TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Institut für Statik und Konstruktion

Institute of Structural Mechanics and Design (ISM+D)

Abschlussbericht

HOLTGLA – Holes in Tempered Glass
Reduzierung der in der DIN EN 12150-1 begrenzten Mindestabstände von Bohrungen in Einscheiben-Sicherheits-Glas (ESG)

Auftraggeber: Bundesverband Flachglas e.V.
Mülheimer Straße 1
53840 Troisdorf

Dieser Bericht umfasst 48 Seiten.

Die Veröffentlichung des vorliegenden Dokuments, auch auszugsweise, sowie die Verwendung
für Werbungszwecke bedarf der Genehmigung des Fachgebietes

Institut für Statik und Konstruktion

Franziska-Braun-Str. 3 64287 Darmstadt Telefon: 06151.16 23013 Telefax: 06151.16 23010

Bearbeiter: Technische Universität Darmstadt	
Vorhabenbezeichnung: HOLTGLA – Holes in Tempered Glass Reduzierung der in der DIN EN 12150-1 begrenzten Mindestabstände von Bohrungen in Einscheiben-Sicherheits-Glas (ESG)	
Projektpartner: Institut für Statik und Konstruktion der Technischen Universität Darmstadt (Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider) DTU Kopenhagen – Technical University of Danmark (Dr. Jens Nielsen) Bundesverband Flachglas e.V.	
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2014 – 31.07.2015 (Projektlaufzeit – 7 Monate)	

Inhalt

1. Einleitung 4
1.1. Forschungsvorhaben 4
1.2. Motivation 4
2. Thermisches Vorspannen von Glas – Theoretische Grundlagen 5
2.1. Materialverhalten von Glas 5
2.2. Thermisch vorgespanntes Glas 5
2.3. Ablauf des Vorspannprozesses 7
3. Begrenzung der Mindestabstände nach DIN EN 12150-1 10
4. Ziel und Umfang der Untersuchungen 11
4.1. Reduzierung der Mindestabstände a und b 11
4.2. Mindestabstand – Bohrungen zueinander und im Kantenbereich 12
4.3. Mindestabstand – Bohrung im Eckbereich 13
4.4. Gliederung und Aufteilung der Untersuchungen 13
5. Wärmeübergangskoeffizient h – unendlich ausgedehnte Kreisscheibe 15
5.1. Vorgehensweise 15
5.1.1. FE-Modell 15
5.1.2. FEM – Eingabeparameter 18
5.2. Temperaturberechnung 20
5.3. Spannungsberechnung – Wärmeübergangskoeffizient 23
6. Spannungsberechnung – Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich 26
6.1. FE-Modell 26
6.2. Spannungen im Bohrungsbereich – minimaler Loch- und Randabstand 27
6.3. Simulationsserien 30
6.4. Ergebnisse 31
7. Spannungsberechnung – Bohrung im Eckbereich 38
7.1. Vorgehensweise 38
7.2. Ergebnisse 39
8. Zusammenfassung und Ausblick 43
9. Literaturverzeichnis 48

1. Einleitung

1.1. Forschungsvorhaben

Das Forschungsvorhaben „HOLTGLA – Holes in Tempered Glass“ wurde durch den Bundesverband Flachglas e.V. in Auftrag gegeben. Projektleiter des Forschungsvorhabens ist Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider vom *Institut für Statik und Konstruktion* (ISMD) der Technischen Universität Darmstadt. Das Projekt wurde in Kooperation mit der *DTU Kopenhagen – Technical University of Danmark* (Dr. Jens Nielsen) aus Dänemark bearbeitet. Das Projekt begann im Januar 2014. Die Laufzeit des Projekts betrug 7 Monate.

1.2. Motivation

In diesem Forschungsvorhaben werden durch die numerische Simulation des thermischen Vorspannprozesses die lokalen Spannungen, die sich nach dem thermischen Vorspannprozess im Bohrungsbereich eines Einscheiben-Sicherheits-Glases (ESG) einstellen, untersucht. Hierbei ist die Motivation die Untersuchung des Einflusses der Reduzierung des in der DIN EN 12150-1 begrenzten Mindestabstände der Bohrungen.

Um Aussagen über die Mindestabstände der Bohrungen treffen zu können, werden Spannungen im Bohrungsbereich für unterschiedliche Glasdicken, Bohrungsdurchmesser sowie geringere Mindestabstände der Bohrungen zueinander und zur Glaskante gegenüber der Vorgaben der DIN EN 12150-1, ermittelt und bewertet.

2. Thermisches Vorspannen von Glas – Theoretische Grundlagen

2.1. Materialverhalten von Glas

Der Werkstoff Glas weist ein temperaturabhängiges Materialverhalten auf. Hierbei wird zwischen Glas als Festkörper mit einem näherungsweise linear-elastischen Materialverhalten und Glas als Schmelze mit einem rein viskosen Materialverhalten unterschieden. Der Übergang zwischen festem und flüssigem Aggregatzustand ist nicht sprunghaft wie bei der Entstehung eines kristallinen Produkts, sondern kontinuierlich. Der Übergangsbereich wird als *Transformationsbereich* oder *Glasübergang* bezeichnet (s. Abbildung 2.1). In diesem Übergangsbereich „vermischen“ sich beide Materialverhalten und lassen sich durch ein *visko-elastisches* Materialverhalten beschreiben. Der Transformationsbereich wird mit der *Transformationstemperatur* T_g identifiziert. Diese Temperatur hängt von der chemischen Zusammensetzung des Glases ab und liegt für das im Bauwesen überwiegend eingesetzte Kalk-Natron-Silikatglas bei ca. 530°C.

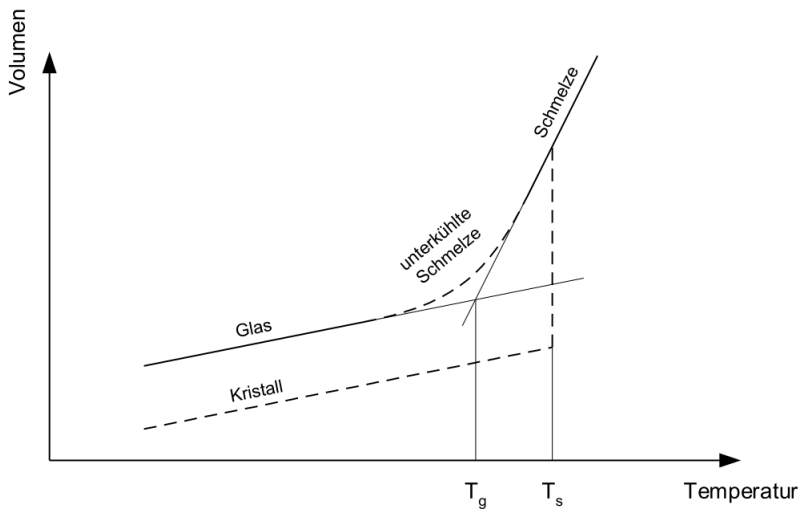


Abbildung 2.1 Schematische Darstellung der Temperaturabhängigkeit des Volumens von Glas [1]

Visko-elastisches Materialverhalten bedeutet, dass eine aufgebrachte Spannung eine zeitabhängige Dehnung und umgekehrt eine aufgebrachte Dehnung einen zeitabhängigen Spannungsverlauf zur Folge hat. Wird Glas im Übergangsbereich einer Temperaturänderung ausgesetzt, tritt zusätzlich eine zeitabhängige Veränderung der physikalischen Eigenschaften ein (z.B. Wärmeausdehnungskoeffizient, Volumen, Viskosität), die durch Strukturrelaxation hervorgerufen wird [2].

2.2. Thermisch vorgespanntes Glas

Die Zeit- und Temperaturabhängigkeit des visko-elastischen Materialverhaltens von Gläsern im Transformationsbereich wird genutzt, um diese thermisch vorzuspannen. Die Höhe der Oberflä-

chendruckspannung hängt dabei im Wesentlichen von der Abkühlgeschwindigkeit und damit von dem Wärmeübergangskoeffizient zwischen Glas und dem abkühlendem Medium ab.

Der durch den Vorspannprozess eingeprägte Eigenspannungszustand entspricht in seinem Verlauf näherungsweise einer einfachen Parabel mit der Form (s. Abbildung 2.2):

$\sigma = \sigma_0 \cdot (1 - 3 \cdot \zeta^2)$ mit $\zeta = \frac{2 \cdot z}{d}$

Nach dem Vorspannen kann das Glas aufgrund der im Eigenspannungszustand gespeicherten Energie nur sehr bedingt bearbeitet werden. Deshalb müssen Kantenbearbeitungen, Bohrungen oder Ausschnitte im Wesentlichen vor der dem Vorspannprozess vorgenommen werden.

Durch den Prozess kann voll vorgespanntes Glas (Einscheiben-Sicherheitsglas, ESG) oder teilvorgespanntes Glas (TVG) hergestellt werden. Dabei beträgt der übliche Grad der Oberflächendruckspannung σ_v bei kommerziellen Gläsern für ESG 90-140 MPa und für TVG 40-60 MPa.

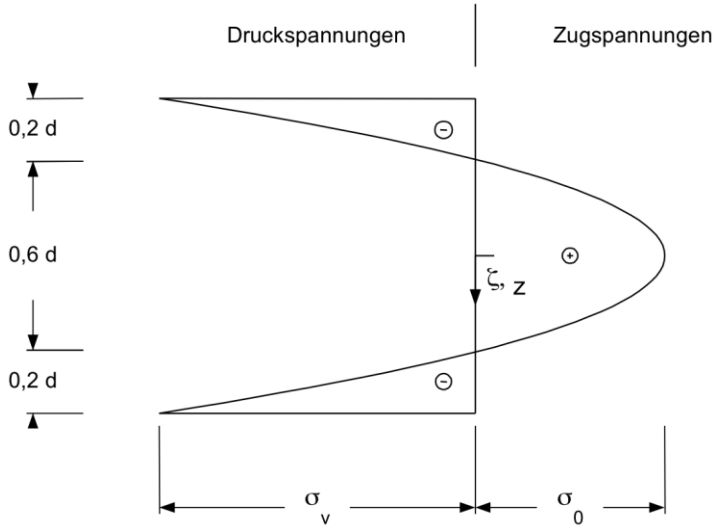


Abbildung 2.2 Spannungsverlauf bei thermisch vorgespanntem Glas

Durch die Oberflächendruckspannung werden bei einer Biegebeanspruchung die festigkeitsmindernden Oberflächendefekte erst nach Überwindung der Druckspannung wirksam (Abbildung 2.3). Die an der Glasoberfläche vorhandenen Mikrorisse werden durch die aus der Vorspannung vorhandene Oberflächendruckspannung zusammengedrückt.

Dadurch wird ein Festigkeitszuwachs gegenüber dem nicht vorgespannten Floatglas erzielt. In der folgenden Abbildung ist der Spannungszustand bei biegebeanspruchtem thermisch vorgespanntem Glas dargestellt.

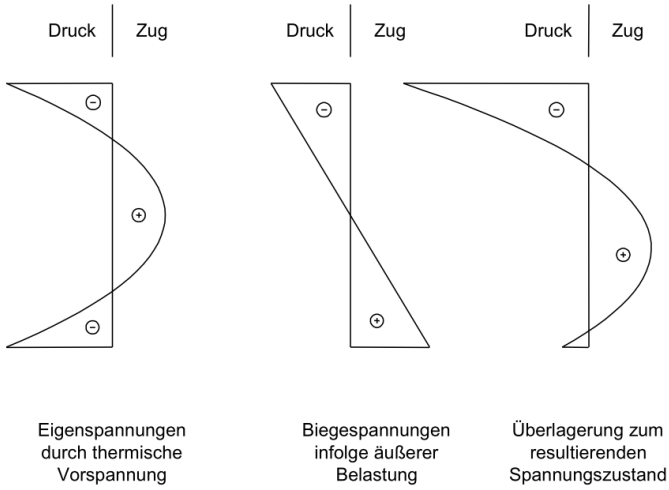


Abbildung 2.3 Spannungszustand bei biegebeanspruchtem thermisch vorgespanntem Glas

2.3. Ablauf des Vorspannprozesses

Zunächst wird das gereinigte Glas homogen, d.h. über den Querschnitt konstant auf eine Temperatur T_0 erwärmt, die etwa 100°C über der Transformationstemperatur T_g liegt, d.h. 620°C bis 680°C. Dies geschieht in einem Konvektions- oder Strahlungsofen bzw. in einer Kombination beider. Anschließend wird die Glasscheibe von den Oberflächen her rasch abgekühlt. Die Abkühlung kann dabei durch Anblasen mit Luft, durch Tauchen in eine Flüssigkeit oder durch Kontaktkühlung erfolgen (Abbildung 2.4). Bei thermisch vorgespannten Scheiben im Bauwesen wird fast immer mit Luft gekühlt.

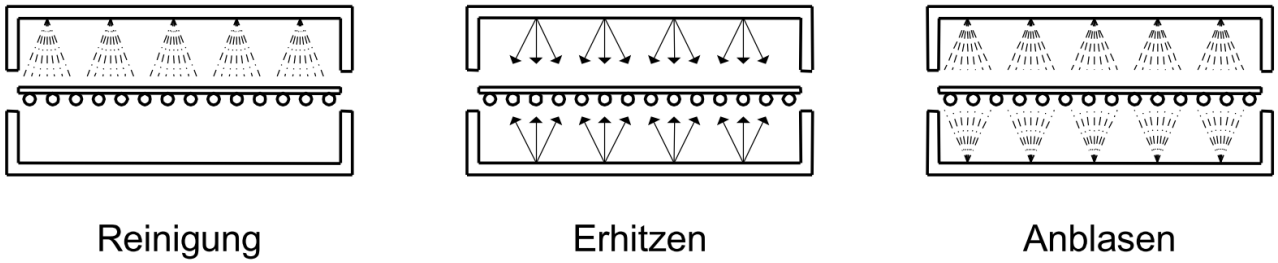


Abbildung 2.4 Herstellung von thermisch vorgespanntem Glas

Zur Berechnung des innerhalb der Scheibe entstehenden Temperaturfeldes in Abhängigkeit der Zeit benötigt man neben der Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur des Körpers und des Kühlmediums (z.B. anströmende Luft), Aufheiztemperatur T_0, Dichte ρ, spezifische Wärmekapazität $c_{p,g}$, Wärmeleitfähigkeit λ sowie den Wärmeübergangskoeffizient h zwischen Glasoberfläche und Kühlmedium. Letzterer hat entscheidenden Einfluss auf die Höhe der entstehenden Spannungen, ist aber für technische Abkühlprozesse experimentell schwer zu bestimmen [3].

Zu Beginn des Abkühlprozesses ist die Spannung über den gesamten Querschnitt konstant. Dann beginnt die Abkühlung der Oberflächenbereiche, welche sich zusammenziehen wollen. Dieses wird durch den noch nicht abgekühlten Kern verhindert. Es entsteht, wie bei einem elastischem Körper erwartet, auf der Oberfläche kurzfristig eine Zugspannung und im Kern eine entsprechende Druckspannung. Die Spannungen erreichen zu diesem Zeitpunkt jedoch nur geringe Werte, da sie durch die niedrige Viskosität bei der vorherrschenden hohen Ausgangstemperatur schnell wieder relaxieren. In der Endphase der Abkühlung, d.h. wenn die Oberflächentemperatur die Transformationstemperatur unterschritten hat, und die Spannungsrelaxation daher vernachlässigbar klein wird (die Oberfläche erstarrt), hat das Glas an der Oberfläche näherungsweise die Eigenschaften eines elastischen Festkörpers. Die Temperaturverteilung ist in etwa parabelförmig (der Kern ist wärmer als die Oberfläche). Um den Endzustand zu erreichen ($\Delta T = 0$), muss sich der Kern um einen größeren Betrag abkühlen als die bereits erstarrte Oberfläche. Dabei zieht sich der Kern zusammen und erzeugt Druckspannungen an der Oberfläche. Im Kern selbst entstehen aus Gleichgewichtsgründen Zugspannungen.

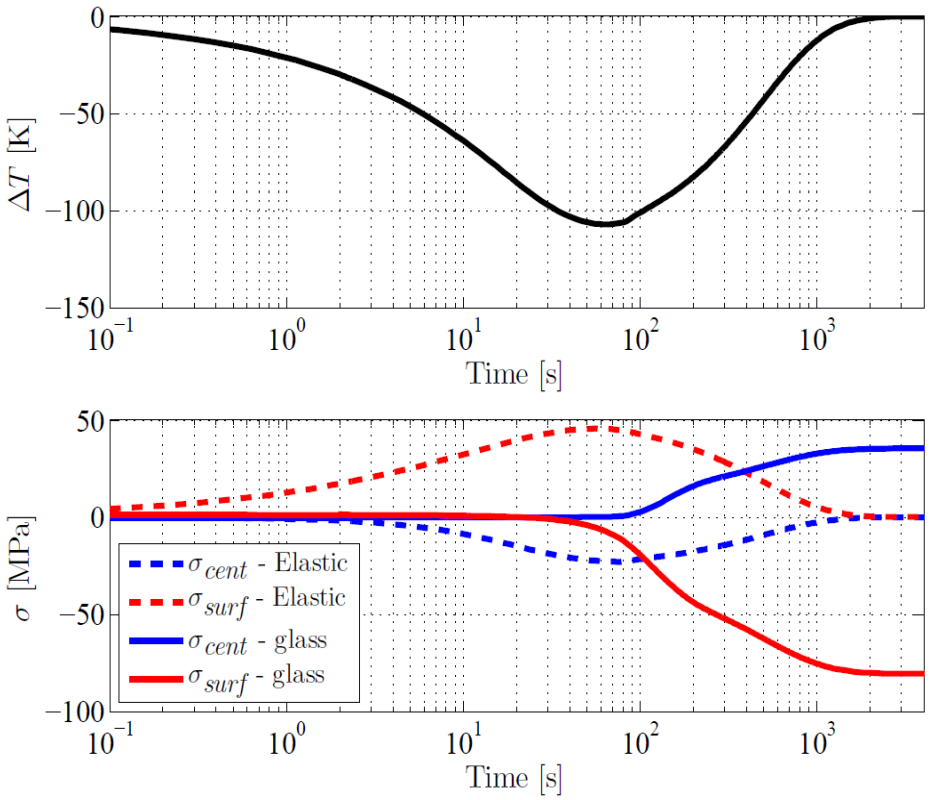


Abbildung 2.5: Prozess der Temperaturdifferenz zwischen Kern und Oberfläche während des Vorspannprozesses und die Entwicklung der Spannungen in einem elastischen Körper und im Glas (Dicke d=19mm) [4]

Die Größe der endgültigen Druckspannungen hängt hauptsächlich davon ab, wie groß die Temperaturdifferenz ΔT zwischen Kern und Oberfläche in der elastischen Phase, d.h. in der „Spannungsab-

bauphase“ ist. Je größer die Differenz, desto größer auch das Bestreben des Kerns, sich relativ zur Oberfläche zusammenzuziehen.

In der folgenden Abbildung ist die Entwicklung der Spannung im Querschnitt einer unendlichen Scheibe während des Abkühlprozesses über die Zeit für ein elastisches Material im Vergleich zum Glas dargestellt.

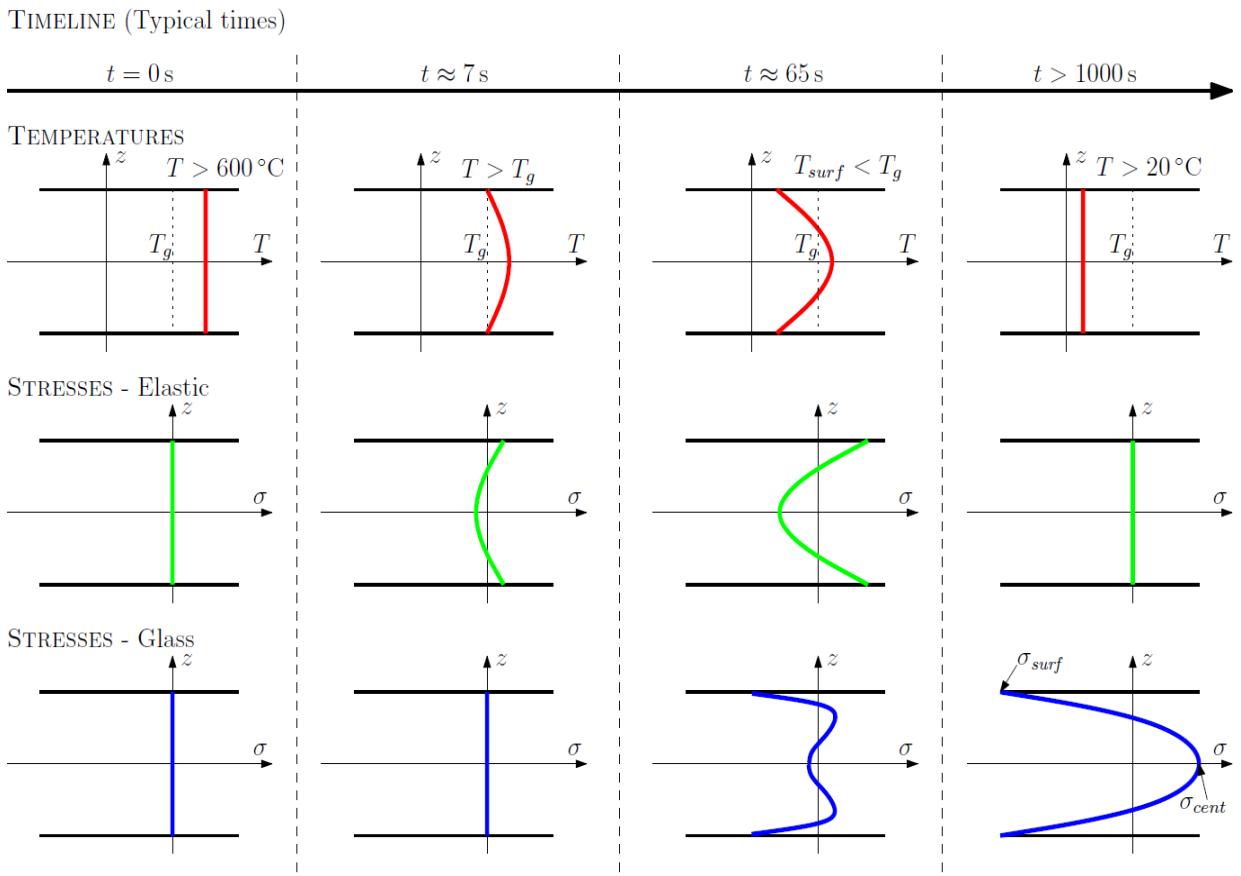


Abbildung 2.6: Temperaturentwicklung während des Abkühlprozesses in einer unendlichen Scheibe für ein elastisches Material und für Glas [4]

Wenn die Starttemperatur zu klein gewählt wird (z.B. < 550°C) dann verhält sich eine Glasscheibe wie ein elastischer Körper und es entstehen bei dem Abkühlprozess zunächst hohe Zugspannungen an der Oberfläche, aber keine eingeprägten Spannungen.

3. Begrenzung der Mindestabstände nach DIN EN 12150-1

In der DIN EN 12150-1 wird die Lage der Bohrungen bzw. deren Mindestabstände im thermisch vorgespannten Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas mit einer Nenndicke von mindestens 4 mm, wie in den folgenden Abbildungen dargestellt, begrenzt. Dabei ist d die Nenndicke des Glases.

a) der Abstand, a, von der Kante einer Bohrung zur Glaskante sollte mindestens 2 d betragen.

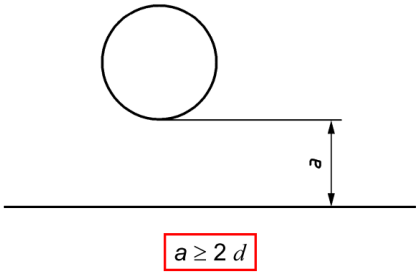


Abbildung 3.1 Beziehung zwischen Bohrung und Scheibenkante

b) Der Abstand, b, zwischen den Kanten zweier Bohrungen sollte mindestens 2 d betragen.

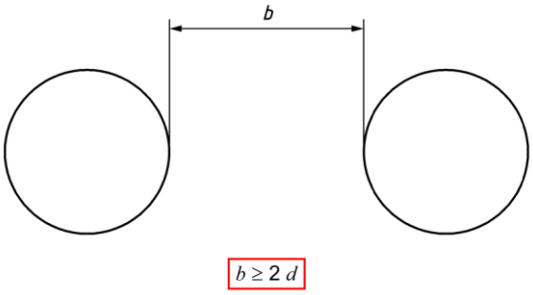


Abbildung 3.2 Beziehung zwischen zwei Bohrungen

c) Der Abstand, c, der Kante einer Bohrung zur Ecke des Glases sollte mindestens 6 d betragen.

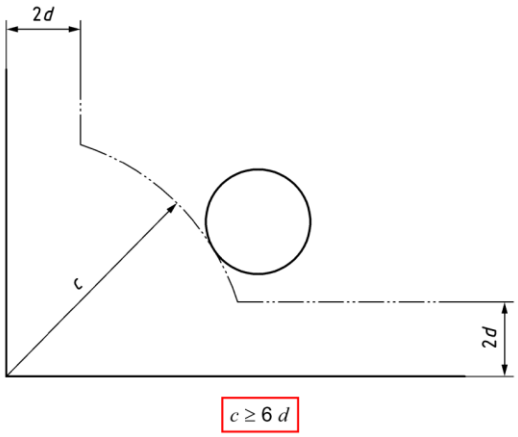


Abbildung 3.3 Beziehung zwischen Bohrung und Ecke der Scheibe

In der DIN EN 12150-1 ist die Begrenzung der Mindestabstände *a* und *b* nur von der Nenndicke *d* des Glases abhängig. Es werden keinerlei Begrenzungen der Mindestabstände hinsichtlich des Bohrungsdurchmessers gemacht. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass der Durchmesser der Bohrung Ø im Allgemeinen nicht kleiner als die Nenndicke des Glases sein darf.

4. Ziel und Umfang der Untersuchungen

4.1. Reduzierung der Mindestabstände *a* und *b*

Das Ziel des Projekts ist es, auf Basis numerischer Berechnungen Informationen zur Spannungsverteilung der Eigenspannung im Bohrungsbereich von thermisch vorgespannten Gläsern zu erhalten mit denen bei positivem Ergebnis im TC129 WG2 eine Reduzierung der Mindestabstände von Bohrungen in der DIN EN 12150-1 von $a \geq 2d$ auf $a \geq 1d$ vorgeschlagen werden kann (s. Abbildung 4.1). Dabei ist:

- *d* die Nenndicke des Glases,
- Ø der Durchmesser der Bohrung,
- *a* der Abstand von der Kante einer Bohrung zur Glaskante
- und *b* der Abstand zwischen den Kanten zweier nebeneinander positionierten Bohrungen

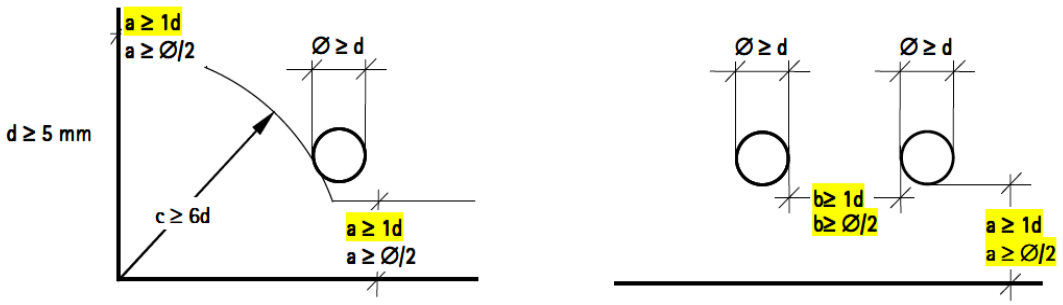


Abbildung 4.1 Bohrungsposition - Bohrung im Eckbereich (links) – Bohrungen zueinander und im Kantenbereich (rechts)

Da in der DIN EN 12150-1 keine Begrenzung der Mindestabstände *a* und *b* hinsichtlich des Bohrungsdurchmessers Ø getroffen werden, wurde in den Untersuchungen eine weitere Bedingung für die Begrenzung der Mindestwerte der Rand- und Bohrungsabstände *a* und *b* über den Bohrungsdurchmesser Ø definiert. Demnach wurden für die numerischen Untersuchungen folgende Bedingungen bei der Positionierung der Bohrung berücksichtigt:

$$\text{Min a} = \text{Max}\ \{a \geq 1d \quad \textbf{und} \quad a \geq Ø/2\}$$

$$\text{Min b} = \text{Max}\ \{b \geq 1d \quad \textbf{und} \quad b \geq Ø/2\}$$

Bei der Ermittlung der Mindestabstände *a* und *b* für die Lage der Bohrung in der numerischen Simulation wurde das größere Maß aus den oben genannten Begrenzungsbedingungen ermittelt und angesetzt. Es ist zu beachten, dass bei jeweils gleichem Bohrungsdurchmesser Ø und gleicher Glasdicke *d* die Werte für die Mindestabstände *a* und *b* gleich sind.

Es wurden ausschließlich zylindrische Bohrungen untersucht. Für die Fase an den Bohrungen und an der Glaskante wurde von 1/10 der Glasdicke *d* ausgegangen, mindestens jedoch 1 mm und unter einem Winkel von 45°.

4.2. Mindestabstand – Bohrungen zueinander und im Kantenbereich

Bei zwei nebeneinander angeordneten Bohrungen (Abbildung 4.1, rechts) wurde die Reduzierung der Abstände auf die Glasdicke bzw. ½ Durchmesser der Bohrung, wobei das größere Maß maßgebend ist, untersucht.

<u>Es wurden folgende Parameter untersucht:</u>

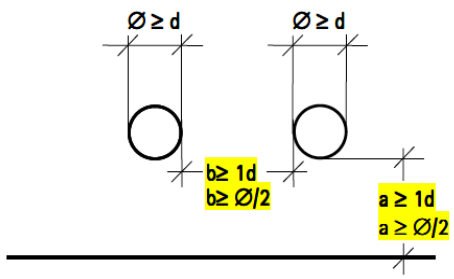
Bohrungsdurchmesser Ø = 8 mm, 50 mm und 100 mm

Glasdicke *d* = 6 mm und 10 mm

In der folgenden Tabelle sind die mit den festgelegten Begrenzungsbedingungen ermittelten Mindestabstände *a* und *b* aufgelistet.

Tabelle 4.1 Mindestabstände *a* und *b* – Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich

Ø [mm]	d [mm]	**Min a; b[mm]**	a/Ø ; b/Ø
8	6	**6**	3/4
	10	**10**	5/4
50	6	**25**	1/2
	10	**25**	1/2
100	6	**50**	1/2
	10	**50**	1/2



4.3. Mindestabstand – Bohrung im Eckbereich

Für die Anordnung der Bohrungen im Eckbereich (Abbildung 4.1, links) wurden zwei Zustände untersucht:

1. Bohrung auf der Diagonalen (Winkel konstant 45°) mit variablen Werten für den Abstand *c* gem. Abbildung 4.1.
2. Wert *c* konstant, aber variabler Winkel

4.4. Gliederung und Aufteilung der Untersuchungen

Um die Spannungen im Bohrungsbereich numerisch berechnen zu können, musste die Temperaturkonvektion im Abkühlprozess simuliert werden. Hierzu ist der wesentliche Einflussparameter der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Glasoberfläche und Kühlmedium. Dieser Parameter ist für die technischen Prozesse experimentell sehr schwer zu ermitteln. Deshalb wurde die numerische Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten *h* zu einem Bestandteil der vorliegenden Untersuchungen.

Nach der iterativen, numerischen Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten, der für unterschiedliche Glasdicken erfolgte und mit den unabhängigen Berechnungsergebnissen für den Wärmeübergangskoeffizienten durch Herrn Dr. Jens Nielsen (DTU Kopenhagen – Technical University of Danmark) validiert wurde, konnten in einem weiteren Schritt, unter Berücksichtigung des viskoelastischen Materialverhaltens von Glas, der Abkühlprozess simuliert und die nach dem Abkühlvorgang entstehenden Spannungen im Bohrungsbereich für unterschiedliche Glasdicken, Bohrungsdurchmesser, Bohrungs- und Randabstände ermittelt werden.

Demnach wurden die Untersuchungen in den folgenden zwei Schritten unterteilt:

1. Studie zu Wärmeübergangskoeffizient *h*:

   Iterative Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten anhand transienter FE-Berechnungen an einer „unendlich“ ausgedehnten Kreisscheibe.

2. Berechnung der Spannungen im Bohrungsbereich:
   a. Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich.
   b. Bohrung im Eckbereich.

Am Institut für Statik und Konstruktion der Technischen Universität Darmstadt (TUD) erfolgten die numerischen Untersuchungen mit der Hilfe des FE-Programms ANSYS 16.0 [5].

Die Untersuchungen an DTU (Technical University of Danmark) wurden mit dem FE-Programm ABAQUS durchgeführt.

Die beiden Universitäten haben bei der numerischen Berechnung der Spannungen im Bohrungsbereich kooperiert und die Untersuchungen wie folgt aufgeteilt:

- TUD und DTU: Studie zu Wärmeübergangskoeffizient h
- TUD: Bohrungen zueinander und im Kantenbereich
- DTU: Bohrung im Eckbereich

Die numerische Untersuchung des Wärmeübergangskoeffizienten wurde von beiden Universitäten mit dem gleichen Modell und den zusammen abgesprochenen Ausgangspunkten durchgeführt, verglichen und validiert.

5. Wärmeübergangskoeffizient *h* – unendlich ausgedehnte Kreisscheibe

5.1. Vorgehensweise

Für die numerische Simulation der Temperaturkonvektion im Abkühlprozess ist der wesentliche Einflussparameter der Wärmeübergangskoeffizient h. Dieser Parameter hat entscheidenden Einfluss auf die Höhe der entstehenden Spannungen nach dem Abkühlen und wurde im Zuge der Untersuchungen an drei unendlich ausgedehnten Kreisscheiben mit unterschiedlichen Dicken von $d = 6$ mm; 10 mm und 15 mm anhand transienter FE-Berechnungen numerisch und iterativ ermittelt.

Zunächst wurden für die unterschiedlichen Konvektionsflächen einer realen endlichen Glasscheibe mit Bohrung (Oberfläche, Fase, Loch und Kante) variable Wärmeübergangskoeffizienten nach [6] definiert. Diese Werte wurden in einem FE-Modell einer „unendlich“ ausgedehnten Kreisscheibe mit einer im Zentrum positionierten Bohrung auf die entsprechenden Konvektionsflächen aufgesetzt und eine transiente **Temperaturberechnung** wurde durchgeführt. Dabei wurde der Temperatur-Zeit-Verlauf des Abkühlprozesses bestimmt (s. Abschnitt 5.2).

- $h_{\text{Kante}} = 72\ \beta$
- $h_{\text{Oberfläche}} = 96\ \beta$
- $h_{\text{Fase}} = 125\ \beta$
- $h_{\text{Loch}} = 69\ \beta$ h [W/m²K]

Erfahrungsgemäß wird für die Fase ein höherer Wärmeübergangskoeffizient angesetzt als im Lochbereich [4].

Im Anschluss wurde der aus dem Abkühlprozess simulierte und ermittelte Temperatur-Zeit-Verlauf als Temperaturbelastung übernommen und eine zusätzliche **Spannungsberechnung** unter Berücksichtigung der Strukturrelaxation des Werkstoffes Glas durchgeführt. Damit konnten Spannungen, die im Abkühlprozess entstehen, über die Abkühlzeit berechnet werden (s. Abschnitt 5.3).

Die Variable β des Wärmeübergangskoeffizienten h wurde solange iteriert, bis die Oberflächendruckspannung ca. 100 MPa betrug. Damit wurde aus den transienten Berechnungen der unbekannte Einflussparameter h für eine bestimmte Oberflächendruckspannung berechnet und für die weiteren Spannungsberechnungen entsprechend angesetzt.

5.1.1. FE-Modell

Für die numerischen Berechnungen zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten wurde ein Volumen-Modell einer Kreisscheibe (R=225mm) mit einer Bohrung im Zentrum der Scheibe (R=25mm) erzeugt (s. Abbildung 5.1). Die Fase wurde ebenso nach den Vorgaben im Abschnitt 4.1 modelliert. In der folgenden Abbildung ist die Skizze der modellierten Kreisscheibe dargestellt. Um das FE-Modell zu vereinfachen und die Berechnungsdauer zu minimieren, wurde auf Grund der

Kreissymmetrie nur ein Kreisabschnitt mit dem Mittelpunktswinkel von 5° sowie die Hälfte des Modells in Dickenrichtung modelliert.

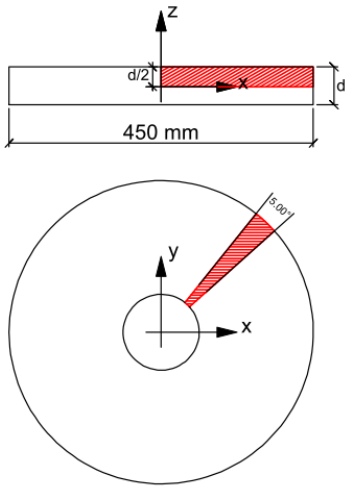


Abbildung 5.1 Modellskizze – Kreisscheibe mit Loch

Für die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten über die Vorgabe der Oberflächendruckspannung sind die Spannungen im „ungestörten“ Bereich von Bedeutung. Deshalb wurden mehrere Untersuchungen unternommen, um den Radius der Kreisscheibe so zu wählen, dass das Abkühlen über die Konvektionsflächen der Bohrung, der Fase und der äußeren Kante keinen Einfluss auf die Entwicklung der Spannungen im „ungestörten“ Bereich haben. Dieser Bereich befindet sich unmittelbar in der Mitte des rot markierten Kreisstreifens. Die Symmetriebedingungen wurden als Lagerbedingung im vereinfachten FE-Modell berücksichtigt. In der folgenden Abbildung ist das vereinfachte FE-Modell mit den Lagerbedingungen der Symmetrieachsen dargestellt.

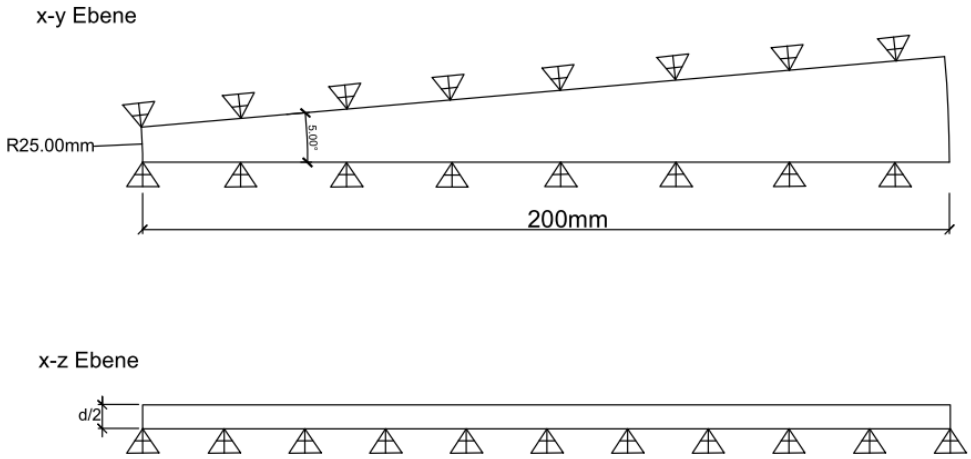


Abbildung 5.2 Vereinfachtes FE-Modell – Kreisscheibe mit Loch

Die Vernetzung des Modells erfolgte mit Hilfe von Volumenelementen. Für die Vernetzung des Modells bei der Durchführung der Temperaturberechnungen wurde das 3D–20–Knoten Thermo-Volumenelement *SOLID90* eingesetzt, das im Programmpaket ANSYS 16.0 zur Verfügung steht. Das Element ist ein reines Thermo-Element und hat die Temperatur als einzigen Freiheitsgrad und berücksichtigt dementsprechend nur die auf das Modell angesetzten Konvektionen. Diese Elementeigenschaft ist für die Ermittlung des reinen Temperatur-Zeit-Verlaufes im Abkühlprozess von Bedeutung.

Die Diskretisierung des Volumenmodells für die anschließende Spannungsberechnungen (visko-elastische Berechnung) erfolgte durch das 3D–20–Knoten Visko-Volumenelement *VISCO89*, welches ebenso im Programmpaket ANSYS 16.0 zur Verfügung steht. Das Element berücksichtigt sowohl Spannungs- als auch Strukturrelaxation. Mit Hilfe dieses Elements können die visko-elastische Eigenschaften von über die Transformationstemperatur erhitztem Glas modelliert und damit die Entwicklung des Spannungsverlaufes im Glas während des Abkühlprozesses simuliert werden.

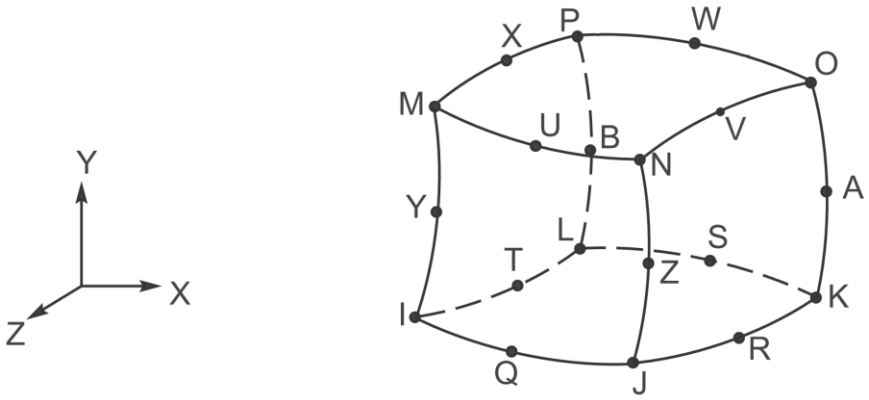


Abbildung 5.3 3D–20–Knoten Volumenelement [7]

Bei der Vernetzung des Modells wurde darauf geachtet, dass die Elemente näherungsweise bzw. möglichst die gleichen Seitenlängen aufweisen. In der Dickenrichtung wurde ein Element sizefaktor von 0,25 gewählt [4]. Dies bedeutet, dass das Element in Scheibenmitte 4 Mal größer ist als das Element an der Scheibenoberfläche. Dementsprechend ändern sich die Elementhöhen von der Scheibenmitte bis zur Oberfläche, s. Abbildung 5.4. Auf Grund des parabelförmigen Spannungsverlaufes, der sich nach dem Abkühlprozess entlang der Scheibendicke einstellt, ist diese Elementgrößenveränderung in Dickenrichtung notwendig. Damit können die Druckspannungen im oberen 20% der Scheibendicke besser erfasst werden.

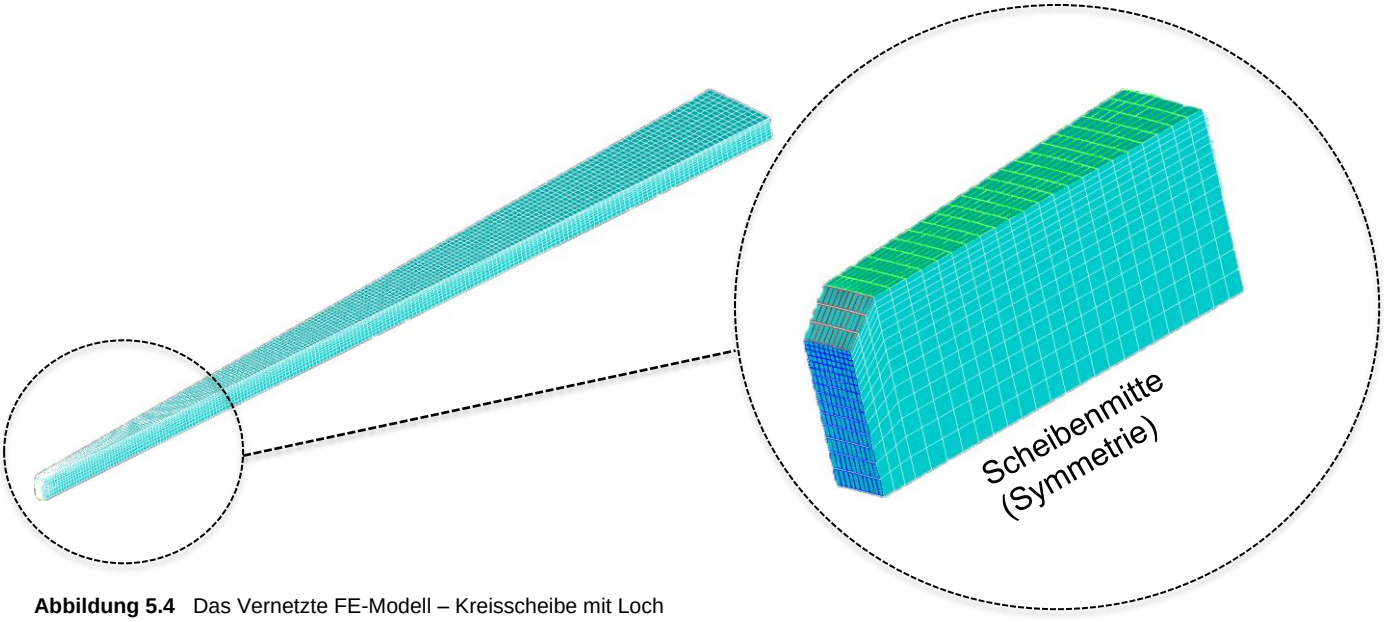


Abbildung 5.4 Das Vernetzte FE-Modell – Kreisscheibe mit Loch

5.1.2. FEM – Eingabeparameter

Für die FE-Simulation des Abkühlprozesses muss eine Temperatur-Zeit-Funktion vorhanden sein (Abschnitt 5.2). Um Spannungsentwicklungen im Glas während des Abkühlprozesses und danach numerisch simulieren zu können, müssen neben der Temperatur-Zeit-Funktion auch andere Parameter für die Simulation der Spannungs- und Strukturrelaxation im Glas bekannt sein.

In der folgenden Tabelle sind die wesentlichen physikalischen Eigenschaften von Kalk-Natron-Silikatglas aufgeführt.

Tabelle 5.1 Materialeigenschaften von Kalk-Natron-Silikatglas

Eigenschaft	**Kalk-Natron-Silikatglas**
Elastizitätsmodul	E = 70 000 Mpa
Querkontraktionszahl	$\nu = 0{,}22$
Thermische Ausdehnungskoeffizient (fest)	$\alpha_g = 9 \times 10^{-6}$ 1/K
Thermische Ausdehnungskoeffizient (schmelze)	$\alpha_l = 32 \times 10^{-6}$ 1/K
Wärmeleitfähigkeit	$k = 0{,}975$
Spezifische Wärmekapazität (fest)	$c_{p,g} = 840$ J/kgK
Aktivierungsenergie / ideale Glaskonstante	$H/R = 55\,000$ K
Konstante x	$x = 0{,}5$
Dichte	$\rho = 2500$ kg/m³
Umgebungstemperatur	$T_\infty = 20$°C

Annahmen für die visko-elastische Berechnung:

- Der instantane Schubmodul $G(t = 0)$ wurde aus den Werten für den Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl der Tabelle 4.1 wie folgt berechnet und vereinfacht konstant angenommen:

$$G(t = 0) = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{70\,000\ MPa}{2(1+0{,}22)} = 28689\ \text{MPa}$$

- Es wurde eine vollständige Schub-Relaxation angenommen, so dass $G(t \to \infty) = 0$.
- Die Relaxation des Kompressionsmoduls wurde mit dem instantane Kompressionsmodul $K(t = 0) = 34171{,}4$ MPa und $K(t \to \infty) = 6150{,}9$ MPa berücksichtigt ($\frac{K_\infty}{K_0} = 0{,}18$).
- Es wurden je 6 *Maxwell-Elemente* für die Spannungs-, Struktur- und Volumenrelaxation verwendet [8].
- Die Wichtungsfaktoren (w_{1i} , w_{2i} und C_i) und Relaxationszeiten (τ_{1i} , τ_{2i} und λ_i) für die Summenfunktionen der Spannungs-, Volumen und Strukturrelaxation wurden bei einer Referenztemperatur von 596°C verwendet (s. Tabelle 5.2) [8].

In der folgenden Tabelle sind die Wichtungsfaktoren und Relaxationszeiten der Spannungs-, Volumen und Strukturrelaxation dargestellt.

Tabelle 5.2 Wichtungsfaktoren und Relaxationszeiten der Schubspannungs-, Volumen und Strukturrelaxation ($\boldsymbol{T_{ref}}$ = **596**°C) entnommen aus [8]

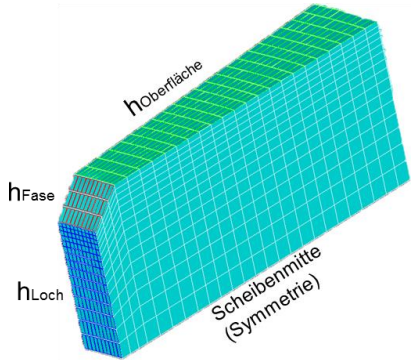
Schubspannungsrelaxation		**Volumenrelaxation** ($K_\infty/K_0 = 0.18$)		**Strukturrelaxation**	
w_{1i}	τ_{1i}	w_{2i}	τ_{2i}	C_i	λ_i
0.05523	$6.658 \cdot 10^{-5}$	0.0222	$5.009 \cdot 10^{-5}$	0.05523	$5.965 \cdot 10^{-5}$
0.08205	$1.197 \cdot 10^{-3}$	0.0224	$9.945 \cdot 10^{-4}$	0.08205	$1.077 \cdot 10^{-2}$
0.1215	$1.514 \cdot 10^{-2}$	0.0286	$2.022 \cdot 10^{-3}$	0.1215	0.1362
0.2286	0.1672	0.2137	$1.925 \cdot 10^{-2}$	0.2286	1.505
0.2860	0.7497	0.394	0.1199	0.2860	6.747
0.2265	3.292	0.3191	2.033	0.2265	29.63

Diese Wichtungsfaktoren mit den entsprechenden Relaxationszeiten für die Schubspannungs- und Volumenrelaxation sowie für die Strukturrelaxation wurden als Eingabeparameter der Materialmodellierung bei der visko-elastischen Spannungsberechnung in ANSYS eingegeben.

5.2. Temperaturberechnung

Für die Ermittlung der Spannungen nach dem Abkühlprozess ist die Berechnung einer Temperatur-Zeit-Funktion, die die Abkühlgeschichte beschreibt und als äußere Belastung für die Spannungsberechnungen gilt, erforderlich. Hierzu wurden transiente Temperaturberechnungen durchgeführt.

Für die transiente Temperaturberechnung wurde als Anfangsbelastung auf alle Elementknoten des Elementtyps *SOLID90* zum Zeitpunkt t=0 eine Aufheiztemperatur T_0 von 650°C aufgesetzt. Zur Abkühlung des Modells wurden alle Oberflächenelemente mit den entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten als Konvektion versehen, s. Abbildung 5.5. Hierbei wurde der Faktor β solange iteriert, bis die Oberflächendruckspannung 100 MPa betrug.



- $h_{\text{Kante}} = 72\ \beta$
- $h_{\text{Oberfläche}} = 96\ \beta$
- $h_{\text{Fase}} = 125\ \beta$
- $h_{\text{Loch}} = 69\ \beta$

Abbildung 5.5 Konvektionsflächen mit den zugehörigen Wärmeübergangskoeffizienten *h* [W/m²K] [6]

Das Modell wurde nach einem Zeitpunkt $t \to \infty$ auf eine Umgebungstemperatur T_∞ von 20°C abgekühlt. In der folgenden Tabelle sind die angesetzten Temperaturen nochmals dargestellt.

Tabelle 5.3 Angesetzte Temperaturen

Bauteiltemperatur T_0 (t=0)	650°C
Umgebungstemperatur T_∞ ($t \to \infty$)	20°C

Das mit dem Anfangstemperatur T_0 erhitzte Modell wurde in zwei Lastschritten stufenweise abgekühlt. Der stufenweise Abkühlprozess erfolgte in beiden Lastschritten in diskreten Zeitschritten.

Im ersten Lastschritt (*Abschrecken*) wurden sehr feine Zeitschritte gewählt. In den ersten 10 s des Abkühlvorgangs ändert sich die Temperaturverteilung über den Querschnitt sehr schnell. Da jede Änderung der Temperaturdifferenz die Bildung von Spannungen nach sich zieht, ist eine möglichst genaue Fassung des Zeitintervalls notwendig. Zudem können bei zu großen Schrittweiten Konvergenzprobleme auftreten. Die Zeitschrittweite hat allerdings besonders in Verbindung mit einer dichten Vernetzung einen erheblichen Einfluss auf die Rechenzeit. Um die Rechenzeit zu optimieren,

musste daher ein möglichst effektiver Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit getroffen werden. Bei der Wahl der Zeitschritte des ersten Lastschrittes muss darauf geachtet werden, dass die momentane Temperatur des gesamten Querschnittes, von der Oberfläche bis zum Scheibenkern, nach diesen Zeitschritten des Abkühlvorgangs die Glasübergangstemperatur T_g unterschritten hat. Deshalb wird die Wahl der Zeitschrittweiten von der Scheibendicke beeinflusst. In einem iterativen Vorgang wurden die Zeitschrittweiten dickenabhängig festgelegt (Tabelle 5.4):

Tabelle 5.4 Dickenabhängige Zeitschrittweiten Δt

Dicke		Abkühlzeit t	Zeitschrittweite Δt
***d*=6mm**	**Lastschritt 1**	$t_1 = 10$ s	$\Delta t_1 = 0{,}1$ s
	Lastschritt 2	$t_2 = 380$ s	$\Delta t_2 = 5$ s
***d*=10mm**	**Lastschritt 1**	$t_1 = 30$ s	$\Delta t_1 = 0{,}2$ s
	Lastschritt 2	$t_2 = 800$ s	$\Delta t_2 = 10$ s
***d*=15mm**	**Lastschritt 1**	$t_1 = 60$ s	$\Delta t_1 = 0{,}5$ s
	Lastschritt 2	$t_2 = 1200$ s	$\Delta t_2 = 50$ s

Im Folgenden ist der Temperatur-Zeit-Verlauf des Abkühlprozesses für die drei unterschiedlichen Dicken dargestellt. Diese Temperatur-Zeit-Verläufe wurden im Zuge der Temperaturberechnung ermittelt und gelten bei den Spannungsberechnungen als äußere Belastung

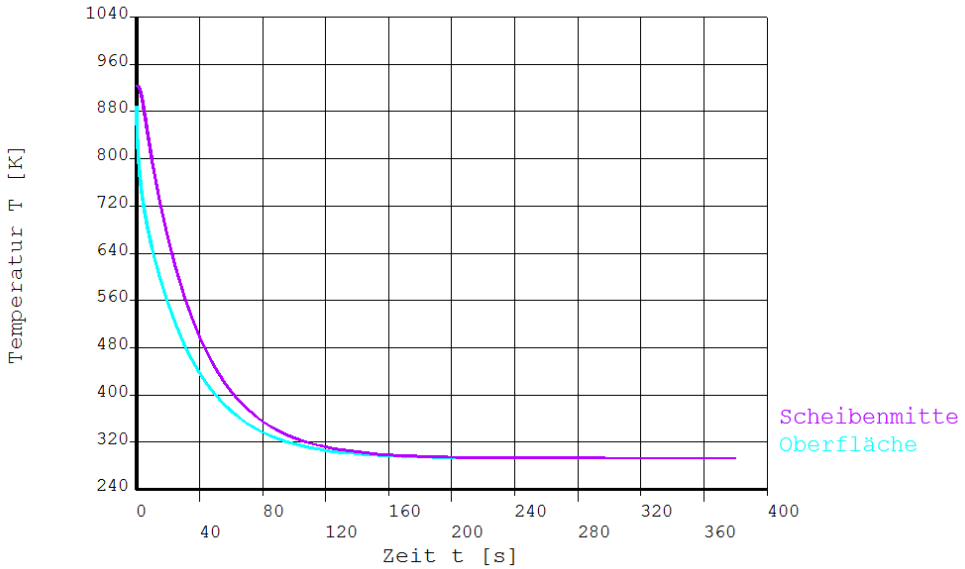


Abbildung 5.6 Temperatur-Zeit-Funktion (Dicke *d*=6mm) – nach 10 Sekunden Abkühlzeit: $T_{\text{Oberfläche}}$ = 647,47 K - 273,15 = 374,32°C; $T_{\text{Scheibenmitte}}$ = 795,97 K – 273,15 = 522,82°C

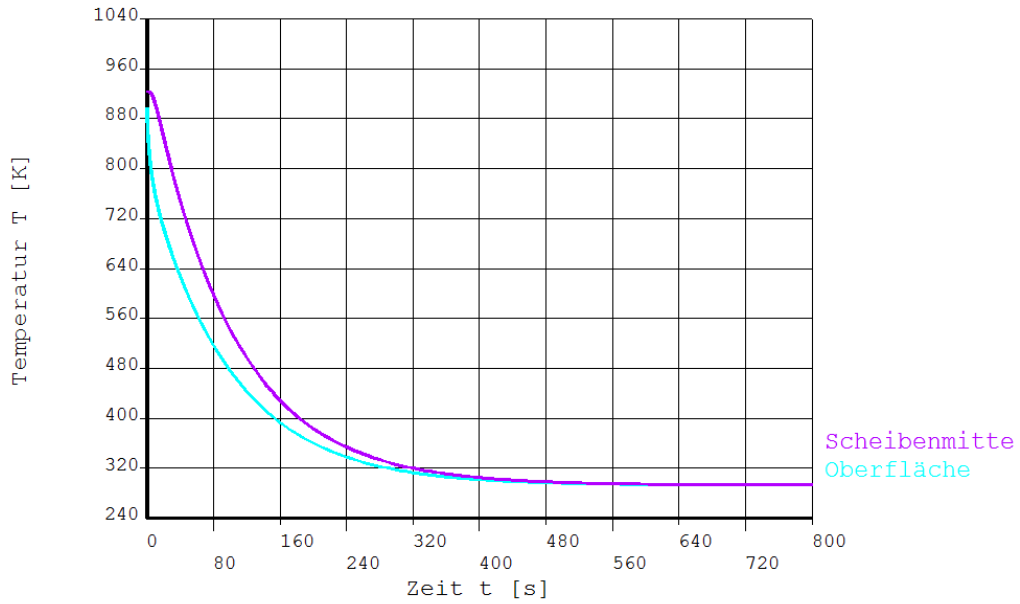


Abbildung 5.7 Temperatur-Zeit-Funktion (Dicke *d*=10mm) – nach 30 Sekunden Abkühlzeit: $T_{\text{Oberfläche}}$ = 663,60 K - 273,15 = 390,451°C; $T_{\text{Scheibenmitte}}$ = 797,16 K – 273,15 = 524,01°C

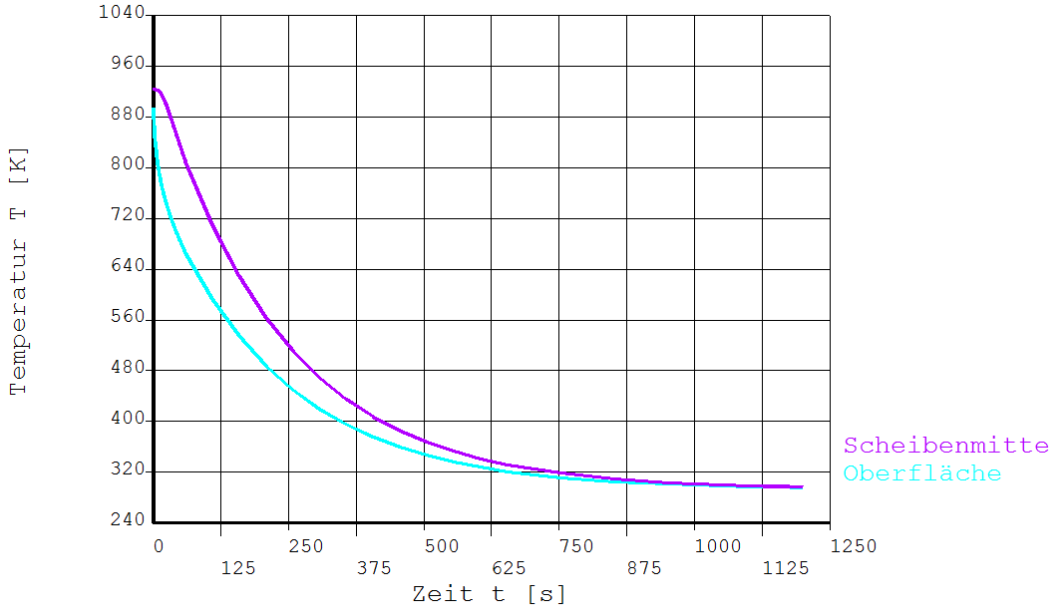


Abbildung 5.8 Temperatur-Zeit-Funktion (Dicke *d*=15mm) – nach 60 Sekunden Abkühlzeit: $T_{\text{Oberfläche}}$ = 668,20 K – 273,15 = 392,05°C; $T_{\text{Scheibenmitte}}$ = 808,96 K – 273,15 = 535,81°C

In den Temperatur-Zeit-Kurven ist zu sehen, dass die Temperatur in der Scheibenmitte und an der Scheibenoberfläche am Ende des Abkühlprozesses auf die vorgegebene Umgebungstemperatur von T_{∞}=20°C+273,15 = 293,15 K abgekühlt werden.

5.3. Spannungsberechnung – Wärmeübergangskoeffizient

Für die Spannungsberechnungen wurde das im FE-Programmpaket ANSYS 16.0 implementierte Modell der Strukturrelaxation verwendet [5]. Hierbei wurden die in Tabelle 5.2 aufgelisteten Werte der Wichtungsfaktoren und entsprechenden Relaxationszeiten für die Spannungs-, Volumen und Strukturrelaxation verwendet.

Als äußere Belastung wurde die Temperatur-Zeit-Funktion auf die Elemente aufgebracht, die sich im Abschnitt 5.2 aus der transienten Temperaturberechnung ergab. Hierzu wurden die thermischen Elemente (*SOLID90*) durch die visko-elastischen Elemente (*VISCO89*) ersetzt. In Abbildung 5.9 ist beispielhaft der Spannungsverlauf im Querschnitt für eine 10mm dicke Glasscheibe dargestellt. Die Spannung wurde im ungestörten Bereich (ca. 135mm von der Bohrung entfernt) abgelesen und über die halben Dicke aufgetragen.

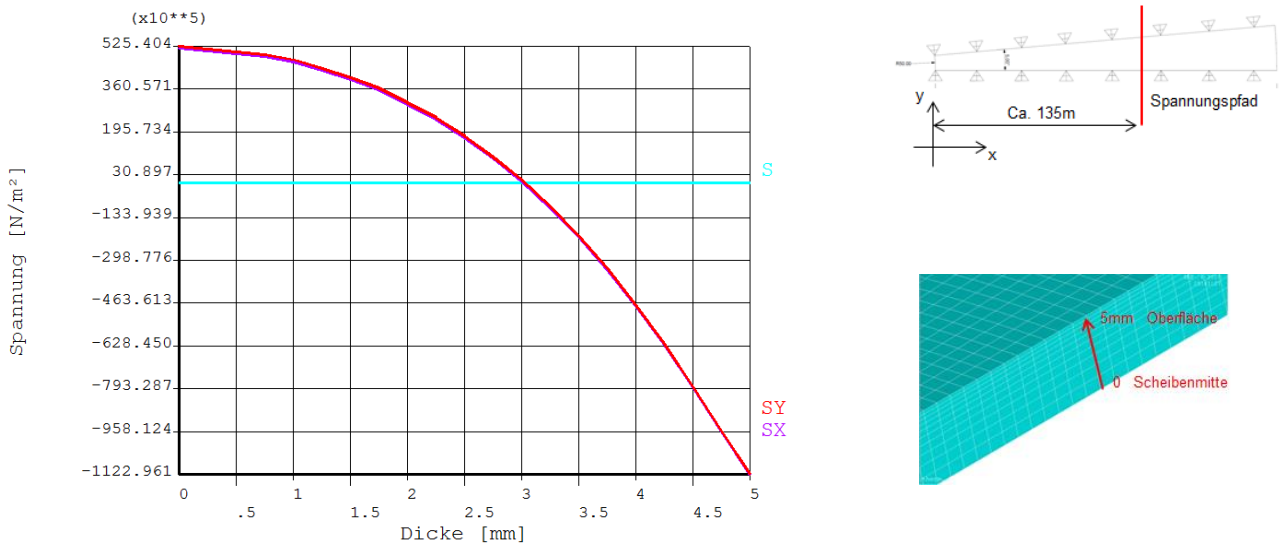


Abbildung 5.9 Mit der Methode der Finiten Elemente berechneter Spannungsverlauf für ein Natron-Silikatglas, aufgetragen über die halbe Dicke, Glasdicke d = 10mm, $\boldsymbol{T_0}$=650°C, Faktor des Wärmeübergangskoeffizient $\boldsymbol{\beta}$ = 1,5

Mit dem Faktor des Wärmeübergangskoeffizienten $\beta = 1{,}5$ ergibt sich eine Oberflächendruckspannung von ca. 112 MPa und eine Kernzugspannung von ca. 53 MPa. Die Iteration wurde hier abgebrochen. Die Oberflächendruckspannung müsste doppelt so groß sein wie die Kernzugspannung, damit die Parabelform des Spannungsverlaufes über die Glasdicke eingehalten ist. Hier ist der Vergrößerungsfaktor $\left|\frac{\text{Oberflächendruckspannung}}{\text{Kernzugspannung}}\right| = 2{,}1$ akzeptabel. Es ist aus der Abbildung ebenso ersichtlich, dass die Spannungen in X-Richtung (SX) gleich der Spannungen in Y-Richtung (SY) sind. Hierbei wurden die Spannungen im kartesischen Koordinatensystem abgelesen.

In Abbildung 5.10 ist der Verlauf der thermischen Spannungen nach dem Abkühlprozess im Bohrungsbereich und im ungestörten Bereich dargestellt.

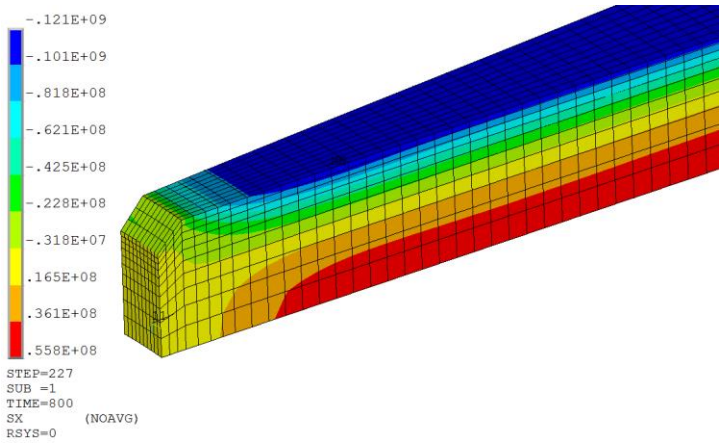


Abbildung 5.10 Verlauf der thermischen Spannungen im Bohrungsbereich und im ungestörten Bereich, Kalk-Natron-Silikatglas, Glasdicke d = 10mm, T_0=650°C, Faktor des Wärmeübergangskoeffizient β = 1,5, dargestellt ist die halbe Scheibendicke, in [N/m²]

Die Oberflächendruckspannung der Scheibe im ungestörten Bereich beträgt ca. 112 MPa. Die Oberflächendruckspannung hinter der Fase im Bereich von $d/2$ ist etwas geringer als im ungestörten Bereich, da die Tangentialdruckspannungen der Bohrungskante dort ihr Gleichgewicht finden. Abbildung 5.11 zeigt exemplarisch den Spannungs-Zeit-Verlauf an der Oberfläche und in Scheibenmitte für die Dicke d=10mm bei Aufheizung auf T_0=650°C und Abkühlung mit dem Faktor des Wärmeübergangskoeffizienten β = 1,5.

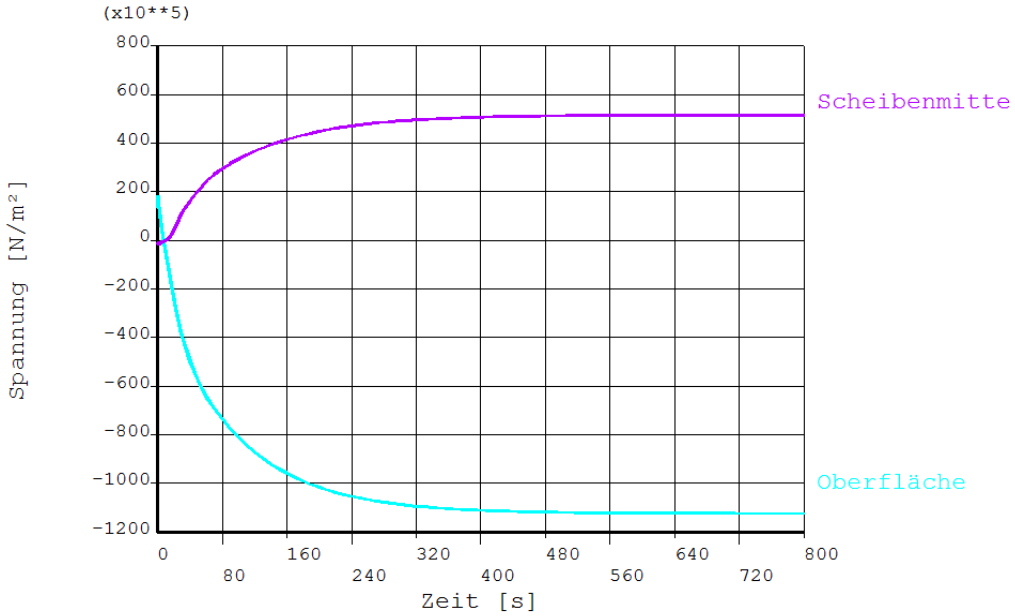


Abbildung 5.11 Spannungs-Zeit-Verlauf an der Glasoberfläche und in Scheibenmitte, Kalk-Natron-Silikatglas, Glasdicke d = 10mm, T_0=650°C, Faktor des Wärmeübergangskoeffizient β = 1,5

In der folgenden Tabelle ist der iterativ ermittelte Faktor des Wärmeübergangskoeffizienten β mit der bestimmten Oberflächendruckspannung von ca. 100 MPa für die drei Glasdicken 6 mm, 10 mm und 15 mm aufgelistet.

Tabelle 5.5 Wärmeübergangskoeffizient *h* [W/(m²K)]

Dicke d [mm]	6	10	15
β	**2,7**	**1,5**	**1,0**
Wärmeübergangskoeffizient *h* [W/(m²K)]			
$h_{Kante} = 72\beta$	194,4	108,0	72,0
$h_{Oberfläche} = 96\beta$	259,2	144,0	96,0
$h_{Fase} = 125\beta$	337,5	187,5	125,0
$h_{Loch} = 69\beta$	186,3	103,5	69,0

Die in Tabelle 4.1 angegebenen Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten h wurden für die weiteren Spannungsberechnungen an den Bohrungen verwendet.

6. Spannungsberechnung – Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich

6.1. FE-Modell

Zur Modellierung einer „unendlich“ ausgedehnten Scheibe mit Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich wurden die vorhandenen Symmetrien wie folgt ausgenutzt:

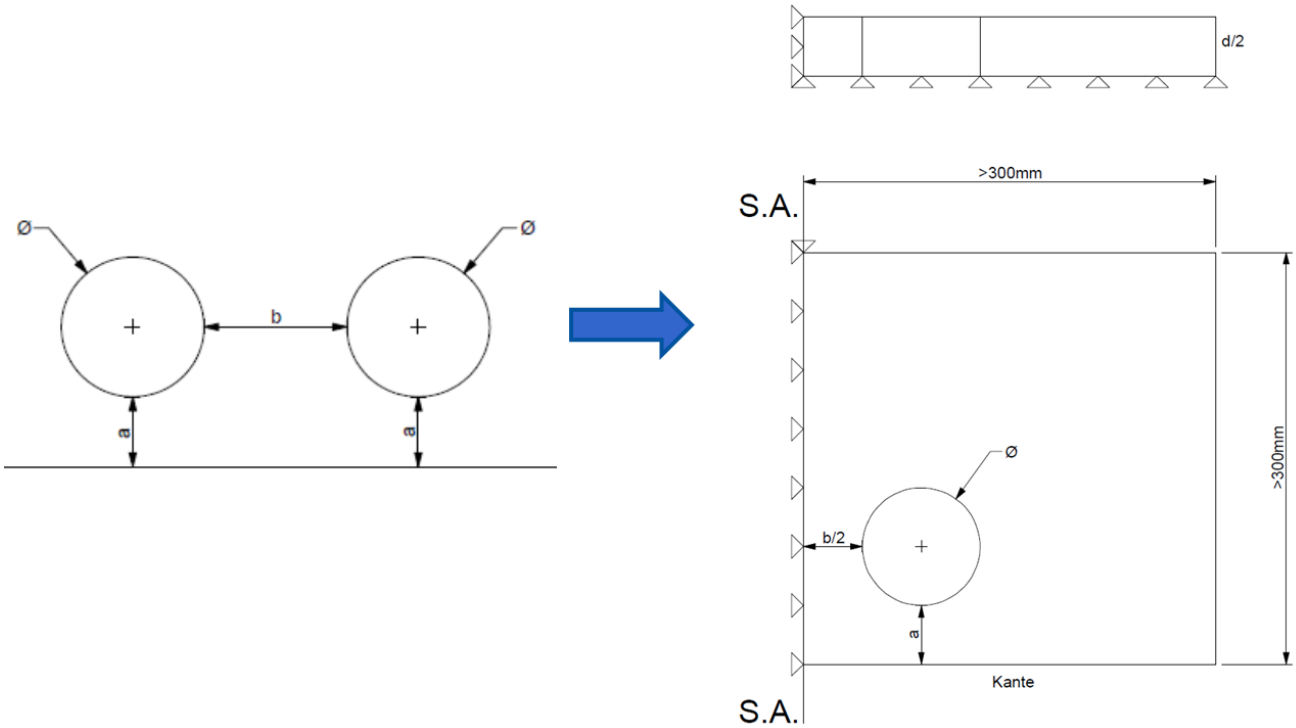


Abbildung 6.1 FE-Model einer „unendlich“ ausgedehnten Scheibe mit Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich

Die Seitenlängen wurden so gewählt, dass es innerhalb der modellierten Scheibe einen „ungestörten“ Bereich gibt, in dem das Abkühlen der Fase, Bohrung und der Kante keinen Einfluss auf die Entwicklung der Spannungen haben. Für die Temperatur- und die Spannungsberechnungen wurden jeweils die gleichen Elementtypen und auch die gleiche Elementierung über die Dicke gewählt, wie in Abschnitt 5.1.1 dargestellt.

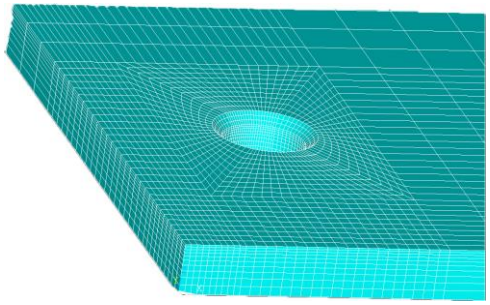


Abbildung 6.2 FE-Netz – Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich

Die in Tabelle 5.5 angegebenen dickenabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten h wurden, wie in folgender Abbildung dargestellt, auf die Oberflächenelemente angesetzt.

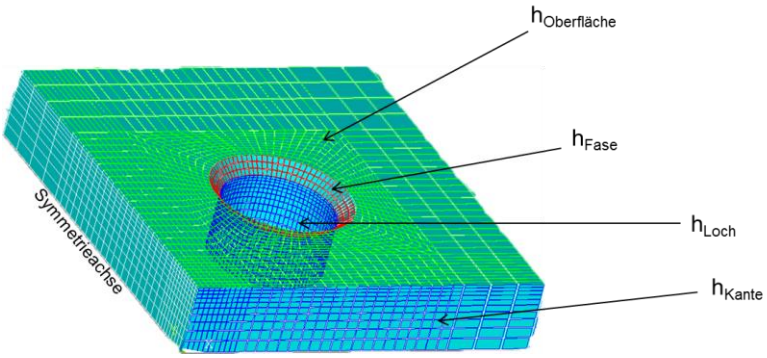


Abbildung 6.3 Konvektion auf die Oberflächenelemente

Die Aufheiztemperatur T_0, die Umgebungstemperatur T_∞ nach dem Abkühlprozess sowie alle Eingabeparameter des Materialmodels wurden aus den vorherigen Berechnungen des Wärmeübergangskoeffizienten übernommen.

6.2. Spannungen im Bohrungsbereich – minimaler Loch- und Randabstand

Bei gebohrten Glasscheiben aus thermisch vorgespanntem Glas treten 3-dimensionale Spannungszustände an der Bohrung auf, wobei die Tangentialspannung den entscheidenden Anteil der Vorspannung liefert [3]. In Abbildung 6.4 ist beispielhaft der Verlauf der thermischen Tangentialspannungen für den minimalen Loch- und Randabstand dargestellt (Ø 8mm, d = 10mm, a = b = 1,25Ø). Hierfür wurde ein zylindrisches Koordinatensystem in die Bohrung smitte gesetzt. In dem zylindrischen Koordinatensystem entspricht die Spannung in x-Richtung der Radialspannung und in y-Richtung der Tangentialspannung.

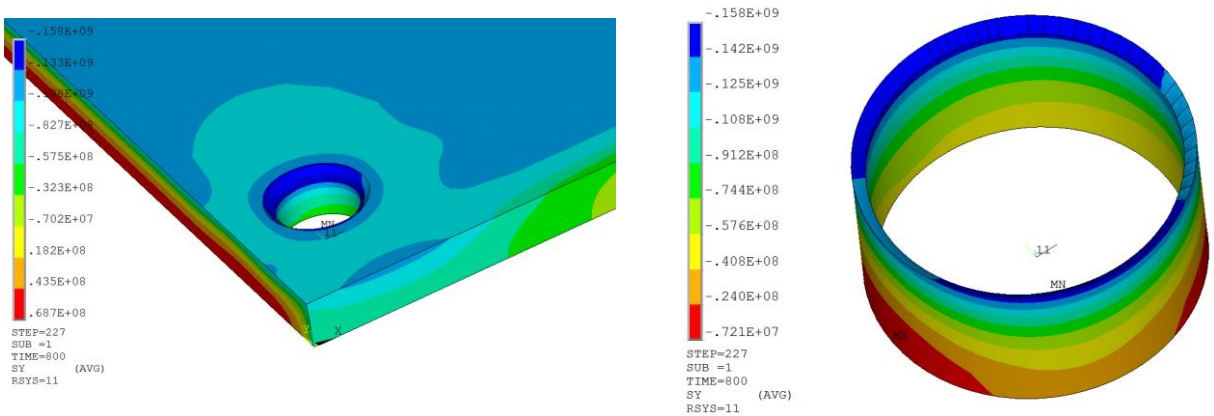


Abbildung 6.4 Verlauf der thermischen Tangentialspannungen im Bohrungsbereich, Ø 8mm, d = 10mm, min a = min b = 1,25Ø, dargestellt ist die halbe Scheibendicke, in [N/m²]

In den Abbildungen 6.5 bis 6.8 sind die Verläufe der thermischen Tangentialspannungen an der Loch-Innenfläche nach dem Abkühlprozess im Bohrungsbereich für die minimalen Loch- und Randabstände nach Tabelle 4.1 (Ø 8 und 50mm) dargestellt. Die Spannungswerte auf der y-Achse sind in N/m² dargestellt und müssen deshalb mit 10^{-6} multipliziert werden, um N/mm² bzw. MPa zu erhalten.

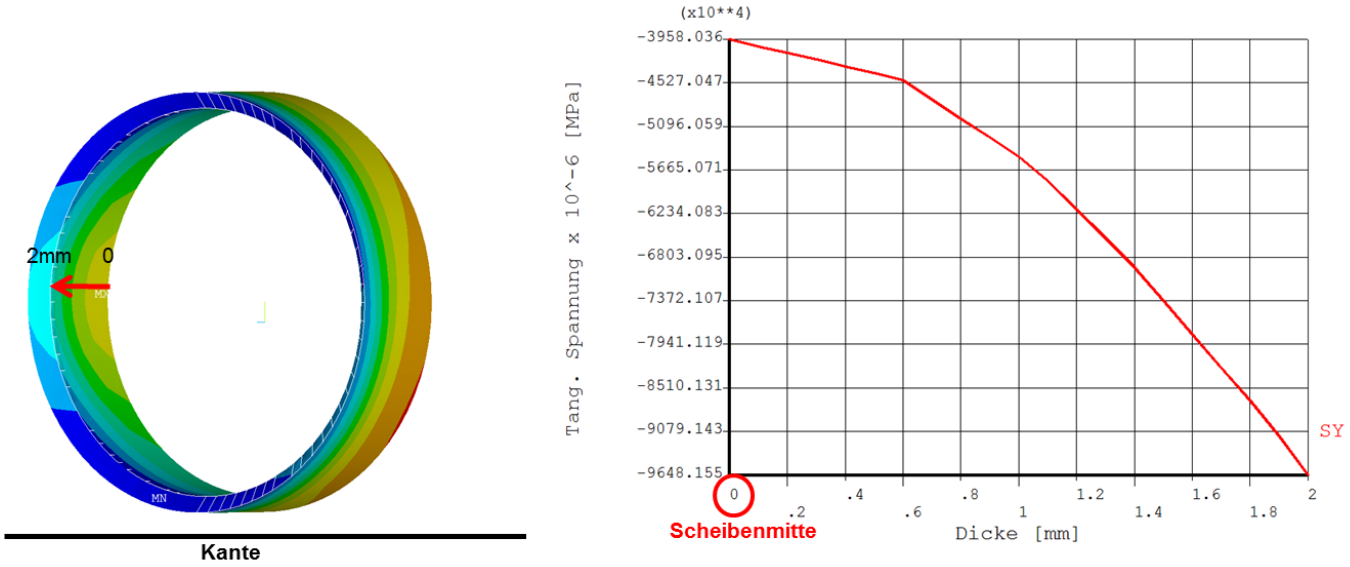


Abbildung 6.5 Verlauf der Tangentialspannungen an der Loch-Innenfläche – Ø 8mm, *d* = 6mm, min a = min b = 0,75Ø

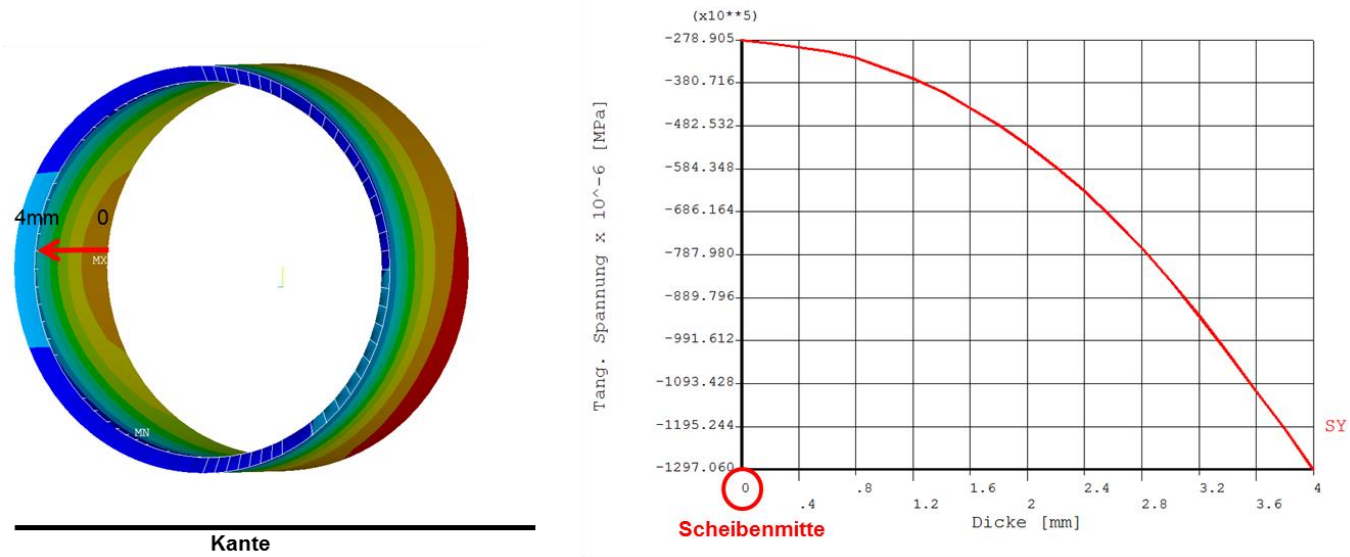


Abbildung 6.6 Verlauf der Tangentialspannungen an der Loch-Innenfläche – Ø 8mm, *d* = 10mm, min a = min b = 1,25Ø

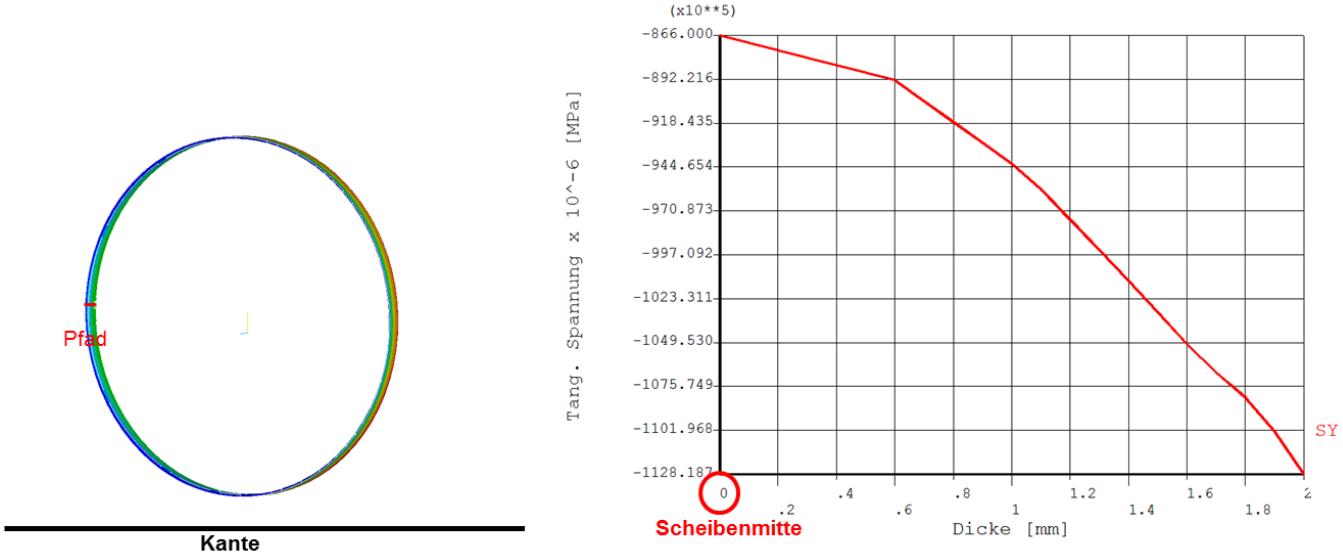


Abbildung 6.7 Verlauf der Tangentialspannungen an der Loch-Innenfläche – Ø 50mm, *d* = 6mm, min a = min b = 0,5Ø

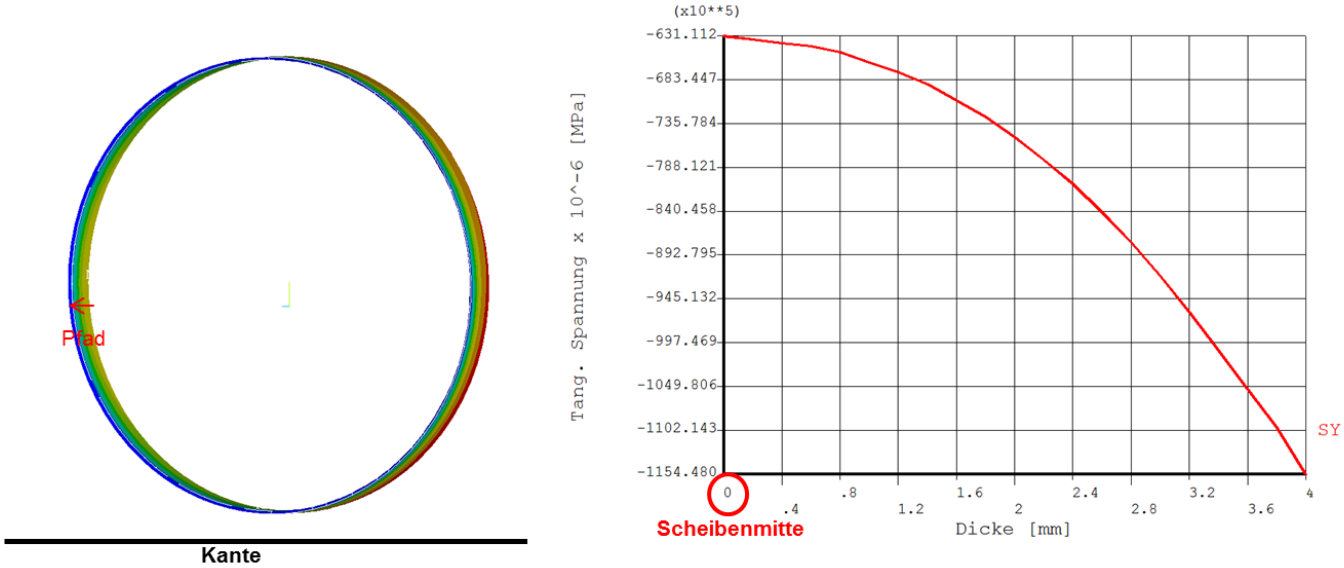


Abbildung 6.8 Verlauf der Tangentialspannungen an der Loch-Innenfläche – Ø 50mm, *d* = 10mm, min a = min b = 0,5Ø

Wie in den Bildern zu sehen ist, tritt die „betragsmäßig“ minimale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche im Bereich der **Scheibenmitte** auf.

6.3. Simulationsserien

Um den Einfluss der Rand- und Lochabstände auf die Spannungen im Bohrungsbereich zu untersuchen, wurden Parameterstudien durchgeführt. Hierbei wurde für jede Glasdicke und Bohrungsdurchmesser der Randabstand a konstant gehalten und der Lochabstand b variiert. Jede Simulationsreihe beginnt mit den in Tabelle 4.1 angegebenen Mindestabständen für a und b. In Tabelle 6.1 sind alle untersuchten Fälle zusammengefasst.

Tabelle 6.1 Simulationsserien

d = 6mm					**Ø = 8mm**
a[mm]	6	16	24	40	
b[mm]	6	6	6	6	
	16	16	16	16	
	24	24	24	24	
	40	40	40	40	
d = 10mm					
a[mm]	10	16	24	40	
b[mm]	10	10	10	10	
	16	16	16	16	
	24	24	24	24	
	40	40	40	40	
d = 6mm					**Ø = 50mm**
a[mm]	25	50	100	200	
b[mm]	25	25	25	25	
	50	50	50	50	
	100	100	100	100	
	200	200	200	200	
d = 10mm					
a[mm]	25	50	100	200	
b[mm]	25	25	25	25	
	50	50	50	50	
	100	100	100	100	
	200	200	200	200	

d = 6mm					**Ø = 100mm**
a[mm]	50	100	200	400	
b[mm]	50	50	50	50	
	100	100	100	100	
	200	200	200	200	
	400	400	400	400	
d = 10mm					
a[mm]	50	100	200	400	
b[mm]	50	50	50	50	
	100	100	100	100	
	200	200	200	200	
	400	400	400	400	

6.4. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die maximale (kritische) Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche nach dem Abkühlprozess in MPa (aus der FE-Berechnung) in Abhängigkeit der Rand- und Lochabstände *a* und *b* sowie des Bohrungsdurchmessers Ø und der Glasdicke *d* tabellarisch dargestellt. Dabei bezeichnen die negativen Werte Druckspannungen.

Tabelle 6.2 Maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche in Abhängigkeit des Rand- und Lochabstandes a und b in [MPa] – Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich, Aufheiztemperatur T_0=650°C, Umgebungstemperatur T_∞=20°C

		a[mm]				
	b[mm]	6	16	24	40	
d=6mm	6	-7,927	-20,076	-23,436	-25,756	Ø = 8mm
	16	-26,306	-35,395	-36,619	-37,734	
	24	-26,144	-37,781	-38,871	-39,761	
	40	-26,668	-37,465	-38,008	-38,787	
		10	16	24	40	
d=10mm	10	-7,208	-13,405	-17,623	-20,545	
	16	-17,694	-21,843	-24,428	-26,401	
	24	-20,401	-24,684	-26,469	-29,062	
	40	-20,373	-24,986	-25,741	-27,657	
		25	50	100	200	Ø = 50mm
d=6mm	25	-56,580	-58,087	-59,537	-60,129	
	50	-61,08	-61,668	-62,212	-62,599	
	100	-59,862	-61,512	-62,191	-62,350	
	200	-57,923	-59,150	-57,774	-58,007	
		25	50	100	200	
d=10mm	25	-53,854	-56,735	-59,584	-60,864	
	50	-63,804	-63,738	-64,823	-65,570	
	100	-62,004	-64,823	-66,446	-67,890	
	200	-61,279	-64,847	-64,404	-64,8563	
		50	100	200	400	Ø = 100mm
d=6mm	50	-62,641	-63,670	-64,226	-64,491	
	100	-62,163	-62,933	-63,134	-63,242	
	200	-61,906	-58,574	-58,86	-58,982	
	400	-62,048	-58,587	-51,414	-51,494	
		50	100	200	400	
d=10mm	50	-63,948	-65,136	-68,52	-69,023	
	100	-66,467	-67,513	-68,099	-71,034	
	200	-66,149	-64,436	-64,81	-67,531	
	400	-66,345	-66,742	-55,245	-57,908	

In den folgenden Diagrammen (Abbildung 6.9, Abbildung 6.10 und Abbildung 6.11) sind auf der vertikalen Achse die maximalen Tangentialspannungen an der Loch-Innenfläche der jeweiligen Bohrung dargestellt. Diese nehmen von unten nach oben zu. Die negativen Werte auf der vertikalen Achse stellen die Druckspannungen dar und positive Werte stehen für die Zugspannungen. Dementsprechend werden die Spannungen auf der vertikalen Achse nach oben hin kritisch, da die tangentialen Druckspannungen an der Loch-Innenfläche nach oben hin kleiner werden. Auf der horizontalen Achse ist der Lochabstand b aufgetragen. Für die Parameterstudie wurde der Randabstand a jeweils konstant gehalten und der Lochabstand b variiert. Deshalb ist jeder Kurve ein Randabstand a zu zuschreiben. Der blaue Punkt in den Diagrammen zeigt die maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche der Bohrung bei der Begrenzung der Mindestabstände a und b nach DIN EN 12150-1. Es wurde für jeden Durchmesser und jede Glasdicke eine Berechnung mit den Mindestabständen nach DIN EN 12150-1 durchgeführt. Der Mindestabstand nach DIN EN 12150-1 beträgt $a = b \geq 2d$, siehe Kapitel 3. Hierbei werden keine Bedingungen für den Bohrungsdurchmesser festgelegt. Deshalb ist ergeben sich bei größeren Durchmessern von 50 mm und 100 mm keine Änderung der Rand- und Lochabstände nach DIN EN 12150-1.

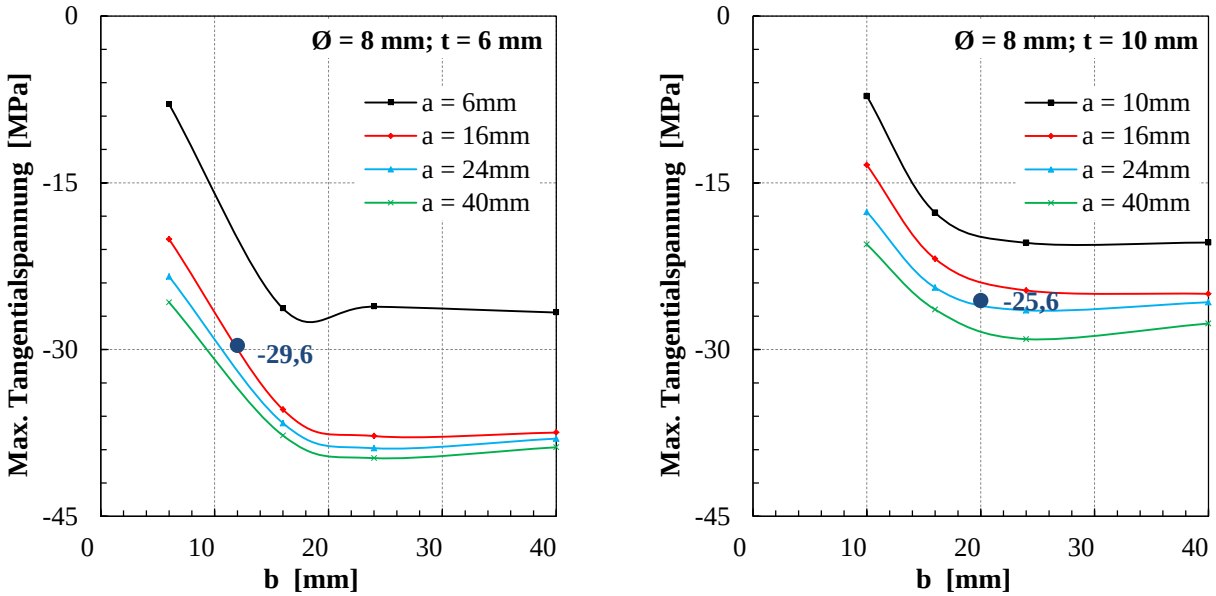


Abbildung 6.9 Maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche in Abhängigkeit des Rand- und Lochabstandes a und b – Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich, Aufheiztemperatur T_0=650°C, Umgebungstemperatur T_∞=20°C – **Bohrungsdurchmesser Ø = 8mm,** mit **(links)** Glasdicke d = 6mm und **(rechts)** Glasdicke d = 10mm – **Blauer Punkt:** Tangentialspannung beim Mindestabstand nach DIN EN 12150-1 a = b ≥ 2d

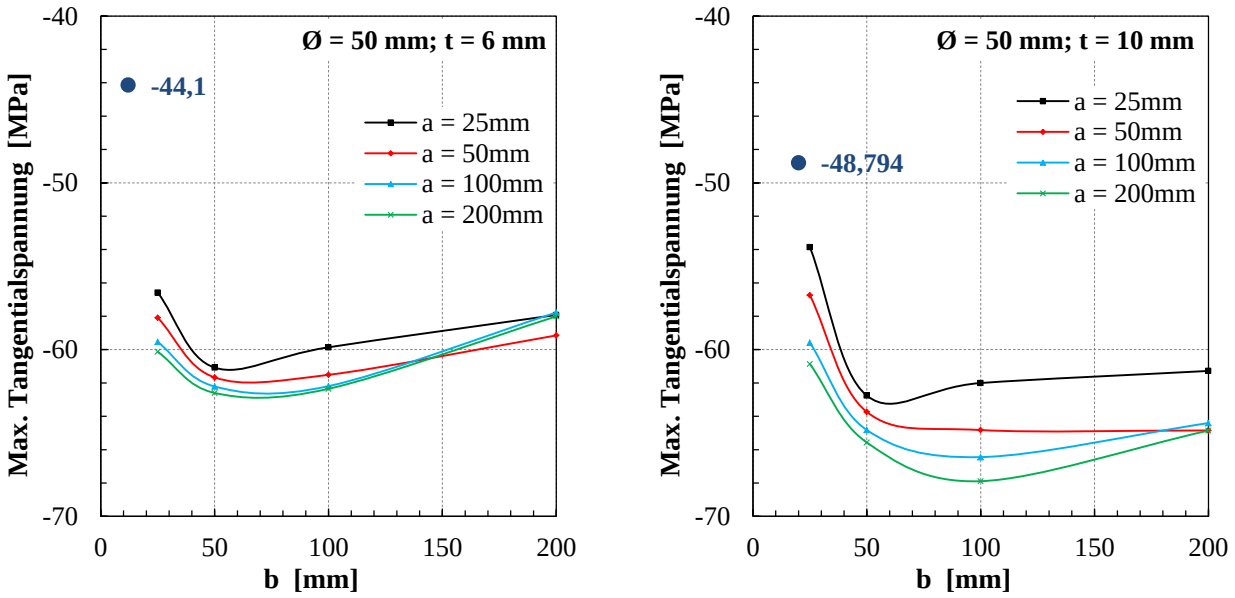


Abbildung 6.10 Maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche in Abhängigkeit des Rand- und Lochabstandes a und b – Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich, Aufheiztemperatur T_0=650°C, Umgebungstemperatur T_∞=20°C – **Bohrungsdurchmesser Ø = 50mm** mit **(links)** Glasdicke *d* = 6mm und **(rechts)** Glasdicke *d* = 10mm – **Blauer Punkt:** Tangentialspannung beim Mindestabstand nach DIN EN 12150-1 a = b ≥ 2*d*

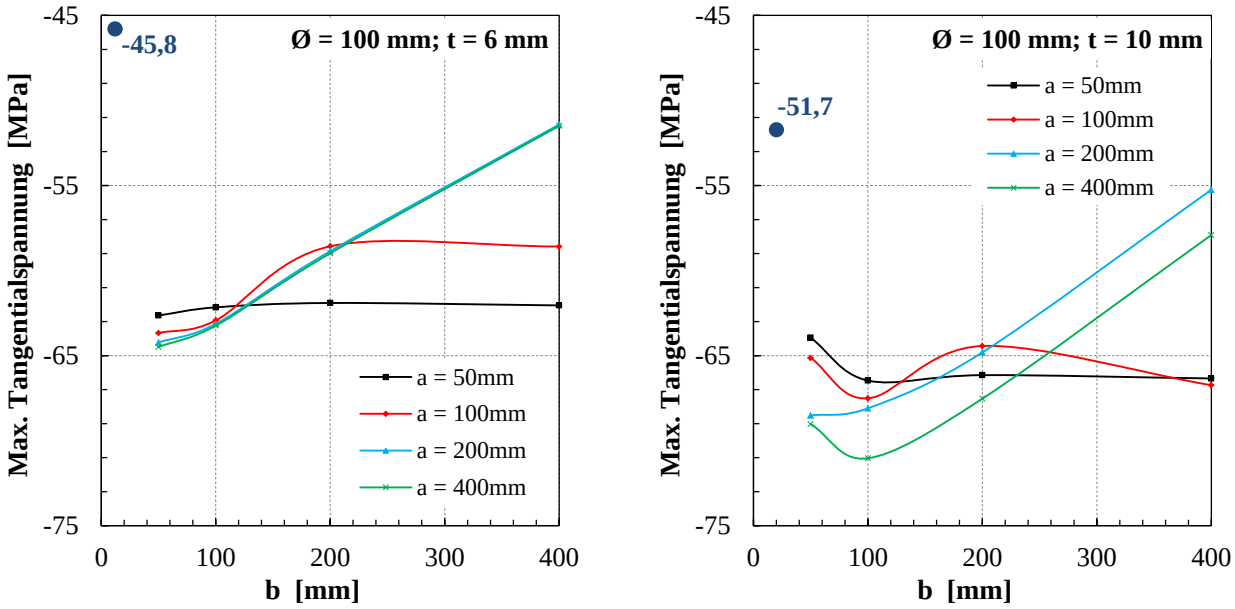


Abbildung 6.11 Maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche in Abhängigkeit des Rand- und Lochabstandes a und b – Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich, Aufheiztemperatur T_0=650°C, Umgebungstemperatur T_∞=20°C – **Bohrungsdurchmesser Ø = 100mm** mit **(links)** Glasdicke *d* = 6mm und **(rechts)** Glasdicke *d* = 10mm – **Blauer Punkt:** Tangentialspannung beim Mindestabstand nach DIN EN 12150-1 a = b ≥ 2*d*

Bei einem Bohrungsdurchmesser von 8 mm hat der Lochabstand *b* ab einem Grenzwert von b_{Gr} ≥ ca. 24 mm (Abbildung 6.9) keinen signifikanten Einfluss mehr auf die Entwicklung der Tangentialspannungen an der Loch-Innenfläche. Dieser Grenzwert beträgt bei einem Bohrungsdurchmesser von 50 mm b_{Gr} ≥ ca. 100 mm (Abbildung 6.10). Bei kleineren Lochabständen nimmt die tangentiale Druckspannung stark ab. Bei einem Bohrungsdurchmesser von 50 mm und einer Glasdicke von 10 mm ergibt die Reduzierung des Lochabstandes *b* von 50 mm auf 25 mm eine Abnahme der maximalen tangentialen Druckspannung an der Loch-Innenfläche um ca. 20 Mpa. Bei einem Bohrungsdurchmesser von 100 mm wurde eine solche Grenze nicht beobachtet. Dafür müsste der für die Berechnungen festgelegte Wertebereich des variierten Lochabstandes *b* größer gewählt werden. Dies wurde hier durch die Bedingung des Lochabstandes b ≤ Ø/2 verhindert. In Tabelle 6.3 sind die Grenzwerte für den Lochabstand *b* und die Abnahme der tangentialen Druckspannung bei der Reduzierung des Lochabstandes auf die in Tabelle 4.1 ermittelten Mindestabstände dargestellt.

Tabelle 6.3 Grenzwert b_{Gr} und die Abnahme der tangentialen Druckspannung an der Loch-Innenfläche bei der Reduzierung des Randabstandes *b* auf den Mindestabstand

Ø [mm]	*d* [mm]	*a* [mm]	Min *b* [mm]	Max. Tangentialspannung im Bereich der Loch-Innenfläche bei Min *b* [Mpa]	Grenzwert b_{Gr} [mm]	Max. Tangentialspannung im Bereich der Loch-Innenfläche bei b_{Gr} [Mpa]	Spannungsabnahme
8	6	6	6	-7,927	24	-26,144	um ca. -70%
		16	6	-20,076	24	-37,781	um ca. -47%
		24	6	-23,436	24	-38,871	um ca. -40%
		40	6	-25,756	24	-39,761	um ca. -35%
	10	10	10	-7,208	24	-20,401	um ca. -65%
		16	10	-13,405	24	-24,684	um ca. -46%
		24	10	-17,623	24	-26,469	um ca. -33%
		40	10	-20,545	24	-29,062	um ca. -29%
50	6	25	25	-56,580	100	-59,862	um ca. -5%
		50	25	-58,087	100	-61,512	um ca. -6%
		100	25	-59,537	100	-62,191	um ca. -4%
		200	25	-60,129	100	-62,350	um ca. -4%
	10	25	25	-53,854	100	-62,004	um ca. -13%
		50	25	-56,735	100	-64,823	um ca. -12%
		100	25	-59,584	100	-66,446	um ca. -10%
		200	25	-60,864	100	-67,890	um ca. -10%

Die größte Abnahme der Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche bei der Reduzierung des Lochabstandes b von b_{Gr} auf die Mindestlochabstand Min b ergibt sich bei einem Bohrungsdurchmesser von 8 mm.

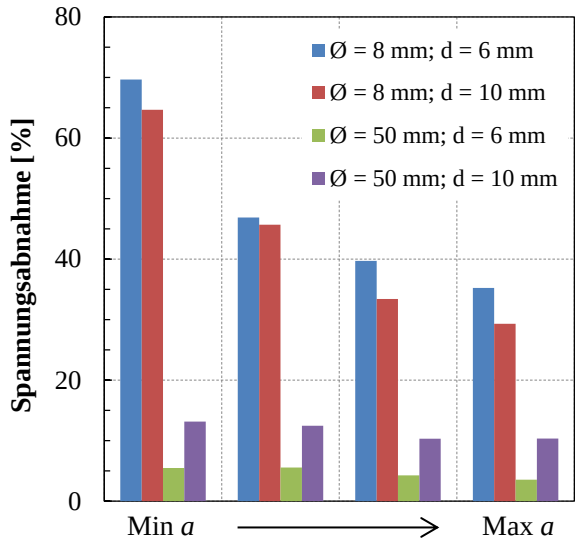


Abbildung 6.12 Spannungsabnahme in [%] bei der Reduzierung des Lochabstandes von b_{Gr} auf den Mindestlochabstand Min b

In Abbildung 6.13 ist die maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche in Abhängigkeit des Randabstandes a und des Bohrungsdurchmessers für den jeweiligen Lochabstand b_{Gr} dargestellt

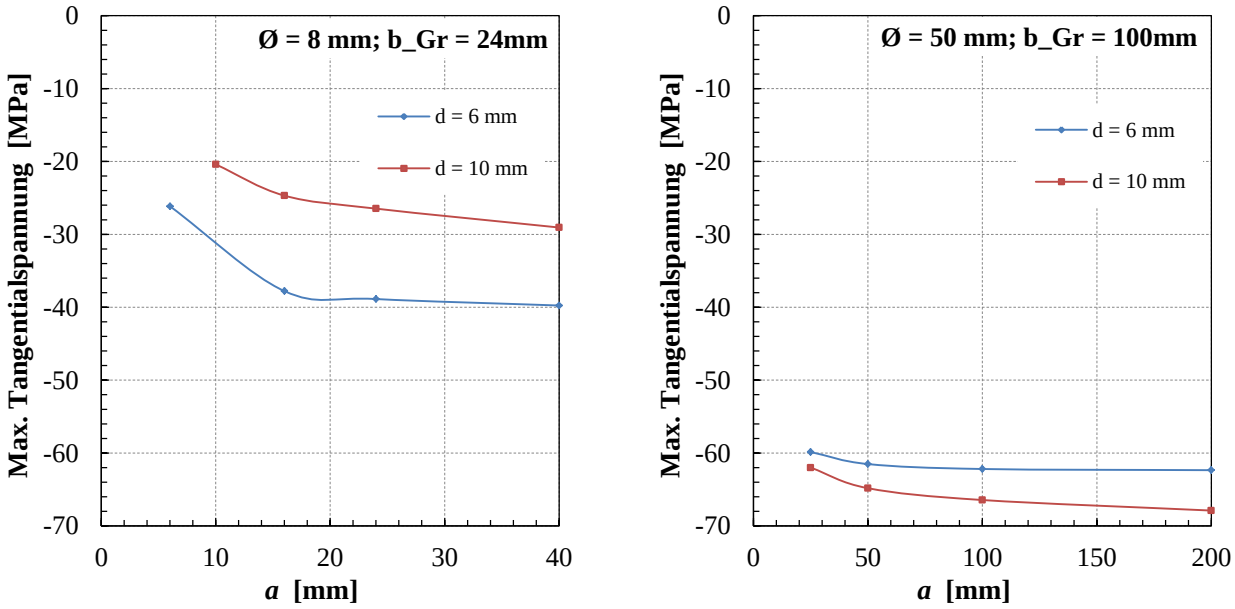


Abbildung 6.13 Maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche in Abhängigkeit des Randabstandes a und des Bohrungsdurchmessers für den jeweiligen Lochabstand b_{Gr}, – Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich, Aufheiztemperatur T_0=650°C, Umgebungstemperatur T_∞=20°C – **(links)** Ø = 8 mm; b_{Gr} = 24 mm und **(rechts)** Ø = 50 mm; b_{Gr} = 100 mm

Um die maximale Tangentialspannung, die an der Bohrungsinnenfläche im Bereich der Scheibenmitte auftritt, zu bewerten, wurde für die minimalen Rand- und Lochabstände (min a = min b) die kritische Tangentialspannung an der Bohrung mit den Spannungen in anderen Bereichen der Scheibe verglichen. In Abbildung 6.14 sind die Stellen dargestellt, die für einen Spannungsvergleich untersucht wurden.

1) Bohrungsinnenfläche – im Bereich der Scheibenmitte
2) Bohrung – im Bereich der oberen Seite der Fase
3) Kante – im Bereich der oberen Seite der Fase
4) Ungestörter Bereich

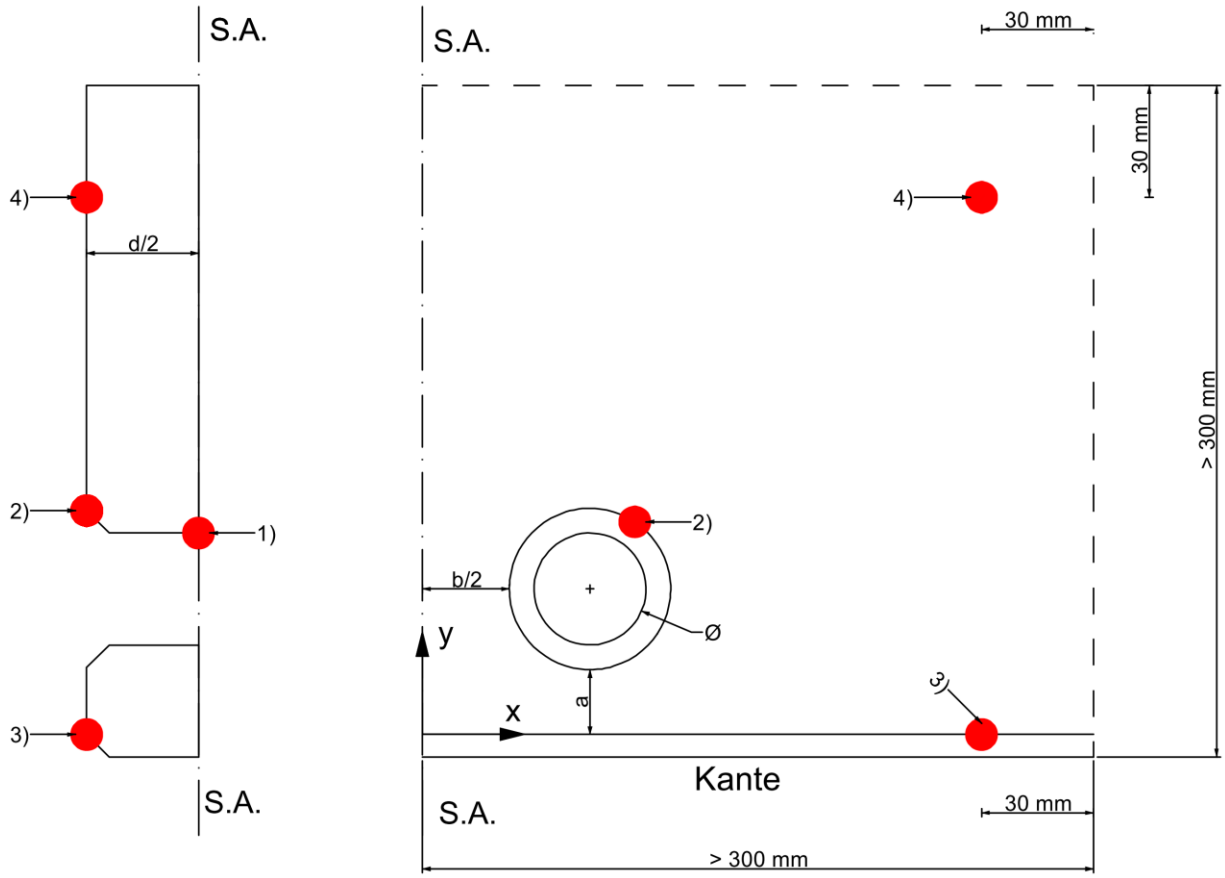


Abbildung 6.14 Untersuchte Stellen für einen Spannungsvergleich – 1) Bohrung (Innenfläche_Scheibenmitte) 2) Bohrung (Fase_Oben) 3) Kante (Fase_Oben) 4) Ungestörter Bereich (Oberfläche)

In Tabelle 6.4 sind die Spannungen an den untersuchten Stellen dargestellt.

Tabelle 6.4 Spannungen in unterschiedlichen Bereichen der Scheibe nach dem Vorspannprozess in [MPa] bei minimalen Rand- und Lochabständen min *a* und min *b* – Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich

Ø [mm]	*d* [mm]	Min *a* = Min *b* [mm]	Tangentialspannung [MPa]		σ_x [MPa]	$\sigma_x = \sigma_y$ [MPa]
			Bohrung (Innenfläche_Scheibenmitte)	Bohrung (Fase_Oben)	Kante (Fase_Oben)	Ungestört (Oberfläche)
8	6	6	-7,93	-99,10	-116,93	-104,68
	10	10	-7,21	-122,44	-136,22	-104,86
50	6	25	-56,58	-109,57	-120,21	-105,35
	10	25	-53,85	-118,56	-131,38	-103,40
100	6	50	-62,64	-110,99	-122,25	-105,41
	10	50	-63,95	-121,07	-132,05	-103,41

Die in Tabelle 6.4 aufgelisteten Spannungen sind in Abbildung 6.15 zusammengefasst.

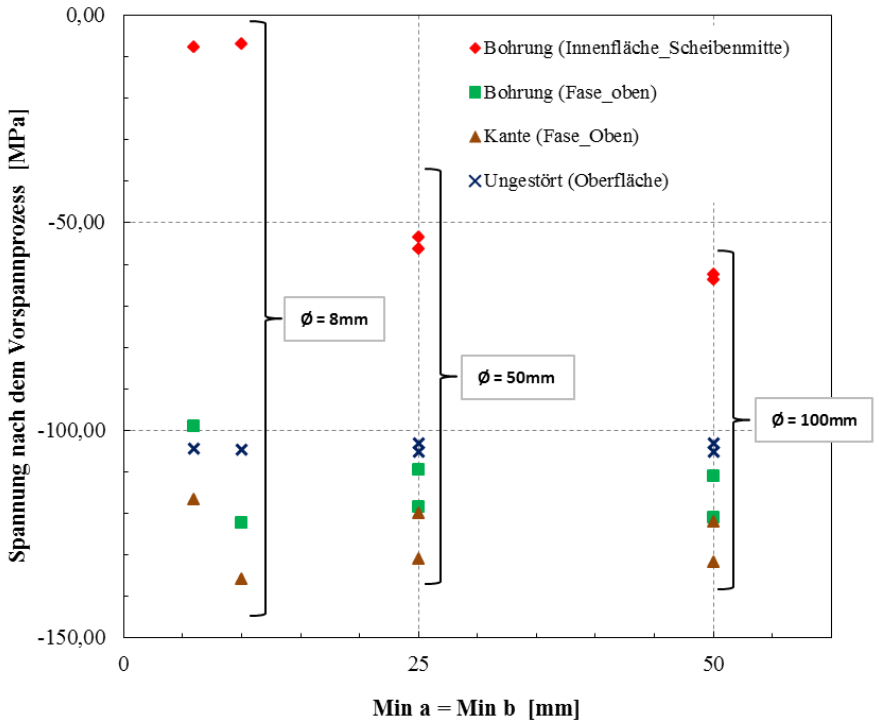


Abbildung 6.15 Vergleich der Spannungen nach dem Vorspannprozess in unterschiedlichen Bereichen der Scheibe für die Mindestabstände min *a* = min *b* – jeweils für die Dicken **d = 6 mm und d = 10 mm** und die Bohrungsdurchmesser **Ø = 8 mm, Ø = 50 mm und Ø = 100 mm** – Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich

7. Spannungsberechnung – Bohrung im Eckbereich

7.1. Vorgehensweise

Die Berechnungen wurden mit Hilfe des FE-Programms ABAQUS durchgeführt. Alle Materialeingabeparameter für die Spannungsberechnungen sowie die Werte für die Wärmeübergangskoeffizienten sind identisch mit den aus Kapitel 5. Das folgende Modell wurde zur Berechnung der Spannungen im Bereich der Bohrung im Eckbereich verwendet.

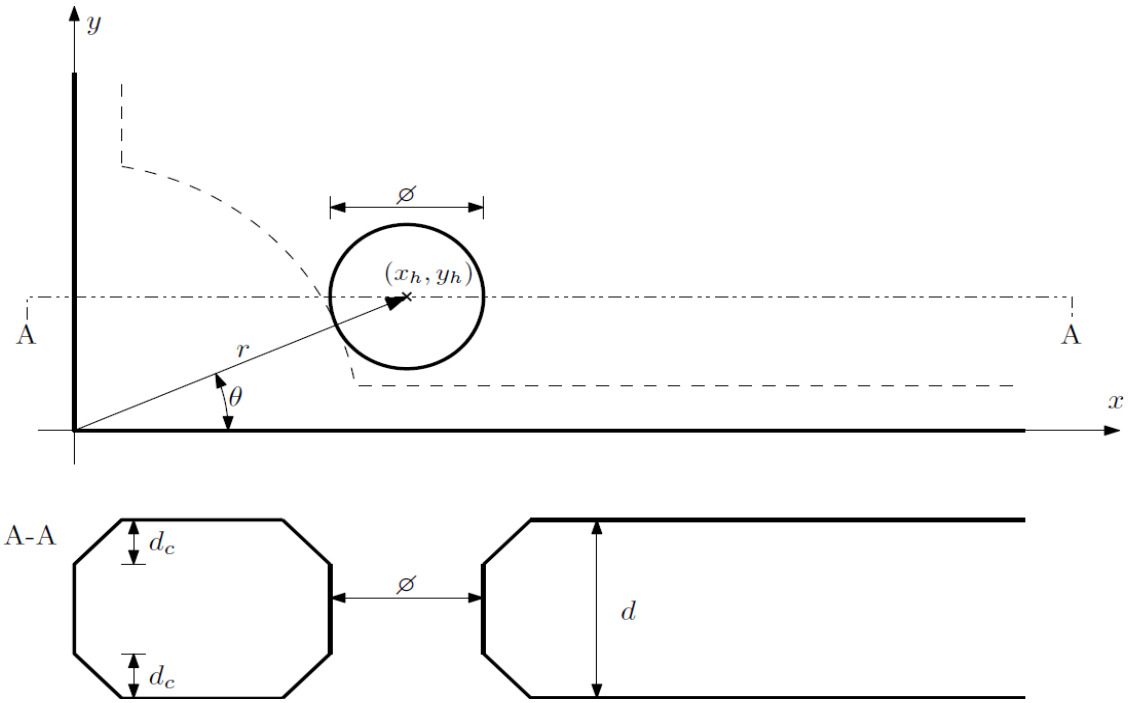


Abbildung 7.1 FE-Modell – Bohrung im Eckbereich

Die Bohrung wurde gemäß Abbildung 7.1 in den Eckbereich einer „unendlich“ ausgedehnten Scheibe positioniert. Es wurden zwei Loch-Positionen untersucht:

1. Winkel θ bleibt konstant 45° und der Abstand von der Scheibenecke zum Lochmittelpunkt r wird variiert. Dabei beginnt r mit dem minimalen Koordinatenwert des Bohrungszentrums $x_h = y_h =$ Min(a=d; a=Ø/2) und endet mit dem zulässigen Wert $r = c + Ø/2 = 6d + Ø/2$ aus DIN EN 12150-1.

2. Der Abstand r bleibt konstant und der Winkel θ wird variiert. Dabei beginnt der Winkel θ mit dem minimalen Koordinatenwert des Bohrungszentrums $x_h = y_h =$ Min{a=d; a=Ø/2} und wird auf θ=45° erhöht.

7.2. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die maximale (kritische) Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche nach dem Abkühlprozess in MPa (aus der FE-Berechnung) in Abhängigkeit des Abstandes r (Tabelle 7.1) und des Winkels θ (Tabelle 7.2) sowie des Bohrungsdurchmessers Ø und der Glasdicke d tabellarisch dargestellt. Dabei bezeichnen die negativen Werte Druckspannungen und die positiven Werte kritische Zugspannungen.

Tabelle 7.1 Maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche in [MPa] – Bohrung im Eckbereich, Winkel $\boldsymbol{\theta}$=45° Abstand r variiert, Aufheiztemperatur $\boldsymbol{T_0}$=650°C, Umgebungstemperatur $\boldsymbol{T_\infty}$=20°C

d [mm]	d_c [mm]	Ø [mm]	x_h [mm]	y_h [mm]	r [mm]	θ [deg]	St_max [MPa]	Bemerkung
6	1	8	8	8	11,31371	45	-0,912266	Min(a=d, a=Ø/2)
6	1	8	14,76142	14,76142	20,87581	45	-47,0943	
6	1	8	21,52285	21,52285	30,4379	45	-60,1876	
6	1	8	28,28427	28,28427	40	45	-65,2334	Min. Abst. nach EN12150
6	1	15	13,5	13,5	19,09188	45	-33,8345	Min(a=d, a=Ø/2)
6	1	15	19,25305	19,25305	27,22792	45	-61,6323	
6	1	15	25,0061	25,0061	35,36396	45	-70,2987	
6	1	15	30,75914	30,75914	43,5	45	-75,6036	Min. Abst. nach EN12150
6	1	50	31	31	43,84062	45	-36,8878	Min(a=d, a=Ø/2)
6	1	50	35,0445	35,0445	49,56041	45	-64,6403	
6	1	50	39,08901	39,08901	55,28021	45	-74,2355	
6	1	50	43,13351	43,13351	61	45	-80,6532	Min. Abst. nach EN12150
6	1	100	56	56	79,19596	45	-38,083	Min(a=d, a=Ø/2)
6	1	100	57,60373	57,60373	81,46397	45	-55,3949	
6	1	100	59,20746	59,20746	83,73199	45	-63,4342	
6	1	100	60,81118	60,81118	86	45	-68,919	Min. Abst. nach EN12150
10	1	8	8	8	11,31371	45	53,9511	Min(a=d, a=Ø/2)
10	1	8	20,41828	20,41828	28,87581	45	-19,1097	
10	1	8	32,83656	32,83656	46,4379	45	-39,0533	
10	1	8	45,25483	45,25483	64	45	-46,5799	Min. Abst. nach EN12150
10	1	15	15	15	21,2132	45	-2,05383	Min(a=d, a=Ø/2)
10	1	15	25,9099	25,9099	36,64214	45	-45,8853	
10	1	15	36,81981	36,81981	52,07107	45	-59,6186	
10	1	15	47,72971	47,72971	67,5	45	-64,7351	Min. Abst. nach EN12150
10	1	50	35	35	49,49747	45	-37,398	Min(a=d, a=Ø/2)
10	1	50	43,36803	43,36803	61,33165	45	-64,5231	
10	1	50	51,73605	51,73605	73,16582	45	-74,8405	
10	1	50	60,10408	60,10408	85	45	-80,4108	Min. Abst. nach EN12150
10	1	100	60	60	84,85281	45	-41,9473	Min(a=d, a=Ø/2)
10	1	100	65,92725	65,92725	93,23521	45	-62,6103	
10	1	100	71,8545	71,8545	101,6176	45	-72,7798	
10	1	100	77,78175	77,78175	110	45	-78,8761	Min. Abst. nach EN12150
15	1,5	8	8	8	11,31371	45	92,1576	Min(a=d, a=Ø/2)
15	1,5	8	27,48935	27,48935	38,87581	45	6,00567	
15	1,5	8	46,97869	46,97869	66,4379	45	-19,3802	
15	1,5	8	66,46804	66,46804	94	45	-28,4501	Min. Abst. nach EN12150
15	1,5	15	15	15	21,2132	45	41,792	Min(a=d, a=Ø/2)
15	1,5	15	32,98097	32,98097	46,64214	45	-26,0052	
15	1,5	15	50,96194	50,96194	72,07107	45	-46,315	
15	1,5	15	68,94291	68,94291	97,5	45	-53,4309	Min. Abst. nach EN12150
15	1,5	50	40	40	56,56854	45	-29,4802	Min(a=d, a=Ø/2)
15	1,5	50	53,77243	53,77243	76,04569	45	-60,5912	
15	1,5	50	67,54485	67,54485	95,52285	45	-73,0846	
15	1,5	50	81,31728	81,31728	115	45	-78,7206	Min. Abst. nach EN12150
15	1,5	100	65	65	91,92388	45	-37,1156	Min(a=d, a=Ø/2)
15	1,5	100	76,33165	76,33165	107,9493	45	-63,4014	
15	1,5	100	87,6633	87,6633	123,9746	45	-75,4569	
15	1,5	100	98,99495	98,99495	140	45	-82,0333	Min. Abst. nach EN12150

Bei den Diagrammen ist die maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche nach dem Abkühlprozess (Vertikalachse) über den variierten Abstand r (Horizontalachse) aufgetragen. Hierbei wurde der Winkel θ konstant 45° gehalten und der Abstand r variiert. Jeder Kurve ist ein Bohrungsdurchmesser Ø zu zuordnen.

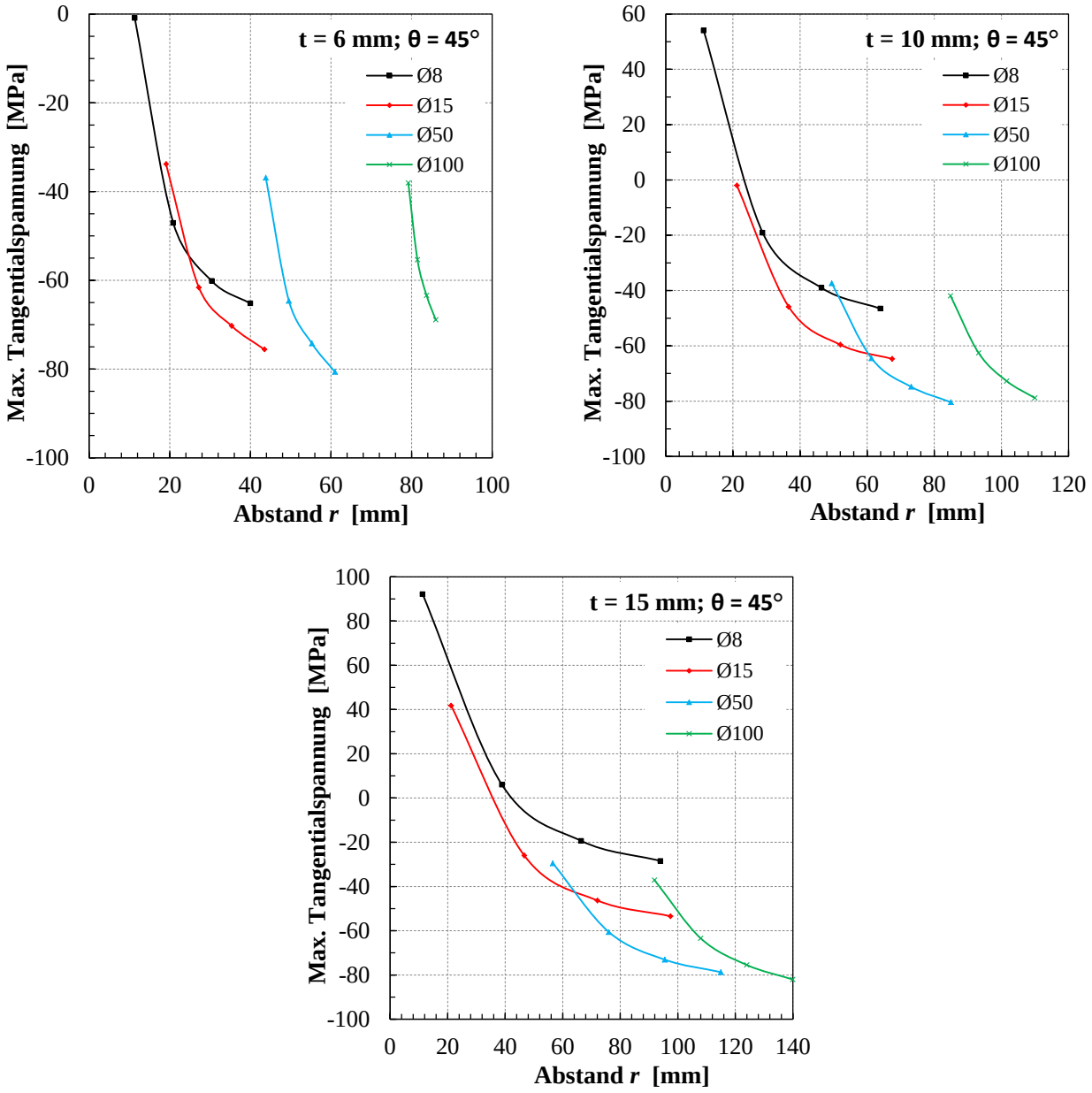


Abbildung 7.2 Maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche in Abhängigkeit des Abstandes r von der Scheibenecke bis zum Lochzentrum – Bohrung im Eckbereich, Aufheiztemperatur T_0=650°C, Umgebungstemperatur T_∞=20°C – Winkel θ=45° - Glasdicken d = 6 mm, d = 10 mm und d = 15 mm

Tabelle 7.2 Maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche in [MPa] – Bohrung im Eckbereich, Winkel variiert, konstanter Abstand *r*, Aufheiztemperatur T_0=650°C, Umgebungstemperatur T_∞=20°C

d [mm]	d_c [mm]	Ø [mm]	x_h [mm]	y_h [mm]	r [mm]	θ [deg]	St_max [MPa]	Bemerkung
6	1	8	39,19184	8	40	11,53696	-26,9435	Min(a=d, a=Ø/2)
6	1	8	36,90387	15,43064	40	22,69131	-31,8208	
6	1	8	33,22164	22,2783	40	33,84565	-33,034	
6	1	8	28,28427	28,28427	40	45	-65,2334	
6	1	15	41,35215	13,5	43,5	18,08001	-53,1404	Min(a=d, a=Ø/2)
6	1	15	38,74038	19,78466	43,5	27,05334	-61,7473	
6	1	15	35,18033	25,58504	43,5	36,02667	-63,5384	
6	1	15	30,75914	30,75914	43,5	45	-75,6036	
6	1	50	52,5357	31	61	30,54379	-54,3133	Min(a=d, a=Ø/2)
6	1	50	49,7459	35,30362	61	35,36253	-69,338	
6	1	50	46,60443	39,35768	61	40,18126	-74,3914	
6	1	50	43,13351	43,13351	61	45	-80,6532	
6	1	100	65,26868	56	86	40,62933	-45,6501	Min(a=d, a=Ø/2)
6	1	100	63,82379	57,64134	86	42,08622	-55,5405	
6	1	100	62,33764	59,24541	86	43,54311	-60,8122	
6	1	100	60,81118	60,81118	86	45	-68,919	
10	1	8	63,49803	8	64	7,180756	-5,40892	Min(a=d, a=Ø/2)
10	1	8	60,22122	21,66574	64	19,78717	-23,4019	
10	1	8	54,04083	34,28686	64	32,39359	-23,9057	
10	1	8	45,25483	45,25483	64	45	-46,5799	
10	1	15	65,81223	15	67,5	12,83959	-41,0605	Min(a=d, a=Ø/2)
10	1	15	61,87346	26,98007	67,5	23,55973	-55,0323	
10	1	15	55,775	38,01841	67,5	34,27986	-53,9929	
10	1	15	47,72971	47,72971	67,5	45	-64,7351	
10	1	50	77,45967	35	85	24,31574	-58,9034	Min(a=d, a=Ø/2)
10	1	50	72,6979	44,04561	85	31,21049	-69,8903	
10	1	50	66,88467	52,45417	85	38,10525	-73,8133	
10	1	50	60,10408	60,10408	85	45	-80,4108	
10	1	100	92,19544	60	110	33,05573	-53,2807	Min(a=d, a=Ø/2)
10	1	100	87,80696	66,25661	110	37,03715	-64,1379	
10	1	100	82,99465	72,19341	110	41,01858	-68,3528	
10	1	100	77,78175	77,78175	110	45	-78,8761	
15	1,5	8	93,65896	8	94	4,882142	16,0311	Min(a=d, a=Ø/2)
15	1,5	8	89,26927	29,44482	94	18,25476	-16,2862	
15	1,5	8	80,03878	49,29293	94	31,62738	-16,4774	
15	1,5	8	66,46804	66,46804	94	45	-28,4501	
15	1,5	15	96,33924	15	97,5	8,849883	-18,732	Min(a=d, a=Ø/2)
15	1,5	15	91,08498	34,78183	97,5	20,89992	-46,6483	
15	1,5	15	81,81673	53,03087	97,5	32,94996	-45,6311	
15	1,5	15	68,94291	68,94291	97,5	45	-53,4309	
15	1,5	50	107,8193	40	115	20,35441	-58,0823	Min(a=d, a=Ø/2)
15	1,5	50	100,9972	54,99599	115	28,5696	-71,5097	
15	1,5	50	92,10238	68,86329	115	36,7848	-71,3863	
15	1,5	50	81,31728	81,31728	115	45	-78,7206	
15	1,5	100	123,996	65	140	27,664	-52,0251	Min(a=d, a=Ø/2)
15	1,5	100	116,8213	77,15432	140	33,44267	-68,6191	
15	1,5	100	108,4593	88,52449	140	39,22133	-69,8493	
15	1,5	100	98,99495	98,99495	140	45	-82,0333	

Bei den Diagrammen ist die maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche nach dem Abkühlprozess (Vertikalachse) über den variierten Winkel θ (Horizontalachse) aufgetragen. Hierbei wurde bei jedem Bohrungsdurchmesser Ø und jeder Glasdicke d der Mindestabstand r nach DIN EN 12150-1 konstant gehalten und den Winkel θ variiert.

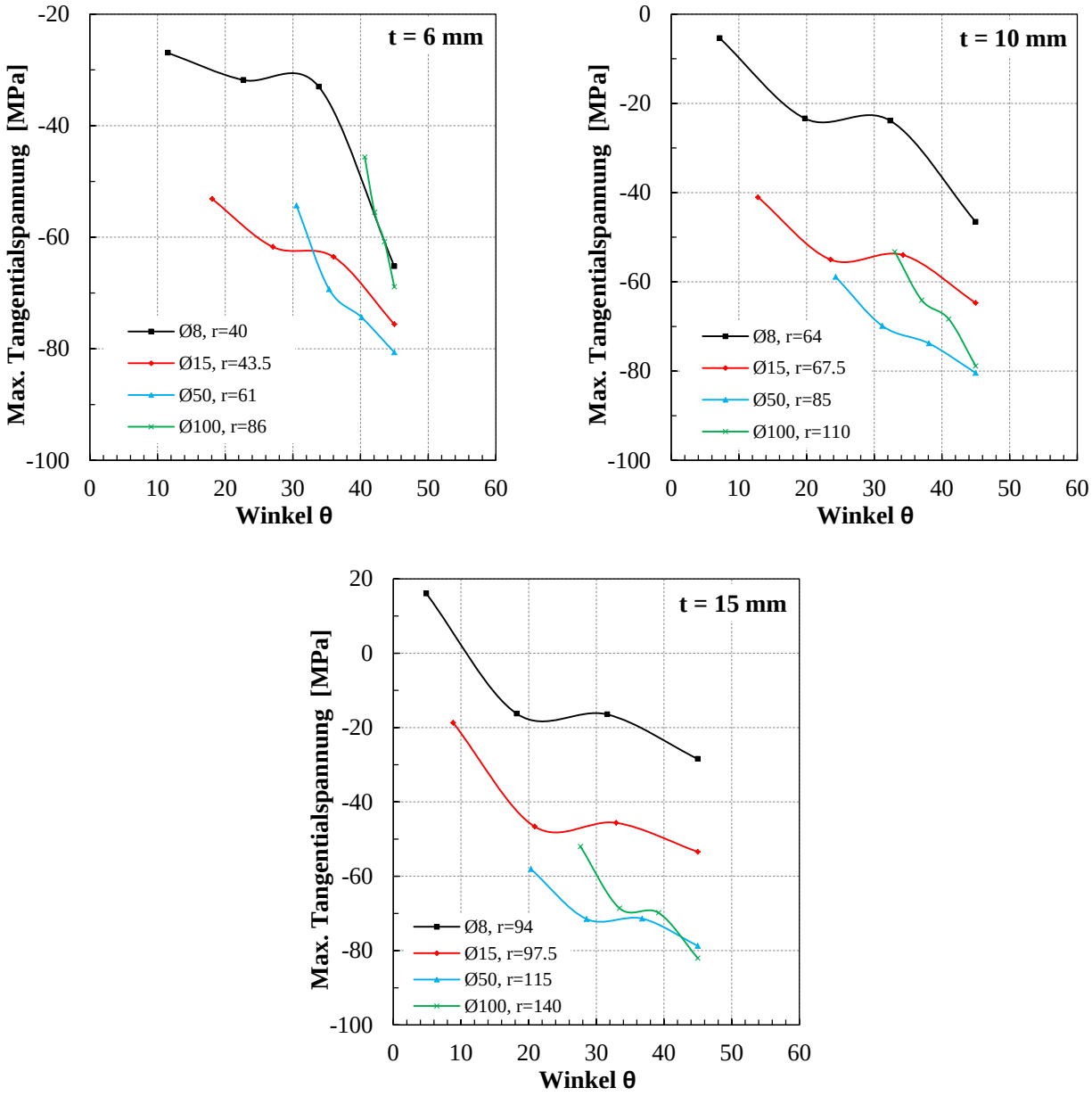


Abbildung 7.3 Maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche in Abhängigkeit des Winkels $\boldsymbol{\theta}$ – Bohrung im Eckbereich, Aufheiztemperatur $\boldsymbol{T_0}$=650°C, Umgebungstemperatur $\boldsymbol{T_\infty}$=20°C – Abstand r jeweils nach DIN EN 12150-1

8. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Forschungsvorhaben wurden durch die numerische Simulation des Abkühlprozesses beim thermischen Vorspannen die Spannungen, die sich nach dem thermischen Vorspannprozess im Bohrungsbereich eines Einscheiben-Sicherheits-Glases (ESG) aus Kalk-Natron-Silikatglas einstellen, für kreisrunde Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich sowie kreisrunde Bohrung im Eckbereich einer Glasscheibe bei ausgewählten Bohrungspositionen, Glasdicken und Bohrungsdurchmesser untersucht. Hierbei war das Ziel die in der DIN EN 12150-1 begrenzten Mindestabstände der Bohrungen zu reduzieren. Es wurden geringere Mindestabstände der Bohrungen zueinander und zur Glaskante sowie zur Ecke der Glasscheibe angesetzt als es in der DIN EN 12150-1 vorgeschrieben ist. Dabei wurde das Glas mit der Bohrung, die in einem bestimmten Abstand zum Rand bzw. zur Ecke der Scheibe positioniert wurde, numerisch auf eine Anfangstemperatur von $T_0 = 650°C$ erhitzt und in gewählten Zeitschrittweiten Δt auf einen Umgebungstemperatur von $T_\infty = 20°C$ abgekühlt. Die aus der transienten Temperaturberechnung entstehende Temperatur-Zeit-Funktion wurde in einem zweiten Schritt als äußere Belastung auf das Glas unter Berücksichtigung der viskoelastischen Eigenschaften aufgesetzt. Die maximalen Tangentialspannungen, die sich nach dem Abkühlvorgang an der Innenfläche der Bohrung einstellten, wurden in Abhängigkeit der Bohrungsposition erfasst.

Diese Tangentialspannungen befinden sich bei Bohrungen, die nebeneinander und im Kantenbereich positioniert werden, noch im Druckbereich. Bei einem Bohrungsdurchmesser von Ø=8 mm nimmt der Betrag der maximalen Tangentialspannungen an der Loch-Innenfläche zur Kante hin und bei Abnahme des Lochabstandes (b < ca. 16mm) stark ab, bleibt aber dennoch im Druckbereich (Abbildung 6.9). Für den Mindestabstand von $a=b=6$mm bedeutet dies gegenüber den in DIN EN 12150-1 zugelassenen Rand- und Lochabständen $a=b=12$mm (bei Ø=8mm; $d=6$mm) eine Abnahme der tangentialen Druckspannung um bis zu 73%.

In der DIN EN 12150-1 ist die Begrenzung der Mindestabstände der Bohrung nur von der Nenndicke d des Glases abhängig. Es werden keinerlei Begrenzungen der Mindestabstände hinsichtlich des Bohrungsdurchmessers gemacht. In diesem Forschungsvorhaben wurde dagegen der Durchmesser der Bohrung bei der Bestimmung der Mindestabstände berücksichtigt (s. Abschnitt 4.1). Deshalb sind die Mindestabstände nach DIN EN 12150-1 bei einem Bohrungsdurchmesser von Ø=50mm mit $a=b=12$mm (nach DIN EN 12150-1) kleiner als der für die Berechnung angesetzte Mindestabstand von $a=b=25$mm. Dies gilt auch für den Bohrungsdurchmesser Ø=100mm mit dem angesetzten Mindestabstand von $a=b=50$mm. Dies ergibt eine höhere tangentiale Druckspannung bei den hier berücksichtigten größeren Mindestabständen von $a=b=25$mm (bei Ø=50mm; $d=6$mm) gegenüber DIN EN 12150-1 um ca. 28%. In der folgenden Tabelle sind die Änderungen der Tangentialspan-

nung bei den hier festgelegten Mindestabständen gegenüber der in der DIN EN 12150-1 zugelassenen Mindestabstände aufgelistet.

Tabelle 8.1 Änderung der Tangentialspannung gegenüber DIN EN 12150-1 – Bohrungen nebeneinander und im Kantenbereich

Ø [mm]	*d* [mm]	HOLTGLA		DIN EN 12150-1		Änderung der Tangentialspannung gegenüber DIN EN 12150-1
		Min(a;b) [mm]	Max. Tangentialspannung im Bereich der Loch-Innenfläche [MPa]	Min(a;b) [mm]	Max. Tangentialspannung im Bereich der Loch-Innenfläche [MPa]	
8	6	6	-7,9	12	-29,6	um ca. –73%
8	10	10	-7,2	20	-25,6	um ca. –72%
50	6	25	-56,6	12	-44,1	(um ca. +28%)
50	10	25	-43,5	20	-48,8	um ca. –11%
100	6	50	-62,6	12	-45,8	(um ca. +37%)
100	10	50	-65,7	20	-51,7	(um ca. +27%)

Es konnte beobachtet werden, dass die maximale Tangentialspannung an der Loch-Innenfläche im Bereich der Scheibenmitte auftritt (Abschnitt 6.2). Dies könnte bei Scheiben, die unter globaler Zugbeanspruchung stehen durch Überlagerung der Spannungen im Bohrungsbereich zum Überschreiten der Zugfestigkeit führen. Die baupraktisch reale Beanspruchung ist jedoch Biegung (durch Wind- oder Schneelast). Bei reiner Biegebeanspruchung ist die Spannung in der Scheibenmitte Null und die maximale Druck-/Zugspannung tritt jeweils an den Oberflächen auf.

Nach DIN EN 12150-1 darf der Bohrungsdurchmesser nicht kleiner als die Glasdicke sein. Diese Begrenzung wurde hier nicht berücksichtigt. Die maximalen Tangentialspannungen werden ebenso von der Glasdicke und dem Bohrungsdurchmesser beeinflusst. So entstehen bei kleineren Bohrungsdurchmessern (Ø=8mm) betragsmäßig kleinere Tangentialdruckspannungen im Bohrungsbereich als bei größeren Durchmessern (Ø=100mm).

- Einfluss vom Randabstand *a* auf die Tangentialspannungen im Bohrungsbereich:

Bei einem Bohrungsdurchmesser von 8 mm entstehen desto größere tangentiale Druckspannungen je größer der Randabstand *a* gewählt wird, siehe Abbildung 6.9. Dieser Effekt wurde ebenso bei dem Bohrungsdurchmesser von 50 mm beobachtet. Bei dem größeren Durchmesser von 100 mm konnte der Randeinfluss aus den Berechnungen nicht eindeutig erkannt werden. Der Randabstand *a* hat bei einem Bohrungsdurchmesser von 8 mm ab einem Wert von $a \geq$ ca. 16 mm und bei einem

Bohrungsdurchmesser von 50 mm ab einem Wert von $a \geq$ ca. 100 mm keinen signifikanten Einfluss auf die Spannungsentwicklung an der Loch-Innenfläche im Bereich der Scheibenmitte (Abbildung 6.13). Um den Randeffekt besser bewerten zu können, müssten weitere Berechnungen durchgeführt werden, bei denen der Lochabstand b konstant gehalten wird und der Randabstand a variiert wird.

- Einfluss vom Abstand b zweier Bohrungen zueinander auf die Tangentialspannungen im Bohrungsbereich:

Bei einem Bohrungsdurchmesser von 8 mm hat der Lochabstand b ab einem Grenzwert von $b_{Gr} \geq$ ca. 16 mm keinen signifikanten Einfluss mehr auf die Entwicklung der Tangentialspannungen an der Loch-Innenfläche. Dieser Grenzwert beträgt bei einem Bohrungsdurchmesser von 50 mm $b_{Gr} \geq$ ca. 24 mm. Bei kleineren Lochabständen nimmt die tangentiale Druckspannung stark ab. Bei einem Bohrungsdurchmesser von 50 mm und einer Glasdicke von 10 mm ergibt die Reduzierung des Lochabstandes b von 50 mm auf 25 mm eine Abnahme der maximalen tangentialen Druckspannung an der Loch-Innenfläche um ca. 20 MPa. Bei einem Bohrungsdurchmesser von 100 mm wurde eine solche Grenze nicht beobachtet. Dafür müsste der für die Berechnungen festgelegte Wertebereich des variierten Lochabstandes b größer gewählt werden. In Tabelle 6.3 sind die Grenzwerte für den Lochabstand b und die Abnahme der tangentialen Druckspannung bei der Reduzierung des Lochabstandes auf die in Tabelle 4.1 ermittelten Mindestabstände dargestellt.

Die Reduzierung des nach DIN EN 12150-1 begrenzten Mindestabstandes einer Bohrung zur Ecke verschlechtert die Spannungssituation im Bohrungsbereich. Wie in Tabelle 8.2 dargestellt, entstehen bei der Reduzierung des Abstandes r (Scheibenecke-Bohrungszentrum) bei konstant bleibendem Winkel $\theta = 45°$ (s. Abbildung 7.1) kleinere Tangentialspannungen im Bohrungsbereich als nach DIN EN 12150-1. In einigen Fällen entstehen sogar tangentiale Zugspannungen an der Loch-Innenfläche nach dem Abkühlprozess. Und selbst in den anderen Fällen entstehen bei den hier angesetzten Mindestabständen um bis zu ca. 100% kleinere Tangentialspannungen an der Loch-Innenfläche gegenüber den Mindestabständen nach DIN EN 12150-1. In Tabelle 8.2 ist die Änderung der Tangentialspannung bei den hier bestimmten Mindestabständen gegenüber der in der DIN EN 12150-1 zugelassenen Mindestabstände aufgelistet.

Tabelle 8.2 Änderung der Tangentialspannung gegenüber DIN EN 12150-1 – Bohrung in der Ecke – variabler Abstand *r* (s. Abbildung 7.1), Winkel θ=45°

Ø [mm]	*d* [mm]	HOLTGLA		DIN EN 12150-1		Änderung der Tangentialspannung gegenüber DIN EN 12150-1
		Min *r* [mm]	Max. Tangentialspannung im Bereich der Loch-Innenfläche [MPa]	Min *r* [mm]	Max. Tangentialspannung im Bereich der Loch-Innenfläche [MPa]	
8	6	11,314	-0,9	40	-65,2	um ca. –99%
8	10	11,314	+54,0	64	-46,6	Zugspannung
8	15	11,314	+92,2	94	-28,5	Zugspannung
15	6	19,092	-33,8	43,5	-75,6	um ca. –55%
15	10	21,213	-2,1	67,5	-64,7	um ca. –97%
15	15	21,213	+41,5	97,5	-53,4	Zugspannung
50	6	43,841	-36,9	61	-80,7	um ca. –54%
50	10	49,497	-37,4	85	-80,4	um ca. –53%
50	15	56,569	-29,5	115	-78,7	um ca. –63%
100	6	79,196	-38,1	86	-68,9	um ca. –45%
100	10	84,853	-41,9	110	-78,9	um ca. –47%
100	15	91,924	-37,2	140	-82,0	um ca. –55%

Die Reduzierung der in DIN EN 12150-1 festgelegten Mindestabstände der Bohrungen in Einscheiben-Sicherheitsgläsern ist bei einer Beanspruchung, die zur Lochleibung führt, nicht empfehlenswert, da die tangentiale Druckspannung an der Loch-Innenfläche im Bereich der Scheibenmitte bei allen berechneten Modellen weit unterhalb der Druckspannung im ungestörten Bereich (ca. 100 MPa) an der Oberfläche liegt. Bei einigen Modellen tritt nach dem Abkühlprozess sogar Zugspannung auf. Jedoch ist die Biegebeanspruchung, resultierend aus Eigengewicht, Wind und/oder Schnee, die in Hochbau übliche Beanspruchung für Scheiben. Hierbei sind die Oberflächen einer Scheibe, bei der Annahme von Theorie I. Ordnung, die höchst beanspruchten Stellen und nicht die Scheibenmitte (s. Abbildung 2.3). Die Untersuchungen ergaben für die in Abbildung 6.14 untersuchten Bereiche an der Oberfläche, dass die Druckspannung an diesen Stellen höher als 100 MPa ist (Abbildung 6.15). Damit könnte der Festigkeitszuwachs durch das thermische Vorspannen für die untersuchten Bereiche an der Scheibenoberfläche, unbeeinflusst von der Reduzierung der Mindestabstände in DIN EN 12150-1 auf die in diesem Forschungsvorhaben festgelegten Werte, weiterhin bestehen.

Weitergehende Untersuchungen im Vergleich mit den Vorgaben der DIN 18008 (Mindestabstand $a = b = 80$ mm) sind notwendig, um klären zu können, ob eine Reduzierung des Abstandes für den konstruktiven Einsatz von Glas möglich ist und dabei immer noch die charakteristische Festigkeit des Glases für eine Bemessung nach DIN 18008 erreicht werden kann.

9. Literaturverzeichnis

[1] H. SCHOLZE, *Glas - Natur, Struktur und Eigenschaften*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1988.

[2] J.-D. WÖRNER, J. SCHNEIDER, und A. FINK, *Glasbau Grundlagen, Berechnung, Konstruktion*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.

[3] J. SCHNEIDER, *Festigkeit und Bemessung punktgelagerter Gläser und stoßbeanspruchter Gläser*, Nr. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2001.

[4] J. H. NIELSEN, *Tempered Glass: Bolted Connections and Related Problems*, Nr. PhD Thesis. Technical University of Danmark, 2009.

[5] *ANSYS Inc.* Ansys 16.0, 2015.

[6] F. BERNARD und L. DAUDEVILLE, „Point fixings in annealed and tempered glass structures: Modeling and optimization of bolted connections“, *Eng. Struct.*, Bd. 31, Nr. 4, S. 946–955, 2009.

[7] ANSYS, *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*, Bd. 3304, Nr. April. 2009, S. 724–746.

[8] A. ARONEN und R. KARVINEN, „Explanation for Edge Bending of Glass in Tempering Furnace“, *Glas. Perform. Days 2009*, S. p.: 575 – 579, 2009.

[9] O. S. Narayanaswamy, „A Model of Structural Relaxation in Glass“, *J. Am. Ceram. Soc.*, Bd. 54, Nr. 10, S. 491–498, 1971.

[10] *DIN EN 12150-1 Glas im Bauwesen - Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas - Teil 1: Definition und Beschreibung.* 2014.

Darmstadt, 08.02.2016

Prof. Dr.-Ing. J. Schneider	Dr. Jens Nielsen	Dipl.-Ing. Navid Pourmoghaddam