemessen	-109,53	-115,93	-115,12	-105,16
$\sigma_{x1}$		-108,76	-104,70	-113,00	-90,62
$\sigma_y$		-104,13	-114,06	-112,58	-110,74
$\sigma_{y1}$		-124,09	-115,16	-106,75	-119,73
$\sigma_1$	berechnet	-114,95	-120,31	-117,23	-93,13
$\sigma_2$		-98,70	-109,68	-110,48	-122,77

**A1.1.2 Serie 6-2-1**

**Prüfkörper 6-2-1-1**

		<b>Stelle 1</b>	<b>Stelle 2</b>	<b>Stelle 3</b>	<b>Stelle 4</b>
$\sigma_x$	gemessen	-113,28	-111,61	-117,62	-118,85
$\sigma_{x1}$		-118,76	-121,59	-120,92	-114,84
$\sigma_y$		-120,56	-121,84	-122,00	-117,65
$\sigma_{y1}$		-110,66	-115,13	-118,97	-123,83
$\sigma_1$	berechnet	-111,48	-110,68	-117,42	-122,78
$\sigma_2$		-122,37	-122,78	-122,21	-113,71

**Prüfkörper 6-2-1-2**

		<b>Stelle 1</b>	<b>Stelle 2</b>	<b>Stelle 3</b>	<b>Stelle 4</b>
$\sigma_x$	gemessen	-120,88	-113,20	-117,28	-120,60
$\sigma_{x1}$		-123,86	-117,41	-124,20	-115,04
$\sigma_y$		-115,89	-121,71	-116,24	-114,88
$\sigma_{y1}$		-122,38	-119,41	-117,36	-109,30
$\sigma_1$	berechnet	-120,99	-113,08	-120,22	-121,79
$\sigma_2$		-115,78	-121,83	-113,30	-113,69

**Prüfkörper 6-2-1-3**

		<b>Stelle 1</b>	<b>Stelle 2</b>	<b>Stelle 3</b>	<b>Stelle 4</b>
$\sigma_x$	gemessen	-120,44	-103,24	-112,04	-121,78
$\sigma_{x1}$		-116,38	-138,40	-124,47	-118,82
$\sigma_y$		-112,04	-118,57	-122,20	-112,47
$\sigma_{y1}$		-114,41	-122,58	-114,03	-121,45
$\sigma_1$	berechnet	-120,55	-99,89	-109,84	-121,96
$\sigma_2$		-111,92	-121,92	-124,40	-112,29

**Prüfkörper 6-2-1-4**

		<b>Stelle 1</b>	<b>Stelle 2</b>	<b>Stelle 3</b>	<b>Stelle 4</b>
$\sigma_x$	gemessen	-118,73	-112,02	-109,87	-122,12
$\sigma_{x1}$		-120,86	-120,99	-108,77	-117,45
$\sigma_y$		-120,09	-120,85	-124,49	-123,46
$\sigma_{y1}$		-124,83	-119,96	-125,82	-121,60
$\sigma_1$	berechnet	-117,31	-111,99	-105,95	-120,61
$\sigma_2$		-121,50	-120,88	-128,41	-124,97

**Prüfkörper 6-2-1-5**

		<b>Stelle 1</b>	<b>Stelle 2</b>	<b>Stelle 3</b>	<b>Stelle 4</b>
$\sigma_x$	gemessen	-122,67	-116,52	-132,06	-122,54
$\sigma_{x1}$		-113,89	-128,84	-121,55	-118,77
$\sigma_y$		-113,56	-114,47	-122,30	-115,53
$\sigma_{y1}$		-121,68	-117,41	-118,62	-124,20
$\sigma_1$	berechnet	-124,11	-121,30	-132,28	-123,46
$\sigma_2$		-112,12	-109,69	-122,09	-114,61

A4

### A1.2 Einfluss des Trennmittels

Der Einfluss des Trennmittels wurde planmäßig mit halbseitig mit dem Trennmittel versehenen, unbedruckten Scheiben untersucht (vergleiche Abschnitt 5.3.3, Seite 115 der Hauptarbeit). Statistische Ausreißer sind grau markiert und aus der weiteren Auswertung entfernt.

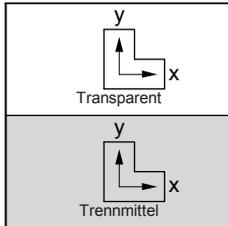


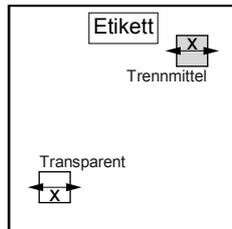
Bild A1 Proben zur Kontrolle des Trenmitteleinflusses

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung – transparent				y-Richtung – transparent			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
1	5,83	-113,51	55,86	-111,25	0,49	-109,29	54,74	-110,04	0,50
2	5,88	-112,23	55,29	-108,73	0,49	-110,61	54,61	-107,99	0,49
3	5,94	-108,79	57,11	-120,46	0,52	-105,11	51,61	-101,99	0,49
4	5,87	-110,50	55,27	-110,98	0,50	-105,91	53,04	-107,34	0,50
5	5,87	-111,29	55,66	-110,61	0,50	-108,46	54,25	-108,55	0,50

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung – Trennmittel				y-Richtung – Trennmittel			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
1	5,87	-105,81	53,59	-104,72	0,51	-107,70	53,39	-109,32	0,50
2	5,90	-110,32	55,42	-112,49	0,50	-104,55	52,98	-107,54	0,51
3	5,84	-111,19	55,22	-111,18	0,50	-112,58	54,67	-107,29	0,49
4	5,89	-110,34	56,11	-111,43	0,51	-106,00	52,95	-104,90	0,50
5	5,88	-111,32	55,63	-112,16	0,50	-106,84	53,89	-108,71	0,50

### A1.3 Messungen mittels Differential-Refraktographie – LaserGASP

Die Messungen erfolgten an der transparenten und der Stelle mit dem Trennmittel in x-Richtung. Die Messwerte besitzen die Einheit [ ° ], die Spannung [ N/mm<sup>2</sup> ].



**Bild A2** Proben zur spannungsoptischen Messung mit dem LaserGASP

#### A1.3.1 Serie 6-1-1

##### Digitaldruck

Probe [ / ]	Trennmittel		Transparent	
	Messwert	Spannung	Messwert	Spannung
1	70,0	115,87	70,0	115,87
2	68,2	105,47	68,9	109,33
3	68,3	106,01	69,8	114,63
4	68,4	106,55	69,2	111,05
5	69,0	109,90	70,0	115,87
6	69,0	109,90	69,0	109,90
7	68,6	107,65	69,4	112,22
8	69,7	114,02	69,7	114,02
9	69,7	114,02	70,6	119,72
10	68,1	104,94	69,5	112,82

##### Siebdruck

Probe [ / ]	Trennmittel		Transparent	
	Messwert	Spannung	Messwert	Spannung
11	70,0	115,87	70,0	115,87
12	69,8	114,63	70,1	116,50
13	70,0	115,87	69,8	114,63
14	70,1	116,50	70,5	119,06
15	69,8	114,63	71,0	122,41
16	72,0	129,64	72,5	133,56
17	69,0	109,90	68,6	107,65
18	68,6	107,65	70,5	119,06
19	71,2	123,80	68,7	108,20
20	68,5	107,10	68,9	109,33

A6

### A1.3.2 Serie 6-1-2

#### Digitaldruck

Probe [ / ]	Trennmittel		Transparent	
	Messwert	Spannung	Messwert	Spannung
1	69,2	111,05	68,9	109,33
2	70,0	115,87	70,5	119,06
3	70,3	117,77	71,5	125,93
4	68,0	104,41	69,8	114,63
5	69,8	114,63	70,0	115,87
6	68,1	104,94	69,5	112,82
7	69,2	111,05	69,5	112,82
8	70,0	115,87	70,5	119,06
9	68,8	108,76	68,8	108,76
10	69,0	109,90	69,1	110,47

#### Siebdruck

Probe [ / ]	Trennmittel		Transparent	
	Messwert	Spannung	Messwert	Spannung
11	69,7	114,02	70,1	116,50
12	68,6	107,65	69,2	111,05
13	69,6	113,42	70,0	115,87
14	69,6	113,42	69,6	113,42
15	69,2	111,05	70,2	117,13
16	69,2	111,05	70,2	117,13
17	69,9	115,25	69,7	114,02
18	68,8	108,76	70,1	116,50
19	69,2	111,05	69,9	115,25
20	68,9	109,33	68,9	109,33

**A1.3.3 Serie 6-2-1****Siebdruck**

Probe [ / ]	Trennmittel		Transparent	
	Messwert	Spannung	Messwert	Spannung
11	68,9	109,33	68,2	105,47
12	68,3	106,01	69,4	112,22
13	68,9	109,33	68,3	106,01
14	70,0	115,87	71,0	122,41
15	69,1	110,47	69,1	110,47
16	69,2	111,05	69,8	114,63
17	68,7	108,20	69,4	112,22
18	68,6	107,65	68,4	106,55
19	68,5	107,10	70,0	115,87
20	68,6	107,65	69,9	115,25

A8

### A1.3.4 Serie 6-2-3

#### Digitaldruck

Probe [ / ]	Trennmittel		Transparent	
	Messwert	Spannung	Messwert	Spannung
1	69,5	112,82	69,5	112,82
2	68,2	105,47	69,8	114,63
3	69,2	111,05	70,2	117,13
4	68,0	104,41	69,0	109,90
5	69,1	110,47	69,1	110,47
6	68,5	107,10	69,1	110,47
7	68,3	106,01	69,0	109,90
8	69,5	112,82	70,0	115,87
9	69,0	109,90	70,0	115,87
10	69,1	110,47	68,3	106,01

#### Siebdruck

Probe [ / ]	Trennmittel		Transparent	
	Messwert	Spannung	Messwert	Spannung
11	68,0	104,41	68,3	106,01
12	68,6	107,65	68,6	107,65
13	68,6	107,65	69,2	111,05
14	69,0	109,90	70,1	116,50
15	68,2	105,47	68,2	105,47
16	68,7	108,20	68,7	108,20
17	69,2	111,05	68,2	105,47
18	68,0	104,41	68,5	107,10
19	70,0	115,87	69,0	109,90
20	68,8	108,76	68,8	108,76

#### A1.4 Prüfung der bedruckten Seite

Planmäßig sind aus Festigkeits- und optischen Gründen die Bedruckungen auf der Atmosphärenseite des Glases aufgebracht. Dieses wurde für jede einzelne Probe mit einem Zinnbadseitentester von Bohle beziehungsweise im Rahmen der Messungen mit dem Differential-Refraktometer überprüft.

##### A1.4.1 Serie 6-1-1

Probe DD	Seite
1	A
2	A
3	A
4	A
5	A
6	A
7	A
8	A
9	A
10	A
A	100 %
Z	–

A Atmosphärenseite  
Z Zinnbadseite

Probe SD	Seite
11	A
12	A
13	A
14	A
15	A
16	A
17	A
18	A
19	A
20	A
A	100 %
Z	–

DD Digitaldruck  
SD Siebdruck

##### A1.4.2 Serie 6-1-2

Probe DD	Seite
1	A
2	A
3	A
4	A
5	A
6	A
7	A
8	A
9	A
10	A
A	100 %
Z	–

A Atmosphärenseite  
Z Zinnbadseite

Probe SD	Seite
11	A
12	A
13	A
14	A
15	A
16	A
17	A
18	A
19	A
20	A
A	100 %
Z	–

DD Digitaldruck  
SD Siebdruck

A10

**A1.4.3 Serie 6-1-3**

Probe DD	Seite
1	A
2	A
3	A
4	A
5	A
6	A
7	A
8	A
9	A
10	A
A	100 %
Z	-

A Atmosphärenseite  
Z Zinnbadseite

Probe DD	Seite
11	A
12	A
13	A
14	A
15	A
16	A
17	A
18	A
19	A
20	A
A	100 %
Z	-

DD Digitaldruck  
SD Siebdruck

Probe DD	Seite
21	A
22	A
23	A
24	A
25	A
26	A
27	A
28	A
29	A
30	A
A	100 %
Z	-

Probe SD	Seite
31	A
32	A
33	A
34	A
35	A
36	A
37	A
38	A
39	A
40	A
A	100 %
Z	-

A Atmosphärenseite  
Z Zinnbadseite

Probe SD	Seite
41	A
42	A
43	A
44	A
45	A
46	A
47	A
48	A
49	A
50	A
A	100 %
Z	-

DD Digitaldruck  
SD Siebdruck

**A1.4.4 Serie 6-2-1**

Probe DD	Seite
1	Z
2	A
3	A
4	A
5	A
6	A
7	Z
8	A
9	A
10	A
A	80 %
Z	20 %

A Atmosphärenseite  
Z Zinnbadseite

Probe DD	Seite
11	A
12	A
13	A
14	A
15	A
16	A
17	A
18	A
19	A
20	A
A	100 %
Z	-

DD Digitaldruck  
SD Siebdruck

Probe SD	Seite
21	A
22	A
23	A
24	A
25	A
26	A
27	A
28	A
29	A
30	A
A	100 %
Z	-

**A1.4.5 Serie 6-2-3**

Probe DD	Seite
1	A
2	A
3	A
4	A
5	A
6	A
7	A
8	A
9	A
10	A
A	100 %
Z	-

A Atmosphärenseite  
Z Zinnbadseite

Probe SD	Seite
11	A
12	A
13	A
14	A
15	A
16	A
17	A
18	A
19	A
20	A
A	100 %
Z	-

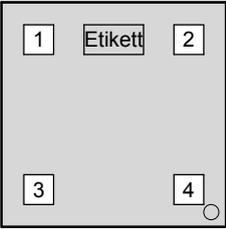
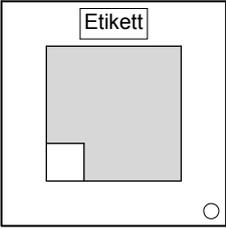
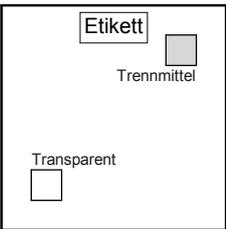
DD Digitaldruck  
SD Siebdruck

A12

## A2 Spannungsoptische Messungen

Alle Spannungen sind in der Einheit [ N/mm<sup>2</sup> ]. Die Dicken stellen gemittelte Werte zwischen der x- und y-Richtung dar. Statistische Ausreißer sind grau markiert und aus der weiteren Auswertung entfernt. Die Abkürzungen DD und SD stehen für Digital- beziehungsweise Siebdruck.

Die Messungen an Proben mit drei unterschiedlichen Formen bezüglich der Messstellen untersucht. Die Probenzuordnung zur jeweiligen Probengestaltung kann der folgenden Tabelle entnommen werden. Die Proben besitzen immer die nominellen Abmessungen 300 x 300 x 6 mm.

Probenform [ / ]	Serie [ / ]	Probengruppe [ / ]
	6-1-3 DD	1 – 10
	6-2-1 DD	1 – 10
	6-1-3 DD	11 – 20
	6-1-3 SD	31 – 40
	6-2-1 DD	11 – 20
	6-1-1 DD	1 – 10
	6-1-1 SD	1 – 10
	6-1-2 DD	1 – 10
	6-1-2 SD	1 – 10
	6-2-1 SD	1 – 10
	6-2-3 DD	1 – 10
	6-2-3 SD	1 – 10

## A2.1 Serie 6-0-0 – Probengruppe 1 – 10

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
1	5,90	-109,14	54,40	-108,47	0,50	-128,27	63,22	-124,64	0,49
2	5,86	-106,51	52,65	-104,07	0,49	-127,36	63,66	-127,30	0,50
3	5,87	-103,24	52,03	-104,90	0,50	-133,70	65,47	-128,13	0,49
4	5,85	-119,72	60,61	-122,75	0,51	-104,58	53,92	-111,03	0,52
5	5,91	-106,03	54,37	-111,45	0,51	-129,11	63,72	-125,79	0,49
6	5,83	-110,21	55,02	-109,89	0,50	-128,81	63,68	-125,95	0,49
7	5,84	-125,15	63,33	-128,17	0,51	-104,91	53,62	-109,55	0,51
8	5,89	-103,52	50,75	-99,47	0,49	-127,62	63,78	-127,52	0,50
9	5,85	-105,22	52,36	-104,26	0,50	-131,79	64,91	-127,85	0,49
10	5,84	-106,73	52,58	-103,61	0,49	-130,18	65,06	-130,10	0,50

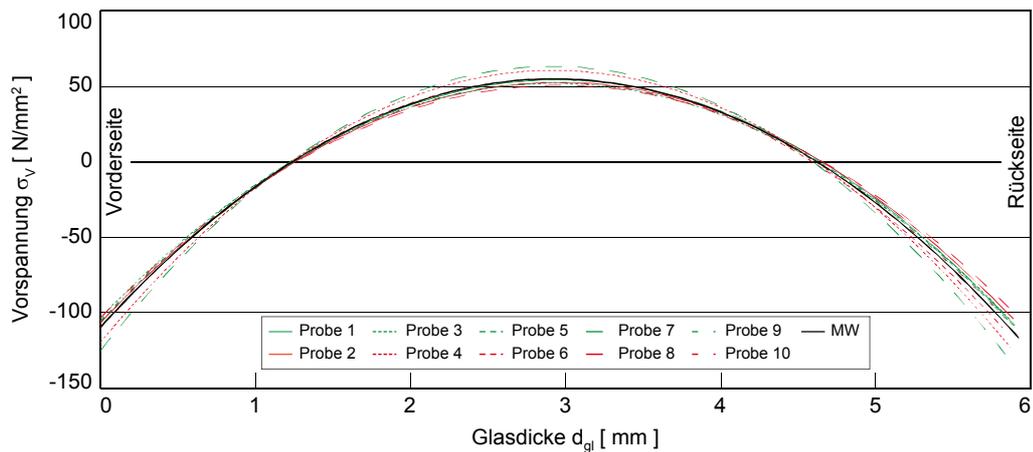


Bild A3 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x

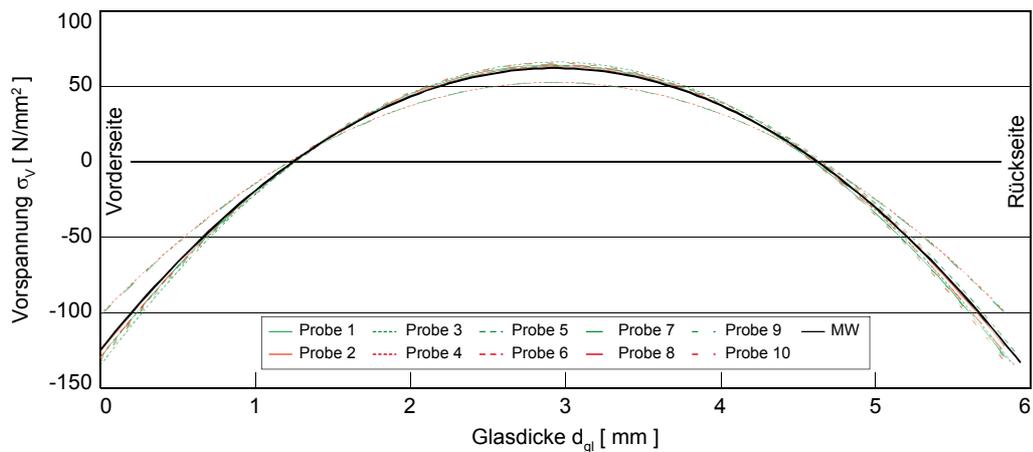
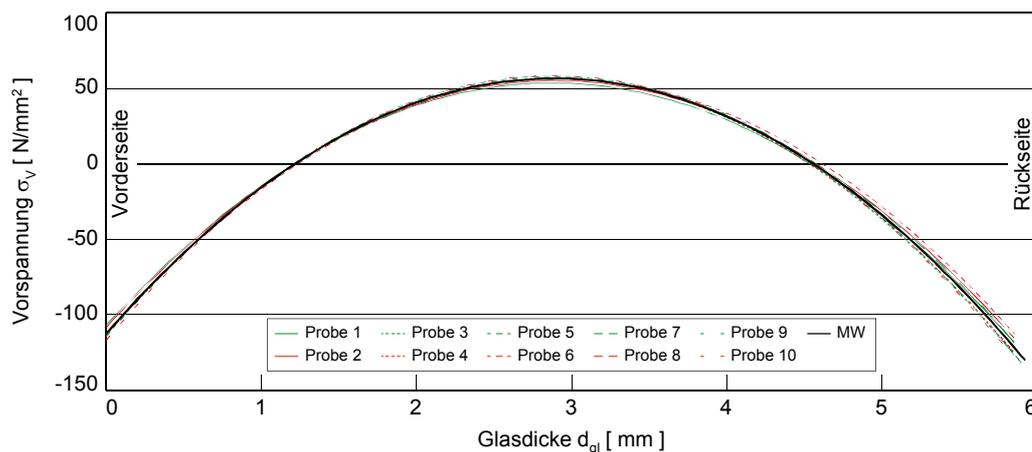


Bild A4 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

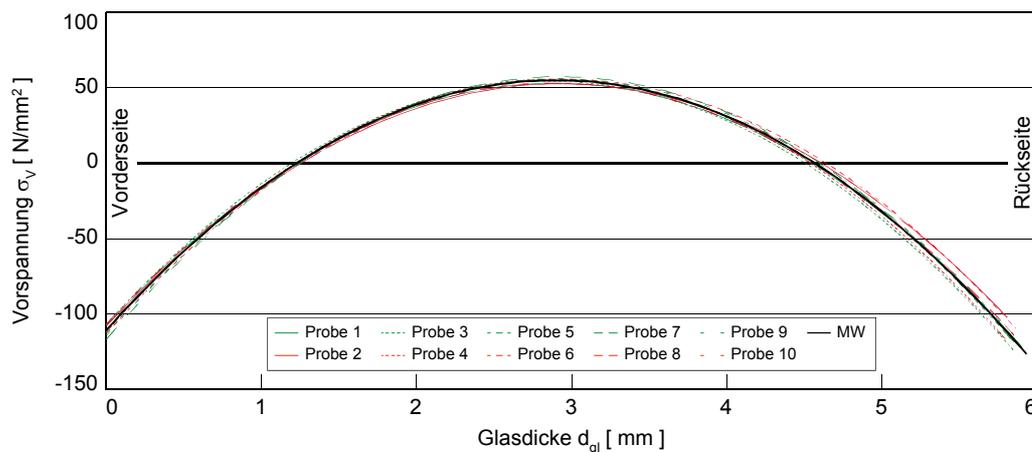
A14

**A2.2 Serie 6-1-1 – Probengruppe 1 – 10 DD**

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
1	5,75	-106,75	53,57	-107,59	0,50	-107,56	52,99	-104,38	0,49
2	5,81	-108,31	55,06	-111,93	0,51	-108,16	52,56	-102,04	0,49
3	5,74	-113,70	56,65	-112,94	0,50	-106,91	54,44	-110,83	0,51
4	5,76	-113,32	56,81	-113,97	0,50	-111,76	55,76	-111,34	0,50
5	5,79	-114,19	58,07	-118,10	0,51	-111,81	55,73	-111,12	0,50
6	5,86	-112,58	56,35	-112,88	0,50	-113,03	55,69	-109,70	0,49
7	5,81	-111,93	56,22	-112,95	0,50	-116,84	57,32	-112,45	0,49
8	5,78	-111,80	56,18	-112,97	0,50	-106,59	53,01	-105,44	0,50
9	5,81	-114,28	57,76	-116,75	0,51	-114,25	55,93	-109,47	0,49
10	5,76	-116,84	58,43	-116,93	0,50	-107,18	53,24	-105,79	0,50



**Bild A5** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x



**Bild A6** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

### A2.3 Serie 6-1-1 – Probengruppe 1 – 10 DD mit Trennmittel

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
1	5,80	-104,82	53,24	-108,14	0,51	-106,58	53,50	-107,42	0,50
2	5,83	-100,50	49,82	-98,82	0,50	-113,60	55,32	-107,66	0,49
3	5,75	-102,78	50,43	-98,90	0,49	-108,16	53,14	-104,39	0,49
4	5,78	-107,01	54,54	-111,15	0,51	-101,49	50,58	-100,82	0,50
5	5,86	-107,74	54,40	-109,88	0,50	-105,06	52,28	-104,08	0,50
6	5,85	-107,56	53,52	-106,54	0,50	-110,55	55,09	-109,86	0,50
7	5,83	-108,00	53,25	-105,03	0,49	-109,85	53,98	-106,06	0,49
8	5,76	-111,80	56,18	-112,97	0,50	-101,63	50,51	-100,46	0,50
9	5,83	-107,75	53,70	-107,11	0,50	-114,10	56,39	-111,50	0,49
10	5,81	-107,26	53,98	-108,68	0,50	-112,00	55,69	-110,76	0,50

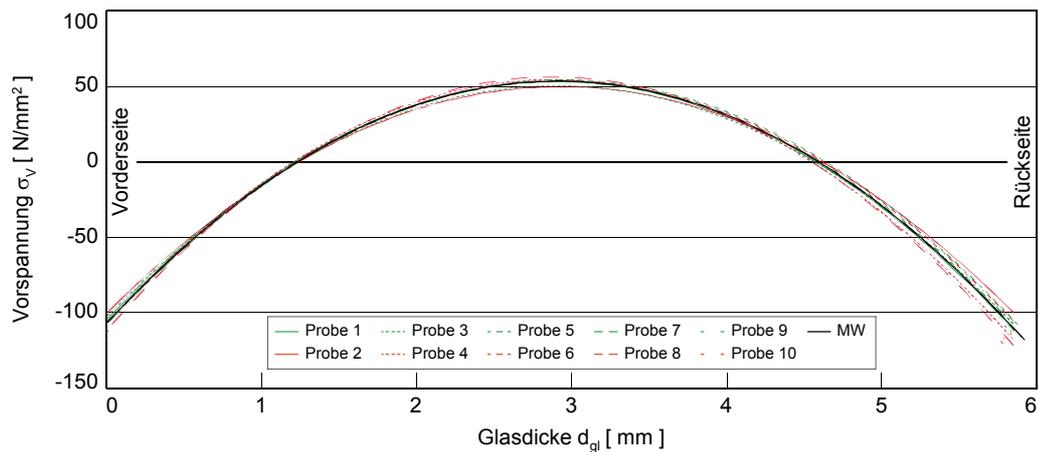


Bild A7 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x

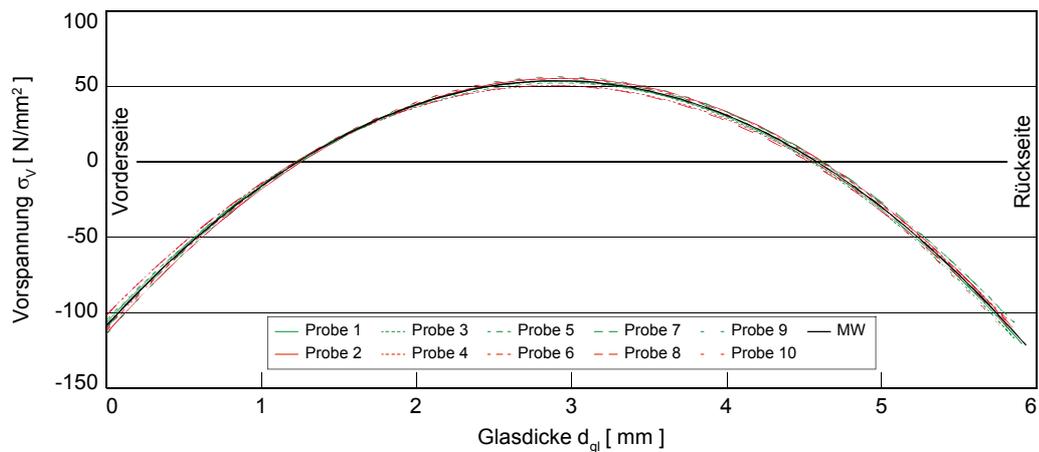
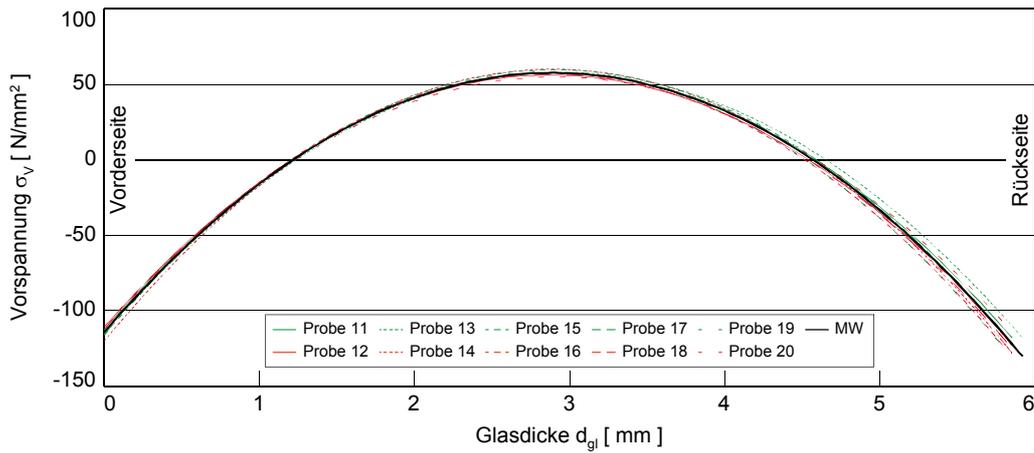


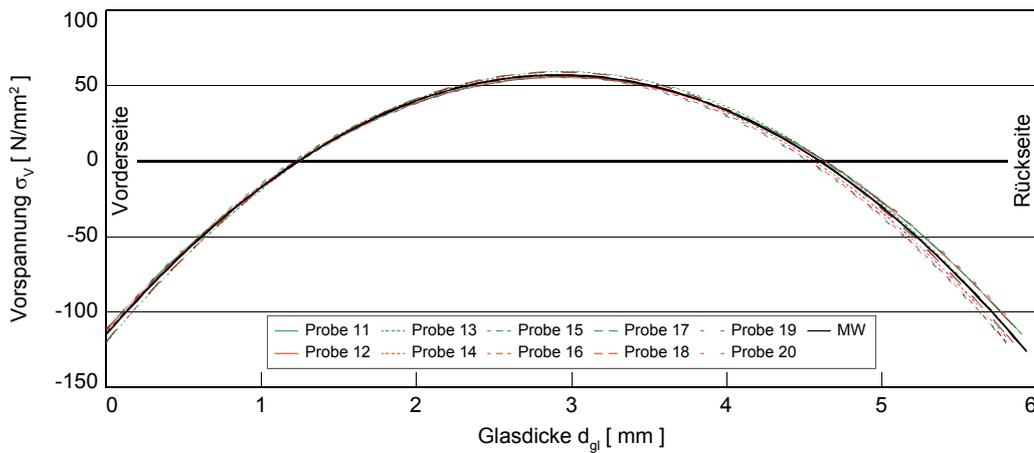
Bild A8 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

**A2.4 Serie 6-1-1 – Probengruppe 11 – 20 SD**

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
11	5,86	-112,21	57,34	-117,12	0,51	-111,48	55,97	-112,43	0,50
12	5,81	-110,80	56,10	-113,64	0,51	-112,59	55,41	-109,05	0,49
13	5,88	-114,58	58,01	-117,46	0,51	-120,59	59,25	-116,37	0,49
14	5,79	-120,11	60,09	-120,26	0,50	-114,83	57,49	-115,14	0,50
15	5,86	-115,85	59,74	-123,05	0,52	-114,31	56,29	-110,82	0,49
16	5,74	-113,67	57,56	-116,56	0,51	-114,13	56,51	-111,95	0,50
17	5,82	-115,55	58,09	-116,80	0,50	-119,74	59,25	-117,29	0,49
18	5,79	-112,06	56,75	-114,95	0,51	-120,29	58,91	-115,36	0,49
19	5,74	-116,13	58,33	-117,19	0,50	-111,59	56,03	-112,56	0,50
20	5,84	-110,31	55,01	-109,73	0,50	-112,26	55,36	-109,18	0,49



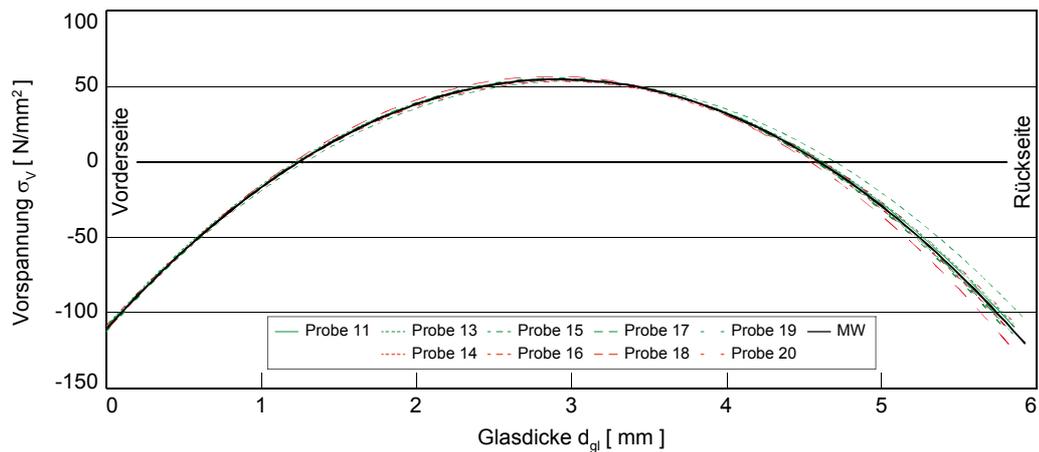
**Bild A9** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x



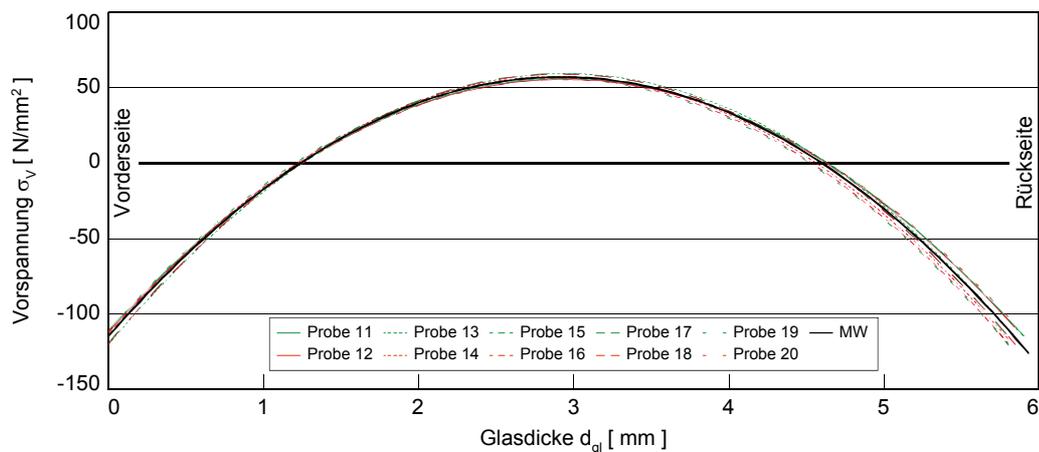
**Bild A10** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

### A2.5 Serie 6-1-1 – Probengruppe 11 – 20 SD mit Trennmittel

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
11	5,83	-110,10	54,49	-107,86	0,49	-111,89	55,52	-110,20	0,50
12	5,76	-104,47	51,90	-103,12	0,50	-98,67	42,50	-69,64	0,43
13	5,87	-109,51	54,58	-108,81	0,50	-115,67	57,37	-113,81	0,50
14	5,82	-108,78	54,95	-111,01	0,51	-111,49	55,62	-111,01	0,50
15	5,89	-110,43	53,55	-103,72	0,48	-108,68	52,83	-102,61	0,49
16	5,73	-111,69	53,65	-102,81	0,48	-114,30	56,35	-111,13	0,49
17	5,82	-109,56	54,73	-109,39	0,50	-99,29	51,18	-105,37	0,52
18	5,76	-112,12	56,68	-114,63	0,51	-114,65	56,50	-111,32	0,49
19	5,76	-112,42	55,38	-109,08	0,49	-112,00	55,84	-111,39	0,50
20	5,85	-108,41	53,26	-104,62	0,49	-106,91	53,22	-105,98	0,50



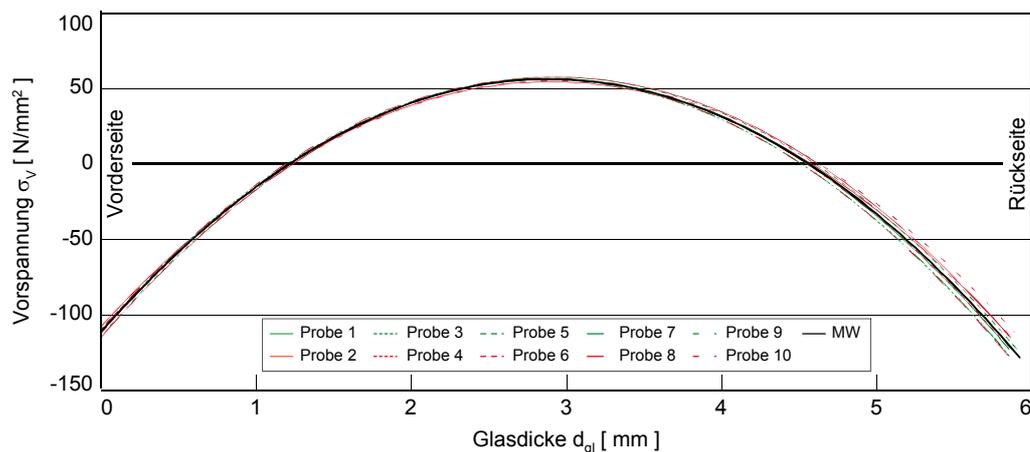
**Bild A11** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x



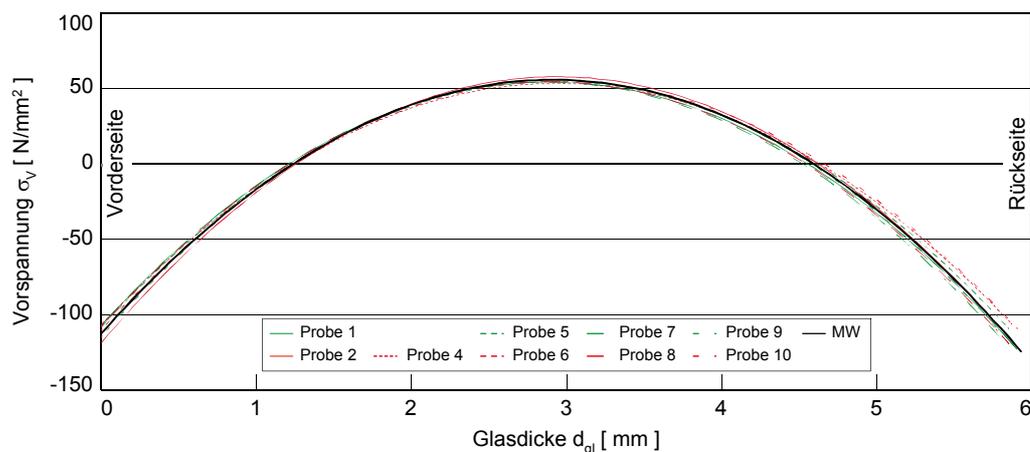
**Bild A12** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

**A2.6 Serie 6-1-2 – Probengruppe 1 – 10 DD**

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
1	5,79	-111,55	56,62	-114,96	0,51	-106,90	54,23	-110,03	0,51
2	5,82	-107,44	54,54	-110,69	0,51	-118,54	57,71	-112,25	0,49
3	5,75	-110,12	56,20	-114,66	0,51	-116,97	58,36	-116,51	0,50
4	5,87	-114,70	57,53	-115,44	0,50	-106,85	53,28	-106,28	0,50
5	5,85	-113,97	57,62	-116,53	0,51	-108,13	54,32	-109,19	0,50
6	5,79	-112,07	56,41	-113,59	0,50	-112,91	55,57	-109,36	0,49
7	5,74	-111,17	55,91	-112,49	0,50	-107,41	54,08	-108,90	0,50
8	5,76	-109,63	56,60	-116,71	0,52	-108,01	54,38	-109,57	0,50
9	5,78	-109,66	55,46	-112,21	0,51	-114,55	56,11	-109,87	0,49
10	5,90	-108,96	55,10	-111,47	0,51	-110,05	54,85	-109,33	0,50



**Bild A13** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x



**Bild A14** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

## A2.7 Serie 6-1-2 – Probengruppe 1 – 10 DD mit Trennmittel

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
1	5,77	-109,46	54,71	-109,41	0,50	-110,41	54,37	-107,07	0,49
2	5,82	-110,97	54,22	-105,90	0,49	-109,88	53,68	-104,80	0,49
3	5,78	-105,32	53,34	-108,02	0,51	-114,73	57,04	-113,44	0,50
4	5,87	-109,82	54,83	-109,51	0,50	-108,22	54,23	-108,73	0,50
5	5,89	-109,70	54,17	-106,96	0,49	-105,96	53,19	-106,79	0,50
6	5,81	-109,44	54,62	-109,07	0,50	-110,20	54,93	-109,53	0,50
7	5,76	-110,76	54,98	-109,16	0,50	-107,51	53,98	-108,43	0,50
8	5,80	-101,48	51,46	-104,34	0,51	-111,44	55,44	-110,37	0,50
9	5,83	-105,12	52,46	-104,75	0,50	-111,87	55,64	-110,67	0,50
10	5,89	-109,75	54,02	-106,31	0,49	-109,81	54,24	-107,17	0,49

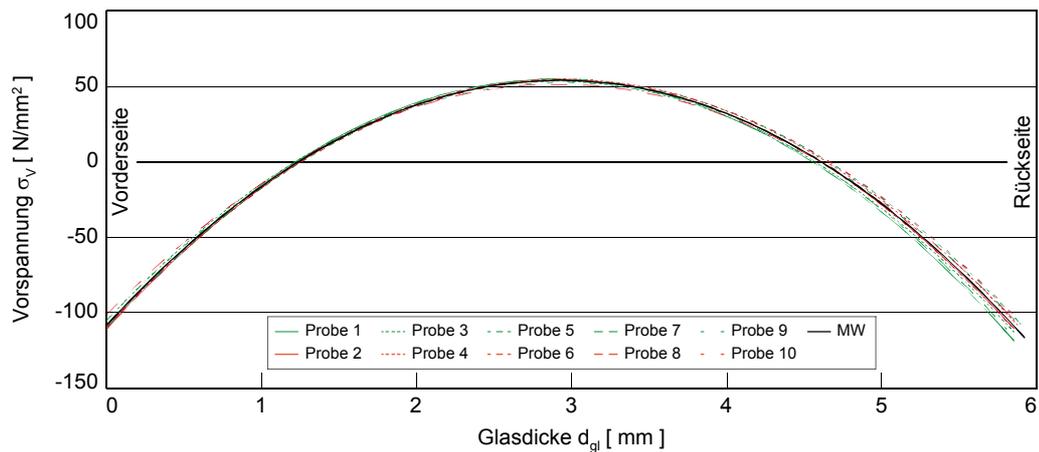


Bild A15 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x

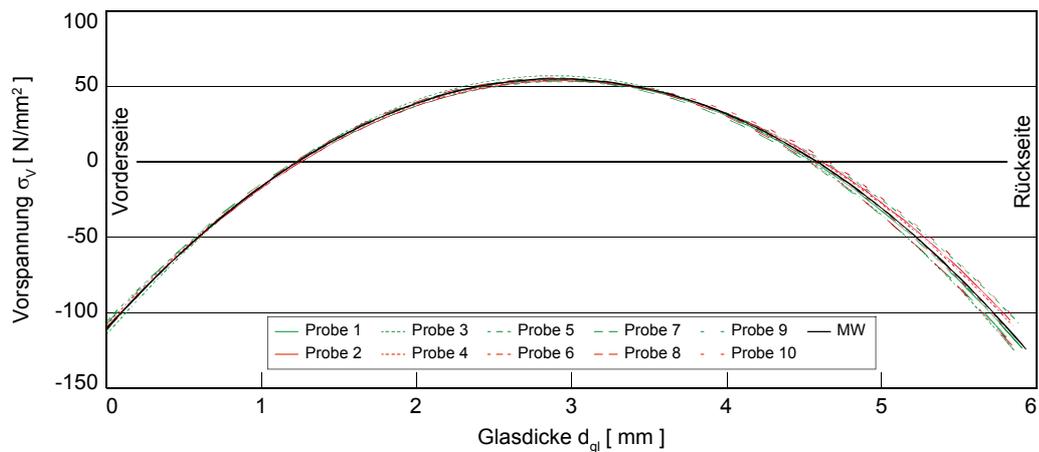
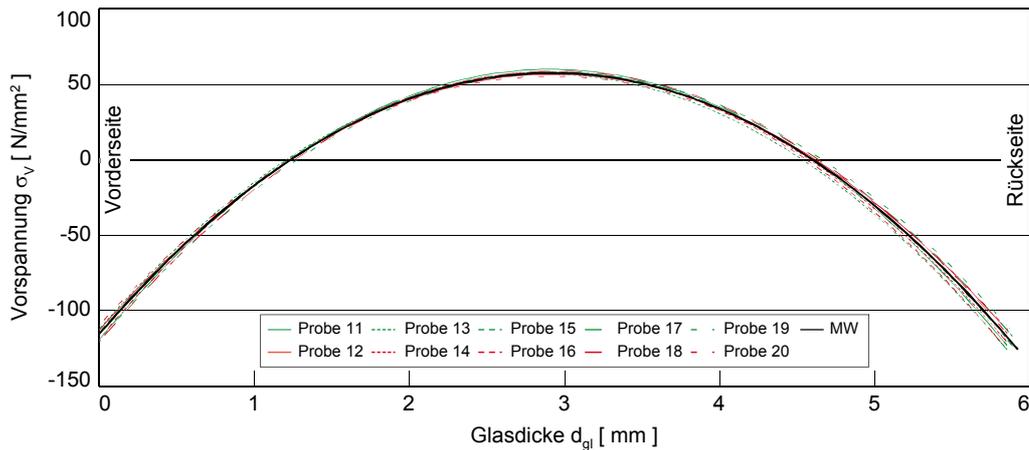


Bild A16 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

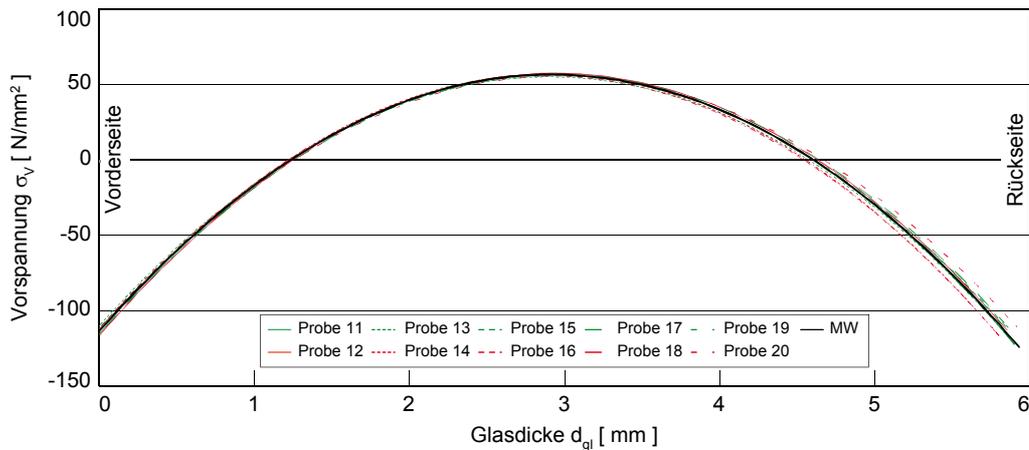
A20

**A2.8 Serie 6-1-2 – Probengruppe 11 – 20 SD**

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
11	5,83	-119,14	59,98	-120,77	0,50	-115,36	57,27	-113,74	0,50
12	5,86	-112,80	56,76	-114,27	0,50	-116,55	57,40	-113,03	0,49
13	5,79	-112,12	56,93	-115,63	0,51	-109,99	55,03	-110,15	0,50
14	5,79	-115,63	57,87	-115,87	0,50	-113,27	56,69	-113,51	0,50
15	5,85	-114,35	58,53	-119,72	0,51	-111,56	55,50	-110,49	0,50
16	5,76	-118,48	58,37	-114,99	0,49	-111,99	55,78	-111,14	0,50
17	5,87	-116,00	58,16	-116,65	0,50	-115,53	56,62	-110,91	0,49
18	5,85	-120,67	58,98	-115,23	0,49	-113,58	56,89	-114,01	0,50
19	5,86	-119,70	57,90	-111,86	0,48	-112,21	56,21	-112,69	0,50
20	5,89	-109,54	55,45	-112,28	0,51	-112,01	55,66	-110,66	0,50



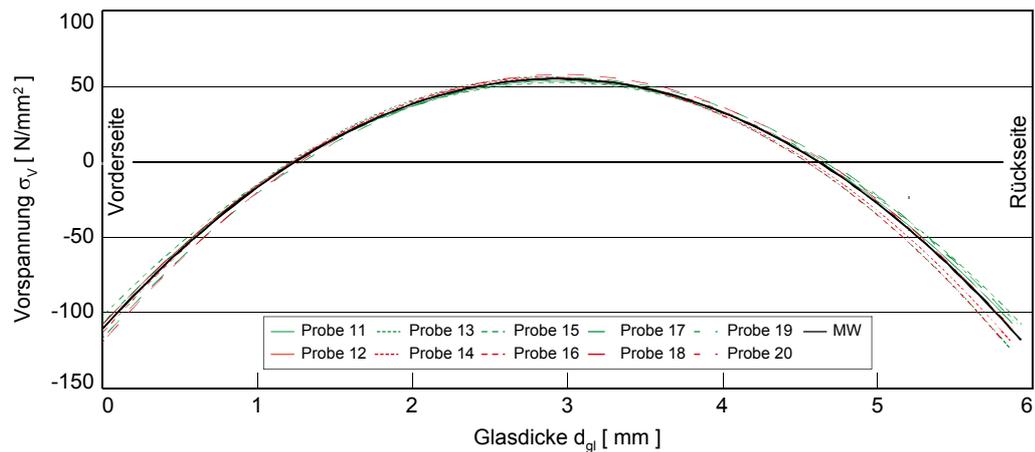
**Bild A17** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x



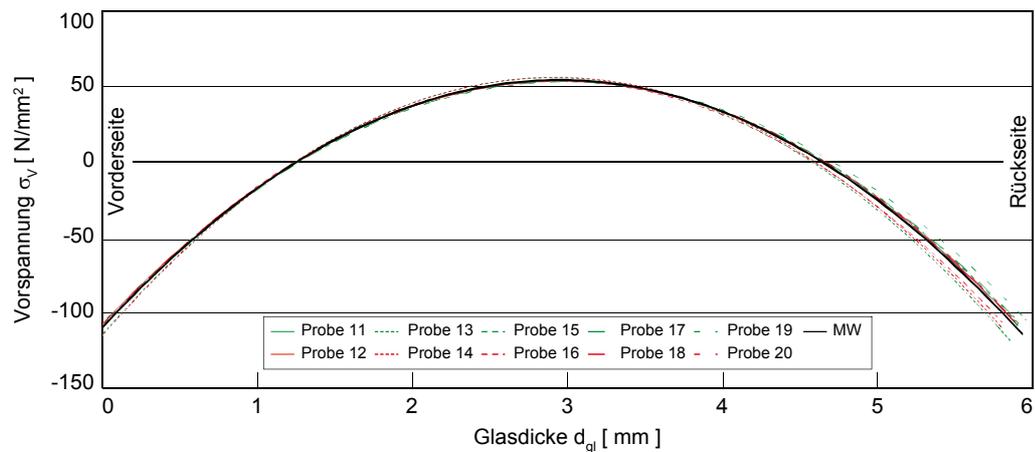
**Bild A18** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

### A2.9 Serie 6-1-2 – Probengruppe 11 – 20 SD mit Trennmittel

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
11	5,87	-107,49	53,62	-107,01	0,50	-109,84	53,89	-105,68	0,49
12	5,87	-108,13	54,73	-110,80	0,51	-107,48	53,34	-105,87	0,50
13	5,77	-111,35	56,38	-114,22	0,51	-114,47	55,76	-108,53	0,49
14	5,79	-110,67	55,45	-111,13	0,50	-115,07	56,03	-109,03	0,49
15	5,92	-102,39	52,48	-107,50	0,51	-108,41	53,91	-107,22	0,50
16	5,77	-113,80	56,08	-110,54	0,49	-108,95	53,78	-106,16	0,49
17	5,88	-117,30	55,74	-105,45	0,48	-109,70	53,23	-103,16	0,49
18	5,88	-119,79	57,81	-111,37	0,48	-109,50	53,79	-105,65	0,49
19	5,93	-107,23	53,62	-107,27	0,50	-107,01	52,95	-104,77	0,49
20	5,89	-111,25	55,56	-111,02	0,50	-107,93	53,86	-107,52	0,50



**Bild A19** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x

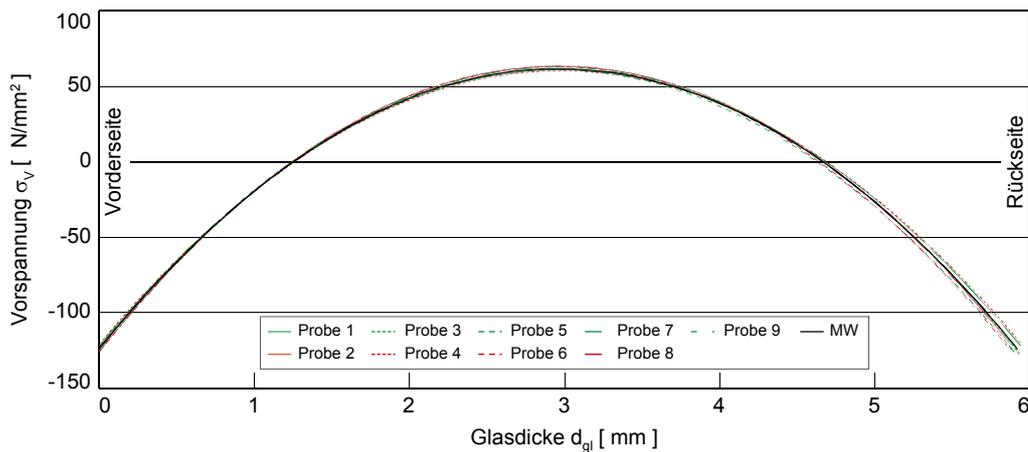


**Bild A20** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

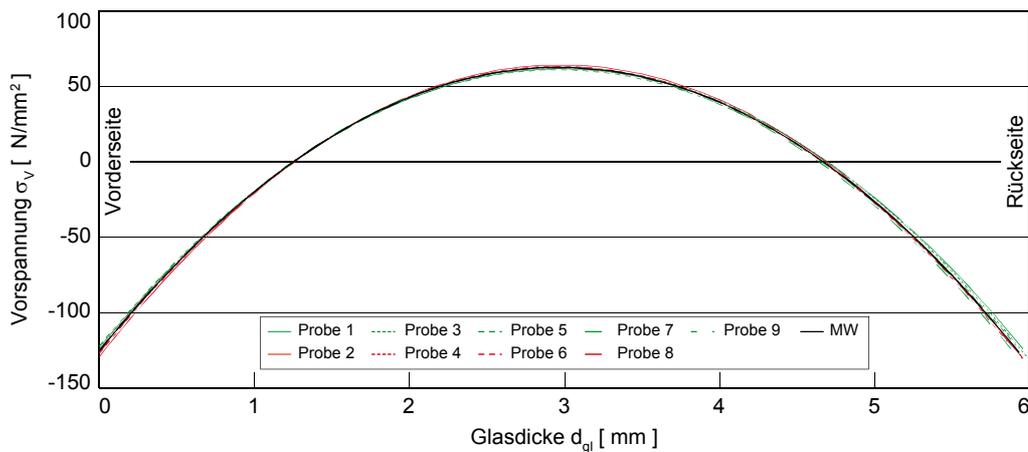
A22

**A2.10 Serie 6-1-3 – Probengruppe 1 – 10 DD**

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
1	5,95	-121,90	60,89	-121,70	0,50	-123,11	61,69	-123,71	0,50
2	5,93	-125,57	63,38	-127,94	0,50	-129,09	64,23	-127,87	0,50
3	5,94	-125,70	63,25	-127,32	0,50	-125,53	62,74	-125,47	0,50
4	5,93	-120,90	60,27	-120,21	0,50	-124,49	62,48	-125,44	0,50
5	5,89	-122,23	61,06	-122,04	0,50	-122,15	61,01	-121,88	0,50
6	5,90	-125,85	63,10	-126,57	0,50	-127,11	63,32	-126,18	0,50
7	5,92	-123,69	62,64	-126,88	0,51	-124,80	62,48	-125,12	0,50
8	5,90	-124,28	62,02	-123,78	0,50	-126,59	62,99	-125,38	0,50
9	5,89	-123,28	61,27	-121,81	0,50	-125,12	62,41	-124,53	0,50
10	5,90	-115,79	59,40	-121,80	0,51	-116,60	56,94	-111,16	0,49



**Bild A21** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x



**Bild A22** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

## A2.11 Serie 6-1-3 – Probengruppe 11 – 20 DD

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
11	5,85	-120,96	59,77	-118,12	0,49	-109,28	54,34	-108,07	0,50
12	5,97	-127,84	63,29	-125,35	0,50	-113,12	56,47	-112,74	0,50
13	5,93	-126,00	61,57	-120,24	0,49	-105,97	53,81	-109,28	0,51
14	5,87	-112,22	58,14	-120,26	0,52	-108,85	54,06	-107,43	0,50
15	5,94	-99,08	50,13	-101,43	0,51	-108,37	54,31	-108,87	0,50
16	5,89	-110,21	55,70	-112,59	0,51	-109,87	55,08	-110,47	0,50
17	6,00	-126,13	61,27	-118,91	0,49	-114,42	57,58	-115,91	0,50
18	6,00	-122,25	57,87	-108,97	0,47	-106,37	54,88	-113,10	0,52
19	5,94	-118,21	58,04	-113,95	0,49	-100,58	50,67	-102,10	0,50
20	5,90	-115,79	59,40	-121,80	0,51	-116,60	56,94	-111,16	0,49

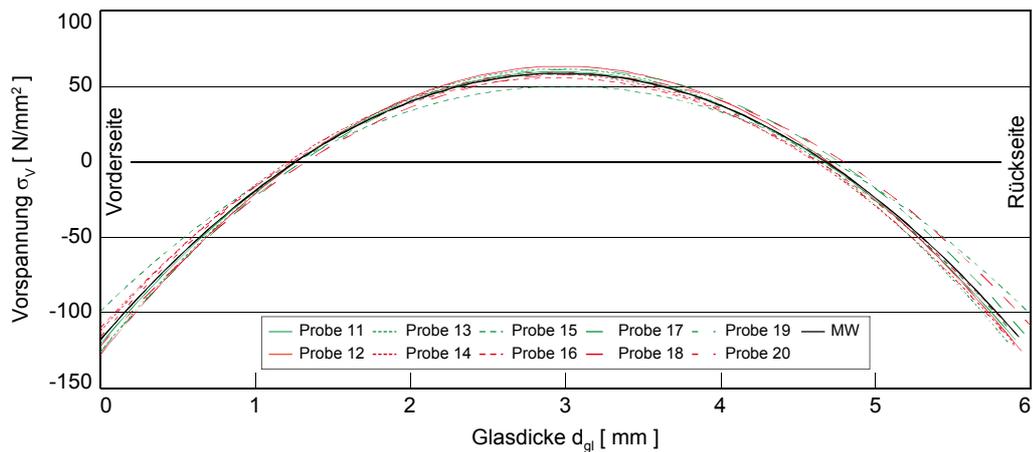


Bild A23 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x

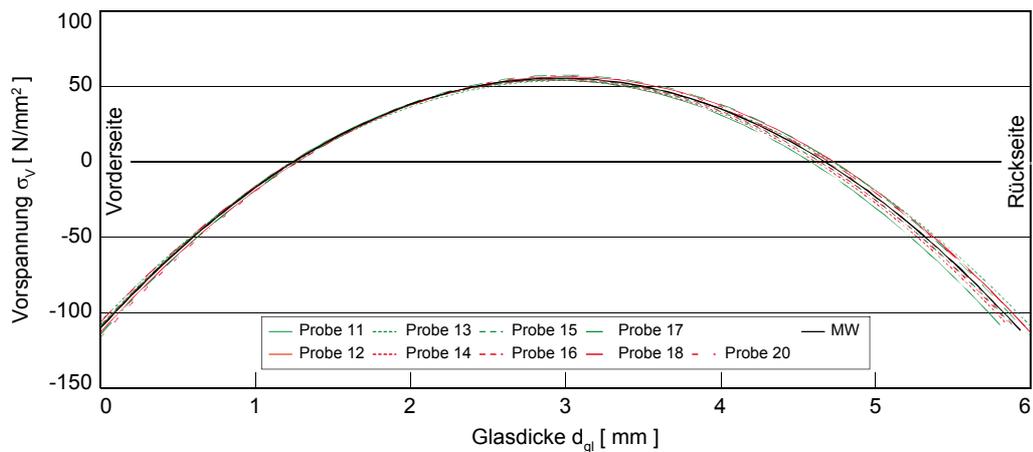
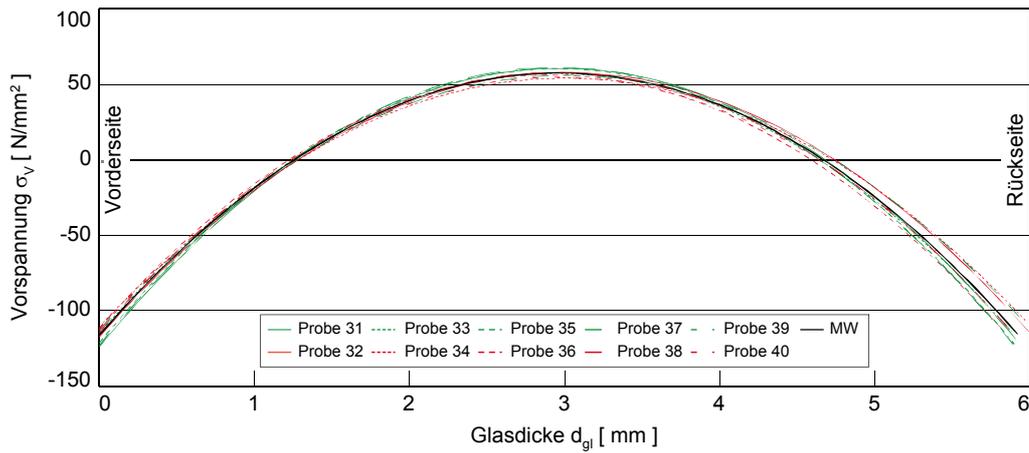


Bild A24 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

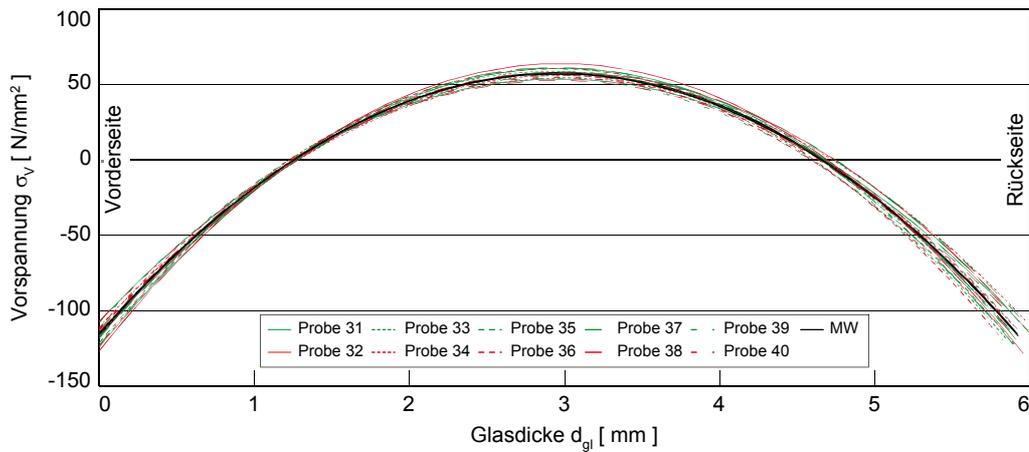
A24

**A2.12 Serie 6-1-3 – Probengruppe 31 – 40 SD**

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
31	5,93	-123,92	60,69	-118,85	0,49	-106,96	53,64	-107,62	0,50
32	5,98	-117,06	57,86	-114,37	0,49	-126,51	63,72	-128,43	0,50
33	5,88	-115,06	57,22	-113,83	0,50	-116,47	58,65	-118,17	0,50
34	5,93	-110,72	54,19	-106,00	0,49	-114,51	56,08	-109,80	0,49
35	5,91	-121,21	60,35	-120,18	0,50	-116,88	57,34	-112,47	0,49
36	5,83	-111,53	56,35	-113,87	0,51	-123,08	60,62	-119,42	0,49
37	6,00	-112,64	55,99	-111,32	0,50	-118,01	58,22	-114,87	0,49
38	5,90	-114,18	57,81	-117,04	0,51	-107,14	52,67	-103,55	0,49
39	5,86	-122,89	61,20	-121,91	0,50	-108,14	53,90	-107,47	0,50
40	5,85	-112,28	54,60	-106,06	0,49	-112,99	54,58	-105,24	0,48



**Bild A25** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x



**Bild A26** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

## A2.13 Serie 6-2-1 – Probengruppe 1 – 10 DD

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
1	5,90	-120,18	60,05	-120,03	0,50	-117,60	59,05	-118,61	0,50
2	5,95	-121,98	64,37	-135,30	0,53	-123,41	61,99	-124,57	0,50
3	5,90	-118,75	59,05	-117,47	0,50	-125,55	62,18	-123,18	0,50
4	5,91	-123,91	61,87	-123,58	0,50	-121,38	60,84	-122,00	0,50
5	5,90	-120,61	60,78	-122,52	0,50	-121,83	61,37	-123,64	0,50
6	5,91	-121,90	60,70	-120,92	0,50	-118,61	59,21	-118,23	0,50
7	5,91	-122,76	60,98	-121,18	0,50	-121,17	60,28	-119,98	0,50
8	5,91	-120,44	59,86	-119,04	0,50	-122,08	60,51	-119,96	0,50
9	5,95	-116,61	58,57	-117,73	0,50	-120,73	61,19	-124,03	0,51
10	5,89	-117,63	58,70	-108,86	0,50	-110,68	55,19	-110,13	0,50

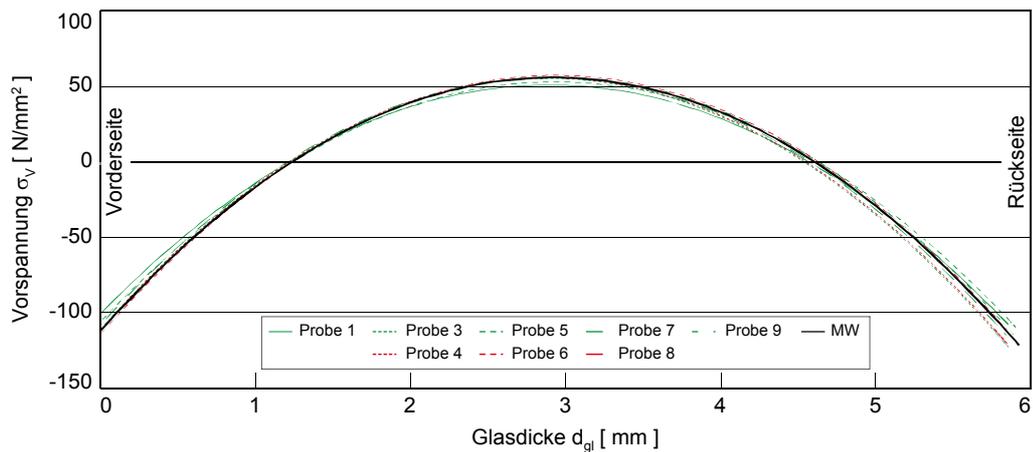


Bild A27 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x

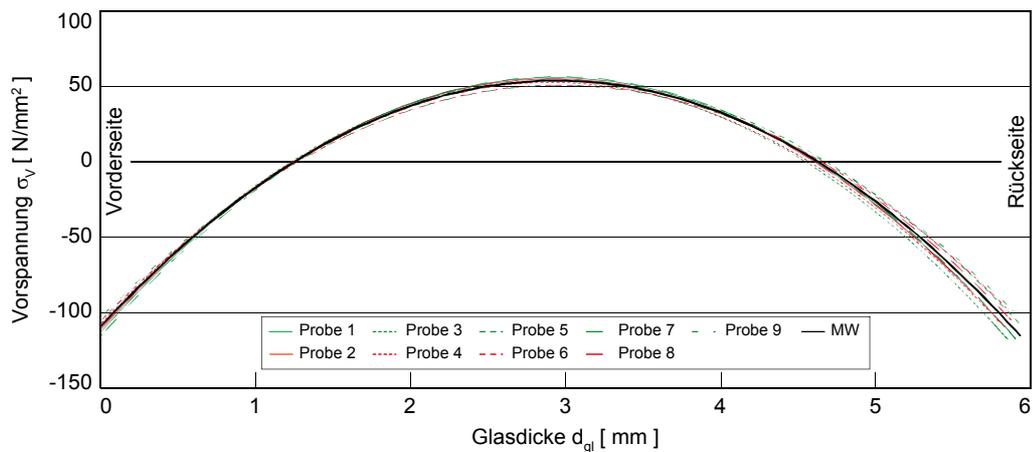
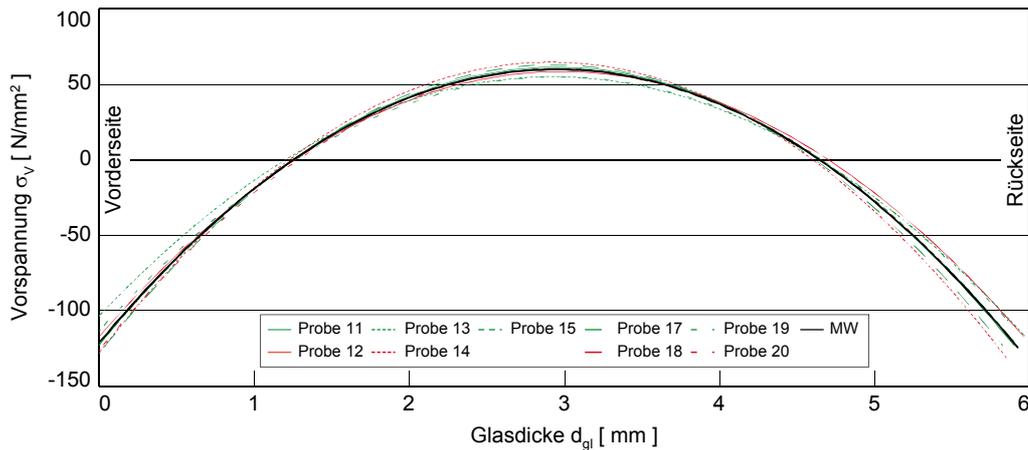


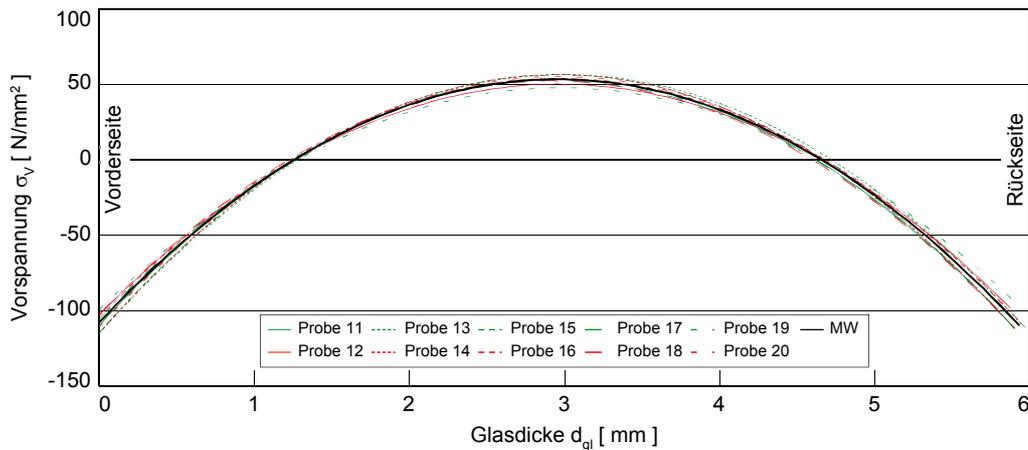
Bild A28 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

**A2.14 Serie 6-2-1 – Probengruppe 11 – 20 DD**

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
11	5,87	-122,46	61,37	-123,02	0,50	-109,56	53,50	-104,39	0,49
12	5,92	-117,00	58,51	-117,07	0,50	-102,50	50,18	-98,20	0,49
13	5,97	-103,36	55,04	-116,59	0,53	-114,93	56,49	-111,02	0,49
14	5,87	-127,81	64,75	-131,18	0,51	-114,34	56,49	-111,62	0,49
15	5,89	-122,45	60,49	-119,50	0,49	-114,38	56,45	-111,43	0,49
16	5,91	-107,58	50,06	-92,26	0,47	-104,55	54,07	-111,66	0,52
17	5,83	-128,19	62,89	-123,39	0,49	-105,95	52,51	-104,13	0,50
18	5,84	-128,12	62,96	-123,71	0,49	-102,77	52,37	-106,69	0,51
19	5,87	-113,17	54,98	-106,70	0,49	-99,05	47,76	-91,92	0,48
20	5,89	-125,88	59,99	-113,90	0,48	-110,68	55,19	-110,13	0,50



**Bild A29** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x



**Bild A30** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

## A2.15 Serie 6-2-1 – Probengruppe 21 – 30 SD

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
21	5,83	-100,64	50,94	-103,13	0,51	-112,92	55,90	-110,70	0,50
22	5,82	-105,52	53,44	-108,23	0,51	-111,27	55,10	-109,16	0,50
23	5,75	-111,04	55,36	-110,45	0,50	-109,15	53,81	-106,09	0,49
24	5,77	-111,37	55,73	-111,56	0,50	-107,54	52,67	-103,10	0,49
25	5,89	-106,09	53,02	-106,02	0,50	-109,23	53,93	-106,50	0,49
26	5,86	-114,32	57,29	-114,85	0,50	-105,54	50,90	-97,97	0,48
27	5,84	-108,16	55,80	-114,98	0,52	-115,78	56,45	-109,96	0,49
28	5,90	-107,08	54,11	-109,37	0,51	-108,80	53,38	-104,71	0,49
29	5,89	-111,25	56,37	-114,24	0,51	-103,42	50,59	-98,90	0,49
30	5,91	-109,82	55,45	-111,97	0,50	-107,10	52,41	-102,52	0,49

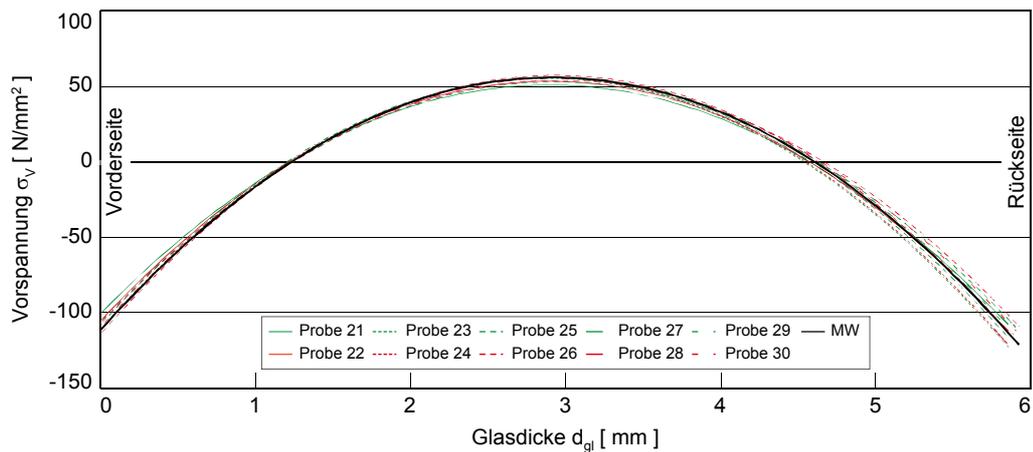


Bild A31 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x

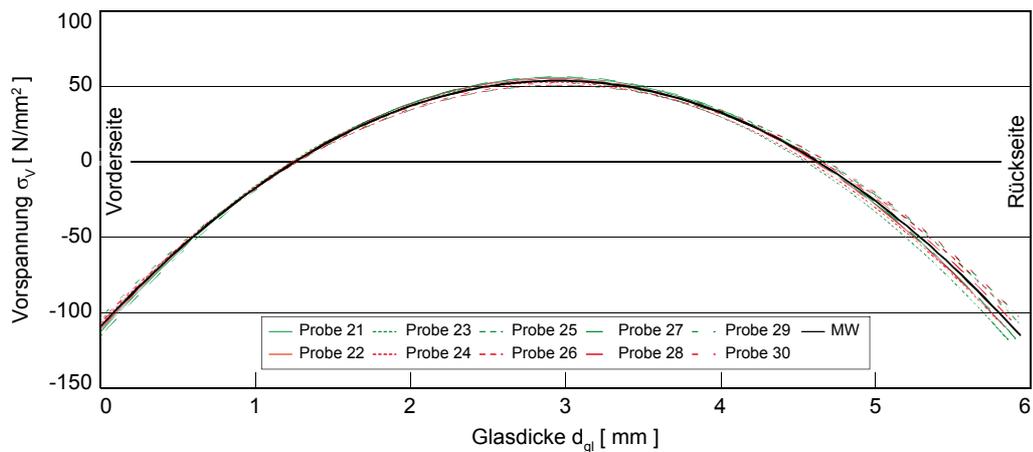
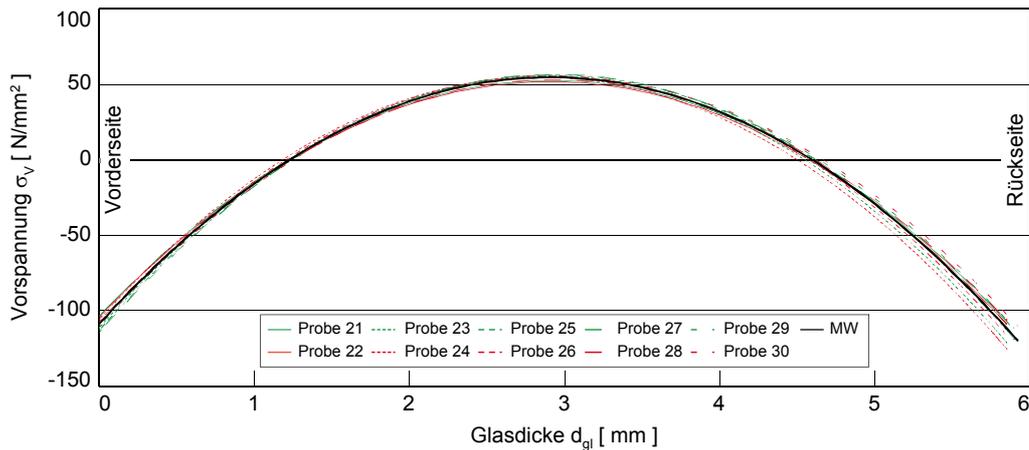


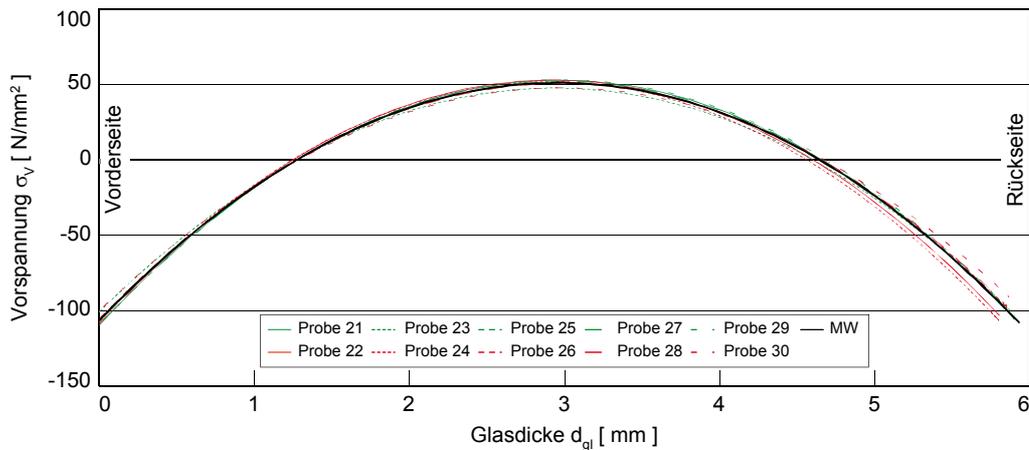
Bild A32 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

**A2.16 Serie 6-2-1 – Probengruppe 21 – 30 SD mit Trennmittel**

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
21	5,87	-103,13	53,00	-108,83	0,51	-109,32	52,79	-101,77	0,48
22	5,80	-104,23	51,76	-102,82	0,50	-108,37	52,88	-103,14	0,49
23	5,77	-111,37	55,73	-111,56	0,50	-100,77	47,55	-89,21	0,47
24	5,75	-105,69	54,81	-113,49	0,52	-107,15	51,82	-100,04	0,48
25	5,85	-112,92	56,34	-112,51	0,50	-105,54	50,90	-97,97	0,48
26	5,85	-108,16	55,80	-114,98	0,52	-105,59	50,84	-97,69	0,48
27	5,86	-114,30	56,68	-112,45	0,50	-106,91	52,25	-102,06	0,49
28	5,84	-107,00	53,17	-105,69	0,50	-105,75	50,54	-96,27	0,48
29	5,90	-109,88	55,38	-111,66	0,50	-109,44	53,19	-103,28	0,49
30	5,89	-109,75	54,93	-109,99	0,50	-100,07	47,74	-90,78	0,48



**Bild A33** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x



**Bild A34** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

## A2.17 Serie 6-2-3 – Probengruppe 1 – 10 DD

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
1	5,87	-109,62	53,92	-106,05	0,49	-118,42	57,56	-111,78	0,49
2	5,81	-113,62	57,19	-115,13	0,50	-106,27	52,23	-102,64	0,49
3	5,85	-102,74	50,32	-98,51	0,49	-116,89	57,16	-111,72	0,49
4	5,88	-109,54	54,78	-109,59	0,50	-114,19	57,07	-114,14	0,50
5	5,78	-107,32	54,36	-110,12	0,51	-112,31	55,85	-111,11	0,50
6	5,85	-112,25	56,69	-114,53	0,51	-106,80	50,74	-96,03	0,48
7	5,74	-102,11	51,66	-104,52	0,51	-105,95	53,00	-106,07	0,50
8	5,80	-107,01	54,05	-109,20	0,51	-113,04	56,04	-111,13	0,50
9	5,81	-115,07	57,33	-114,26	0,50	-107,14	53,18	-105,58	0,50
10	5,81	-104,63	53,60	-109,74	0,51	-107,55	52,15	-100,99	0,48

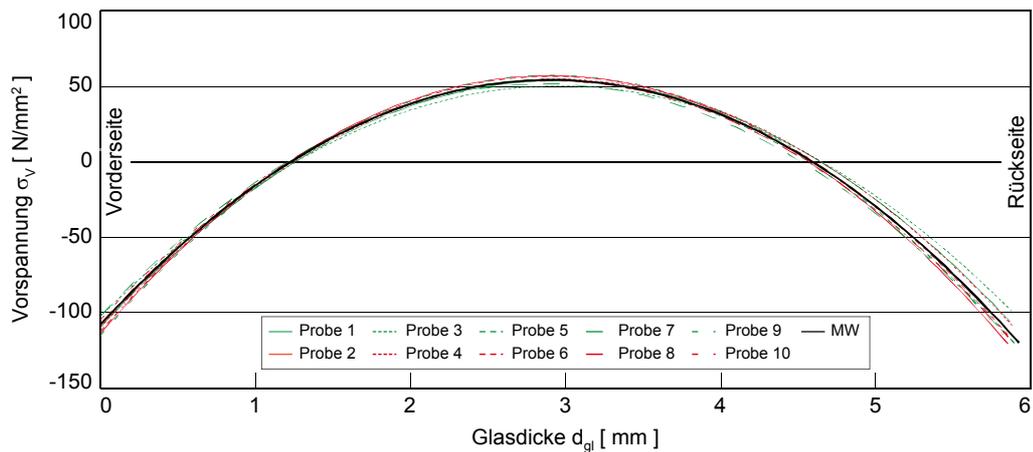


Bild A35 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x

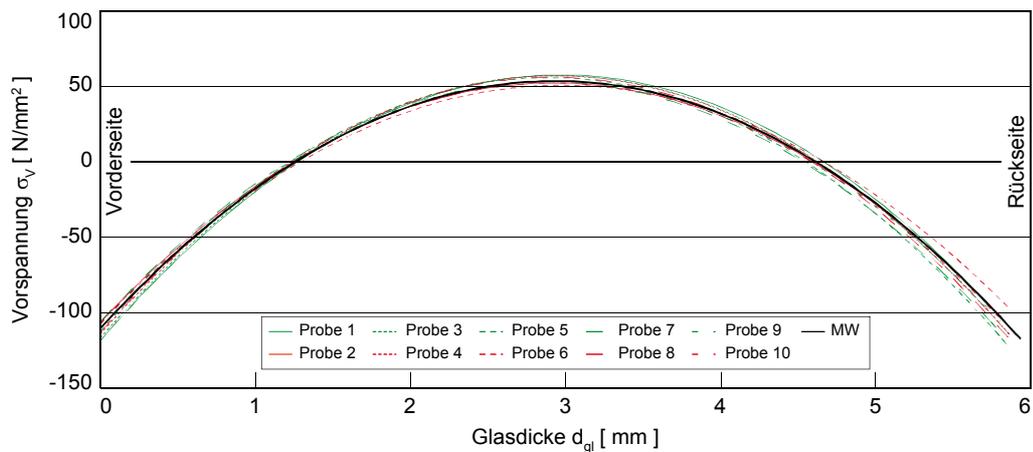
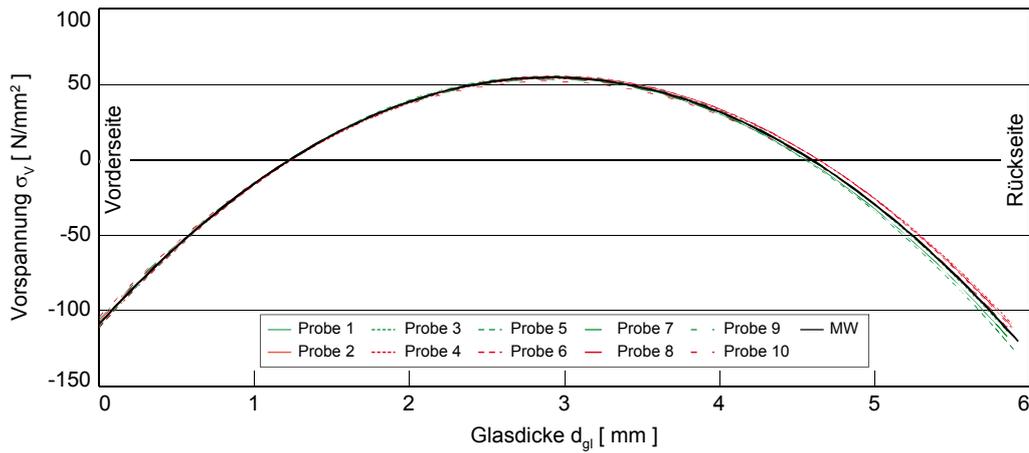


Bild A36 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

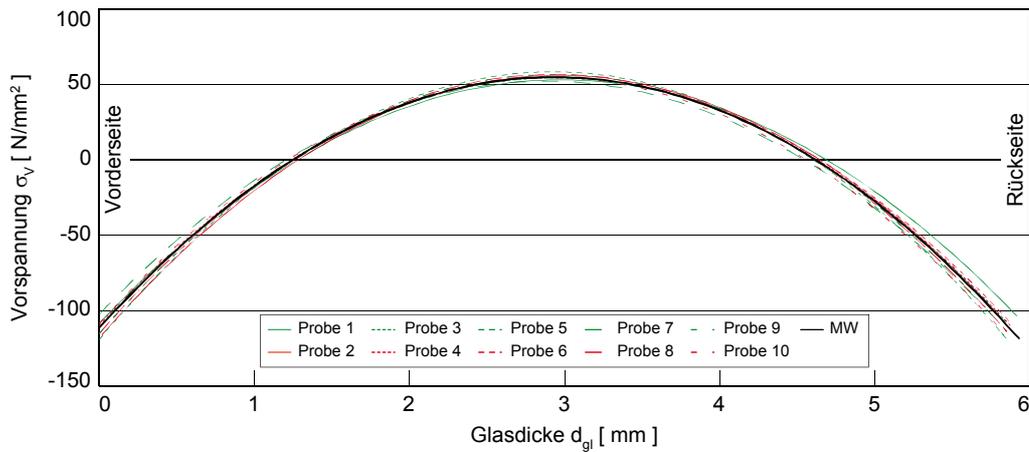
A30

**A2.18 Serie 6-2-3 – Probengruppe 1 – 10 DD mit Trennmittel**

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
1	5,91	-109,33	55,25	-111,66	0,51	-108,45	53,02	-103,63	0,49
2	5,80	-108,79	54,41	-108,88	0,50	-115,88	55,94	-107,79	0,48
3	5,83	-109,08	54,89	-110,49	0,50	-110,73	54,21	-106,10	0,49
4	5,88	-108,26	54,14	-108,31	0,50	-109,57	54,83	-109,77	0,50
5	5,79	-110,86	55,31	-110,41	0,50	-118,91	58,32	-114,37	0,49
6	5,88	-110,97	55,56	-111,29	0,50	-111,13	54,63	-107,36	0,49
7	5,80	-105,67	53,26	-107,36	0,50	-102,39	52,15	-106,22	0,51
8	5,83	-106,78	53,67	-107,89	0,50	-115,02	56,61	-111,43	0,49
9	5,84	-110,41	55,59	-111,97	0,50	-115,08	56,55	-111,11	0,49
10	5,80	-103,97	52,05	-104,24	0,50	-108,35	54,57	-109,94	0,50



**Bild A37** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x



**Bild A38** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

## A2.19 Serie 6-2-3 – Probengruppe 11 – 20 SD

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
11	5,80	-100,90	52,74	-109,95	0,52	-97,92	48,82	-97,36	0,50
12	5,85	-113,36	57,91	-118,26	0,51	-101,50	49,54	-96,60	0,49
13	5,90	-106,05	54,30	-111,11	0,51	-108,71	52,94	-102,99	0,49
14	5,85	-109,84	54,80	-109,38	0,50	-118,47	59,16	-118,19	0,50
15	5,87	-104,07	53,44	-109,64	0,51	-105,61	52,16	-103,03	0,49
16	5,87	-116,93	59,88	-122,58	0,51	-108,07	53,87	-107,43	0,50
17	5,89	-98,25	49,89	-101,31	0,51	-95,80	46,89	-91,75	0,49
18	5,89	-115,87	56,94	-111,88	0,49	-98,61	49,77	-100,50	0,50
19	5,88	-106,48	55,46	-115,26	0,52	-106,21	52,63	-104,29	0,50
20	5,85	-116,66	57,85	-114,76	0,50	-108,35	54,70	-110,45	0,50

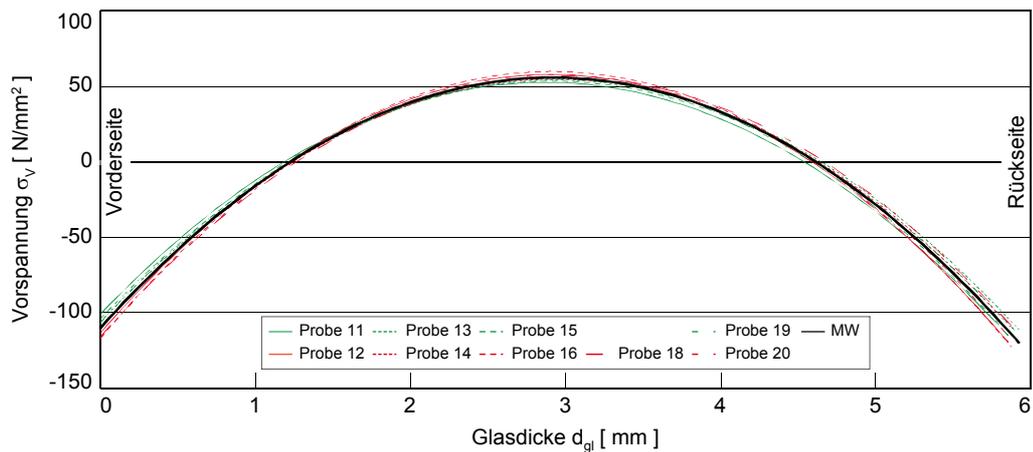


Bild A39 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x

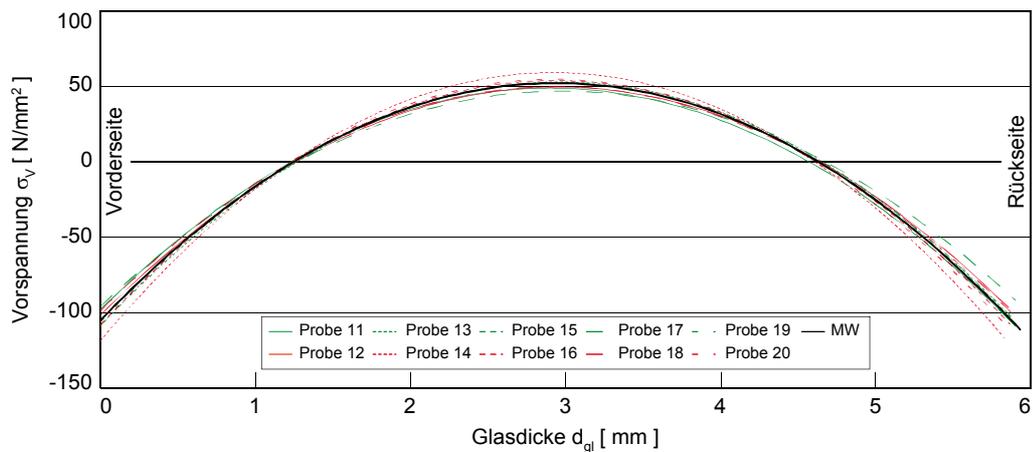
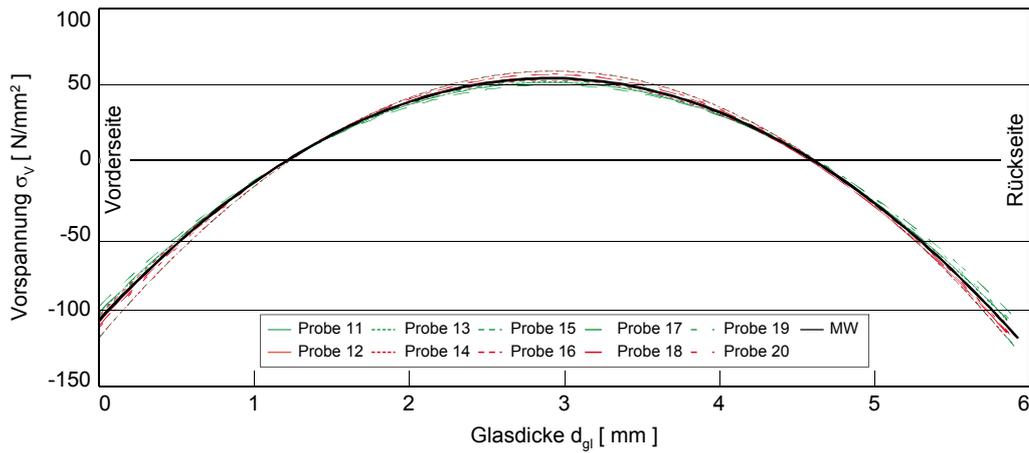


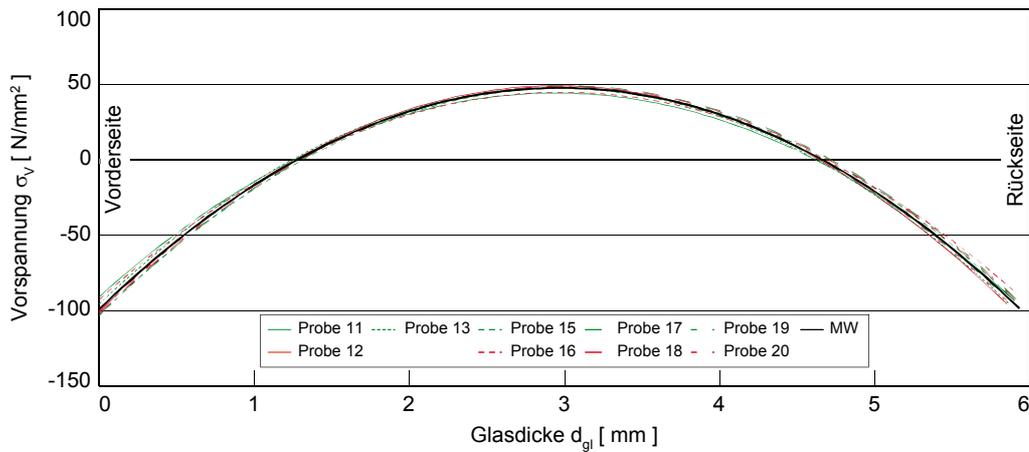
Bild A40 Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

**A2.20 Serie 6-2-3 – Probengruppe 11 – 20 SD mit Trennmittel**

Probe [ / ]	Dicke [ mm ]	x-Richtung				y-Richtung			
		$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$	$\sigma_{VS}$	$\sigma_{Mi}$	$\sigma_{RS}$	$\sigma_{Mi} / \sigma_{VS}$
11	5,83	-100,92	51,27	-104,15	0,51	-90,43	44,13	-86,07	0,49
12	5,83	-107,43	54,42	-110,25	0,51	-100,25	48,94	-95,46	0,49
13	5,86	-101,83	51,78	-105,28	0,51	-95,15	47,64	-95,43	0,50
14	5,86	-117,60	58,80	-117,67	0,50	-116,56	58,26	-116,51	0,50
15	5,85	-117,60	58,80	-117,67	0,50	-102,56	47,41	-86,65	0,46
16	5,86	-103,07	52,67	-107,59	0,51	-92,20	44,61	-86,22	0,48
17	5,90	-96,85	49,67	-101,79	0,51	-102,81	48,87	-92,49	0,48
18	5,89	-109,63	56,44	-116,08	0,51	-101,60	48,45	-92,03	0,48
19	5,85	-104,11	52,81	-107,18	0,51	-99,08	47,12	-89,22	0,48
20	5,87	-111,08	56,94	-116,64	0,51	-100,54	48,31	-92,59	0,48



**Bild A41** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung x



**Bild A42** Ausgewertete Eigenspannungsverläufe in Messrichtung y

### A3 Bruchversuche

Der statistischen Auswertung liegt eine Lognormal-Verteilung zu Grunde. Ausreißer werden entweder über den Bruchsprung außerhalb der Lastringfläche oder statistisch definiert. Mögliche statistische Ausreißer werden nach dem Dixon-Test gemäß DIN 53804-1 bestimmt. Alle statistischen und geometrischen ( $r > 50$  mm) Ausreißer sind grau markiert und aus der weiteren Auswertung entfernt. Dabei stellen die Ausreißerproben ohne eine Angabe von  $\sigma_{bB,Prüf}$  Proben mit einem Bruchsprung außerhalb der Lastringfläche dar, Proben mit Angabe dieses Wertes sind statistische Ausreißer. Die Lokalisierung des Bruchsprungs erfolgt nach Bild A43.

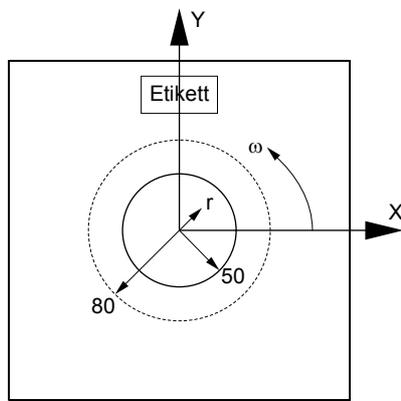


Bild A43 Lokalisierung des Bruchsprungs über  $r$  und  $\omega$

#### A3.1 Serie 6-0-0 – Probengruppe 1 – 10 ESG unbedruckt

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \omega$ [ mm ] / [ ° ]	
1	5,88	Keine Bedruckung vorhanden	25,83	218,09	44	287
2	5,86		24,33	206,80	8	2
3	5,86		23,17	196,94	18	120
4	5,83		26,86	230,48	44	240
5	5,91		21,04	176,16	20	222
6	5,84		27,91	238,69	44	45
7	5,83		29,09	250,23	40	76
8	5,89		27,25	229,32	32	257
9	5,85		27,99	238,74	40	102
10	5,86		22,34	189,73	44	240
MW	5,86		25,60	217,68	$d_{em}$ ohne Ausreißer: 0 $n = 10$ $t_{f,0,95} = 2,911$	
Stabw.	0,03		2,80	25,04		
Var.	<b>0,43 %</b>		<b>10,95 %</b>	<b>11,50 %</b>		
5%-Fraktile			<b>18,52</b>	<b>154,89</b>		

A34

### A3.2 Serie 6-1-1 – Probengruppe 1 – 10 DD

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \omega$ [ mm ] / [ ° ]	
1	5,79	231,60	19,35	168,49	25	294
2	5,86	234,20	20,49	174,45	44	85
3	5,89	235,70	20,05	168,58	32	63
4	5,85	233,80	20,15	172,15	48	232
5	5,83	233,00	20,63	177,49	30	90
6	5,81	232,20	20,41	176,84	45	268
7	5,87	234,70	18,67	158,33	43	268
8	5,81	232,30	19,45	168,32	32	8
9	5,81	232,50	18,38	158,83	48	201
10	5,85	233,90	19,50	166,44	23	108
MW	5,83		19,71	169,01	$d_{em} = 25 \mu\text{m}$ Ausreißer: 0 $n = 10$ $t_{f,0,95} = 2,911$	
Stabw.	0,03		0,78	6,71		
Var.	<b>0,55 %</b>		<b>3,95 %</b>	<b>3,97 %</b>		
5%-Fraktile			<b>17,56</b>	<b>150,45</b>		

### A3.3 Serie 6-1-1 – Probengruppe 11 – 20 SD

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \omega$ [ mm ] / [ ° ]	
11	5,91	236,20	15,53	130,03	42	288
12	5,83	233,10	14,42	123,95	48	334
13	5,92	236,70	16,43	136,93	48	57
14	5,87	234,60	15,48	131,40	34	251
15	5,92	236,70	15,87	132,29	25	296
16	5,80	231,80	15,22	132,28	45	225
17	5,87	234,60	15,22	129,15	17	318
18	5,83	233,00	15,44	132,79	27	191
19	5,80	231,80	15,58	135,44	32	142
20	5,87	234,70	15,53	131,69	38	299
MW	5,86		15,47	131,60	$d_{em} = 25 \mu\text{m}$ Ausreißer: 0 $n = 10$ $t_{f,0,95} = 2,911$	
Stabw.	0,05		0,51	3,57		
Var.	<b>0,79 %</b>		<b>3,30 %</b>	<b>2,71 %</b>		
5%-Fraktile			<b>14,05</b>	<b>121,56</b>		

**A3.4 Serie 6-1-2 – Probengruppe 1 – 10 DD**

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \varnothing$ [ mm ] / [ ° ]	
1	5,83	116,60	18,55	159,33	38	355
2	5,86	117,15	15,73	133,79	41	270
3	5,79	115,80	17,42	151,66	24	0
4	5,90	118,00	17,78	149,10	32	273
5	5,91	118,20	18,84	157,46	25	196
6	5,82	116,40	18,65	160,71	48	144
7	5,80	115,90	17,15	149,09	24	272
8	5,81	116,20	17,47	151,03	31	348
9	5,84	116,85	17,68	151,20	33	315
10	5,93	118,60	16,02	132,94	33	261
MW	5,85		17,53	149,67	$d_{em} = 50 \mu\text{m}$ Ausreißer: 0 $n = 10$ $t_{f,0,95} = 2,911$	
Stabw.	0,05		1,06	9,80		
Var.	<b>0,85 %</b>		<b>6,06 %</b>	<b>6,55 %</b>		
5%-Fraktile			<b>14,67</b>	<b>123,45</b>		

**A3.5 Serie 6-1-2 – Probengruppe 11 – 20 SD**

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \varnothing$ [ mm ] / [ ° ]	
11	5,88	117,65	14,05	118,56	32	221
12	5,93	118,60	13,26	110,07	39	188
13	5,82	116,35	12,99	112,07	30	42
14	5,85	116,95	13,60	116,09	38	202
15	5,92	118,45	13,52	112,55	34	122
16	5,82	116,35	12,63	108,95	42	328
17	5,94	118,70	13,41	111,10	45	220
18	5,93	118,60	13,33	110,68	35	197
19	5,93	118,65	14,11	116,99	15	37
20	5,94	118,75	14,52	120,21	33	87
MW	5,90		13,54	113,73	$d_{em} = 50 \mu\text{m}$ Ausreißer: 0 $n = 10$ $t_{f,0,95} = 2,911$	
Stabw.	0,05		0,56	3,89		
Var.	<b>0,85 %</b>		<b>4,12 %</b>	<b>3,42 %</b>		
5%-Fraktile			<b>12,00</b>	<b>102,89</b>		

A36

### A3.6 Serie 6-1-3 – Probengruppe 1 – 10 DD

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \omega$ [ mm ] / [ ° ]	
1	5,94		18,02		52	223
2	5,98	59,78	17,58	143,60	32	193
3	5,93	59,28	18,11	150,42	41	309
4	5,98	59,75	18,26	149,30	40	342
5	5,96	59,55	15,44	127,09	39	10
6	5,96	59,63	15,95	130,93	45	350
7	5,93	59,28	16,23	134,82	45	16
8	5,96	59,60	15,51	127,49	39	302
9	5,95	59,53	18,04	148,62	40	298
10	Nicht geprüft					
MW	5,95		16,89	139,08	$d_{em} = 100 \mu\text{m}$ Ausreißer: 1 $n = 8$ $t_{f;0,95} = 3,188$	
Stabw.	0,02		1,23	10,11		
Var.	<b>0,32 %</b>		<b>7,28 %</b>	<b>7,27 %</b>		
5%-Fraktile			<b>13,36</b>	<b>110,07</b>		

### A3.7 Serie 6-1-3 – Probengruppe 11 – 20 DD mit Trennmittel

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \omega$ [ mm ] / [ ° ]	
11	5,92	59,20	19,87	165,50	42	317
12	6,01	60,08	19,76	159,86	35	97
13	5,93	59,33	20,00	165,85	46	324
14	5,90	59,03	19,17	160,61	46	324
15	5,91	59,10	18,73	156,54	44	252
16	5,92	59,18	19,95	166,31	45	182
17	6,03	60,30	20,96	168,23	46	330
18	6,02	60,23	20,70	166,57	48	245
19	5,91	59,13	19,60	163,65	42	315
20	5,99		20,58		52	218
MW	5,95		19,86	163,69	$d_{em} = 100 \mu\text{m}$ Ausreißer: 1 $n = 9$ $t_{f;0,95} = 3,032$	
Stabw.	0,05		0,69	3,89		
Var.	<b>0,89 %</b>		<b>3,45 %</b>	<b>2,38 %</b>		
5%-Fraktile			<b>17,88</b>	<b>152,27</b>		

**A3.8 Serie 6-1-3 – Probengruppe 21 – 30 DD**

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \varnothing$ [ mm ] / [ ° ]	
21	6,00	60,03	19,68	159,44	20	81
22	5,96	59,63	19,68	161,62	46	14
23	5,90	58,98	18,30	153,60	23	105
24	5,95	59,50	18,57	153,14	23	138
25	5,93	59,25	17,53	145,74	46	164
26	5,90	59,03	16,74	140,27	43	85
27	5,96	59,60	17,64	144,99	21	193
28	5,92	59,18	17,77	148,09	45	145
29	5,93	59,33	18,45	153,01	43	148
30	6,00	60,00	17,83	144,53	38	154
MW	5,95		18,22	150,46	$d_{em} = 100 \mu\text{m}$ Ausreißer: 0 $n = 10$ $t_{f,0,95} = 2,911$	
Stabw.	0,04		0,93	6,85		
Var.	<b>0,62 %</b>		<b>5,09 %</b>	<b>4,56 %</b>		
5%-Fraktile			<b>15,69</b>	<b>131,65</b>		

**A3.9 Serie 6-1-3 – Probengruppe 31 – 40 SD mit Trennmittel**

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \varnothing$ [ mm ] / [ ° ]	
31	6,03	60,33	13,73	110,11	42	255
32	6,06		14,80		51	206
33	5,99	59,85	14,19	115,60	41	238
34	5,96	59,58	13,71	112,76	46	238
35	5,99	59,88	14,51	118,13	35	241
36	5,98	59,75	13,50	110,41	40	212
37	6,05	60,45	14,14	112,98	46	237
38	6,01	60,13	13,98	112,88	46	235
39	5,98	59,78	13,95	113,99	44	235
40	5,93	59,30	14,01	116,26	25	193
MW	6,00		13,97	113,68	$d_{em} = 100 \mu\text{m}$ Ausreißer: 1 $n = 9$ $t_{f,0,95} = 3,032$	
Stabw.	0,04		0,30	2,63		
Var.	<b>0,71 %</b>		<b>2,13 %</b>	<b>2,31 %</b>		
5%-Fraktile			<b>13,09</b>	<b>105,95</b>		

A38

**A3.10 Serie 6-1-3 – Probengruppe 41 – 50 SD**

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \omega$ [ mm ] / [ ° ]	
41	5,95	59,53	13,86	114,18	31	317
42	6,01	60,13	14,66	118,34	46	8
43	5,96		14,37		53	186
44	6,02	60,15	14,15	114,17	39	216
45	5,96		10,23		53	200
46	5,98	59,75	14,32	117,12	17	129
47	5,96	59,58	14,88	122,39	30	98
48	5,98	59,80	14,65	119,59	46	234
49	5,97	59,68	13,65	111,93	46	233
50	5,96	59,55	14,67	120,74	28	282
MW	5,98		14,36	117,32	$d_{em} = 100 \mu\text{m}$ Ausreißer: 2 $n = 8$ $t_{f,0,95} = 3,188$	
Stabw.	0,02		0,44	3,64		
Var.	<b>0,41 %</b>		<b>3,06 %</b>	<b>3,11 %</b>		
5%-Fraktile			<b>13,02</b>	<b>106,21</b>		

**A3.11 Serie 6-2-1 – Probengruppe 1 – 10 DD**

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \omega$ [ mm ] / [ ° ]	
1	5,97	238,90	25,75	210,72	42	94
2	5,98	239,00	18,57	151,84	48	320
3	5,94	237,70	22,56	186,48	41	309
4	Nicht geprüft					
5	5,94	237,60	16,73	138,41	50	282
6	5,95	237,90	14,97	123,54	38	295
7	5,96	238,50	24,13	198,12	37	271
8	5,95	237,90	22,18	183,03	49	43
9	5,98	239,20	22,75	185,70	42	340
10	5,95	237,90	23,88	197,06	40	294
MW	5,96		21,34	175,44	$d_{em} = 25 \mu\text{m}$ Ausreißer: 0 $n = 9$ $t_{f,0,95} = 3,032$	
Stabw.	0,02		3,98	32,39		
Var.	<b>0,26 %</b>		<b>18,64 %</b>	<b>18,46 %</b>		
5%-Fraktile			<b>11,98</b>	<b>99,02</b>		

### A3.12 Serie 6-2-1 – Probengruppe 11 – 20 DD mit Trennmittel

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \varnothing$ [ mm ] / [ ° ]	
11	5,91	59,10	20,34	169,96	42	350
12	5,96	59,58	19,13	157,36	44	153
13	5,97	59,68	23,63	193,70	22	315
14	5,93	59,25	18,69	155,41	34	209
15	5,90		20,01		52	256
16	5,92	59,20	18,44	153,57	40	358
17	5,91	59,05	20,22	169,27	38	5
18	5,91	59,08	19,34	161,74	18	237
19	5,92	59,23	20,84	173,44	33	352
20	5,92	59,23	19,60	163,07	38	333
MW	5,93		20,03	166,43	$d_{em} = 25 \mu\text{m}$ Ausreißer: 1 $n = 9$ $t_{f,0,95} = 3,032$	
Stabw.	0,02		1,50	11,92		
Var.	<b>0,37 %</b>		<b>7,48 %</b>	<b>7,16 %</b>		
5%-Fraktile			<b>15,93</b>	<b>133,64</b>		

### A3.13 Serie 6-2-1 – Probengruppe 21 – 30 SD

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \varnothing$ [ mm ] / [ ° ]	
21	5,90	236,00	14,88	124,77	33	243
22	5,86	234,40	14,49	123,19	42	320
23	5,82	232,60	13,72	118,45	28	321
24	5,82	232,60	13,58	117,19	44	247
25	5,92	236,80	15,39	128,15	14	209
26	5,89	235,70	14,86	124,90	33	279
27	5,90	235,90	14,78	124,06	22	244
28	5,92	236,60	15,22	126,96	42	348
29	5,94	237,40	15,56	128,93	42	256
30	5,92	236,70	14,83	123,64	24	275
MW	5,89		14,73	124,03	$d_{em} = 25 \mu\text{m}$ Ausreißer: 0 $n = 10$ $t_{f,0,95} = 2,911$	
Stabw.	0,04		0,66	3,83		
Var.	<b>0,73 %</b>		<b>4,49 %</b>	<b>3,09 %</b>		
5%-Fraktile			<b>12,91</b>	<b>113,31</b>		

A40

**A3.14 Serie 6-2-3 – Probengruppe 1 – 10 DD**

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \omega$ [ mm ] / [ ° ]	
1	5,95	59,45	15,46	127,68	43	329
2	5,86	58,55	15,75	134,11	43	284
3	5,90	59,00	16,90	141,74	37	270
4	5,93	59,25	17,59	146,23	50	231
5	5,83	58,25	17,51	150,68	31	146
6	5,94	59,35	17,66	146,33	24	298
7	5,82	58,23	16,74	144,14	31	231
8	5,85	58,53	17,22	146,78	38	303
9	5,89	58,85	17,76	149,66	45	298
10	5,86	58,58	16,64	141,59	27	0
MW	5,88		16,93	142,92	$d_{em} = 100 \mu\text{m}$ Ausreißer: 0 $n = 10$ $t_{f,0,95} = 2,911$	
Stabw.	0,04		0,81	7,34		
Var.	<b>0,76 %</b>		<b>4,81 %</b>	<b>5,13 %</b>		
5%-Fraktile			<b>14,70</b>	<b>122,93</b>		

**A3.15 Serie 6-2-3 – Probengruppe 11 – 20 SD**

Probe [ / ]	Dicke $d_{gl}$ [ mm ]	$d_{gl} / d_{em}$ [ / ]	$F_{Prüf}$ [ kN ]	$\sigma_{bB,Prüf}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Ursprung $r / \omega$ [ mm ] / [ ° ]	
11	5,91	59,08	10,55	88,28	37	283
12	5,91	59,05	11,88	99,48	41	145
13	5,95	59,53	11,71	96,50	42	216
14	5,95	59,50	12,08	99,57	44	178
15	5,96	59,58	11,18	91,96	42	292
16	5,95	59,53	11,01	90,74	45	239
17	5,95	59,48	11,01	90,88	46	215
18	5,95	59,45	11,59	95,75	28	252
19	5,95	59,45	10,70	88,35	42	304
20	5,95	59,45	11,23	92,74	38	254
MW	5,94		11,30	93,44	$d_{em} = 100 \mu\text{m}$ Ausreißer: 0 $n = 10$ $t_{f,0,95} = 2,911$	
Stabw.	0,02		0,51	4,17		
Var.	<b>0,31 %</b>		<b>4,47 %</b>	<b>4,46 %</b>		
5%-Fraktile			<b>9,91</b>	<b>81,98</b>		

## A4 Numerische Simulation

### A4.1 Thermische Parameter Glas

Es werden nur die thermischen Parameter aufgeführt, deren Temperaturverlaufsfunctionen aus Messergebnissen aus der Literatur bestimmt werden. Parameter, deren Funktionsverläufe direkt aus der Literatur entnommen werden können, sind bereits im Hauptteil der Arbeit aufgeführt.

#### Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_T$  werden die Werte aus Scholze 1988, Seite 171, Tabelle 21 verwendet. Die Werte stellen mittlere Ausdehnungskoeffizienten in verschiedenen Temperaturintervallen dar.

**Tafel 60** Berechnung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten mit Werten nach Scholze 1988

Intervall [ °C ]	$T_{MW}$ [ °C ]	$T_{MW}$ [ K ]	$\alpha_T$ [ 1/K ]	$\alpha_{T,berechnet}$ [ 1/K ]	Abweichung [ % ]
20 – 100	60	333,15	$8,90 \cdot 10^{-6}$	$8,88 \cdot 10^{-6}$	-0,23
20 – 200	110	383,15	$9,10 \cdot 10^{-6}$	$9,12 \cdot 10^{-6}$	0,21
20 – 300	160	433,15	$9,35 \cdot 10^{-6}$	$9,36 \cdot 10^{-6}$	0,10
20 – 400	210	483,15	$9,60 \cdot 10^{-6}$	$9,60 \cdot 10^{-6}$	-0,01
20 – 500	260	533,15	$9,85 \cdot 10^{-6}$	$9,84 \cdot 10^{-6}$	-0,11

Die Temperaturabhängigkeit folgt einem linearen Verlauf.

$$\alpha_{T,gl} = 0,0048 \cdot T + 7,28$$

Wegen der kontinuierlichen Zunahme von  $\alpha_{T,gl}$  auf den Wert von  $\alpha_{T,li}$  über ein begrenztes Temperaturintervall wird für diesen Übergangsbereich ein linearer Funktionsverlauf angenommen. Das Temperaturintervall wird durch die obere und untere Kühltemperatur begrenzt. Es gilt daher:

$T < T_{sp}$ : Funktion  $\alpha_{T,gl}$  nach **Tafel 10** der Hauptarbeit

$T_{sp} < T < T_{ap}$ : Funktion  $\alpha_{T,gl}$  als lineare Kopplung zwischen  $\alpha_{T,gl}$  und  $\alpha_{T,li}$

$T_{ap} < T$ : Funktion  $\alpha_{T,li} = 3 \cdot \alpha_{T,gl}$  nach **Tafel 10** der Hauptarbeit

$$\alpha_{T,gl} = \alpha_{T,gl}(T_{sp}) + \frac{T - T_{sp}}{T_{ap} - T_{sp}} \cdot [\alpha_{T,li}(T_{ap}) - \alpha_{T,gl}(T_{sp})]$$

Der Funktionsverlauf der Dichte basiert auf der thermischen Ausdehnung. Daher gelten die gleichen Randbedingungen. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 14 der Hauptarbeit. Die Werte für  $T_{ap}$  und  $T_{sp}$  sind **Tafel 7** der Hauptarbeit zu entnehmen.

**Spezifische Wärmekapazität**

Für die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  liegen Funktionen für den Bereich unterhalb und oberhalb  $T_g$  vor, allerdings ohne Eingrenzung, über welchen Temperaturbereich sich  $T_g$  erstreckt [Carré 1999]. Wegen der kontinuierlichen Zunahme von  $c_{p,gl}$  auf den Wert von  $c_{p,li}$  über ein begrenztes Temperaturintervall wird für diesen Übergangsbereich ein linearer Funktionsverlauf und kein Sprung angenommen. Das betreffende Temperaturintervall wird durch die obere und untere Kühltemperatur begrenzt. Es gilt daher:

$T < T_{sp}$ : Funktion  $c_{p,gl}$  nach Tafel 10 der Hauptarbeit

$T_{sp} < T < T_{ap}$ : Funktion  $c_{p,gl}$  als lineare Kopplung zwischen  $c_{p,gl}$  und  $c_{p,li}$

$T_{ap} < T$ : Funktion  $c_{p,li}$  nach Tafel 10 der Hauptarbeit

$$c_{p,gl} = c_{p,gl}(T_{sp}) + \frac{T - T_{sp}}{T_{ap} - T_{sp}} \cdot [c_{p,li}(T_{ap}) - c_{p,gl}(T_{sp})]$$

Die Werte für  $T_{ap}$  und  $T_{sp}$  sind Tafel 7 der Hauptarbeit zu entnehmen.

**Wärmetransport durch Strahlung**

Für den Wärmetransport durch Strahlung  $\lambda_{st}$  werden die Werte aus Blazek 1976, Seite 79, Glas 10 verwendet. Da nur vier Messwerte vorliegen, ist eine Extrapolation der Ausgleichskurve auf Raumtemperatur zu fehlerbehaftet. Daher werden weitere Stützstellen knapp oberhalb des absoluten Nullpunkts und bei 0 °C eingefügt. Strahlungsleitung findet am absoluten Nullpunkt statt nicht und besitzt bei Raumtemperatur nur sehr geringe Werte. Mit diesen zusätzlichen Stützstellen lässt sich eine sinnvolle Regressionsfunktion bilden.

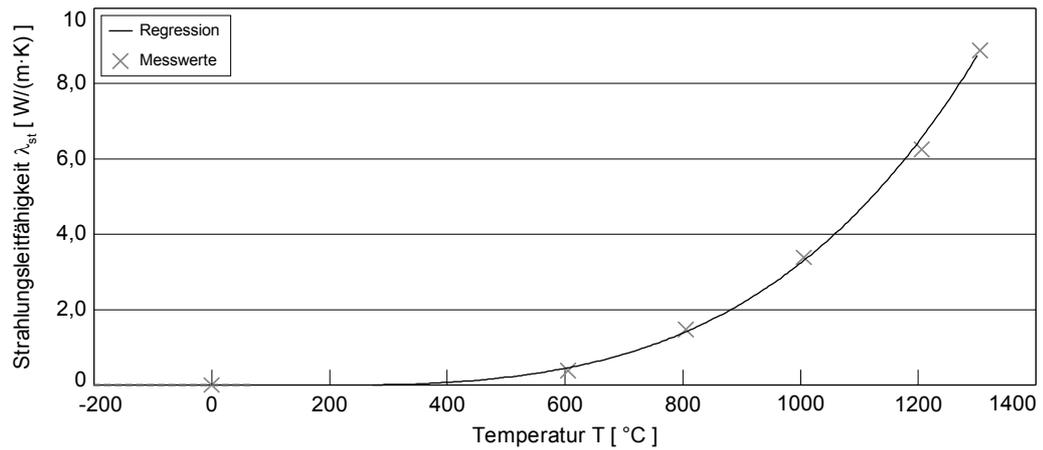
**Tafel 61** Berechnung der Strahlungsleitfähigkeit mit Werten nach Blazek 1976

T [ °C ]	T [ K ]	T [ 10 <sup>-3</sup> K ]	$\lambda_{st}$ [ cal/(s·cm·°C) ]	$\lambda_{st}$ [ W/(m·K) ]	$\lambda_{st,Regression}$ [ W/(m·K) ]
-273	0,1	0,0001		0,00	0,00
0	273	0,273		0,01	0,00
600	873	0,873	0,0140	0,33	0,43
800	1073	1,073	0,0600	1,43	1,37
1000	1273	1,273	0,1400	3,34	3,22
1200	1473	1,473	0,2600	6,21	6,44
1300	1573	1,573	0,3700	8,84	8,72

$$\lambda_{st} = 2,207 \cdot T^4 - 1,152 \cdot T^3 - 0,138 \cdot T^2 + 0,021 \cdot T$$

mit T in 10<sup>-3</sup> K

In dem Diagramm sind die Regressionskurve und die Einzelwerte zur Strahlungsleitfähigkeit dargestellt. Die Anpassung ist mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,9987$  ausreichend genau, da die Strahlungsleitfähigkeit additiv der Wärmeleitfähigkeit zugeordnet wird. Der relative Fehler zwischen Einzelwert und Regression wirkt sich daher geringfügiger aus.



**Bild A44** Werte der Strahlungsleitfähigkeit nach Blazek 1976 mit zugehöriger Regression

A44

#### A4.2 Thermische Parameter Emaille

Die thermischen Parameter für die Emaille liegen nur als Einzahlwerte und nicht als Funktionen vor. Wegen der Strukturgleichheit von Glas und Glasfluss werden die gleichen Funktionen vom Glas auf die Emaille übertragen. Eine Anpassung auf die Emaille erfolgt über eine Skalierung der gegebenen Einzelwerte.

##### Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Der mittlere thermische Ausdehnungskoeffizient ist mit  $\alpha_{T,em,50-300} = 8,0 \cdot 10^{-6}$  1/K bis  $9,5 \cdot 10^{-6}$  1/K angegeben. Der äquivalente Wert für Glas liegt bei  $\alpha_{T,gl,50-300} = 9,43 \cdot 10^{-6}$  1/K. Der obere Grenzwert der Emaille deckt sich mit diesem Wert, einzig für den unteren Grenzwert wird die Anpassung vorgenommen. Unter Annahme der gleichen Steigung ergibt sich für die Emaille

$$\alpha_{T,em,gl} = 0,0048 \cdot T + 7,28 - 1,43 = 0,0048 \cdot T + 5,85.$$

##### Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität ist mit  $c_p = 800$  J/(kg·K) bis  $1000$  J/(kg·K) angegeben. Der äquivalente Wert beim Glas liegt bei  $c_{p,gl} = 1010$  J/(kg·K). Der obere Grenzwert der Emaille deckt sich mit diesem Wert, einzig für den unteren Grenzwert wird die Anpassung vorgenommen. Unter Annahme der gleichen Steigung ergibt sich unterhalb  $T_{sp}$

$$c_{p,em,gl} = 893 + 0,4 \cdot T - 1,8 \cdot 10^{-7} / T^2 - 210 = 683 + 0,4 \cdot T - 1,8 \cdot 10^{-7} / T^2.$$

Und oberhalb von  $T_{ap}$

$$c_{p,em,l} = 1433 + 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot T - 210 = 1223 + 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot T$$

Im Übergangsbereich wird analog des Vorgehens beim Glas linear interpoliert.

##### Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist mit  $\lambda_{le,em} = 0,8$  W/(m·K) bis  $1,0$  W/(m·K) angegeben. Der äquivalente Wert beim Glas liegt bei  $\lambda_{le,gl} = 0,99$  W/(m·K). Der obere Grenzwert der Emaille deckt sich mit diesem Wert, einzig für den unteren Grenzwert wird die Anpassung vorgenommen. Unter Annahme der gleichen Steigung ergibt sich

$$\lambda_{le,em} = 0,741 + 8,58 \cdot 10^4 \cdot T - 0,19 = 0,548 + 8,58 \cdot 10^4 \cdot T.$$

Strahlung tritt wegen der Opazität nicht oder nur in einem sehr geringen Maße auf.

### A4.3 Wärmeübergangskoeffizient

Die Wärmeübergangszahl setzt sich aus den Einzelanteilen des konvektiven Wärmeübergangs und der Wärmestrahlung zusammen.

#### Allgemeine Parameter – Temperaturen und Strahlung

$T_0$	Aufheiztemperatur [ K ]	$T_0$	= 923 K
$T_L$	Temperatur der angeblasenen Luft [ K ]	$T_L$	= 303 K
$T_M$	gemittelte Temperatur [ K ]	$T_M$	= 613 K
$\sigma_S$	Stefan-Boltzmann-Konstante [ $W/(m^2 \cdot K^4)$ ]	$\sigma_S$	= $5,78 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$

#### Allgemeine Parameter – Kennwerte der angeblasenen Luft bei $T_M = 613$ K

$\lambda_L$	Wärmeleitfähigkeit Luft [ $W/(m \cdot K)$ ]	$\lambda_L$	= $4,64 \cdot 10^{-2} W/(m \cdot K)$
$\nu_L$	kinematische Viskosität der Luft [ $m^2/s$ ]	$\nu_L$	= $5,47 \cdot 10^{-5} m^2/s$
$\rho_L$	Dichte der Luft [ $m^2/s$ ]	$\rho_L$	= $0,57 kg/m^3$
$a_L$	Temperaturleitfähigkeit [ $m^2/s$ ]	$a_L$	= $7,71 \cdot 10^{-5} m^2/s$
$w_L$	Luftgeschwindigkeit [ m/s ]	$w_L$	= 50,60 m/s

#### Allgemeine Parameter – Geometrie

H	Düsenabstand [ m ]	H	= 0,025 m
$D_{opt}$	optimaler Düsendurchmesser [ m ] = $H/5$	$D_{opt}$	= 0,005 m
$L_{T,opt}$	optimaler Düsenabstand [ m ] = $7 \cdot D_{opt}$	$L_{T,opt}$	= 0,035 m
$d^*$	Hilfsgröße [ / ] = $0,8862 \cdot D_{opt} / L_{T,opt}$	$d^*$	= 0,1266
$F_{12}$	Sichtfaktor für Strahlung [ / ]	$F_{12}$	= 1,0

$$G = \frac{d^* \cdot (1 - 2,2 \cdot d^*)}{1 + 0,2 \cdot (h^* - 6) \cdot d^*} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{10 \cdot h^* \cdot d^*}{6} \right)^6 \right]^{-0,05} \quad G = 0,0897$$

#### Konvektiver Übergang

$$\alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda_L}{D_{opt}} = \frac{21,57 \cdot 4,64 \cdot 10^{-2}}{0,005} \quad \alpha_K = 200,32 W/(m^2 \cdot K)$$

$$Nu = G \cdot Re^{2/3} \cdot Pr^{0,42} \quad \text{Nusselt-Zahl [ / ]} \quad Nu = 21,57$$

$$Re = \frac{w_L \cdot D_{opt}}{\nu_L} \quad \text{Reynolds-Zahl [ / ]} \quad Re = 4623$$

$$Pr = \frac{\nu_L}{a_L} = 0,71 \quad \text{Prandtl-Zahl [ / ]} \quad Pr = 0,71$$

#### Übergang durch Strahlung

$$\alpha_S = 4 \cdot F_{12} \cdot \sigma_S \cdot T_0^3 \quad \alpha_S = 181,64 W/(m^2 \cdot K)$$

A46

#### A4.4 Thermische Parameter – Prüfung der Implementierung in Ansys

Die Eingabe der temperaturabhängigen Materialeigenschaften wird mit Darstellungen der Temperatur-Eigenschaftsdiagramme aus Ansys überprüft. Die Diagramme für die Emaille sind analog, nur anders skaliert beziehungsweise Wärmeleitung ohne Anteil der Strahlung.

##### Thermischer Ausdehnungskoeffizient

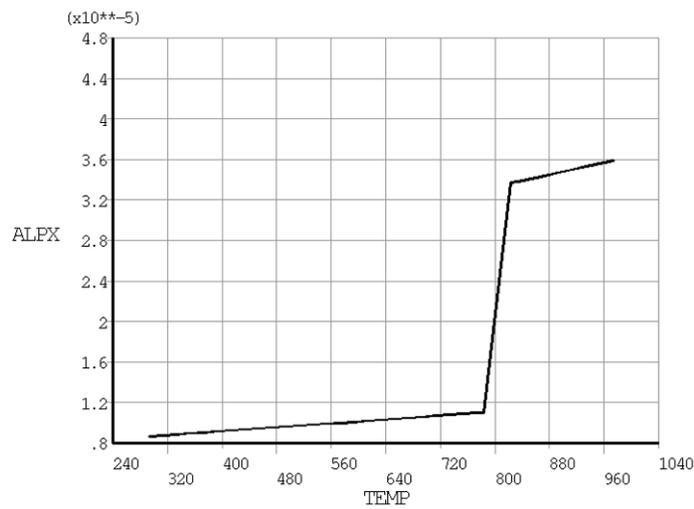


Bild A45 Thermischer Ausdehnungskoeffizient in Ansys

##### Dichte

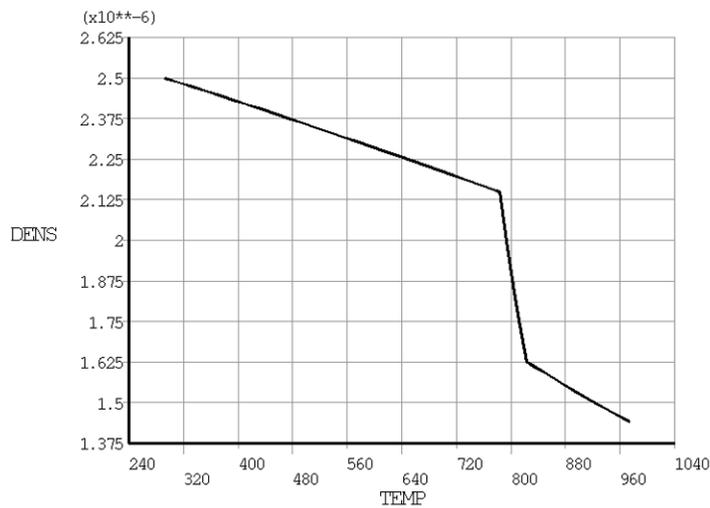
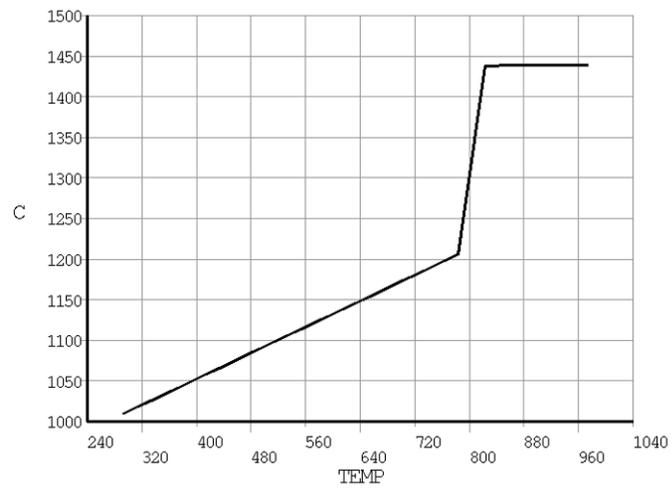
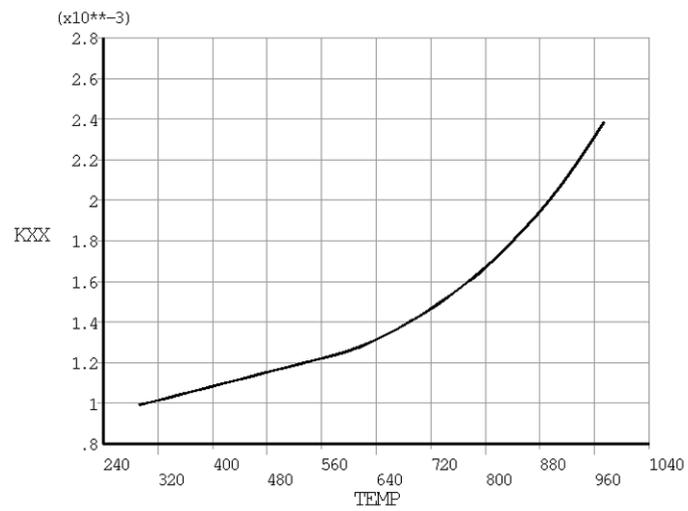


Bild A46 Dichte in Ansys

**Spezifische Wärmekapazität****Bild A47** Spezifische Wärmekapazität in Ansys**Wärmeleitfähigkeit****Bild A48** Wärmeleitfähigkeit in Ansys