

**Systematische Untersuchungen der Eigenspannungs-
verteilung in thermisch vorgespannten Gläsern
im Hinblick auf die Flächenfestigkeit, die Kantenfestigkeit
und die Festigkeit im Bereich der Lochränder bei
punktgestützten Glasscheiben**

T 2772

T 2772

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

1998, ISBN 3-8167-4946-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail irb@irb.fhg.de

URL <http://www.irb.fhg.de>

Forschungsbericht Lehrstuhl für Stahlbau der RWTH Aachen

Forschungsvorhaben

Systematische Untersuchung der Eigenspannungsverteilung in thermisch vorgespannten Gläsern im Hinblick auf die Flächenfestigkeit, die Kantenfestigkeit und die Festigkeit im Bereich der Lochränder bei punktgestützten Glasscheiben

Forschende Stelle

Bearbeitung: Dipl. Ing. W. Laufs

Anschrift: Prof. Dr. Ing. G. Sedlacek
Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohr-Straße 1
52074 Aachen

Telefon: 0241/805177

Zusammenfassung

Die Größe und Verteilung der thermischen Vorspannung muß für die verschiedenen Bereiche (Plattenfläche, Kante, Ecke und Loch) gesondert untersucht werden. Nur für die Plattenmittelfläche sind die Spannungen richtungsunabhängig, während sie für alle anderen Bereiche ihre Richtung und Größe ändern. Die bekannte Spannungsparabel über die Glasdicke ist nicht mehr ohne weiteres gültig. Dies hat unmittelbar Einfluß auf die Wirkung der schützenden Druckvorspannung an den Oberflächen, die im wesentlichen eine Sicherheit gegen Versagen infolge äußerer Lasten sicherstellen muß.

Das am Lehrstuhl für Stahlbau der RWTH Aachen entwickelte Programm Thervo Pro ermöglicht erstmals die qualitative Ermittlung der thermischen Vorspannung für alle Stellen der Glasscheibe. Es können durch FEM- Simulation alle Ofenparameter beim Vorspannprozeß auf ihren Einfluß hin beobachtet werden.

Entscheidend für den Nachweis der thermischen Vorspannung sowohl beim Hersteller als auch auf der Baustelle sowie für wissenschaftliche Grundlagenuntersuchungen sind die optischen Meßverfahren. Sie ermöglichen eine zerstörungsfreie Messung der Spannungen. Auftretende Inhomogenitäten, Größe und Richtung der thermisch eingepprägten Spannungen sind meßbar, Einscheibensicherheitsgläser (ESG) sind im Detail analysierbar. Am Beispiel des Kantenspannungsgeräts nach der Methode von Sénarmont wird die Handhabung und Wirkungsweise beschrieben.

Inhaltsverzeichnis		Seite
	Zusammenfassung	1
	Inhaltsverzeichnis	2
1	Einleitung	3
2	Der Baustoff Glas	6
3	Die Entstehung der thermischen Vorspannung	9
4	Simulation des Vorspannprozesses mittels Finite-Elemente-Methode	10
	Die Plattenfläche	12
	Die Plattenkante	13
	Die Plattenecke	15
	Das Plattenloch	18
5	Spannungsoptische Verfahren	22
6	Optische Meßergebnisse an der Kante	24
	6.1 Gerätebeschreibung und Versuchsaufbau	24
	6.2 Versuchsdurchführung	26
	6.3 Versuchsauswertung	28
	6.4 Beispiel	29
7	Parameterstudien	30
8	Zusammenfassung und Ausblick	32
	Anhang	

1 Einleitung

Thermisch vorgespannte Gläser, die sogenannten Einscheiben-Sicherheits-Gläser (ESG), haben den Einsatz von Glas als Baustoff entscheidend erweitert. In der jüngsten Entwicklung können große Glasscheiben ohne Rahmenhilfskonstruktionen verwendet werden, da die Last direkt über sogenannte Punkthalter aufgenommen wird, die in ein meist konusförmig ausgebildetes Loch greifen. Bild 1 zeigt den Bauzustand der vollverglasten Zentralhalle der neuen Leipziger Messe mit derartig konstruierten Punkthaltern.

Definition: Thermisches Vorspannen von Glas bezeichnet den Prozeß der Temperaturbehandlung einer Glasscheibe, die über ihre Transformationstemperatur hinaus erwärmt und anschließend von der Oberfläche her rasch abgekühlt wird. Dabei wird an der Oberfläche eine Druckspannung eingepreßt, die im Innern des Glaskörpers mit einer Zugspannungszone im Gleichgewicht steht.

Die Spannungsverteilung in thermisch vorgespanntem Glas ist hinsichtlich ihrer Größe und Hauptspannungsrichtungen bisher nur für den Bereich der Plattenfläche bekannt, wobei theoretisch von der unendlich ausgedehnten Platte ausgegangen wird, deren Vorspannprofil sich zweidimensional verhält und über die Dicke d ein parabolisches Profil aufweist (Verhältnis Oberflächendruckspannung zu Zugspannung in Mittelebene = 2 : 1).

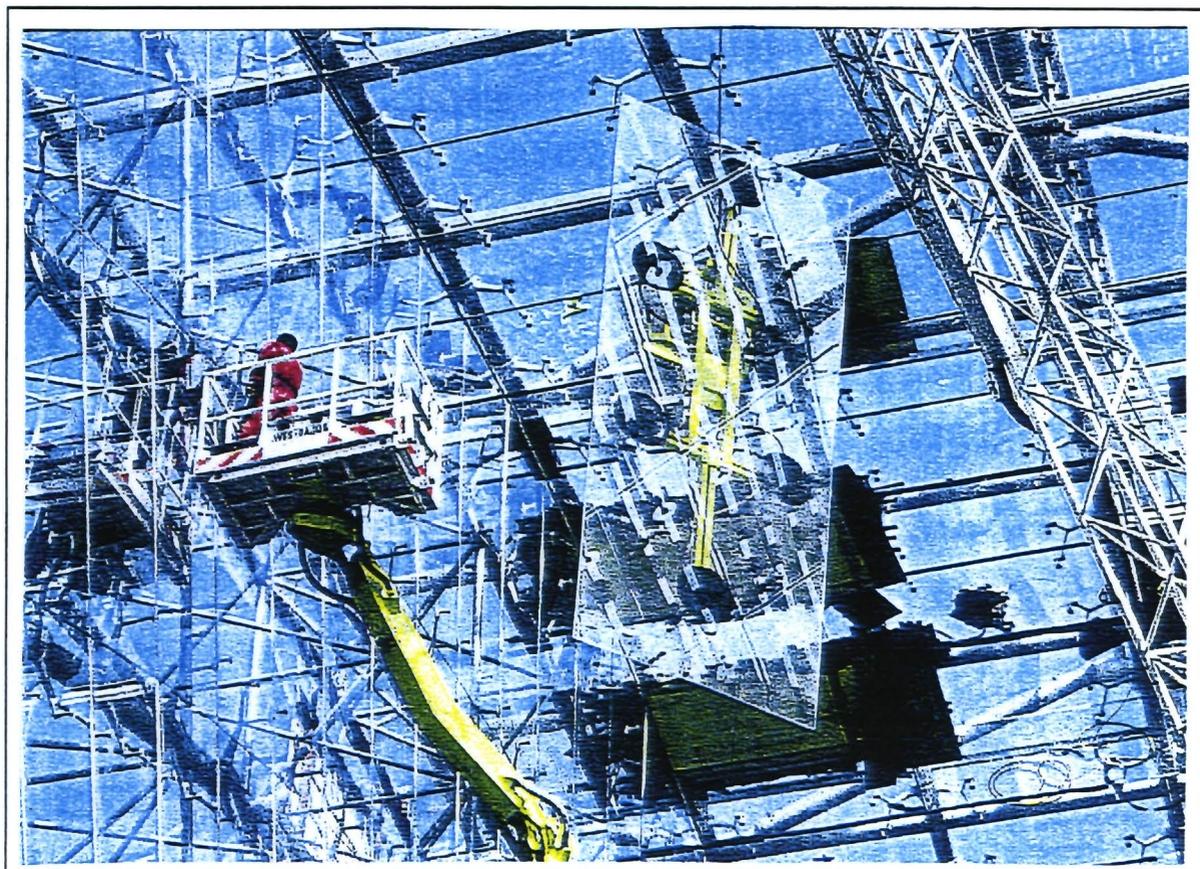


Bild 1: Bauzustand Messehalle Leipzig, punktgehaltenes ESG

An den Scheibenkanten und Ecken sowie im Bereich von Lochbohrungen stellen sich aber dreidimensionale Eigenspannungszustände infolge thermischer Vorspannung mit wechselnder Größe und Richtung ein, die insbesondere für die Praxis von großem Interesse sind, da bei Beanspruchung ein Versagen an der Kante und im Bereich von Lochbohrungen auftritt, indem die oberflächennahe, schützende Druckvorspannung durch Zug überschritten wird und ein schlagartiges Versagen durch Sprödbruch eintritt. Theoretische Untersuchungen für diese Zonen der Glasscheiben sind bisher nicht veröffentlicht, so daß optische Meßverfahren eingesetzt werden, um die thermische Vorspannung zu ermitteln.

Gegenstand der Untersuchungen ist die Auswirkung des thermischen Vorspannprozesses auf alle Bereiche der Glasscheibe, die sich aus dem Flächenbereich, der Kante, der Ecke und dem Loch additiv zusammensetzt (Bild 2).

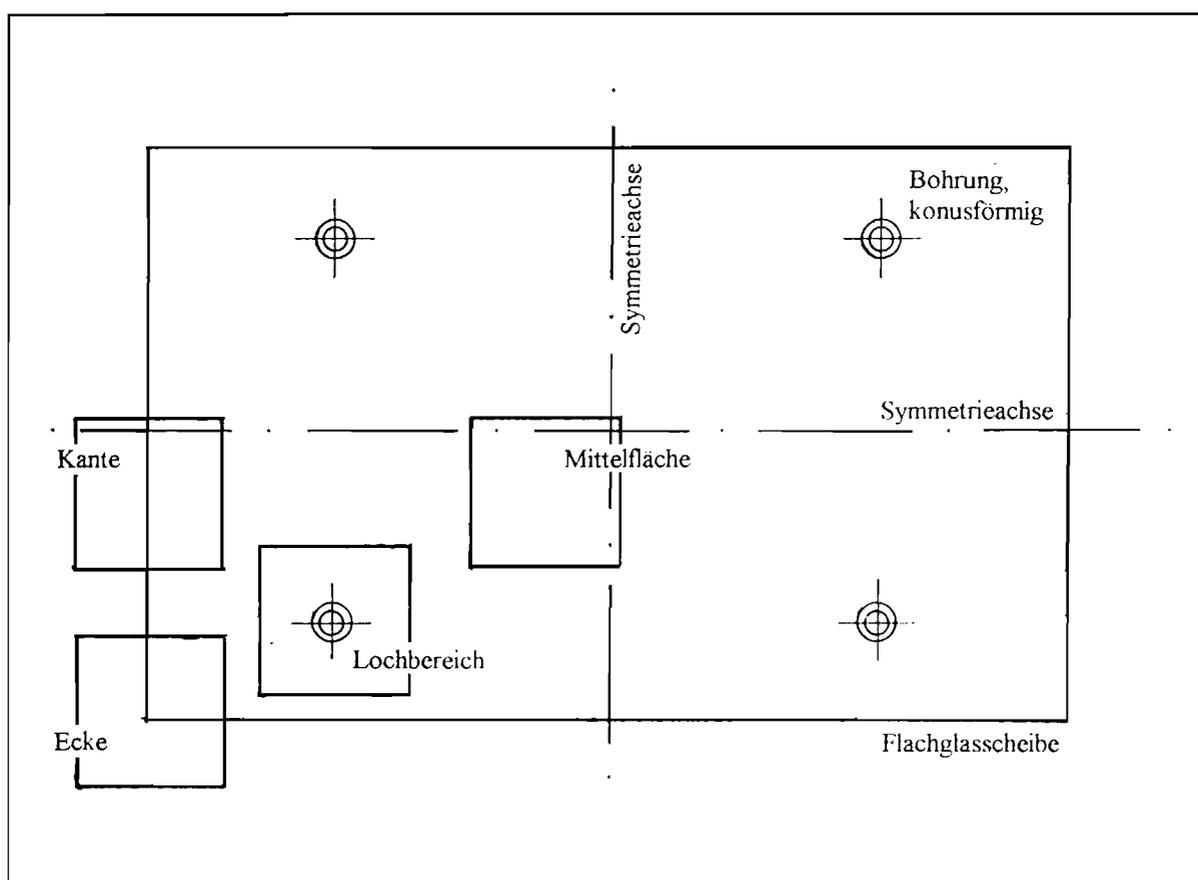


Bild 2: Grundriß und relevante Teilbereiche der Glasscheibe

Die Kenntnis der vier skizzierten Teilbereiche einer Glasscheibe reicht aus, um die Verhältnisse der thermischen Vorspannung im Glas vollständig zu beschreiben: In hinreichendem Abstand von der Ecke baut sich zu beiden Seiten hin das Vorspannprofil der Kante auf, welches sich mit wachsendem Abstand von den Kanten zur Mitte der Platte hin durch das Vorspannprofil der Mittelfläche beschreiben läßt. Auch der Sonderausschnitt "Lochbereich" (entweder rein zylindrisch ausgeführt oder konisch) geht ab einem gewissen Abstand in den Bereich der Mittelfläche bzw. der Kante über.

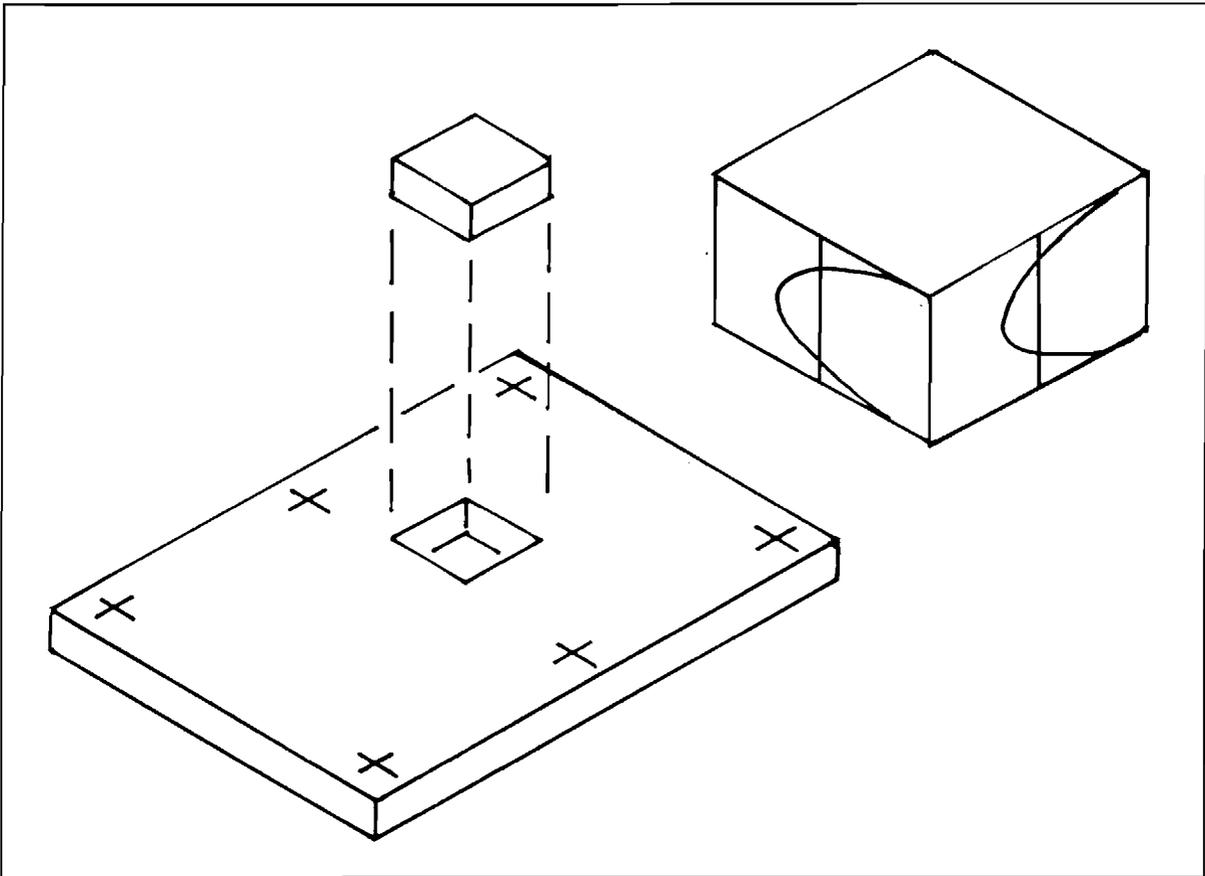


Bild 3: Thermisches Vorspannprofil der Mittelfläche

Während das Vorspannprofil der Mittelfläche einer thermisch vorgespannten Glasplatte bekannt ist (Bild 3), sind in der Literatur bisher keine Publikationen für die Bereiche der Kante, Ecke und des Lochs veröffentlicht. Es ergeben sich folgende Fragen:

Wie groß sind die Oberflächendruckspannungen an der Kante, Ecke und am Loch?
(Grundlagenforschung)

Wie verläuft die Richtung der Hauptspannungen an der Kante, Ecke und am Loch?
(Hauptspannungstrajektorien)

Wie beeinflusst der thermische Vorspannprozeß die Größe der Oberflächendruckspannungen? (Parameterstudien)

Wie können die im Glas vorhandenen thermischen Spannungen optisch nachgewiesen werden? (Meßverfahren)

Welche Anforderungen ergeben sich an die Normung und Qualitätskontrolle?
(Sicherheit beim Bauen mit Glas)

2 Der Baustoff Glas

Die Bruchfestigkeit von Glas ist keine Materialkonstante, sondern wird überwiegend durch den Zustand seiner Oberfläche bedingt. Diese ist generell durch kleine äußere Fehlstellen und Verletzungen gekennzeichnet, während im Innern des Materials ein vollkommen fehlerfreier Bereich vorliegt (Bild 4). Die theoretische Festigkeit, die durch atomare Bindungskräfte innerhalb des chemischen Gitters beschrieben ist, wird durch oberflächennahe Defekte relativiert. Tiefe und geometrische Form von Rissen verursachen bei Belastung lokale Spannungsspitzen, die zum Sprödbruch führen.

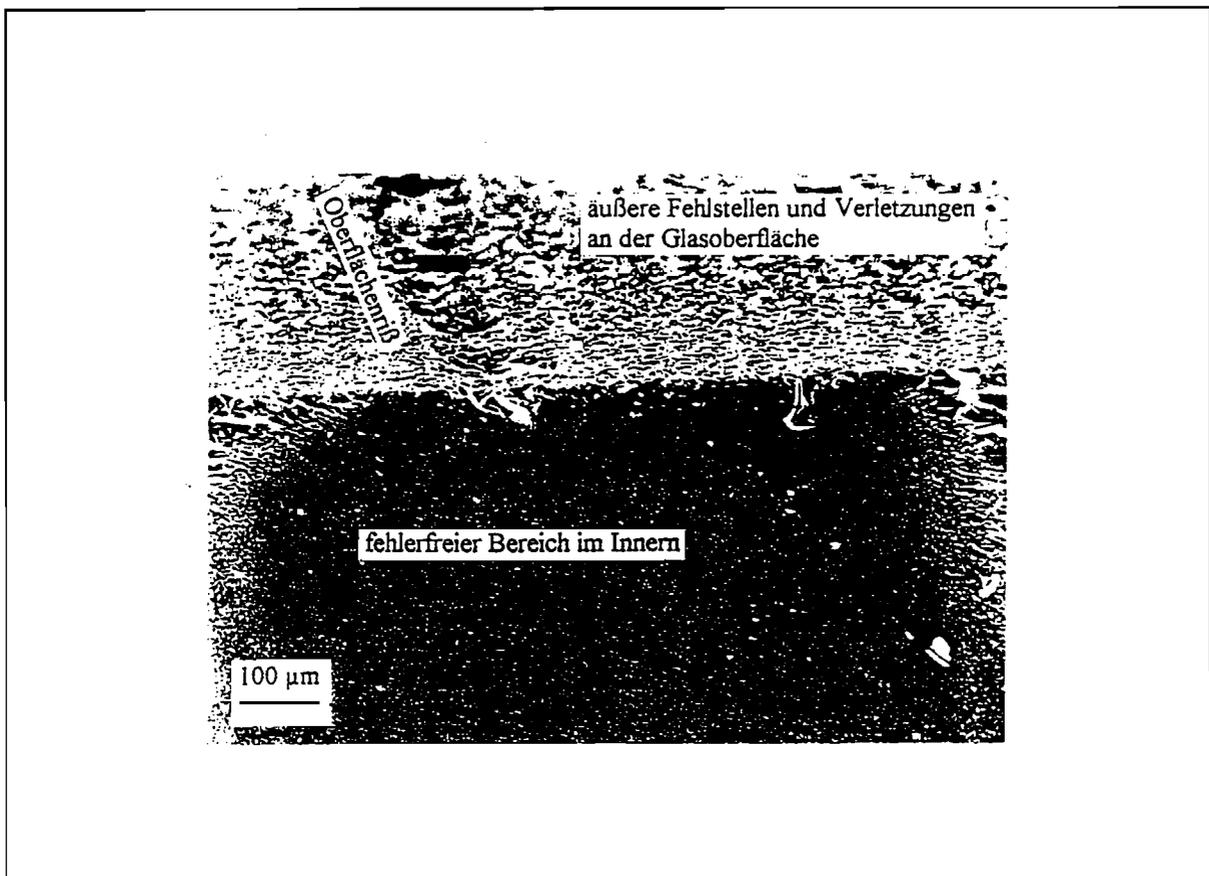


Bild 4: Schnitt durch die raue Glasoberfläche mit Riß

Deutlich erkennbar in Bild 4 ist die raue Oberflächenstruktur des Glases. In der linken, oberen Hälfte der Abbildung ist eine Rißstruktur zu erkennen, die sich an der Oberfläche entlangzieht. Bei Belastung auf Zug verursacht ein derartiger Riß an seinem Kerbgrund eine Spannungsspitze, die einen Sprödbruch verursacht, sofern dort die Zugfestigkeit überschritten wird.

Im Unterschied zu duktilen Werkstoffen (z. B. Stahl) können lokale Spannungsspitzen bei Glas nicht durch örtliches Plastifizieren abgebaut werden, so daß bei Erreichen der Glaszugfestigkeit ein spontaner Bruch auftritt.

Daraus ergibt sich die grundsätzliche Wirkungsweise der thermischen Vorspannung wie folgt: Oberflächendefekte werden durch eine thermisch eingeprägte Glasdruckspannung überdrückt, so daß ein Aufreißen der Oberflächenrisse verhindert wird. Diese Oberflächendruckspannung steht mit einer Zugspannung im Glasinnern der Glasplatte im Gleichgewicht. Das Innere der Glassubstanz ist homogen und fehlerfrei, so daß dort keine Spannungsspitzen infolge von Mikrorissen auftreten. Die theoretisch sehr hohe Materialfestigkeit ist voll aktivierbar und die inneren Zugspannungen führen nicht zu Versagen.

Bei äußerer Belastung etwa durch Biegung (Bild 5) kann die Belastung so lange gesteigert werden, bis die Zugspannung infolge Biegung auf einer Seite des Glases die schützende thermische Druckvorspannung überschreitet und sich die Risse wieder öffnen können. Erst dann kommt es zum Spröbruch. Es darf auch nach Überschreiten der thermischen Druckspannung an der Oberfläche noch ein gewisser Zugfestigkeitswert des Glases angesetzt werden, der berücksichtigt, daß das normale Floatglas etwas Zug an der Oberfläche verträgt, ehe es versagt.

Dabei sind allerdings festigkeitsmindernde Einflüsse (Belastungsdauer und -geschwindigkeit, Umgebungsbedingungen, Größe und Beschaffenheit der Oberfläche etc.) zu berücksichtigen. Im derzeit genormten Zweipunktbiegeversuch (DIN 52 303, Teil1) wird demnach nicht allein die thermische Druckvorspannung ermittelt, sondern nur die Summe aus thermischer Druckvorspannung und Floateigenfestigkeit an der Glasoberfläche. Diese Floateigenfestigkeit ist kurzfristig relativ hoch, also nicht direkt mit dem Baustellenzustand vergleichbar.

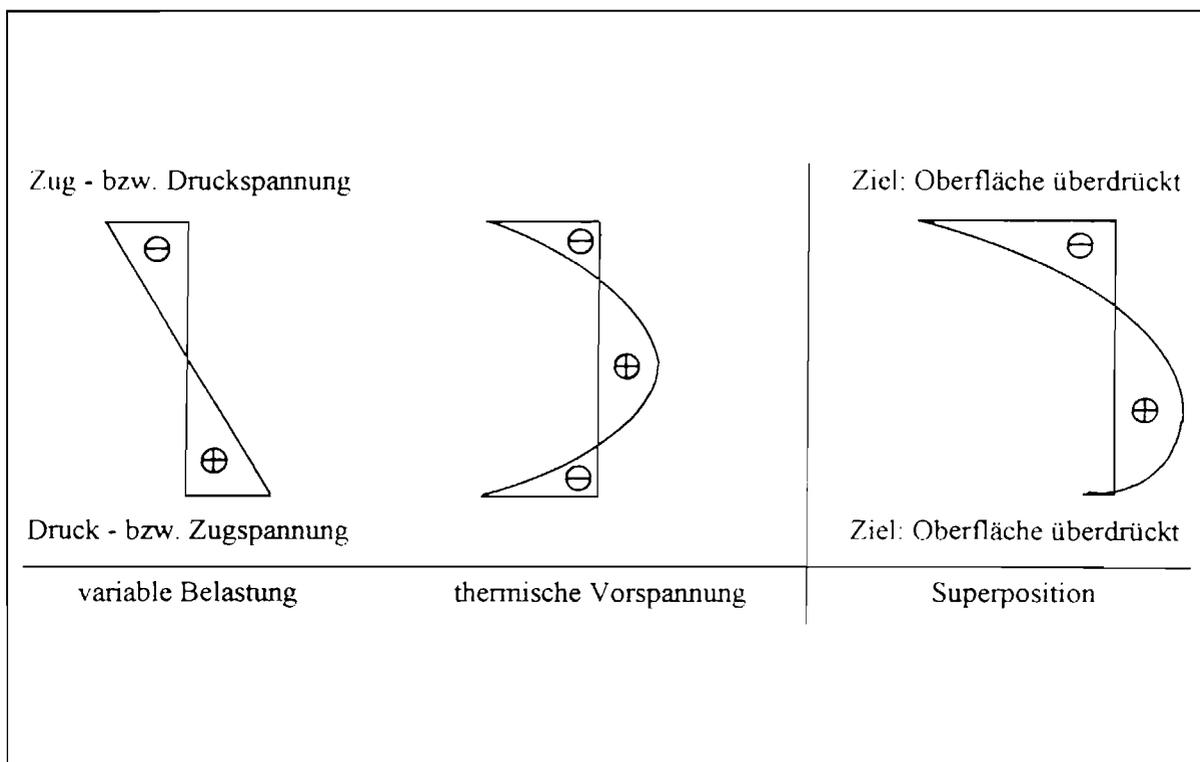


Bild 5: Superposition der thermischen Vorspannung mit einer Biegebeanspruchung

Wird eine Glasscheibe z. B. infolge Biegung bereichsweise auf Zug beansprucht, so werden die Oberflächenrisse geöffnet. Dadurch erfolgt an dieser Stelle des Querschnitts eine Umverteilung der Zugspannungen auf einen geringeren Querschnitt. Die Konzentration dieser Zugbeanspruchung nahe der Rißspitze fördert das Rißwachstum und erwirkt letztlich das Versagen der gesamten Scheibe, da das innere Gleichgewicht der thermischen Vorspannung aufgehoben wird und die hohe innere Energie des ESG überall Risse erzeugt.

Der Mechanismus des Versagens ist schematisch in Bild 6 dargestellt. Dabei wird deutlich, daß an allen Oberflächen Risse thermisch überdrückt werden müssen, um Rißwachstum zu vermeiden. Insbesondere an der Kante und im Bereich der Lochbohrungen ist eine thermische Oberflächendruckspannung einzuprägen, da dies durch äußere Belastung besonders hoch beanspruchte Teilbereiche des Glases sind.

Das Zusammenwirken von Zugbeanspruchung und Oberflächenfehlstelle führt bei normalem Floatglas zum Bruch. Der Ort des Glasversagens muß nicht notwendigerweise mit der Stelle der maximalen Beanspruchung aus Schnittgrößen zusammenfallen, wird aber durch große Belastungen begünstigt, die insbesondere im Lochbereich der Glasplatten auftritt. Hohe Druckspannungen im Glas führen nicht zum Bruch (Glas sehr druckfest), müssen aber auf zugerzeugende Sekundäreffekte (Knicken) untersucht werden.

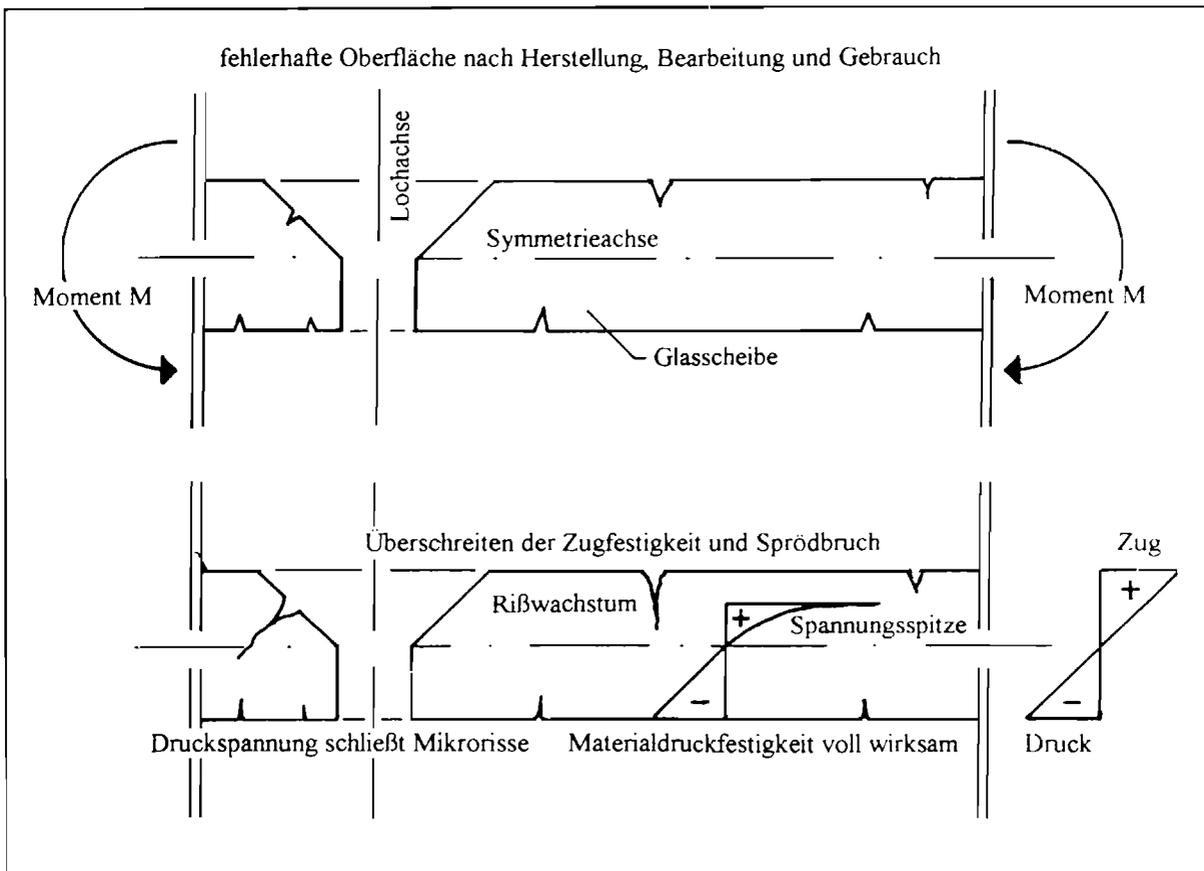


Bild 6: Versagensmechanismus einer biegebeanspruchten Glasscheibe

3 Die Entstehung der thermischen Vorspannung

Im folgenden soll erläutert werden, wie normale Floatglasscheiben industriell vorgespannt werden und welche qualitativen Vorgänge schließlich dazu führen, daß an den Glasscheibenoberflächen eine Druckspannung entsteht, die mit einer Zugspannungszone im Gleichgewicht steht (Bild 7).

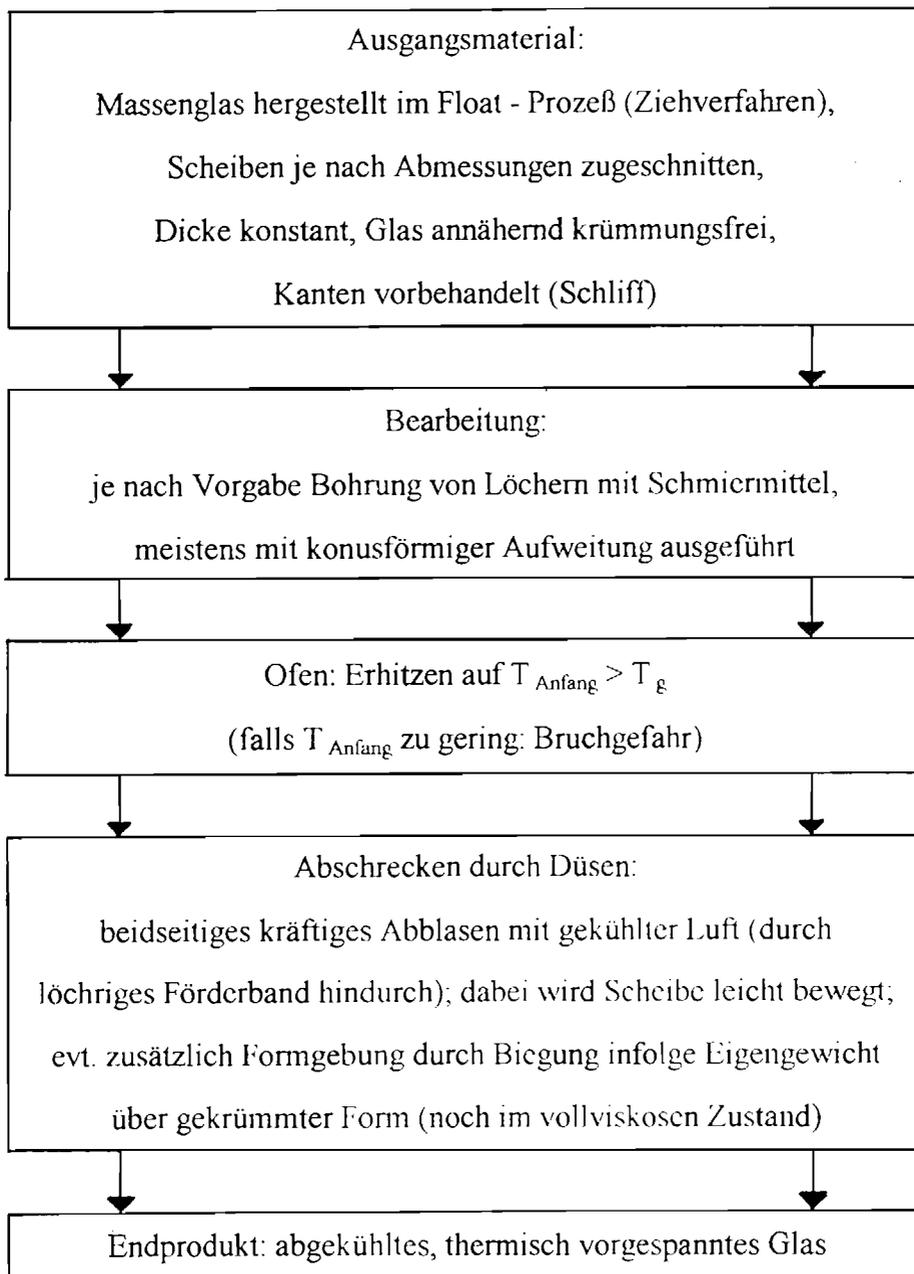


Bild 7: Industrieller Herstellungsprozeß von thermisch vorgespanntem Glas

4 Simulation des Vorspannprozesses mittels Finite-Elemente-Methode

Die Interaktion von Temperaturgradient und Viskosität ist am Lehrstuhl für Stahlbau, (Abteilung Konstruktiver Glasbau) der RWTH Aachen analytisch und numerisch untersucht worden. Es werden die Phänomene der Wärmeübertragung sowie statische, elastomechanische Verzerrungsprobleme, die sich einer exakten analytischen Lösbarkeit entziehen, durch Simulation nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) numerisch behandelt. Dem Verfahren liegt die Idee zugrunde, den Deformationszustand eines allgemein inhomogen deformierten Mediums unter Berücksichtigung vorgegebener Randbedingungen lokal an einer endlichen Anzahl von Stützstellen zu beschreiben und die Gesamtlösung durch die Interpolation zwischen diesen Positionen zu erreichen.

Bilder 8 und 9 zeigen den grundsätzlichen Ablauf der FEM - Analysen. Zunächst wird die Temperaturverteilung während des Abkühlprozesses abgebildet, anschließend die jeweiligen Viskositätszustände je Element im Glas ermittelt. Das Zusammenspiel von Relaxation, Spannungsaufbau infolge Temperaturdifferenz und globalem Gleichgewicht liefert für alle Bereiche der Glasscheibe (siehe Bild 2) die thermische Vorspannung. Dabei ist für manche Materialkennwerte des Glases die Abhängigkeit von der Temperatur zu berücksichtigen. In Bild 10 ist exemplarisch die Generierung der Plattenkante dargestellt.

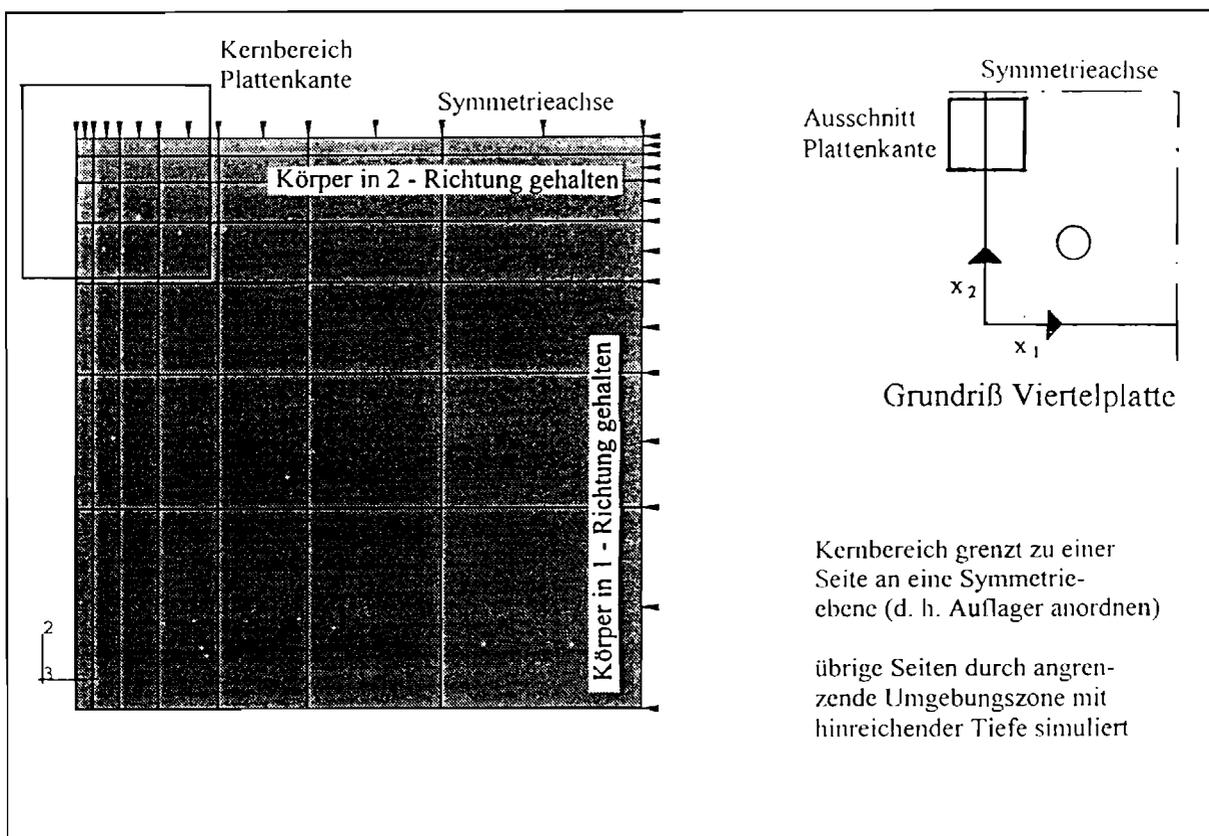


Bild 10: Generierung der Plattenkante (FEM)

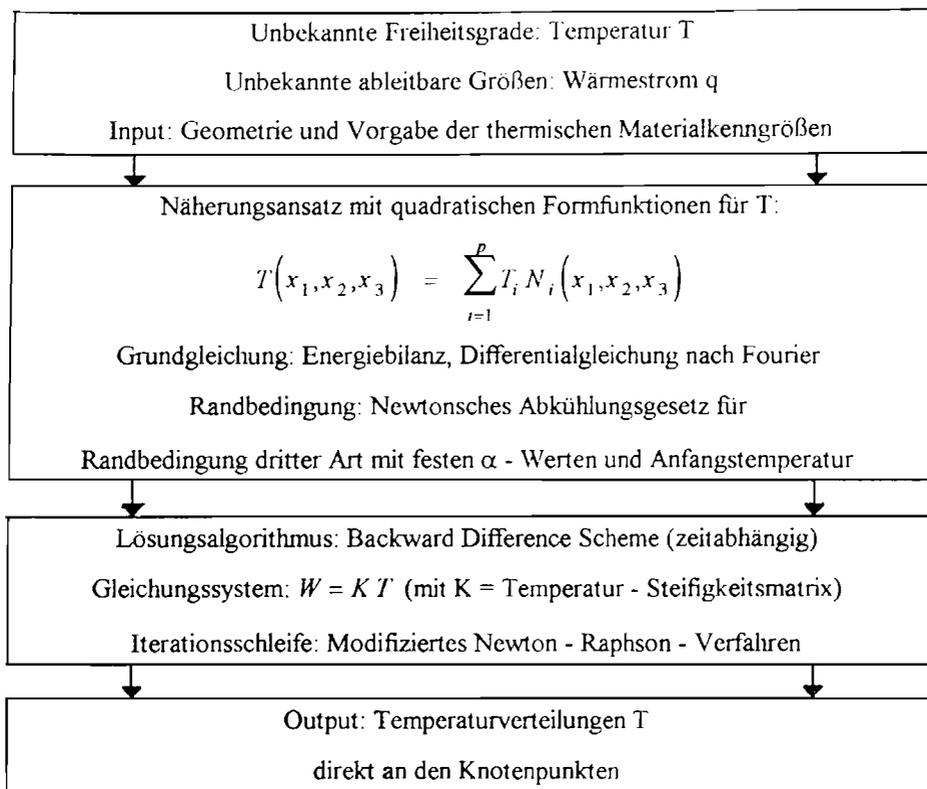


Bild 8: FEM - Schema zur Temperaturberechnung

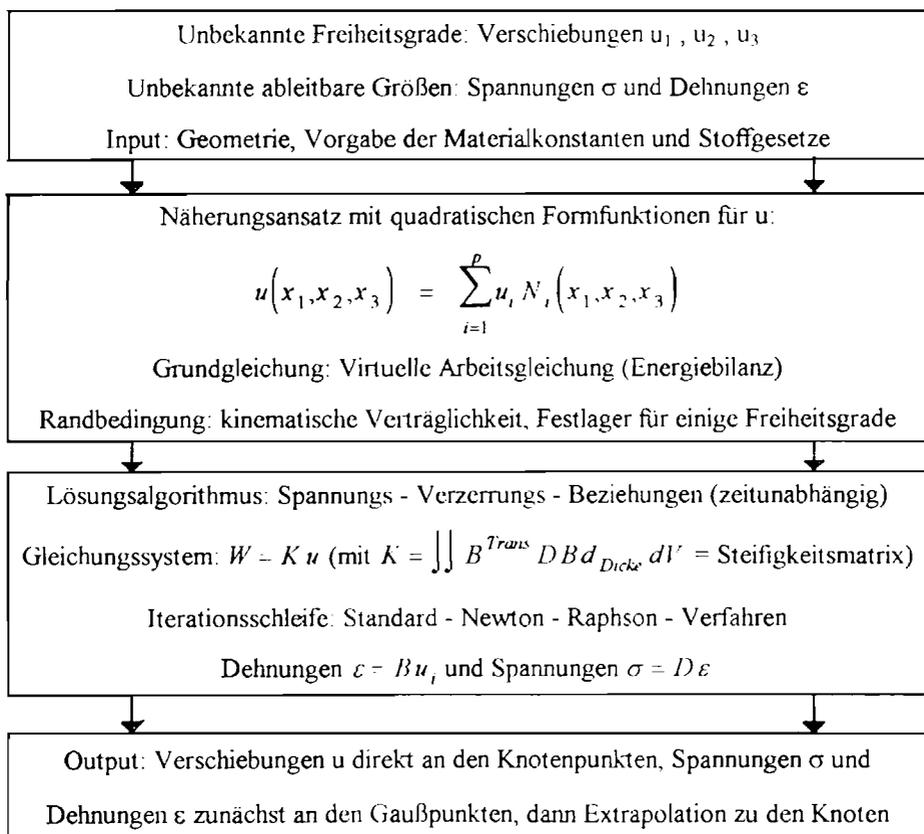


Bild 9: FEM - Schema zur Spannungsberechnung

Die Plattenfläche

Die numerischen Berechnungen werden anhand von veröffentlichten externen Versuchsmeßwerten verglichen (Bild 11). Dargestellt sind die thermischen Spannungen über die halbe Plattendicke $d/2$ (Symmetrie bzgl. anderer Plattenhälfte $d/2$). Man erkennt deutlich den charakteristischen Parabelverlauf der Vorspannung mit einem Verhältnis von äußerer Druckspannung zu innerer Zugspannung von 2 : 1. Der Nulldurchgang (Nulllinie) liegt entsprechend bei etwa 0.20 d von der Oberfläche entfernt.

Das FEM - Modell zeigt sehr gute Übereinstimmung mit den Meßwerten. Da diese für eine Glasplatte mit relativ kleiner Wärmeübergangszahl $\alpha = 27.2 \text{ [W/(m}^2 \text{ K)]}$ ermittelt sind, muß der sogenannte Struktureffekt infolge Dichteunterschieden und Sprung im Wärmeausdehnungskoeffizienten β berücksichtigt werden. Der Struktureffekt hat für diesen Fall mit 45% einen relativ hohen Anteil an der Druckvorspannung, seine Bedeutung für höhere α - Werte (z. B. 100 bis 300 $\text{[W/(m}^2 \text{ K)]}$) nimmt aber stark ab.

Weitere Vergleichsmeßwerte für andere Wärmeübergangszahlen ermöglichen die Optimierung der Netzfeinheit, die günstige Wahl der Zeitinkremente und eine Kalibrierung des numerischen FEM - Modells THERVO PRO.

Die Richtung der thermischen Vorspannungshaupttrajektorien verläuft für die Plattenfläche immer parallel zu den Scheibenoberflächen, die Komponente in Richtung der Dicke ist Null.

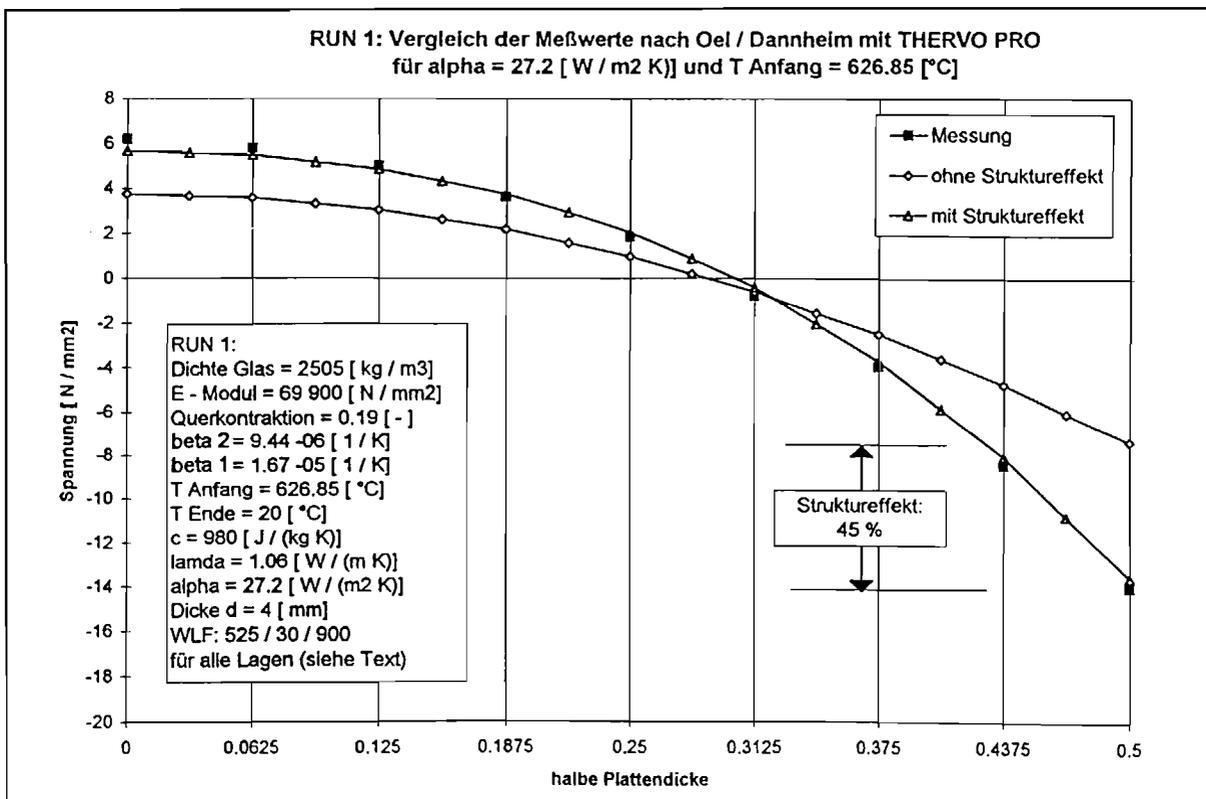


Bild 11: Ergebnisse der Plattenfläche (Vergleich FEM mit Meßwerten)

Die Plattenkante

An der Kante stellt sich während der Abkühlung ein zweidimensionales Temperaturprofil entsprechend Bild 12 ein. Deutlich erkennbar ist, wie die äußere Kantenecke schneller abkühlt als die inneren Lagen. Direkt an der Kante ist die Temperatur am geringsten und steigt dann in geschwungenen Isothermen zur Mitte hin an, bis der seitliche Einfluß der Abkühlung zur Kante hin vernachlässigbar wird und die Wärme nur noch eindimensional zur Plattenoberfläche hin entweicht. Mit zunehmendem Abstand von der Kante verlaufen die Temperaturgleichen wieder parallel zur Oberfläche, und es stellt sich das Verhalten der Plattenfläche ein.

Bild 13 zeigt die zugehörigen Spannungen, wobei die halbe Plattendicke im Farbplot dargestellt ist. Die kantenparallele Vorspannung S_{22} hat nahe der Kante eine wellenförmige Nulllinie, um die sich nun richtungsabhängige Spannungen legen: die schützende thermische Druckvorspannung läuft als sogenannte Membrandruckspannung um die Kante umlaufend herum. Es entsteht eine geschwächte Druckzone etwa im Abstand d von der Kante. Mit zunehmendem Abstand von der Kante stellt sich wieder das richtungsunabhängige Vorspannprofil der Plattenfläche ein. Die Spannung S_{11} senkrecht zur Kante ist direkt an der Kante aus Gleichgewichtsgründen Null und nähert sich zügig dem Profil der Plattenfläche.

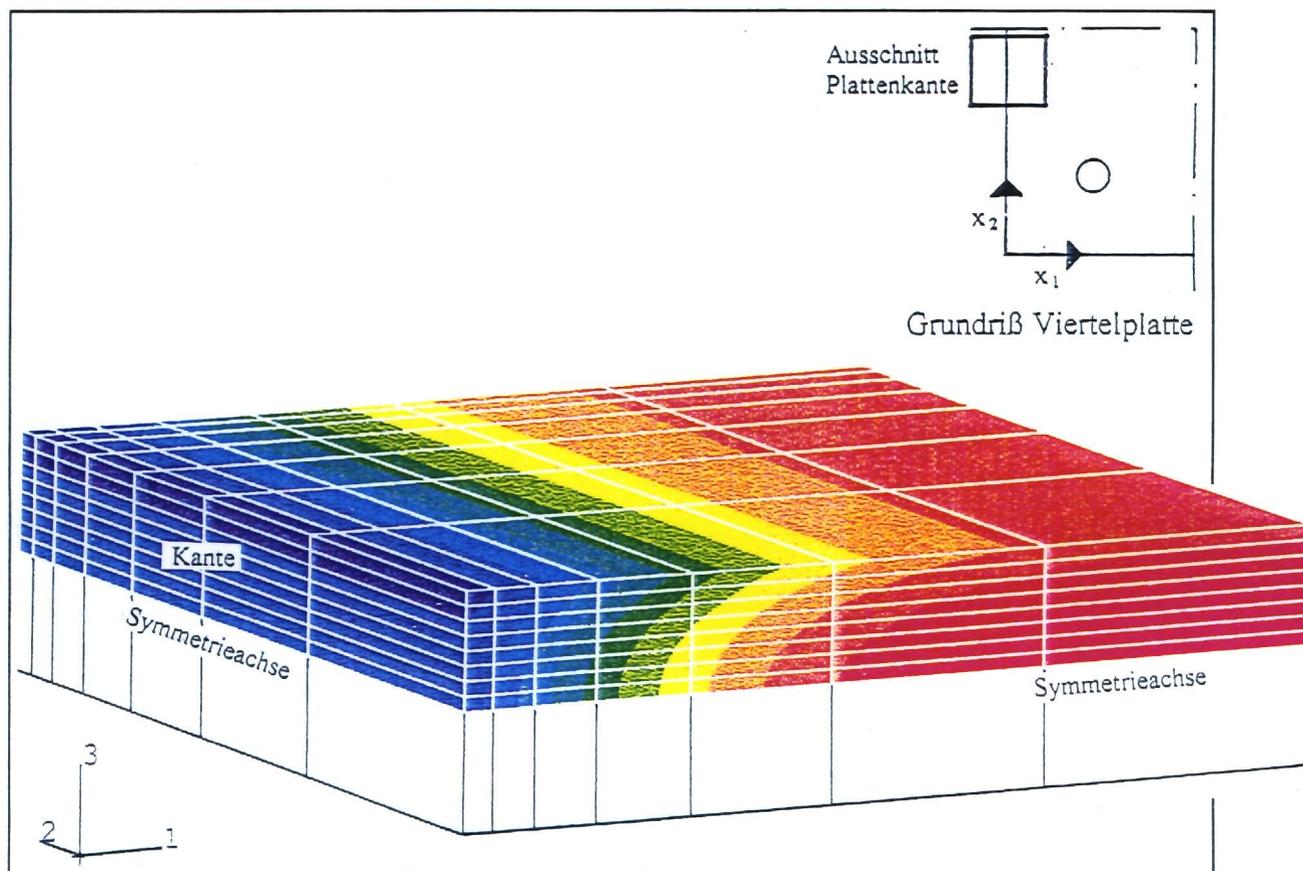


Bild 12: Beispiel Temperaturprofil an der Kante

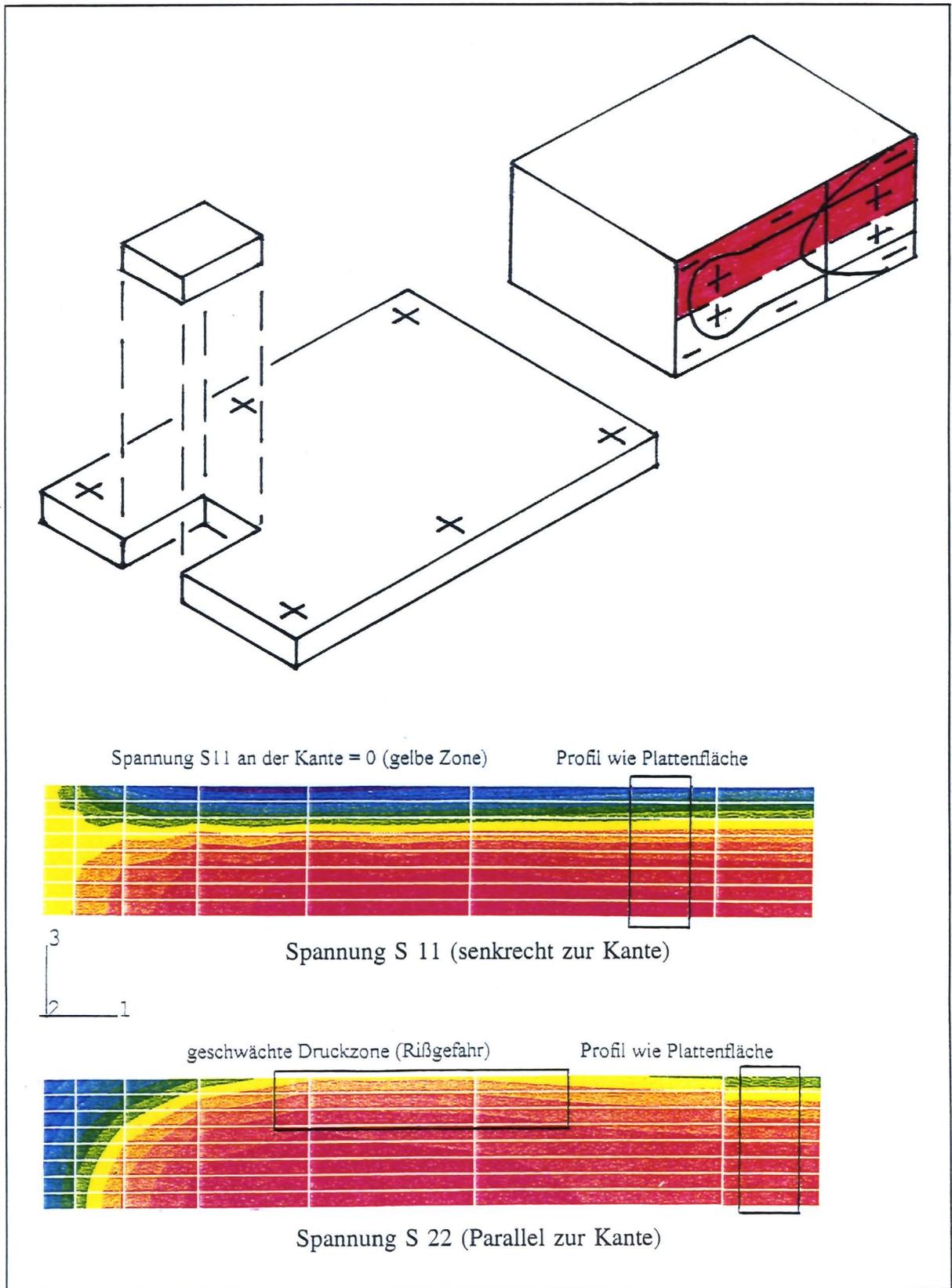


Bild 13: Thermische Vorspannung an der Kante

Die Plattenecke

Da die Wärme während der Abkühlung im Eckbereich zu beiden Kanten sowie zu den Oberflächen hin entweicht, entsteht ein dreidimensionales Temperaturprofil (Bild 14). Verfolgt man den Temperaturverlauf von der Ecke (kältester Punkt) aus entlang der Kante, so stellt sich ab etwa der dreifachen Plattendicke das Temperaturfeld der Kante ein, d. h. die Isothermen im Glaskörper verlaufen parallel zur Kante. Da die äußeren Bereiche der Kanten sehr viel schneller abkühlen als die inneren Schichten, zerbrechen aufgrund von temporären Spannungsunterschieden viele Glasscheiben bereits im Vorspannofen oder unter der Abblasanlage. Daher müssen alle Kanten vor dem Vorspannen gefast werden, d. h. die gefährdeten Bereiche werden vorab durch Schliff entfernt.

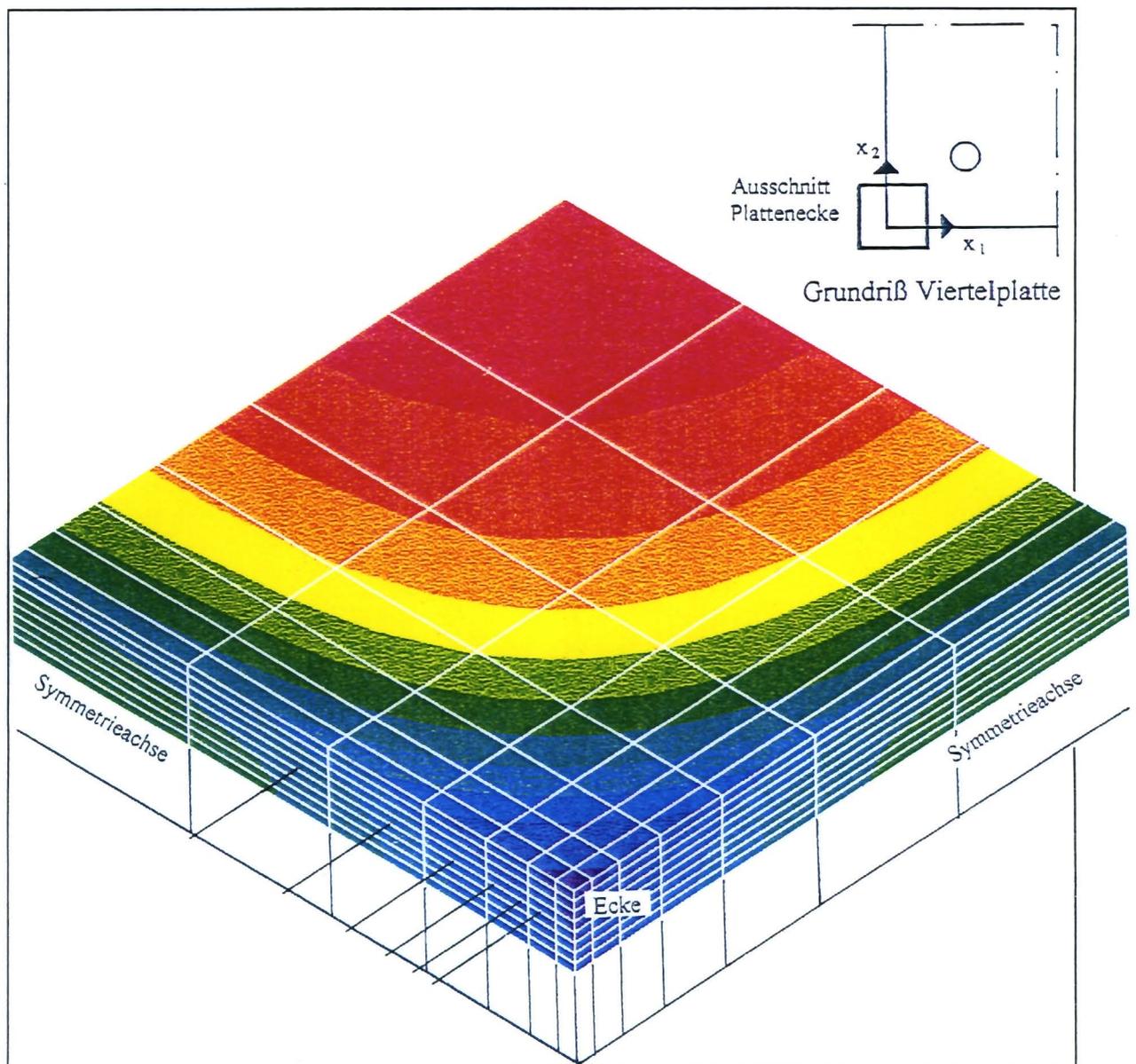


Bild 14: Beispiel Temperaturprofil an der Ecke

Aus dem Temperaturprofil wird die an der Ecke eingeprägte thermische Vorspannung berechnet (Bild 15). Die Spannung in Richtung der Plattendicke senkrecht zur Oberfläche ist vernachlässigbar gering und direkt an der Oberfläche gleich Null, da die Verformung unbehindert ist. Alle anderen Spannungen hingegen sind in ihrer Größe und Richtung ortsabhängig.

In Bild 15 sind einige Diagonalelemente herausgeschnitten, um den Spannungsaufbau S_{11} zur Plattenfläche nach innen zu beobachten. Da an der Kante senkrecht zur Oberfläche keine äußeren Spannungen vorliegen, ist S_{11} direkt an der Kante gleich Null (Orangefarbige Zone). Von dort baut sich die Spannung zur Mitte hin auf, bis die gleichen Spannungsprofile entstehen, die sich für die Plattenfläche einstellen: die Oberflächendruckspannungen (blaue und grüne Zone) stehen mit Zugspannungen der mittleren Schichten im Gleichgewicht (rote Zone). Werden Glasscheiben durch Klemmteller direkt an den Ecken gehalten, so muß nicht nur die Größe der Zugbelastung an der Oberfläche infolge äußerer Belastung (z. B. Wind) der Druckvorspannung des ESG gegenübergestellt werden, sondern zusätzlich sind die Spannungsrichtungen zu beachten, da die schützende Vorspannung richtungsabhängig ist.

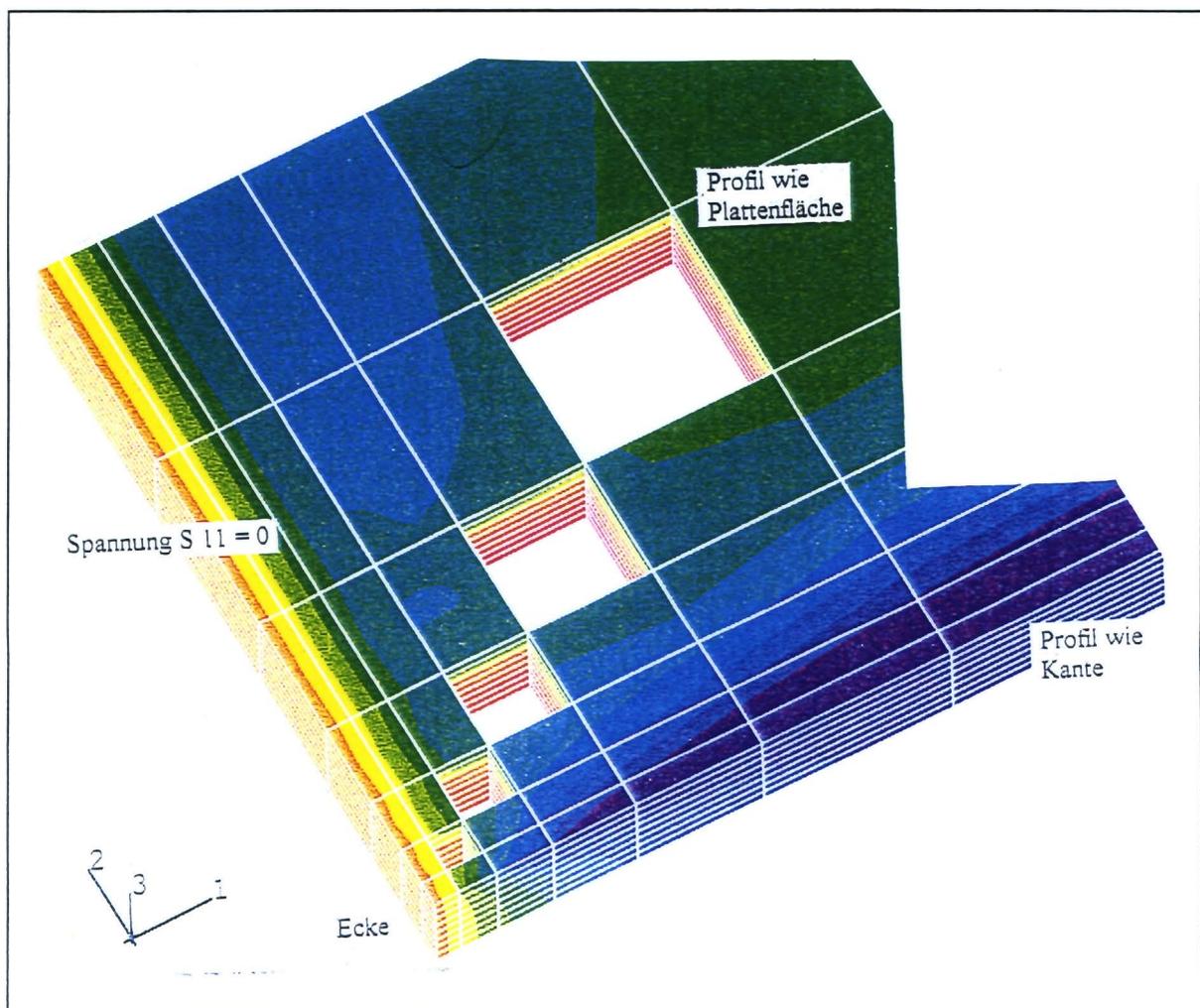


Bild 15: Thermische Vorspannung an der Ecke

Anders als für die Plattenfläche ändern die Druckspannungen für jede Ebene ihre Richtung. Aufgrund der Randbedingungen verläuft die erste Drucktrajektorie parallel an der Kante entlang und biegt kurz vor der Ecke in Richtung der anderen Kante ab. Alle weiteren Drucktrajektorien nahe den Kanten stehen senkrecht auf der halbierenden Diagonale (Bild 16) und schwenken schließlich zu beiden Seiten hin in eine Richtung, die kantenparallel ist. Ihr Verlauf ähnelt der Form der Isothermen an der Ecke.

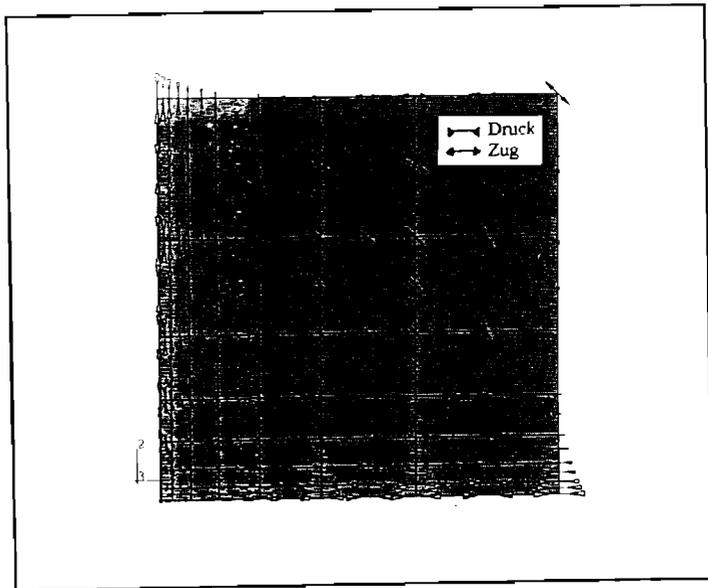


Bild 16: Drucktrajektorie I für Ebene $x_3 = d/4$ (Ecke)

Nahe der Ecke müssen die Druckspannungen an den Kanten aus statischen Gleichgewichtsgründen kurzgeschlossen werden. Dies geschieht über eine diagonal gerichtete Zugkraft, die das Kräftedreieck schließt (Bild 17).

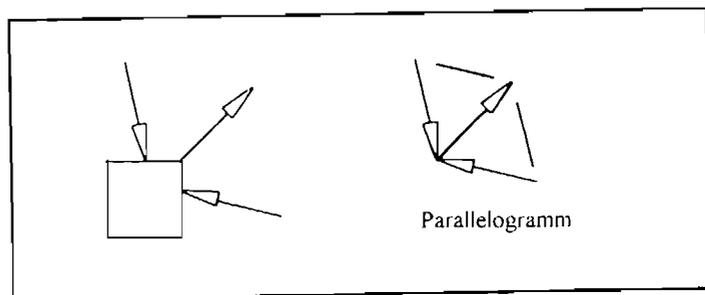


Bild 17: Kräftedreieck für Ebene $x_3 = d/4$ (Ecke)

Die zweite Drucktrajektorienschar steht senkrecht zur Kante und ist direkt an den seitlichen Oberflächen gleich Null (Bild 18). Je weiter sie ins Innere wandern, desto mehr ändern sie ihre Richtung, um sich den Verhältnissen der Plattenfläche anzunähern. Ein großer Vorteil von FEM liegt darin, daß alle Gleichgewichtsansforderungen für den räumlichen Fall erfüllt werden, wobei sich die Hauptspannungen im Glas auch über die Dicke ständig verändern.

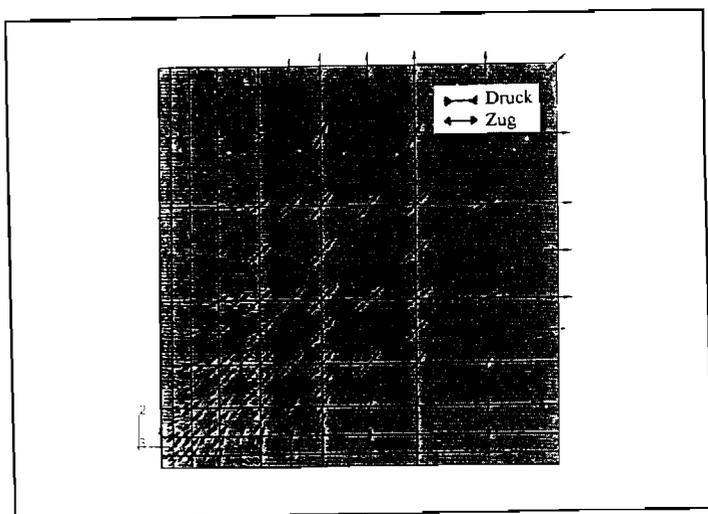


Bild 18: Drucktrajektorie II für Ebene $x_3 = d/4$ (Ecke)

Das Plattenloch

Im Lochbereich werden die auftretenden Spannungen zweckmäßig in einem Zylinderkoordinatensystem beschrieben (Tangentialspannungen umlaufend um das Loch und Radialspannungen senkrecht dazu; die Koordinate in Richtung Plattendicke markiert die Lochachse). Liegt die Lochachse genügend weit von der Kante entfernt, so verhalten sich die Spannungen am Loch rotationssymmetrisch, so daß gemäß Bild 19 ein Winkelsegment untersucht wird.

Dargestellt ist die Spannungsnulllinie der Tangentialspannungen, die ein zentrales Zugspannungsgebiet von einer Druckzone trennt. Nahe des Lochrands bildet sich ähnlich der Kante eine Welle aus, sofern das Loch rein zylindrisch ausgeführt wird. Zusätzlich ist dargestellt, wie die Tangentialspannung etwa ab einem Abstand des einfachen bis doppelten Lochdurchmessers die Form der thermischen Spannungen der Plattenfläche annimmt und die Nulllinie wieder parallel zur Oberfläche verläuft.

Es werden zwei geometrische Ausführungen von Lochbohrungen numerisch untersucht:

Loch rein zylindrisch

Loch mit zylindrischem Bereich und konusförmiger Aufweitung

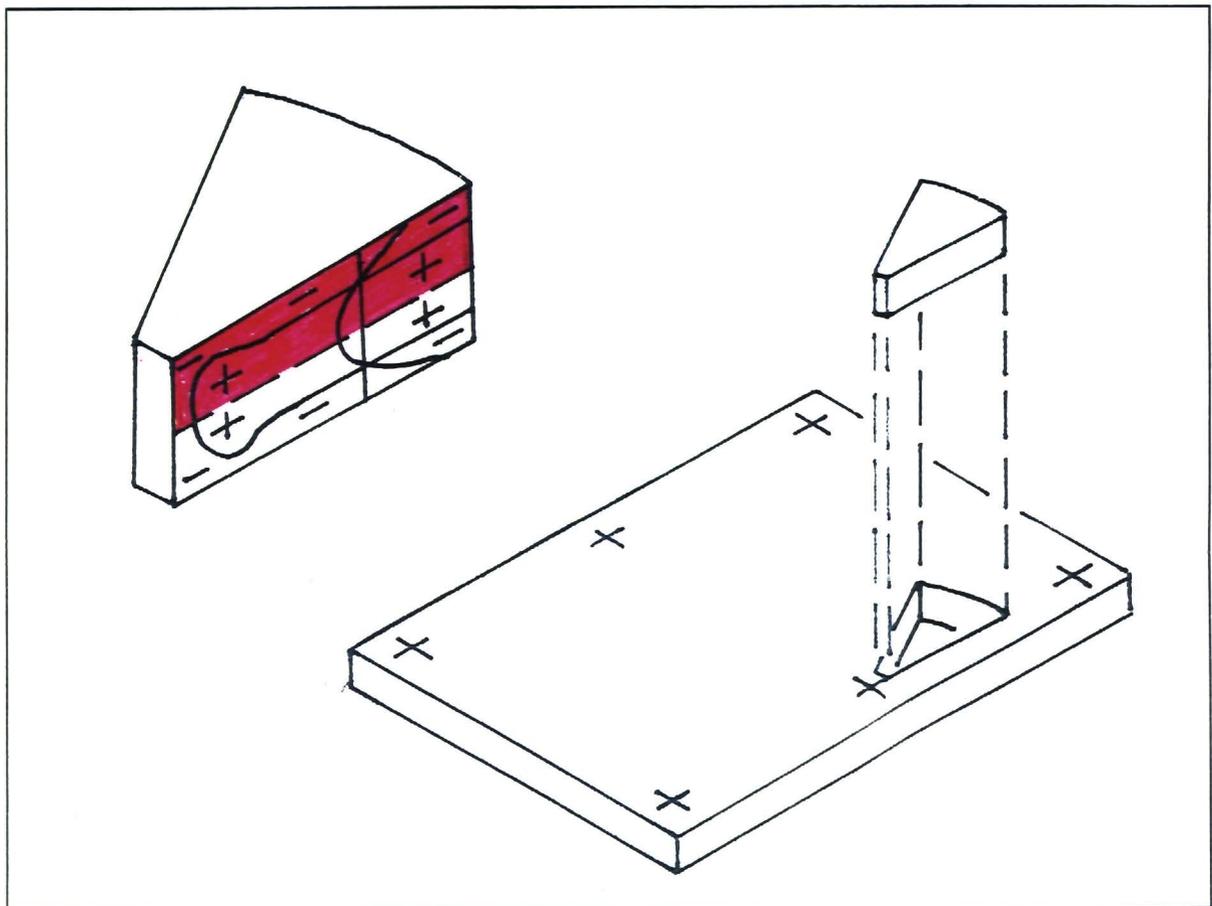


Bild 19: Thermisches Vorspannprofil am zylindrischen Loch

Bild 20 zeigt qualitativ die Temperaturverteilung für ein zylinderförmiges Loch mit den zugehörigen Radial- und Tangentialspannungen. Wie an der Kante wird auch zum Loch hin die Spannung $R_{11} = 0$ und erreicht ab einer gewissen Entfernung vom Loch das Spannungsprofil der Plattenfläche. Für die Tangentialspannung T_{22} wird der Membranspannungseffekt sichtbar: der Temperaturunterschied zum Loch hin erzeugt an der Zylinderoberfläche Druck, der im Innern durch Zug ausgeglichen wird. Dieses Profil überlagert sich mit den bereits beschriebenen Spannungen der unendlich ausgedehnten Scheibe, so daß analog zur Kante eine verbreiterte Zugzone sichtbar ist, die sich zum Loch hin wellenförmig aufbaut. Im Unterschied zur Kante entsteht am Loch geringfügig mehr Druck, da sich eine Ringspannung um das Loch bilden kann.

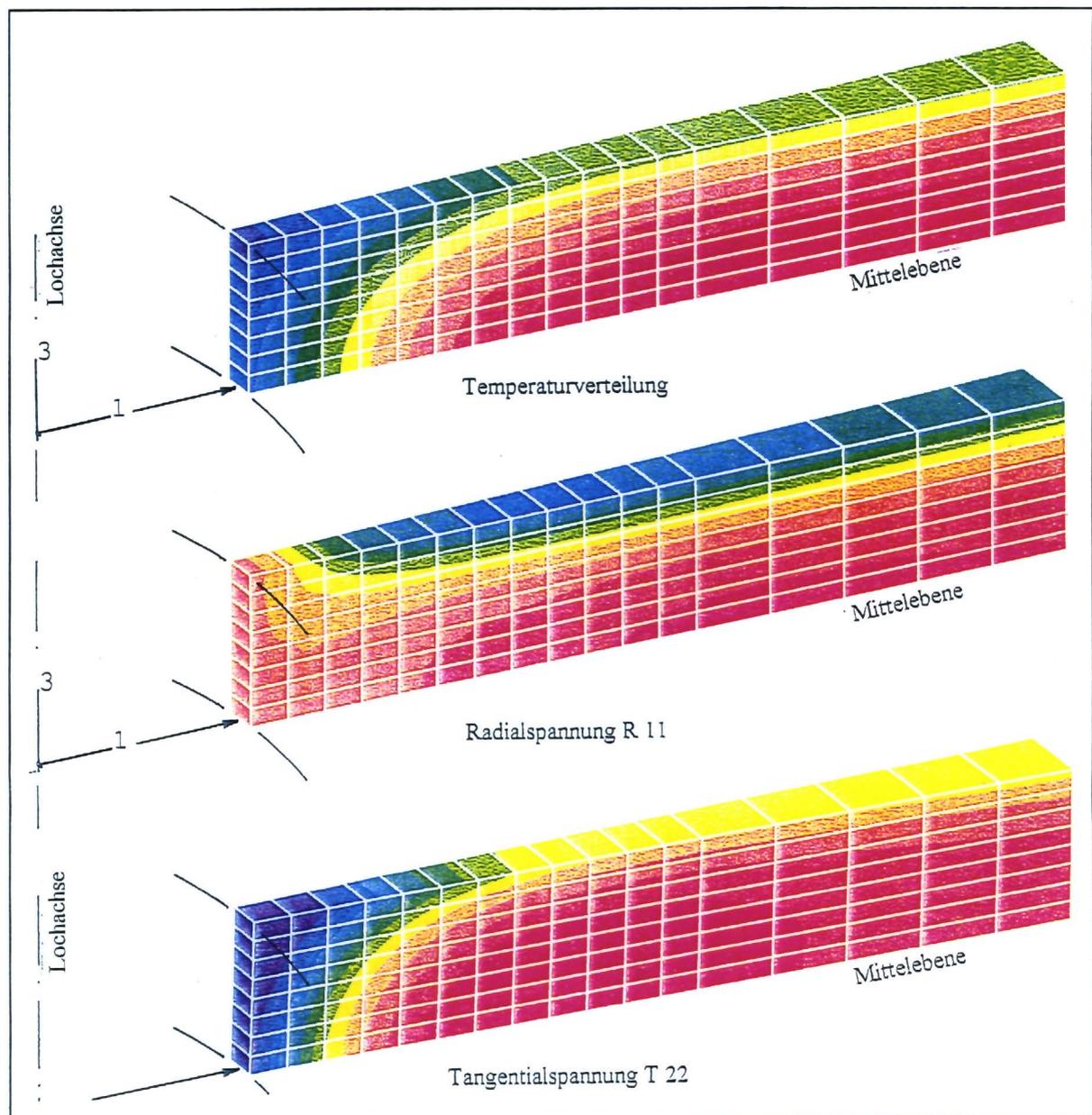


Bild 20: Temperatur und Spannungen am zylindrischen Loch

Der Verlauf der Hauptspannungen ist in Bild 21 dargestellt, wobei gedanklich alle drei Abbildungen zu überlagern sind. Die Bedingung, daß die Spannungstrajektorien senkrecht aufeinander stehen müssen, wird für alle Elemente erfüllt.

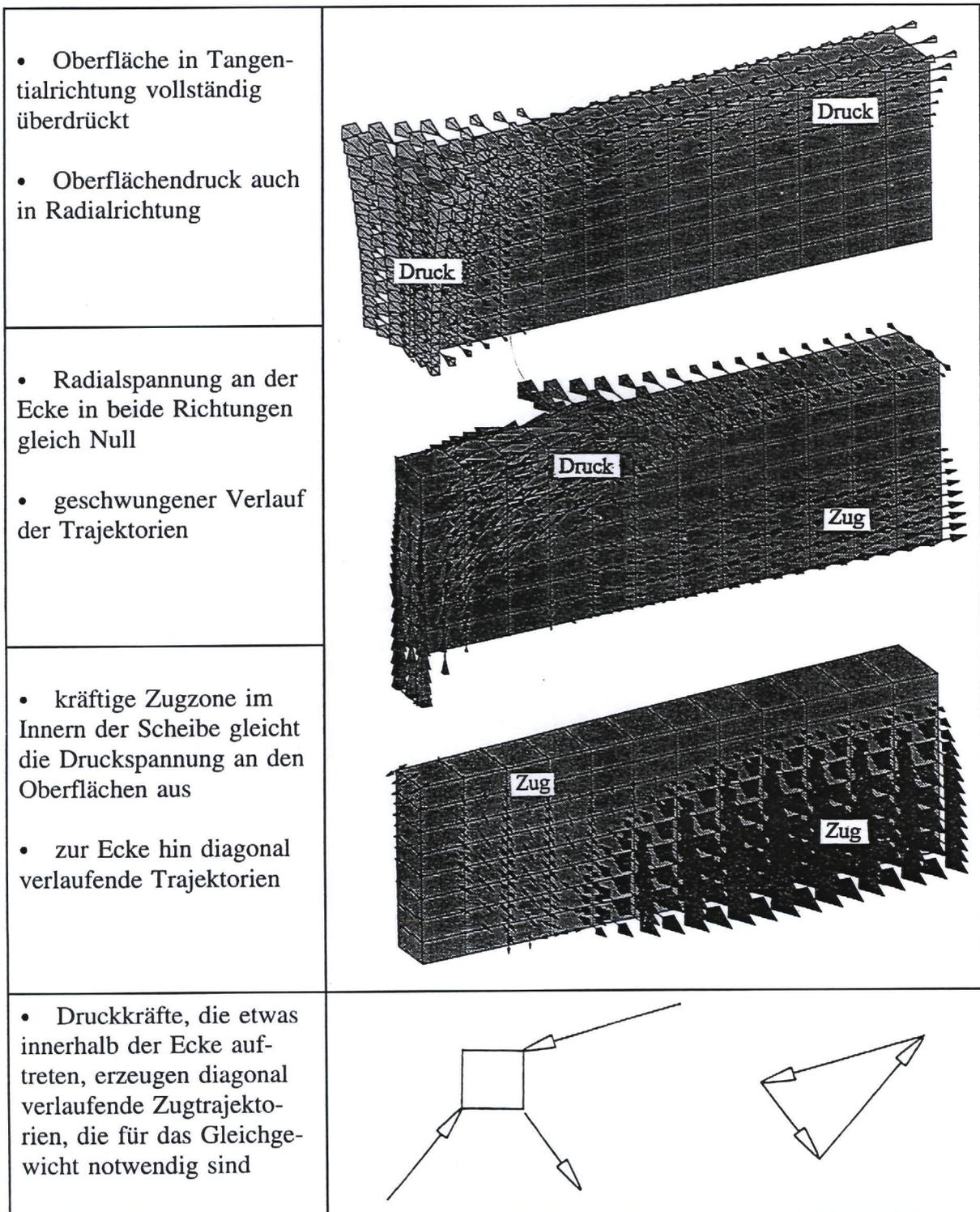


Bild 21: Hauptspannungstrajektorien (zylindrisches Loch)

Wird die Bohrung konusförmig einseitig ausgeführt, muß die gesamte Plattendicke d generiert werden (Bild 22). Die Radialspannung R_{11} am Konus muß aufgrund der Neigung nicht mehr gleich Null sein, wie es am Zylinder erforderlich ist, da die Hauptspannungen unter 45° Neigung parallel zur Konusoberfläche verlaufen. Das Tangentialspannungsprofil T_{22} verhält sich homogener und damit günstiger als für eine rein zylinderförmige Bohrung, da die innere Zugzone den Druck von nur einer Ecke ausgleichen muß und damit keine stark wellenförmige Verbreiterung der Zugzone erforderlich wird.

Bei konusförmiger Bohrung greift die Unterkonstruktion mit einer Schraube direkt in das Glas, so daß andere Beanspruchungen als bei einem reinen Zylinderloch (und damit Klemmtellern) vorliegen, die beim Sicherheitsnachweis gesondert untersucht werden müssen.

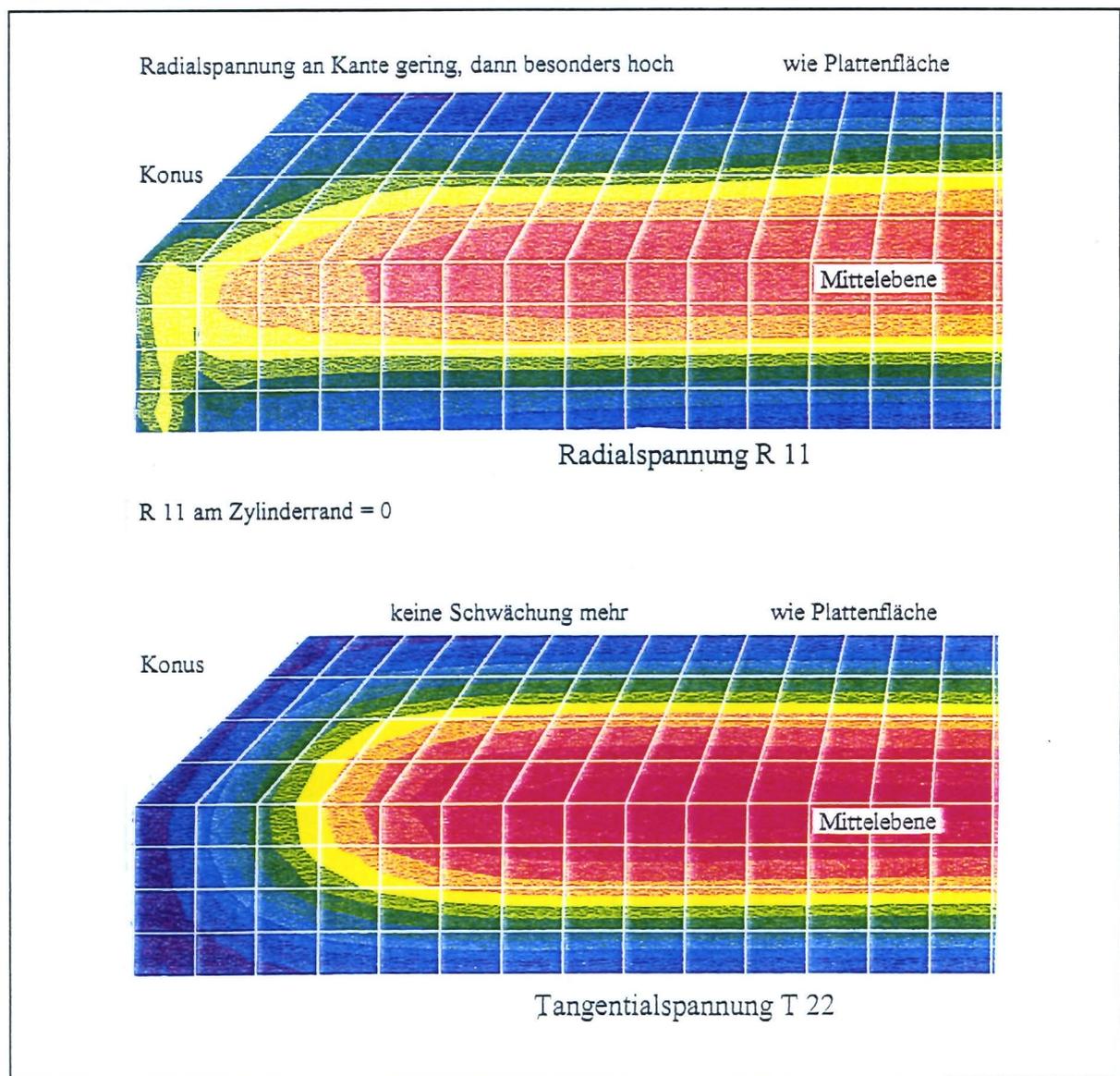


Bild 22: Spannungen am konusförmigen Loch

5 Spannungsoptische Verfahren

Mit Hilfe der Spannungsoptik kann die Verteilung von Spannungen in einer Glasscheibe direkt sichtbar gemacht werden. Dabei wird der optische Effekt der Doppelbrechung ausgenutzt, den der durchsichtige Werkstoff Glas aufweist. Aus dem ursprünglich isotropen Glaskörper wird durch Belastung ein Stoff mit Kristalleigenschaften und damit ausgezeichneten Richtungen. Dabei ist die Doppelbrechung belastungsabhängig entsprechend dem spannungsoptischen Grundgesetz nach Maxwell- Wertheim (Gl. 1).

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{S}{d} n \quad (1)$$

Für jeden Meßpunkt im Glas ist die Differenz der Hauptspannungen ($\sigma_1 - \sigma_2$) dem Gangunterschied n direkt proportional und zur Glasscheibendicke d umgekehrt proportional. Die Proportionalitätskonstante S heißt spannungsoptische Kennzahl, die werkstoff- und wellenlängenabhängig ist. Sie wird experimentell bestimmt (z. B. mit Biegeversuch). Das spannungsoptische Grundgesetz beruht auf dem Phänomen, daß sich ein senkrecht in das Glas einfallender Lichtstrahl in Abhängigkeit des vorliegenden Spannungs- und Dehnungszustandes in zwei ausgezeichnete Richtungen mit verschiedenen Lichtgeschwindigkeiten c_1 und c_2 aufteilt, die mit den Hauptspannungsrichtungen in der durchstrahlten Schicht übereinstimmen.

Bis zum Wiederaustritt des Lichts aus der Glasscheibe hat sich eine Phasenverschiebung zwischen den beiden ausgezeichneten Richtungswellen gebildet, deren Interferenzfigur gemessen wird, indem der Gangunterschied n bestimmt wird. Der Gangunterschied n ist die Phasenverschiebung bezogen auf die Wellenlänge λ , die zwischen beiden Lichtstrahlen über die Scheibendicke d entsteht, und wird als Isochromatenordnung bezeichnet. Eine Isochromate ist die im Analysator sichtbare Verbindung von Punkten gleicher Hauptspannungsdifferenz (auch: Farbgleiche). Durch Abzählen der Isochromatenanzahl kann mittels Gl. 1 die Größe der Hauptspannungsdifferenz quantitativ bestimmt werden.

Alle spannungsoptischen Meßverfahren bieten folgende Vorteile für die Untersuchung und Bewertung von Einscheibensicherheitsgläsern (ESG):

- zerstörungsfreie Meßverfahren
- möglicher Einsatz in der Fläche, an der Kante, Ecke und am Loch
- Möglichkeit der Qualitätskontrolle auf der Baustelle (Tragbarkeit)
- Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (gute Genauigkeit)
- Möglichkeit zur wissenschaftlichen Untersuchung der thermischen Vorspannung

Im folgenden sind die optischen Meßverfahren mit ihren Anwendungsmöglichkeiten aufgeführt (Bild 23):

Optisches Meßgerät	Einsatzmöglichkeit
Kompensationmethode nach Sénarmont (z. B. Gerät Sharples) (z. B. Diffuslicht- Polariskop)	Membranspannungen an der Kante, gemittelt über die Plattendicke d
	Spannungen an der Ecke, gemittelt über die Plattendicke d
	Spannungen in Lochnähe, gemittelt über die Plattendicke d
Differential Surface Refractometer (DSR)	Bestimmung der Oberflächendruckspannung in der Plattenfläche
Epibiaskop	Bestimmung der Oberflächendruckspannung in der Plattenfläche
Streulichtverfahren	Bestimmung der Spannungsgrößen und Spannungsrichtungen für alle beliebigen Stellen der Glasscheibe

Bild 23: Optische Meßverfahren und ihre Anwendungsmöglichkeiten

Das Kantenspannungsmeßgerät wird im folgenden Kapitel 6 beschrieben.

Beim DSR- Gerät fällt Licht durch ein Prisma auf die Glasscheibenoberfläche ein und wird totalreflektiert. Dabei liegt die Lichteinfallsebene senkrecht zur Oberflächenspannung, die gemessen wird. Die Lichtstrahlen werden nach Prismaustritt über einen Spiegel durch ein Interferenzfilter geleitet und ihre Differenz über ein Objektiv mit Strichplatte abgelesen.

Das Epibiaskop sendet Licht als flaches Bündel auf die Glasoberfläche, es entstehen Grenzschichtwellen, deren elliptischer Schwingungszustand über einen Streifenkompensator verändert wird. Es entstehen Interferenzstreifen, deren Neigungswinkel ein Maß für die Oberflächenspannung ist.

Das Streulichtverfahren beruht auf der physikalischen Erscheinung, daß Licht, das in ein durchsichtiges, trübes Medium eintritt, etwas gestreut wird (Tyndalleffekt). Dabei werden winzige Teilchen zu Schwingungen angeregt und strahlen Licht aus (mikroskopisch kleine Lichtquellen). Durch diese Lichtstreuung kann ein Lichtstrahl von der Seite beobachtet werden. Das entstehende Streulicht ist linear polarisiert und wird von einem Beobachter, der senkrecht auf den Primärstrahl sieht, wahrgenommen. Entlang des Lichtweges im Glasinnern wird die unterschiedliche Lichtintensität erfaßt und ausgewertet.

6 Optische Meßergebnisse an der Kante

6.1 Gerätebeschreibung und Versuchsaufbau

Das SHARPLES Edge Stress Meter ist ein tragbares Instrument, dessen Lichtquelle über einen Transformator an eine gewöhnliche Stromquelle angeschlossen wird. Meßgerät, Lampe, Trafo und Kabel werden in einem Handkoffer geliefert. Das Gerät besteht im wesentlichen aus Lichtquelle, Polarisator, Probenfläche, Viertelplatte und verdrehbarem Analysator mit Winkelskala. Lichtquelle und Polarisator liegen im Lichtblock unterhalb des Probenschlitzes, Viertelwellenplatte und Analysator sind in einer festen Einheit oberhalb der Probe zusammengefaßt.

Über eine verstellbare Vergrößerungslinse werden die Isochromaten im Analysatorgesichtsfeld abgelesen, wobei wahlweise mittels einer linearen Meßskala für verschiedene Meßstellen in definiertem Abstand von der Kante abgelesen werden kann. Soll z. B. im Abstand $a = 1.5$ [mm] von der Kante gemessen werden, um die dort vorliegende Membrandruckspannung zu ermitteln, wird die Linse entlang der linearen Meßskala verschoben, um senkrecht von oben im Abstand 1.5 [mm] von der Kante auf das Isochromatenbild zu blicken. So können Fehler bei der Ablesung durch schiefen Blickwinkel vermieden werden. Bild 25 zeigt die wesentlichen Elemente des Geräts in Grundriß und Ansicht. Für den Versuchsaufbau wird der Transformator an eine Stromquelle angeschlossen. Die saubere Glasscheibenprobe wird mit überstehender Kante auf eine ebene Fläche gelegt und das Meßgerät mittels Griff über den Kantenrand der Glasplatte geschoben, bis die Glaskante im Meßschlitz verschwindet. Dabei muß die Kante flächig an den hinteren Anschlag anstoßen und parallel zum Anschlag sein, was in der Regel durch sorgfältiges Aufsetzen des Geräts auf die Scheibe erreicht wird. Während der Messung darf das Gerät nicht mehr verrückt werden. Es ist darauf zu achten, daß nicht zu nah an der Scheibenecke gemessen wird, da dort keine kantenparallele Kantenmembrandruckspannung mehr vorliegt und falsche Werte gemessen werden. Zur Kontrolle sollte an allen vier Seiten der Probe an den jeweiligen Seitenhalbierenden die Membrandruckspannung gemessen werden (Bild 24).

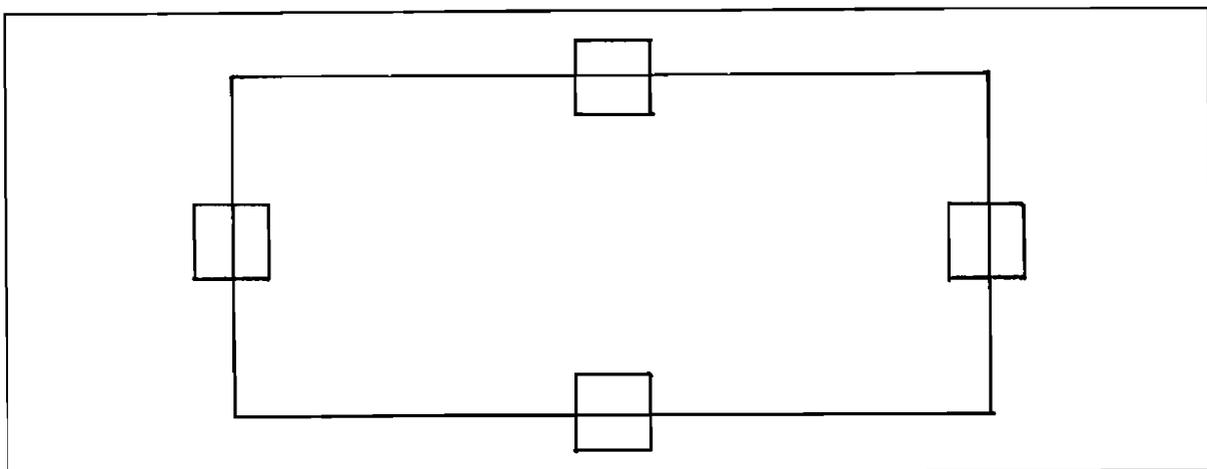


Bild 24: Vorschlag Meßstellen an der Glasprobe

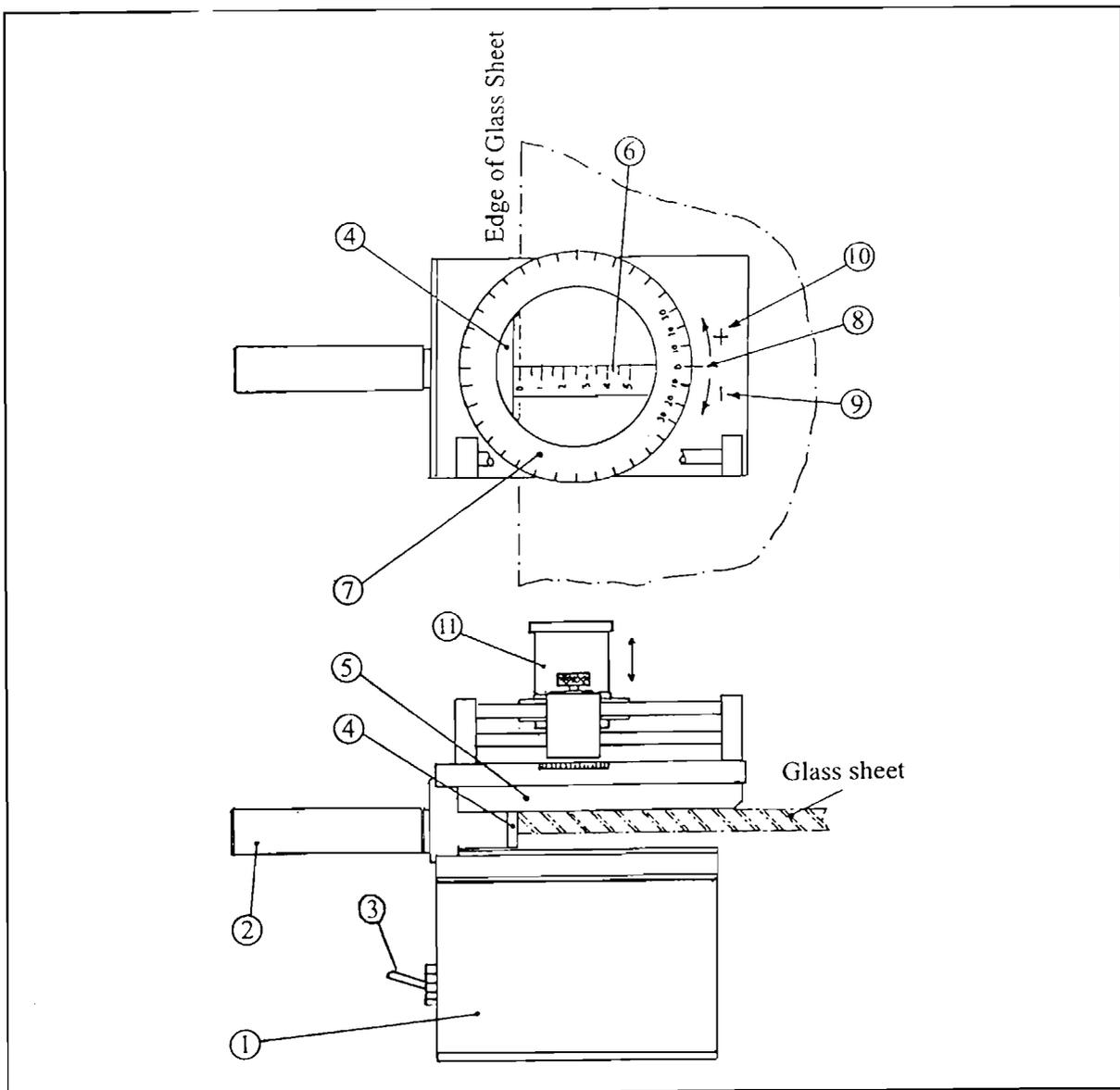


Bild 25: Grundriß und Ansicht SHARPLES

- 1 Lichtblock mit Lichtquelle (Weißlicht) und Polarisatorplatte
- 2 Handgriff zum Bewegen des Prüfgeräts
- 3 Lichtschalter
- 4 Hinterer Anschlag für Probenkante
- 5 Oberer Anschlag für Probenoberseite
- 6 Obere und untere lineare Meßskala (für Meßpunkte senkrecht von der Kante entfernt)
- 7 Verdrehbare Winkelskala am Analysatorgesichtsfield
- 8 Nullpunkt Winkelskala
- 9 +/- Verdrehung (Scheibe gegen Uhrzeigersinn → Bruchteil r positiv)
- 10 -/- Verdrehung (mit Uhrzeigersinn → Bruchteil r negativ)
- 11 Verschiebliche Vergrößerungslinse mit Arretierschraube

6.2 Versuchsdurchführung

Da die Kanten thermisch vorgespannter Glasplatten in der Regel gefast sind, kann unmittelbar an der Kante nicht gemessen werden, da die Interferenzbilder verschwimmen. Deshalb wird für etwa 4 - 6 Stützstellen im Abstand senkrecht zur Kante von z. B. $x_i = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$ [mm] die Isochromatenanzahl ($n + r$) bestimmt (Bild 26). Dabei muß x_i größer als die Tiefe der Fasse gewählt werden. Die Meßhilfswerte werden über x aufgetragen. Laut Hersteller kann der Kantenmembrandruckspannungswert direkt an der Kante dadurch bestimmt werden, daß eine kubische Ausgleichsgerade durch die gemessenen Werte der Stützstellen gelegt wird. Die Extrapolation dieser Kurve für den Wert $x = 0$ (Kante) liefert dann den gesuchten Spannungswert.

Die kubische Ausgleichskurve hat die Form der Gleichung (1). Dies bedeutet, daß für vier Stützpunkte die Variablen a, b, c und d über vier Gleichungen direkt ermittelt werden können. Die Aussagekraft der Extrapolation nimmt aber für mehr Stützstellen zu, so daß sechs Stützstellen empfohlen werden. Es wird dann ein kubischer Kurvenfit erforderlich, da sechs Meßpaare für nur vier Unbekannte vorliegen und Gleichung (1) überbestimmt ist. Es wird demnach eine kubische Regression nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durchgeführt.

$$y = a + b x + c x^2 + d x^3 \quad (1)$$

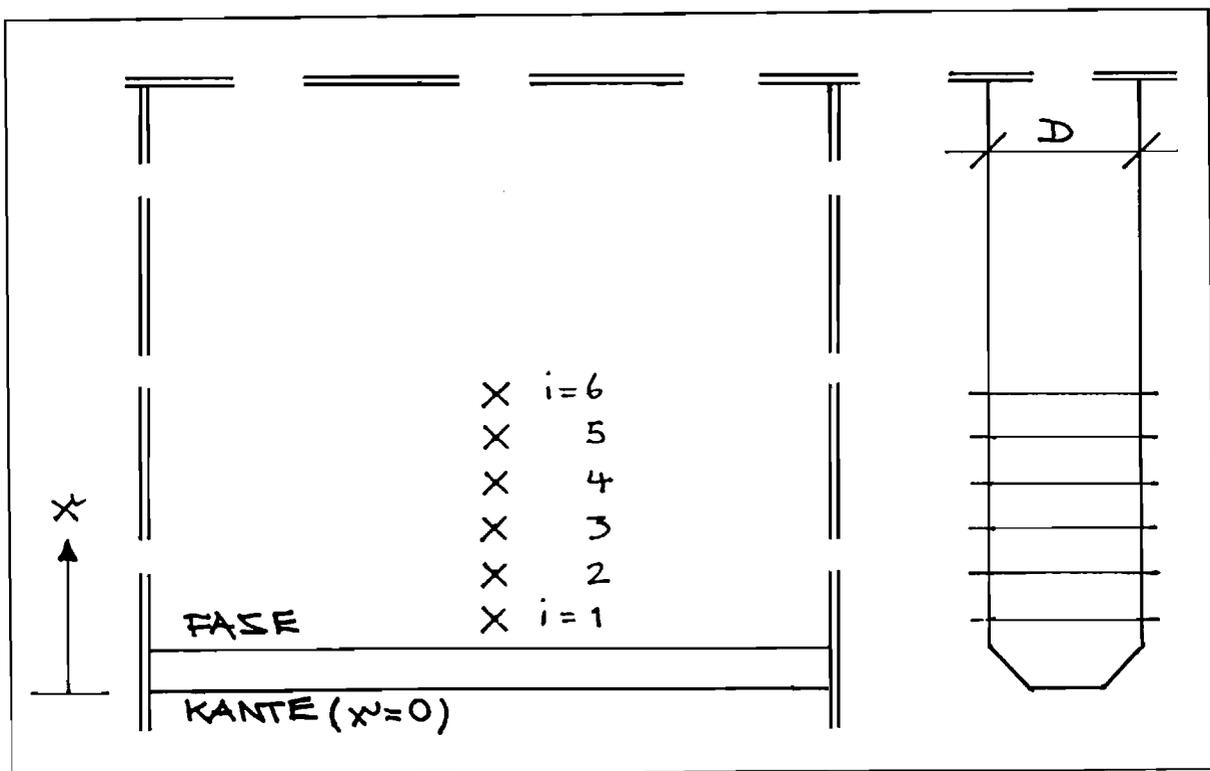


Bild 26: Lage der Meßhilfspunkte an der gefasteten Kante

Damit ergibt sich die Versuchsdurchführung stichwortartig wie folgt:

- 1 Glasprobe reinigen und beschriften
- 2 Glasprobe flach mit freivorstehender Kante auf Prüftisch auflegen
- 3 Prüfgerät über Trafo an Stromkreis anschließen und Licht einschalten
- 4 Prüfgerät flächig über Glasplattenkante schieben (Anschläge bündig mit Glasplatte)
- 5 Winkelskala auf 0 stellen
- 6 Arretierschraube der Linse lösen und Linse auf Höhe von x_1 schieben, bis obere und untere Skalea sich im Meßpunkt decken (wichtig !); x_1 jenseits der Fase wählen
- 7 Arretierschraube vorsichtig festziehen
- 8 Im Analysatorhalbfeld (Weißlicht) schwarze 0 - Isochromate suchen (relativ breite, schwachschwarze Linie "oben" im Analysatorfeld erkennbar)
- 9 Im Analysatorhalbfeld (Grünlicht) Isochromatenanzahl n bis zur Fase abzählen; die 0 - Isochromate nicht mitzählen (n steigt zur Kante hin an)
- 10 Winkelskala drehen, bis die dem Meßhilfspunkt am nächsten liegende Isochromate mittig auf Höhe der Fase steht (für Drehung gegen Uhrzeigersinn gilt: Bruchteil $r =$ positiv, für Drehung im Uhrzeigersinn gilt: Bruchteil $r =$ negativ)
- 11 Isochromatenordnung n und Bruchteil r für x_i notieren
- 12 Schritte 5 bis 11 für Meßhilfspunkte x_i wiederholen ($i = 1 \dots 6$)
- 13 Glasscheibe drehen und Membranspannung für die übrigen drei Kanten auf Höhe der Kantenhalbierenden analog bestimmen
- 14 Gerät ausschalten und Versuch abbauen
- 15 Versuchsauswertung je Kante

Prüfung der Homogenität der Kantenvorspannung:

Schritte 1 bis 7 wiederholen

Gerät vorsichtig entlang der Kanten verschieben und die Schwankung der schwarzen Isochromaten im Grünfeld qualitativ beobachten (Maß für Homogenität)

6.3 Versuchsauswertung

Die gesamte Isochromatenordnung n^i_{Gesamt} je Meßhilfspunkt in [°] ergibt sich mit Gl. (2) zu:

$$n^i_{\text{Gesamt}} = n^i * 180 + r^i = \text{Gesamtiisochromatenordnung [°]} \quad (2)$$

Je Kante wird nun das zugehörige n_{Gesamt} errechnet, indem die Meßhilfswerte über x_i aufgetragen und kubisch zur Kante ($x = 0$) hin entsprechend Gl. (1) extrapoliert werden. Dies geschieht z. B. mit einem Tabellenkalkulationsprogramm oder einer kurzen Programmroutine.

Mit Hilfe der Spannungsoptik kann die Verteilung von Spannungen in einer Glasscheibe direkt sichtbar gemacht werden. Dabei wird der optische Effekt der Doppelbrechung ausgenutzt, den der durchsichtige Werkstoff Glas aufweist. Aus dem ursprünglich isotropen Glaskörper wird durch Belastung ein Stoff mit Kristalleigenschaften und damit ausgezeichneten Richtungen. Dabei ist die Doppelbrechung belastungsabhängig entsprechend dem spannungsoptischen Grundgesetz nach Maxwell- Wertheim (Gl. 3).

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{S}{d} n \quad (3)$$

Für jeden Meßpunkt im Glas ist die Differenz der Hauptspannungen ($\sigma_1 - \sigma_2$) dem Gangunterschied n direkt proportional und zur Glasscheibendicke d umgekehrt proportional. Die Proportionalitätskonstante S heißt spannungsoptische Kennzahl, die werkstoff- und wellenlängenabhängig ist. Sie wird experimentell bestimmt (z. B. mit Biegeversuch).

Mit dem einmal bestimmten Wert der spannungsoptischen Konstante S folgt die über die Glasdicke gemittelte Membrandruckspannung an der Kante (Gl. 4) über das spannungsoptische Grundgesetz nach Gl. (3). In guter Übereinstimmung mit vorliegenden Kalibrierungsversuchen kann $S = 2.63$ [Brewster] = 263 [kN/(m² Isochromatenzahl)] gesetzt werden.

$$\sigma_2 = - \frac{n_{\text{Gesamt}}}{180} * \frac{S}{d} \quad (4)$$

Die Werte σ_2 der vier Kanten der Glasprobe können abschließend verglichen werden und Aufschluß über die Homogenität der Vorspannung der Glasscheibenkanten geben. Alternativ können auch mehrere Messungen entlang einer einzigen Plattenkante durchgeführt werden.

Eine evt. unregelmäßige Kantenvorspannung kann dadurch nachgewiesen werden, daß das Meßgerät entlang der Kante verschoben wird, um den Verlauf der Isochromaten (im Grünfeld schwarze Linien) qualitativ zu beobachten: ändern die Linien ihren Abstand relativ zur Kante, schwankt die Membrankantenspannung (Linien nähern sich der Kante \Rightarrow thermische Vorspannung sinkt; Linien entfernen sich von der Kante \Rightarrow thermische Vorspannung steigt).

6.4 Beispiel

Anhand von zwei Messungen (M1 und M2) wird die Berechnung der Membrandruckspannung an der Kante verdeutlicht (Bild 27).

M1	Abstand x	Isochrom. n	Winkel r	n gesamt
ESG	[mm]	[Anzahl]	[°]	[°]
D = 12 mm	1.5	3	81	621
Sekurit	2.0	2	170	530
	2.5	2	90	450
	3.0	2	21	381
	3.5	1	139	319
	4.0	1	95	275
M2	Abstand x	Isochrom. n	Winkel r	n gesamt
ESG	[mm]	[Anzahl]	[°]	[°]
D = 12 mm	1.5	2	138	498
Sekurit	2.0	2	55	415
	2.5	1	153	333
	3.0	1	80	260
	3.5	1	31	211
	4.0	0	154	154

Bild 27: Beispiel für zwei Meßpunkte M1 und M2

Die Werte n werden über x aufgetragen und eine kubische Ausgleichsfunktion bestimmt. Es folgt (siehe Anlage):

$$M1: \quad y = 1.7037x^3 + 7.873x^2 - 223.08x + 931.83 \quad (\text{Bestimmtheitsmaß } R^2 = 0.9999)$$

$$y(0) = 931.83$$

$$M2: \quad y = -7 \text{ E-}12x^3 + 18.714x^2 - 240.36x + 817.64 \quad (\text{Bestimmtheitsmaß } R^2 = 0.9992)$$

$$y(0) = 817.64$$

Mit Gleichung 4 folgt:

$$M1: \quad \sigma_2 = -931.83 / 180 * 263 / 12 = - 113.5 \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$M2: \quad \sigma_2 = -817.64 / 180 * 263 / 12 = - 99.6 \quad [\text{N/mm}^2]$$

7 Parameterstudien

Der Einfluß verschiedener Parameter auf die thermische Vorspannung kann mit dem am Lehrstuhl für Stahlbau der RWTH Aachen entwickelten FEM- Programm Thervo Pro untersucht werden. Insbesondere die Wärmeübergangszahl in $[W/(m^2 K)]$ steuert die Größe der eingepprägten Vorspannung wesentlich. Sie entspricht der Stärke und Form der Abblasdüsen, die die heiße Glasscheibe unmittelbar nach Austritt aus dem Vorspannofen abschrecken und somit den Temperaturgradienten erzeugen.

Bild 28 zeigt exemplarisch die Untersuchung für eine Plattendicke $d = 8 \text{ mm}$ in der Plattenfläche. Die Diagramme belegen den typisch parabolischen Verlauf über die Glasscheibendicke (halbe Plattendicke $d/2$ dargestellt). Der Nulldurchgang liegt bei etwa $0.3 d$, d. h. bei 20% der Dicke unterhalb der Oberfläche.

Für die Flächenfestigkeit gilt: je größer die Wärmeübergangszahl, desto höher die eingepprägte thermische Vorspannung. An der Kante, den Ecken und Löchern jedoch ist die Verwirbelung der Kühlluft aus den Abblasdüsen ungeklärt, so daß die Kühleffekte je nach Oberfläche und Glasveredler stark schwanken kann. Für das konusförmige Loch besteht die Möglichkeit, daß die Konus- und Zylinderoberflächen langsamer abkühlen, da der kühle Luftstrom hier behindert ist.

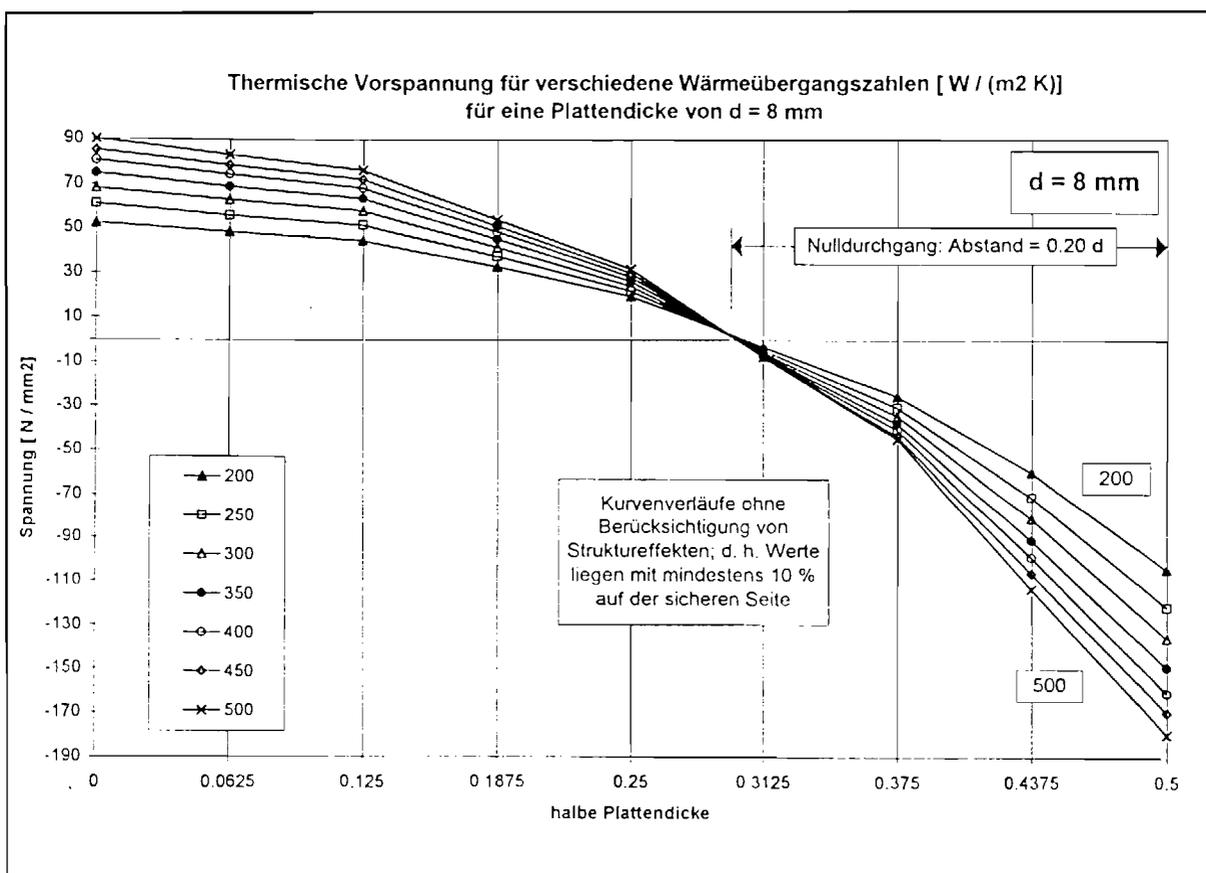


Bild 28: Einfluß der Wärmeübergangszahl auf die Vorspannung (am Beispiel $d = 8 \text{ mm}$)

Ist dies der Fall, so wirken sich solche Verhältnisse ungünstig auf die Vorspannung aus, wie Bild 29 zeigt: Ist die Abkühlung von außen am Lochrand kleiner als für die Fläche (α -Wert < 200), so verkleinert sich der schützende Druckzonenbereich (blau) und die Zugzone rückt näher an das Loch (rot). Bisher sind die tatsächlichen Verhältnisse am Loch experimentell nicht untersucht.

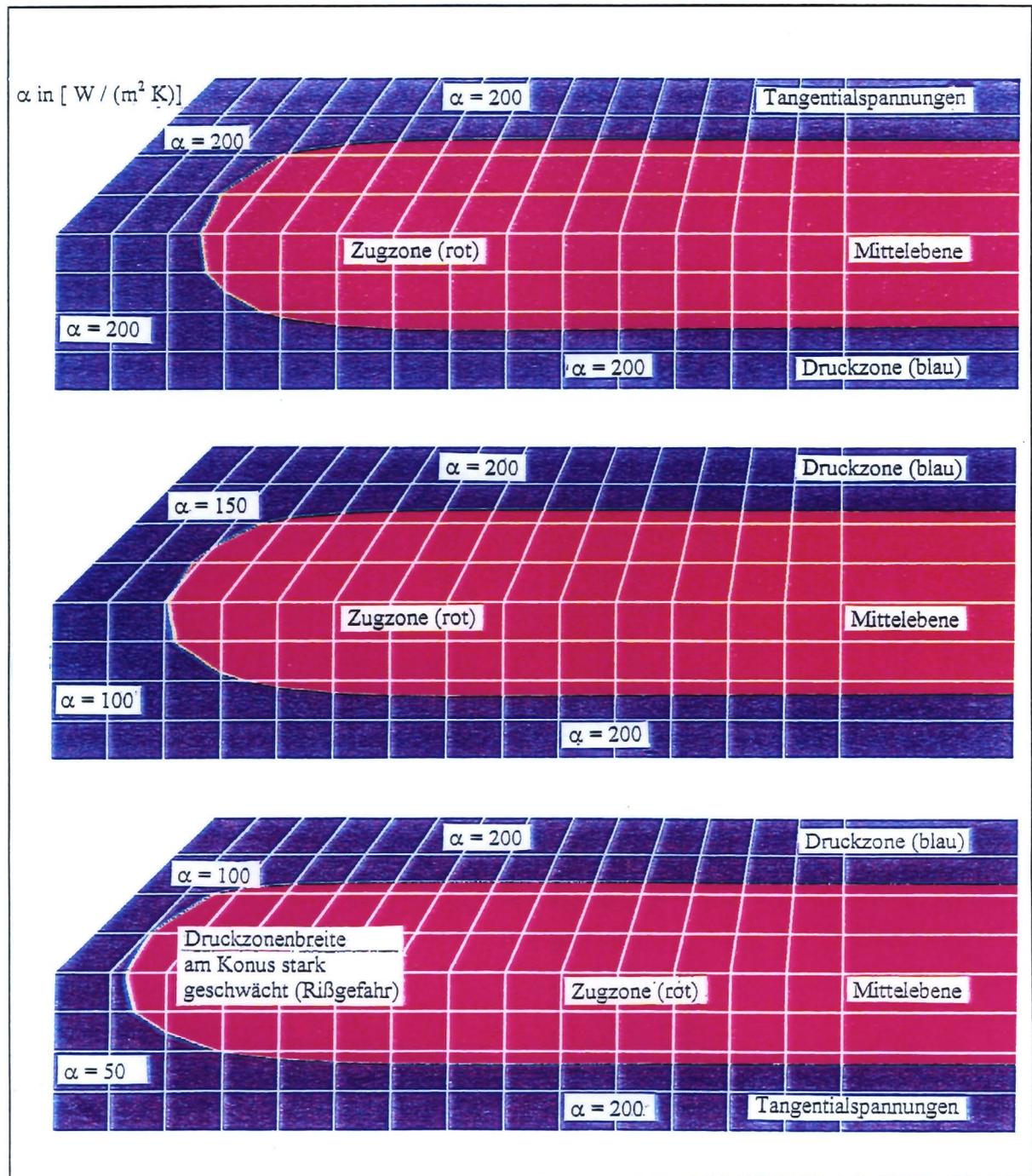


Bild 29: Vorspannstudie am konischen Loch für verschiedene α -Werte

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die thermische Vorspannung einer Glasscheibe muß bereichsweise untersucht werden. Es bietet sich an, die Platte wie folgt zu unterteilen:

Plattenmittelfläche

Plattenkante

Plattenecke

Plattenloch

rein zylindrische Bohrung
zylindrisch mit konusförmiger Bohrung
sonstige Geometrie

Das am Lehrstuhl für Stahlbau entwickelte Programm Thervo Pro ermöglicht die qualitative Ermittlung der thermischen Vorspannung für diese Bereiche, deren Aneinanderreihung die Glasscheibe vollständig beschreibt. Insbesondere ergeben sich folgende Schlußfolgerungen:

Nur für die Plattenmittelfläche sind die Spannungen richtungsunabhängig. Für alle anderen Bereiche ändern die Spannungen ihre Richtung und damit Wirkung.

Die Größe der Vorspannung an der Kante, Ecke und am Loch unterscheidet sich von den Werten der Plattenmittelfläche.

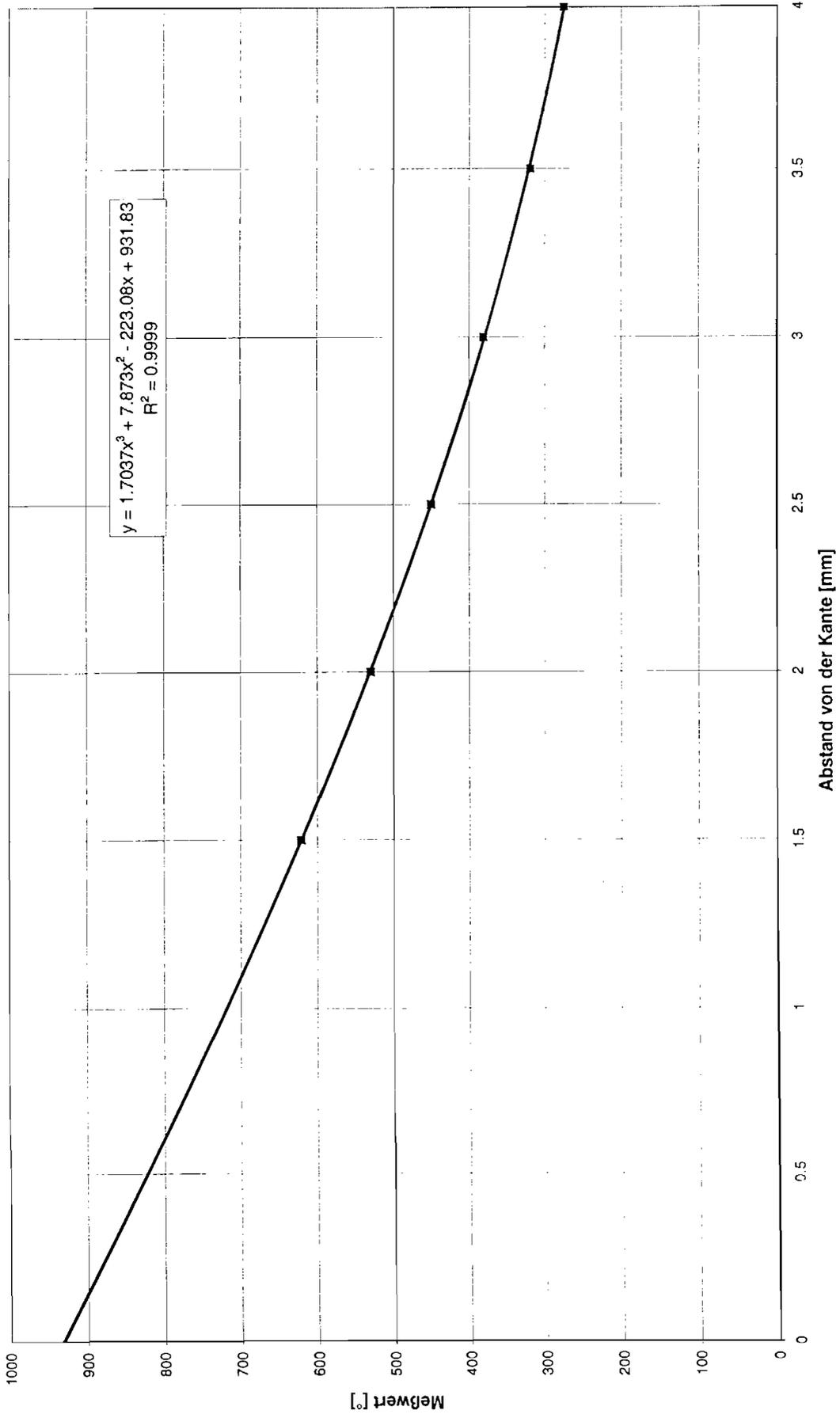
Ofenparameter beim Vorspannprozeß wie Temperatur, Plattendicke und Wärmeübergangszahl haben einen beachtlichen Einfluß auf die eingeprägte thermische Vorspannung. Theoretische Parameterstudien liegen vor.

Da die Ofenparameter schwierig genau meßbar sind und nur indirekt Auskunft über die Güte der thermischen Vorspannung geben, bieten sich optische Verfahren zur direkten Messung der Spannungswerte und Richtungen an. Dabei ergibt sich:

Das Kantenspannungsgerät nach der Methode von Sénarmont ist am Lehrstuhl für Stahlbau im Einsatz und ermöglicht die Kontrolle der Kantenmembranspannungen.

Zur Bestimmung und meßtechnischen Verifizierung der Werte für alle Teilbereiche der Platte ist es notwendig, Oberflächenspannungsmeßgeräte genauer zu studieren und das Streulichtverfahren einzusetzen, mit welchem insbesondere die Verhältnisse am Loch untersucht werden können.

Meßpunkt M 1



Meßpunkt M 2

