

**Lastabtragungsmechanismen
im Lochbereich
punktgestützter Glastafeln**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Nils Albrecht

aus Bad Dürkheim

Tag der mündlichen Prüfung: 16.01.2004

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Helmut Saal

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Gert Albrecht

Karlsruhe 2004

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe.

Für die Anregung und Betreuung der Dissertation sowie die sehr gute Zusammenarbeit in zahlreichen Industrie- und Forschungsprojekten danke ich meinem Lehrer Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Saal herzlichst. Seine stetige Diskussionsbereitschaft und seine wertvollen Anregungen haben wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Albrecht danke ich für seine Unterstützung, die stets motivierenden Gespräche sowie die Übernahme des Korreferates.

Meinen Kollegen an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine sei für die immer gewährte Hilfsbereitschaft sowie das angenehme Arbeitsklima gedankt.

Zuletzt möchte ich mich bei den Kollegen des Arbeitskreises „Glas im konstruktiven Ingenieurbau“ für das rege Interesse an meiner Arbeit sowie für die zahlreichen Diskussionen bedanken.

Nils Albrecht, im Januar 2004

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden die Einflüsse verschiedener Faktoren (z.B. Einfluss der Lochverfüllung sowie der Randabstände) auf die Lastabtragungsmechanismen im Lochbereich vierpunktgestützter Glastafeln untersucht. Grundlage der Untersuchungen sind numerische Berechnungen mit einem in dieser Arbeit entwickelten FE-Modell der punktgestützten Glastafel, das durch Verwendung von Volumen- und Kontaktelementen alle möglichen Lastabtragungsmechanismen im Lochbereich realitätsnah abbilden kann. Neben einer Verifizierung der FE-Modellierungen anhand von Versuchen wird in dieser Arbeit auch der Ansatz durch Rückführung des Problems auf einfache analytische Lösungen gewählt. Durch diese Vorgehensweise ist sichergestellt, dass das FE-Modell nicht mit den Versuchsergebnissen kalibriert wird, sondern die Versuche nur eine Bestätigung des rechnerischen Ansatzes bilden.

Durch die dreidimensionale Darstellung der mit dem FE-Modell im Lochbereich berechneten Spannungs- und Kontaktkräfteverteilungen wird die Aktivierung der einzelnen Lastabtragungsmechanismen in Abhängigkeit von den einzelnen Faktoren aufgezeigt und deren Einfluss auf die bemessungsrelevanten Größen (Spannung, Durchbiegung, Auflagerkräfte) beschrieben.

Das verifizierte FE-Modell bildet zudem den Ausgangspunkt von numerischen Parameterstudien, mit deren Ergebnissen Vordimensionierungstabellen und -formeln für vierpunktgestützte, monolithische Glastafeln unter gleichförmiger Flächenlast entwickelt werden. Die Entwicklung der Bemessungshilfen erfolgt für den in dieser Arbeit verwendeten Punkthaltertyp. Sie sind aber auch für andere Punkthaltervarianten (mit Ausnahme von Senkkopfhaltern) als vorsichtige Abschätzung verwendbar. Darüber hinaus sind die Bemessungshilfen unter Vernachlässigung der Verbundwirkung auch für die Bemessung von Verbundsicherheitstabellen anwendbar.

Abstract

The load-carrying behaviour in the **hole area* of point-supported glass panes is subject to different factors; for example, the influence of ‘hole-fillers’ as well as the distance to the edge. This topic will be dealt with in the presented study.

The basis for the investigation are the numerical calculations with a special FE-Model which was developed during this study. By using 3-D structural solids and contact elements it is possible to show all load-carrying mechanisms in the *hole area* in a way close to reality.

The verification of the FE-Modelling was executed by means of full-scale tests as well as by comparison with simple analytic solutions to the problem. Whereas the tests confirm the calculative approach.

The activation of the individual load-carrying mechanisms in the *hole area* was shown by displaying the calculated distribution of stress and contact-force. Thus the influence of the individual load-carrying mechanisms on the relevant sizes for calculation (stress, deflection, bearing forces) could be described.

Besides this the verified FE-Model forms the starting point of numerical parameter studies. With the results of these studies, pre-dimensioning diagrams and formulas for four-point-supported monolithic glass panes under homogeneous surface loads were developed.

The application of the calculation aids is limited to the type of point-holder which was used in this study. Nevertheless they can also be used as a cautious estimation for other point holders with the exception of countersunk bolt-holders.

Furthermore, if the behaviour of the laminate is ignored, the dimensioning aids are applicable for the calculations for point-supported laminated glass panes.

*the area in the pane where the hole has been drilled

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Allgemeines.....	5
1.2	Problemstellung.....	6
1.3	Ziele und Gliederung der Arbeit	8
2	Das System der punktgestützten Glastafel	10
2.1	Allgemeines.....	10
2.2	Kraftübertragungswege	10
2.2.1	Allgemeines.....	10
2.2.2	Kraftübertragung durch Kontakt	11
2.2.3	Kraftübertragung über Reibung	12
2.3	Anschluss an die Unterkonstruktion	14
2.3.1	Ausgleich von Fehlmaßen.....	14
2.3.2	Statische Systeme	15
2.4	Glasprodukte	17
2.5	Punkthalter	18
2.5.1	Punkthalterausführungen.....	18
2.5.2	Nachweis der Punkthalter.....	21
3	Parameterspektrum.....	27
3.1	Allgemeines.....	27
3.2	Glastafelabmessungen.....	27
3.3	Glastafelaufbau und Glastafeldicke	28
3.4	Ort der Punkthalterung	29
3.5	Art der Punkthalterung	30
3.6	Einwirkungen	30
4	FE-Modellierung von punktgestützten Glastafeln	32
4.1	Allgemeines.....	32
4.2	Verwendete Elementtypen	32
4.2.1	Allgemeines.....	32
4.2.2	SOLID 45	33
4.2.3	SHELL 63	34
4.2.4	LINK 10, CONTAC 52.....	35
4.3	Aufbau des FE-Modells	37
4.3.1	Modellierung der Glastafel.....	37
4.3.2	Modellierung des Punkthalters.....	38
4.4	Ermittlung der notwendigen Netzdichte	41
4.4.1	Allgemeines.....	41
4.4.2	Kreisringplatte mit Punkthalter	43
4.4.3	Kreisringplatte ohne Punkthalter.....	46

4.4.4	Vierpunktgestützte Glastafel	54
4.4.5	Abbildungsvorschrift.....	59
5	Versuche an vierpunktgestützten Glastafeln	63
5.1	Allgemeines.....	63
5.2	Versuchsaufbau	64
5.2.1	Allgemeiner Versuchsaufbau	64
5.2.2	Besonderheiten der einzelnen Versuchsreihen.....	67
5.2.3	Zusammenstellung der durchgeführten Versuche.....	70
5.2.4	Beschreibung der Messeinrichtung	70
5.3	Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung.....	74
5.3.1	Vorgehensweise bei der Durchführung der Versuche.....	74
5.3.2	Auswertung der Messergebnisse.....	75
5.4	Verifizierung der FE-Modellierung	76
5.4.1	Allgemeines.....	76
5.4.2	Beurteilung der FE-Modellierung anhand der durchgeführten Versuche.....	77
6	Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren mit dem verifizierten FE-Modell	86
6.1	Allgemeines.....	86
6.2	Einfluss der Lochverfüllung.....	86
6.3	Einfluss der Randabstände	98
6.4	Einfluss der EPDM-Steifigkeit.....	107
6.5	Einfluss der Halterausführung.....	113
6.6	Einfluss der Bohrlochgröße.....	117
6.7	Einfluss der Tafeldicke.....	119
6.8	Zusammenfassung.....	120
7	Entwicklung von Vordimensionierungstafeln.....	122
7.1	Allgemeines.....	122
7.2	Berechnungen nach geometrisch nichtlinearer Theorie.....	122
7.3	Berechnungen nach DIN EN 13474.....	125
7.4	Parameterstudie	127
7.5	Vordimensionierungstafeln	129
7.5.1	Allgemeines.....	129
7.5.2	Tafeln für den Spannungsnachweis.....	129
7.5.3	Tafeln für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis.....	136
7.5.4	Tafeln zur Bestimmung der horizontalen Auflagerkräfte	140
7.6	Anwendbarkeit der Tafeln für die VSG-Bemessung	146
8	Zusammenfassung und Ausblick	148
8.1	Zusammenfassung.....	148
8.2	Ausblick	149
9	Schrifttum.....	151

Bildverzeichnis.....	158
Tabellenverzeichnis.....	164
Anhang	165
Anhang A1: Versuchsreihe 1: Starrer Halter mit 15 mm Loch.....	165
Anhang A2: Versuchsreihen 2 und 3: Gelenkiger Halter mit 15 mm Loch.....	175
Anhang A3: Versuchsreihe 4: Starrer Halter mit 35 mm Loch.....	185
Anhang A4: Versuchsreihe 5: Gelenkiger Halter mit 35 mm Loch.....	195
Anhang A5: Versuchsreihe 6: Starrer Halter mit 35 mm Loch / verfüllt.....	205
Anhang A6: Versuchsreihe 7: Gelenkiger Halter mit 35 mm Loch / verfüllt.....	215
Anhang A7: Bemessungstafeln für Randabstände 100 mm.....	225
Anhang A8: Bemessungstafeln für Randabstände 200 mm.....	228
Anhang A9: Bemessungstafeln für Randabstände 300 mm.....	231

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die deutsche Glasindustrie konnte im Jahr 2001 trotz der allgemein schwachen Wirtschaftslage ihren Umsatz um vier Prozent auf neun Milliarden Euro steigern. Größter Abnehmermarkt war mit einem Anteil von 35 % am Produktionswert die Bauindustrie. Dieser hohe Anteil ist auf die Gestaltungswünsche der Architekten zurückzuführen, die den Werkstoff Glas zur Schaffung sehr organischer, lichtdurchfluteter und leichter Konstruktionen einsetzen. Durch Einsatz von punktgestützten Glastafeln (siehe Bild 1.1) versuchen die Architekten die Transparenz der Glaskonstruktionen weiter zu erhöhen und die Glashalterung zu entmaterialisieren. Die erhöhte Transparenz wird allein schon durch den minimierten Flächenanteil dieses Befestigungssystems erreicht. Zum Vergleich beträgt der Befestigungsflächenanteil linienförmig gelagerter Verglasungen (Pressleistenverglasung) 8 bis 10 %, der Befestigungsanteil punktförmiger Glashaltesysteme weniger als 0,5 % der aufgelagerten Glasfläche [9].

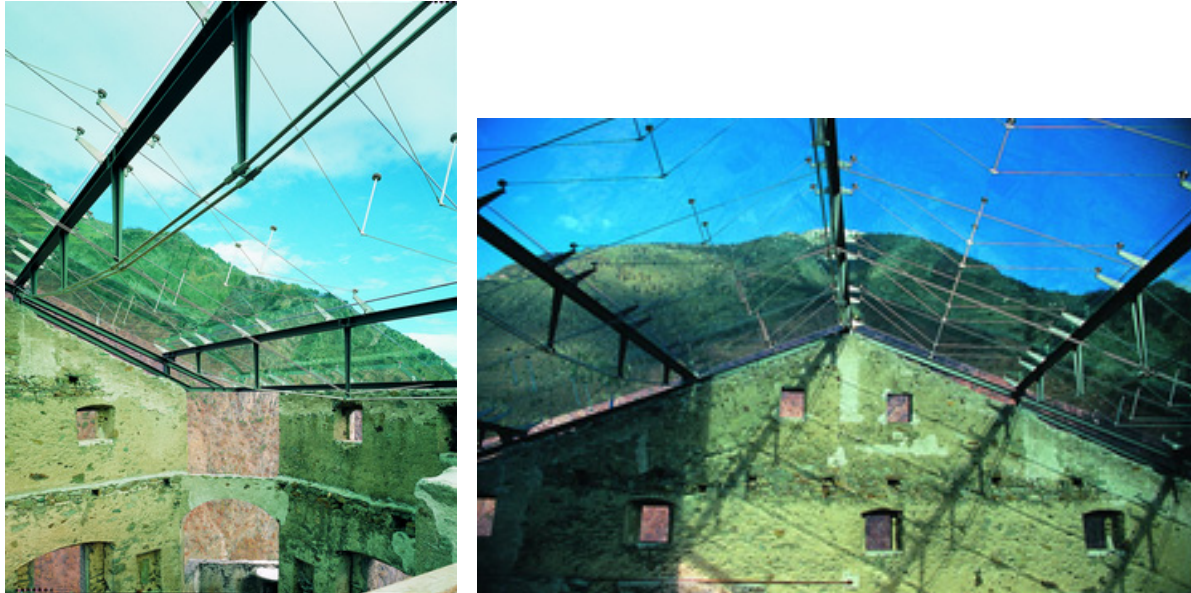


Bild 1.1: Glasdach auf Schloss Juval [15]

In den nächsten Jahren ist mit einem weiteren Wachstum der Glasproduktion für den Bausektor zu rechnen, da dem Werkstoff Glas die weitreichendsten Entwicklungspotentiale aller zur Zeit am Bau verwendeten Baustoffe vorausgesagt werden. Die positiven Prognosen beziehen

sich auf den Einsatz von Glas als tragendem Baustoff sowie auf die Einführung neuer Bemessungsnormen und -hilfen für den konstruktiven Glasbau.

Für die Bemessung von vierseitig linienförmig gelagerten Glastafeln (siehe Bild 1.2 a) ist dies durch zahlreiche Veröffentlichungen z.B. [6], [43], [42], durch die Einführung der „Technischen Regel für die Verwendung von liniengelagerten Verglasungen“ [22] sowie darauf basierenden Bemessungsprogrammen [35], [38] weitestgehend abgeschlossen. Die punktförmige Glaslagerungsart dagegen ist nur für Einzelanwendungen durch Zulassungen [17], [20] bauaufsichtlich geregelt. Die DIN 18516 / Teil 4 [27] erwähnt zwar die punktförmige Glastafellagerung, dabei wird aber von punktförmiger Lagerung am Glastafelrand (siehe Bild 1.2 b) und nicht in der Glastafelfläche (siehe Bild 1.2 c) ausgegangen.

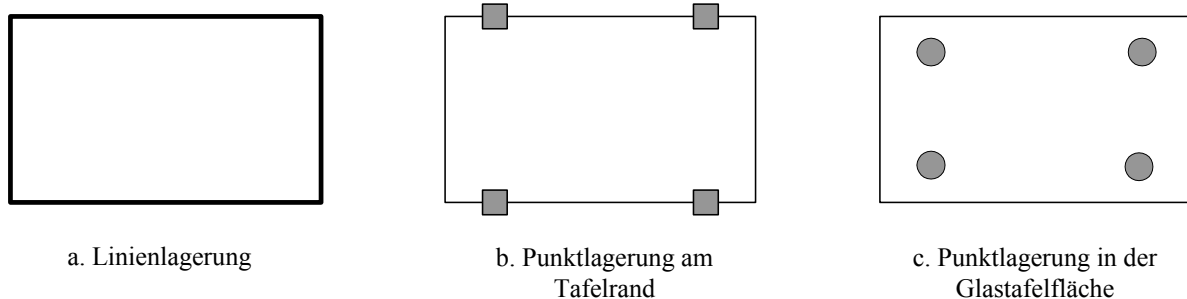


Bild 1.2: Lagerungsarten von Glastafeln

Die hier vorliegende Arbeit befasst sich ausschließlich mit punktgestützten Glastafeln, die durch in der Glastafelfläche befestigte Punkthalter mit der Unterkonstruktion verbunden sind. Werden die Ausdrücke „Punktlagerung“ oder „Punktstützung“ verwendet, so beziehen sie sich im Rahmen dieser Arbeit auf diesen konkreten Anwendungsfall.

1.2 Problemstellung

Bei der Bemessung punktgestützter Glastafeln kann auf die Abbildung des punktgestützten Systems mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) nicht verzichtet werden, da eine Dimensionierung aufgrund komplexer geometrischer Lagersituationen in Verbindung mit verschiedenen Materialien mit einfachen Handberechnungen nicht möglich ist [11], [12], [55], [56], [62].

Für eine einheitliche, den Sicherheitsbedürfnissen entsprechende, rechnerische Abbildung der punktgestützten Glastafel gibt es bisher im Fachschrifttum nur wenige Ansätze. Die Erfahrung zeigt, dass abhängig vom verwendeten FE-Programm und dem Kenntnisstand des Anwenders, unterschiedliche Modellierungen für den Halterbereich verwendet werden [12], [13],

[55], [62], [72]. Auch die Berücksichtigung der Anbindung der Punkthalter an die Stahlunterkonstruktion und die dadurch bedingten statischen Systeme werden nicht einheitlich gehandhabt [8], [49], [69], [87].

Die Untersuchungen in [12], [55], [56], [70] und [71] liefern zwar erste Anhaltspunkte über das Resultat unterschiedlicher Abbildungen des punktgestützten Systems mit der FEM, es werden aber keine Aussagen über das Lastabtragungsverhalten im Lochbereich sowie über den Einfluss verschiedener Faktoren (z.B. Steifigkeiten der elastischen Zwischenschichten, Bohrlochgröße etc.) auf das Tragverhalten der punktgestützten Glastafel gemacht. Darüber hinaus fehlt die Verifizierung der verwendeten FE-Modelle durch Versuche. Erste Aussagen zu den oben angesprochenen offenen Punkten werden in den neuesten Untersuchungen [77], [16] zu dieser Problematik gemacht.

In [52] und [68] werden Versuche gefordert, durch deren Nachrechnung mittels FEM eine Benchmarkmodellierung zur Kalibrierung der in der Praxis vorkommenden Modellvielfalt entwickelt werden kann. Die Grenzen dieses Lösungsansatzes zeigen die Untersuchungen aus [34]. Dort wurden verschiedene FE-Modelle unter Berücksichtigung von Reibung und Kontakt mit dem FE-Programm ANSYS aufgebaut und mit den in [10] als Benchmarkversuche bezeichneten Versuchen verglichen. Dabei ergab sich, dass die in [10] beschriebenen Basisversuche zu wenig Vergleichswerte für die Verifizierung von FE-Modellen liefern: Neben der Kraft wurde nur die Durchbiegung unter der Lasteinleitung aufgezeichnet.

Neben einer Verifizierung der FE-Modellierungen anhand von Versuchen, muss deshalb auch ein Ansatz durch Rückführung des Problems auf einfache analytische Lösungen gewählt werden. Durch diese Vorgehensweise ist sichergestellt, dass die FE-Modelle nicht mit den Versuchsergebnissen kalibriert werden, sondern die Versuche nur eine Bestätigung des rechnerischen Ansatzes bilden.

Obige Ausführungen zeigen, dass sowohl für die Qualifizierung der Rechenansätze für den Tragfähigkeitsnachweis als auch für die Entwicklung von Vordimensionierungshilfen, die auf vereinfachten und vorsichtigen Annahmen beruhen dürfen, die notwendigen Grundlagenuntersuchungen fehlen.

1.3 Ziele und Gliederung der Arbeit

Aus den unter 1.2 genannten Aspekten lassen sich die Ziele dieser Arbeit ableiten, die im Rahmen der Beschreibung der einzelnen Kapitel herausgestellt werden sollen.

Zur Darstellung der zum Verständnis des Lastabtragungsverhaltens von punktgestützten Glastafeln erforderlichen Grundlagen wird in **Kapitel 2** das System der punktgestützten Glastafel in die zwei Hauptkomponenten Glastafel und Punkthalter zerlegt, und die wesentlichen Kraftübertragungswege von der Glastafel über den Punkthalter zur Unterkonstruktion werden vorgestellt. Darüber hinaus werden mögliche Lagerungsarten von punktgestützten Glastafeln und die daraus resultierenden statischen Systeme beschrieben.

Ausgehend von der Zusammenstellung aller für die Bemessung notwendigen Parameter werden diese in **Kapitel 3** für die späteren Untersuchungen der Lastabtragungsmechanismen im Lochbereich sowie für die Erstellung von Vordimensionierungshilfen sinnvoll eingegrenzt. Diese Eingrenzung berücksichtigt die Vorgaben der Bauaufsicht und der Planer, die zu erwartenden Einwirkungen sowie die möglichen Abmessungen der Systemkomponenten (Glastafel, Punkthalter), die von den Produktions- und Nachbearbeitungsanlagen abhängig sind.

In **Kapitel 4** wird auf die FE-Modellierung punktgestützter Glastafeln mit dem in dieser Arbeit verwendeten FE-Programm ANSYS eingegangen. Besonderes Augenmerk wird auf die Abbildung des Stützbereiches gelegt. Durch schrittweise Abstraktion der vierpunktgestützten Glastafel auf die Kreisringplatte mit Ringlast wird die erforderliche Netzdichte im Stützbereich ermittelt und eine Abbildungsvorschrift für das FE-Modell angegeben.

Die für die Verifizierung dieser FE-Modellierung notwendigen Versuche an punktgestützten Glastafeln werden in **Kapitel 5** beschrieben, ausgewertet, und ihre Ergebnisse werden dargestellt. Es werden verschiedene Versuchsreihen vorgestellt, die sich in einzelnen Parametern (z.B. Verfüllzustand des Loches, Lochgröße) unterscheiden. Den Abschluss des Kapitels bildet die Beurteilung der Abbildungsvorschrift aus Kapitel 4 durch einen Vergleich der FE-Berechnungen mit den Ergebnissen der durchgeführten Versuche.

Mit dem verifizierten FE-Modell werden in **Kapitel 6** Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss verschiedener Faktoren (z.B. Steifigkeiten der elastischen Zwischenschichten, Verfüllzustand des Bohrloches etc.) auf das Tragverhalten des punktgestützten Systems durchgeführt. Dabei werden in Erweiterung der in Kapitel 2 gelegten Grundlagen die Lastabtra-

gungsmechanismen im Lochbereich in Abhängigkeit von den einzelnen Einflussfaktoren behandelt.

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel ist in **Kapitel 7** die Entwicklung von Vordimensionierungshilfen für punktgestützte, monolithische Glastafeln unter gleichförmiger Flächenlast dokumentiert und ihre Übertragbarkeit auf Verbundsicherheitstafeln beschrieben. Die Entwicklung der Bemessungshilfen beschränkt sich dabei auf den in dieser Arbeit verwendeten Punkthalterttyp sowie den in der Praxis am häufigsten auftretenden Fall der vierpunktgestützten, doppelsymmetrischen Glastafel.

Den Abschluss der Arbeit bildet **Kapitel 8** mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse und einem Ausblick auf sich anschließende Forschungsmöglichkeiten.

Abschließend seien als Zusammenfassung die wesentlichen Ziele der vorliegenden Arbeit nochmals wiederholt.

Zusammenfassung der Ziele:

1. Entwicklung einer FE-Abbildungsvorschrift für den Lochbereich punktgestützter Glastafeln
2. Verifizierung der unter 1. entwickelten FE-Abbildungsvorschrift durch Versuche an vierpunktgestützten Glastafeln
3. Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren auf das Tragverhalten der punktgestützten Glastafel, insbesondere auf die Lastabtragungsmechanismen im Lochbereich
4. Entwicklung von Bemessungshilfen zur Vordimensionierung von punktgestützten Glastafeln unter gleichförmiger Flächenlast

2 Das System der punktgestützten Glastafel

2.1 Allgemeines

Wie in der Einleitung der vorliegenden Arbeit angesprochen, ist die punktförmige Glaslagerungsart mit Befestigungsmitteln in der Glastafelfläche bauaufsichtlich nur in Form von Zulassungen für einzelne Sonderkonstruktionen [17], [20] geregelt. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass auf dem Markt eine Vielzahl verschiedener Glassorten und eine noch größere Anzahl von Punkthalterausführungen vorhanden ist.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Kraftübertragungswege über Kontakt und Reibung von der Glastafel in den Punkthalter behandelt sowie die verschiedenen Anschlussmöglichkeiten der punktgestützten Glastafel an die Unterkonstruktion vorgestellt. Dadurch werden die Grundlagen, die zum Verständnis des Lastabtragungsverhaltens von punktgestützten Glastafeln notwendig sind, gelegt. Im Anschluss daran wird ein Überblick über die einzelnen Glassorten und Punkthalterausführungen gegeben, und es werden Angaben zum Nachweis der Punkthalter gemacht.

2.2 Kraftübertragungswege

2.2.1 Allgemeines

In [85] werden die prinzipiellen Möglichkeiten zur kraftschlüssigen Verbindung von Glas mit der Unterkonstruktion ausführlich behandelt. Der Autor unterscheidet dabei zwischen Klebeverbindungen, Lochleibungsverbindungen und Reibverbindungen. Die Befestigung von gebohrten Glastafeln über Punkthalter mit der Unterkonstruktion lässt sich dabei nicht eindeutig einer dieser Kategorien zuordnen. Vielmehr werden hier die Lasten über eine Kombination aus Kontakt- und Reibungskräften von der Glastafel über die Punkthalter in die Unterkonstruktion geleitet. Nachfolgend werden diese Lastabtragungswege kurz vorgestellt und gezeigt, wo sie im System der punktgestützten Glastafel auftreten. Weitergehende Überlegungen finden sich in Kapitel 6 dieser Arbeit.

2.2.2 Kraftübertragung durch Kontakt

Durch Kontakt werden ausschließlich Druckkräfte übertragen, die normal zur Kontaktfläche wirken. Zur Vermeidung von zu hohen Spannungen im Krafteinleitungsbereich müssen die Kontaktflächen ausreichend groß sein. Bei dem System der punktgestützten Glastafel kann eine Kraftübertragung über Kontakt an verschiedenen Stellen erfolgen. Dies hängt hauptsächlich davon ab, ob die Belastung normal zur Glastafel oder in Glastafelebene wirkt.

1. Belastung normal zur Glastafelebene

In diesem Fall wird der Hauptteil der Belastung von der Glastafel über Elastomerringe (EPDM-Ringe) in die Punkthalterdeckel eingeleitet (siehe Bild 2.1).

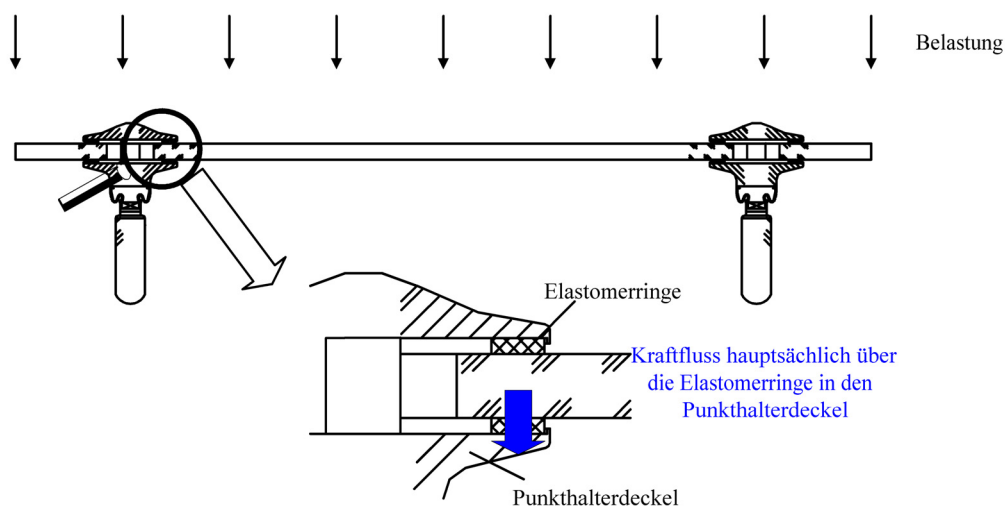


Bild 2.1: Belastung der Glastafel normal zur Glastafelebene

Durch eine Vorspannung der Punkthalterdeckel (Kompression der Elastomerringe) können im Extremfall bis zur Entlastung der Kontaktflächen auch äußere Zugkräfte aus Momentenbelastungen aufgenommen werden.

2. Belastung in der Glastafelebene

In diesem Fall wird der Hauptteil der Belastung von der Glastafel über Zwischenschichten die den direkten Kontakt zwischen Glas und Metall vermeiden in den Glasdickebolzen eingetragen (siehe Bild 2.2).

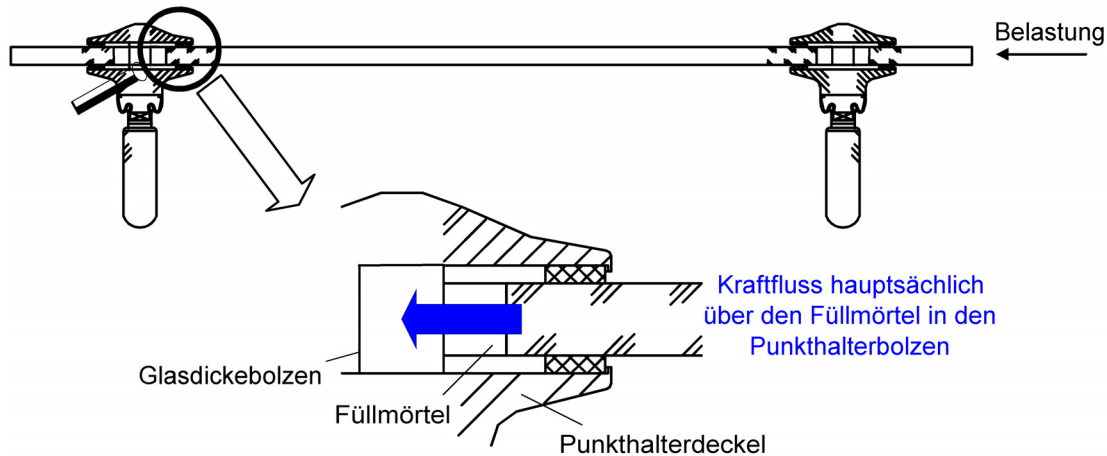


Bild 2.2: Belastung der Glastafel in der Glastafelebene

2.2.3 Kraftübertragung über Reibung

Durch die Vorspannung der Punkthalterdeckel kann ein Anteil der Belastung auch über Reibung zwischen der Glastafel und den Elastomerringen (siehe Bild 2.3) übertragen werden. Die Kraftübertragung über Reibung ist dabei zum einen auf die mechanische Verzahnung der Mikrorauhigkeiten beider Kontaktflächen zurückzuführen, zum anderen treten in der Kontaktfläche auch Adhäsionskräfte auf.

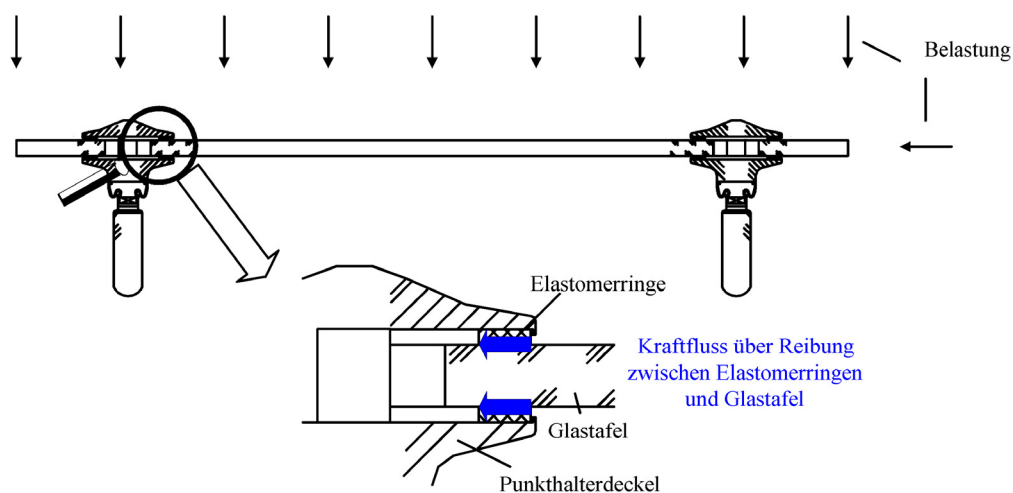


Bild 2.3: Kraftübertragung über Reibung

Für die spätere Abbildung des punktgestützten Systems mit der FEM ist die Information, wie viel Kraft über Reibung zwischen den EPDM-Schichten des Punkthalters und der Glasoberfläche übertragen werden kann, wichtig.

Zur Bestimmung der Reibungskräfte des in dieser Arbeit untersuchten Punkthalters (für genauere Angaben zum Punkthalter siehe Kapitel 5.2.2.) wurden in [66] Kleinversuche an Glas tafeln mit einem Punkthalter und Gesamtbauteilversuche an vierpunktgestützten Glastafeln durchgeführt. In Bild 2.4 sind beispielhaft die erhaltenen Last-Verformungskurven der Kleinversuche mit einem Punkthalter angegeben.

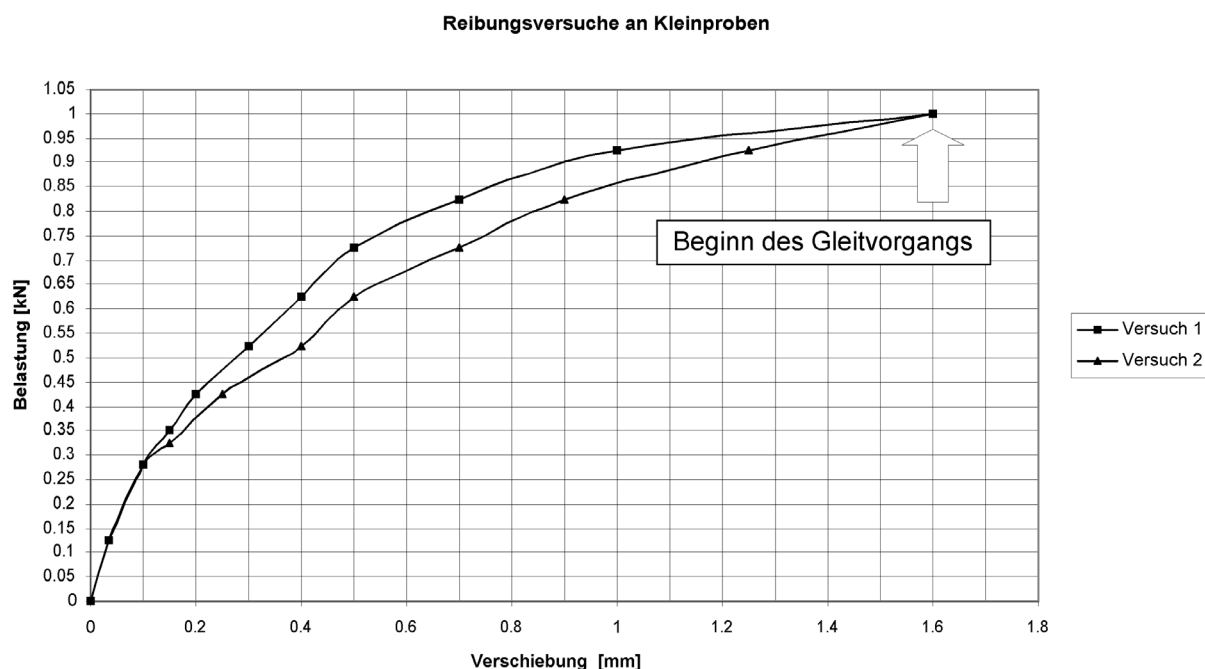


Bild 2.4: Messergebnisse der Reibungsversuche an Glastafeln mit einem Punkthalter [66]

Aus Bild 2.4 geht hervor, dass über Haftreibung pro Punkthalter maximal 1 kN übertragen werden konnte. Danach begann der Gleitvorgang. Deutlich zu sehen ist zudem der, durch die Schubverformung der EPDM-Schichten bedingte, nichtlineare Verlauf der Kraft-Verformungskurve.

Die Versuche aus [66] zeigen, dass über diesen Lastpfad Kräfte übertragen werden können. In der hier vorliegenden Arbeit wurde die Möglichkeit dieser Lastabtragung bei der Abbildung mit der FEM deshalb berücksichtigt. Inwieweit die Abbildung dieses Lastpfades notwendig ist, zeigen die Untersuchungen in Kapitel 6.

2.3 Anschluss an die Unterkonstruktion

2.3.1 Ausgleich von Fehlmaßen

Der Ausgleich von Fehlmaßen bei Glaskonstruktionen ist umfassend einzuplanen. Die Bemessung muss dabei stets für die ungünstigste Lage und Richtung der angreifenden Lasten und unter Berücksichtigung der Punkthalterart (siehe Tabelle 2.1) erfolgen.

In [10] werden die Anforderungen an die Unterkonstruktion und das Glas beschrieben. Für die Unterkonstruktion wird demnach gefordert, dass die zulässige Maßabweichung (Toleranz) für die Lage der Anschlusspunkte an die Punkthalter ± 5 mm nicht überschreiten darf.

Auch an die Toleranzen beim Glas werden spezielle Anforderungen gestellt. Dabei werden die Toleranzen von einem Referenzpunkt angegeben (siehe Bild 2.5). Die Toleranz A gibt den Abstand zwischen dem Referenzpunkt und der Achse des angrenzenden Loches an. Sie beträgt ± 1 mm. Toleranz B ist die Distanz zwischen zwei beliebigen Bohrlochachsen (in x- oder y-Richtung). Als Wert werden ± 2 mm zugelassen. Die Glasbohrungen sind unter Beachtung der in [24] angegebenen Grenzabmaße herzustellen. Die Bohrungen sollen möglichst glatt und mit ausgebildeten Fasen sein. Auf den zulässigen Versatz von Bohrlochrändern wird unter anderem in [29] eingegangen.

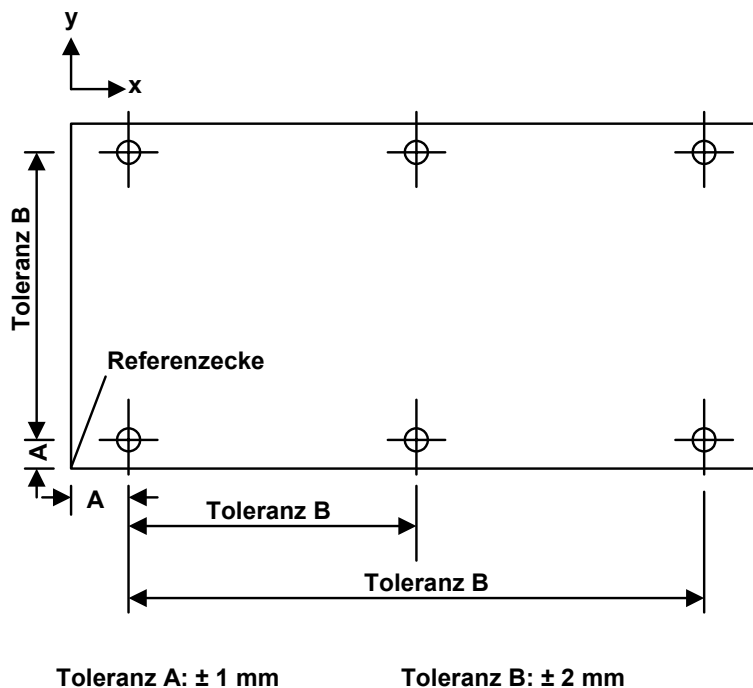


Bild 2.5: Toleranzen an Glastafeln nach [10]

In der Praxis gibt es für punktgestützte Glaskonstruktionen zwei verschiedene Möglichkeiten vorhandene Fehlmaße auszugleichen und dadurch Montagezwängungen zu vermeiden. Diese sind:

1. Aufnahme der Fehlmaße ausschließlich im Bohrloch

In diesem Fall wird die Bohrung größer als der Durchmesser des Glasdickebolzen ausgeführt. Der verbleibende Zwischenraum zwischen Glasdickebolzen und Lochrand der Glastafel wird durch Füllmörtel z.B. [58] ausgefüllt. Diese Möglichkeit kann nur bei Tellerkopfhaltern (siehe Tabelle 2.1) zur Anwendung kommen. Bei Senkkopfhaltern ist dies aufgrund der notwendigen Passgenauigkeit des Senkkopfes mit der Fase des Glases nicht möglich. Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass der Glasdickebolzen nicht immer zentrisch im Bohrloch sitzt, d.h. je nach Lage des Bolzens mehr oder weniger Zwischenraum zum Lochrand vorhanden ist. Dies erschwert das gleichmäßige Einbringen des Füllmaterials.

2. Aufnahme der Fehlmaße an der Unterkonstruktion

Zu diesem Zweck werden zwischen Punkthalter und Tragarm der Unterkonstruktion Ausgleichselemente (siehe Bild 2.7) eingefügt. Neben dem Ausgleich von Montagetoleranzen sollen diese Elemente außerdem dazu dienen, eine statisch bestimmte Lagerung der Glastafeln zu erreichen. Vom Prinzip her sind diese Ausgleichselemente nichts anderes als Langlöcher, die aus dem Stahl- und Leichtmetallbau bekannt sind. Wegen der Ausgleichselemente müssen die Bohrungen im Glas nur wenige Millimeter größer als der Durchmesser der Glasdickebolzen sein. Zudem können auf diese Weise auch Konstruktionen mit Senkkopfhaltern zwängungsarm gelagert werden. Es ist dennoch erforderlich, den direkten Kontakt zwischen Glas und Stahl durch geeignete Materialien zu verhindern [60].

2.3.2 Statische Systeme

Inwieweit Zwängungskräfte infolge behinderter Verformungen auftreten, hängt von der Wahl des statischen Systems der Auflagerung ab.

Im allgemeinen ist es konstruktiv einfacher und damit auch billiger, statisch hochgradig unbestimmt anzuschließen, als durch die Schaffung von Freiheitsgraden den Grad der Unbestimmtheit zu vermindern [81]. Für eine reine statisch bestimmte Lagerung sind drei Auflager erforderlich, deren Wirkungslinien nicht parallel sind und sich nicht in einem Punkt schneiden (siehe Bild 2.6 a).

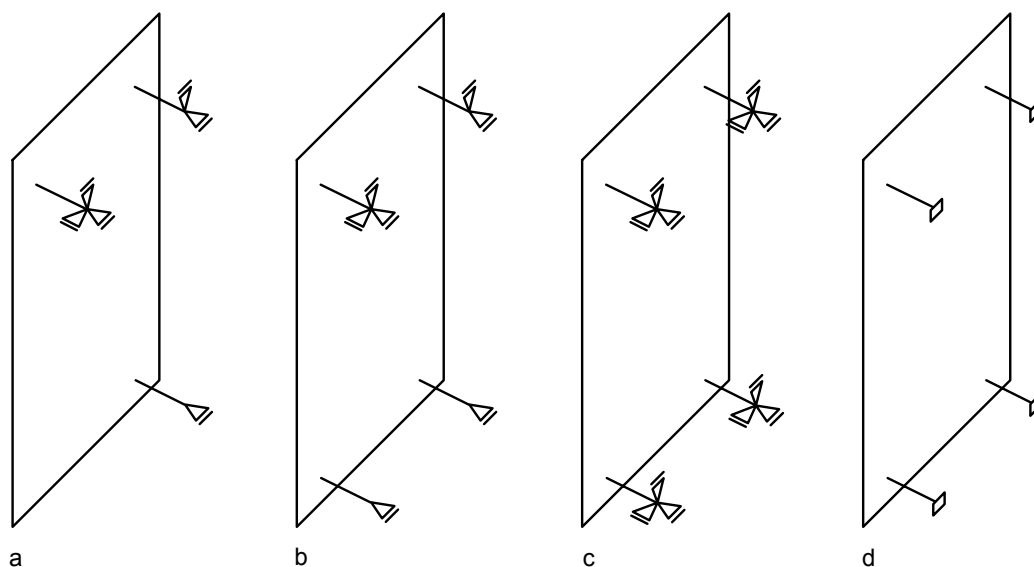


Bild 2.6: Lagerungsarten von Glastafeln nach [12]

Aufgrund architektonischer Vorgaben ist diese Lagerung in den seltensten Anwendungsfällen realisierbar. Im Glasbau werden deshalb die bereits in 2.3.1 erwähnten Ausgleichselemente (siehe Bild 2.7) zwischen Punkthalter und Tragarm der Unterkonstruktion eingebaut. Mit diesen ist es möglich Fest-Lager, Vertikal-Lager und Los-Lager auszuführen und eine „statisch bestimmte Lagerung“ der Glastafeln in Glastafelebene zu ermöglichen (siehe Bild 2.6 b). Zwangsbeanspruchungen bei Unterkonstruktionsdeformationen aus der Glastafelebene heraus sind trotzdem möglich [12]. Damit eine Verschieblichkeit der Vertikal-Lager und der Los-Lager gewährleistet ist, werden an den Kontaktflächen zwischen Verschraubung und Unterkonstruktion PTFE-Gleitfolien eingesetzt.

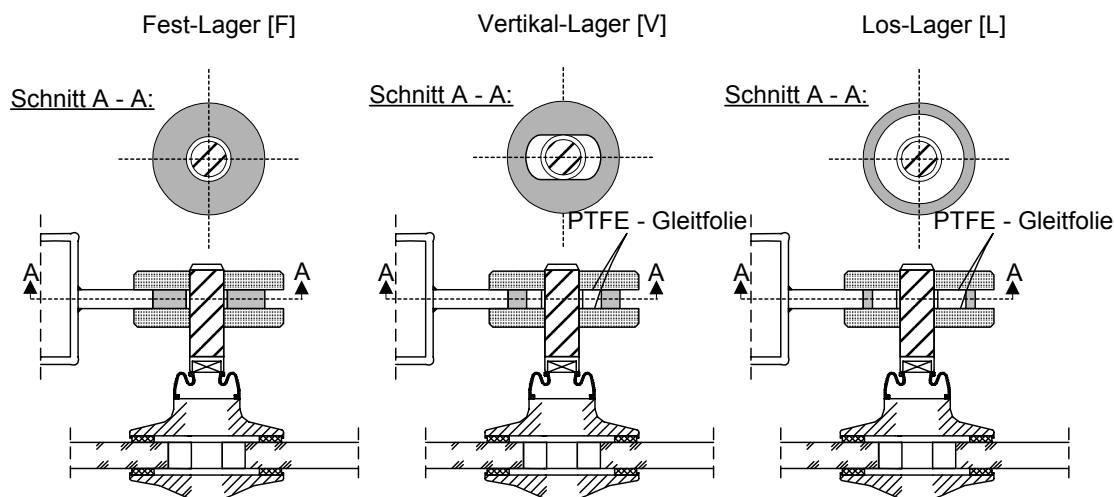


Bild 2.7: Ausgleichselemente

Bei der Bauausführung muss überprüft werden, ob die theoretischen Vorgaben auch richtig umgesetzt wurden. Oft wird bei der Bauausführung festgestellt, dass die Ausgleichselemente kein geeignetes Mittel für die Gewährleistung der Verschieblichkeit sind. Die Reibungskräfte zwischen Verschraubung und Unterkonstruktion sind trotz der eingebauten Gleitfolien aufgrund verschiedener Einflussfaktoren (Verschmutzung der Gleitfolien, erhöhtes Anzugsmoment der Verschraubung) nicht genau erfassbar. Bei schräger Belastung kann durch Klemmen oder Fräsen sogar bei korrektem Einbau der Elemente die Verschieblichkeit verloren gehen. In diesen Fällen ergeben sich die statischen Systeme von Bild 2.6 c und d.

2.4 Glasprodukte

Die Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten von Glas und die damit verbundene hohe Anzahl an Glasprodukten erschwert eine einheitliche Einteilung von Glas und Glaserzeugnissen. Selbst bei einer Beschränkung auf Glasprodukte aus dem Bereich Bauwesen kann kein einheitliches Prinzip für die Benennung oder Einteilung gefunden werden. In [78] sind verschiedene Einteilungsmöglichkeiten umfassend zusammengestellt. Hiernach können die Glasprodukte für die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Verglasungen zum Beispiel zunächst nach der Geometrie in die Kategorie Flachglas eingeordnet werden. Die weitere Unterteilung der Produkte kann entsprechend dem Veredelungszustand des Glases erfolgen in:

1. Floatglas (Spiegelglas)
2. Teilvorgespanntes Glas (TVG)

3. Einscheibensicherheitsglas (ESG)

Aus obigen Produkten kann mittels einer organischen Zwischenschicht ein Verbundglas hergestellt werden [26]. Wird die organische Zwischenschicht als Folie (vorwiegend Polyvinylbutyral (PVB)) ausgeführt, so wird das Endprodukt als Verbundsicherheitsglas (VSG) bezeichnet.

Für weitergehende Informationen wird auf das umfangreiche Schrifttum (z.B. [44], [79], [89]) verwiesen.

2.5 Punkthalter

2.5.1 Punkthalterausführungen

Bei der Lagerung mit Punkthaltern im Bohrloch können verschiedene Punkthalterausführungen zur Anwendung kommen. Diese können nach verschiedenen Kriterien kategorisiert (siehe Tabelle 2.1) werden. Prinzipiell gilt, dass der direkte Kontakt zwischen der Glastafel und dem Metall des Punkthalters durch geeignete Zwischenschichten dauerhaft und zuverlässig verhindert werden muss. Diese Schichten haben zum einen die Aufgabe, Spannungsspitzen im Glas zu vermeiden, zum anderen können sie je nach Steifigkeit eine Einspannung des Glases verhindern. Das Glas kann somit weitestgehend seiner natürlichen Biegelinie folgen. Eine weitere Möglichkeit, den Einspanngrad zu verringern, besteht darin, einige Punkthalter mit zusätzlichen Gelenken zu verwenden.

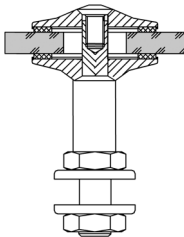
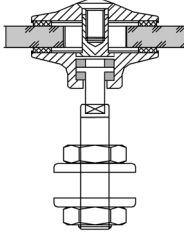
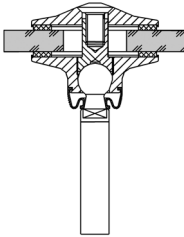
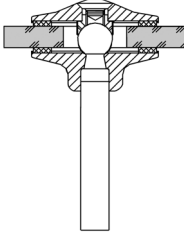
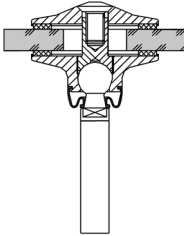
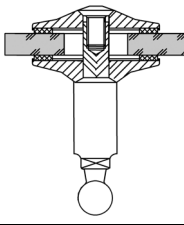
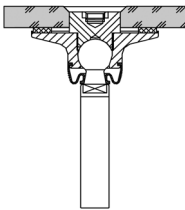
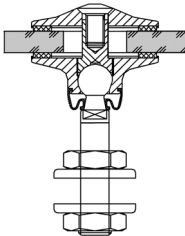
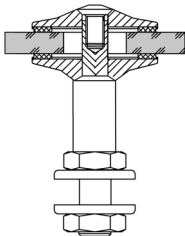
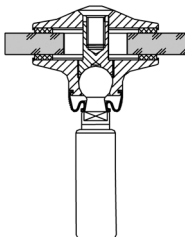
1. Verdrehbarkeit der Punkthalter		
a.	starr (ohne Gelenk)	
b.	beweglich-elastisches Gelenk	
c.	beweglich-reines Kugelgelenk	
2. Ort des Gelenkes		
a.	in der Glasaufebene (Schwerpunkt)	
b.	versetzt hinter der Glasaufebene	
c.	am Anschlagpunkt zur Unterkonstruktion	

Tabelle 2.1: Einteilung der Punkthalter

3. Ausbildung der Glastafelaußenseite		
a.	flächenbündig * ¹ (Senkkopfhalter)	
b.	nicht flächenbündig * ² (Tellerkopfhalter)	
4. Art der Lagerung / Anschluss an die Unterkonstruktion		
a.	Anschluss über eine geschraubte Verbindung	
b.	Anschluss über eine geschweißte Verbindung (Einschweißhülse / Anschweißhülse)	

*¹ Das Bohrloch muss auf der Glastafelaußenseite angefast sein, damit die Senkkopfschraube des Punkthalters flächenbündig mit der Glastafeloberfläche abschließen kann. Die Windsogsicherung der Glastafel erfolgt über die Fase und den Senkkopf des Punkthalters.

*² Das Bohrloch kann zylindrisch ausgeführt werden. Die Windsogsicherung erfolgt über den äußeren Teller des Punkthalters.

Tabelle 2.1 Fortsetzung: Einteilung der Punkthalter

2.5.2 Nachweis der Punkthalter

Die heute verwendeten Punkthalter werden in der Regel aus nichtrostendem Stahl [18] hergestellt. Sie sind kein geregeltes Bauprodukt, d.h. sie sind nicht in der Bauregelliste [21] aufgeführt und lassen sich je nach Ausführung nicht auf Basis einschlägiger Vorschriften des Metallbaus nachweisen. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für das Produkt Punkthalter gibt es bisher nur in Zusammenhang mit dem Baustoff Glas [17], [20]. Für die Erlangung einer solchen Zulassung sind Bauteilprüfungen notwendig. Die Prüfkörper bestehen aus ganzen Glastafeln, die mit Punkthaltern an einer Unterkonstruktion befestigt sind. Bei Belastungsversuchen versagen in der Regel die Glastafeln vor den Punkthaltern. Voraussetzung dafür ist eine entsprechend sorgfältige Produktion der Punkthalter sowie die Kenntnis der Besonderheiten des verwendeten nichtrostenden Materials [67].

In [52] sind Forderungen an die Hersteller von Punkthaltern aufgelistet. Darunter wird neben der Angabe von Abmessungen, genauen Materialangaben, Fügeverfahren auch die Angabe von Tragfähigkeiten gefordert. Da je nach Punkthalterhersteller der Punkthalter aus bis zu 20 Einzelteilen bestehen kann, ist die Ermittlung dieser Tragfähigkeiten nur durch Versuche möglich. Die Ermittlung der Tragfähigkeit auf rechnerischem Wege mit der FEM scheitert daran, dass Montagetoleranzen und Herstellverfahren bei der FE-Modellierung nur bedingt berücksichtigt werden können. In Bild 2.8 ist der in dieser Arbeit verwendete Punkthaltertyp (genauere Angaben zum verwendeten Punkthaltertyp finden sich in Abschnitt 5.2.2) abgebildet. Aus der Zeichnung geht hervor, an welchen Stellen theoretisch ein Versagen des Punkthalters eintreten kann. Wie aus Abschnitt 2.2 entnommen werden kann, werden über den Punkthalter Querkräfte und Normalkräfte aus der Glastafel zur Unterkonstruktion geleitet. Zur Beurteilung des Tragverhaltens des in dieser Arbeit zur Anwendung kommenden Punkthalters wurden Punkthalterversuche unter Normalkraft- und Querkraftbelastung gefahren [65] und daraus charakteristische Werte der Tragfähigkeit ermittelt [64].

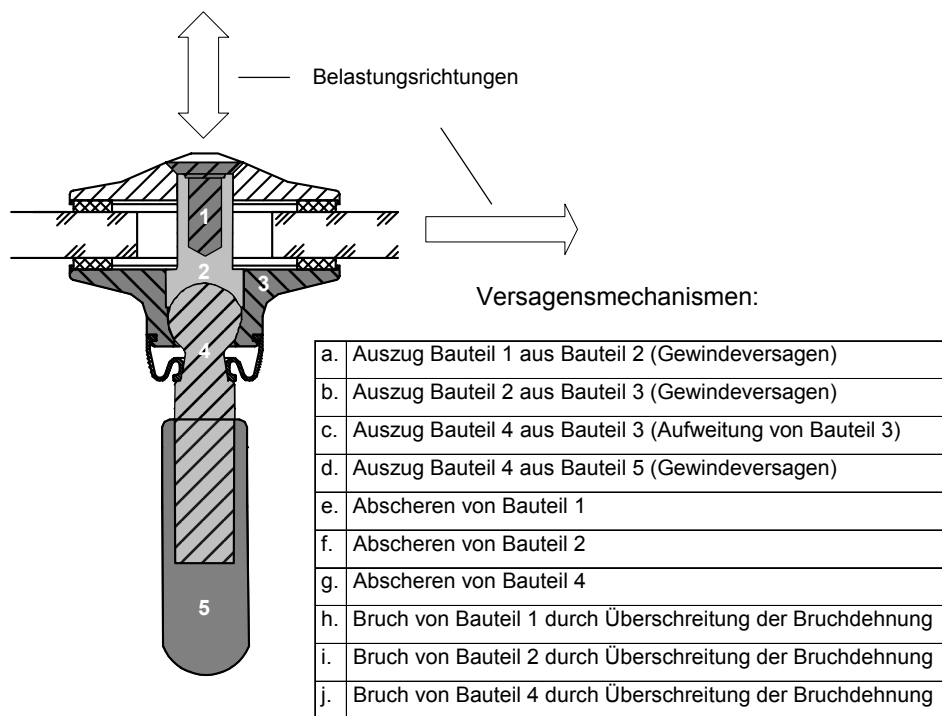


Bild 2.8: Versagensmechanismen eines Punkthalterbolzens

Bei Ermittlung der aufnehmbaren Querkraft des Punkthalterbolzens muss zunächst der Kraftfluss der äußeren Lasten betrachtet werden. Die äußeren Lasten werden von der Glastafel über den Glasdickebolzen in den Punkthalter eingeleitet. Von dort müssen sie auf die Kugel des Punkthalterbolzens übertragen werden können, um dann weiter in die Unterkonstruktion geleitet zu werden. Es wurden deshalb diese beiden Kraftwege untersucht. Die dazu notwendigen Versuchsaufbauten sind in Bild 2.9 und Bild 2.10 abgebildet. Der Querkraftversuch 1 dient der Überprüfung, ob die Lasten von der Glastafel über den Glasdickebolzen möglich ist. Insgesamt wurden fünf Querkraftversuche dieses Typus gefahren und mit den erhaltenen Versagenslasten mit [19] ein charakteristischer Tragfähigkeitswert von 13,2 kN ermittelt. Der ermittelte Wert entspricht einem 5 %-Fraktile Wert bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von $W = 75 \%$. Zudem wurde bei der Wertebestimmung der 5 %-Fraktile Wert mit einem Normierungsfaktor multipliziert, der sich aus dem Verhältnis der Streckgrenze Z_h nach Technischer Lieferbedingung [28] zur Streckgrenze Z_g des Versuchsmaterials ergab.

Durch den Querkraftversuch 2 wurden die Lasten ermittelt, die vom Punkthalterbolzen zur Unterkonstruktion geleitet werden können. Hierbei muss beachtet werden, dass in Abhängigkeit von der Eindrehentiefe des Punkthalterbolzens in die Einschweißhülse sowie der Einbautiefe

fe der Einschweißhülse unterschiedliche Hebelarme der Lasteinleitung zur Unterkonstruktion entstehen.

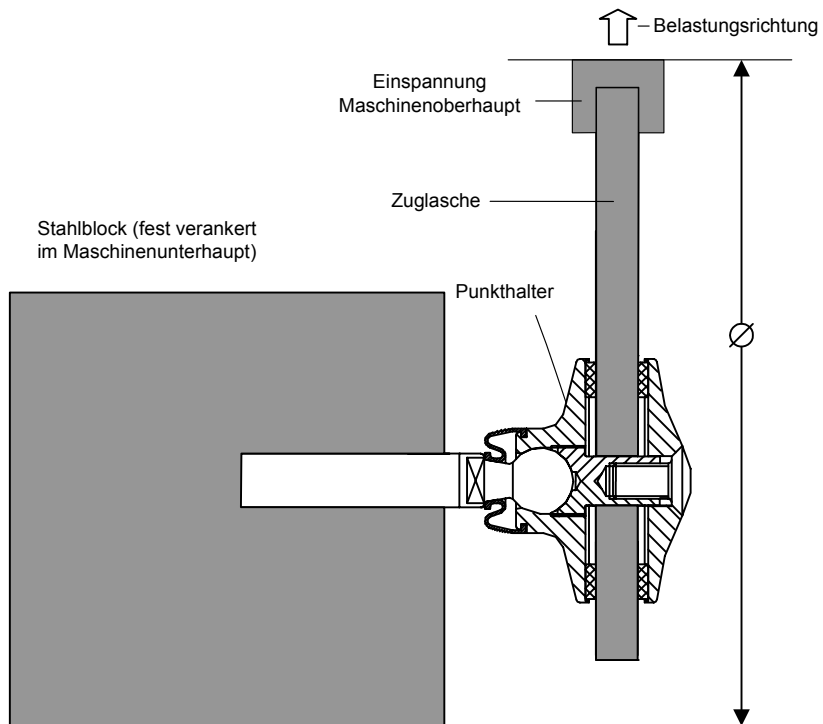


Bild 2.9: Querkraftversuch 1

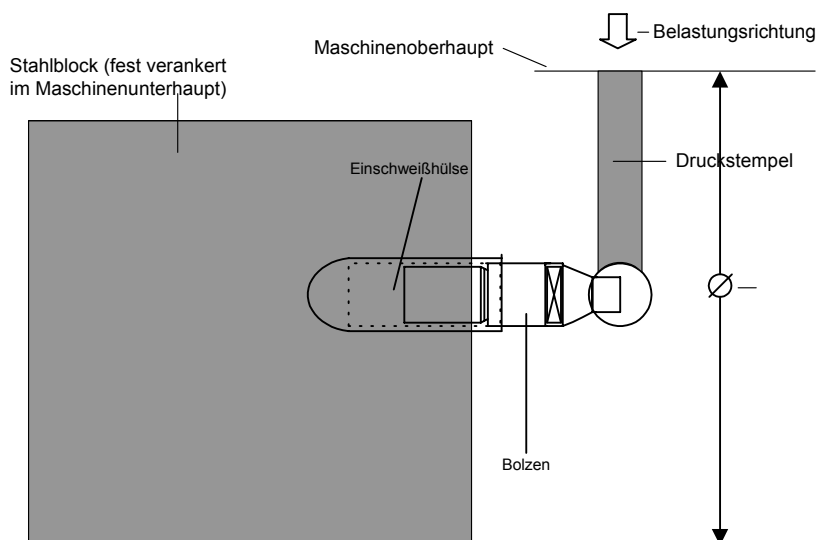


Bild 2.10: Querkraftversuch 2



Bild 2.11: Hebelarme bei den Querkraftversuchen 2

Die rechte der in Bild 2.11 dargestellten Einbausituationen lieferte im Vergleich zur linken Einbausituation bei gleicher Verschiebung des Bolzens geringere Lastwerte. Ein Versagen der Bolzen konnte nicht festgestellt werden. Zur Ermittlung eines charakteristischen Tragfähigkeitswertes wurden die Lasten bei einem Verformweg von 8 mm ausgelesen und entsprechend dem Vorgehen bei den Querkraftversuchen 1 ausgewertet. Als charakteristische Tragfähigkeit wurden 5,95 kN ermittelt. Ein Vergleich der Tragfähigkeit aus Querkraftversuch 1 und 2 zeigt, dass der Wert 5,95 kN maßgebend und für den Nachweis der Tragfähigkeit des Punkthalters auf Querkraft zu verwenden ist. Beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit muss beachtet werden, dass diese durch Plastizierung der Bolzen bei Lasten größer als 5 kN nicht mehr gegeben ist.

In Bild 2.12 ist der Versuchsaufbau für die Normalkraftversuche abgebildet. Das Versagen trat durch Herausziehen des Kugelkopfes des Punkthalterbolzens aus dem unteren Punkthalterdeckel auf. Wie bei den Querkraftversuchen auch, wurden fünf Versuche gefahren und entsprechend dem Vorgehen bei den Querkraftversuchen 1 und 2 ausgewertet. Als charakteristischer Wert der Tragfähigkeit unter Normalkraftbeanspruchung ergab sich 12,90 kN.

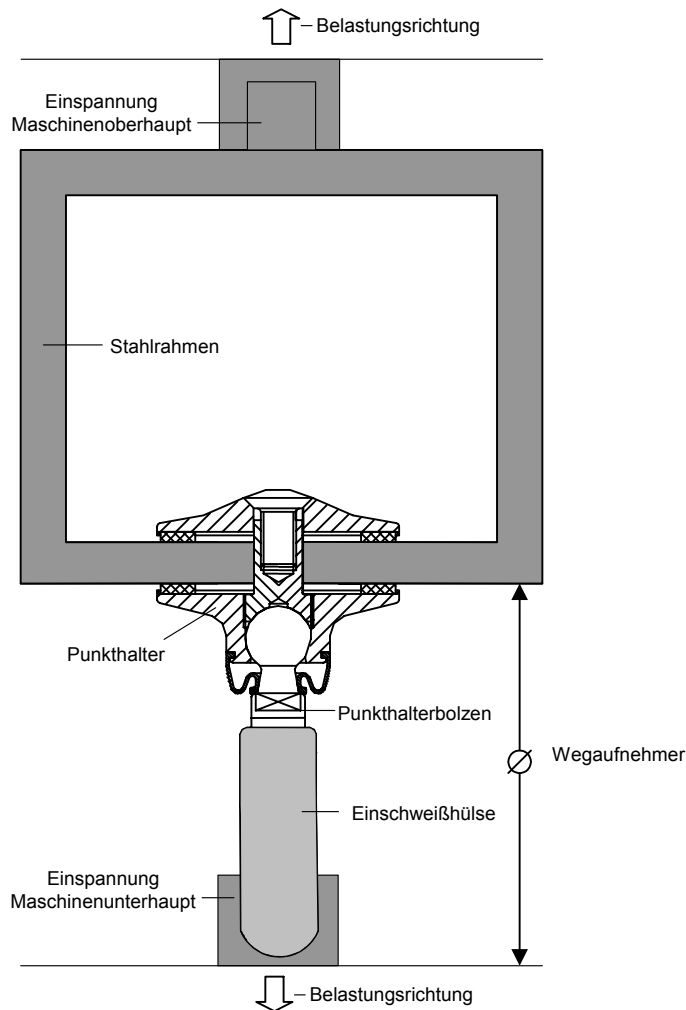


Bild 2.12: Normalkraftversuche

Mit den ermittelten charakteristischen Werten kann ein Interaktionsdiagramm für kombinierte Beanspruchungen erstellt werden. In diesem wird zwischen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit unterschieden. Die Grenze der Gebrauchstauglichkeit wurde so festgelegt, dass bis zu ihrem Erreichen der Bolzenwerkstoff ein annähernd linear-elastisches Verhalten aufweist. In Bild 2.13 ist das Diagramm angegeben. Die Bemessungswerte der Beanspruchbarkeiten ergeben sich mit diesen Werten, indem diese durch $\gamma_M = 1,1$ dividiert werden. Es wird auf der sicher liegenden Seite eine lineare Interaktion zwischen Normalkraft und Querkraft gewählt.

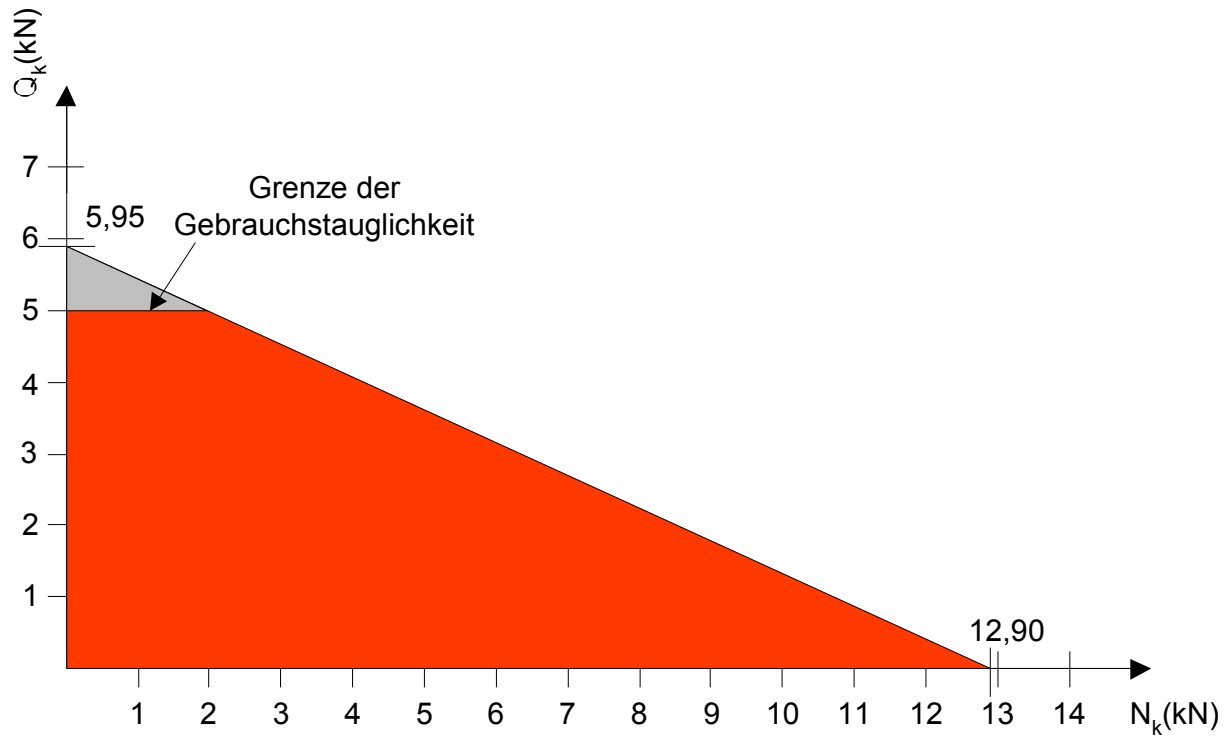


Bild 2.13: Interaktionsdiagramm zwischen Querkraft und Normalkraft [64]

3 Parameterspektrum

3.1 Allgemeines

Bei der Bemessung von punktgestützten Glastafeln spielen eine Reihe von Parametern eine Rolle. Diese sind unter anderen:

1. Glastafelabmessungen
2. Glastafelaufbau und Glastafeldicke
3. Ort der Punktlagerung
4. Art der Punktlagerung
5. Einwirkungen

Für die Entwicklung von Bemessungshilfen für punktgestützte Glastafeln ist es erforderlich, das gesamte Parameterspektrum zu kennen und die Einflussgröße der einzelnen Parameter auf der sicheren Seite liegend abzuschätzen. In den folgenden Abschnitten werden die Parameter zusammengestellt. Darüber hinaus geben die Abschnitte Auskunft darüber, wie das Parameterspektrum für die spätere Entwicklung der Bemessungshilfen (siehe Kapitel 7) eingegrenzt wurde.

3.2 Glastafelabmessungen

Die Glastafelabmessungen sind durch die Größe der Produktions- und Nachbearbeitungsanlagen auf Höchstmaße beschränkt. Bild 3.1 zeigt in einer Übersicht die erhältlichen Glastafelabmessungen. Zudem sollten „wirtschaftliche“ Höchstmaße, ab denen die Kosten für den Transport und Einbau oder der Preis der Glastafel im Vergleich zur Tafel der kleineren Abmessung überproportional ansteigen, nicht überschritten werden. Bei der Erstellung der Bemessungshilfen (siehe Kapitel 7) wird diesen Bedingungen Rechnung getragen, indem sowohl die Länge als auch die Breite der untersuchten Glastafeln auf 3 m beschränkt wurde.

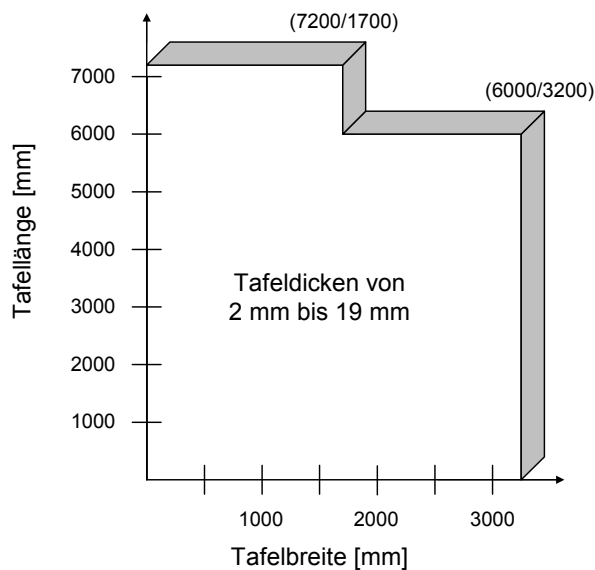


Bild 3.1: Produktionsbereich für Glastafeln nach [47]

3.3 Glastafelaufbau und Glastafeldicke

Prinzipiell kann zwischen monolithischen Glastafeln und Verbundgläsern unterschieden werden. In der derzeitigen Anwendung können monolithische Glastafeln in Dicken von 2 mm bis 19 mm produziert werden, wobei Glastafeln unter 8 mm im Bauwesen nur selten zur Anwendung kommen. Da monolithische Glastafeln keine Resttragfähigkeit besitzen und bei Glasbruch schlagartig versagen, werden heute vermehrt Verbundsicherheitsgläser eingesetzt. Neben der vorhandenen Resttragfähigkeit weisen diese Gläser den Vorteil auf, dass durch den Verbund zweier (oder mehrerer) Glasscheiben das Widerstandsmoment der Tafel erhöht werden kann. In welchem Maß und für welche Dauer die Verbundwirkung für die Bemessung angesetzt werden darf, ist trotz zahlreicher Untersuchungen (z.B. [3], [2], [7], [83], [82]) bisher nicht ausreichend geklärt. Auf der sicheren Seite liegend sollte deshalb ohne Annahme eines Verbundes gerechnet werden. Eine Ausnahme bildet die Bemessung von Isolierverglasungen, bei denen der Verbund einen negativen Einfluss auf das Tragverhalten haben kann [32], [33], [59]. Bei der Berechnung von Isolierglas müssen nach [22] deshalb beide Fälle (voller Verbund, kein Verbund) berücksichtigt werden.

Bei Verbundsicherheitsgläsern (VSG) reicht das Herstellungsspektrum für den normalen Baubereich (keine Anforderung an Begehbarkeit und Absturzsicherung) von zwei Tafeln à 4 mm bis zwei Tafeln à 12 mm. In Ausnahmefällen wird auch VSG aus zweimal 15 mm hergestellt. Da sich durch die Änderung der Tafeldicke auch der Halterhebelarm (Abstand Tafelmitte zur

felmitte zur Unterkonstruktion) verändert, muss diese Variable in der Untersuchung berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden monolithische Glastafeln der Tafeldicken 4 mm bis 20 mm untersucht. Inwieweit Ergebnisse dieser Untersuchungen für die VSG-Bemessung verwendet werden dürfen, zeigt Kapitel 7.6.

3.4 Ort der Punkthalterung

Bei Anordnung von Punkthaltern in der Glastafelfläche müssen verschiedene Gesichtspunkte beachtet werden. Zunächst sind die Wünsche des Architekten zu berücksichtigen. In der Regel ist es dessen Ziel, die Glaskonstruktion möglichst transparent wirken zu lassen. Dies führt dazu, dass die Punkthalter so nah wie möglich an den Tafelecken angeordnet werden.

Dieser Forderung sind aber oft durch statische Vorgaben (Einhaltung der zulässigen Spannungen und Durchbiegungen) Grenzen gesetzt. In [47] und [48] werden die aus statischer Sicht optimalen Positionen der Punkthalter angegeben. Dabei werden die Randabstände im Verhältnis zu den Glastafelabmessungen festgelegt. Für die in Kapitel 3.2 angegebenen Glastafelabmessungen entspricht der ideale Randabstand nach [48] 0,2-mal der Länge der jeweiligen Glastafelabmessung.

Weitere Einschränkungen bei der freien Wahl der Randabstände erfolgen durch Berücksichtigung von bauaufsichtlichen Forderungen (z.B. [29], [51]). In [51] werden die einzuhaltenden Randabstände rechtwinklig zu den Tafelrändern in einem Bereich von 80 mm bis 300 mm angegeben. Die Einhaltung dieser Randabstände soll zum einen verhindern, dass bei einer Belastung der Glastafel in Glastafelebene (z.B. Eigengewichtsbelastung bei Fassadentafeln) ein Bolzenausbruch auftreten kann (siehe Bild 3.2 b). Zum anderen muss der freikragende Eckbereich der Glastafel minimiert werden, da anderenfalls bei den für Überkopfverglasungen geforderten Resttragfähigkeitsversuchen die Gefahr eines Eckbereichabbruchs besteht (siehe Bild 3.2 c).

Aus oben genannten Gründen werden in der vorliegenden Arbeit Randabstände zwischen 100 mm und 300 mm untersucht (siehe Bild 3.2 a.).

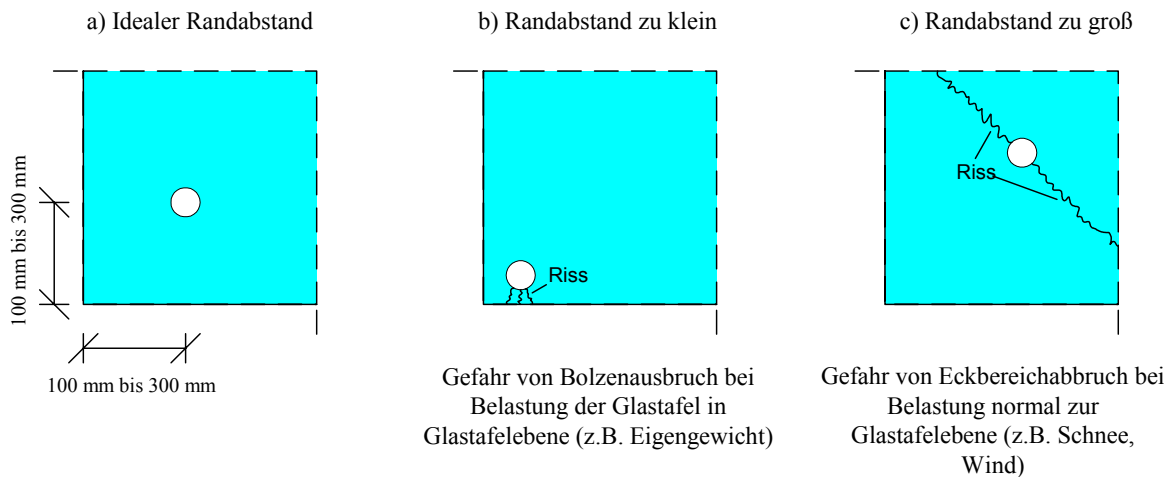


Bild 3.2: Randabstand bei punktgstützten Glastafeln

3.5 Art der Punkthalterung

In Abschnitt 2.5.1 wurde eine Einteilung der Punkthalter in verschiedene Kategorien vorgenommen. In dieser Arbeit wird sowohl die starre als auch die gelenkige Punkthalterausführung mit verfüllter und unverfüllter Lochbohrung betrachtet. Darüber hinaus wird der Einfluss verschiedener Steifigkeiten der elastischen Zwischenschichten untersucht. Der Anschluss der Punkthalter an die Unterkonstruktion erfolgt mehrfach statisch unbestimmt, da wie in Abschnitt 2.3.2 erwähnt die statisch bestimmte Glastafellagerung in der Praxis nur bedingt realisierbar ist.

3.6 Einwirkungen

In dieser Arbeit werden punktgstützte Glastafeln unter gleichförmiger Flächenlast untersucht. Als gleichförmige Flächenlasten werden dabei verstanden:

- a. Windsogbelastung
- b. Winddruckbelastung
- c. Schneebelastung
- d. Glastafeleigengewicht bei horizontalem Glastafeleinbau

Die anzusetzenden Eigen-, Wind- und Schneelasten werden in Deutschland zur Zeit noch nach DIN 1055 [23] bestimmt. Die dort angegebenen Werte werden ohne Teilsicherheitsbeiwerte unmittelbar als Bemessungslasten angegeben.

Eine andere Möglichkeit der Ermittlung der Einwirkungen ist durch die Verwendung von Eurocode 1 [30] geboten. Hier ergeben sich die Bemessungswerte der Einwirkungen aus den Nennwerten durch Multiplikation mit Teilsicherheitsbeiwerten. Bei Überlagerung mehrerer veränderlicher Einwirkungen müssen zusätzliche Kombinationsbeiwerte beachtet werden. Die Teilsicherheitsbeiwerte und im besonderen die Kombinationsbeiwerte werden jedoch dem Werkstoff Glas nicht gerecht, da sie die Abhängigkeit der Biegebruchfestigkeit des Glases von der Einwirkungsdauer nicht berücksichtigen [76].

4 FE-Modellierung von punktgestützten Glastafeln

4.1 Allgemeines

In der Bemessungspraxis herrscht Unsicherheit darüber, wie eine Modellierung im Stützbereich punktgestützter Glastafeln zu erfolgen hat und ob der reale Spannungszustand durch das Modell wiedergegeben werden kann. In verschiedenen Veröffentlichungen [76], [45] werden zwar Angaben zur Diskretisierung gemacht, diese sind aber weder durch Versuche noch durch Vergleiche mit analytischen Lösungen verifiziert.

Die Arbeiten [13] und [72] vergleichen verschiedene FE-Modellierungen (Schalenmodelle und Volumenmodelle) von Kreisringplatten unter Streckenlast am Lochrand mit den analytischen Lösungen dieses Problems aus dem Schrifttum [46]. Nach diesem Vergleich werden die notwendigen Netzgrößen für den Lochbereich angegeben. Bei den oben genannten Untersuchungen fehlt der direkte Bezug zu punktgestützten Glastafeln, da bei punktgestützten Glastafeln:

1. die Lasteinleitung aufgrund der Ausbildung des Punkthalters nicht direkt am Bohrlochrand erfolgt und
2. nur in Ausnahmefällen im Lochbereich ein rotationssymmetrischer Spannungszustand vorliegt.

Ziel der folgenden Abschnitte ist es, eine allgemeingültige Aussage über den notwendigen Grad der Netzdichte im Lochbereich vierpunktgestützter Glastafeln zu finden. Für die Untersuchungen wird das Finite-Elemente-Programm ANSYS [4] verwendet.

4.2 Verwendete Elementtypen

4.2.1 Allgemeines

Die heute in der Praxis zur Anwendung kommenden FE-Programme, z.B. ABAQUS, ANSYS, NASTRAN, bieten eine Vielzahl verschiedener Elemente für Strukturanalysen an. Diese unterscheiden sich in der Knotenanzahl sowie den gewählten Ansatzfunktionen. Für den Anwender bedeutet dies, dass er sein Problem mit verschiedenen Modellen abbilden und lösen

kann. Die Tauglichkeit des Modells muss anhand von Vergleichen mit Versuchen oder analytischen Lösungen beurteilt werden.

In den folgenden Abschnitten werden die Elemente vorgestellt, die bei den Modellen in dieser Arbeit verwendet wurden.

4.2.2 SOLID 45

Das Element SOLID 45 (siehe Bild 4.1) wurde für die Abbildung der Glastafeln, des Punkthalterbolzens sowie der Elastomerringe verwendet. Im folgenden wird kurz auf die Besonderheiten dieses Elements eingegangen.

Bei dem SOLID 45 Element handelt es sich um ein Volumenelement. Das Element wird durch acht Knoten definiert. Pro Knoten besitzt das Element drei Freiheitsgrade (Verschiebungen in x-, y- und z- Richtung). Es ist geeignet zur Darstellung von Strukturen mit orthotropen Materialeigenschaften. Zudem besitzt das Element die Möglichkeit, Berechnungen mit großen Verformungen und Verzerrungen auszuführen.

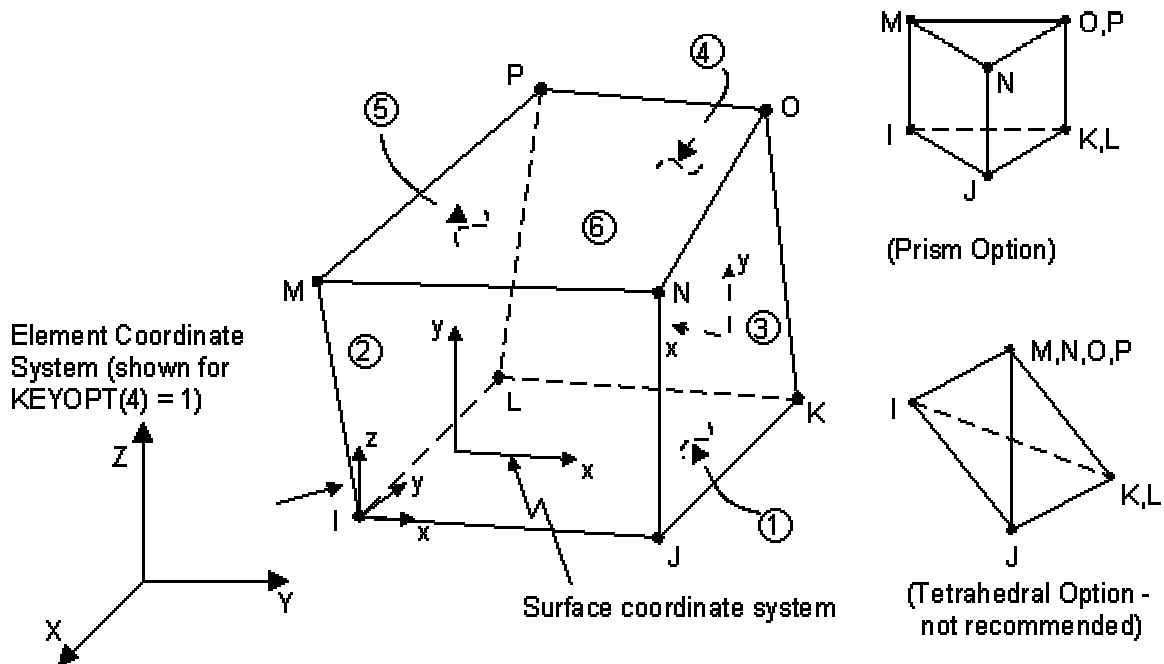


Bild 4.1: SOLID 45 [4]

Für die Abbildung der Elastomerringe wurde das SOLID 45 Element verwendet, da dadurch die dort auftretenden Verformungen und Verzerrungen genau erfasst werden. Die Berücksichtigung dieser Verformungen ist wichtig, da je nach Steifigkeit des verwendeten Materials unterschiedliche Pressungsverteilungen im Punkthalterbereich auftreten können [12]. In der

Bemessungspraxis wird der E-Modul der EPDM-Schicht in einem Bereich von 5 N/mm^2 bis 500 N/mm^2 variiert. Durch diese in [68] geforderte Grenzwertbetrachtung soll der maßgebende Bemessungsfall gefunden werden. Für eine Versuchsnachrechnung ist diese Vorgehensweise aufgrund stark streuender Ergebnisse ungeeignet. Am Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IFK) der Universität Stuttgart wurden deshalb die Materialkennwerte für das in den im folgenden behandelten Versuchen verwendete Material bestimmt [61].

4.2.3 SHELL 63

Zur Abbildung der Punkthalterdeckel wurde in allen Modellen dieser Arbeit das Schalenelement SHELL 63 eingesetzt (siehe Bild 4.2). Zudem wurden bei dem Schalenmodell aus Kapitel 6.8 auch die Glastafel mit diesem Element generiert. Das Element wird definiert durch vier Knoten und hat an jedem Knoten sechs Freiheitsgrade (Translationen in x-, y- und z- Richtung, Rotationen um die x-, y- und z- Knotenkoordinatenachsen). Da es sich um ein Schalenelement handelt, muss dem Element eine Dicke zugewiesen werden. Bei der Abbildung der Punkthalterdeckel wurde berücksichtigt, dass die Punkthalterdeckeldicke über die Deckelfläche veränderlich ist.

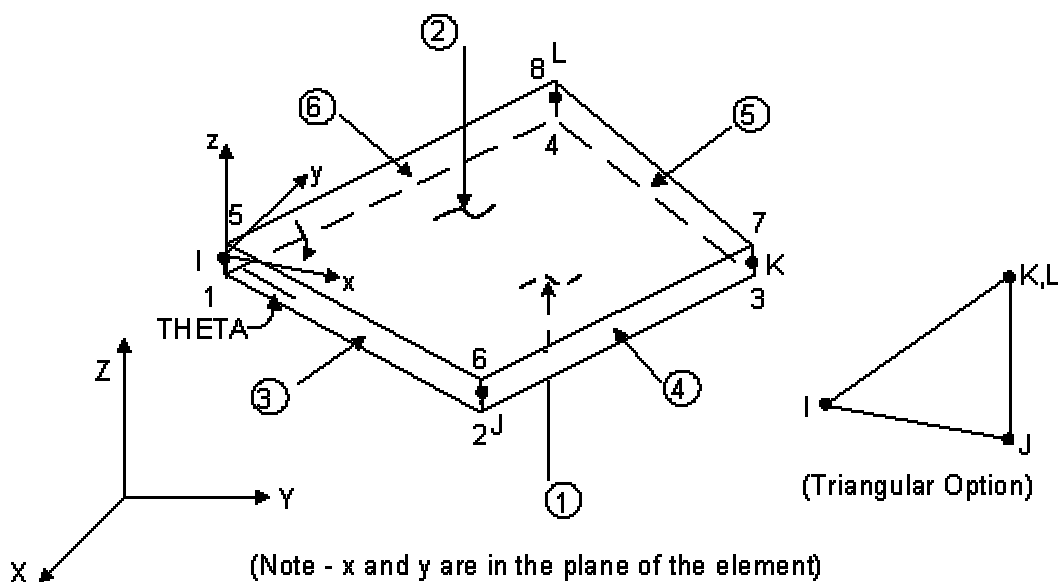


Bild 4.2: SHELL 63 [4]

4.2.4 LINK 10, CONTAC 52

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, erfolgt der wesentliche Kraftfluss - je nachdem ob die Belastung normal zur Glastafel oder in Glastafelebene wirkt - an verschiedenen Stellen des Punkthaltersystems. Bei einer Belastung normal zur Glastafelebene wird der Hauptteil der Belastung von der Glastafel über die Elastomerringe direkt in die Punkthalterdeckel eingeleitet (siehe Bild 2.1). Bei einer Belastung in Glastafelebene wird ein Teil der Belastung von der Glastafel über den Füllmörtel in den Glasdickebolzen eingetragen (siehe Bild 2.2).

In beiden Fällen handelt es sich um Kontaktprobleme, d.h. die Kräfte werden nur über Druck und nicht über Zug übertragen. Im FE-Modell muss dies durch Einbau von Kontaktelementen berücksichtigt werden.

Für den zweiten Fall, d.h. bei der Lastübertragung über den Füllmörtel, wird dies in dieser Arbeit dadurch erreicht, dass der Füllmörtel durch LINK 10 Elemente (siehe Bild 4.3) abgebildet wird.

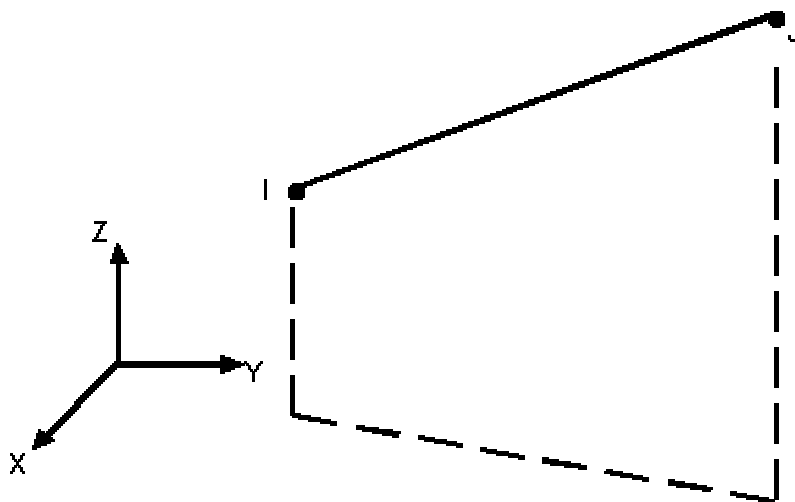


Bild 4.3: LINK 10 [4]

Bei dem Element LINK 10 handelt es sich um ein dreidimensionales Stabelement. Es wird definiert über zwei Knoten und besitzt an jedem Knoten drei Freiheitsgrade (Translationen in x-, y- und z-Richtung). Das Element hat die Eigenschaft einer bilinearen Steifigkeitsmatrix. Durch diese ist es möglich, dass das Element als reines Zug- oder Druckelement wirkt. In dieser Arbeit wird das LINK 10 Element als reines Druck-Element verwendet. Besonderes Augenmerk bei der Elementwahl für den Füllmörtel wurde darauf gelegt, dass dem verwendete-

ten Element auch Materialkennwerte zugewiesen werden können. Dadurch wird das Verhalten des Füllmörtels realistisch erfasst.

Während die Zuweisung von Materialkennwerten im Fall der Füllmörtelabbildung für den Einsatz des LINK 10 Elementes spricht, so ist es für den Fall der Kraftübertragung direkt in die Punkthalterdeckel ein Ausschlusskriterium. In diesem Fall dürfen die verwendeten Kontaktelemente keine Materialkennwerte besitzen, da sie nur dazu eingesetzt werden sollen, ein mögliches Abheben der Elastomerringe von den Glastafeln zu simulieren. Eine Zuweisung von Materialwerten würde zwangsläufig zu Fehlern in den Ergebnissen führen. In dieser Arbeit wird für die Abbildung dieses Bereiches deshalb das CONTAC 52 Element (siehe Bild 4.4) verwendet.

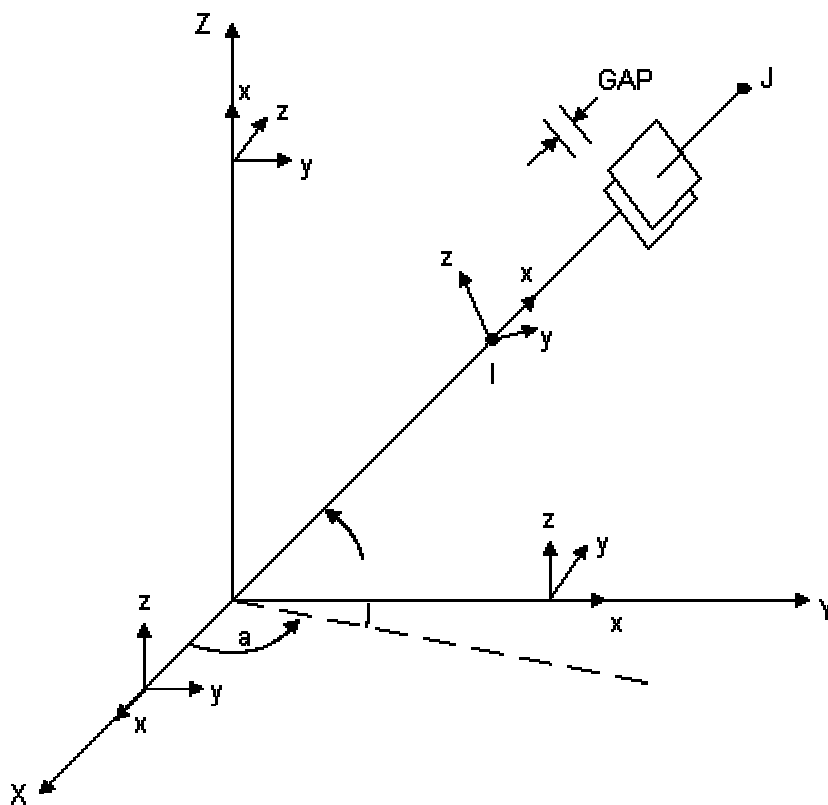


Bild 4.4: CONTAC 52 [4]

Die „Gap-Funktion“ des Elementes ermöglicht es dabei, den in der Modellierung vorhandenen geometrischen Zwischenraum zwischen Elastomerring und Glastafel für die Berechnung zu schließen. Dies bedeutet, dass bei der Lösung des Systems von koinzidenten Punkten auf den Elastomerringen und Glastafeln ausgegangen wird. Darüber hinaus können durch Eingabe eines Reibungskoeffizienten auch Reibungskräfte in tangentialer Richtung übertragen werden.

4.3 Aufbau des FE-Modells

4.3.1 Modellierung der Glastafel

Die Glastafel wird mit dem ANSYS Elementtyp SOLID 45 (siehe Abschnitt 4.2.2) generiert. Im Bereich um die Bohrung der Glastafel wurde das Elementnetz feiner gewählt (siehe Bild 4.6), da in diesem Bereich mit Spannungskonzentrationen zu rechnen ist. Zudem wird der Einfluss der Punkthalterung auf die Gesamtverformung der Glastafel besser erfasst. Genauere Angaben zur Netzdichte werden in Abschnitt 4.4 gemacht. Bei der Berechnung der doppelt symmetrischen, vierpunktgestützten Glastafeln wurde für die Berechnung die Symmetrie der Glastafeln ausgenutzt, d.h. durch Definition von Symmetriebedingungen entlang den Symmetrieachsen genügte es, nur ein Tafelviertel der vierpunktgestützten Glastafel zu generieren (siehe Bild 4.5). Über die Glastafeldicke wurde einheitlich eine Vernetzung mit vier Elementen gewählt (siehe Bild 4.6). Dadurch kann auch der nichtlineare Verlauf der Spannungen über die Glastafeldicke im Lasteinleitungsbereich genau erfasst werden.

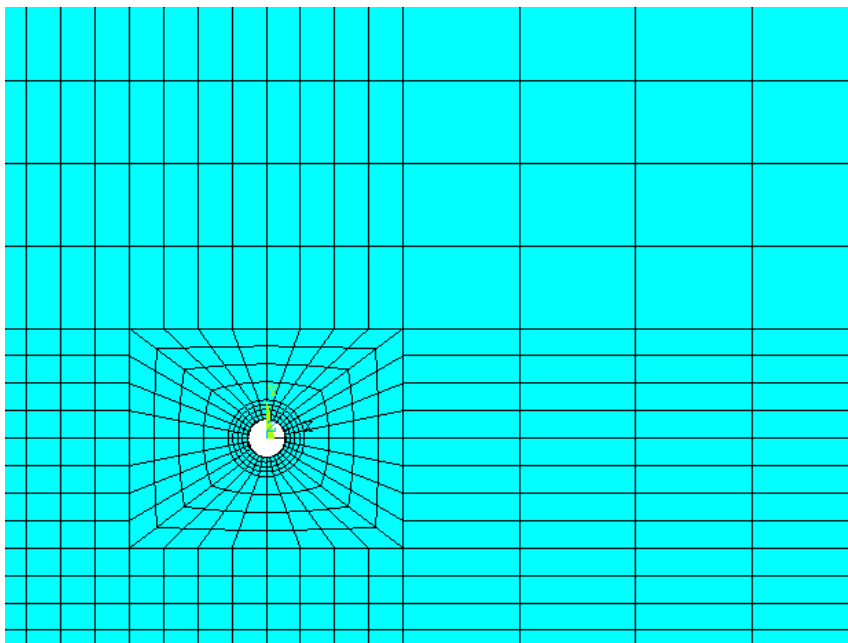


Bild 4.5: Modellierung der Glastafel (schematisch)

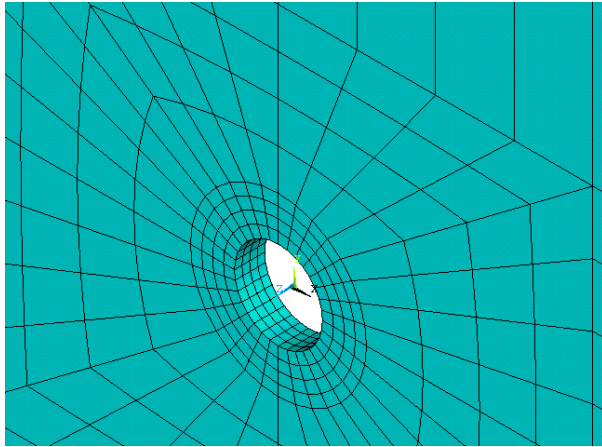


Bild 4.6: Lochbereich (schematisch)

4.3.2 Modellierung des Punkthalters

Die Generierung des Punkthalters kann Bild 4.7 entnommen werden. Zur Modellierung der Klemmteller aus nichtrostendem Stahl wurden Schalenelemente des Typs SHELL 63 (siehe Abschnitt 4.2.3) verwendet. Die Halterachse wurde mit dem ANSYS Elementtyp SOLID 45 (siehe Abschnitt 4.2.2) modelliert. Zur Berücksichtigung der Schubkraftübertragung von der Glastafel über den eingefüllten Füllmörtel des Bohrlochs auf den Glasdickebolzen in der Berechnung, wurden LINK 10 Elemente (siehe 4.2.4) eingebaut, die nur Druckkräfte übertragen können.

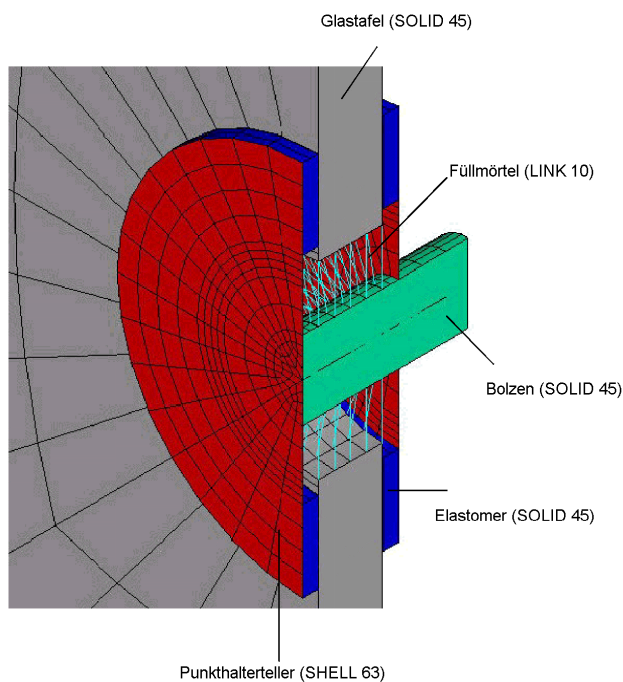


Bild 4.7: Modellierung des Punkthalters

Aus Bild 2.4 ist der nichtlineare Verlauf der Last-Verformungskurven von durchgeführten Reibungsversuchen [66] ersichtlich. Dieser nichtlineare Verlauf ist durch die Schubverformung der zwischen Glastafel und Punkthalterteller angeordneten Elastomerringe bedingt (siehe Bild 4.8).

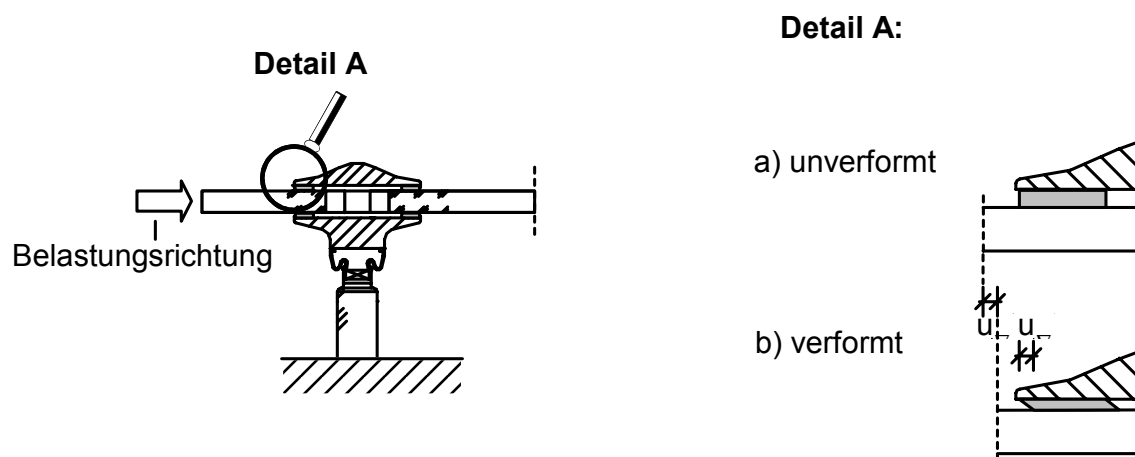


Bild 4.8: Schubverformung der Elastomerringe

Zur Abbildung dieses Effektes im FE-Modell werden für die Elastomerringe Volumenelemente des Typs SOLID 45 verwendet. Weisen diese Volumenelemente gemeinsame Elementknoten mit den Volumenelementen der Glastafel auf, so können die in Bild 2.3 dargestellten Kräfte übertragen werden. Durch die Verschmelzung der Elementknoten von Glastafel und Elastomerringen kann der Effekt einer möglichen Ablösung der Elastomerringe von der Glastafel nicht abgebildet werden. Im FE-Modell müssen aus diesem Grund die Elementknoten der Glastafel und der Elastomerringe getrennt werden. Durch den Einbau von CONTAC 52 Elementen wird ein mögliches Ablösen der Elastomerringe von der Glastafel berücksichtigt.

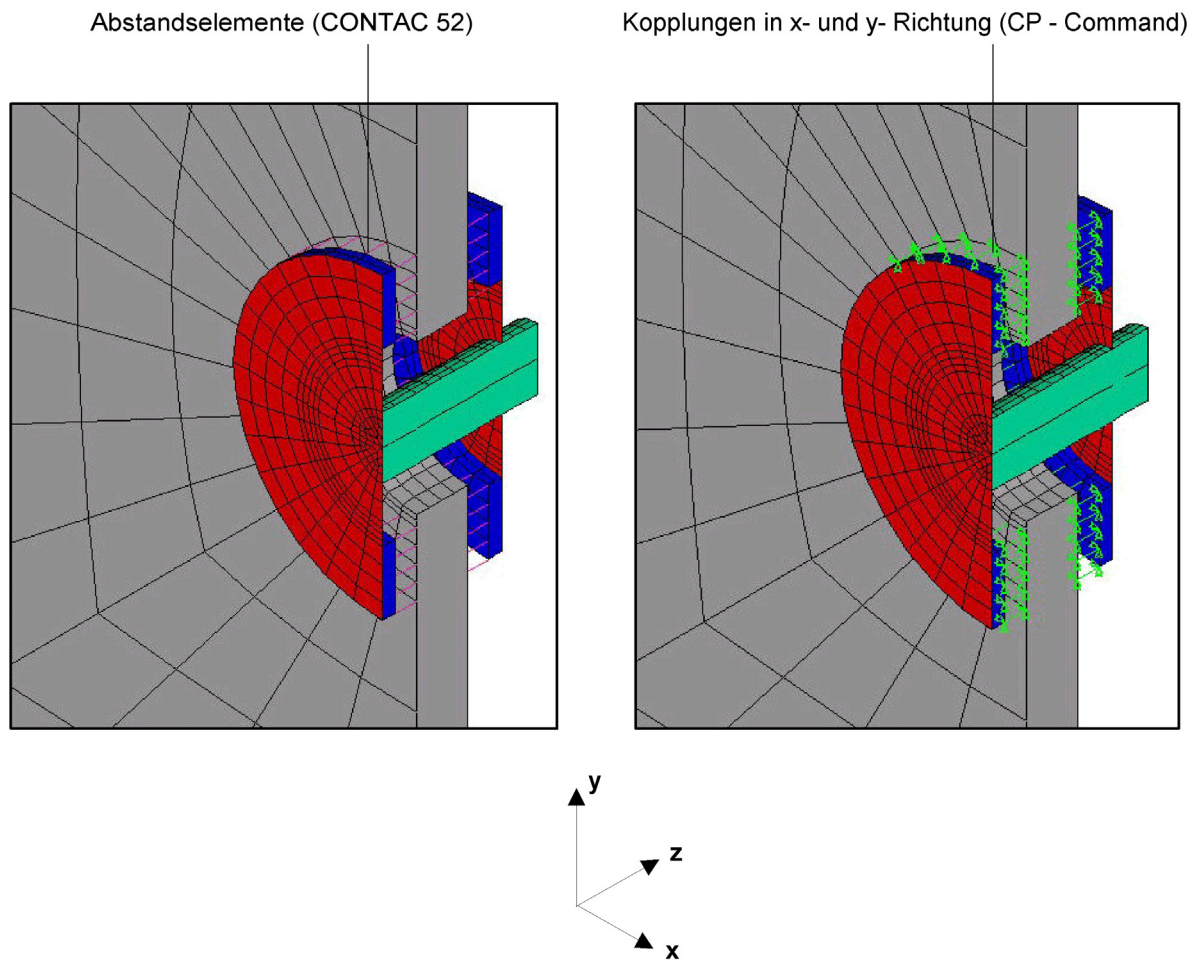


Bild 4.9: Modellierung des Übergangsbereiches Elastomerring-Glastafel

Damit das Gesamtsystem nicht kinematisch wird, müssen zwischen den beiden Oberflächen zusätzlich Bindungen eingebaut werden, die eine Kraftübertragung in Oberflächenebene ermöglichen. Dies ist zum einen dadurch möglich, dass bei dem CONTAC 52 Element von der Option Gebrauch gemacht wird, auch Reibung zu übertragen (siehe Abschnitt 4.2.4). Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Knotenverschiebungen der sich unmittelbar gegenüberliegenden Glas- und Elastomeroberflächen in Glastafelebene miteinander zu koppeln (Verwendung des CP-commands). Es ist offensichtlich, dass im Fall 1 (Abbildung mit CONTAC 52 Elementen) die Realität besser abgebildet wird, da nur begrenzte Lasten übertragen werden können. Im Fall 2 ist dies nicht der Fall. Da wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben dieser Lastpfad nur bei unverfüllten Löchern von Bedeutung ist, wurde er in dieser Arbeit durch die Methode der Knotenkopplung abgebildet (siehe Bild 4.9).

Der Halter wurde bei gelenkigen Haltern bis zum Kugelgelenk abgebildet und dort gelenkig aufgelagert. Bei starren Haltern wurde der Bolzen des Halters bis zur Einspannung abgebildet und dort alle Freiheitsgrade festgehalten.

4.4 Ermittlung der notwendigen Netzdichte

4.4.1 Allgemeines

Bei punktgestützten Glastafeln ist vor allem die notwendige Netzdichte im Stützbereich der Glastafel von Bedeutung, da nur eine ausreichend feine Netzdichte den im Stützbereich auftretenden extremen Spannungsgradienten genau erfassen kann. Dieser Spannungsgradient hängt von folgenden Parametern ab:

1. der Lastgröße
2. der geometrischen Ausbildung der Glastafel (Tafelabmessungen, Größe der Lochbohrung, Ort der Lochbohrung)
3. der geometrischen Ausbildung der Punkthalter (Punkthalterabmessungen, starrer Punkthalter, gelenkiger Punkthalter)
4. der Kennwerte der eingesetzten Materialien (insbesondere der elastischen Zwischenschichten)

In dieser Arbeit wurde mit den Erkenntnissen aus [37] das Problem der vierpunktgestützten Glastafel Schritt für Schritt auf das Problem der Kreisringplatte mit Ringlast reduziert (siehe Bild 4.10). Es wird somit zur Beurteilung der Netzdichte zunächst von einem rotationssymmetrischem Verlauf der Spannungen im direkten Lochbereich der vierpunktgestützten Glastafeln ausgegangen. Diese vereinfachende Annahme erlaubt durch den Vergleich mit der im Schrifttum angebotenen analytischen Lösung eine Beurteilung der gewählten Netzdichte im Stützbereich.

Diese Art der Vorgehensweise entspricht der aus [39], [40] und [63] für die Ermittlung der Bemessungsmomente in großformatigen Fassadenplatten. Da es für lochrandgestützte Platten keine Lösungen gibt, wird auch in diesen Arbeiten davon ausgegangen, dass sich der Spannungszustand im Stützbereich wie bei einer Kreisplatte oder Kreisringplatte einstellt.

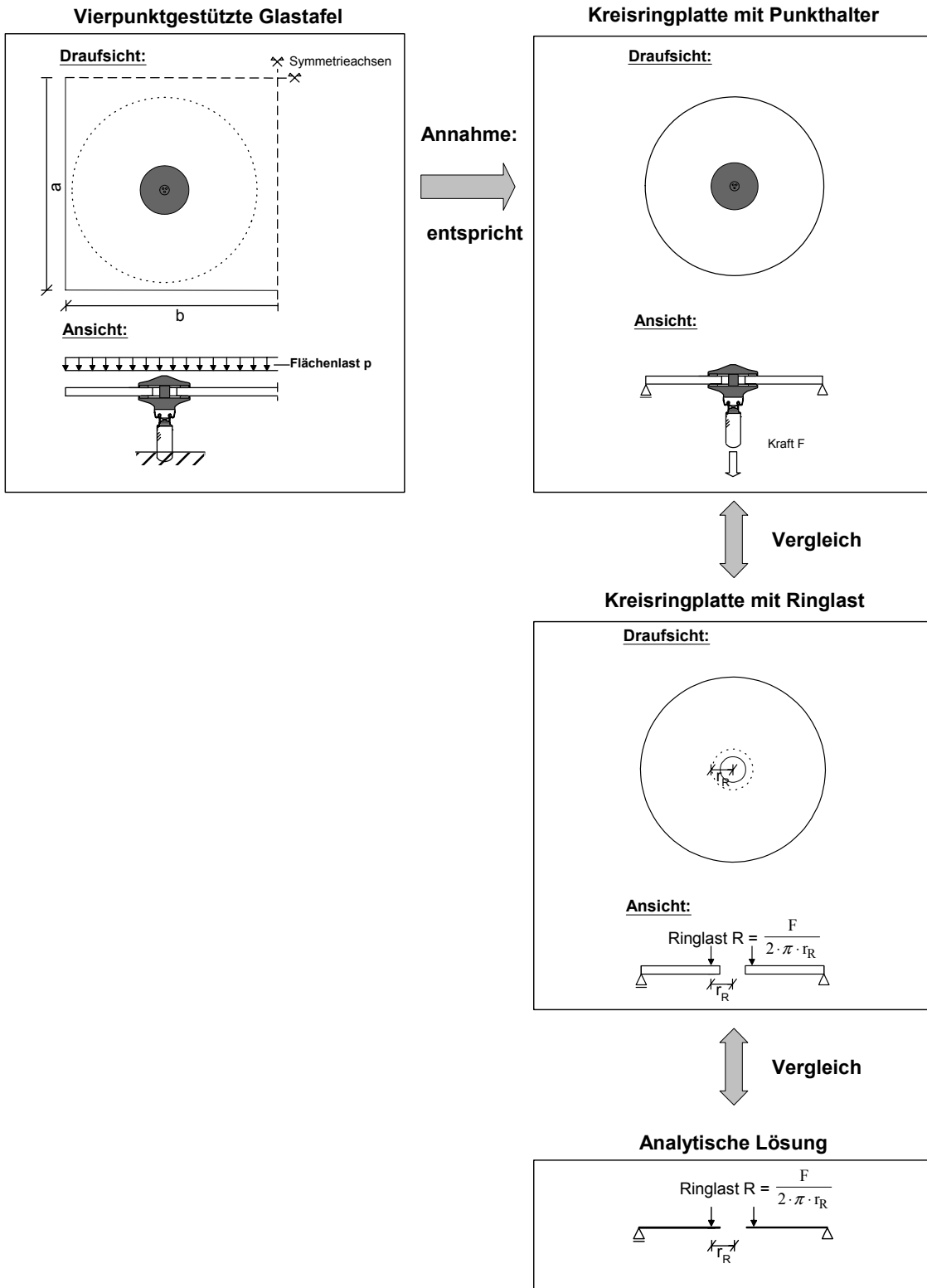


Bild 4.10: Vorgehensweise zur Überprüfung der Netzdichte

4.4.2 Kreisringplatte mit Punkthalter

Ziel der Untersuchungen an der Kreisringplatte mit Punkthalter ist es, Auskunft darüber zu erhalten, wie die Lastübertragung über die EPDM-Ringe des Punkthalters erfolgt und wo die Resultierende der flächigen Lasteinleitung anzusetzen ist. Die Modellierung der Glastafel sowie des Punkthalters erfolgt wie in Abschnitt 4.3 beschrieben. Die Kreisringplatte wird statisch bestimmt am Plattenaußenrand gelagert. Die Lastaufbringung erfolgt durch eine Einzelast am Punkthalterbolzen (siehe Bild 4.11)

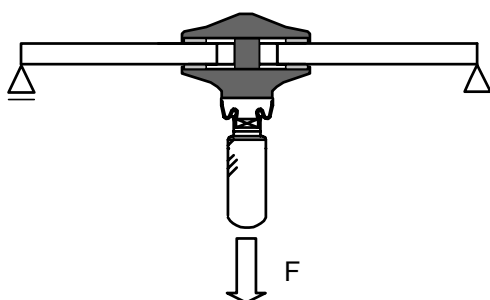


Bild 4.11: Lagerung der Kreisringplatte und Lastaufbringung

Es wurden Untersuchungen mit dem in Tabelle 4.1 zusammengestellten Parameterspektrum durchgeführt.

Parameter				
Belastung [N]	von	1000	bis	10000
Außenradius [mm]	von	100	bis	1000
Tafeldicke [mm]	von	8	bis	20
Bohrlochdurchmesser [mm]		15	und	35

Tabelle 4.1: Untersuchtetes Parameterspektrum

Durch die Auswahl der Parameter war gewährleistet, dass verschieden hohe Spannungsgradienten im Bohrlochbereich erzeugt wurden.

Bei der Auswertung der durchgeführten Berechnungen wurden die Kräfte in den Kontaktelementen CONTAC 52, die im FE-Modell zwischen den EPDM-Ringen des Punkthalters und der Glastafel angeordnet waren, ausgelesen. In Bild 4.12 sind die Kräfteverteilungen in einem Schnitt durch den Punkthalter für verschiedene Modelle des in Tabelle 4.1 angegebenen Parameterspektrums beispielhaft dargestellt.

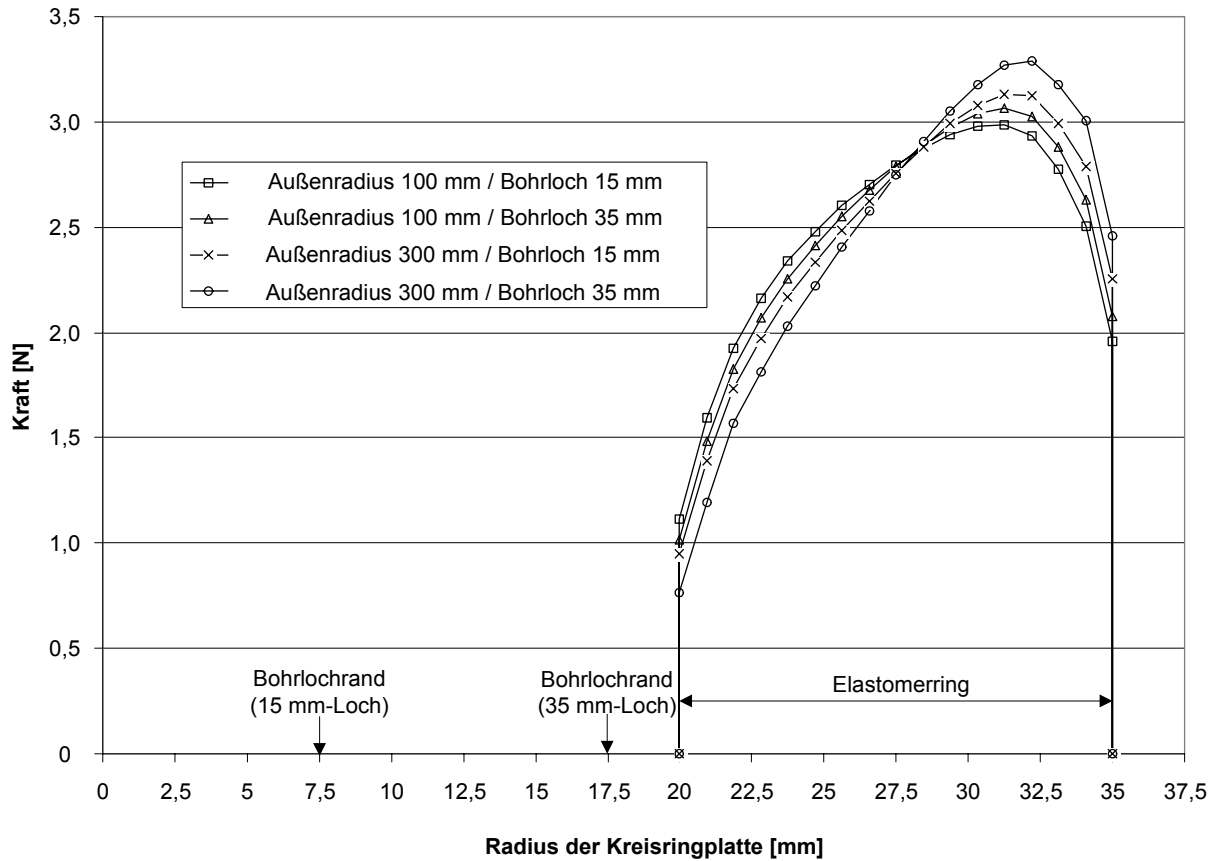


Bild 4.12: Verlauf der Krafteinleitung vom Punkthalter in die Platte über die Kontaktelemente für verschiedene Außenradien und Bohrlochdurchmesser ($h = 10 \text{ mm}$)

Für die späteren Untersuchungen an der Kreisringplatte mit Ringlast werden aus den erhaltenen Kräfteverteilungen die Angriffspunkte der jeweiligen Resultierenden mit folgender Formel berechnet:

$$x = \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^k r_i \cdot K_i \right)}{K_g} \right] \quad (4.1)$$

mit

r_i = Abstand der einzelnen Kontaktkräfte vom Bohrlochrand

K_i = Wert der Kraft im ausgewählten Kontaktelement

K_g = Summe aller Kontaktkräfte

In Tabelle 4.2 sind die Abstände der Resultierenden vom Bohrlochmittelpunkt für verschiedene Modelle des in Tabelle 4.1 zusammengestellten Parameterspektrums beispielhaft angegeben.

Lochdurchmesser [mm]		15	35	15	35
Tafeldicke [mm]		8	8	20	20
Außenradius [mm]	Belastung [N]				
100	1000	30,6	31,7	30,2	31,5
100	10000	30,6	31,7	30,2	31,5
1000	1000	32,1	32,6	30,2	31,5
1000	10000	32,1	32,6	30,2	31,5

Tabelle 4.2: Abstand der Resultierenden der Kontaktkräfte vom Bohrlochmittelpunkt in mm ($h = 10$ mm)

Aus Tabelle 4.2 sind folgende Effekte ersichtlich:

1. Mit zunehmendem Außenradius der Kreisringplatte verschiebt sich die Resultierende weiter in Richtung Punkthalterdeckelrand. Dies zeigt auch der Verlauf der Kräfteverteilungen aus Bild 4.12.
2. Für alle untersuchten Modelle liegt die Resultierende beim großen Bohrloch (35 mm) näher am Punkthalterdeckelrand als beim kleinen Bohrloch (15 mm). Dies wird ebenfalls durch den Kräfteverlauf in Bild 4.12 bestätigt.
3. Je dicker und damit steifer die Platte ist, desto mehr verschiebt sich die Resultierende wieder zum Bohrlochmittelpunkt.

Unter Berücksichtigung der Größenordnung der in Tabelle 4.2 angegebenen Werte sind diese Effekte von untergeordneter Bedeutung. Sowohl für das kleine Bohrloch (15 mm) als auch das große Bohrloch (35 mm) kann in guter Näherung der Angriffspunkt der Resultierenden in einem Abstand von 31,5 mm vom Bohrlochmittelpunkt angegeben werden. Dies bestätigen auch die Ergebnisse aus [5].

4.4.3 Kreisringplatte ohne Punkthalter

Mit den Erkenntnissen aus Abschnitt 4.4.2 wurden FE-Untersuchungen an der Kreisringplatte mit Ringlast durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden mit der FEM zunächst Modelle der Kreisringplatte mit Ringlast unter Variation der Netzdichte aufgebaut und berechnet. Das untersuchte Parameterspektrum entspricht dem aus Abschnitt 4.4.2 (siehe Tabelle 4.2). Die Netzunterteilung wurde in dem Bereich des maximalen Spannungsgradienten (Punkthalterbereich) nach und nach verfeinert, während im Außenbereich der Kreisringplatte das Netz konstant gehalten wurde (siehe Bild 4.13). Dabei wurde die Außenbereichnetzgröße in radialer Richtung entsprechend der Breite der EPDM-Ringe gewählt. Dadurch wurde gewährleistet, dass bei Variation des Kreisringplattenradius auch im Außenbereich der Kreisringplatte ein ausreichend feines Elementnetz existiert.

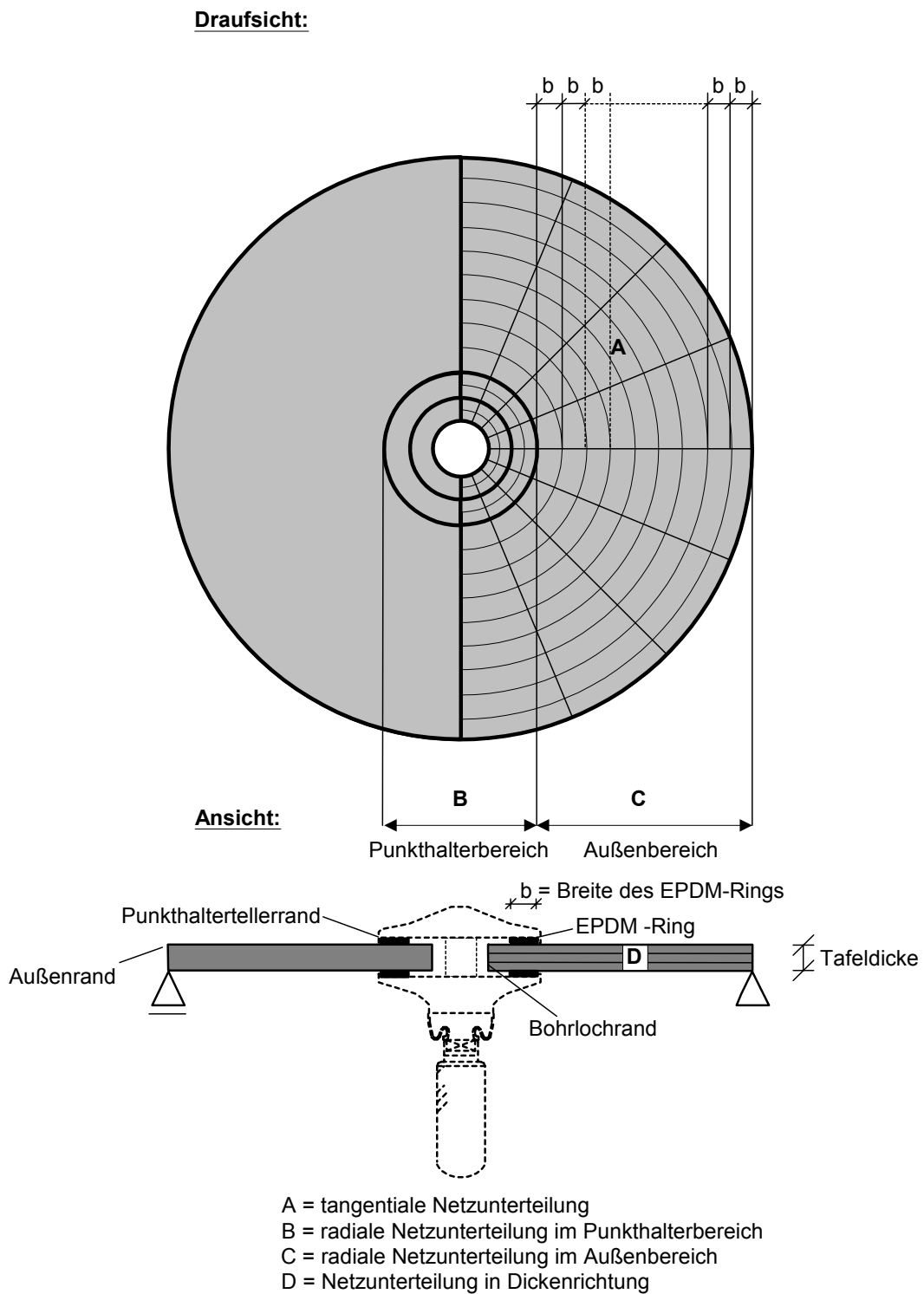


Bild 4.13: Netzunterteilung der Kreisringplatte

Die Ergebnisse der FE-Berechnungen wurden mit der analytischen Lösung der Kreisringplatte mit Ringlast (siehe Bild 4.14) verglichen.

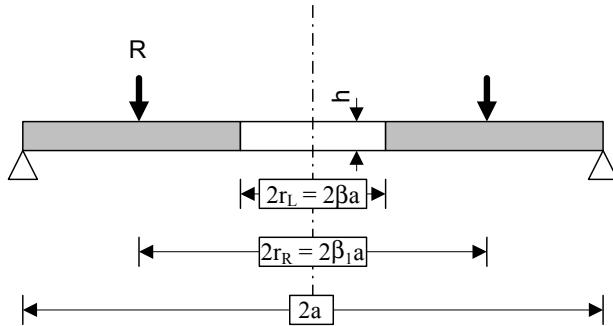


Bild 4.14: Kreisringplatte mit Ringlast nach [57]

Für den Fall einer Navier gelagerten Kreisringplatte mit Kreisringlast gelten nach [57]

mit

$$\beta = \frac{r_L}{a} \quad : \text{Verhältnis Bohrlochradius zu Plattenaußenradius}$$

$$\beta_1 = \frac{r_R}{a} \quad : \text{Verhältnis Radius Kraftangriffspunkt zu Plattenaußenradius}$$

$$\zeta = \frac{r}{a} \quad : \text{dimensionsloser ortsbestimmender Parameter}$$

$$K = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad : \text{Plattensteifigkeit}$$

folgende Formeln für die Durchbiegung sowie die radialen und tangentialen Momente:

1. Bereich Bohrlochrand bis Kraftangriffspunkt:

Fall $\beta > 1$ und $\beta \geq \zeta \geq \beta_1$ oder $\beta < 1$ und $\beta \leq \zeta \leq \beta_1$

$$w = -\frac{R \cdot a^2 r_R}{8K(\beta^2 - 1)} \left\{ \left[\frac{1-\mu}{1+\mu} (\zeta^2 - 1) + 2(\beta^2 - 1) \right] (\beta_1^2 - 1) - 2\beta^2 \ln \zeta + 2(\beta_1^2 - \beta^2 + \zeta^2) \ln \beta_1 + 2\beta^2 \beta_1^2 \ln \frac{\zeta}{\beta_1} + 4 \frac{1+\mu}{1-\mu} \beta^2 \ln \beta_1 \ln \zeta \right\} \quad (4.2)$$

$$M_r = -\frac{R \cdot r_R}{4(\beta^2 - 1)} \left[(1-\mu)(\beta_1^2 - 1) + 2(1+\mu) \ln \beta_1 \right] \cdot \left(\frac{\beta^2}{\zeta^2} - 1 \right) \quad (4.3)$$

$$M_\varphi = -\frac{R \cdot r_R}{4(\beta^2 - 1)} \left[-(1-\mu)(\beta_1^2 - 1) - 2(1+\mu) \ln \beta_1 \right] \cdot \left(\frac{\beta^2}{\zeta^2} + 1 \right) \quad (4.4)$$

2. Bereich Kraftangriffspunkt bis Plattenaußenrand:

Fall $\beta > 1$ und $\beta_1 \geq \zeta \geq 1$ oder $\beta < 1$ und $\beta_1 \leq \zeta \leq 1$

$$w = -\frac{R \cdot a^2 r_R}{8K(\beta^2 - 1)} \left\{ \left[\frac{1-\mu}{1+\mu} (\beta_1^2 - 1) + 2(\beta^2 - 1) \right] (\zeta^2 - 1) - 2\beta^2 \ln \beta_1 + 2(\beta_1^2 - \beta^2 + \zeta^2) \ln \zeta + 2\beta^2 \zeta^2 \ln \frac{\beta_1}{\zeta} + 4 \frac{1+\mu}{1-\mu} \beta^2 \ln \beta_1 \ln \zeta \right\} \quad (4.5)$$

$$M_r = -\frac{R \cdot r_R}{4(\beta^2 - 1)} \left[(1-\mu)(\beta^2 - \beta_1^2) \left(1 - \frac{1}{\zeta^2} \right) + 2(1+\mu)(\beta^2 - 1) \ln \zeta - 2(1+\mu)\beta^2 \left(1 - \frac{1}{\zeta^2} \right) \ln \beta_1 \right] \quad (4.6)$$

$$M_\varphi = -\frac{R \cdot r_R}{4(\beta^2 - 1)} \left[(1-\mu) \left(\frac{\beta^2 - \beta_1^2}{\zeta^2} + 2 - \beta^2 - \beta_1^2 \right) + 2(1+\mu)(\beta^2 - 1) \ln \zeta - 2(1+\mu)\beta^2 \left(1 - \frac{1}{\zeta^2} \right) \ln \beta \right] \quad (4.7)$$

3. Kraftangriffspunkt = Bohrlochrand:

Fall $\zeta = \beta$

$$w = -\frac{R \cdot a^2 r_R}{8K} \left[\frac{3+\mu}{1+\mu} (\beta_1^2 - 1) - \frac{2\beta^2 \ln \beta}{\beta^2 - 1} \left(1 - 2\beta_1^2 \frac{1+\mu}{1-\mu} \ln \beta_1 \right) - 2\beta_1^2 \ln \beta_1 \right] \quad (4.8)$$

$$M_r = 0 \quad (4.9)$$

$$M_\varphi = \frac{R \cdot r_R}{2(\beta^2 - 1)} \left[(1-\mu)(\beta_1^2 - 1) + 2(1+\mu) \ln \beta_1 \right] \quad (4.10)$$

4. Kraftangriffspunkt:

Fall $\zeta = \beta_1$

$$w = -\frac{R \cdot a^2 r_R}{8K(\beta^2 - 1)} \left\{ \left[\frac{1-\mu}{1+\mu} (\beta_1^2 - 1)^2 + 2(\beta^2 - 1)(\beta_1^2 - 1) - 2\beta^2 \ln \beta_1 + 2(2\beta_1^2 - \beta^2) \ln \beta_1 + 4 \frac{1+\mu}{1-\mu} \beta^2 \ln^2 \beta_1 \right] \right\} \quad (4.11)$$

$$M_r = -\frac{R \cdot r_R}{4(\beta^2 - 1)} \left[(1-\mu)(\beta_1^2 - 1) + 2(1+\mu) \ln \beta_1 \right] \cdot \left(\frac{\beta^2}{\beta_1^2} - 1 \right) \quad (4.12)$$

$$M_{\varphi} = \frac{R \cdot r_R}{4(\beta^2 - 1)} \left[(1 - \mu)(\beta_1^2 - 1) + 2(1 + \mu) \ln \beta_1 \right] \cdot \left(\frac{\beta^2}{\beta_1^2} + 1 \right) \quad (4.13)$$

Mit den Formeln

$$\sigma_r = \frac{M_r \cdot 6}{h^2} \quad (4.14)$$

und

$$\sigma_{\varphi} = \frac{M_{\varphi} \cdot 6}{h^2} \quad (4.15)$$

lassen sich aus den Momenten M_r und M_{φ} die radialen und tangentialen Spannungen ermitteln.

In den folgenden Bildern sind die Ergebnisse der Konvergenzstudie für 10 mm dicke Kreisringplatten mit einem Außenradius von 1000 mm und einem Bohrloch von 15 mm dargestellt. Hierbei werden als Konvergenzkriterien zunächst der Wert der Durchbiegung am Bohrlochrand (siehe Bild 4.15) sowie der Maximalwert der Tangentialspannung (siehe Bild 4.16) im Lochbereich verwendet. Für Kreisringplatten mit anderen Geometrien (35 mm Lochdurchmesser, 100 mm Außenradius) ergeben sich entsprechende Ergebnisse.

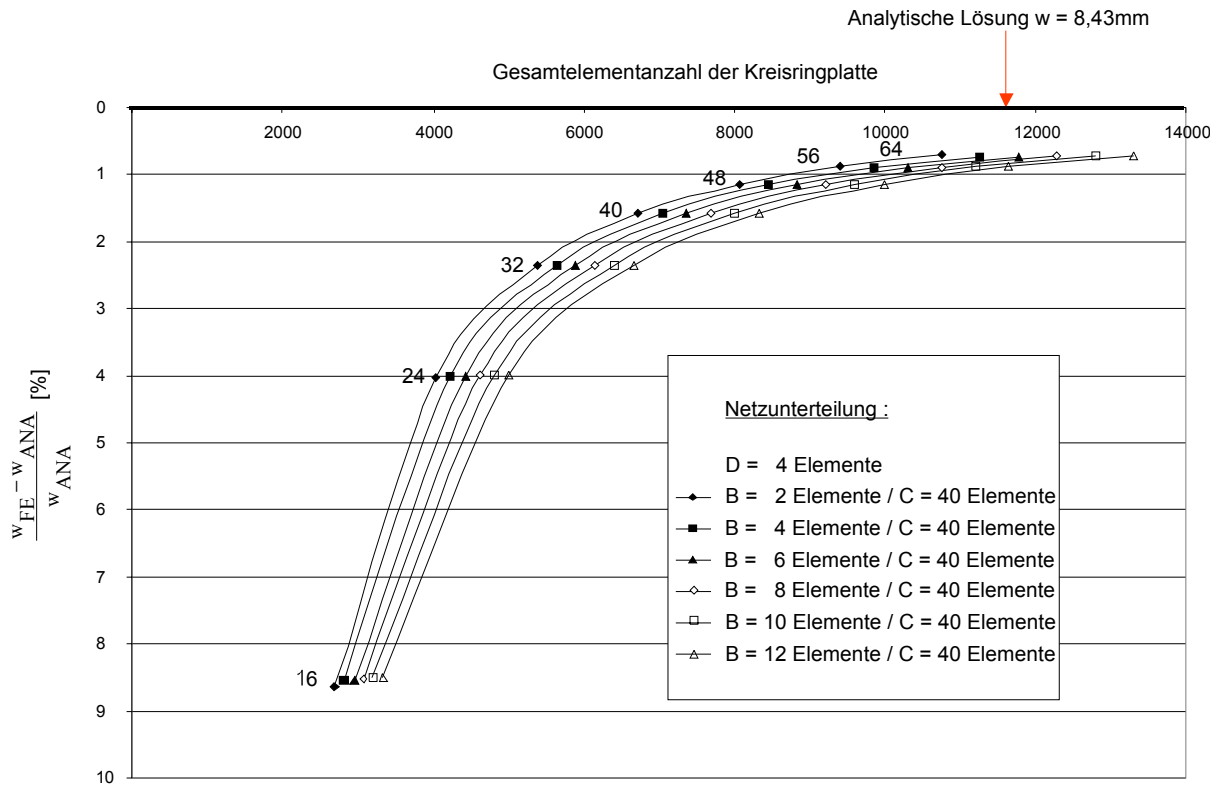


Bild 4.15: Erhöhung der tangentialen Netzunterteilung A für eine Kreisringplatte ($h = 10\text{ mm}$) mit Außenradius 1000 mm und 15 mm Bohrloch bei einer Ringlast von $1000\text{ N}/(2 \cdot \pi \cdot 31,5\text{ mm})$

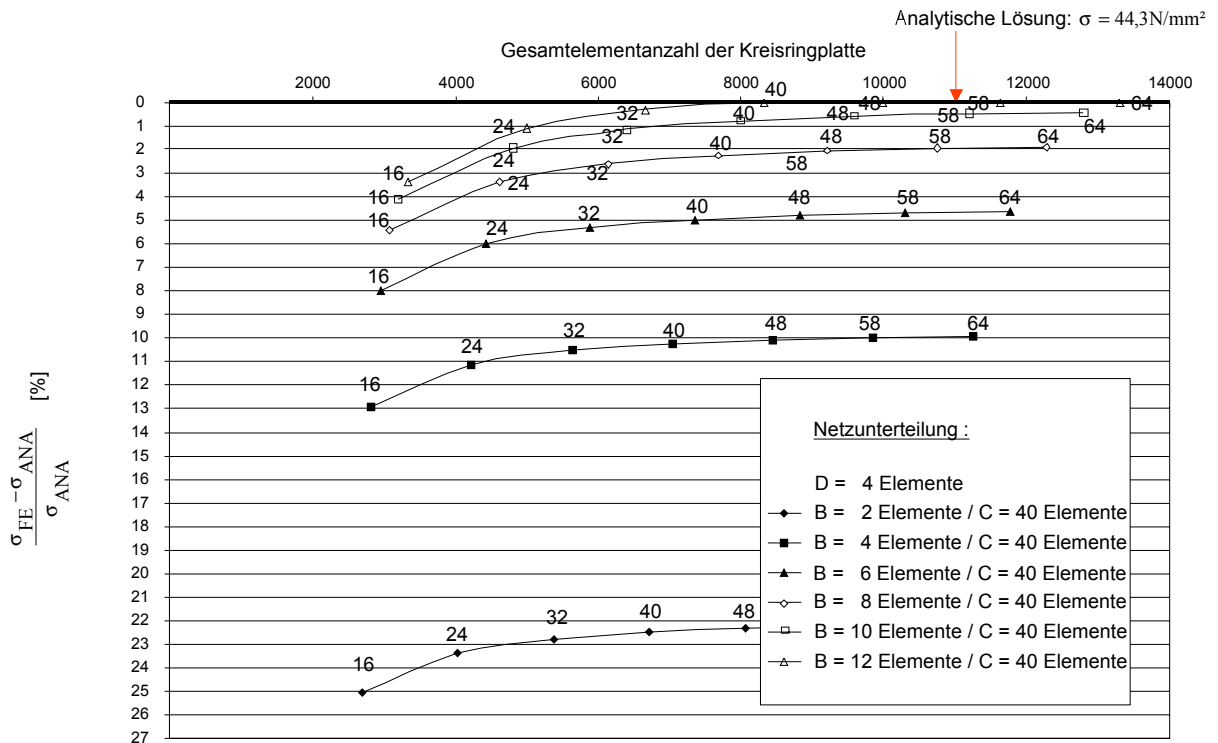


Bild 4.16: Erhöhung der tangentialen Netzunterteilung A für eine Kreisringplatte ($h = 10\text{ mm}$) mit Außenradius 1000 mm und 15 mm Bohrloch bei einer Ringlast von $1000\text{ N}/(2 \cdot \pi \cdot 31,5\text{ mm})$

Aus Bild 4.15 und Bild 4.16 ist erkennbar, dass bei einer Wahl von 32 Elementen in tangentialer Richtung, 4 Elementen in Tafeldickenrichtung und einer radialen Unterteilung im Punkthalterbereich von mindestens 6 Elementen die Abweichungen zur analytischen Lösung der Durchbiegung und der maximalen Tangentialspannung nach [57] unter 6 % liegen. Mit dieser Unterteilung wird auch der Durchbiegungsverlauf genau erfasst. Zur Erfassung der Verläufe der Radial- und Tangentialspannungen über den Plattenradius, sind jedoch mindestens 8 Elemente in radialer Richtung unter dem Punkthalterdeckel anzuordnen. Dies liegt darin begründet, dass die Spannungen abgeleitete Größen sind.

In Bild 4.17 und Bild 4.18 sind neben den analytischen Verläufen der Tangential- und Radialspannungen nach [57] auch die Verläufe aus den FE-Berechnungen der Kreisringplatte ohne Punkthalter und Kreisringplatte mit Punkthalter eingetragen. Bei den FE-Berechnungen wurden 8 Elemente in radialer Richtung unter dem Punkthalterdeckel angeordnet. Die Verläufe zeigen, dass wie in Bild 4.10 angenommen die Kreisringplatte mit Punkthalter auf die analytische Lösung der Kreisringplatte mit Ringlast reduziert werden kann. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden hier nur die Ergebnisse der Kreisringplatte mit einem Außenradius von 100 mm und einem Bohrlochdurchmesser von 15 mm dargestellt. Für andere Plattenabmessungen und Bohrlochgrößen gelten die Aussagen analog.

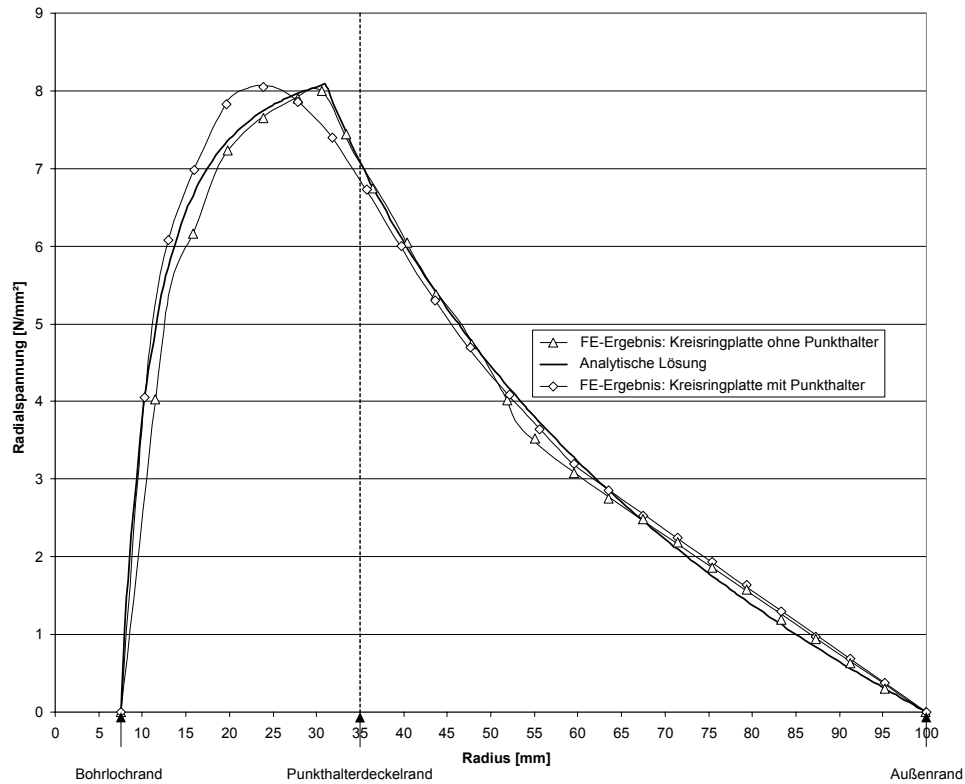


Bild 4.17: Verlauf der Radialspannung für eine Kreisringplatte ($h = 10 \text{ mm}$) mit Außenradius 100 mm und 15 mm Bohrloch bei einer Ringlast von $1000 \text{ N}/(2 \cdot \pi \cdot 31,5 \text{ mm})$ bzw. Einzellast von 1000 N

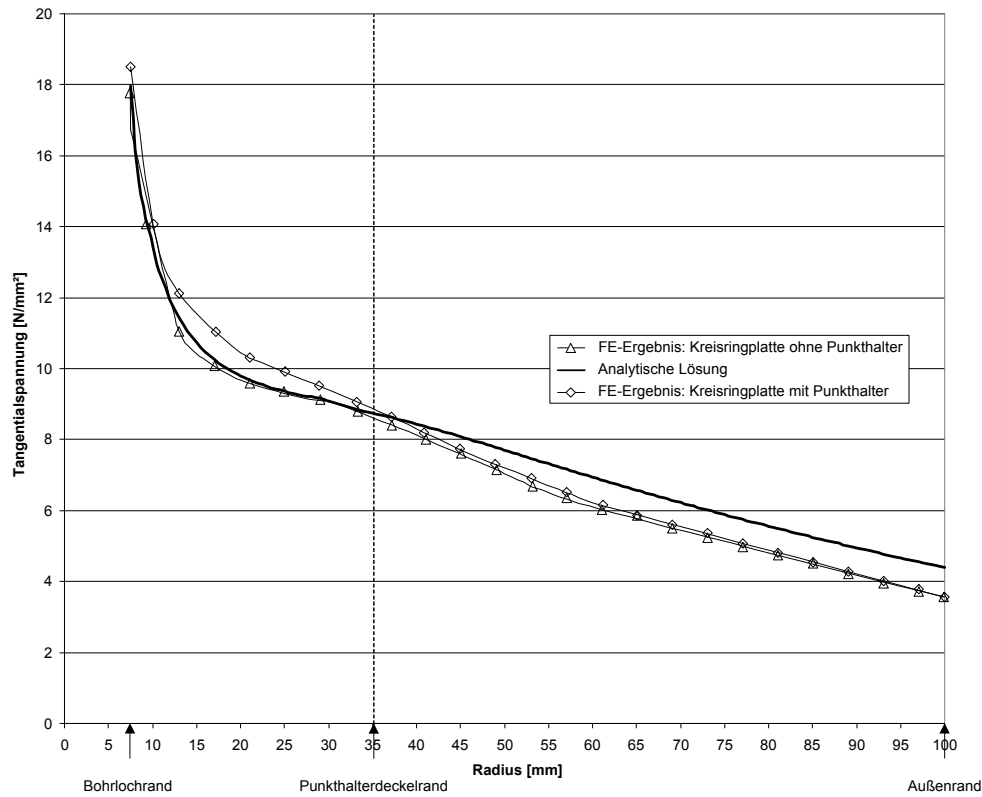


Bild 4.18: Verlauf der Tangentialspannung für eine Kreisringplatte ($h = 10 \text{ mm}$) mit Radius 100 mm und 15 mm Bohrloch bei einer Ringlast von $1000 \text{ N}/(2 \cdot \pi \cdot 31,5 \text{ mm})$ bzw. Einzellast von 1000 N

4.4.4 Vierpunktgestützte Glastafel

Zur Überprüfung der notwendigen Netzdichte gebohrter Glastafeln wurde in Bild 4.10 die Annahme getroffen, dass sich vierpunktgestützte Glastafeln im Stützbereich genauso verhalten wie Kreisringplatten unter einer gleichmäßigen Ringlast. Diese Annahme trifft für wenige Sonderfälle der vierpunktgestützten Glastafel zu.

In der Regel wird sich kein rotationssymmetrischer Spannungsverlauf um das Bohrloch einstellen, sondern es werden sich je nach Tafelabmessung und Randabstand der Bohrlöcher Spannungsspitzen an den Bohrlochrändern ausbilden. Im folgenden wird gezeigt, dass dennoch die in Abschnitt 4.4.3 angegebene Netzdichte im Bohrlochbereich für eine sichere Bemessung von vierpunktgestützten Glastafeln ausreichend ist. Dazu werden die maßgebenden tangentialen Spannungsverläufe verschiedener Glastafeln des in Tabelle 4.1 angegebenen Parameterspektrums betrachtet und mit den Spannungsverläufen der Kreisringplatte verglichen.

Zunächst wird der Sonderfall einer quadratischen Glastafel mit den Abmessungen 1200 mm x 1200 mm x 10 mm ($a \times b \times h$) betrachtet. Die Punkthalter weisen einen Randabstand von 300 mm auf. Der Spannungsplot der tangentialen Spannungen (siehe Bild 4.19) zeigt, dass für diesen Fall der Spannungsverlauf im Lochbereich annähernd rotationssymmetrisch ist.

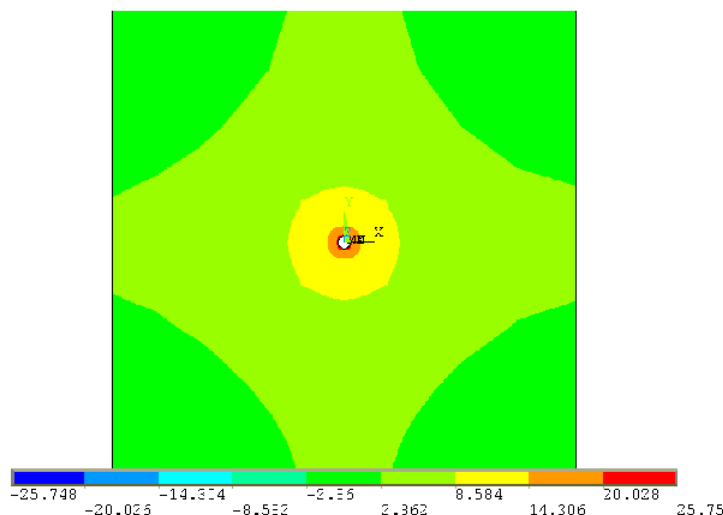


Bild 4.19: Tangentialspannungsplot [N/mm^2] für eine Glastafel 1200 mm x 1200 mm x 10 mm

Durch die Auftragung der tangentialen Spannungen über eine vom Bohrloch radial weglau- fende Strecke (siehe Bild 4.20) wird deutlich, dass der Spannungsgradientenverlauf dem einer Kreisringplatte entspricht. Die durch die Lochbohrungen entstehenden Spannungsspitzen klingen wie bei der Kreisringplatte noch innerhalb des Punkthalterbereiches ab. Der Span- nungsverlauf kann durch eine Funktion $y = a + \frac{b}{x^2}$ beschrieben werden. Diese Funktion wird durch die Untersuchungen in [86] bestätigt, in denen für einen anderen Punkthalter versuchs- technisch die Steigung der Tangentialdehnung zu $\frac{\delta \varepsilon}{\delta F} \cdot (x) = a + \frac{b}{x^2} + c \cdot \ln(x)$ ermittelt wurde.

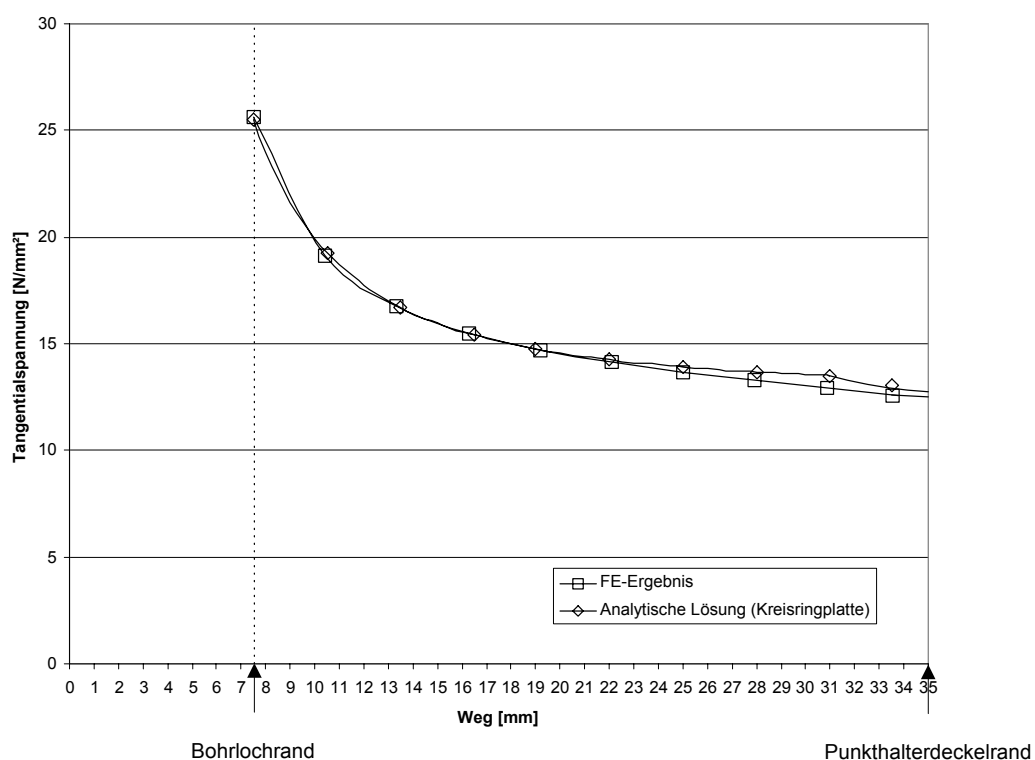


Bild 4.20: Vergleich der tangentialen Spannungsverläufe von Kreisringplatte und quadratischer vierpunktge- stützter Glastafel

Diese Beobachtungen können auch bei Untersuchungen von drei Grenzfällen des in Tabelle 4.1 angegebenen Parameterspektrums gemacht werden. In Bild 4.21 bis Bild 4.23 sind die Spannungsverläufe dieser Grenzfälle mit ihren Näherungskurven eingetragen.

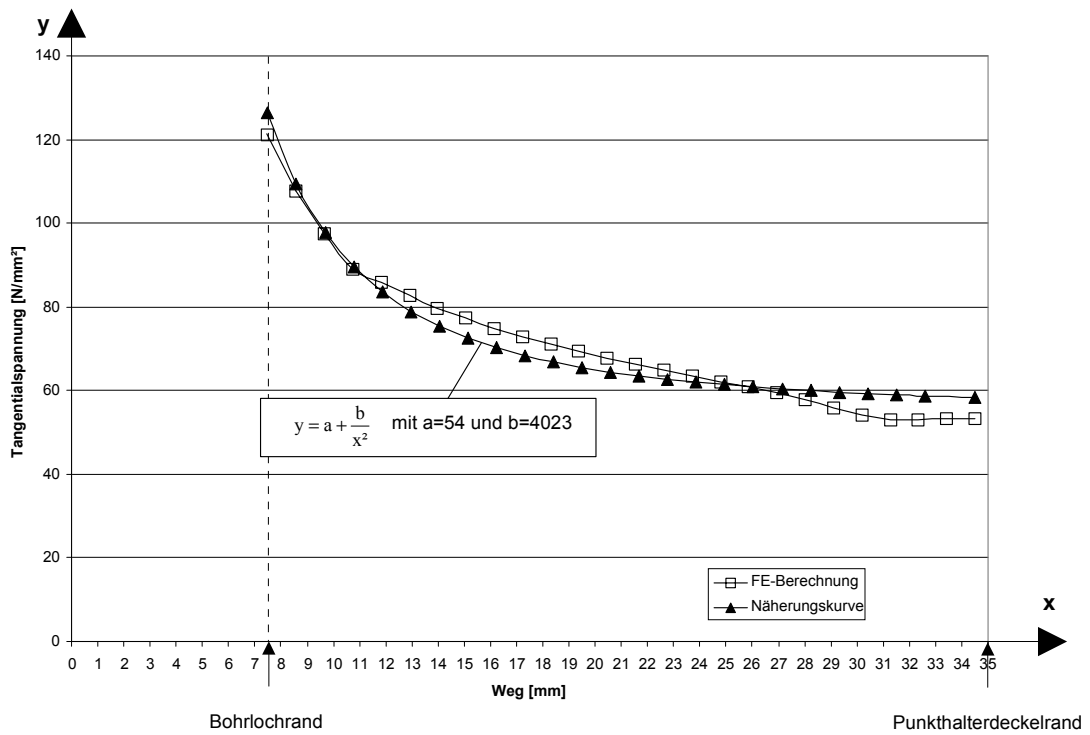


Bild 4.21: Tafel 1000 mm x 1000 mm x 4 mm mit Bohrlochrandabstand 100 mm

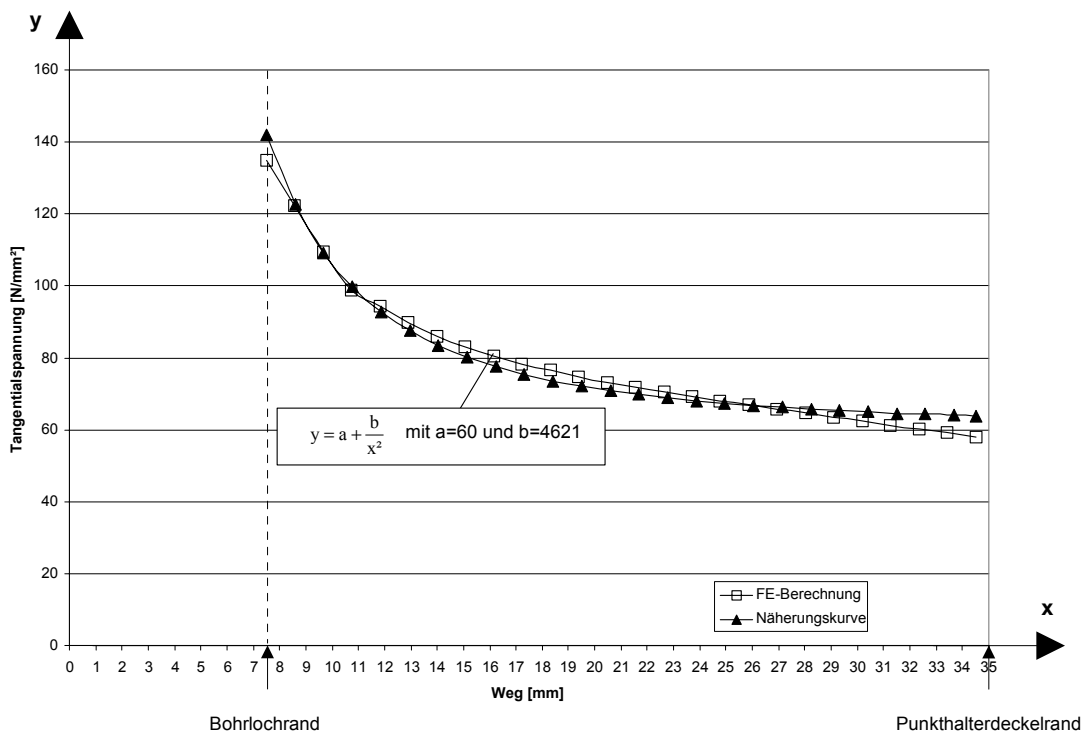


Bild 4.22: Tafel 1200 mm x 3000 mm x 4 mm mit Bohrlochrandabstand 100 mm

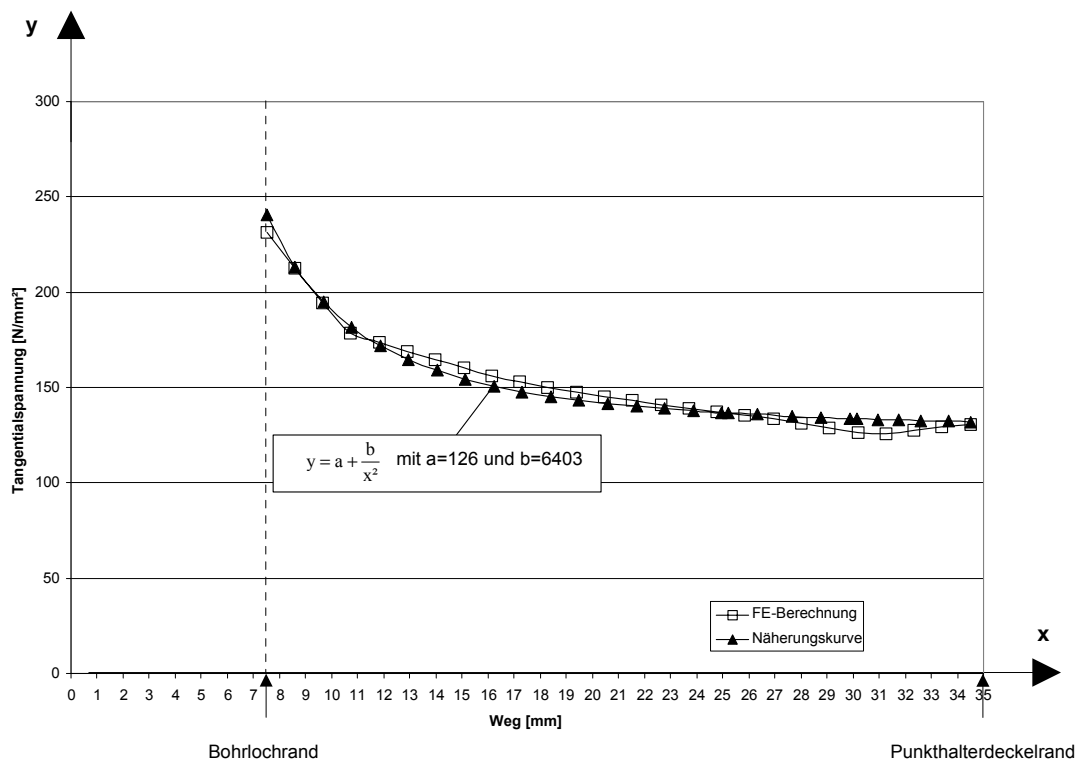


Bild 4.23: Tafel 3000 mm x 3000 mm x 4 mm mit Bohrlochrandabstand 100 mm

Auch hier können die Spannungsverläufe durch Funktionen der Form $y = a + \frac{b}{x^2}$ angenähert werden. Dies bedeutet, dass die Spannungen im direkten Bohrlochbereich unabhängig von den Glastafelabmessungen, bis zu einem Abstand von ca. 3 mm vom Bohrlochrand, den maximalen Spannungsgradienten haben (siehe auch Bild 4.24).

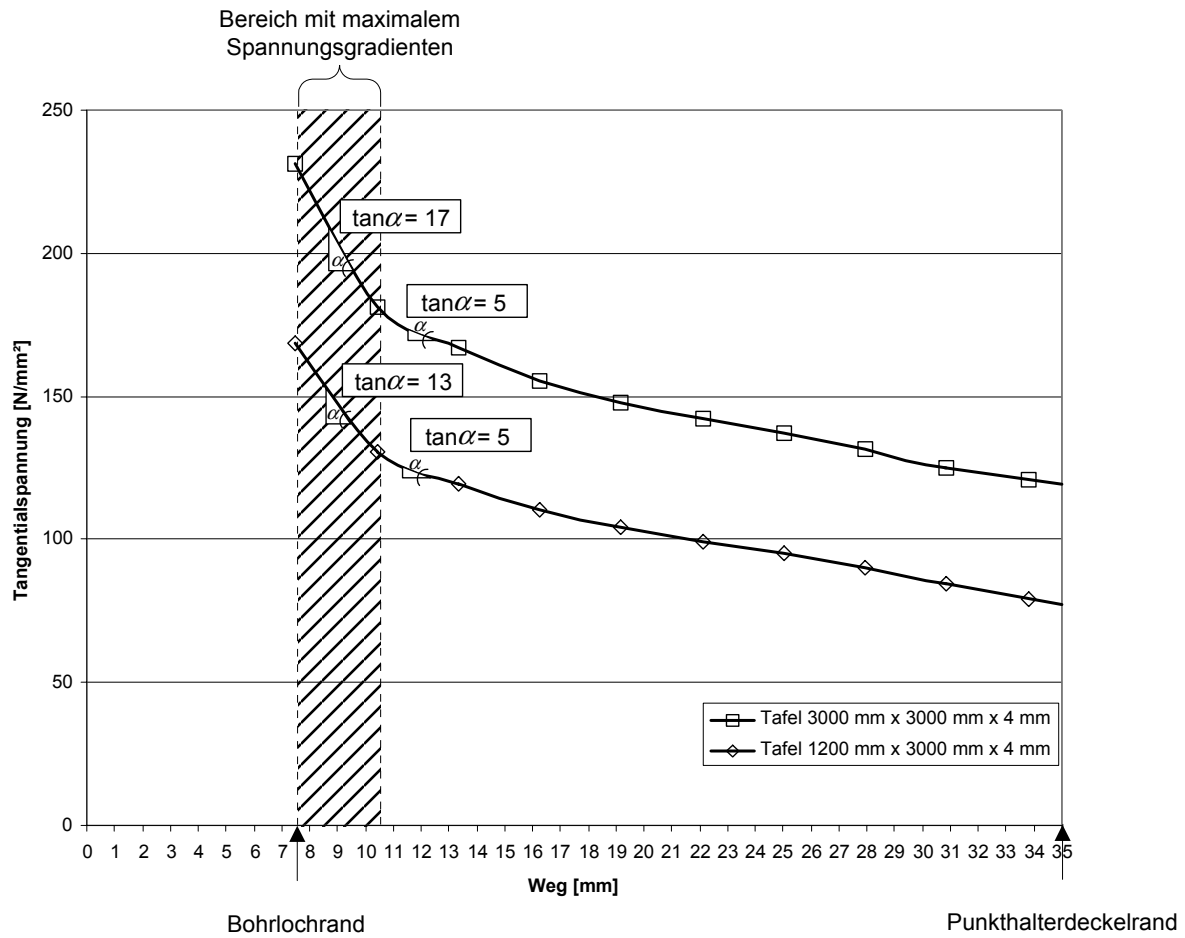


Bild 4.24: Maximaler Spannungsgradient im direkten Bohrlochbereich

Aus Bild 4.25 kann entnommen werden, dass sich durch eine Verfeinerung des radialen Netzes von 8 auf 16 Elemente um das Bohrloch der Spannungsverlauf nur geringfügig verändert.

Der Verlauf kann weiter mit einer Funktion der Form $y = a + \frac{b}{x^2}$ erfasst werden.

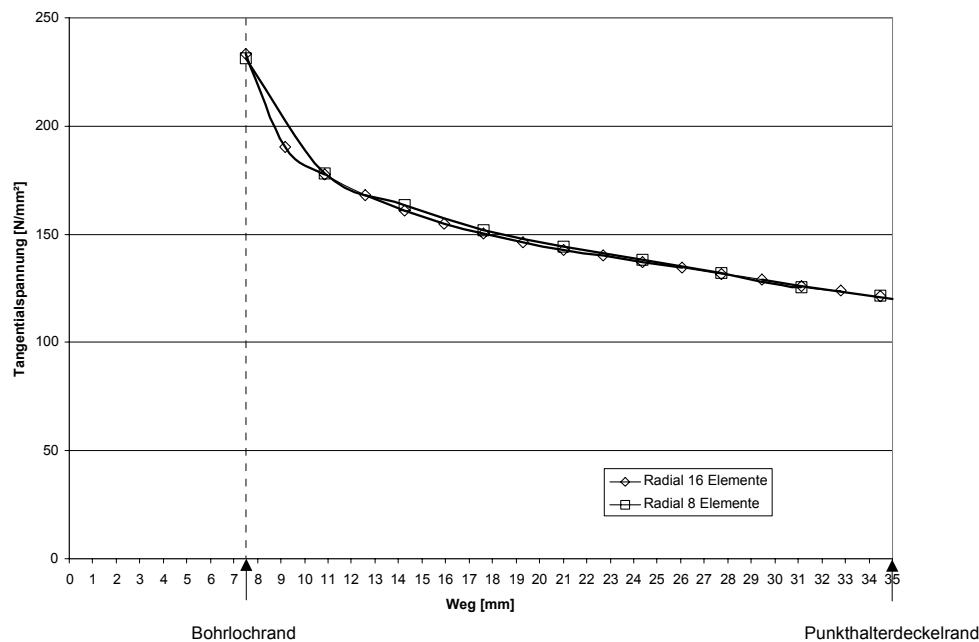


Bild 4.25: Vergleich des Tangentialspannungsverlaufes bei radialer Netzverfeinerung im Punkthalterbereich (Tafel 3000 mm x 3000 mm x 4 mm).

4.4.5 Abbildungsvorschrift

In dieser Arbeit werden zur Abbildung der Glastafeln Volumenelemente mit niedriger Ansatzfunktion gewählt. Bei Verwendung von Volumenelementen mit hoher Ansatzfunktion liegt diese angegebene Netzdichte auf der sicheren Seite. Die vorangegangenen Untersuchungen haben gezeigt, dass für die korrekte Erfassung der im Bohrlochbereich auftretenden Spannungen bei Verwendung der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Elementen folgende Netzdichte ausreichend ist:

1. Netzunterteilung tangential: 32 Elemente
2. Netzunterteilung radial (im Punkthalterbereich): 8 Elemente
3. Netzunterteilung über die Tafeldicke: 4 Elemente

Das restliche Netz der Glastafel kann unter Beachtung von allgemeinen FE-Modellierungsgrundsätzen (z.B. Verhältnis von Elementkanten zueinander maximal 1:3) beliebig gewählt werden.

Die Netzdichte über die Tafeldicke ist im Punktstützungsbereich aufgrund des Lasteinleitungsproblems von Bedeutung, da an der lastzugewandten Glastafeloberfläche Druckspannungen entstehen, die zur lastabgewandten Glastafeloberfläche abklingen (siehe Bild 4.26).

Durch die Wahl von 4 Elementen über die Tafeldicke kann dies im FE-Modell abgebildet werden.

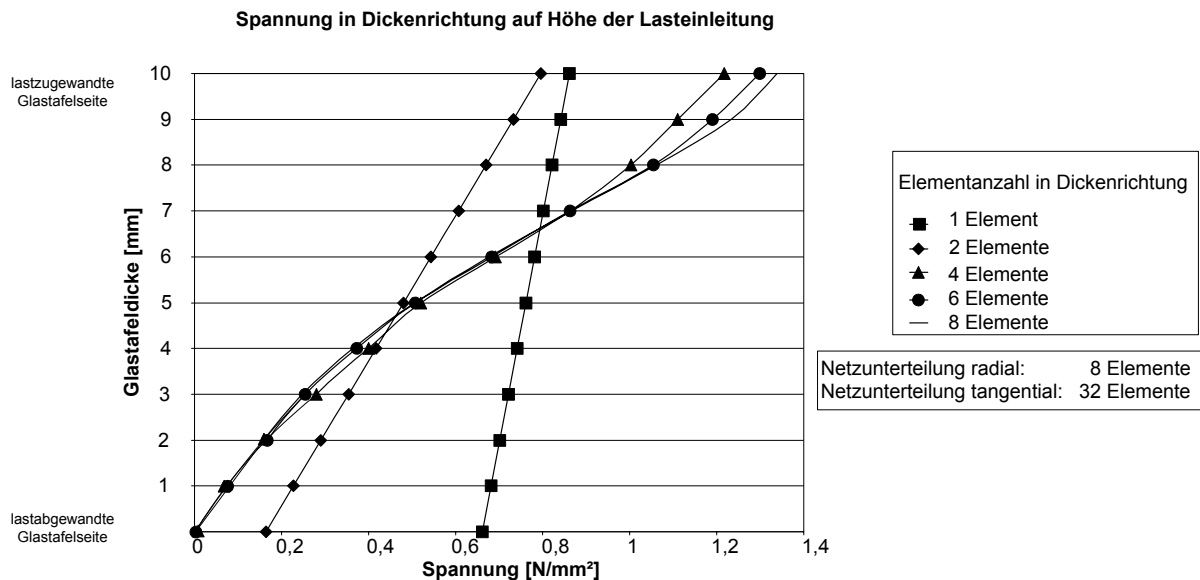


Bild 4.26: Erhöhung der Netzunterteilung in Dickenrichtung für eine 10 mm Kreisringplatte mit Außenradius 1000 mm und 15 mm Bohrloch bei einer Ringlast von $1000\text{N}/(2 \cdot \pi \cdot 31,5\text{mm})$

Wie in Kapitel 6 gezeigt wird, ist eine Vernetzung über die Tafeldicke mit 4 Elementen auch zur genauen Erfassung der Lastabtragung über den Punkthalterbolzen bei ausgefüllten Bohrlochern notwendig.

Zur Vollständigkeit wurde in dieser Arbeit die punktgestützte Glastafel auch mit Platten / Schalenelementen (siehe Bild 4.27) abgebildet. Wie sich zeigte, kann bei Verwendung dieser Elemente das komplexe Abtragungsverhalten der äußeren Lasten im Punkthalterbereich nicht abgebildet werden.

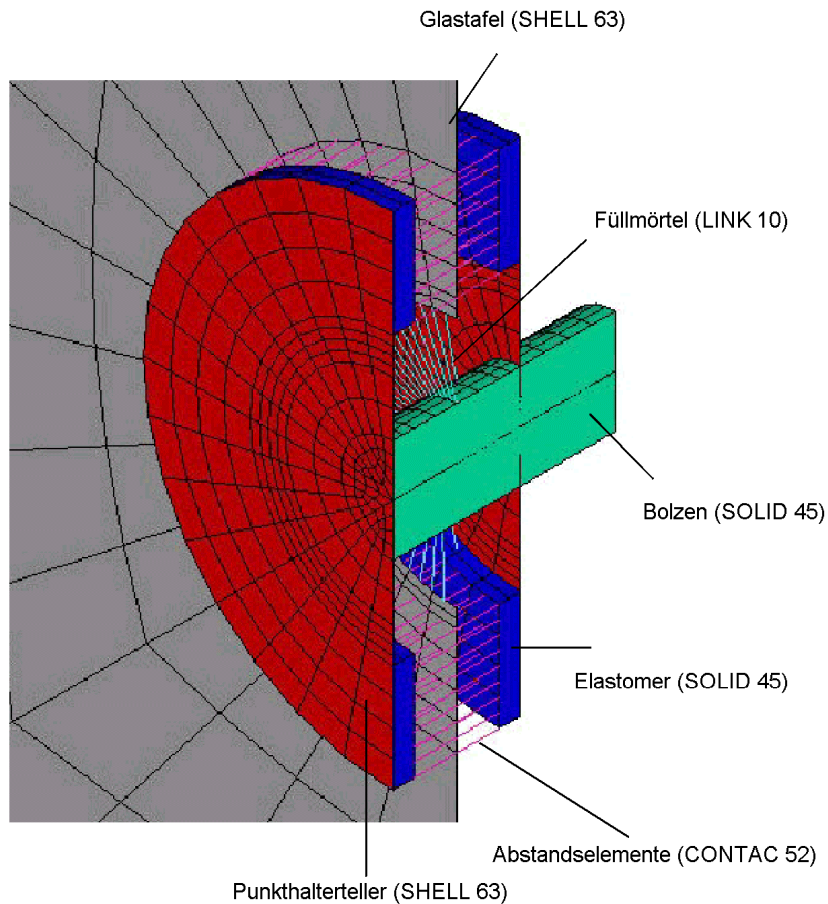


Bild 4.27: Schalenmodell

Vergleichende Berechnungen mit dem FE-Programm SJ MEPLA [80] zeigen jedoch, dass nicht unbedingt Volumenelemente zur Abbildung des Stützbereichs verwendet werden müssen. Voraussetzung sind Schalenelemente mit dafür geeigneten Ansatzfunktionen.

In dem FE-Programm SJ MEPLA [80] werden neunknotige isoparametrische Mehrschicht-Elemente für die Abbildung der Glastafeln verwendet. Das Mehrschichtelement kann Lochleibungskräfte übertragen. Zudem wird Kontakt zwischen der Tellerschicht und der Glasfläche sowie zwischen der Hülsenschicht und dem Bohrungsrand des Glases berücksichtigt (siehe Bild 4.28).

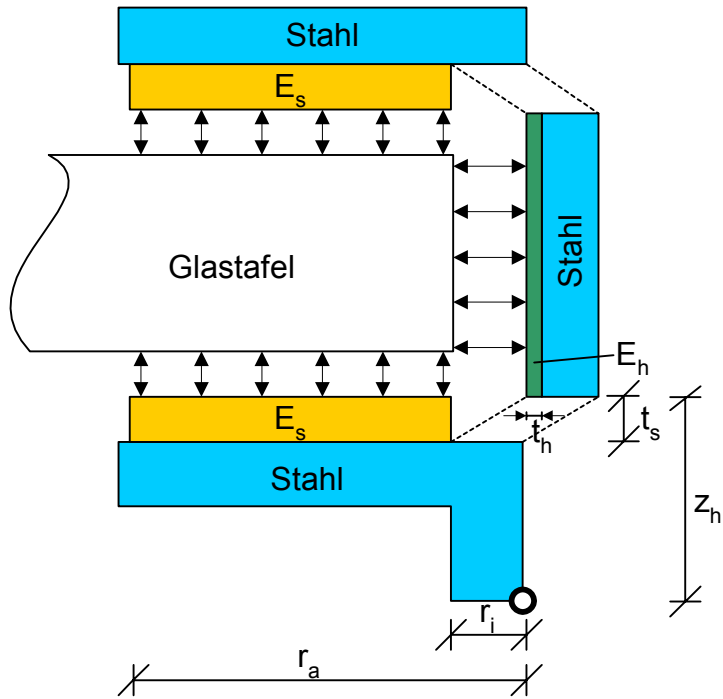


Bild 4.28: Abbildung von Punkthaltern im Programm SJ-MEPLA [80]

5 Versuche an vierpunktgestützten Glastafeln

5.1 Allgemeines

Die im Lochbereich punktgestützter Glastafeln auftretenden Spannungsspitzen erfordern aufwendige Berechnungen nach der FEM. Je nach Punkthaltermodellierung können diese Berechnungen zu falschen Ergebnissen führen. Aufgrund dieses Sachverhaltes werden in [68] Versuche gefordert, anhand derer die FE-Modellierungen der Punkthalter verifiziert werden können.

In [10] werden als „Benchmarkversuche“ bezeichnete Versuche vorgestellt. Bei diesen Versuchen handelt es sich um Auszug-, Biegezug- und Abscherversuche. Die Versuche sollen von den Punkthalterherstellern mit ihren Produkten und den dafür vorgesehenen Glastypeen und Glasdicken durchgeführt werden. In Bild 5.1 bis Bild 5.3 sind Prüfvorrichtungen und verschiedene Probekörper abgebildet.

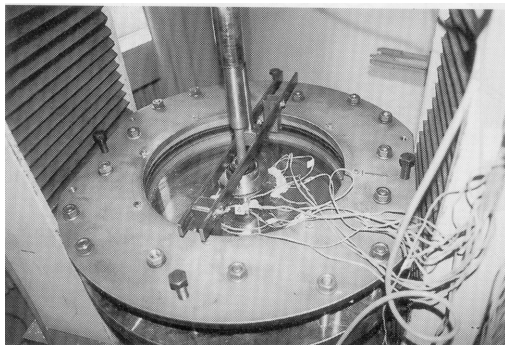


Bild 5.1: Auszugversuch [10]

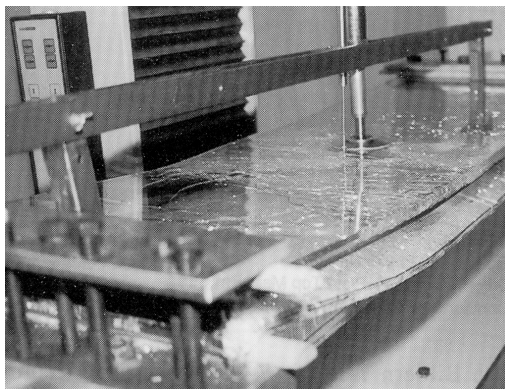


Bild 5.2: Biegezugversuch an einer Referenztafel 1100 mm x 360 mm [10]

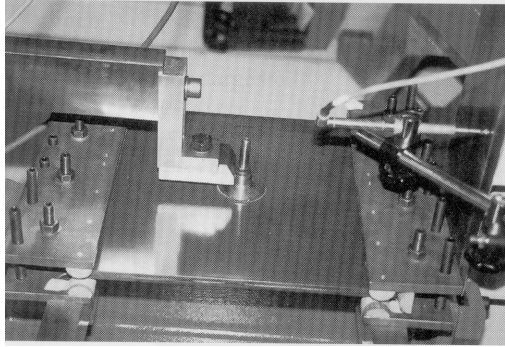


Bild 5.3: Abscherversuche [10]

Die Untersuchungen aus [87] und [88] zeigen, dass solche Versuche an Kleinproben zur Beurteilung des Tragverhaltens punktgestützter Systeme nur bedingte Aussagekraft besitzen. Insbesondere reicht die Aufzeichnung der Kraft sowie der Durchbiegung unter der Lasteinleitung als Vergleichswerte für eine Verifizierung von FE-Modellen nicht aus [34].

In dieser Arbeit wurden deshalb Versuche an vierpunktgestützten Glastafeln durchgeführt, bei denen neben den Durchbiegungen auch Dehnungen über Dehnmessstreifen (DMS) ermittelt wurden.

Im folgenden wird zunächst der allgemeine Versuchsaufbau prinzipiell beschrieben. Im Anschluss daran, werden die Versuchsaufbauten der einzelnen Versuchsreihen mit ihren Besonderheiten vorgestellt. Den Abschluss des Kapitels bildet die Verifizierung der FE-Modellierung aus Abschnitt 4.3 mit den hier vorgestellten Versuchen.

5.2 Versuchsaufbau

5.2.1 Allgemeiner Versuchsaufbau

Bei allen Versuchsreihen wurden 12 mm dicke, gebohrte Floatglastafeln der Abmessungen 1200 mm x 1600 mm (b x h) horizontal mittels vier Punkthaltern unverschieblich an einer Unterkonstruktion aus Stahl befestigt (siehe Bild 5.4) .



Bild 5.4: Versuchsaufbau

Durch die Untersuchung an einem unveredelten Glasprodukt wird verhindert, dass Einflüsse, die sich aus dem Vorspannprozess von Glas ergeben, bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Genauere Angaben zur Eigenspannungsverteilung an gebohrten ESG- und TVG- Tafeln können [50], [53], [54] und [75] entnommen werden. Die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse ist auch der Grund dafür, dass nur monolithische Glastafeln und nicht VSG-Tafeln in dieser Arbeit versuchstechnisch untersucht wurden. Für nähere Informationen zum Tragverhalten von VSG-Tafeln wird auf [3], [2] und [74] verwiesen.

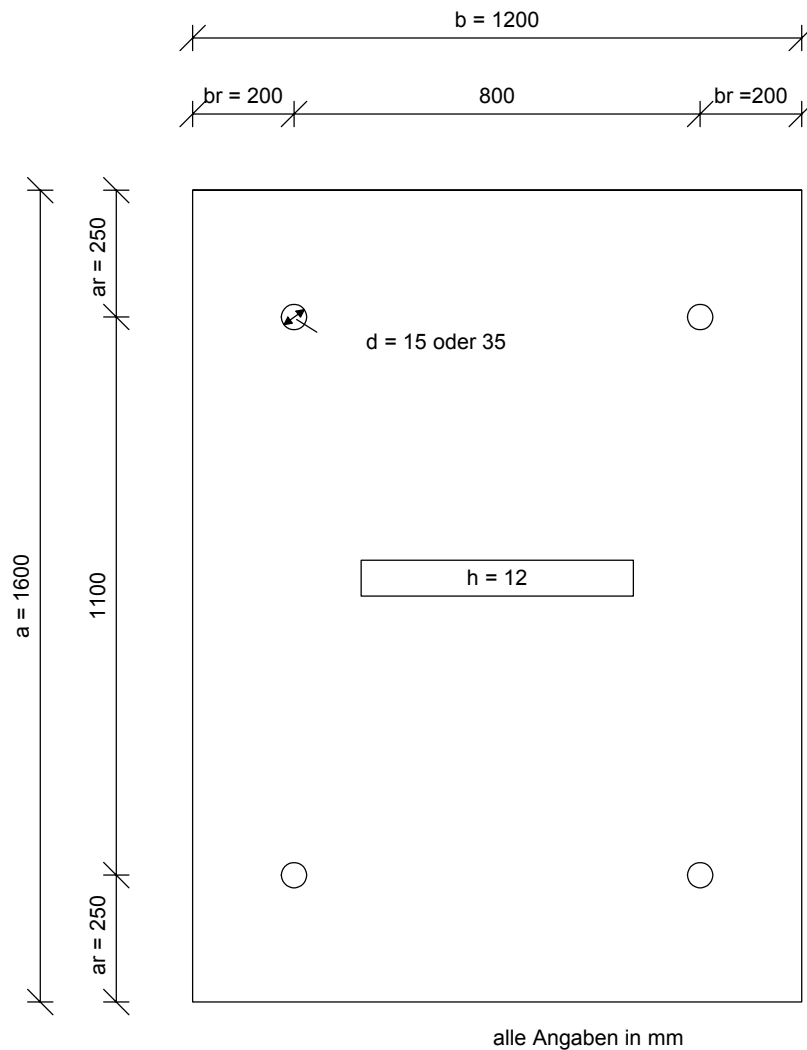


Bild 5.5: Abmessungen der getesteten Glastafeln

Die Lochabstände wurden entsprechend den Ausführungen des Kapitels 2 bei allen Versuchen zu 200 mm (kurze Seite) und zu 250 mm (lange Seite) (siehe Bild 5.5) gewählt. Die Belastung erfolgte durch Aufschütten von Sand. Dadurch ist eine flächige Belastung der Glastafel gewährleistet. Der Einfluss einer ungleichmäßigen Sandverteilung bei einer Durchbiegung der Glastafeln (Sandanhäufung in Tafelmitte) wurde vernachlässigt. Insgesamt wurde eine Gesamtbelastung von 400 kg ($2,1 \text{ kN/m}^2$) in 40 kg Schritten auf die Glastafeln aufgebracht. Alle Glastafeln wurden zur Dehnungsmessung mit DMS bestückt. Die genaue Anordnung der DMS auf den Tafeln kann Bild 5.10 und Bild 5.11 entnommen werden. Neben den Dehnungen wurden zudem die Durchbiegungen in Plattenmitte und in der Mitte der längeren Tafelkante gemessen.

5.2.2 Besonderheiten der einzelnen Versuchsreihen

Es wurden folgende Parameter in den einzelnen Versuchsreihen verändert:

1. Ausbildung der Punkthalter:
 - a. Starrer Punkthalter: In Bild 5.6 ist eine Detailzeichnung dieser Ausführung abgebildet.
 - b. Gelenkiger Punkthalter: In Bild 5.7 ist eine Detailzeichnung dieser Ausführung abgebildet.

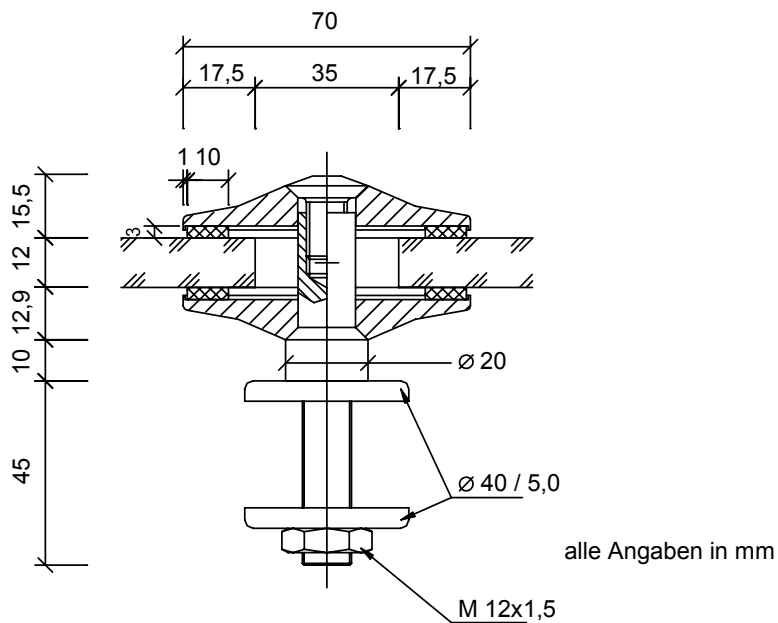


Bild 5.6: Starrer Halter

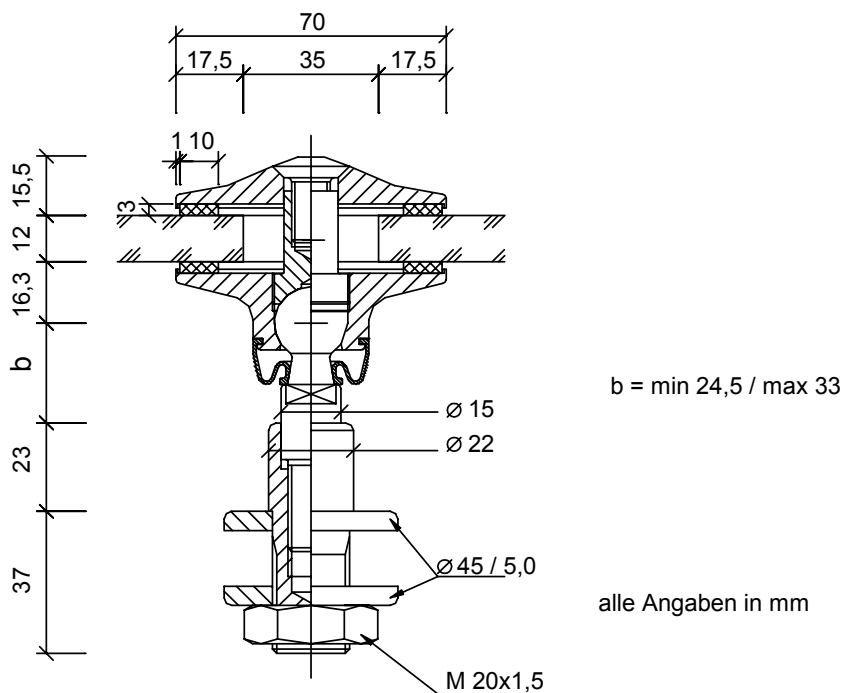


Bild 5.7: Gelenkiger Halter

2. Durchmesser der Bohrlöcher:

- a. Die Durchmesser der Löcher in den Glastafeln wurden mit 15 mm um 0,5 mm größer als der Durchmesser des Glasdickebolzen gewählt.
- b. Die Durchmesser der Glastafellöcher betragen 35 mm. Hierdurch ergibt sich ein Hohlraum zwischen Glasdickebolzen und Lochrand.

3. Verfüllzustand des Bohrloches von 35 mm:

- a. Nicht verfülltes Bohrloch (siehe Bild 5.8)
- b. Verfülltes Bohrloch. Der Raum zwischen Glasdickebolzen und Glastafel wurde mit einer Verfüllmasse (hier HILTI Hit [58]) verfüllt (siehe Bild 5.9).

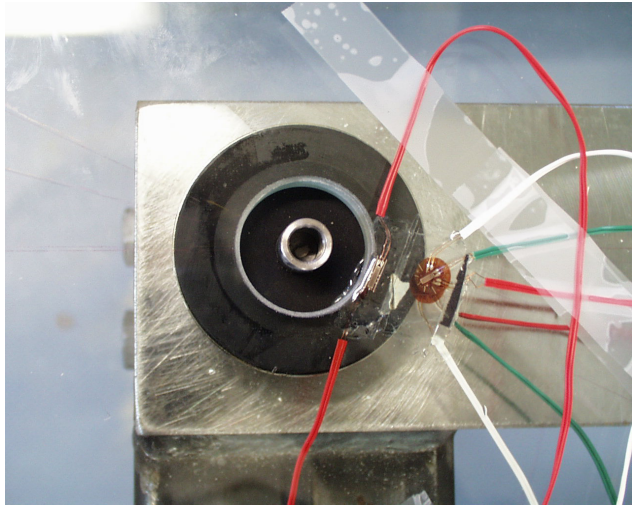


Bild 5.8: Nicht verfülltes Bohrloch

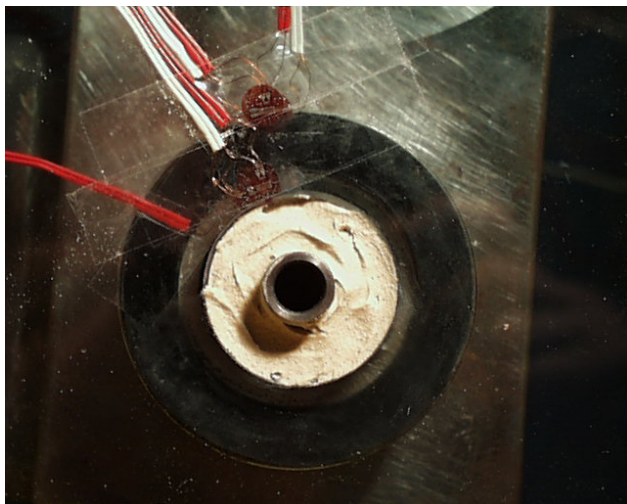


Bild 5.9: Verfülltes Bohrloch

4. Eindrehtiefe des gelenkigen Punkthalters

- a. Vollständig ausgedreht (siehe Bild 5.7: Strecke $b = 33,0$ mm)
- b. Vollständig eingedreht (siehe Bild 5.7: Strecke $b = 24,5$ mm)

5.2.3 Zusammenstellung der durchgeführten Versuche

In Tabelle 5.1 sind alle durchgeführten Versuche aufgelistet. Die Parameterdefinition stimmt mit denen aus Kapitel 5.2.2 überein.

Versuchsreihe	Versuch	Versuchstafel	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3	Parameter 4
Nr.	Nr.	Nr.	Halterausbildung	Lochdurchmesser	Verfüllzustand	Eindrehtiefe der Halter
1	1	1	Starr	15	-	-
	2	2	Starr	15	-	-
2	3	1	Gelenkig	15	-	min
	4	2	Gelenkig	15	-	min
3	5	2	Gelenkig	15	-	max
	6	2	Gelenkig	15	-	max
4	7	3	Starr	35	-	-
	8	4	Starr	35	-	-
	9	5	Starr	35	-	-
5	10	4	Gelenkig	35	-	min
	11	5	Gelenkig	35	-	min
6	12	4	Starr	35	Hilti Hit 50	-
	13	5	Starr	35	Hilti Hit 50	-
7	14	4	Gelenkig	35	Hilti Hit 50	min
	15	5	Gelenkig	35	Hilti Hit 50	min

Tabelle 5.1: Durchgeführte Versuche

5.2.4 Beschreibung der Messeinrichtung

Zur Überprüfung und Verifizierung der FE-Modellierung, müssen die Versuche möglichst viele Vergleichswerte liefern. In den hier durchgeführten Versuchen wurden an allen vier Löchern auf der Unter- und der Oberseite der Glastafeln DMS appliziert. Die genaue Anordnung dieser DMS ist für die Glastafeln mit engem Loch ($d = 15 \text{ mm}$) Bild 5.10 und für Glastafeln mit weitem Loch ($d = 35 \text{ mm}$) Bild 5.11 zu entnehmen. Neben der Dehnungsmessung wurden in Tafelmitte und in Mitte der längeren Glastafelkante die Durchbiegungen gemessen. In Bild 5.12 sind alle Messstellen mit ihren Kurzbezeichnungen abgebildet. Dabei bekommen alle Messstellen, die aufgrund der achsensymmetrischen Anordnung das gleiche Messergebnis liefern müssten, extern die gleiche Bezeichnung. Für die interne Auswertung wurde noch ein Index für die Bohrlochnummer zugefügt. Der Zusatz „o“ steht für Tafeloberseite und der Zu-

satz „u“ für Tafelunterseite. In Tabelle 5.2 sind den Kurzbezeichnungen für eine spätere eindeutige Zuweisung ausführlichere Bezeichnungen zugeordnet.

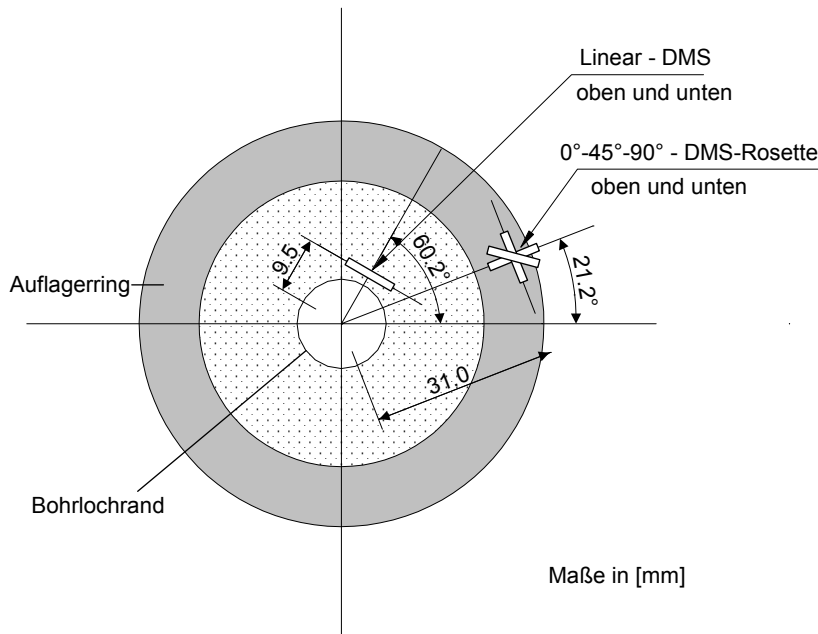


Bild 5.10: Anordnung der DMS bei engem Loch ($d = 15 \text{ mm}$)

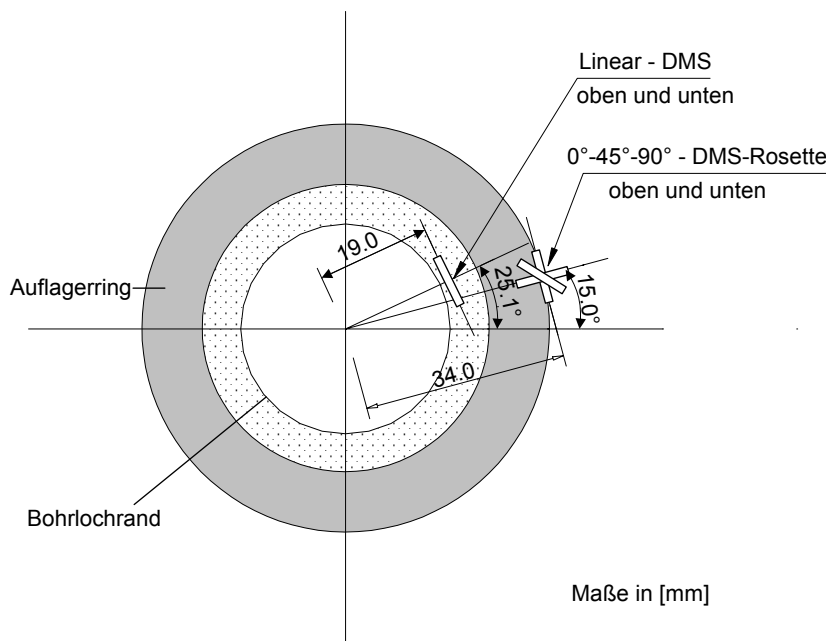


Bild 5.11: Anordnung der DMS bei weitem Loch ($d = 35 \text{ mm}$)

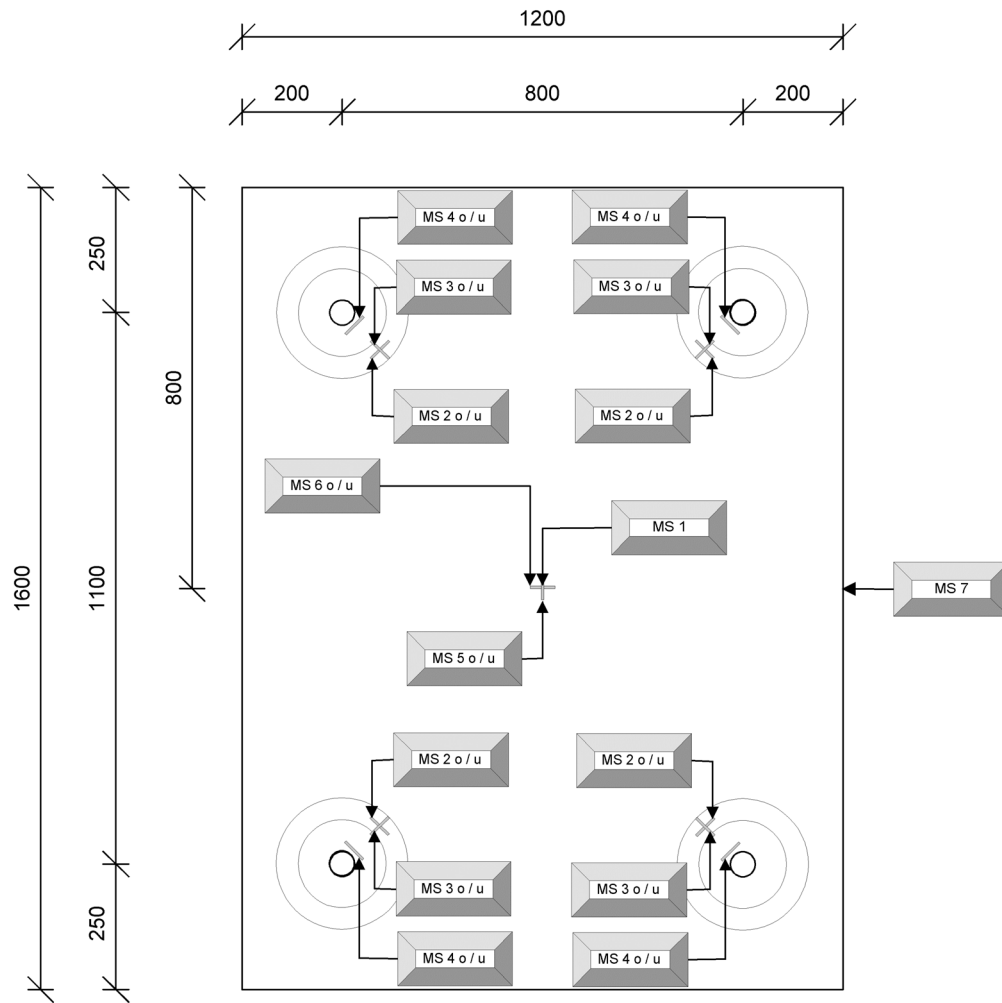


Bild 5.12: Bezeichnung der Messstellen

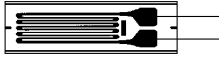
Messstellenbezeichnung	Ausführliche Bezeichnung
MS 1	Durchbiegung in Tafelmitte
MS 2 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflagerring
MS 2 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflagerring
MS 3 o	Radiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflagerring
MS 3 u	Radiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflagerring
MS 4 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Lochrand
MS 4 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Lochrand
MS 5 o	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längsrichtung
MS 5 u	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Längsrichtung
MS 6 o	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Querrichtung
MS 6 u	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Querrichtung
MS 7	Durchbiegung am Tafelrand

Tabelle 5.2: Bezeichnung der Messstellen

Für die Dehnungsmessungen wurden folgende DMS der Firma KYOWA verwendet.

1) Linear – DMS

Geometrie:

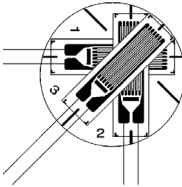


Technische Daten:

TYPE	KFG-5-120-C1-11L3M2R		GAGE FACTOR(24t,50%RH)	2.09	±1.0 %
TEMPERATURE COMPENSATION FOR	STEEL		ADAPTABLE THERMAL EXPANSION	11.7	PPM/°C
GAGE LENGTH	5 mm		TRANSVERSE SENSITIVITY(24t,50%RH)	0.40	%
GAGE RESISTANCE(24t,50%RH)	119.6 ± 0.4 Ω		APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-33A,EP-34	QUANTITY
LOT No.	Y2715	BATCH	239A	C06	10

2) 3-fache DMS – Rosetten

Geometrie:

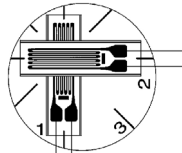


Technische Daten:

TYPE	KFG-3-120-D17-11L3M2S		GAGE FACTOR(24t,50%RH)	2.08	±1.0
TEMPERATURE COMPENSATION FOR	STEEL		ADAPTABLE THERMAL EXPANSION	11.7	PPM
GAGE LENGTH	3 mm		TRANSVERSE SENSITIVITY(24t,50%RH)	0.50	
GAGE RESISTANCE(24t,50%RH)	120.0 ± 0.8 Ω		APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-33A,EP-34	QUANT
LOT No.	Y3177	BATCH	044A	E06	10

3) 2-fache DMS – Rosetten

Geometrie:

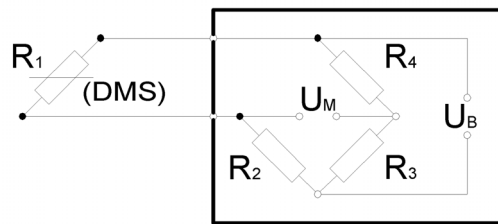


Technische Daten:

TYPE	KFG-2-120-D16-11L3M2S		GAGE FACTOR(24t,50%RH)	2.07	±1.0 %
TEMPERATURE COMPENSATION FOR	STEEL		ADAPTABLE THERMAL EXPANSION	11.7	PPM/°C
GAGE LENGTH	2 mm		TRANSVERSE SENSITIVITY(24t,50%RH)	0.70	%
GAGE RESISTANCE(24t,50%RH)	120.4 ± 0.4 Ω		APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-33A,EP-34	QUANTITY
LOT No.	Y3212	BATCH	102B	E06	10

Die DMS sind als Viertelbrückenschaltung in der Wheatstone'schen Brückenschaltung angeordnet (siehe Bild 5.13). Als Ergänzungswiderstände sind im Datalogger (Schlumberger Data Logger 3535 D) interne Festwiderstände mit einem Nennwiderstand von 120 Ω vorhanden.

Außenschaltung Ergänzungsschaltung



R_{1-4} = Widerstände in den Brückenzweigen

U_B = Brückenspeisespannung

U_M = Brückenausgangsspannung

Bild 5.13: Viertelbrückenschaltung

Bild 5.14 zeigt den Aufbau der gesamten Messeinrichtung.

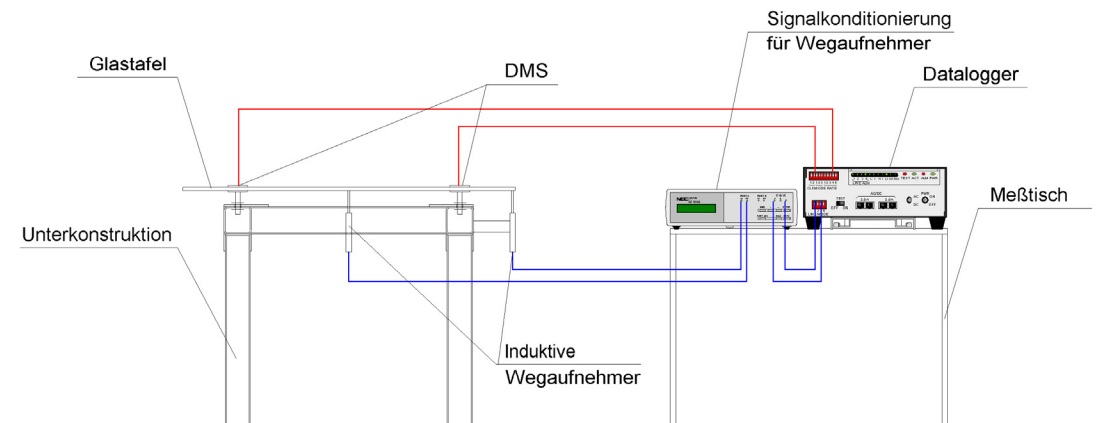


Bild 5.14: Messeinrichtung

5.3 Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung

5.3.1 Vorgehensweise bei der Durchführung der Versuche

Im folgenden ist die Vorgehensweise bei der Durchführung der Versuche aufgelistet:

1. Vorberechnung mit der FEM. Auf Basis dieser Berechnungsergebnisse wurden die Applizierungsstellen der DMS festgelegt
2. Applizieren der DMS auf den Glastafeln

3. Vorbelastung der Glastafeln zur Überprüfung der DMS
4. Abgleichen der DMS
5. Stufenweise Lastaufbringung (400 kg in 10 Schritten à 40 kg) mit Sand auf die Glastafeln
6. Auswertung der Daten

5.3.2 Auswertung der Messergebnisse

Für die Verifizierung der FE-Modelle interessieren zunächst die radialen und tangentialen Dehnungen im Bohrlochbereich. Die DMS werden deshalb in diesen Richtungen angeordnet. Die genaue Anordnung der DMS sowie der jeweils zur Anwendung kommende DMS Typ kann Abschnitt 5.2.4 entnommen werden. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die DMS an jedem Loch an der gleichen Position (entsprechend den Klebeschablonen aus Bild 5.10 und Bild 5.11) appliziert wurden. Dadurch ergeben sich für jede Versuchsreihe (siehe Tabelle 5.1) 8 Vergleichswerte pro Messgröße (z.B. tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflagering (MS 2o)) und Laststufe. Die Aufzeichnung der Dehnungen erfolgte nach jeder Lastaufbringung. Hierbei wurden pro Laststufe und Messstelle 20 Werte gescannt. Bei der Versuchsauswertung wurde aus diesen 20 Werten für jede Messstelle das Mittel gebildet. In einem nächsten Auswertungsschritt wurden die so erhaltenen Dehnungen an den Löchern in jeder Messrichtung verglichen und statistisch ausgewertet. Zusätzlich wurden die Messinstrumentenfehler aus den technischen Beschreibungen der Hersteller abgeschätzt. Es gilt:

$$m_{\max,\min} = \bar{m} \pm \Delta m \pm m_{\text{Fehler}} \quad (5.1)$$

mit: $m_{\max,\min}$ = Maximal/Minimalwert der jeweiligen Messgröße m

\bar{m} = Mittelwert der Datenreihe m

Δm = Standardabweichung der Datenreihe m

m_{Fehler} = Messfehler bei der Aufnahme der Größe m

Neben den Dehnungen sind für den verständlicheren Vergleich mit der FE-Berechnung auch die Spannungen von Interesse. Da mit DMS nur Dehnungen gemessen werden können, müs-

sen die zugehörigen Spannungen unter Einbeziehung der elastischen Kennwerte des Bauteilwerkstoffes (hier Glas) berechnet werden. Diese Kennwerte sind der Elastizitätsmodul und die Querdehnungszahl. Für die Auswertung eines linearen DMS gilt unter Vernachlässigung der radialen Dehnungskomponente [90]:

$$\sigma = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \varepsilon \quad (5.2)$$

Bei Verwendung der DMS-Rosetten werden die Spannungen in radialer und tangentialer Richtung bezogen auf die Bohrungsachse mit folgender Formel [90] berechnet:

$$\sigma_{x,y} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y) \quad (5.3)$$

5.4 Verifizierung der FE-Modellierung

5.4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird die Güte des in Kapitel 4 beschriebenen FE-Modells beurteilt. Zu diesem Zweck werden die in Abschnitt 5.3 beschriebenen Versuche mit dem FE-Modell nachgerechnet und verglichen. In den Tabellen 5.3 bis 5.8 werden die Spannungen an den betreffenden Messstellen verglichen. Eine höhere Übereinstimmung der Mess- mit den Berechnungsergebnissen liefert ein Vergleich der Dehnungen (siehe Anhänge A1 bis A6). Dies liegt darin begründet, dass in einer FE-Berechnung die Verschiebungen an den Knoten ermittelt werden. Aus diesen Verschiebungen werden anschließend Dehnungen berechnet, die wiederum als Grundlage für die Spannungsberechnung dienen. In den Versuchsreihen wurden die Verformungen in Plattenmitte sowie die Dehnungen über DMS gemessen. Die Spannungen wurden aus diesen Dehnungen durch Anwendung der in Abschnitt 5.3.2 angegebenen Formeln und Vereinfachungen ermittelt und weisen bei einem Vergleich deshalb eine geringere Genauigkeit als die Dehnungen auf.

Ein weitere Ungenauigkeit bei einem Vergleich zwischen Versuch und FE-Berechnung folgt daraus, dass die Anordnung der DMS nur mit hohem Aufwand mit der Elementvernetzung

des FE-Modells deckungsgleich nachgebildet werden kann. In der vorliegenden Arbeit wurde zunächst das Element auf dem sich der DMS befindet ausgewählt (siehe Bild 5.15). Im Anschluss daran wurden die Ergebnisse an den vier Randpunkten (Elementknoten) ausgelesen und der Mittelwert aus diesen vier Werten gebildet. Durch diese Vorgehensweise wird auch berücksichtigt, dass die in den Versuchen aufgenommenen Werte der DMS nicht lokalen Größen entsprechen. Der durch die DMS-Streifen aufgezeichnete Wert entspricht in der Realität der über die Gitterlänge gemittelten Größe.

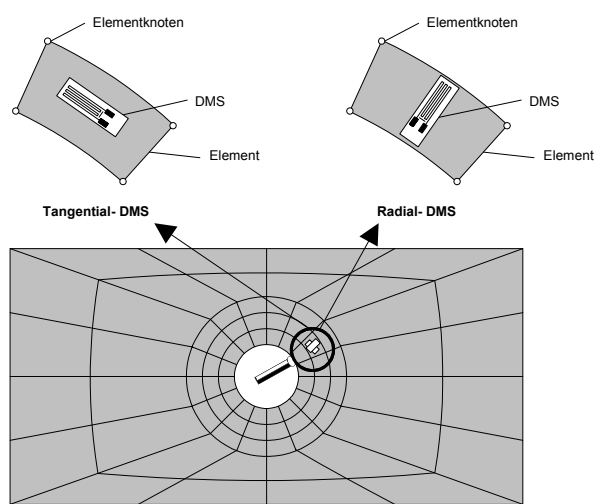


Bild 5.15: Bestimmung der Dehnungen im FE-Modell

5.4.2 Beurteilung der FE-Modellierung anhand der durchgeführten Versuche

Im folgenden werden die Ergebnisse der in Abschnitt 5.3.1 durchgeführten Versuchsreihen den FE-Berechnungen des FE-Modells aus Abschnitt 4.4.4 vergleichend gegenübergestellt. Zur übersichtlicheren Darstellung der Ergebnisse sind diese für die einzelnen Versuchsreihen in den Anhängen A1 bis A6 in Diagrammform aufbereitet. In den folgenden Tabellen werden die Abweichungen der FE-Berechnung von den Mittelwerten der Versuchsreihen für die Belastung $2,1 \text{ kN/m}^2$ angegeben. Wie aus Tabelle 5.1 ersichtlich, wurden jeweils mindestens zwei Versuche pro Versuchsreihe gefahren. Dies bedeutet, dass pro DMS-Messstelle am Bohrlochrand (z.B. tangentialer DMS am Bohrlochrand an der Tafeloberseite) 8 Vergleichswerte zur Verfügung stehen. Diese hohe Anzahl der Vergleichswerte gibt die Gewährleistung, dass der Ausfall einer Messstelle oder eine Fehlmessung sofort festgestellt werden kann. Zudem kann eine obere und untere Schranke festgelegt werden. In den Diagrammen der Anhänge A1 bis A6 sind diese Schranken eingetragen. In Tafelmitte stehen zur Überprüfung der dort

gemessenen Durchbiegungen und Dehnungen nur zwei Vergleichswerte (aus jedem Versuch einer Versuchsreihe erhält man einen Wert) zur Verfügung.

Die Bezeichnung der Messstellen stimmt mit denen aus Tabelle 5.2 und Bild 5.12, die auch für die Bezeichnungen der Diagramme in den Anhängen A1 bis A6 verwendet wurden, überein.

Messstellenbezeichnung	Belastung [kN/m ²]	Versuchsreihe 1		Abweichung [%]
		Versuch [mm]	FE [mm]	
MS 1 Durchbiegung in Tafelmitte	2,1	-2,44	-2,45	0
MS 7 Durchbiegung am Tafelrand	2,1	-2,02	-1,96	-3
Messstellenbezeichnung	Belastung [kN/m ²]	Versuchsreihe 1		Abweichung [%]
		Versuch [N/mm ²]	FE [N/mm ²]	
MS 2 o Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring	2,1	9,45	10,64	11
MS 2 u Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring	2,1	-10,14	-10,33	2
MS 3 o Radiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring	2,1	9,88	10,54	6
MS 3 u Radiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring	2,1	-7,59	-12,84	41
MS 4 o Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Lochrand	2,1	12,73	14,98	15
MS 4 u Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Lochrand	2,1	-13,34	-10,62	-26
MS 5 o Spannung in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längsrichtung	2,1	-7,45	-6,41	-16
MS 5 u Spannung in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Längsrichtung	2,1	7,82	6,19	-26
MS 6 o Spannung in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Querrichtung	2,1	-4,13	-5,26	21
MS 6 u Spannung in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Querrichtung	2,1	4,26	5,11	17

Tabelle 5.3: Vergleich der Versuchsreihe 1 (starrer Punkthalter mit 15 mm Lochbohrung) mit den Ergebnissen der FE-Berechnung

Messstellenbezeichnung	Belastung [kN/m ²]	Versuchsreihen 2 + 3		Abweichung [%]
		Versuch [mm]	FE [mm]	
MS 1 Durchbiegung in Tafelmitte	2,1	-3,13	-3,18	2
MS 7 Durchbiegung am Tafelrand	2,1	-2,38	-2,69	11
Messstellenbezeichnung	Belastung [kN/m ²]	Versuchsreihen 2 + 3		Abweichung [%]
		Versuch [N/mm ²]	FE [N/mm ²]	
MS 2 o Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring	2,1	6,19	7,94	22
MS 2 u Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring	2,1	-7,55	-8,03	6
MS 3 o Radiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring	2,1	4,15	6,13	32
MS 3 u Radiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring	2,1	-5,20	-6,48	20
MS 4 o Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Lochrand	2,1	9,78	13,29	26
MS 4 u Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Lochrand	2,1	-11,72	-13,14	11
MS 5 o Spannung in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längsrichtung	2,1	-9,81	-7,63	-29
MS 5 u Spannung in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Längsrichtung	2,1	9,43	7,57	-25
MS 6 o Spannung in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Querrichtung	2,1	-4,94	-6,11	19
MS 6 u Spannung in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Querrichtung	2,1	4,24	6,07	30

Tabelle 5.4: Vergleich der Versuchsreihen 2 und 3 (gelenkiger Punkthalter mit 15 mm Lochbohrung) mit den Ergebnissen der FE-Berechnung

Messstellenbezeichnung	Belastung [kN/m ²]	Versuchsreihe 4		Abweichung [%]
		Versuch [mm]	FE [mm]	
MS 1 Durchbiegung in Tafelmitte	2,1	-2,52	-2,59	2
MS 7 Durchbiegung am Tafelrand	2,1	-1,93	-2,10	8
Messstellenbezeichnung	Belastung [kN/m ²]	Versuchsreihe 4		Abweichung [%]
		Versuch [N/mm ²]	FE [N/mm ²]	
MS 2 o Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring	2,1	10,19	11,70	13
MS 2 u Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring	2,1	-10,91	-11,90	8
MS 3 o Radiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring	2,1	6,05	6,87	12
MS 3 u Radiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring	2,1	-6,67	-8,11	18
MS 4 o Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Lochrand	2,1	15,41	18,07	15
MS 4 u Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Lochrand	2,1	-16,57	-17,98	8
MS 5 o Spannung in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längsrichtung	2,1	-8,14	-6,67	-22
MS 5 u Spannung in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Längsrichtung	2,1	7,53	6,49	-16
MS 6 o Spannung in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Querrichtung	2,1	-4,73	-5,44	13
MS 6 u Spannung in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Querrichtung	2,1	2,95	5,31	44

Tabelle 5.5: Vergleich Versuchsreihe 4 (starrer Punkthalter mit 35 mm Lochbohrung, unverfüllt) mit den Ergebnissen der FE-Berechnung

Messstellenbezeichnung	Belastung [kN/m ²]	Versuchsreihe 5		Abweichung [%]
		Versuch [mm]	FE [mm]	
MS 1 Durchbiegung in Tafelmitte	2,1	-3,04	-3,19	5
MS 7 Durchbiegung am Tafelrand	2,1	-2,64	-2,70	2
Messstellenbezeichnung	Belastung [kN/m ²]	Versuchsreihe 5		Abweichung [%]
		Versuch [N/mm ²]	FE [N/mm ²]	
MS 2 o Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring	2,1	7,22	9,18	21
MS 2 u Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring	2,1	-8,36	-9,24	10
MS 3 o Radiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring	2,1	2,82	3,90	28
MS 3 u Radiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring	2,1	-3,78	-4,31	12
MS 4 o Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Lochrand	2,1	11,40	14,19	20
MS 4 u Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Lochrand	2,1	-12,67	-14,17	11
MS 5 o Spannung in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längsrichtung	2,1	-9,41	-7,64	-23
MS 5 u Spannung in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Längsrichtung	2,1	8,93	7,58	-18
MS 6 o Spannung in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Querrichtung	2,1	-5,02	-6,11	18
MS 6 u Spannung in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Querrichtung	2,1	3,10	6,07	49

Tabelle 5.6: Vergleich Versuchsreihe 5 (gelenkiger Punkthalter mit 35 mm Lochbohrung, unverfüllt) mit den Ergebnissen der FE-Berechnung

Messstellenbezeichnung	Belastung [kN/m ²]	Versuchsreihe 6		Abweichung [%]
		Versuch [mm]	FE [mm]	
MS 1 Durchbiegung in Tafelmitte	2,1	-2,49	-2,33	-7
MS 7 Durchbiegung am Tafelrand	2,1	-1,77	-1,86	5
Messstellenbezeichnung	Belastung [kN/m ²]	Versuchsreihe 6		Abweichung [%]
		Versuch [N/mm ²]	FE [N/mm ²]	
MS 2 o Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring	2,1	10,65	12,80	17
MS 2 u Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring	2,1	-11,13	-12,03	7
MS 3 o Radiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring	2,1	6,43	10,54	39
MS 3 u Radiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring	2,1	-7,59	-11,59	35
MS 4 o Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Lochrand	2,1	16,09	18,02	11
MS 4 u Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Lochrand	2,1	-17,16	-16,36	-5
MS 5 o Spannung in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längsrichtung	2,1	-7,45	-6,41	-16
MS 5 u Spannung in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Längsrichtung	2,1	7,47	6,19	-21
MS 6 o Spannung in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Querrichtung	2,1	-4,13	-5,10	19
MS 6 u Spannung in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Querrichtung	2,1	3,06	4,93	38

Tabelle 5.7: Vergleich Versuchsreihe 6 (starrer Punkthalter mit 35 mm Lochbohrung, verfüllt) mit den Ergebnissen der FE-Berechnung

Messstellenbezeichnung	Belastung [kN/m ²]	Versuchsreihe 7		Abweichung [%]
		Versuch [mm]	FE [mm]	
MS 1 Durchbiegung in Tafelmitte	2,1	-3,01	-2,38	-26
MS 7 Durchbiegung am Tafelrand	2,1	-2,13	-1,91	-12
Messstellenbezeichnung	Belastung [kN/m ²]	Versuchsreihe 7		Abweichung [%]
		Versuch [N/mm ²]	FE [N/mm ²]	
MS 2 o Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring	2,1	8,33	12,58	34
MS 2 u Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring	2,1	-8,83	-11,62	24
MS 3 o Radiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring	2,1	3,00	7,91	62
MS 3 u Radiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring	2,1	-4,21	-11,67	64
MS 4 o Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Lochrand	2,1	14,21	17,70	20
MS 4 u Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Lochrand	2,1	-14,93	-15,57	4
MS 5 o Spannung in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längsrichtung	2,1	-8,89	-6,32	-41
MS 5 u Spannung in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Längsrichtung	2,1	8,98	6,02	-49
MS 6 o Spannung in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Querrichtung	2,1	-4,50	-5,19	13
MS 6 u Spannung in Tafelmitte an der Tafelunterseite in Querrichtung	2,1	3,33	4,98	33

Tabelle 5.8: Vergleich Versuchsreihe 7 (gelenkiger Punkthalter mit 35 mm Lochbohrung, verfüllt) mit den Ergebnissen der FE-Berechnung

Wie aus obigen Tabellen und den Anhängen A1 bis A6 ersichtlich, liegen die Werte bei den Versuchsreihen 1, 2+3, 4 und 5 bis auf wenige Ausreißer in einem sehr engem Streubereich.

Lediglich die Versuchsreihen 6 und 7, bei denen die Glastafeln mit ausgefüllten Bohrlöchern untersucht wurden, zeigen größere Abweichungen.

In allen Versuchsreihen treten die größten Abweichungen zwischen FE-Berechnung und Versuchsergebnissen bei den Messstellen auf, die zur Ermittlung der radialen Spannungen am Auflagerring verwendet werden. Dies liegt darin begründet, dass der Verlauf der radialen Dehnungen stark nichtlinear ist und deshalb über die Länge des Radial-DMS (siehe Bild 5.15) einen Gradienten aufweist. Im Gegensatz dazu, ist der Verlauf der tangentialen Dehnungen in Umfangsrichtung annähernd konstant. Der über die Gitterlänge gemittelte Dehnungswert des

Tangential-DMS (siehe Bild 5.15) weist somit eine höhere Genauigkeit auf als der über die Gitterlänge gemittelte Dehnungswert des Radial-DMS.

Für die einzelnen Versuchsreihen werden im folgenden weitere Erklärungen zu Abweichungen zwischen den Versuchsergebnissen und den Ergebnissen der FE-Berechnung gegeben:

1. Versuchsreihe 1:

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe hängen extrem von dem in der Realität nicht vermeidbaren Spalt zwischen der PVC-Hülse, die über den Punkthalterbolzen geschoben wird, und dem Lochrand ab. Je nachdem wie groß dieser Spalt ist, können sich die Lastabtragungsmechanismen im Lochbereich (siehe Abschnitt 6) ändern. Während bei der FE-Modellierung kein Spalt berücksichtigt wurde, ist dieser im Versuch vorhanden. Zudem entsteht durch das Herstellverfahren der Lochbohrungen (Diamantbohrverfahren), bei dem von beiden Seiten der Glastafel gebohrt wird, ein Versatz im Bohrloch, dessen Einfluss ebenfalls im FE-Modell nicht berücksichtigt wird. Die hohe Abweichung bei der Messstelle MS 3 u wird dadurch begründbar.

2. Versuchsreihen 2 und 3:

Für die Versuchsreihen 2 und 3 kann die Begründung zu Versuchsreihe 1 ebenfalls angeführt werden. Darüber hinaus wurden bei der Auswertung der Versuche die Ergebnisse der Versuchsreihe 2 (voll eingedrehte Punkthalter) und der Versuchsreihe 3 (voll ausgedrehte Punkthalter) zusammen betrachtet. Nach [13] betragen die Abweichungen in den Versuchsergebnissen zwischen den beiden Versuchsreihen im ungünstigsten Fall 15 %. Wird dies berücksichtigt, so stimmen die Ergebnisse der durchgeführten FE-Berechnung, bei der nur der voll eingedrehte Punkthalter abgebildet wurde, sehr gut mit den Versuchsergebnissen überein.

3. Versuchsreihen 4 und 5:

Die oben dargestellten Effekte bei den Versuchsreihen 1, 2 und 3 treten bei unverfüllten Bohrlöchern mit 35 mm Lochbohrung nicht auf. Aus diesem Grund sind die Abweichungen zwischen den Ergebnissen der FE-Berechnungen und den Versuchsergebnissen in der Regel geringer als bei den Versuchsreihen 1, 2 und 3. Abweichungen, die trotzdem über 20 % liegen, sind auf Streuungen in den Messergebnissen zurückzuführen. Dies wird z.B. bei der Betrachtung der Messstelle MS 4 o (Abweichung 20 %) im Vergleich zur Messstelle MS 4 u (Abweichung 11 %) deutlich (siehe Diagramme A4.13 und A4.14 im Anhang A4). Das Streuband der Messstelle MS 4 o weist eine Breite von 3,91 N/mm² auf, während das Streuband der Messstelle MS 4 u nur eine Breite von 1,63 N/mm² besitzt.

Die sehr hohe Abweichung der Messstelle MS 6 u bei den Versuchsreihen 4 und 5 ist auf einen defekten DMS zurückzuführen, da die hohe Abweichung nur bei diesem DMS auftritt und für die Versuchsreihen die gleichen Versuchstafeln (einschließlich DMS) verwendet wurden (siehe Tabelle 5.1).

4. Versuchsreihen 6 und 7:

Die großen Abweichungen bei den Messstellen MS 3 o und MS 3 u bei den Versuchsreihen 6 und 7, die zur Ermittlung der radialen Spannungen am Auflagerring verwendet werden, liegen darin begründet, dass bei den Versuchsdurchführungen fälschlicherweise der erste Hub der Füllmörtelmischung verwendet wurde. Dadurch konnte der zur Anwendung gekommene Füllmörtel der Firma HILTI nicht ausreichend aushärten. Dies bestätigt auch ein Vergleich der Versuchsergebnisse von unverfülltem und verfülltem Bohrloch (Versuchsreihen 4, 5 und 6, 7), die praktisch keine Abweichungen voneinander aufweisen. Bei den FE-Berechnungen wurde von einer Füllmörtelsteifigkeit von 2750 N/mm² ausgegangen, die einer vollen Aushärtung des Füllmörtels entspricht. Während also im FE-Modell der Lastabtragungsmechanismus über den Füllmörtel vorhanden ist, war dies bei den Versuchen nicht der Fall. Die radialen Spannungen werden deshalb im FE-Modell überschätzt.

6 Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren mit dem verifizierten FE-Modell

6.1 Allgemeines

Der Vergleich zwischen Versuch und FE-Berechnung in Abschnitt 5.4.2 zeigt, dass das mit den in Abschnitt 4.4.5 festgelegten Modellierungsvorschriften aufgebaute FE-Modell für weitere Untersuchungen verwendet werden darf.

In den folgenden Abschnitten wird mit dem verifizierten FE-Modell der Einfluss der in Kapitel 3 aufgelisteten Parameter auf die bemessungsrelevanten Größen herausgestellt. Als bemessungsrelevante Größen werden dabei verstanden:

1. die maximale Spannung in der Glastafel
2. die maximale Durchbiegung der Glastafel
3. die resultierenden Auflagerkräfte an der Punktstützung.

6.2 Einfluss der Lochverfüllung

Zur Veranschaulichung des Einflusses einer Lochverfüllung, werden die Ergebnisse von FE-Berechnungen, bei denen die Steifigkeiten des Füllmörtels zu 2750 N/mm^2 , 7000 N/mm^2 und 70000 N/mm^2 eingegeben wurden, vergleichend den Ergebnissen von Berechnungen mit unverfülltem Loch gegenübergestellt. Hierbei dienen die Berechnungen mit den Steifigkeitswerten von 7000 N/mm^2 und 70000 N/mm^2 dazu, das prinzipielle Tragverhalten von punktgestützten Glastafeln besser aufzuzeigen. Die auf dem Markt erhältlichen Füllmassen weisen maximale Steifigkeitswerte von 2750 N/mm^2 (Herstellerangaben) auf. In der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass über den Füllmörtel nur Druckkräfte aufgenommen werden können. Wie in [60] beschrieben, gilt dies nicht für jeden Füllmörtel. Der Vergleich erfolgt an einer 12 mm dicken Tafel mit den Abmessungen 1600 mm x 1200 mm unter einer Flächenlast von $2,1 \text{ kN/m}^2$. In Tabelle 6.1 sind die Ergebnisse der Berechnungen zusammengestellt.

a = 1600 mm b = 1200 mm t = 12 mm	σ_{\max} (Lochrand Tafeloberseite)	u_{\max} (Tafelmitte)	Auflagerkräfte	
			horizontal	vertikal
ar = 250 mm / br = 200 mm	[N/mm ²]	[mm]	[N]	[N]
Kein Füllmörtel	18,64	2,69	1000	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 2750 \text{ N/mm}^2$	19,12	2,37	1733	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 7000 \text{ N/mm}^2$	18,00	2,29	1901	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 70000 \text{ N/mm}^2$	18,30	2,13	2214	1000

Tabelle 6.1: Einfluss der Füllmörtelsteifigkeit Tafel 1600 mm x 1200 mm x 12 mm

Tabelle 6.1 zeigt, dass die Durchbiegungen in Tafelmitte mit der Steifigkeit der Lochverfüllung stetig abnehmen, während die Bemessungsspannungen zunächst leicht abnehmen und dann wieder zunehmen. Die Resultierende der horizontalen Auflagerkräfte nimmt mit der Steifigkeit der Verfüllung des Bohrloches zu.

In Bild 6.1 und in Bild 6.2 sind die radialen und tangentialen Spannungen sowie die Pressungen im Bohrlochbereich für verschiedene Verfüllzustände des Loches grafisch dargestellt.

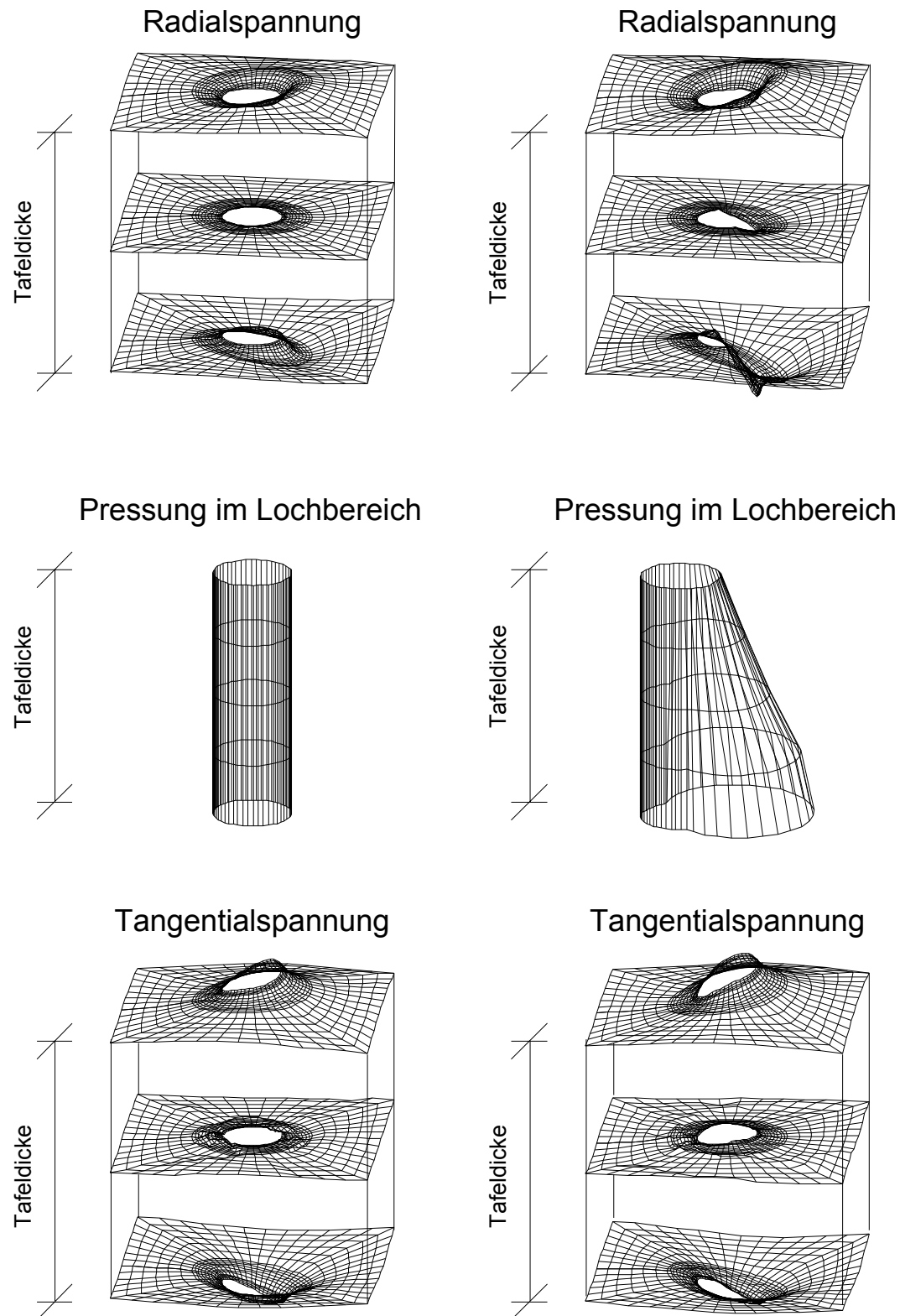


Bild 6.1: Tafel 1600mm x 1200mm x 12mm
 links: unverfülltes Loch
 rechts: Füllmörtel (2750 N/mm²)

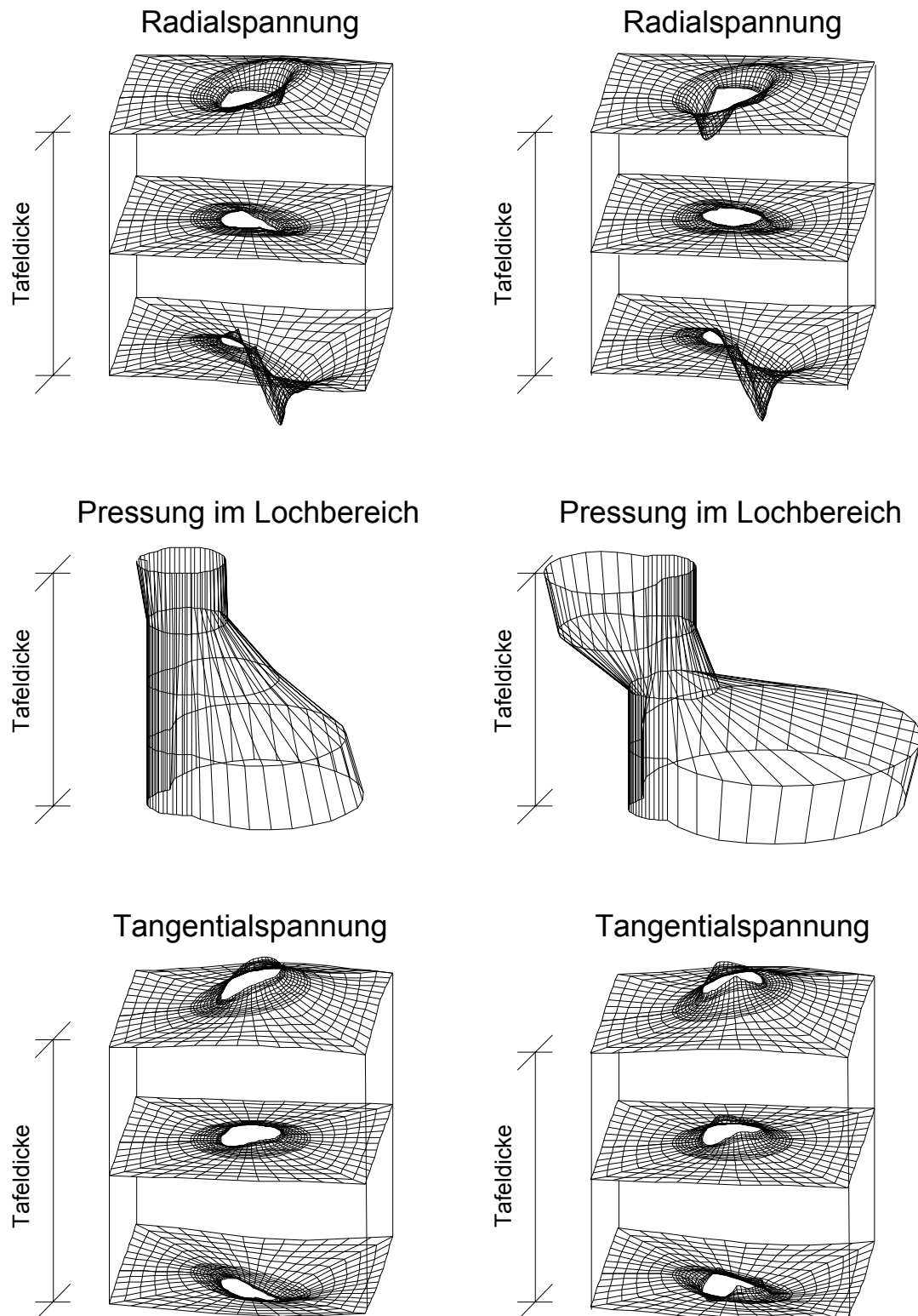
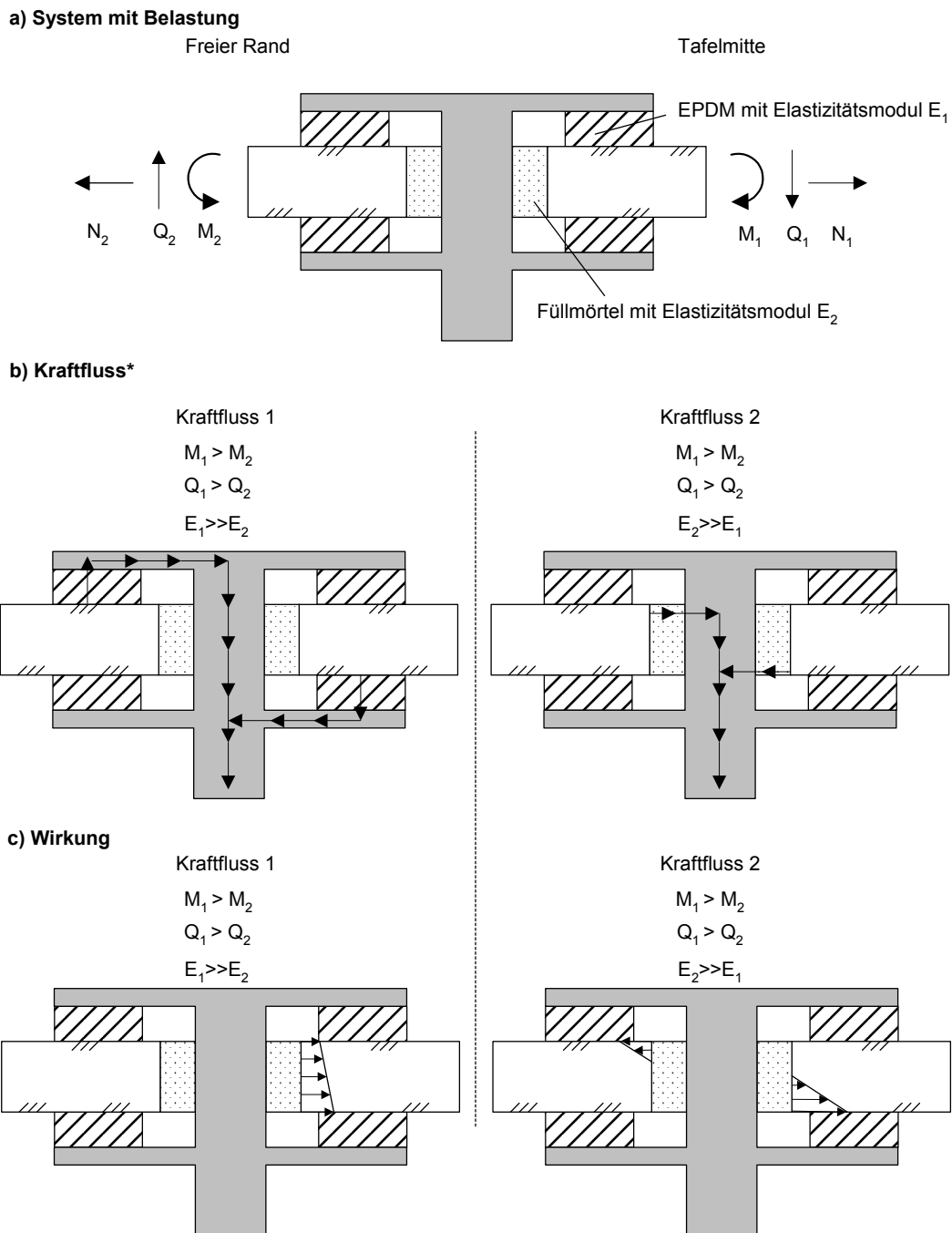


Bild 6.2: Tafel $1600 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$
 links: Füllmörtel (7000 N/mm^2)
 rechts: Füllmörtel (70000 N/mm^2)

Zur Begründung, warum die Spannungen je nach Füllmörtelsteifigkeit zwischen $18,00 \text{ N/mm}^2$ und $19,12 \text{ N/mm}^2$ variieren, müssen die in Abschnitt 2.2 bereits angesprochenen Kontaktmechanismen genauer betrachtet werden. In Bild 6.3 sind die mit der Belastung aus Querkraft und Moment einhergehenden Kraftflüsse und die daraus resultierenden Wirkungen abgebildet. Zur Vollständigkeit ist auch die in der Tafel wirkende Normalkraft abgebildet, die bei einem System mit unausgefülltem Bohrloch über Reibung zwischen den EPDM-Ringen und den Glastafeloberflächen (siehe Bild 2.3) und bei ausgefülltem Bohrloch noch zusätzlich über den Glasdickebolzen durch Kontakt abgetragen wird.



* die mögliche Lastabtragung über Reibung ist nicht abgebildet

Bild 6.3: Abtragung der Belastung aus Moment und Querkraft

Aus Bild 6.3 ist erkennbar, dass je nach Steifigkeit der Zwischenschichten (EPDM-Ringe, Füllmörtel) unterschiedliche Abtragungsmechanismen im Lochbereich aktiviert werden. Bei einer Erhöhung der Füllmörtelsteifigkeit wird das Moment aus der Glastafel vermehrt über den Glasdickebolzen (Kraftfluss 2) und weniger über die Punkthalterdeckel (Kraftfluss 1)

abgetragen. Dieser Zusammenhang ist in Bild 6.4 und Bild 6.5 für die Füllmörtelsteifigkeiten 2750 N/mm^2 und 70000 N/mm^2 dargestellt.

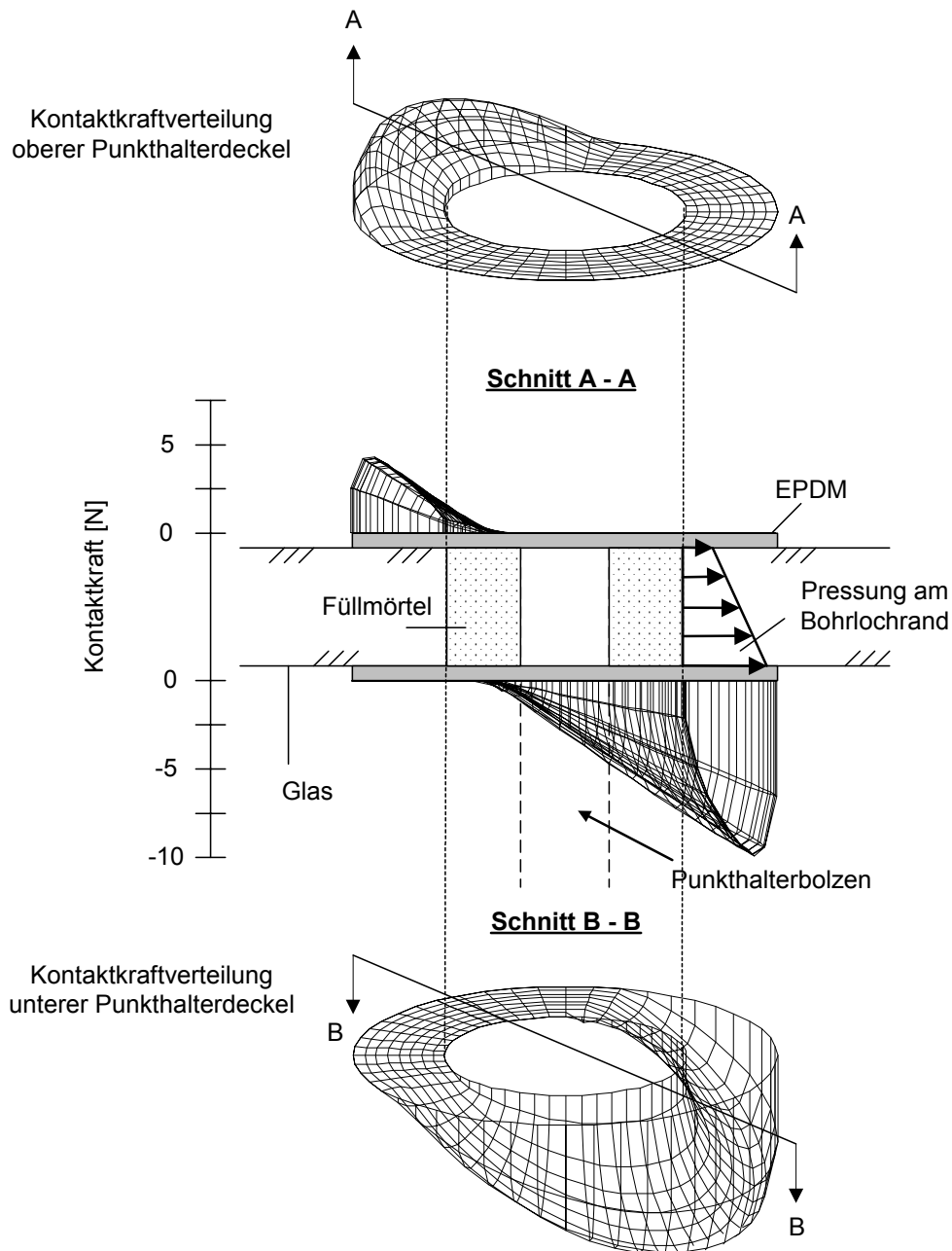


Bild 6.4: Kontaktkraftverteilung in den Punkthalterdeckeln (Füllmörtelsteifigkeit 3000 N/mm^2) und am Bohrlochrand

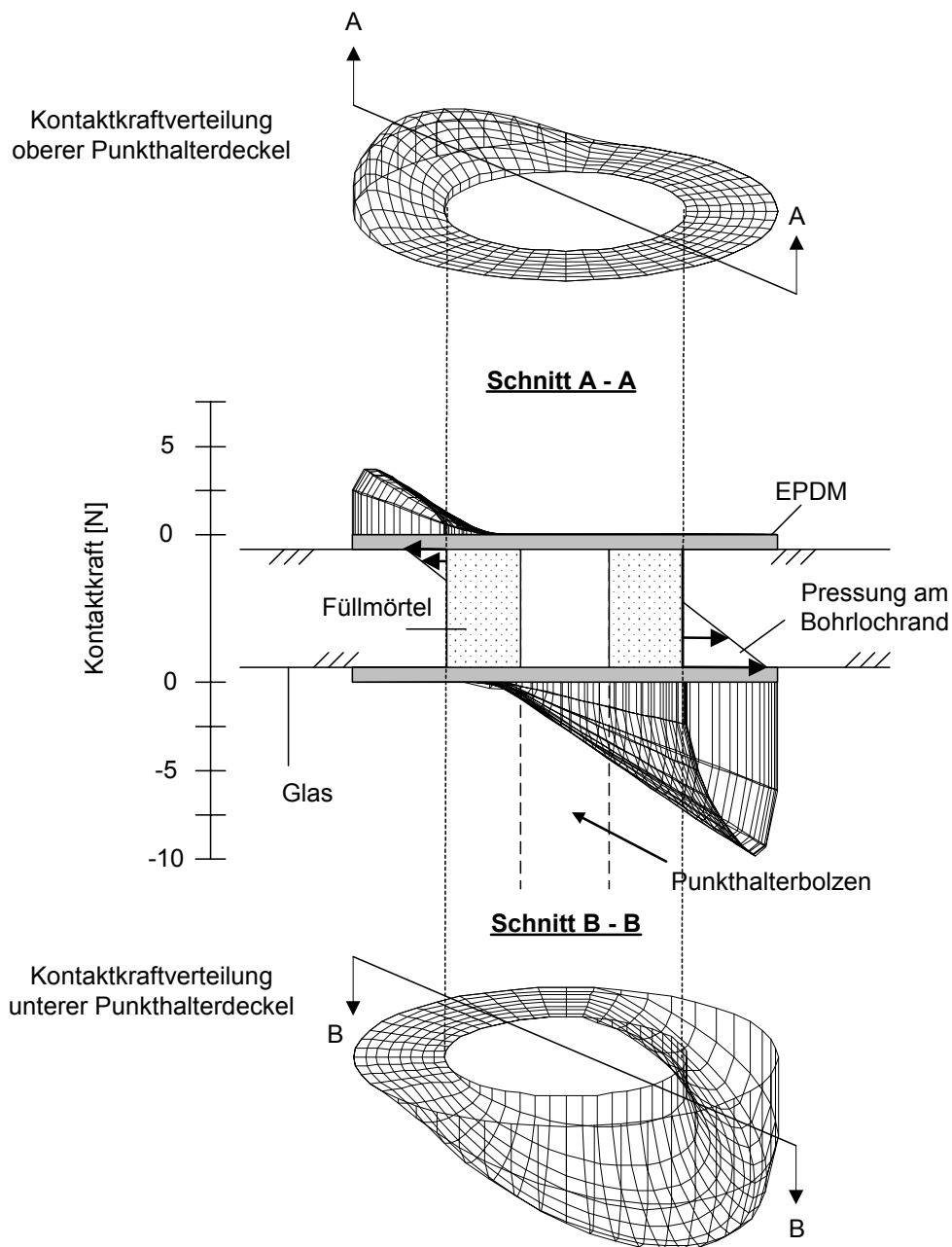


Bild 6.5: Kontaktkraftverteilung in den Punkthalterdeckeln (Füllmörtelsteifigkeit 70000 N/mm^2) und am Bohrlochrand

Mit obigen Ausführungen ist es möglich, die Variation in den Spannungswerten zu erklären. Die Erhöhung der Spannungen von einem unverfülltem Bohrloch zu einem verfülltem Bohrloch der Füllmörtelsteifigkeit 2750 N/mm^2 ist dadurch bedingt, dass bei verfülltem Bohrloch aufgrund der Veränderung des statischen Systems ein größeres Moment aus der Tafel über den Punkthalter abgetragen wird. Die maximale Tangentialspannung tritt in beiden Fällen am Bohrlochrand auf der lastzugewandten Glastafelseite unter einem Winkel von 45° zur längeren Tafelseite auf (siehe Bild 6.6).

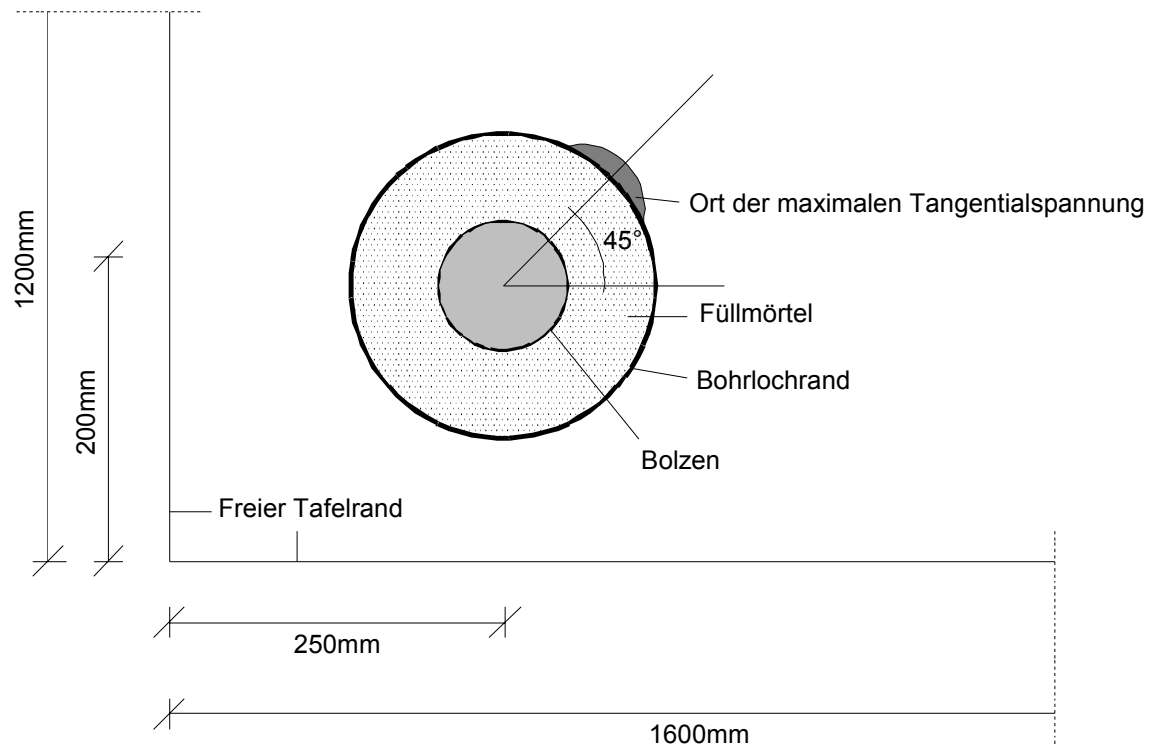


Bild 6.6: Ort der maximalen Tangentialspannung für unverfülltes Bohrloch und verfülltes Bohrloch (Füllmörtelsteifigkeit 3000 N/mm^2)

Die Verringerung der Spannungen bei einer Steigerung der Füllmörtelsteifigkeit auf 7000 N/mm^2 ist auf einen Wechsel im Abtragungsmechanismus (von Kraftfluss 1 zu Kraftfluss 2) zurückzuführen. Es kommt auf der lastzugewandten Glastafelseite an dem dem bisherigen Ort der maximalen Tangentialspannung gegenüberliegenden Bohrlochrand zu einer erhöhten Pressung. Die Auswirkung dieser Pressung ist in Bild 6.7 stark vereinfacht dargestellt. Wie aus dem Bild ersichtlich ist, bewirkt die Pressung am Ort der bisherigen maximalen Tangentialspannung eine Spannungsentlastung.

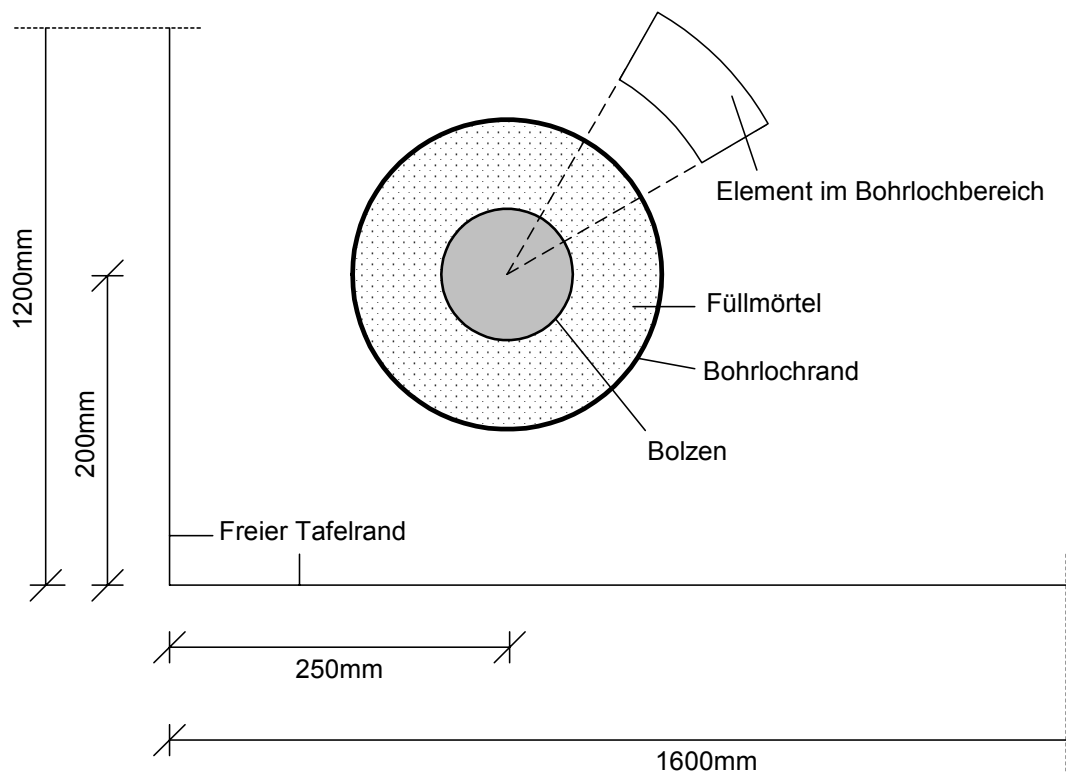
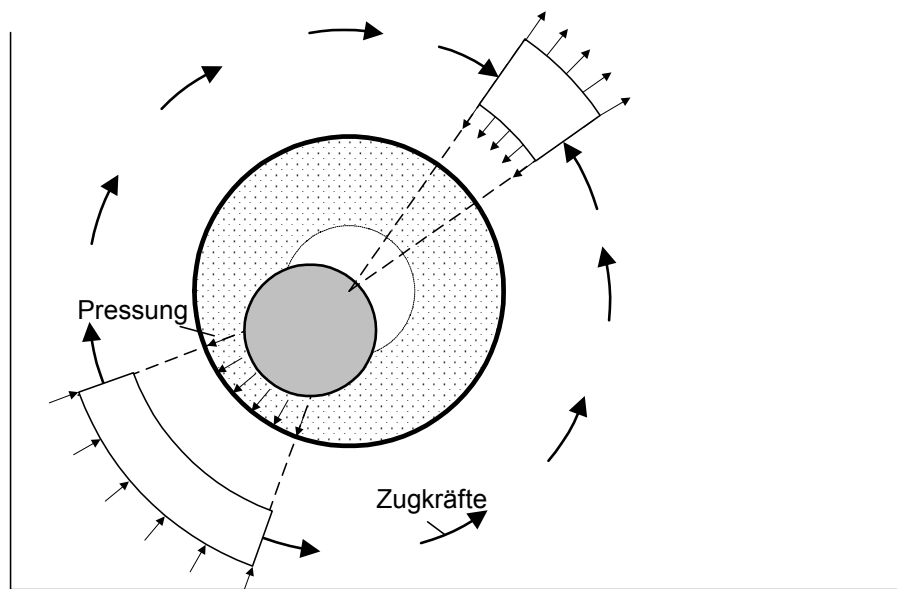
a) unbelastete Glastafel**b) belastete Glastafel**

Bild 6.7: Einfluss der Lochpressung auf die Tangentialspannung

Zum besseren Verständnis ist der Zusammenhang zwischen Pressung, radialen und tangentialen Spannungen im Bohrlochbereich in Bild 6.8 und Bild 6.9 bei reiner Normalkraftbeanspruchung (reine Verschiebung des Punkthalters in Glastafelebene im Bohrlochbereich) dargestellt.

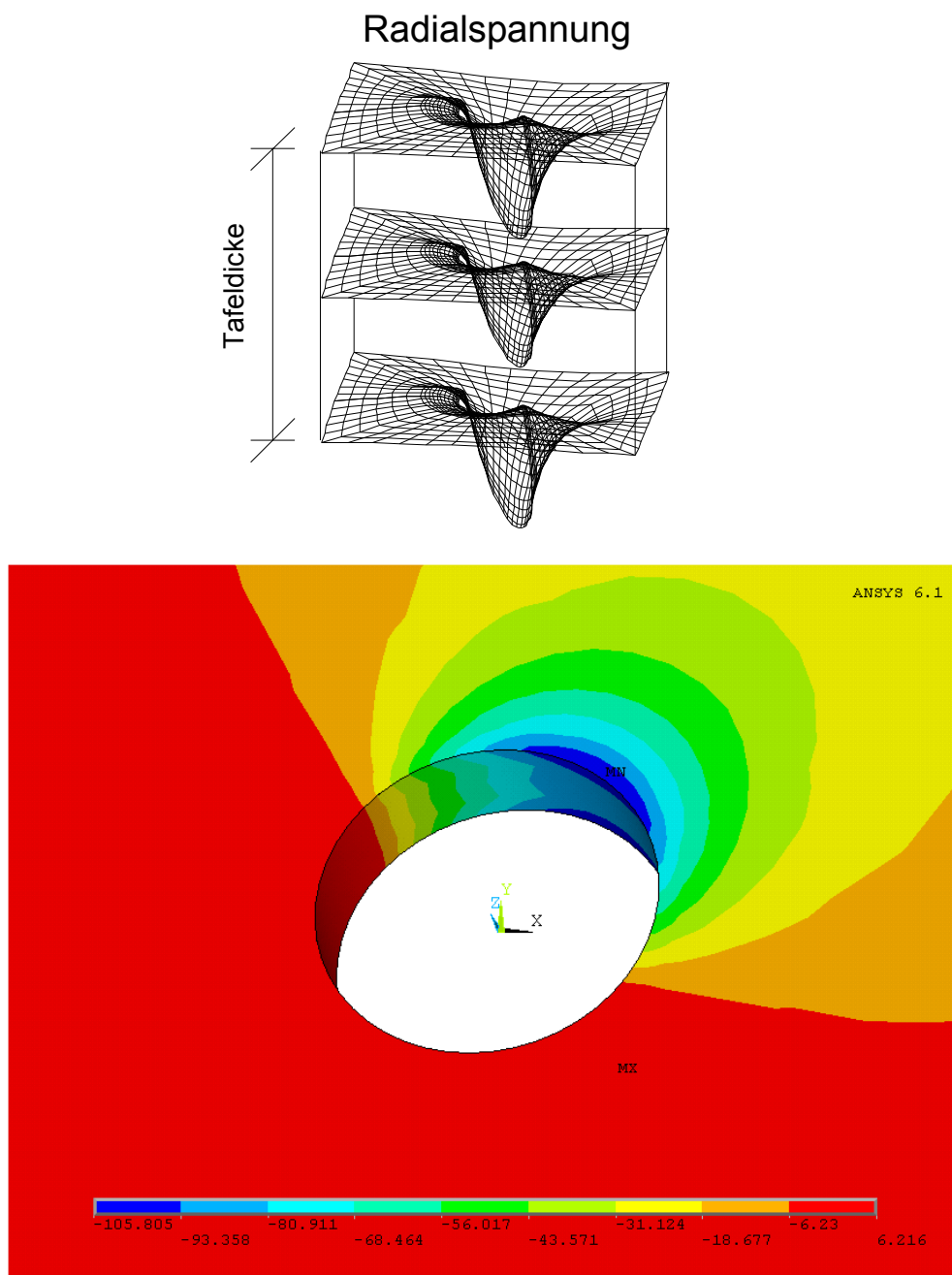


Bild 6.8: Radialspannung bei reiner Bolzenverschiebung

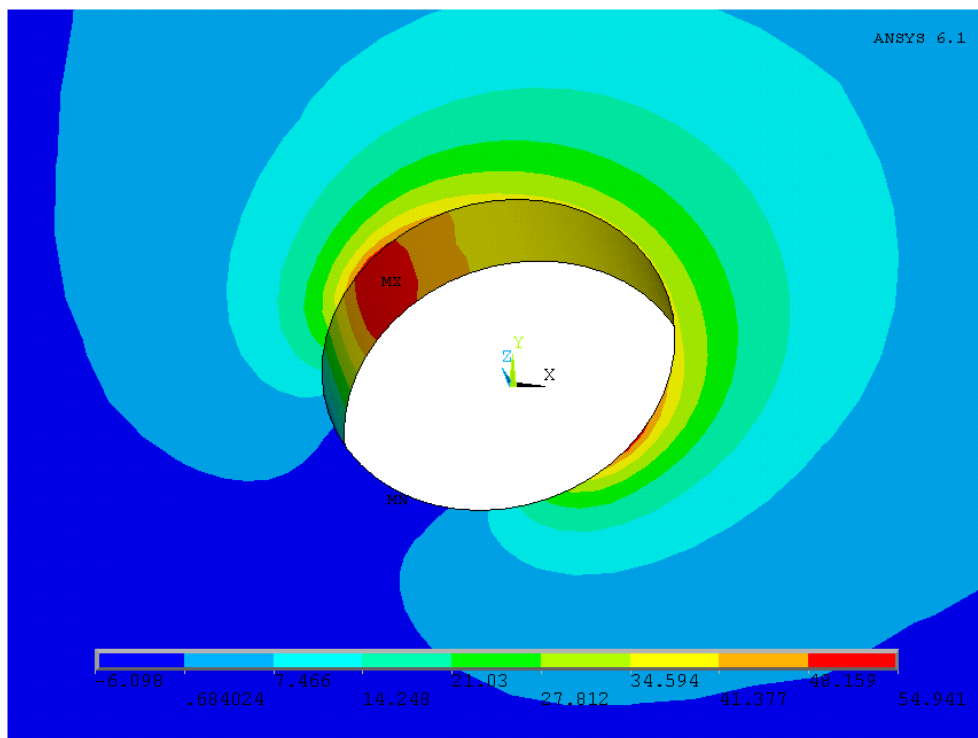
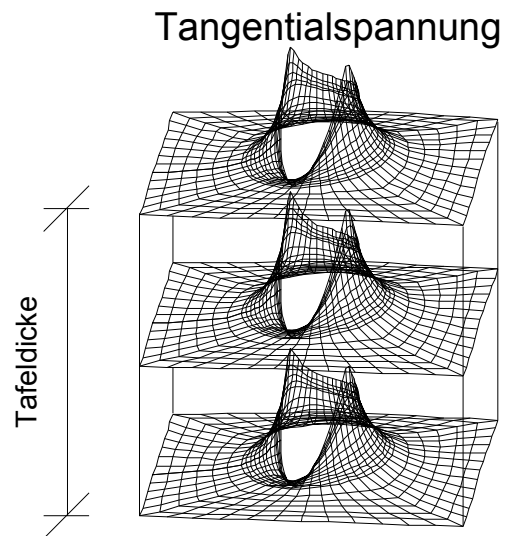


Bild 6.9: Tangentialspannung bei reiner Bolzenverschiebung

Der Anstieg der Tangentialspannungen bei einer Füllmörtelsteifigkeit von 70000 N/mm^2 ist auf die in Bild 6.8 und Bild 6.9 dargestellten Umlagerungseffekte zurückzuführen. Der Einfluss der Pressung nimmt durch die erhöhte Füllmörtelsteifigkeit zu und der Ort der maxima-

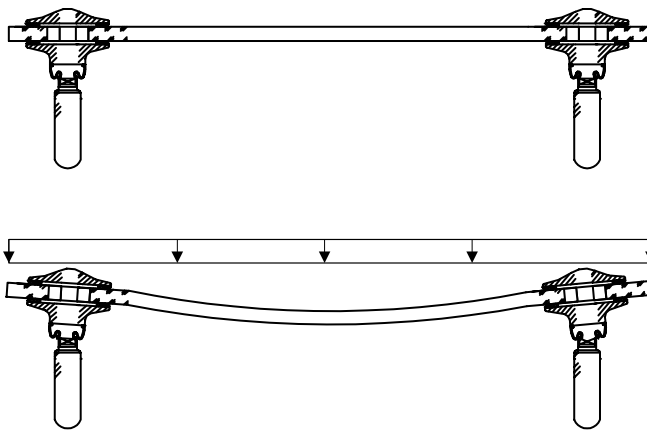
len Tangentialspannung ändert sich. Dies ist deutlich bei den Tangentialspannungen in Bild 6.2 (rechts) zu sehen.

6.3 Einfluss der Randabstände

Durch Variation der Tafelabmessungen sowie der Randabstände der Glastafellöcher kann sich der Abtragungsmechanismus innerhalb des Bohrungsbereiches ebenfalls verändern. Dieser Sachverhalt ist in Bild 6.10 und Bild 6.11 für einen gelenkigen Punkthalter dargestellt.

Gelenkiger Punkthalter

1) Kleiner Randabstand der Glastafelbohrungen



2) Grosser Randabstand der Glastafelbohrungen

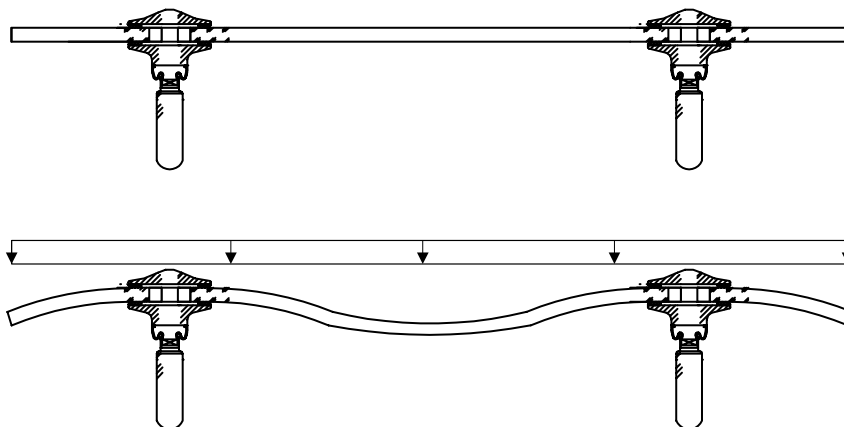


Bild 6.10: Biegelinien gelenkig aufgelagerter Glastafeln bei Variation des Randabstandes

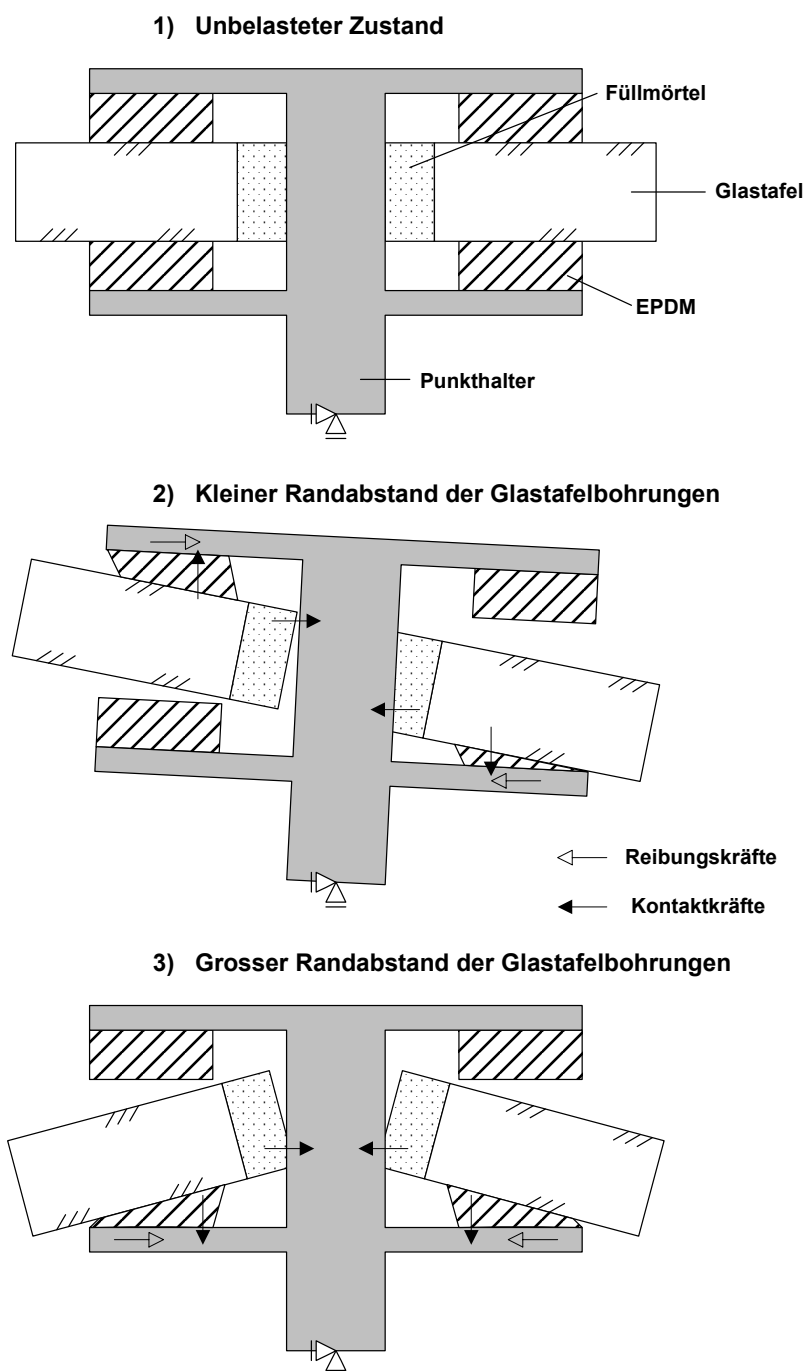
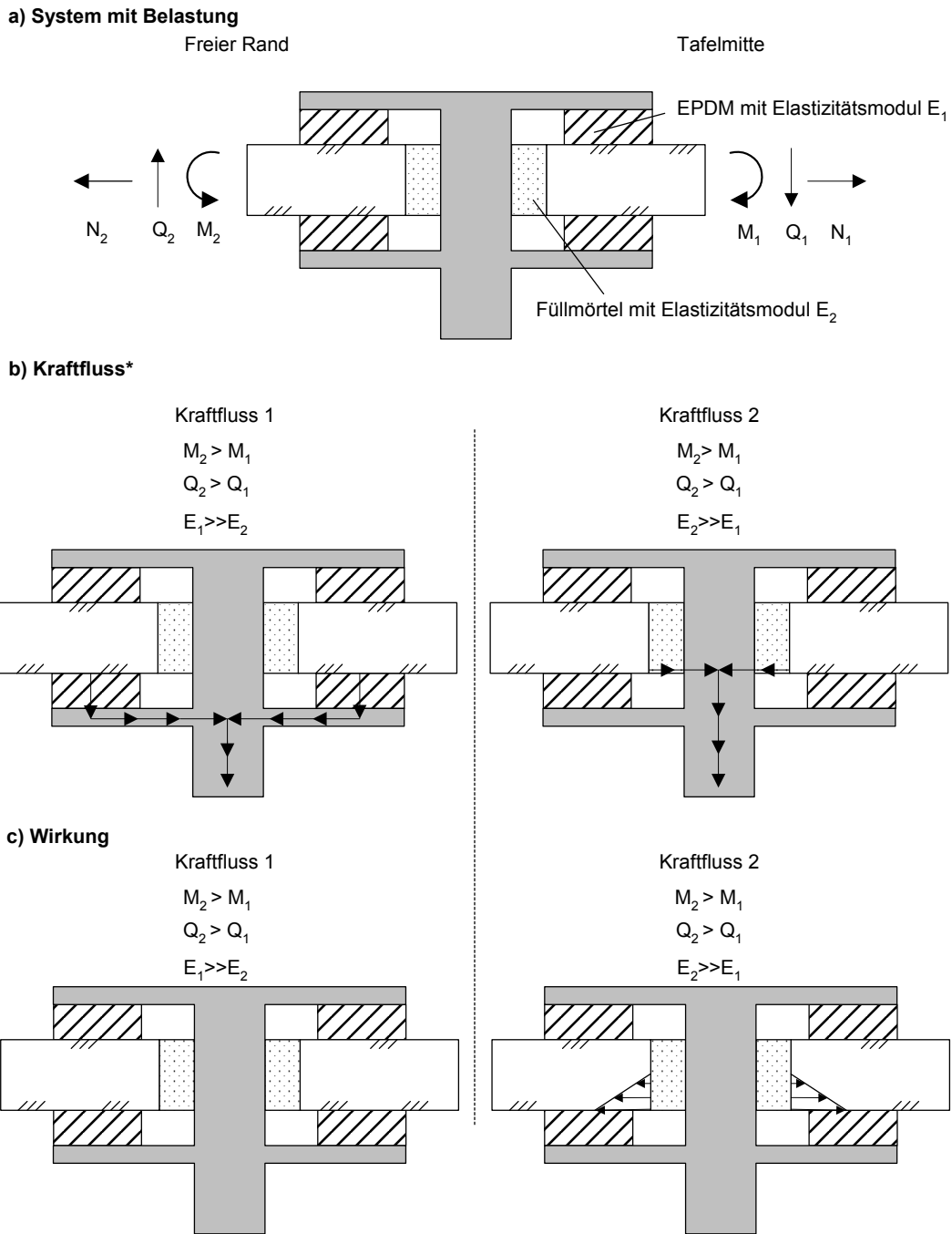


Bild 6.11: Lastabtragungsmechanismen im Lochbereich bei verschiedenen Randabständen der Glastafelbohrungen

Die in Bild 6.3 dargestellten Abtragungsmechanismen gelten, wie aus Bild 6.11 ersichtlich ist, nur bei kleinem Randabstand der Glastafelbohrungen. Sobald sich der Randabstand vergrößert, findet die Lastabtragung wie in Bild 6.12 dargestellt statt.



* die mögliche Lastabtragung über Reibung ist nicht abgebildet

Bild 6.12: Abtragung der Belastung aus Moment und Querkraft bei Glastafeln mit großem Randabstand der Glastafelbohrungen

Zur Überprüfung des Einflusses des Randabstandes der Glasbohrungen, wurden aus dem in Kapitel 3 zusammengestellten Parameterspektrum verschiedene Varianten ausgewählt und berechnet. Hierbei wurde darauf geachtet, die in Bild 6.10 und Bild 6.11 dargestellten Zustände zu erfassen. In Tabelle 6.2 und Tabelle 6.3 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Als Be-

lastung wurde bei den Berechnungen eine Flächenlast angenommen, die in einer vertikalen Auflagerkraft von 1000 N je Punkthalter resultiert.

a = 1200 mm b = 1200 mm t = 12 mm	σ_{\max} (Lochrand Tafeloberseite)	u_{\max} (Tafelmitte)	Auflagerkräfte	
			horizontal	vertikal
ar = 300 mm / br = 300 mm	[N/mm ²]	[mm]	[N]	[N]
Kein Füllmörtel	18,17	1,02	232	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 1250 \text{ N/mm}^2$	18,08	0,89	347	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 2750 \text{ N/mm}^2$	17,84	0,95	408	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 70000 \text{ N/mm}^2$	16,22	0,89	542	1000

Tabelle 6.2: Einfluss der Füllmörtelsteifigkeit Tafel 1200 mm x 1200 mm x 12 mm

a = 1200 mm b = 1200 mm t = 12 mm	σ_{\max} (Lochrand Tafeloberseite)	u_{\max} (Tafelmitte)	Auflagerkräfte	
			horizontal	vertikal
ar = 100 mm / br = 100 mm	[N/mm ²]	[mm]	[N]	[N]
Kein Füllmörtel	22,08	4,67	1000	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 1250 \text{ N/mm}^2$	24,20	4,24	2830	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 2750 \text{ N/mm}^2$	22,44	4,06	3153	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 7000 \text{ N/mm}^2$	21,15	3,61	3949	1000

Tabelle 6.3: Einfluss der Füllmörtelsteifigkeit Tafel 1200 mm x 1200 mm x 12 mm

Die Ergebnisse in Tabelle 6.2 und Tabelle 6.3 bestätigen, dass die maßgebenden Spannungen im Lochbereich von den Lochrandabständen beeinflusst werden. Dies wird auch aus den Bildern Bild 6.13 bis Bild 6.16 deutlich. Aus Bild 6.13 und Bild 6.14 ist erkennbar, dass die Spannungen bei der Glastafel mit 300 mm Randanstand im Lochbereich annähernd rotations-symmetrisch sind. Es stellt sich der Lastabtragungsmechanismus 3 aus Bild 6.11 ein, wodurch die Auflagerkräfte sehr gering bleiben. Es ist eine konstante Abnahme der Spannungen bei einer Erhöhung der Füllsteifigkeit zu beobachten, da sich die Durchbiegung und damit die Biegespannungen bei erhöhter Füllsteifigkeit verringern. Über den oberen Punkthalterdeckel werden keine Kräfte übertragen (siehe Bild 6.17).

Bei Verringerung des Randabstandes von 300 mm auf 100 mm verändert sich Lastabtragungsverhalten der Tafel und die Einflüsse der Lochverfüllung machen sich verstärkt bemerkbar. Es treten die in Kapitel 6.2 dargelegten Effekte auf. Durch die Verdrehung der Glas-tafel und des Punkthalters werden über die EPDM-Schicht des oberen Punkthalters Kräfte übertragen. Für die Tafel mit geringem Randabstand stellt sich der Lastabtragungsmechanismus 2 aus Bild 6.11 ein.

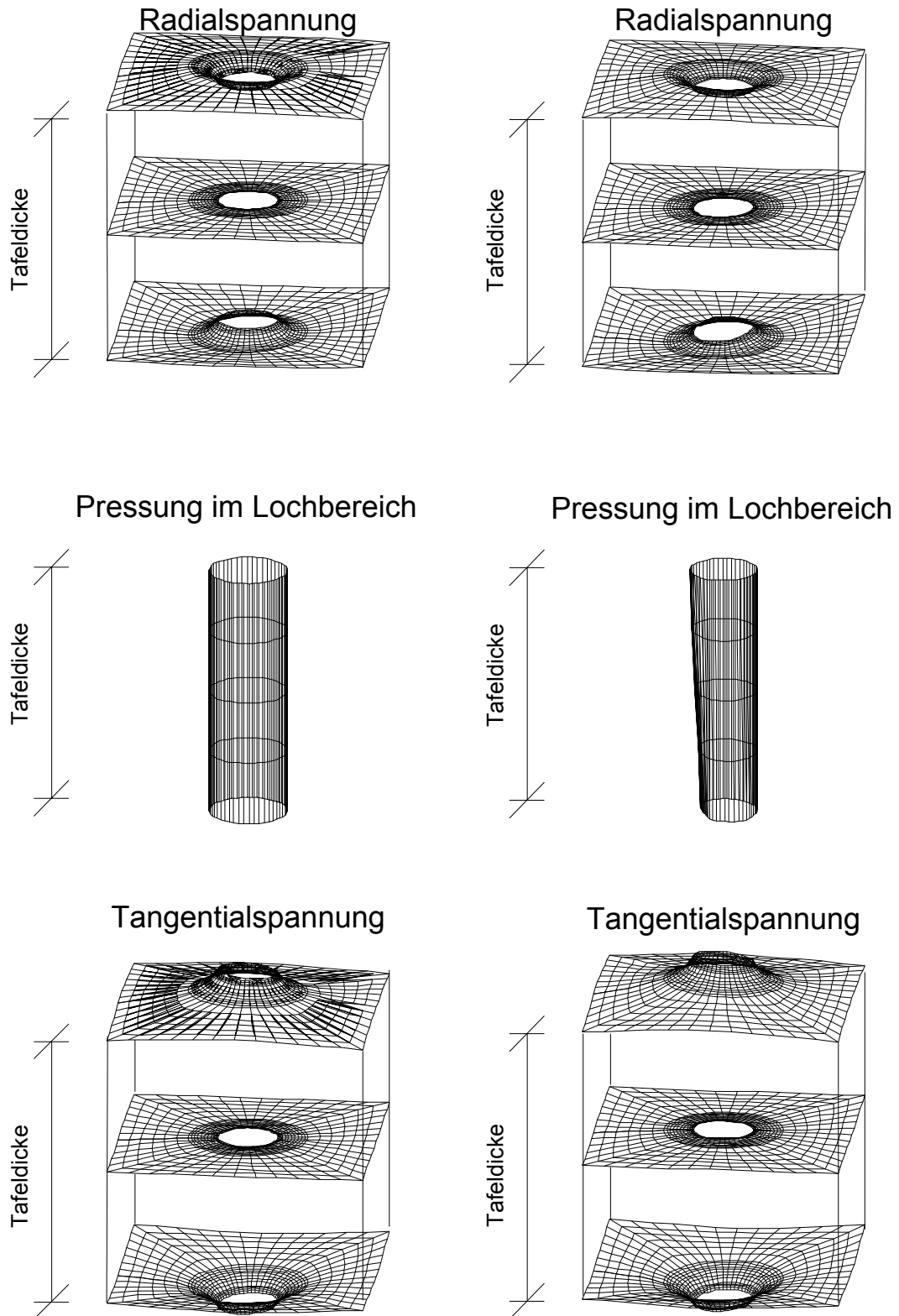


Bild 6.13: Tafel 1200 mm x 1200 mm x 300 mm x 300 mm x 12 mm
 links: unverfülltes Bohrloch
 rechts: Füllmörtelsteifigkeit 1250 N/mm²

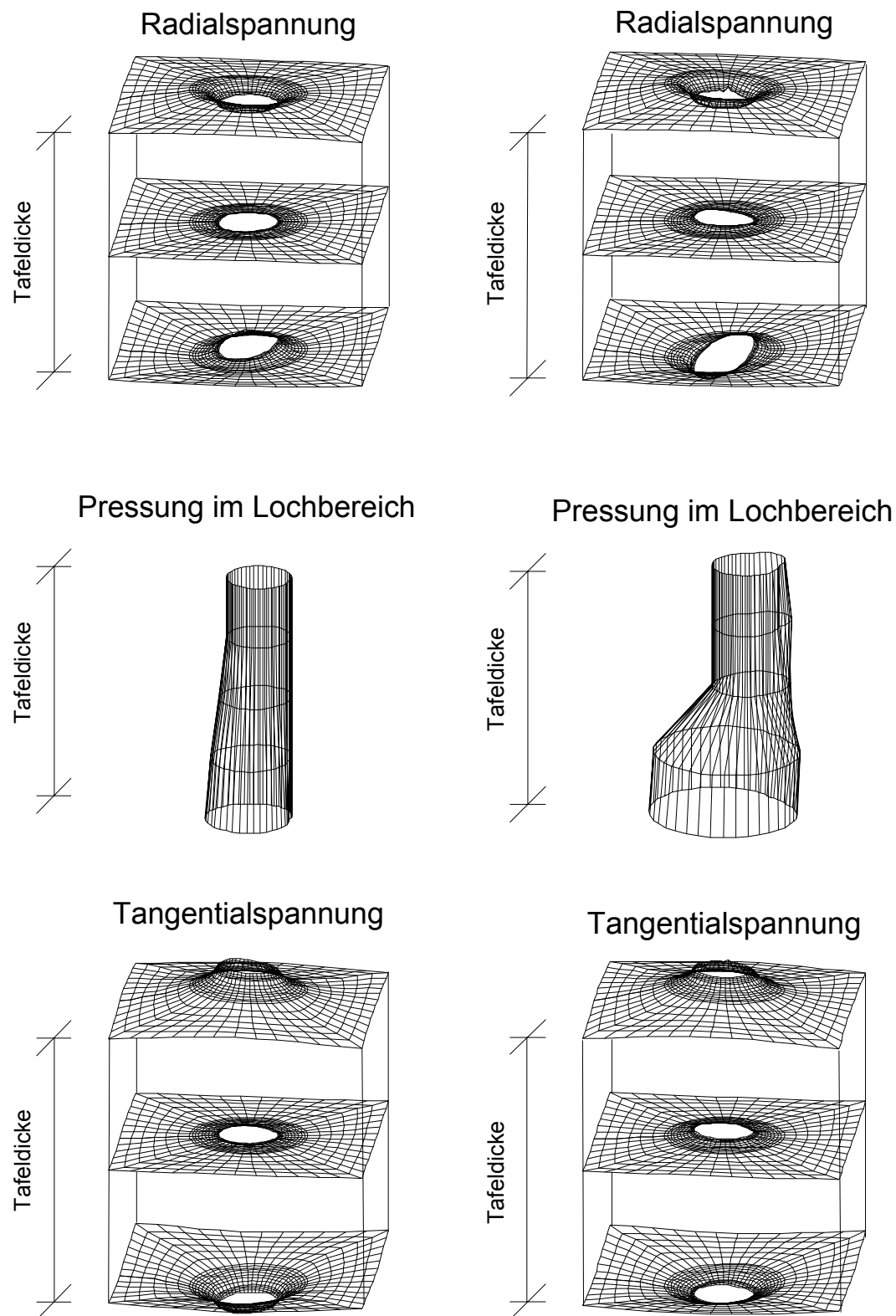


Bild 6.14: Tafel 1200 mm x 1200 mm x 300 mm x 300 mm x 12 mm
 links: Füllmörtelsteifigkeit 2750 N/mm²
 rechts: Füllmörtelsteifigkeit 70000 N/mm²

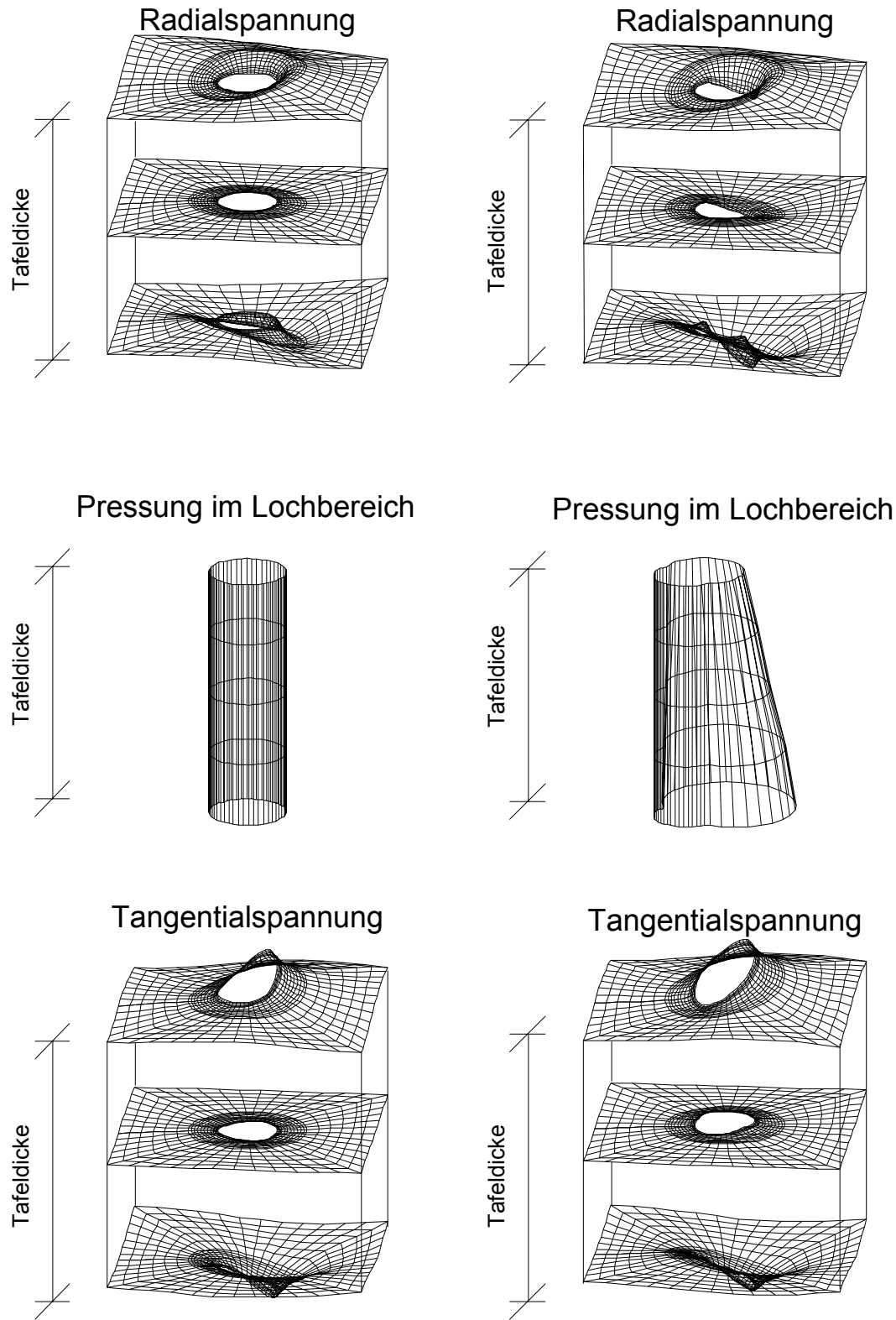


Bild 6.15: *Tafel 1200 mm x 1200 mm x 100 mm x 100 mm x 12 mm*
 links: *unverfülltes Bohrloch*
 rechts: *Füllmörtelsteifigkeit 1250 N/mm²*

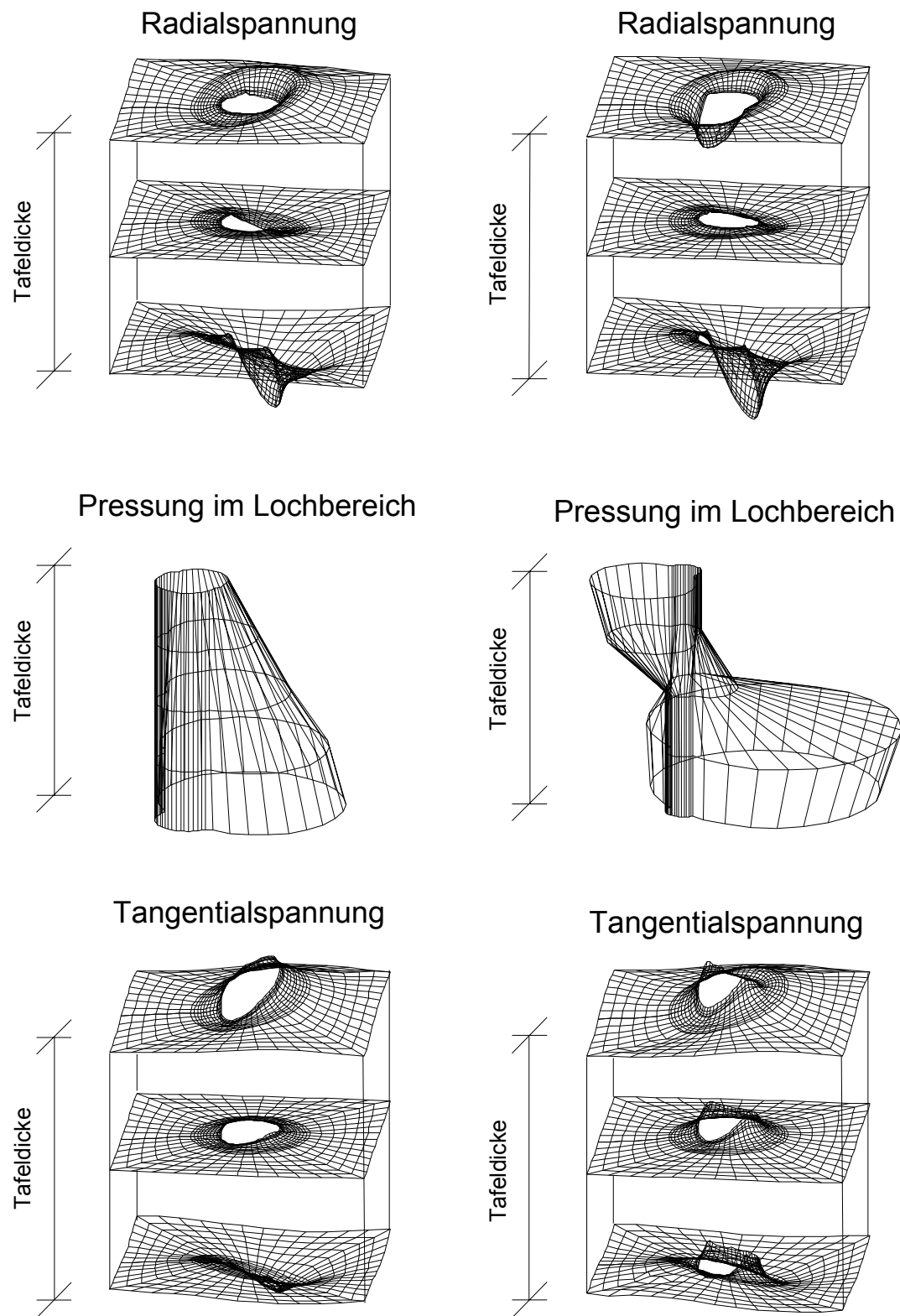


Bild 6.16:
links:
rechts:

Tafel 1200 mm x 1200 mm x 100 mm x 100 mm x 12 mm
 Füllmörtelsteifigkeit 2750 N/mm²
 Füllmörtelsteifigkeit 70000 N/mm²

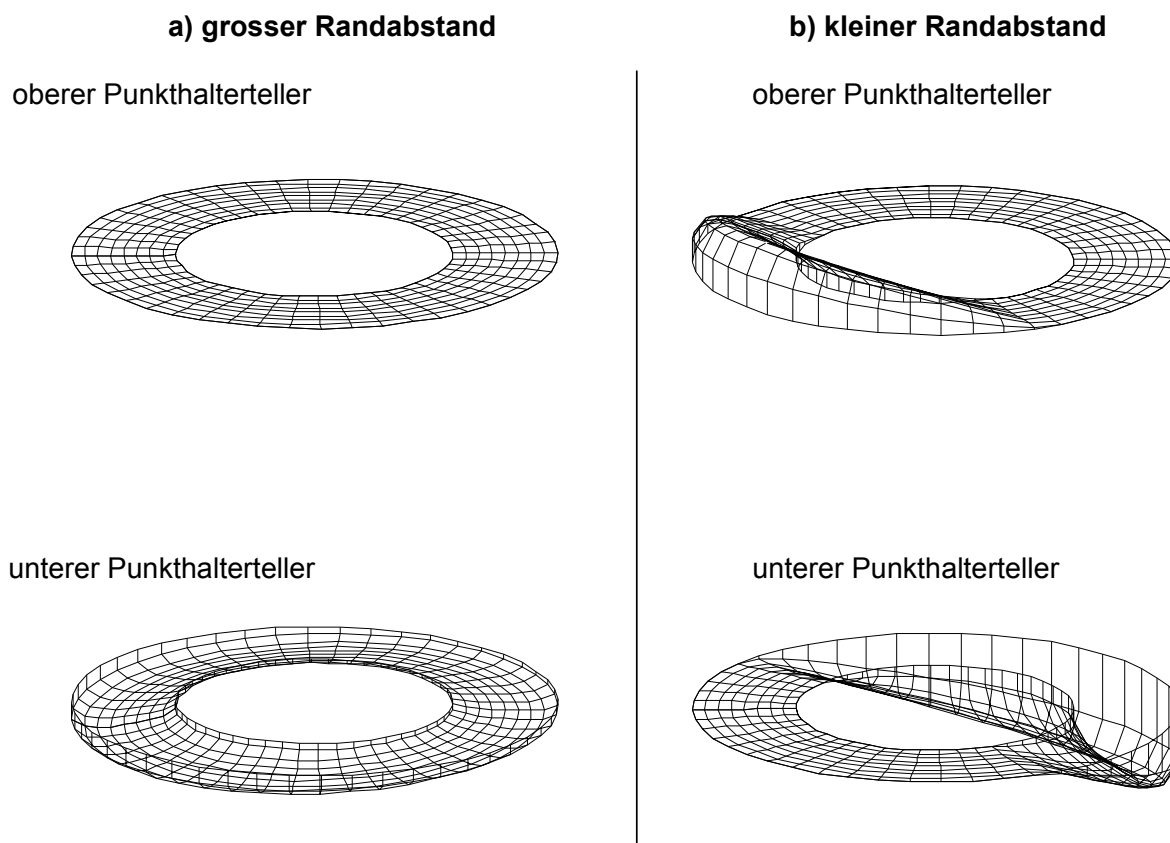


Bild 6.17: Kontaktkraftverteilungen in den Punkthalterdeckeln

6.4 Einfluss der EPDM-Steifigkeit

Die Ausführungen des vorangegangenen Abschnittes haben gezeigt, dass der Abtragungsmechanismus im Lochbereich von den Steifigkeiten der Zwischenmaterialien abhängt (siehe Bild 6.3 und Bild 6.12). Es konnte beobachtet werden, dass durch eine Verfüllung des Bohrloches je nach Füllmörtelsteifigkeit spannungsabmindernde Effekte auftreten können.

Im folgenden wird der Einfluss der EPDM-Steifigkeit auf die bemessungsrelevanten Größen an einer 12 mm dicken Glastafel der Abmessungen 3000 mm x 3000 mm untersucht. Als Belastung wurde bei den Berechnungen wieder eine Flächenlast angenommen, die in einer vertikalen Auflagerkraft von 1000 N je Punkthalter resultiert. Der Elastizitätsmodul des Füllmörtels betrug 1250 N/mm². In Tabelle 6.4 sind die Ergebnisse der Berechnungen zusammengestellt.

a = 3000 mm b = 3000 mm t = 12 mm	σ_{\max} (Lochrand Tafeloberseite)	u_{\max} (Tafelmitte)	Auflagerkräfte	
			horizontal	vertikal
ar = 100 mm / br = 100 mm	[N/mm ²]	[mm]	[N]	[N]
$E_{\text{EPDM}} = 25 \text{ N/mm}^2$	53,78	43,57	9648	1000
$E_{\text{EPDM}} = 1000 \text{ N/mm}^2$	59,13	33,21	15008	1000
$E_{\text{EPDM}} = 70000 \text{ N/mm}^2$	69,94	30,79	16312	1000

Tabelle 6.4: Einfluss der EPDM-Steifigkeit Tafel 3000 mm x 3000 mm x 12 mm

Durch die Erhöhung der EPDM-Steifigkeit wird das Moment aus der Glastafel verstärkt über die Punkthalterdeckel, d.h. über den Lastabtragungsmechanismus 2 aus Bild 6.11 abgetragen. Dies ist in Bild 6.18 und Bild 6.19 dargestellt. Dadurch treten spannungsabmindernde Effekte, wie man sie bei einer Erhöhung der Füllmörtelsteifigkeit in Abschnitt 6.2 beobachtet hat, nicht mehr auf.

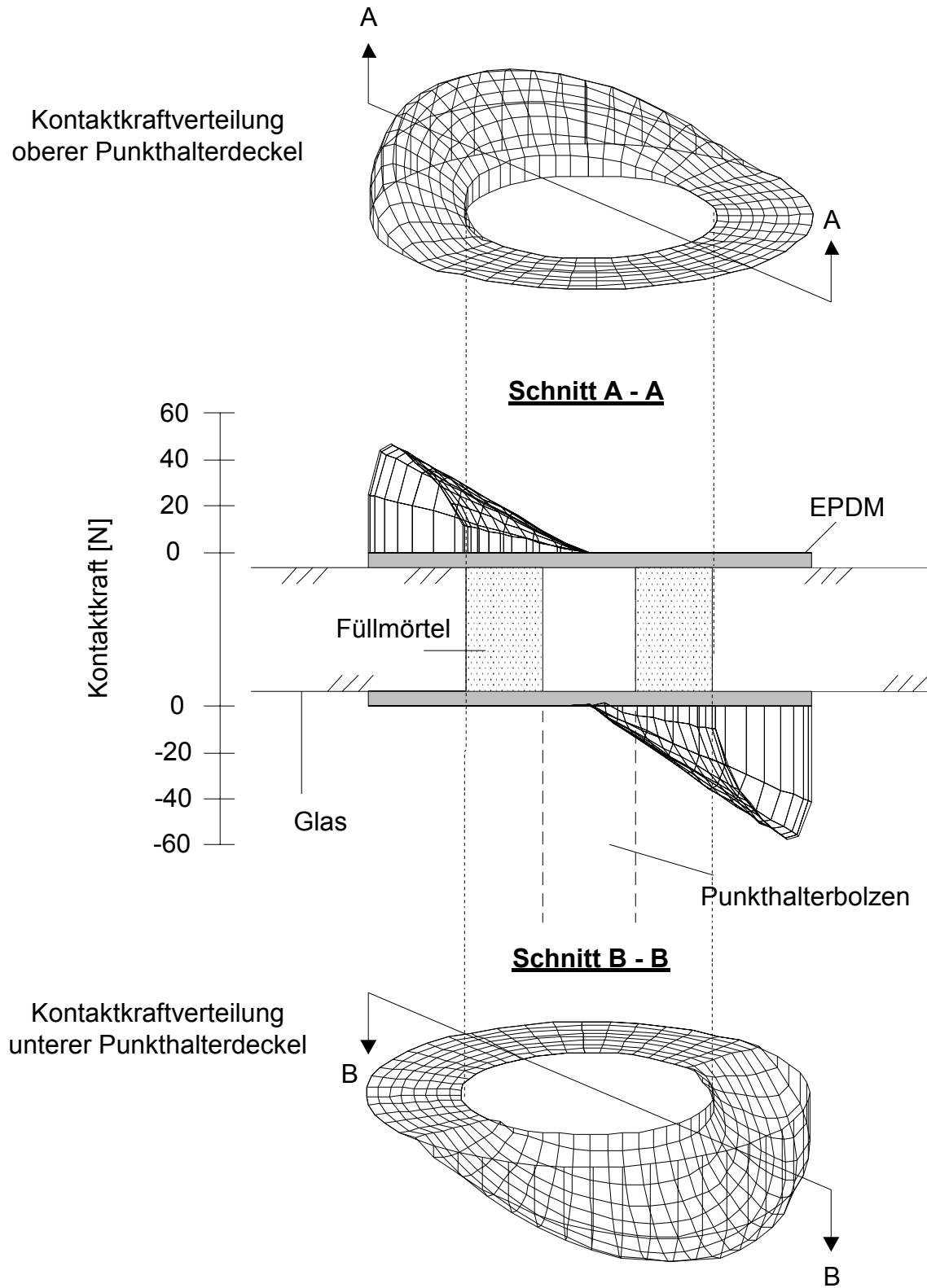


Bild 6.18: Kontaktkraftverteilung in den Punkthalterdeckeln (EPDM-Steifigkeit 25 N/mm²)

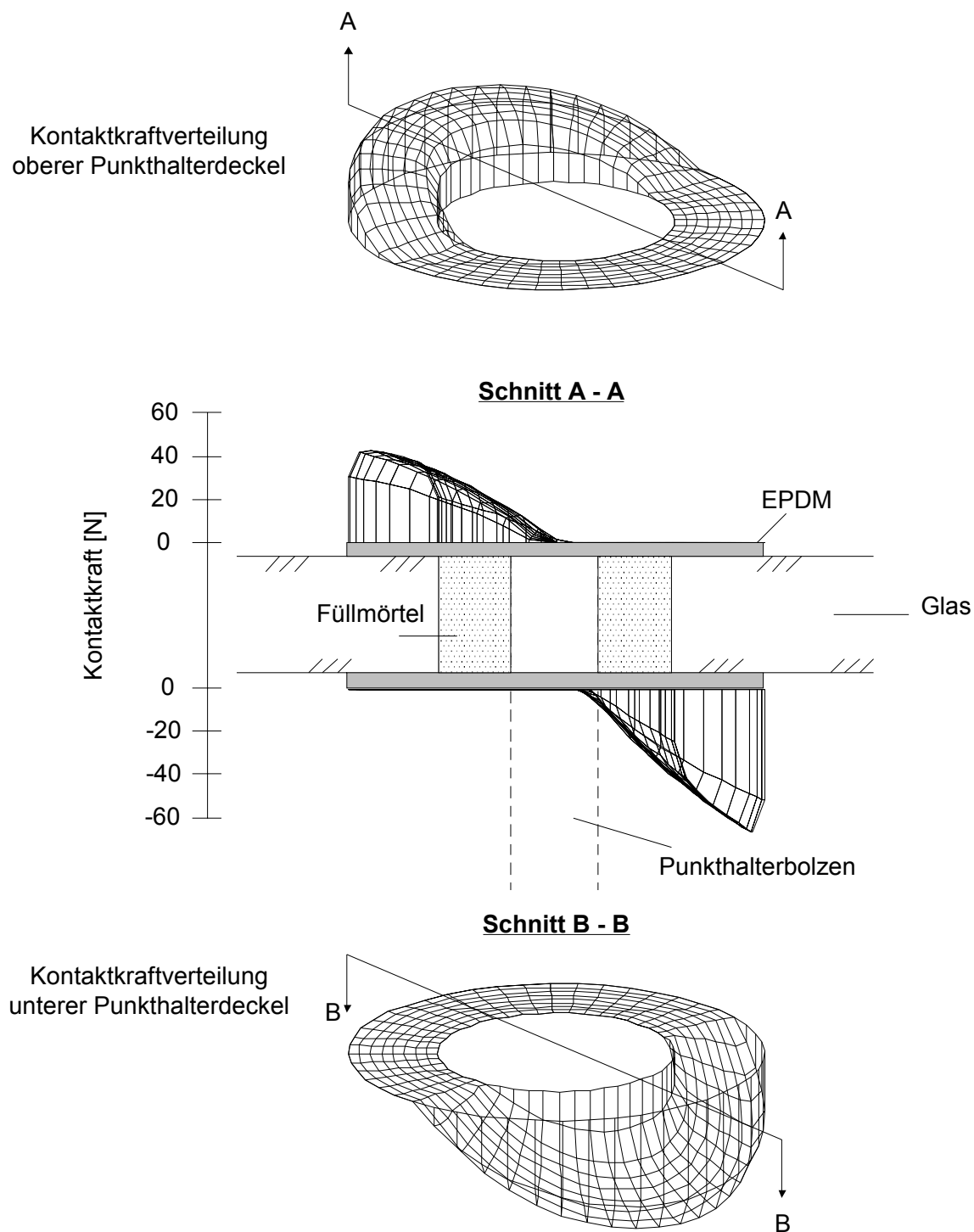


Bild 6.19: Kontaktkraftverteilung in den Punkthalterdeckeln (EPDM-Steifigkeit 70000 N/mm²)

Der Ort der maximalen Tangentialspannung wandert vom Bohrlochrand (Bild 6.20, links) zum Punkthalterdeckelrand (Bild 6.20, rechts). Mit der Steifigkeit der EPDM-Schicht (Elastomerringe) nehmen durch Änderung des statischen Systems (siehe Bild 6.21) die horizontalen Auflagerkräfte zu.

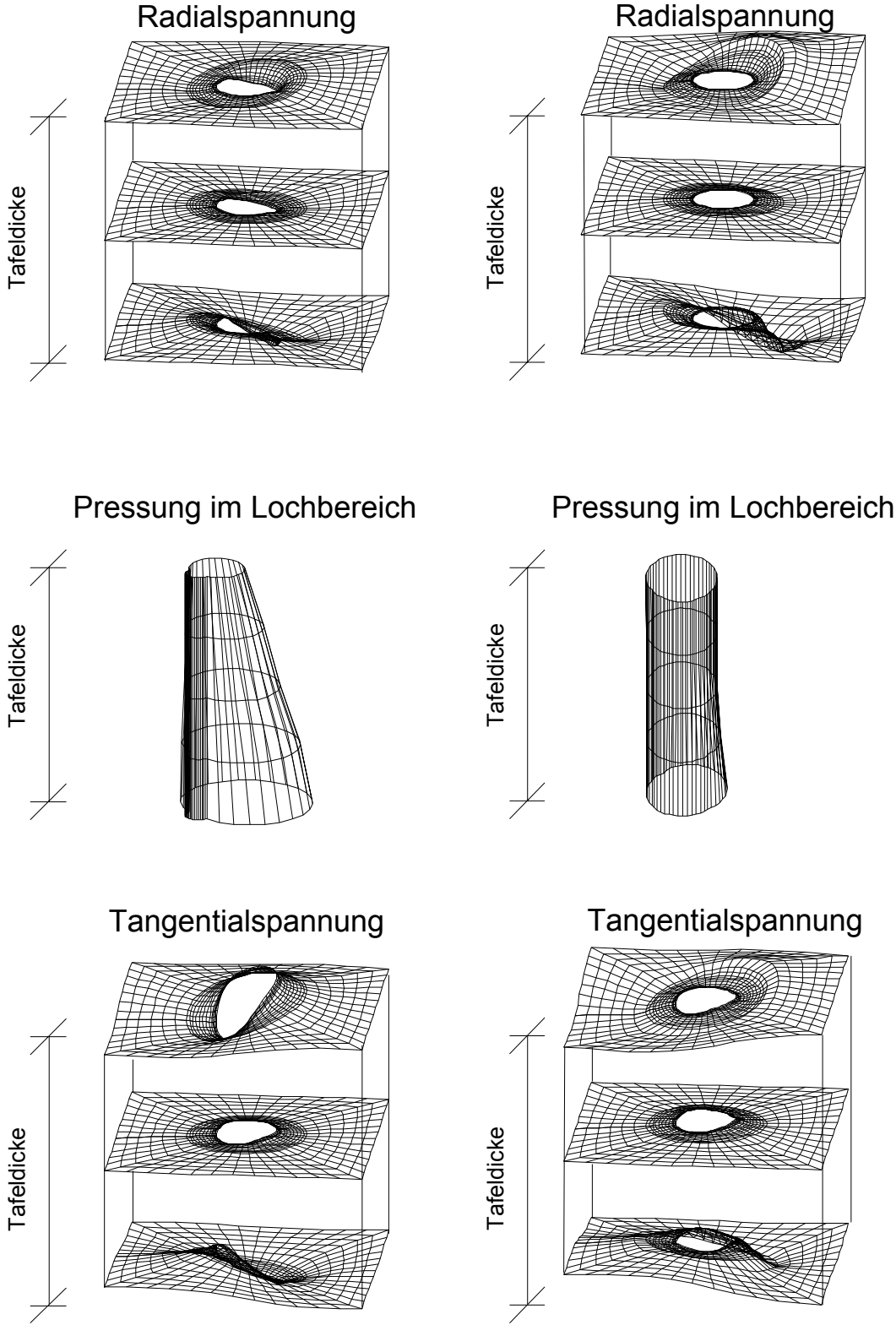
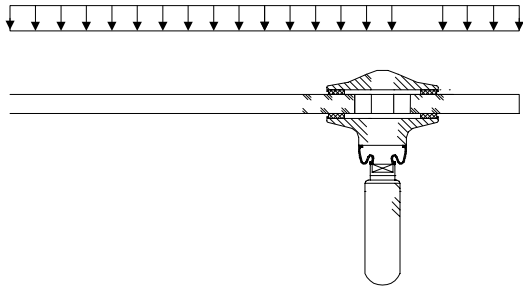


Bild 6.20: Vergleich EPDM Steifigkeit 25 N/mm² (links) - 70000 N/mm² (rechts)

Reales System



Statische Systeme

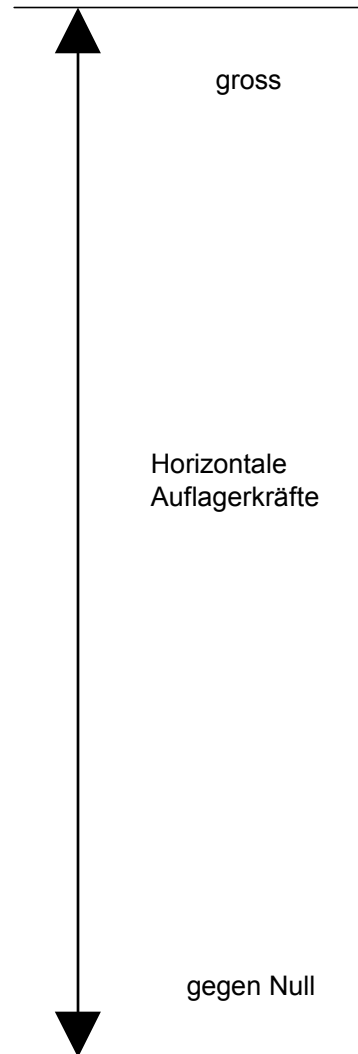
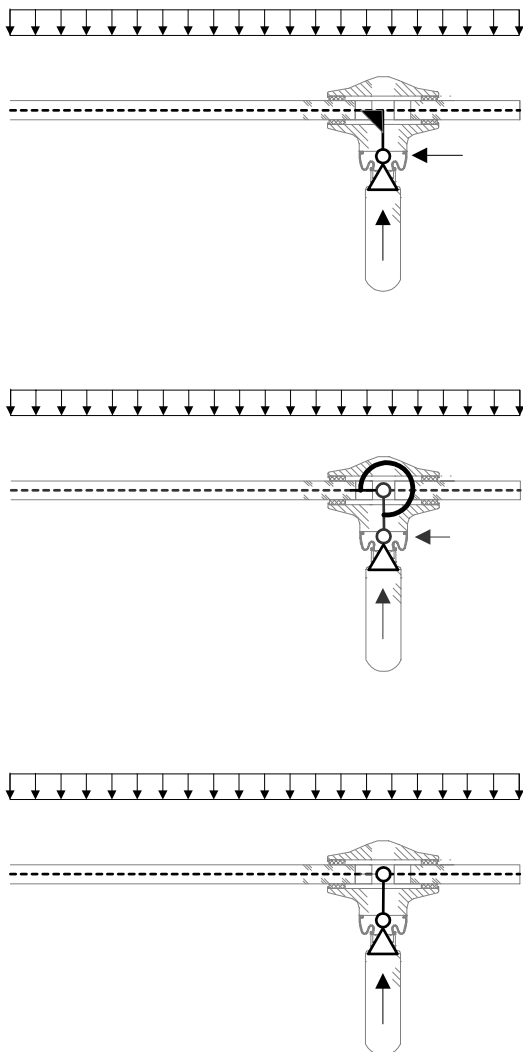


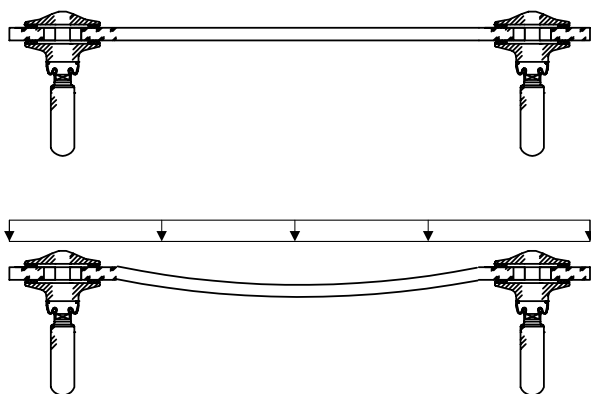
Bild 6.21: Statische Systeme

6.5 Einfluss der Halterausführung

In Abschnitt 6.3 wurde bereits der Einfluss der Randabstände auf die bemessungsrelevanten Größen angesprochen. In Bild 6.10 wurde dabei auf die Biegelinien eines gelenkigen Halters eingegangen. Bild 6.22 zeigt zum Vergleich die Biegelinien eines starren Punkthalters für verschiedene Randabstände. Für große Randabstände entspricht die Biegelinie der eines gelenkigen Punkthalters, da sich der gelenkige Punkthalter aufgrund der Tafelgeometrie nicht verdrehen kann. Bei kleinen Randabständen sollte es zu unterschiedlichem Tragverhalten kommen, da der starre Punkthalter nicht der Biegelinie des Glases folgen kann.

Starrer Punkthalter

1) Kleiner Randabstand der Glastafelbohrungen



2) Grosser Randabstand der Glastafelbohrungen

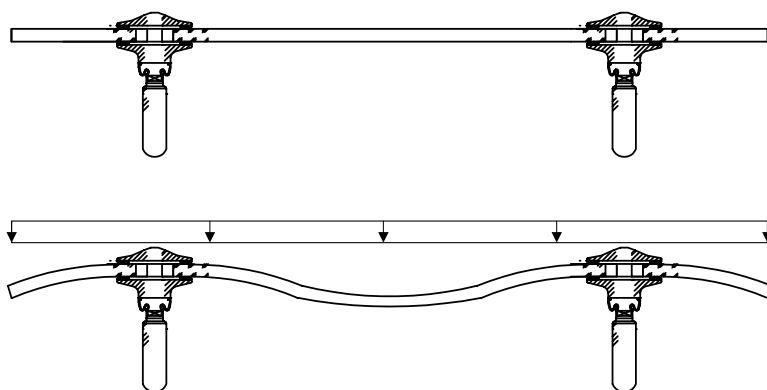


Bild 6.22: Biegelinien starr gelagerter Glastafel bei Variation des Randabstandes

Zur Überprüfung des Einflusses dieses Parameter, wurden aus dem in Kapitel 3 zusammengestellten Parameterspektrum verschiedene Varianten ausgewählt und berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.5 und Tabelle 6.6 zusammengestellt.

a = 1200 mm b = 1200 mm t = 12 mm	Ausführung	σ_{\max} (Lochrand Tafeloberseite)	u_{\max} (Tafelmitte)	Auflagerkräfte	
				horizontal	vertikal
ar = 300 mm / br = 300 mm		[N/mm ²]	[mm]	[N]	[N]
Kein Füllmörtel	gelenkig	18,17	1,02	232	1000
	starr	18,64	0,96	72	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 1250 \text{ N/mm}^2$	gelenkig	18,08	0,98	347	1000
	starr	18,36	0,94	189	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 2750 \text{ N/mm}^2$	gelenkig	17,84	0,95	408	1000
	starr	18,07	0,93	301	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 70000 \text{ N/mm}^2$	gelenkig	16,22	0,89	542	1000
	starr	16,17	0,87	678	1000

Tabelle 6.5: Einfluss der Halterausführung Tafel 1200 mm x 1200 mm x 12 mm

a = 3000 mm b = 3000 mm t = 12 mm	Ausführung	σ_{\max} (Lochrand Tafeloberseite)	u_{\max} (Tafelmitte)	Auflagerkräfte	
				horizontal	vertikal
ar = 100 mm / br = 100 mm		[N/mm ²]	[mm]	[N]	[N]
Kein Füllmörtel	gelenkig	48,43	47,90	1000	1000
	starr	48,43	47,73	1000	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 1250 \text{ N/mm}^2$	gelenkig	53,78	43,50	9648	1000
	starr	54,39	43,16	9860	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 2750 \text{ N/mm}^2$	gelenkig	47,29	41,80	10522	1000
	starr	48,53	41,36	10775	1000
$E_{\text{Füllmörtel}} = 70000 \text{ N/mm}^2$	gelenkig	60,53	37,90	12534	1000
	starr	62,28	37,20	12894	1000

Tabelle 6.6: Einfluss der Halterausführung Tafel 3000 mm x 3000 mm x 12 mm

Wie aus obigen Tabellen ersichtlich ist, ist die Differenz in den Spannungen und in den Durchbiegungen zwischen einer starren und einer gelenkigen Punkthalterausführung vernachlässigbar. Dies liegt darin begründet, dass die EPDM-Schichten der Punkthalterdeckel hier

sehr weich sind (EPDM-Steifigkeit 25 N/mm^2). Dadurch bildet sich bereits im Punkthalterkopf ein Gelenk aus.

Bei Betrachtung der Auflagerkräfte ist wieder der Einfluss der Randabstände zu bemerken. Im Beispiel aus Tabelle 6.5 erfolgt die Abtragung der Belastung entsprechend Bild 6.12. Dadurch, dass sich der starre Halter weniger verdreht, werden auch die horizontalen Auflagerkräfte geringer. Erst bei hohen Füllmörtelsteifigkeiten (70000 N/mm^2) macht sich die starre Halterausführung bemerkbar und die horizontalen Auflagerkräfte der starren Ausführung liegen über denen der gelenkigen Ausführung. Dies ist in Bild 6.23 durch die Größe der Kraftpfeile für die horizontalen Auflagerreaktionen für die unterschiedlichen Fälle veranschaulicht.

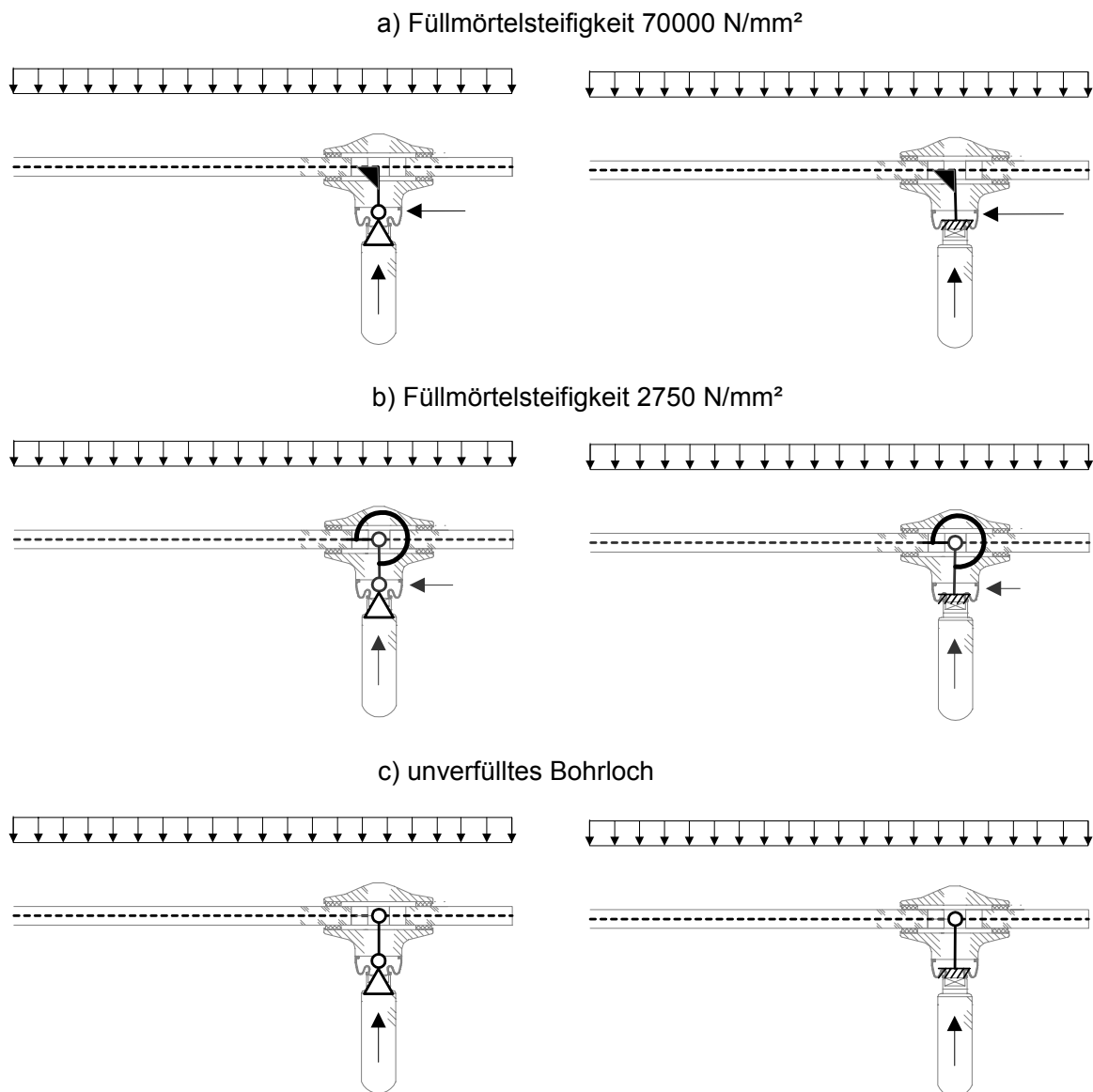
gelenkiger Halter**starrer Halter**

Bild 6.23: Horizontalkräfte in Abhängigkeit der Halterausführung bei großen Randabständen

Im Beispiel aus Tabelle 6.6 werden die äußeren Lasten entsprechend Bild 6.3 abgetragen. Durch den höheren Einspanneffekt des starren Halters liegen deshalb die horizontalen Auflagerkräfte immer über denen des gelenkigen Halters.

6.6 Einfluss der Bohrlochgröße

Werden die Montagetoleranzen an der Unterkonstruktion und nicht im Bohrloch aufgenommen, so kann der Glasdickebolzen ohne Zwischenraum in das Bohrloch gesetzt werden. Zur Vermeidung von Kontakt zwischen Stahl und Glas ist über den Glasdickebolzen eine Hülse aus PVC oder Aluminium zu schieben.

Ein direkter Vergleich der Auswirkungen der Bohrlochgröße auf die bemessungsrelevanten Größen ist nicht möglich, da das größere Bohrloch verschiedene Verfüllzustände aufweisen kann (vgl. Abschnitt 6.2) und die Zwischenhülse bei der kleinen Lochbohrung aus unterschiedlichen Materialien bestehen kann.

In der Regel wird durch eine kleinere Lochbohrung ein größerer Einspanngrad erreicht, der dann größere horizontale Auflagerkräfte zur Folge hat. Die äußeren Lasten werden hauptsächlich dem Kraftfluss 2 aus Bild 6.3 und Bild 6.12 folgen. Für die maximalen tangentialen Spannungen bedeutet dies, dass spannungsabmindernde Effekte durch Spannungsumlagerungen im Lochbereich möglich sind. Ob diese die Einflüsse der stärkeren Einspannung aufheben können, muss für die verschiedenen Konstellationen aus Randabstand, Tafelabmessung etc. getrennt untersucht werden. In Tabelle 6.7 und Bild 6.24 ist der Vergleich für eine Glastafel 3000 mm x 3000 mm x 12 mm durchgeführt. Mit dem kleineren Bohrloch sind deutlich größere Spannungen verbunden.

a = 3000 mm b = 3000 mm t = 12 mm	σ_{\max} (Lochrand Tafeloberseite)	u_{\max} (Tafelmitte)	Auflagerkräfte	
			horizontal	vertikal
ar = 100 mm / br = 100 mm	[N/mm ²]	[mm]	[N]	[N]
Bohrlochgröße 35 mm E _{Füllmörtel} = 2750 N/mm ²	47,29	41,80	10522	1000
Bohrlochgröße 15 mm	170,00	37,99	11412	1000

Tabelle 6.7: Einfluss der Füllmörtelsteifigkeit Tafel 1200 mm x 1200 mm x 12 mm

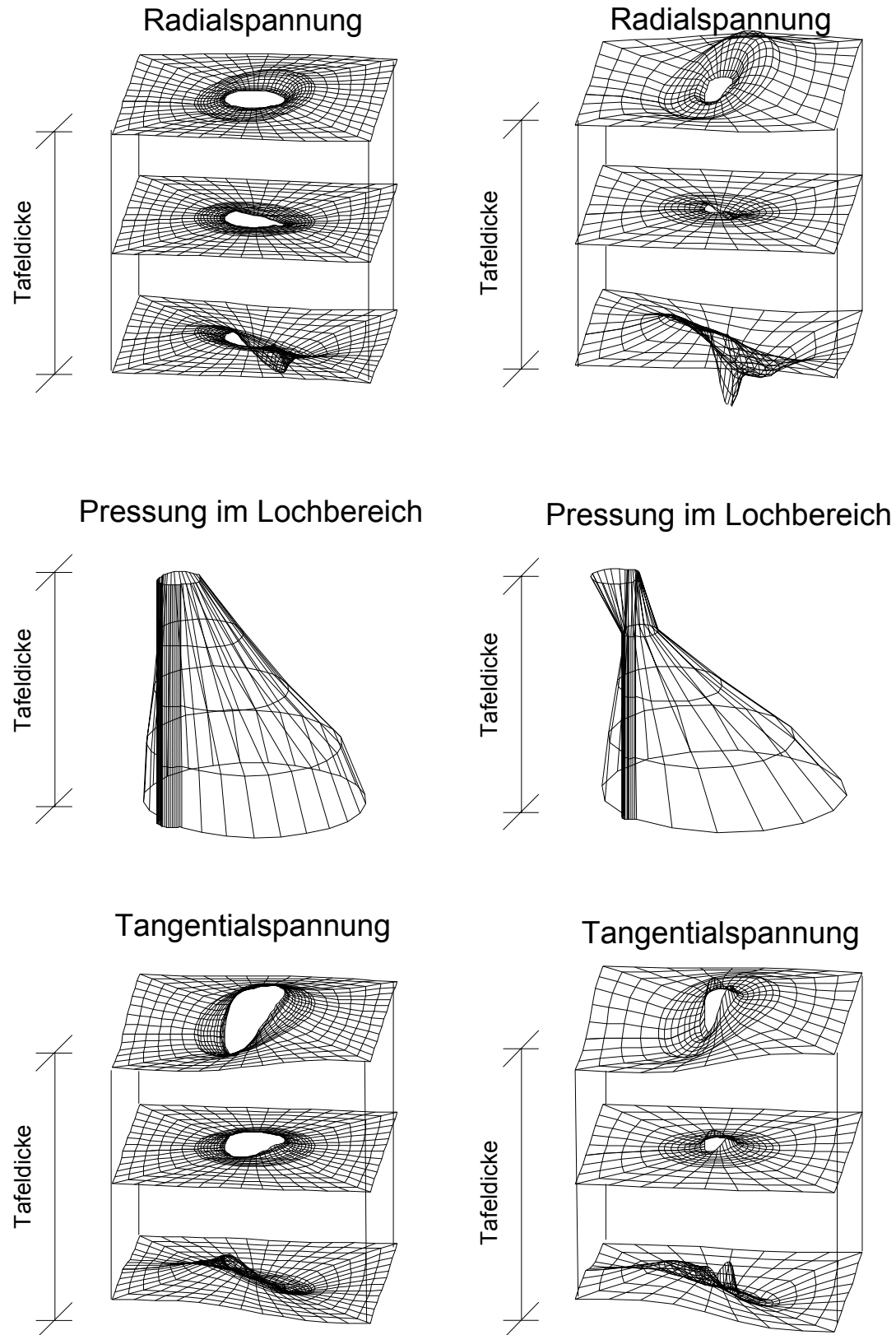
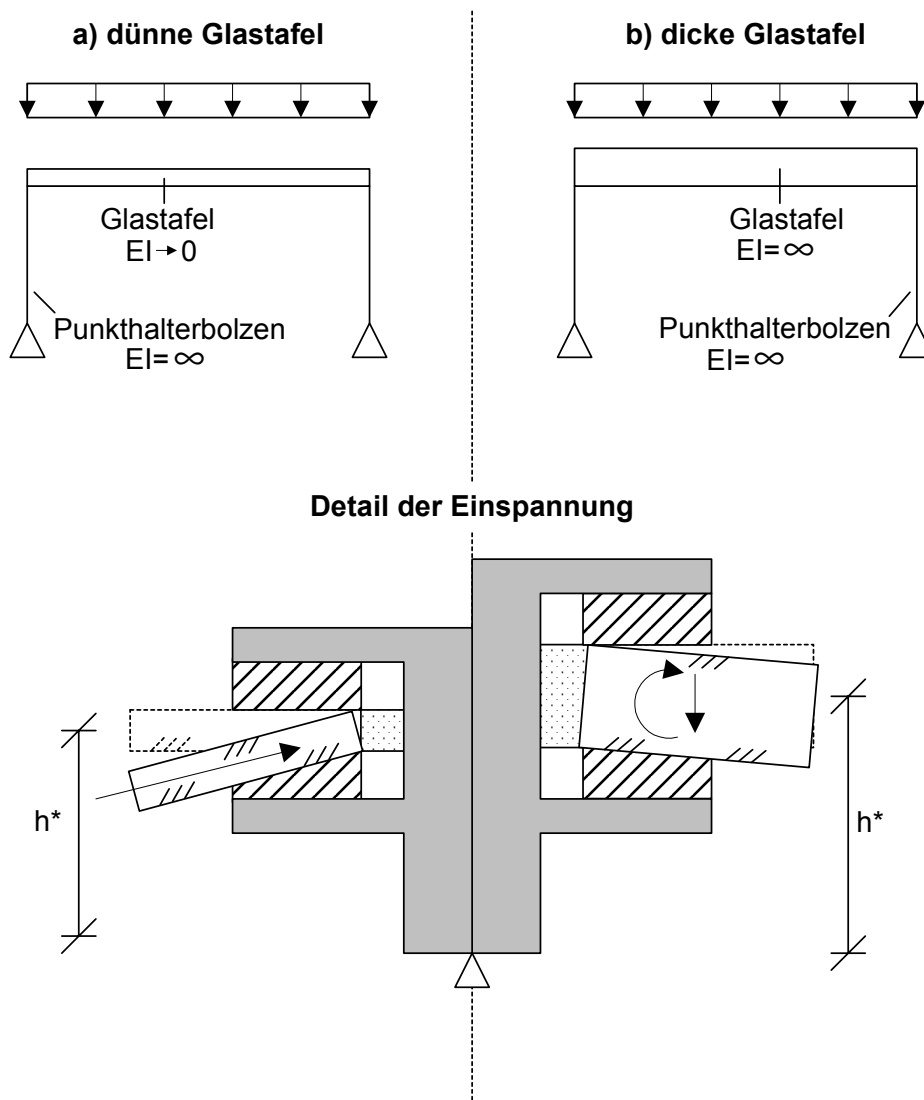


Bild 6.24: Vergleich großes (links) und kleines Bohrloch (rechts)

6.7 Einfluss der Tafeldicke

Auch die Wahl der Tafeldicke beeinflusst das Tragverhalten der punktgestützten Glastafel. Eine dünne Tafel trägt als Membran. Die äußeren Lasten werden über Normalkräfte zum Punkthalter geleitet (siehe Bild 6.25a). Eine dicke Tafel trägt die Lasten als Platte über Biegung ab (siehe Bild 6.25b). Darüber hinaus ändert sich der Hebelarm von Glastafelmitte zur Auflagerung, wodurch die Größe der Auflagerkräfte bestimmt wird. Auf diese Zusammenhänge wird genauer in Abschnitt 7.5.4 eingegangen.



* h = Hebelarm von Glastafelmitte zur Auflagerung

Bild 6.25: Einfluss der Glastafeldicke

6.8 Zusammenfassung

Mit den Ergebnissen der Untersuchungen der vorangegangenen Abschnitte lassen sich Tendenzen zum Einfluss der einzelnen Parameter angeben. Dabei werden die Einflüsse anhand der bemessungsrelevanten Größen bewertet.

1. Einfluss der Parameter auf die maximale Spannung am Bohrlochrand:

- a. Die Füllmörtelsteifigkeit hat auf die Größe der maximalen Spannungen im Lochbereich nur einen geringen Einfluss. Bei einem großen Randabstand der Lochbohrungen reduzieren sich die Spannungen im Lochbereich bei Erhöhung der Füllmörtelsteifigkeit. Bei kleinem Randabstand der Lochbohrungen kann sich der Lastabtragungsmechanismus im Lochbereich bei einer Erhöhung der Füllmörtelsteifigkeit verändern. Deshalb ist eine eindeutige Aussage, ob eine Füllmörtelsteifigkeitserhöhung zu einer Reduktion oder einer Spannungserhöhung im Lochbereich führt pauschal nicht möglich.
- b. Eine Erhöhung der EPDM-Steifigkeit der Punkthalterteller erhöht bei gleichbleibender Füllmörtelsteifigkeit die Spannungen im Lochbereich.
- c. Die Lagerung der Punkthalter (starr oder gelenkig) hat bei den hier untersuchten Punkthaltern nur einen geringen Einfluss auf die Spannungen im Lochbereich.
- d. Je kleiner die Lochbohrung ausgeführt wird, desto größer werden die Spannungen im Lochbereich.
- e. Ort und Größe der größten Spannungen im Lochbereich hängen von dem Verhältnis der Steifigkeit der EPDM-Ringe zu der Steifigkeit des Füllmörtels ab.

2. Einfluss der Parameter auf die Durchbiegung in Glastafelmitte:

- a. Bei Erhöhung der Füllmörtelsteifigkeit reduziert sich in der Regel die Durchbiegung in Tafelmitte geringfügig. Wie bereits für die Spannungen im Lochbereich festgestellt wurde, muss gleichzeitig auch der Einfluss der Randabstände der Lochbohrungen berücksichtigt werden.

- b. Je kleiner der Randabstand gewählt wird, desto größer wird die Durchbiegung in Tafelmitte. Dies liegt an der Verminderung der Spannweite und dem rückstellenden Effekt der auskragenden Glasfläche.
- c. Eine Erhöhung der EPDM-Steifigkeit der Punkthalterteller verringert bei gleichbleibender Füllmörtelsteifigkeit die Durchbiegung in Glastafelmitte.
- d. Die Lagerung der Punkthalter (starr oder gelenkig) hat bei den hier untersuchten Punkthaltern nur einen geringen Einfluss auf die Durchbiegung in Glastafelmitte.
- e. Aufgrund der stärkeren Einspannung der Glastafel bei kleinen Lochbohrungen ist die Durchbiegung in Tafelmitte geringer als bei großen Lochbohrungen.
- f. Die Durchbiegung in Tafelmitte hängt vom Steifigkeitsverhältnis der EPDM-Ringe und des Füllmörtels und der damit verbundenen Gelenkwirkung im Punkthalterkopf ab.

3. Einfluss der Parameter auf die resultierenden horizontalen Auflagerkräfte:

Die horizontale Auflagerkräfte vergrößern sich, bei

- a. einer Erhöhung der Füllmörtelsteifigkeit,
- b. einer Verringerung des Randabstandes der Lochbohrungen,
- c. einer Erhöhung der EPDM-Steifigkeit,
- d. einer Verkleinerung des Bohrlochdurchmessers.

7 Entwicklung von Vordimensionierungstafeln

7.1 Allgemeines

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass das Tragverhalten von punktgestützten Glastafeln von einer Vielzahl sich gegenseitig beeinflussender Parameter abhängt. In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die Erstellung von Vordimensionierungstafeln und -formeln gelegt. Im Vordergrund steht dabei, die zu berücksichtigende Parameteranzahl zu reduzieren. Deshalb wird zunächst untersucht, inwieweit Berechnungen nach einer geometrisch nichtlinearen Theorie bei der Erstellung der Bemessungstafeln notwendig sind. Im Anschluss daran wird das Berechnungskonzept der DIN EN 13474 [25] vorgestellt, an das sich die folgende Entwicklung der Vordimensionierungstafeln und -formeln anlehnt.

7.2 Berechnungen nach geometrisch nichtlinearer Theorie

In [6], [10] und [42] wird darauf aufmerksam gemacht, dass bei Glastafeln relativ schnell die lineare Plattentheorie zu konservative Ergebnisse liefert. Dabei konnte dieser Effekt bereits bei einer Durchbiegung der Tafeln von 0,2 x der Tafeldicke festgestellt werden. Die dort aufgeführten Untersuchungen beschränkten sich jeweils auf vierseitig linienförmig gelagerte Glastafeln.

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen im Vergleich dazu erkennen, dass der Einfluss einer geometrischen Nichtlinearität bei punktgestützten Glastafeln im bemessungsrelevanten Lastbereich gering ist. Bild 7.1 zeigt die Last-Verformungskurve eines Versuches aus Kapitel 5, der bis zum Bruch der Glastafeln gefahren wurde. Die Last-Verformungskurve weist bis zum Bruch annähernd ein linear-elastisches Verhalten auf.

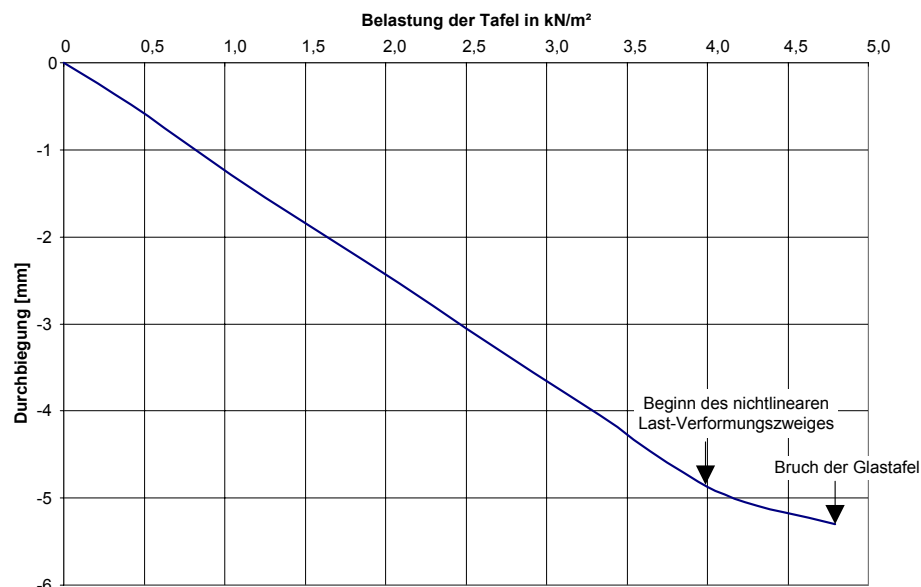


Bild 7.1: Annähernd linear-elastisches Verhalten bis zum Glasbruch

In [69] wurden Versuche an vierpunktgestützten, monolithischen Glastafeln geometrisch linear und geometrisch nichtlinear nachgerechnet. Die Belastung der 10 mm dicken Glastafeln mit den Abmessungen 1000 mm x 1000 mm erfolgte über eine Einzellast in Tafelmitte bis zum Bruch der Probekörper. Auch hier sind Einflüsse nach geometrisch nichtlinearer Theorie erst nach Verlassen des bemessungsrelevanten Lastbereichs erkennbar.

Dies liegt darin begründet, dass die Durchbiegungen normal zur Plattenebene von folgenden Faktoren abhängig sind:

1. Der Größe der Querbelastung p^*

Sollen Effekte nach Theorie II. Ordnung berücksichtigt werden, so reicht es nicht aus, eine dünne Platte nur durch das Verhältnis Breite zu Dicke $[a/h]$ zu definieren. Aalami und Williams führen deshalb in [1] den dimensionslosen Parameter p^* ein. Dieser Parameter setzt sich zusammen aus der Tafelbreite a , der Tafeldicke h , dem E-Modul des Materials sowie der Querbelastung p :

$$p^* = \frac{a^4 \cdot p}{h^4 \cdot E} \quad (7.1)$$

Der Parameter p^* kann als ein Maßstab für den Einfluss von geometrisch nichtlinearen Effekten verstanden werden. In den meisten Fällen rechtfertigt ein Wert $p^* > 5$ die Bemessung nach der geometrisch nichtlinearen Theorie [1]. Bei punktgestützten Glastafeln wird der Wert

p^* selten über 5 steigen, da zuvor der Spannungsnachweis oder der Gebrauchstauglichkeitsnachweis nicht mehr erfüllt wäre.

2. Den Randbedingungen

Platten gleicher Geometrie unter der gleichen Belastung bei unterschiedlichen Randbedingungen zeigen bei einer Bemessung nach geometrisch nichtlinearer Theorie stark unterschiedliches Verhalten. Dabei gilt, dass die Effekte aus der geometrischen Nichtlinearität bei Platten, die keine Verformungen in Tafelebene zulassen, im allgemeinen stärker ausgeprägt sind. Wegen der oft sogar gelenkig ausgeführten (siehe Kapitel 2) Punktlagerung ist dieser Effekt bei punktgestützten Glastafeln geringer als bei linienförmig gelagerten Glastafeln.

3. Den Materialeigenschaften

Der Ausgang eines Bruches bildet bei spröden Material die Tragfähigkeitsgrenze. Je größer die Bruchspannung ist, desto wichtiger wird es nach geometrisch nichtlinearer Theorie zu rechnen. Aufgrund der starken Streuung der Glasfestigkeiten wird bei der Bemessung von Glastafeln mit hohen Sicherheitsfaktoren gerechnet. In der Regel beträgt der Sicherheitsfaktor 2,4. Mit diesem Sicherheitsfaktor ergeben sich die in Tabelle 7.1 angegebenen zulässigen Spannungswerte für die unterschiedlichen Glassorten. Bevor geometrisch nichtlineare Effekte auftreten, werden die zulässigen Spannungen in der Glastafel überschritten. Begünstigt wird dies durch Schwächung z.B. in Form von Lochbohrungen.

Glassorte	Vertikalverglasung	Überkopfverglasung
Spiegelglas	18	12
VSG aus Spiegelglas	22,5	15
ESG aus Spiegelglas	50	50

Tabelle 7.1: Zulässige Spannungswerte für verschiedene Glassorten in N/mm^2

Die obigen Ausführungen zeigen, dass bei der Erstellung der Vordimensionierungstabellen geometrisch nichtlineare Effekte vernachlässigt werden können, ohne dadurch eine zu konservative Abschätzung der Bemessungsgrößen zu bekommen.

7.3 Berechnungen nach DIN EN 13474

In DIN EN 13474 [25] wird ein Bemessungsverfahren für linienförmig gelagerte Glastafeln vorgestellt. Teil 1 dieser Norm enthält allgemeine Grundlagen zur Bemessung von Glastafeln, die für die Aufnahme der Einwirkungen nach DIN V ENV 1991-2 [30], die normal zur Glastafelebene angreifen, erforderlich sind. In Teil 2 wird das Bemessungsschema für gleichmäßig verteilte Belastungen beschrieben. Im Gegensatz zu dem Konzept der zulässigen Spannungen wird hier das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte verwendet.

Die Bemessung erfolgt nach folgendem Schema:

- a. Ermittlung der Bemessungswerte p_d für die Einwirkungen:

	Eine veränderliche Einwirkung	Zwei oder mehrere veränderliche Einwirkungen
Grenzzustand der Tragfähigkeit	$\sum_j \gamma_{Gj} \cdot G_{kj} + 1,5 \cdot Q_{k1}$	$\sum_j \gamma_{Gj} \cdot G_{kj} + 1,35 \cdot \sum_i Q_{ki}$
Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	$\sum_j G_{kj} + Q_{k1}$	$\sum_j G_{kj} + 0,9 \cdot \sum_i Q_{ki}$

Tabelle 7.2: Ermittlung der Bemessungswerte [25]

- b. Bestimmung der normierten Belastung $p^* = \frac{a^4 \cdot p_d}{h^4 \cdot E}$

mit: a = Tafelbreite (kürzere Abmessung)

h = Tafeldicke

p_d = Bemessungswert der Einwirkungen

E = E-Modul

- c. Berechnung der höchsten Zugspannung aus:

$$\sigma_{\max} = k_1 \cdot \frac{a^2}{h^2} \cdot p_d \quad (7.2)$$

Der Faktor k_1 ergibt sich hierbei aus Tabelle 7.3. Er hängt von der normierten Belastung p^* und dem Seitenverhältnis $\lambda = a/b$ der Glastafel ab.

$\lambda = a/b$	p^*									
	0	5	10	20	30	50	100	200	300	500
1,0	0,272	0,271	0,268	0,258	0,245	0,227	0,207	0,188	0,178	0,165
0,9	0,323	0,320	0,314	0,293	0,269	0,243	0,222	0,203	0,193	0,180
0,8	0,383	0,378	0,365	0,329	0,294	0,262	0,240	0,221	0,210	0,198
0,7	0,451	0,442	0,421	0,368	0,322	0,282	0,261	0,241	0,230	0,219
0,6	0,562	0,514	0,485	0,417	0,362	0,305	0,284	0,263	0,252	0,239
0,5	0,603	0,590	0,560	0,485	0,424	0,342	0,309	0,289	0,277	0,264
0,4	0,673	0,665	0,643	0,580	0,519	0,429	0,337	0,317	0,306	0,292
0,3	0,725	0,722	0,714	0,687	0,650	0,575	0,444	0,349	0,337	0,323
0,2	0,748	0,747	0,746	0,744	0,739	0,724	0,671	0,561	0,481	0,384
0,1	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,748	0,746	0,739
0,0	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750

Tabelle 7.3: Faktor k_1 für die Berechnung der Spannung [25]

d. Berechnung der maximalen Durchbiegung aus:

$$w_{\max} = k_4 \cdot \frac{a^4}{h^3} \cdot \frac{p_d}{E} \quad (7.3)$$

Der Faktor k_4 ergibt sich aus Tabelle 7.4. Er hängt wie der Faktor k_1 von der normierten Belastung p^* und dem Seitenverhältnis $\lambda = a/b$ der Glastafel ab.

$\lambda = a/b$	p^*									
	0	5	10	20	30	50	100	200	300	500
1,0	0,046	0,046	0,045	0,041	0,038	0,032	0,024	0,017	0,014	0,011
0,9	0,056	0,056	0,054	0,049	0,044	0,036	0,027	0,019	0,015	0,012
0,8	0,068	0,067	0,065	0,057	0,051	0,041	0,030	0,021	0,018	0,014
0,7	0,083	0,081	0,077	0,068	0,059	0,048	0,035	0,025	0,020	0,016
0,6	0,099	0,097	0,092	0,081	0,071	0,057	0,041	0,029	0,024	0,019
0,5	0,115	0,113	0,109	0,097	0,086	0,070	0,051	0,036	0,030	0,023
0,4	0,131	0,129	0,126	0,116	0,105	0,088	0,065	0,046	0,038	0,030
0,3	0,147	0,142	0,140	0,135	0,128	0,114	0,088	0,064	0,053	0,041
0,2	0,147	0,147	0,147	0,146	0,145	0,140	0,126	0,101	0,085	0,067
0,1	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,147	0,146	0,143	0,136
0,0	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148

Tabelle 7.4: Faktor k_4 für die Berechnung der Durchbiegung [25]

- e. Bestimmung von zulässigen Spannungen und Durchbiegungen
- f. Vergleich von berechneten und zulässigen Spannungen und Durchbiegungen

7.4 Parameterstudie

Wie aus Kapitel 7.3 ersichtlich, werden für die Bemessungstabellen in [25] Faktoren k für verschiedene Plattenverhältnisse $\lambda = a/b$ und für variierende Werte des dimensionslosen Parameters p^* bestimmt. Die Bestimmung dieser Faktoren erweist sich dabei als relativ einfach, da die Faktoren nur von der Belastung, dem Material und der Geometrie abhängig sind. Die Randbedingungen bleiben dabei trotz Veränderung der Tafelabmessungen immer gleich. Es reicht somit für den Fall der vierseitig linienförmig gelagerten Tafel eine Bemessungstafel aus. Für

die Fälle zweiseitiger und dreiseitiger Lagerung werden in [25] weitere Bemessungstabellen angegeben.

In [84] werden Beiwerte in Tabellenform für an ihren vier Ecken punktgestützte Platten unter Gleichlast angegeben. Auch hier ist eine Bemessungstafel ausreichend, da die Punktlagerung immer punktuell direkt in den Eckpunkten der Tafel erfolgt. Bei der Erstellung der Tabellen wurden geometrisch nichtlineare Effekte vernachlässigt.

Für den Fall der punktgestützten Glastafel gestaltet sich die Erstellung von Bemessungstabellen nicht so einfach, da sich die Randbedingungen der Tafel ändern bei:

1. Veränderung der Lage des Gelenks des Punkthalter
2. Veränderung der Lochbohrung in der Glastafel
3. Veränderung des Verfüllzustandes der Lochbohrung
4. Lage der Lochbohrung
5. Größe der Punkthalterdeckel

Im folgenden werden Bemessungstabellen für den in dieser Arbeit untersuchten gelenkigen Punkthalter (siehe Bild 5.7) mit großer, verfüllter Lochbohrung (Lochdurchmesser 35 mm, $E_{\text{Füllmörtel}}=2750 \text{ N/mm}^2$) erstellt. Dazu wurde eine Parameterstudie durchgeführt, in der folgende Parameter variiert wurden:

1. Tafelabmessungen
2. Lage der Lochbohrung
3. Tafeldicke

Als Belastung wurde einheitlich ein Wert von 1 kN/m^2 auf die berechneten Glastafeln angegeben. Die Berechnungen wurden am FE-Modell aus Kapitel 4 durchgeführt. Aufgrund der Ausführungen aus Kapitel 7.2 war es nicht notwendig, einen dimensionslosen Belastungsparameter p^* einzuführen.

7.5 Vordimensionierungstafeln

7.5.1 Allgemeines

Aus den FE-Berechnungen der Parameterstudie wurden automatisch folgende Größen, die als Eingangsparameter für die Tafelerstellungen dienen, an eine Ausgabedatei übergeben:

1. Größe und Ort der maximalen Hauptspannung
2. Größe und Ort der maximalen Spannung am Lochrand
3. Größe und Ort der maximalen Spannung in Tafelmitte
4. Größe und Ort der maximalen Durchbiegung
5. Größe der maximalen Durchbiegung in der Tafelecke
6. Größe der maximalen Durchbiegung in der Tafelmitte
7. Größe und Richtung der horizontalen Auflagerkräfte

7.5.2 Tafeln für den Spannungsnachweis

Als erster Schritt bei der Erstellung der Vordimensionierungstafeln wurden die berechneten Spannungen für jede Tafeldicke in eine 11 x 11 Matrix eingetragen. Die Größe der Matrix ergab sich aus dem Parameterspektrum für die Tafelabmessungen (siehe Kapitel 3.2). In Bild 7.2 und Bild 7.3 sind beispielhaft Auszüge der Matrizen einer 4 mm und einer 20 mm dicken Tafel mit Punkthalterrandabständen von jeweils 100 mm zu den Glastafelkanten dargestellt. Ähnliche Tafeln ergaben sich für die anderen berechneten Glastafeldicken von 8 mm, 12 mm und 16 mm.

Tafeldicke h = 4mm ar = 100mm br = 100mm		Tafelabmessung a [mm]										
		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
Tafelabmessung b [mm]	1000	64,3										
	1200	88,0	115,0									
	1400	117,3	148,0	184,9								
	1600	152,0	187,3	228,4	276,5							
	1800	192,4	233,1	279,1	331,7	392,0						
	2000	239,1	285,4	337,0	395,0	460,0	533,7					
	2200	294,9	345,9	402,4	466,1	537,1	615,7	703,9				
	2400	356,9	418,5	480,7	545,6	622,6	707,8	801,1	904,8			
	2600	425,7	499,0	572,0	645,6	721,5	808,7	908,8	1018,2	1138,4		
	2800	501,0	587,1	671,9	756,6	842,7	932,3	1028,6	1142,8	1268,5	1406,4	
	3000	582,9	682,5	780,4	877,4	974,9	1074,7	1179,4	1292,3	1417,3	1561,5	1725,1

Bild 7.2: Angabe der Spannungen in N/mm^2 für eine 4 mm dicke Glastafel unter einer Belastung von $1 kN/m^2$

Tafeldicke $h = 20\text{ mm}$
 $a_r = 100\text{ mm}$ $b_r = 100\text{ mm}$

Tafelabmessung a [mm]

		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
Tafelabmessung b [mm]	1000	1,2										
	1200	1,7	2,1									
	1400	2,3	2,7	3,3								
	1600	3,0	3,2	3,9	4,7							
	1800	3,8	4,1	4,6	5,5	6,4						
	2000	4,7	5,0	5,4	6,3	7,3	8,3					
	2200	5,7	6,0	6,3	7,2	8,3	9,4	10,6				
	2400	6,7	7,1	7,5	8,2	9,3	10,5	11,8	13,1			
	2600	7,8	8,3	8,7	9,3	10,5	11,8	13,1	14,4	15,9		
	2800	9,0	9,5	10,0	10,4	11,8	13,1	14,4	15,9	17,3	18,9	
	3000	10,2	10,8	11,3	12,2	13,1	14,5	16,0	17,4	18,9	20,5	22,2

Bild 7.3: Angabe der Spannungen in N/mm^2 für eine 20 mm dicke Glastafel unter einer Belastung von 1 kN/m^2

Ziel der Entwicklung von Vordimensionierungstabellen ist es nicht, für jede Tafeldicke und jede Belastung eine Tabelle mit den maximalen Hauptspannungen bereitzustellen, sondern möglichst viele Anwendungsfälle mit einer Tafel oder einer Tabelle abzudecken. Aus diesem Grund wurden im nächsten Entwicklungsschritt für den konstanten Wert der Tafelabmessung a die Spannungen für die einzelnen Glastafeldicken in einer Matrix zusammengefasst. In Bild 7.4 ist dies für die Tafelabmessung $a = 1600\text{ mm}$ beispielhaft dargestellt.

Tafeldicke h [mm]		4	8	12	16	20
b [mm]	a [mm]	1600	1600	1600	1600	1600
	1000	152,0	32,8	10,9	4,7	3,0
	1200	187,3	40,4	13,4	5,8	3,2
	1400	228,4	49,1	16,3	7,1	3,9
	1600	276,5	59,2	19,6	8,5	4,7
	1800	331,7	70,7	23,3	10,0	5,5
	2000	395,0	83,7	27,5	11,7	6,3
	2200	466,1	100,1	32,2	13,6	7,2
	2400	545,6	120,5	37,5	15,6	8,2
	2600	645,6	143,7	45,2	17,9	9,3
	2800	756,6	169,4	54,0	20,6	10,4
	3000	877,4	198,1	64,1	24,5	12,2

Bild 7.4: Maximale Hauptspannung in N/mm^2 für alle Glastafeldicken ($a = 1600\text{ mm}$)

Unter Anwendung der Formel $\frac{\sigma \cdot h^2}{a \cdot b \cdot p_d} = k_1$ (siehe Formel 7.2) konnte aus diesen Werten der

Faktor k_1 zurückgerechnet werden. Das Ergebnis dieser Rückrechnung ist für die Tafelabmessung $a = 1600$ mm in Bild 7.5 in Tabellenform und in Bild 7.6 grafisch angegeben. In Bild 7.6 ist der Faktor k_1 nicht für alle Abmessungen b aufgetragen, sondern nur für die Abmessungen 1200 mm, 2000 mm, 2400 mm und 2800 mm.

b [mm]	Tafeldicke h [mm]	4	8	12	16	20
	a [mm]	1600	1600	1600	1600	1600
1000		1,52	1,31	0,99	0,75	0,76
1200		1,56	1,35	1,01	0,78	0,67
1400		1,63	1,40	1,05	0,81	0,70
1600		1,73	1,48	1,10	0,85	0,73
1800		1,84	1,57	1,17	0,89	0,76
2000		1,97	1,67	1,24	0,94	0,79
2200		2,12	1,82	1,32	0,99	0,82
2400		2,27	2,01	1,41	1,04	0,85
2600		2,48	2,21	1,56	1,10	0,89
2800		2,70	2,42	1,74	1,18	0,93
3000		2,92	2,64	1,92	1,31	1,02

Bild 7.5: Faktor k_1 für alle Glastafeldicken ($a = 1600$ mm)

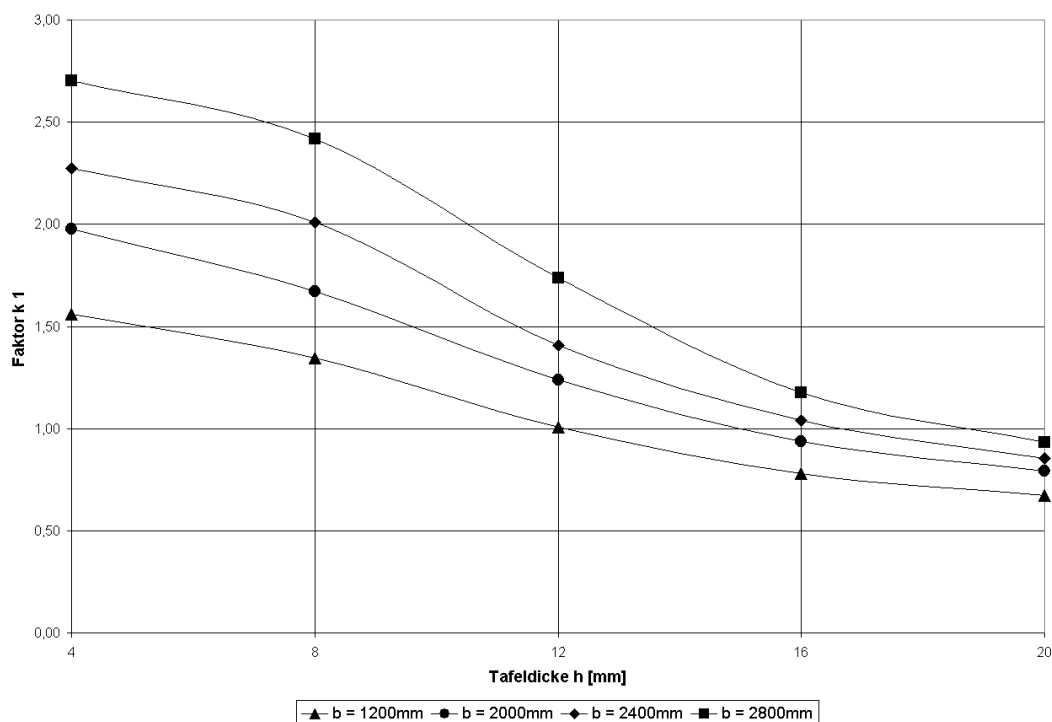


Bild 7.6: Faktor k_1 über alle Glastafeldicken ($a = 1600$ mm)

Zur weiteren Reduzierung der Tafelanzahl wurden die Kurven für den Faktor k_1 aus Bild 7.6 durch Geraden ersetzt. Dies ist in Bild 7.7 für die Abmessungen $b = 1200$ mm und $b = 2800$ mm dargestellt.

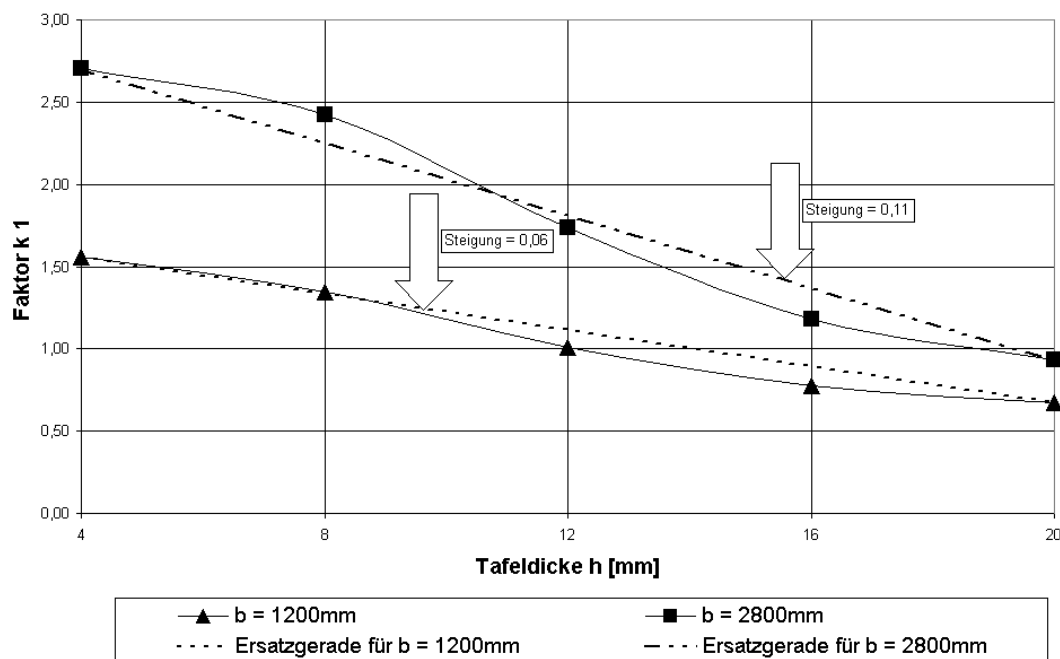


Bild 7.7: Ersatzgeraden für den Faktor k_1

Der in Bild 7.7 dargestellte Vorgang konnte für alle Abmessungen a und b wiederholt werden. In Bild 7.8 sind die Steigungen der für die Abmessung a = 1600 mm erhaltenen Geraden als Faktor k_2 angegeben.

b [mm]	Tafeldicke h [mm]	4	20	k_2
	a [mm]	1600	1600	
1000		1,52	0,76	0,05
1200		1,56	0,67	0,06
1400		1,63	0,70	0,06
1600		1,73	0,73	0,06
1800		1,84	0,76	0,07
2000		1,97	0,79	0,07
2200		2,12	0,82	0,08
2400		2,27	0,85	0,09
2600		2,48	0,89	0,10
2800		2,70	0,93	0,11
3000		2,92	1,02	0,12

Bild 7.8: Faktor k_2

Mit dem Faktor k_2 kann die maximale Spannung ermittelt werden aus:

$$\sigma_{\max} = [k_1 - k_2 \cdot (h - 4)] \cdot \frac{a \cdot b}{h^2} \cdot p_d \quad (7.4)$$

Die Faktoren k_1 und k_2 für alle Tafelabmessungen (Randabstand $a_r = b_r = 100$ mm) sind in Bild 7.9 und Bild 7.10 zusammengestellt.

ar = 100mm br = 100mm		Tafelabmessung a [mm]										
		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
Tafelabmessung b [mm]	1000	1,03										
	1200	1,17	1,28									
	1400	1,34	1,41	1,51								
	1600	1,52	1,56	1,63	1,73							
	1800	1,71	1,73	1,77	1,84	1,94						
	2000	1,91	1,90	1,93	1,97	2,04	2,13					
	2200	2,15	2,10	2,09	2,12	2,17	2,24	2,33				
	2400	2,38	2,32	2,29	2,27	2,31	2,36	2,43	2,51			
	2600	2,62	2,56	2,51	2,48	2,47	2,49	2,54	2,61	2,69		
	2800	2,86	2,80	2,74	2,70	2,68	2,66	2,67	2,72	2,79	2,87	
	3000	3,11	3,03	2,97	2,92	2,89	2,87	2,86	2,87	2,91	2,97	3,07

Bild 7.9: Faktor k_1 für alle Tafelabmessungen ($ar = br = 100 \text{ mm}$)

ar = 100mm br = 100mm		Tafelabmessung a [mm]										
		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
Tafelabmessung b [mm]	1000	0,033										
	1200	0,038	0,043									
	1400	0,042	0,049	0,053								
	1600	0,048	0,055	0,058	0,062							
	1800	0,054	0,061	0,065	0,068	0,072						
	2000	0,060	0,067	0,072	0,074	0,077	0,081					
	2200	0,070	0,074	0,079	0,081	0,083	0,086	0,091				
	2400	0,079	0,084	0,088	0,089	0,090	0,093	0,096	0,100			
	2600	0,089	0,094	0,098	0,099	0,098	0,099	0,102	0,105	0,110		
	2800	0,099	0,104	0,108	0,111	0,109	0,108	0,108	0,111	0,115	0,119	
	3000	0,110	0,115	0,119	0,119	0,120	0,119	0,118	0,119	0,121	0,125	0,130

Bild 7.10: Faktor k_2 für alle Tafelabmessungen ($ar = br = 100 \text{ mm}$)

Für die praktische Anwendung zur Vordimensionierung bietet es sich an, diese Tabellen grafisch aufzubereiten. Zu diesem Zweck wurden die einzelnen Tabellen zunächst in dreidimensionale Flächendiagramme (siehe Bild 7.11 und Anhänge A7 bis A9) überführt. Aus diesen wurden zweidimensionale Umrissdiagramme erstellt (siehe Bild 7.12 und Anhänge A7 bis A9).

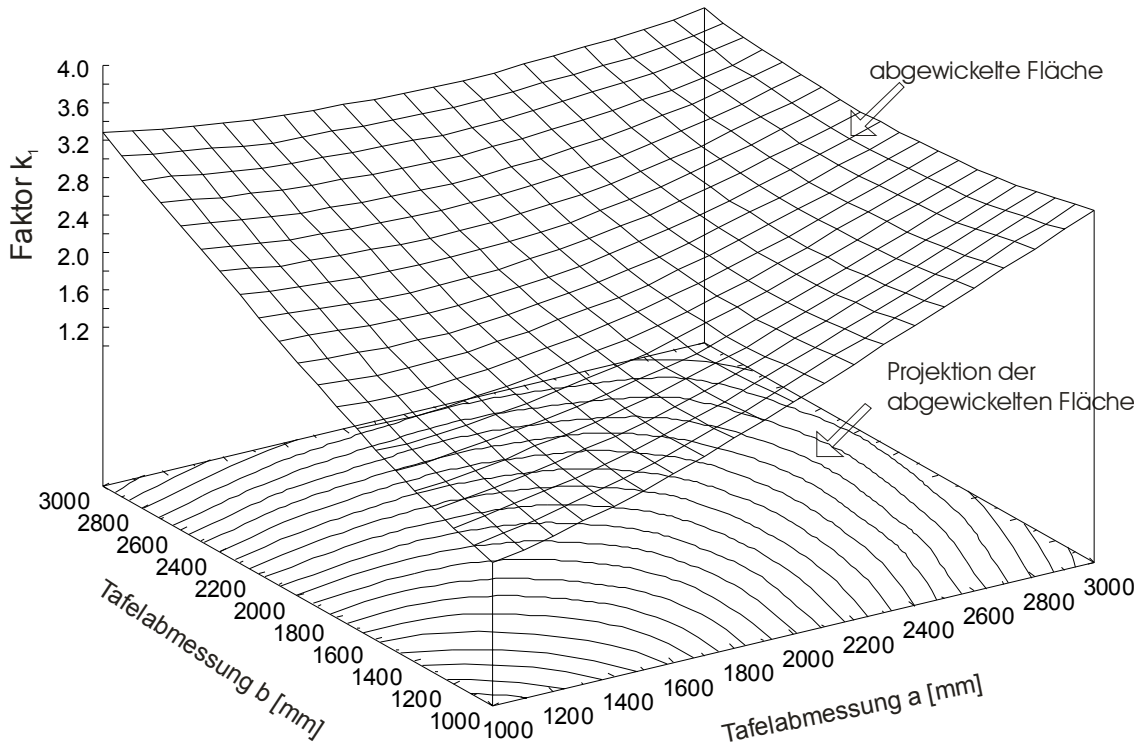


Bild 7.11: Dreidimensionale Darstellung des Faktors k_1 über den Abmessungen

Faktor k_1

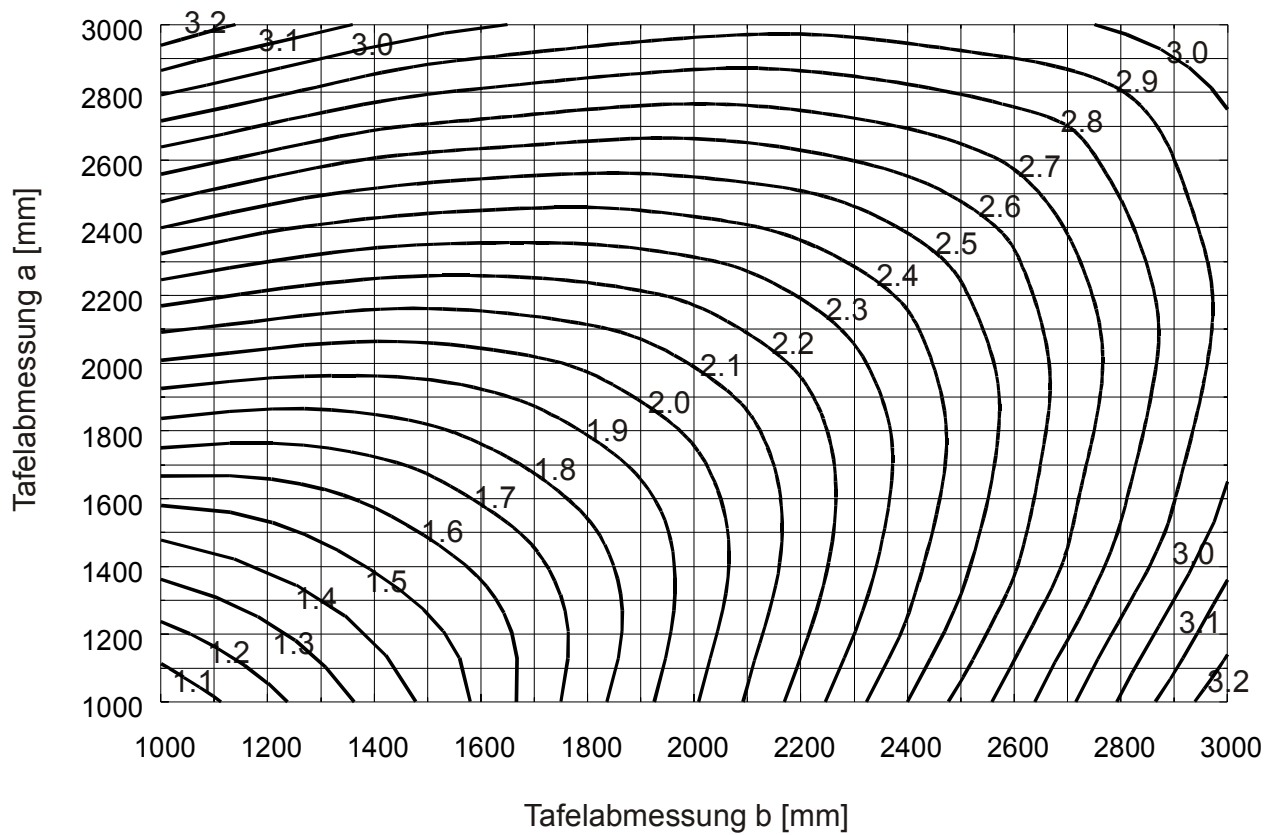


Bild 7.12: Umrissdiagramm für den Faktor k_1

Mit Hilfe der Umrissdiagramme der Anhänge A7 bis A9 lassen sich unter Anwendung der Formel 7.4 für beliebige Abmessungen, Dicken und Belastungen der Glastafeln die maximal auftretenden Spannungen ermitteln.

7.5.3 Tafeln für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis

Die Vorgehensweise bei der Erstellung der Vordimensionierungstafeln entspricht der aus Kapitel 7.5.2. Zunächst wurden alle unter einer Belastung von 1 kN/m^2 ermittelten maximalen Durchbiegungen in eine 11×11 Matrix eingetragen (siehe Bild 7.13 und Bild 7.14).

Tafeldicke $h = 4 \text{ mm}$
 $a_r = 100 \text{ mm}$ $b_r = 100 \text{ mm}$

		Tafelabmessung a [mm]										
		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
Tafelabmessung b [mm]	1000	8,0										
	1200	13,9	20,8									
	1400	23,9	32,1	45,1								
	1600	39,9	49,8	64,7	86,6							
	1800	63,8	76,0	93,3	117,9	152,4						
	2000	98,2	113,1	133,5	161,5	199,5	250,7					
	2200	147,4	163,8	188,3	220,3	262,6	318,3	391,1				
	2400	212,6	231,7	260,7	297,7	345,2	406,3	484,8	584,7			
	2600	296,7	323,3	354,1	397,5	451,2	518,6	603,7	710,5	843,8		
	2800	403,2	438,7	473,3	523,4	584,7	659,7	752,3	867,0	1008,6	1182,3	
	3000	535,7	581,9	627,6	679,7	750,0	834,0	935,6	1059,3	1210,2	1393,6	1615,3

Bild 7.13: Angabe der Durchbiegungen in mm für eine 4 mm dicke Glastafel unter einer Belastung von 1 kN/m^2

Tafeldicke $h = 20 \text{ mm}$
 $a_r = 100 \text{ mm}$ $b_r = 100 \text{ mm}$

		Tafelabmessung a [mm]										
		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
Tafelabmessung b [mm]	1000	0,2										
	1200	0,3	0,4									
	1400	0,5	0,6	0,8								
	1600	0,8	1,0	1,2	1,5							
	1800	1,4	1,5	1,7	2,1	2,6						
	2000	2,2	2,3	2,5	2,9	3,4	4,2					
	2200	3,2	3,4	3,6	4,0	4,5	5,3	6,4				
	2400	4,6	4,8	5,0	5,4	6,0	6,8	7,9	9,4			
	2600	6,4	6,7	7,0	7,3	7,9	8,8	9,9	11,4	13,4		
	2800	8,6	9,1	9,5	9,8	10,4	11,2	12,4	13,9	15,9	18,5	
	3000	11,3	11,9	12,5	13,0	13,4	14,4	15,6	17,1	19,1	21,7	24,9

Bild 7.14: Angabe der Durchbiegungen in mm für eine 20 mm dicke Glastafel unter einer Belastung von 1 kN/m^2

Im nächsten Entwicklungsschritt wurden für den konstanten Wert der Tafelabmessung a die Durchbiegungen für die einzelnen Glastafeldicken in einer Matrix zusammengefasst. In Bild 7.15 ist dies für die Tafelabmessung $a = 1600$ mm beispielhaft dargestellt.

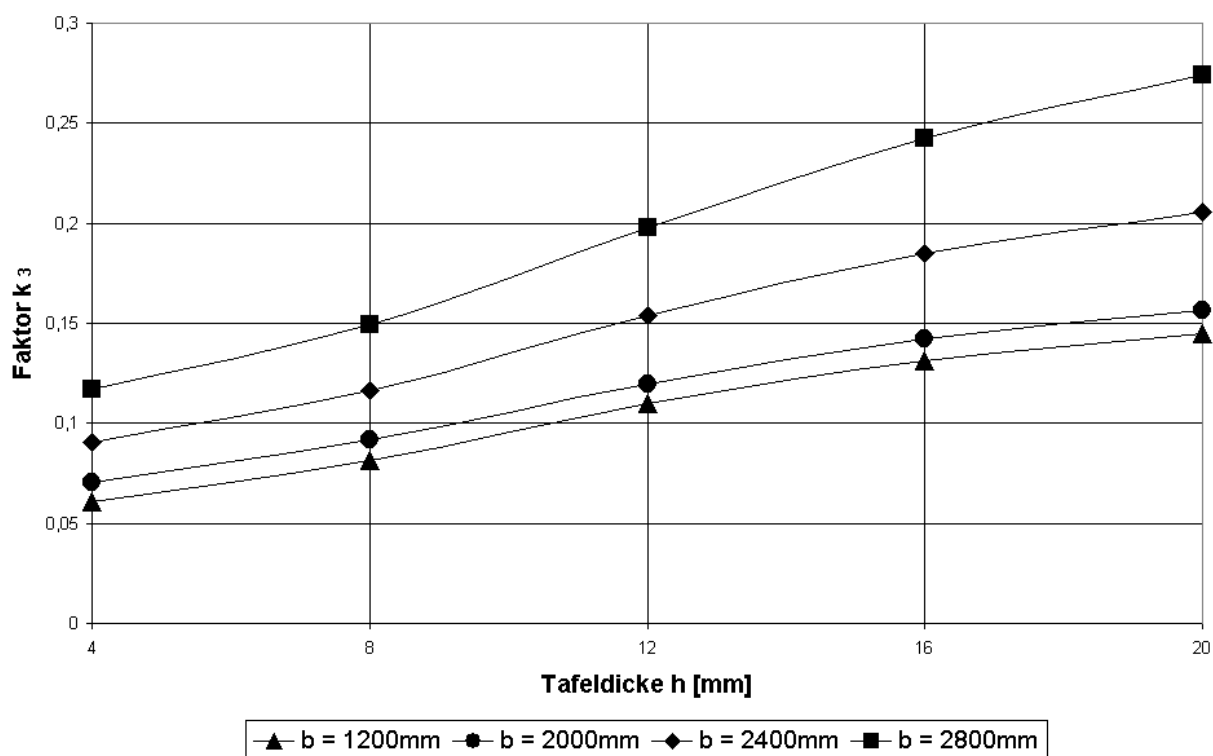
b [mm]	Tafeldicke h [mm]	4	8	12	16	20
	a [mm]	1600	1600	1600	1600	1600
	1000	39,89	6,84	2,80	1,45	0,83
	1200	49,81	8,40	3,34	1,69	0,96
	1400	64,70	10,73	4,19	2,09	1,17
	1600	86,61	14,21	5,50	2,73	1,53
	1800	117,94	19,21	7,43	3,69	2,07
	2000	161,48	26,17	10,15	5,08	2,86
	2200	220,29	35,57	13,85	6,98	3,95
	2400	297,74	47,89	18,73	9,51	5,41
	2600	397,48	63,70	24,99	12,78	7,31
	2800	523,39	83,54	32,86	16,99	9,84
3000	679,65	108,02	42,94	22,39	13,01	

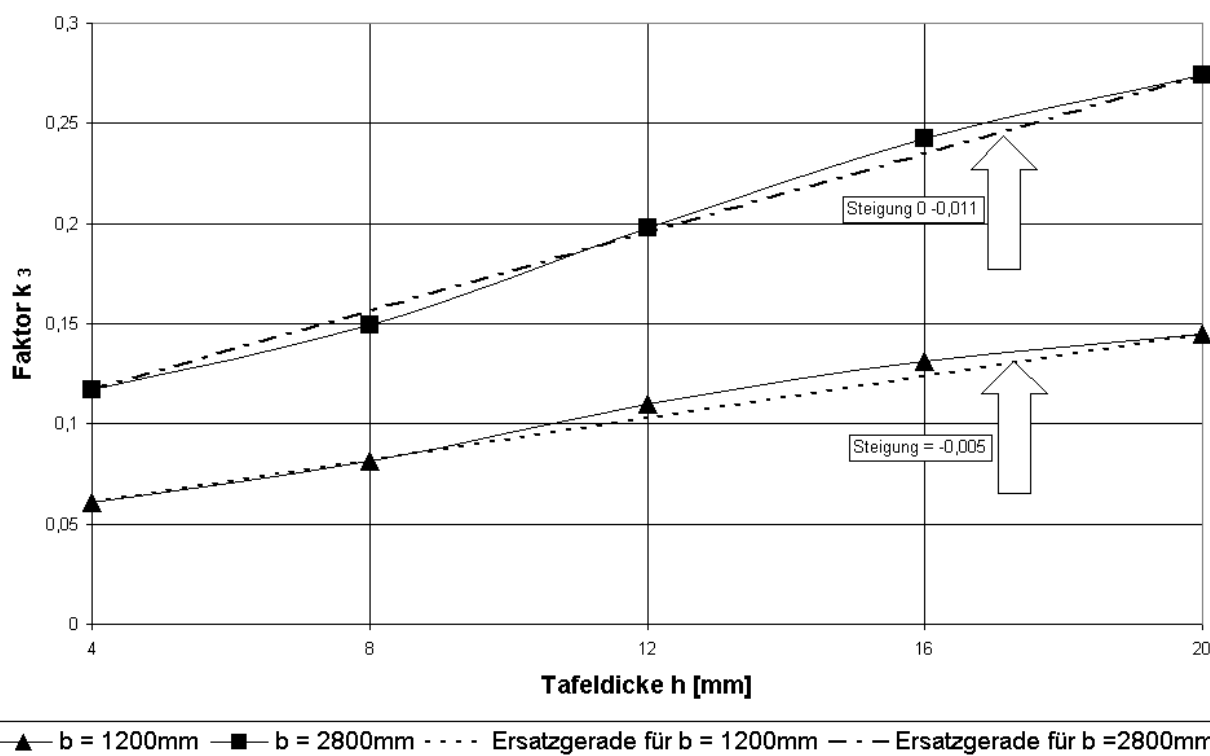
Bild 7.15: Maximale Durchbiegung [mm] für alle Glastafeldicken ($a = 1600$ mm)

Unter Anwendung der Formel $\frac{w \cdot E \cdot h^3}{a^2 \cdot b^2 \cdot p_d} = k_3$ (siehe Formel 7.3) konnte aus diesen Werten

der Faktor k_3 zurückgerechnet werden. Das Ergebnis dieser Rückrechnung ist für die Tafelabmessung $a = 1600$ mm in Bild 7.16 in Tabellenform und in Bild 7.17 grafisch angegeben. Der Übersichtlichkeit halber ist in Bild 7.17 der Faktor k_3 nicht für alle Abmessungen b aufgetragen, sondern nur für die Abmessungen 1200 mm, 2000 mm, 2400 mm und 2800 mm.

b [mm]	Tafeldicke h [mm]	4	8	12	16	20
	a [mm]	1600	1600	1600	1600	1600
1000		0,07	0,10	0,13	0,16	0,18
1200		0,06	0,08	0,11	0,13	0,15
1400		0,06	0,08	0,10	0,12	0,13
1600		0,06	0,08	0,10	0,12	0,13
1800		0,06	0,08	0,11	0,13	0,14
2000		0,07	0,09	0,12	0,14	0,16
2200		0,08	0,10	0,14	0,16	0,18
2400		0,09	0,12	0,15	0,18	0,21
2600		0,10	0,13	0,17	0,21	0,24
2800		0,12	0,15	0,20	0,24	0,27
3000		0,13	0,17	0,23	0,28	0,32

Bild 7.16: Faktor k_3 für alle Glastafeldicken ($a = 1600$ mm)Bild 7.17: Faktor k_3 über alle Glastafeldicken ($a = 1600$ mm)

Bild 7.18: Ersatzgeraden für den Faktor k_3

Zur weiteren Reduzierung der Tafelanzahl wurden die Kurven für den Faktor k_3 aus Bild 7.17 durch Geraden ersetzt. Dies ist in Bild 7.18 für die Abmessungen $b = 1200$ mm und $b = 2800$ mm dargestellt. Der in Bild 7.18 dargestellte Vorgang kann für alle Abmessungen a und b wiederholt werden. In Bild 7.19 sind die Steigungen der für die Abmessung $a = 1600$ mm erhaltenen Geraden als Faktor k_4 angegeben.

b [mm]	Tafeldicke h [mm]	4	20	k ₄
	a [mm]	1600	1600	
1000		0,07	0,18	-0,007
1200		0,06	0,15	-0,005
1400		0,06	0,13	-0,005
1600		0,06	0,13	-0,004
1800		0,06	0,14	-0,005
2000		0,07	0,16	-0,005
2200		0,08	0,18	-0,006
2400		0,09	0,21	-0,007
2600		0,10	0,24	-0,008
2800		0,12	0,27	-0,010
3000		0,13	0,32	-0,012

Bild 7.19: Faktor k₄

Mit dem Faktor k₄ kann die maximale Durchbiegung nun berechnet werden aus:

$$w_{\max} = [k_3 - k_4 \cdot (h - 4)] \cdot \frac{a^2 \cdot b^2}{h^3} \cdot \frac{p_d}{E} \quad (7.5)$$

Die Faktoren k₃ und k₄ für alle Tafelabmessungen und verschiedene Randabstände sind in den Anhänge A7 bis A9 zusammengestellt. Zur besseren Anwendbarkeit erfolgt die Angabe wieder in grafischer Form. Deutlich erkennbar ist, dass die Berücksichtigung des Faktors k₄ nur zu einer geringen Verbesserung des Ergebnisses führt. Für eine Vordimensionierung reicht es deshalb aus, die maximale Durchbiegung aus Gleichung 7.6 zu ermitteln:

$$w_{\max} = k_3 \cdot \frac{a^2 \cdot b^2}{h^3} \cdot \frac{p_d}{E} \quad (7.6)$$

7.5.4 Tafeln zur Bestimmung der horizontalen Auflagerkräfte

Neben dem Nachweis der maximalen Spannung und der maximalen Durchbiegung interessieren den bemessenden Ingenieur auch die Auflagerkräfte, mit denen die Unterkonstruktion dimensioniert werden muss. In Kapitel 6 wurde gezeigt, dass die Auflagerkräfte von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig sind. In Bild 7.20 bis Bild 7.22 ist das Verhältnis der horizontalen Auflagerkraft zur vertikalen Auflagerkraft einer 20 mm dicken Glastafel für die

Randabstände 100 mm, 200 mm und 300 mm über das gesamte in dieser Arbeit untersuchte Tafelabmessungsspektrum dargestellt.

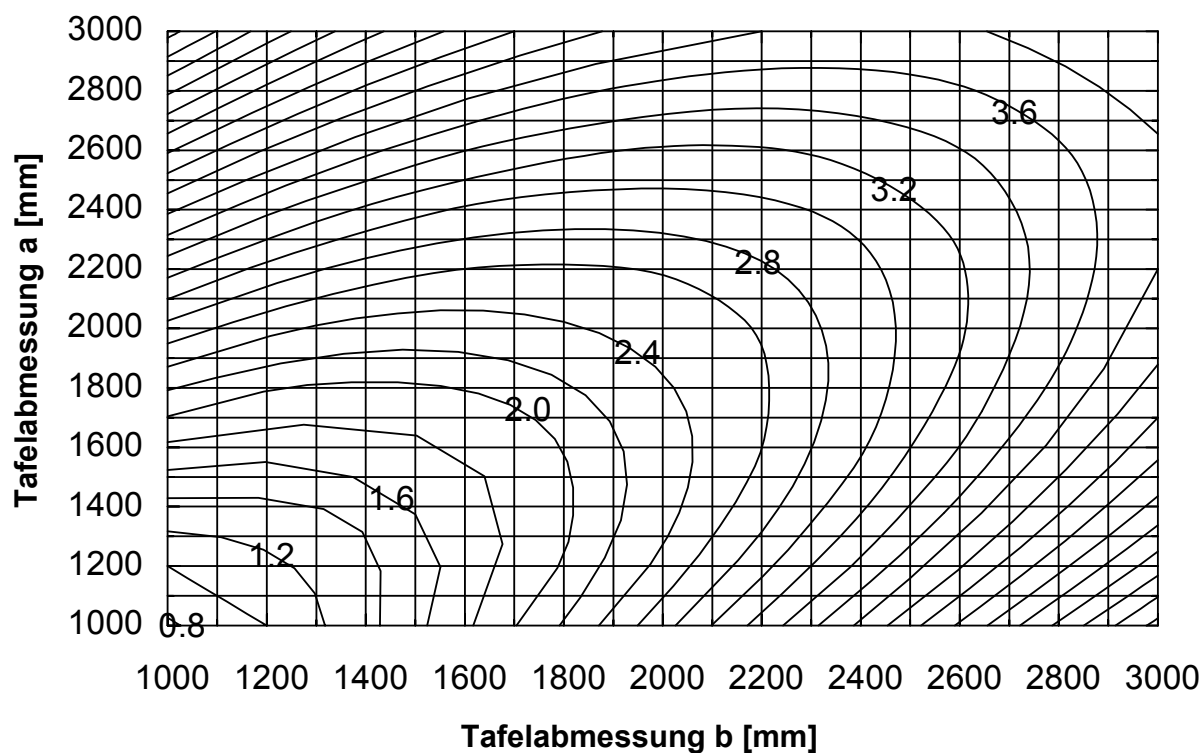


Bild 7.20: Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Auflagerkraft für einen Randabstand von 100 mm

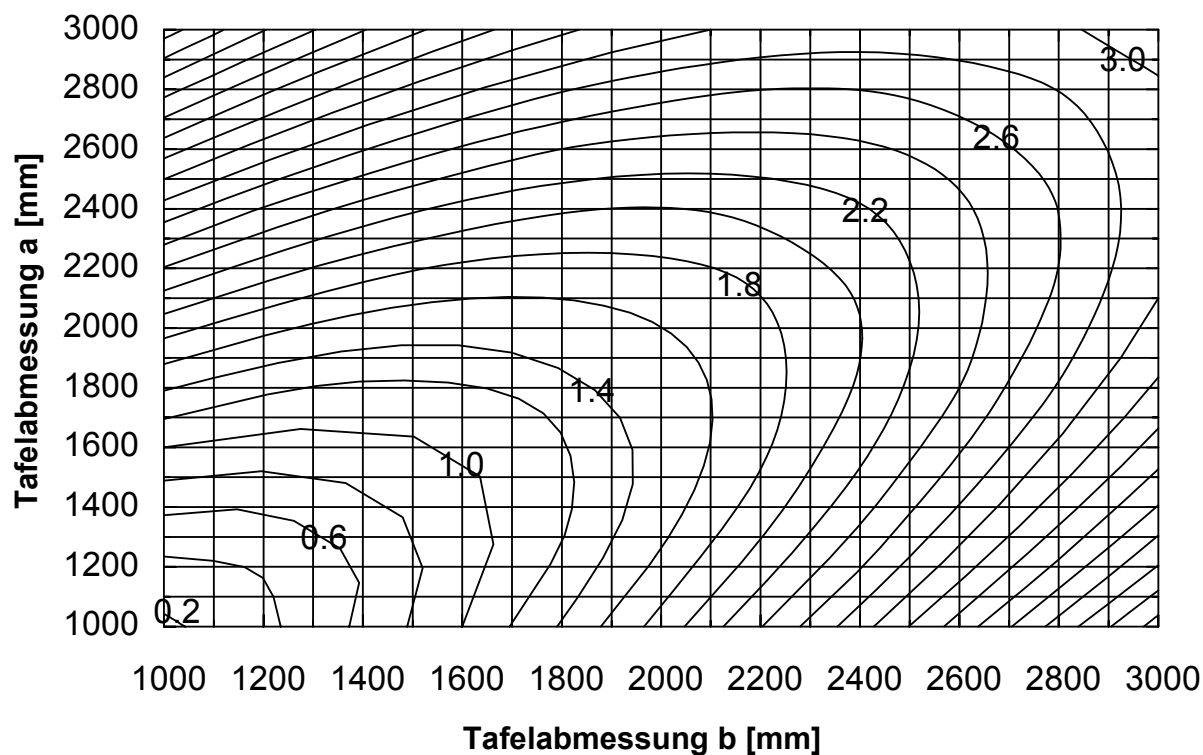


Bild 7.21: Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Auflagerkraft für einen Randabstand von 200 mm

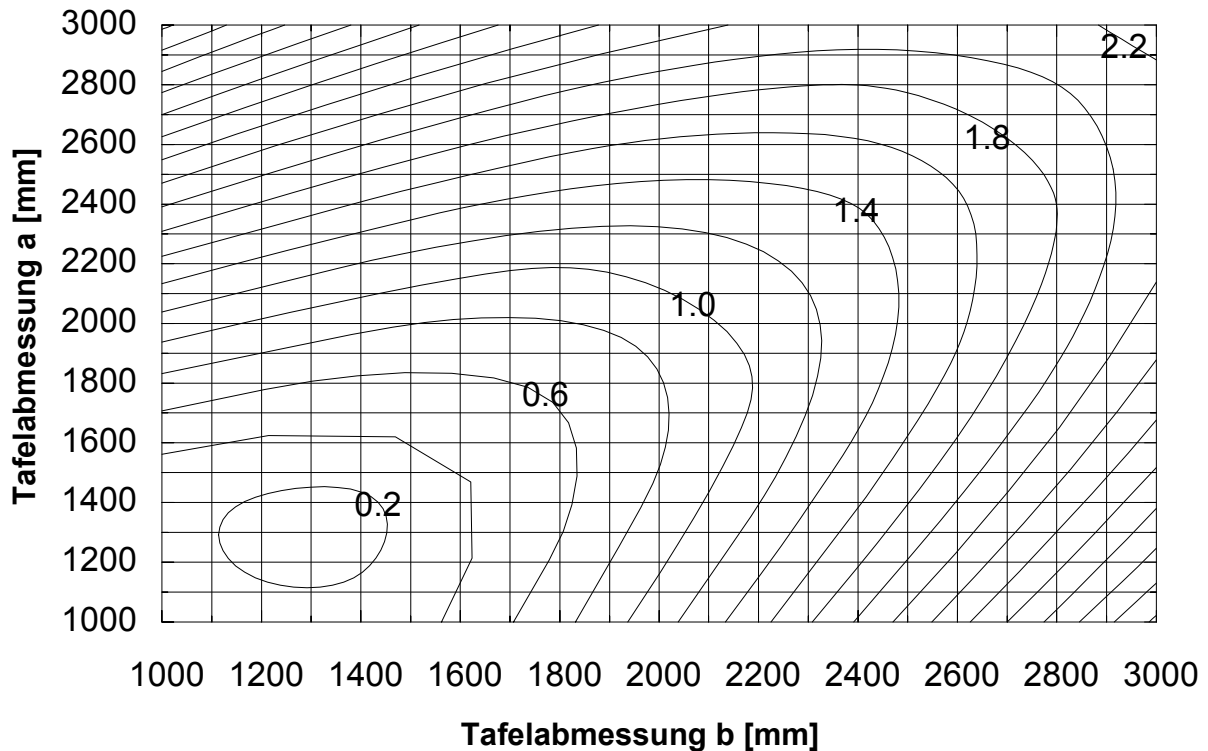


Bild 7.22: Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Auflagerkraft für einen Randabstand von 300 mm

Bei Betrachtung der obigen Bilder sind zwei wichtige Effekte zu beobachten. Der erste Effekt wird vom Randabstand der Lochbohrungen bestimmt, da sich in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Randabstand und Tafelabmessungen unterschiedliche Durchbiegungsverhältnisse zwischen Tafelmitte und Tafelrand einstellen. Dieser Effekt tritt besonders deutlich bei Tafelabmessungen von 1000 mm x 1000 mm bis 1600 mm x 1600 mm auf. Bei einem Randabstand von 300 mm (siehe Bild 7.22) sind die horizontalen Auflagerkräfte bei einer Tafel mit den Abmessungen 1200 mm x 1200 mm fast Null. Dies liegt an den bereits in Kapitel 6.3 getroffenen Aussagen, dass in diesen Fällen im Lochbereich ein annähernd rotationssymmetrischer Zustand vorliegt.

Als zweiter Effekt ist zu sehen, dass eine kleinere Tafelfläche nicht automatisch zu einem kleineren Verhältnis zwischen der horizontalen und vertikalen Auflagerkraft führt. Dies ist für den Fall der 20 mm dicken Tafel (Randabstand 100 mm) mit der konstanten Breite $a = 2400$ mm in Bild 7.23 abgebildet.

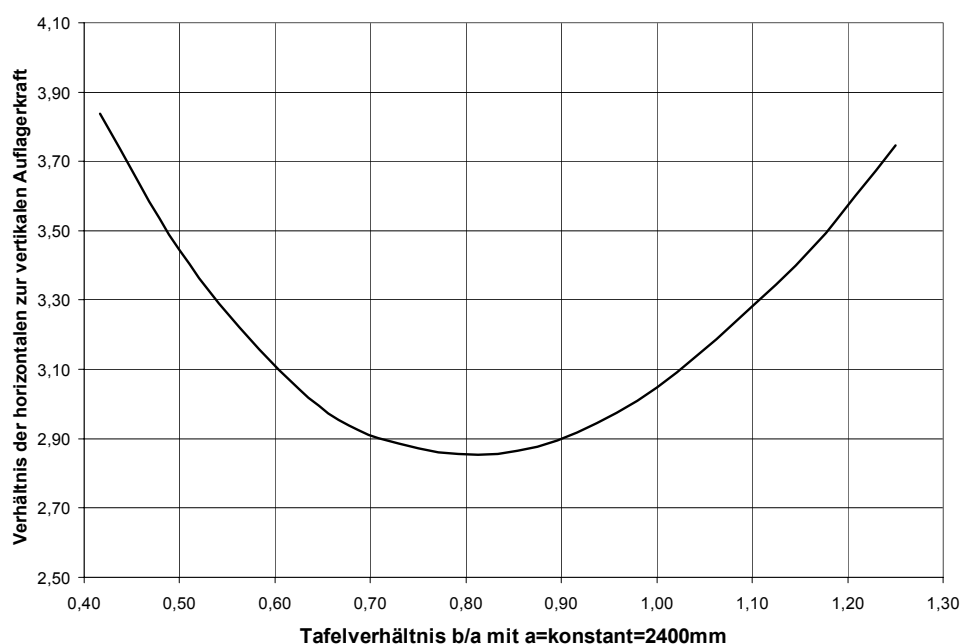
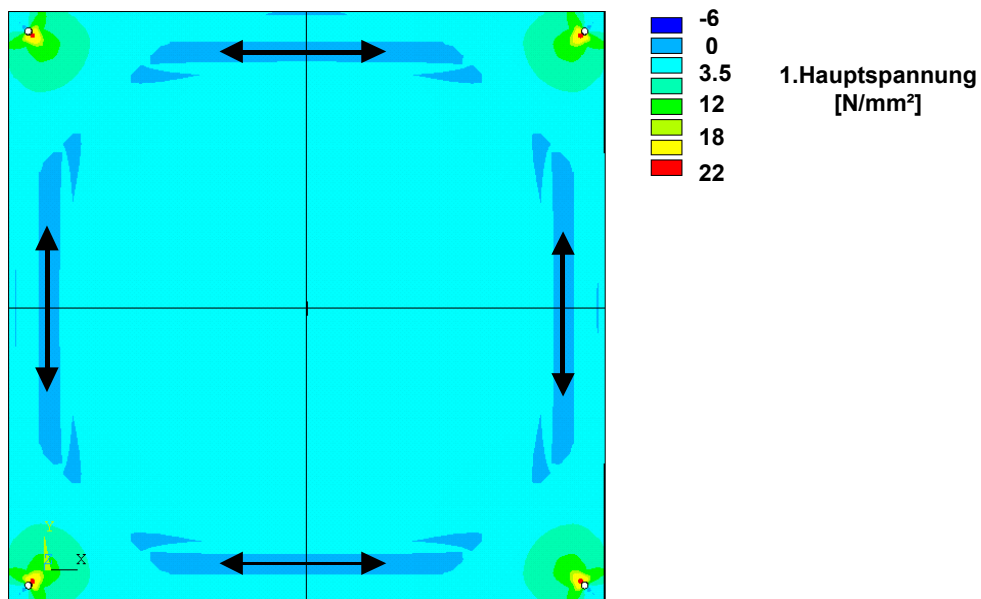


Bild 7.23: Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Auflagerkraft in Abhängigkeit der Tafelabmessungen ($h = 20 \text{ mm}$, Randabstand 100 mm)

Dieser Effekt ist auf das von den Tafelabmessungen abhängige Tragverhalten der Glastafel zurückzuführen. Bei einem Verhältnis $b/a = 0,42$ trägt die Glastafel praktisch nur in einer Richtung ab. Das Tragverhalten ist mit einem Balken zu vergleichen. Bei steigendem Verhältnis von b/a trägt die Glastafel mehr und mehr als Platte. Dadurch bildet sich auf der lastzugewandten Seite ein Druckring in der Tafel aus, der zur Reduzierung der horizontalen Auflagerkräfte führt (siehe Bild 7.24). Solch ein Effekt wurde von Hess [41] bereits für vierseitig liniengelagerte Glastafeln beschrieben.

Tafeloberseite mit Druckring



Tafelunterseite mit Zugbändern

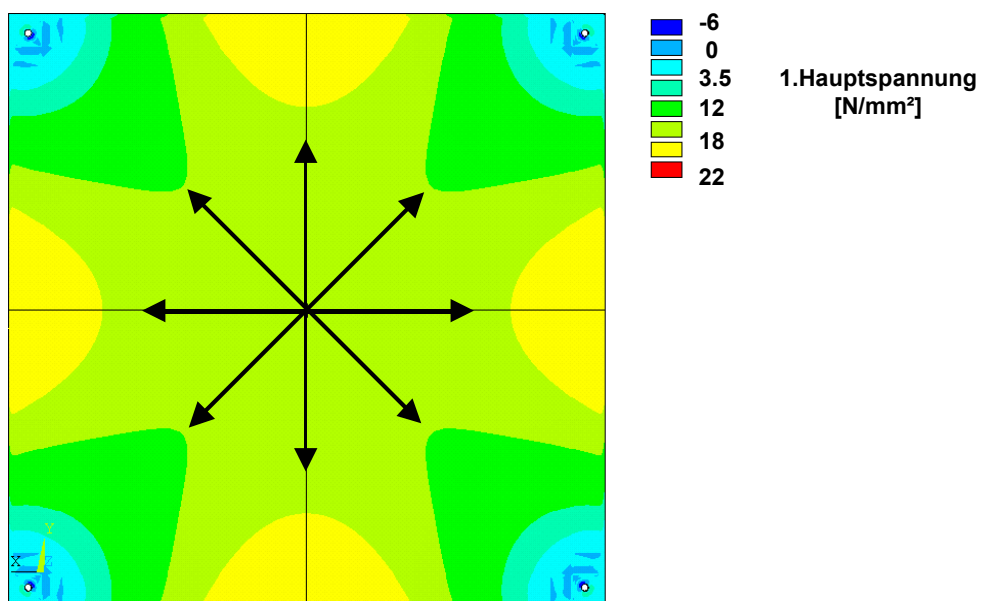


Bild 7.24: Plattentragwirkung mit Druckring

Neben den oben angesprochenen Effekten muss zudem die Tafeldicke beachtet werden, da auch diese maßgeblichen Einfluss auf das Tragverhalten der Tafel hat (siehe Kapitel 6.7). In Bild 7.25 ist das Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Auflagerkraft für verschiedene Tafeldicken beispielhaft für die konstante Tafelabmessung $a=1800$ mm und den konstanten

Randabstand 300 mm abgebildet. Analoge Bilder ergeben sich für andere Randabstände und Tafelabmessungen. Aus Bild 7.25 ist ersichtlich, dass das Verhältnis von der horizontalen zur vertikalen Auflagerkraft bei einer Tafeldicke von 12 mm am größten wird. Für die Vordimensionierung werden deshalb für diese Tafeldicke Bemessungstafeln erstellt.

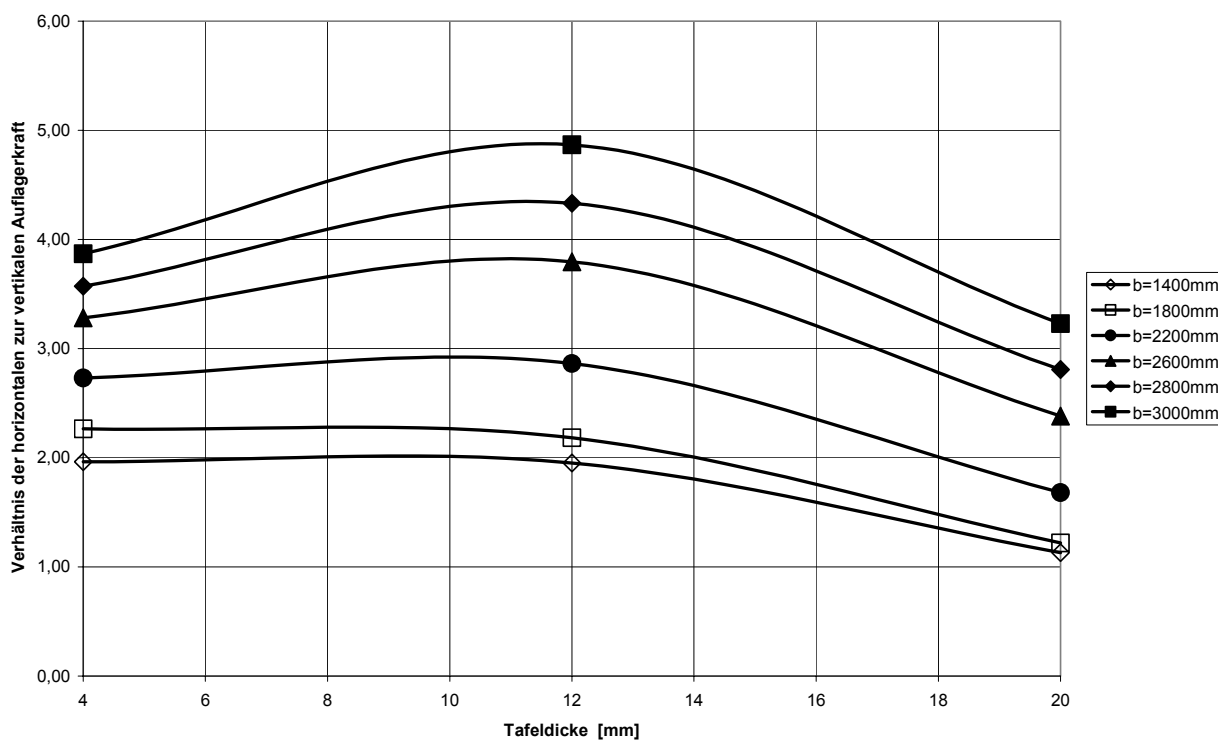


Bild 7.25: Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Auflagerkraft in Abhängigkeit der Tafeldicke ($a = 1800 \text{ mm}$, $a_r = b_r = 300 \text{ mm}$)

In Bild 7.26 ist die Bemessungstafel für Randabstände von 100 mm beispielhaft dargestellt. Das Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Auflagerkraft wird als Faktor k_5 bezeichnet. Den Anhängen A8 und A9 sind die Bemessungstafeln für die Randabstände 200 mm und 300 mm zu entnehmen.

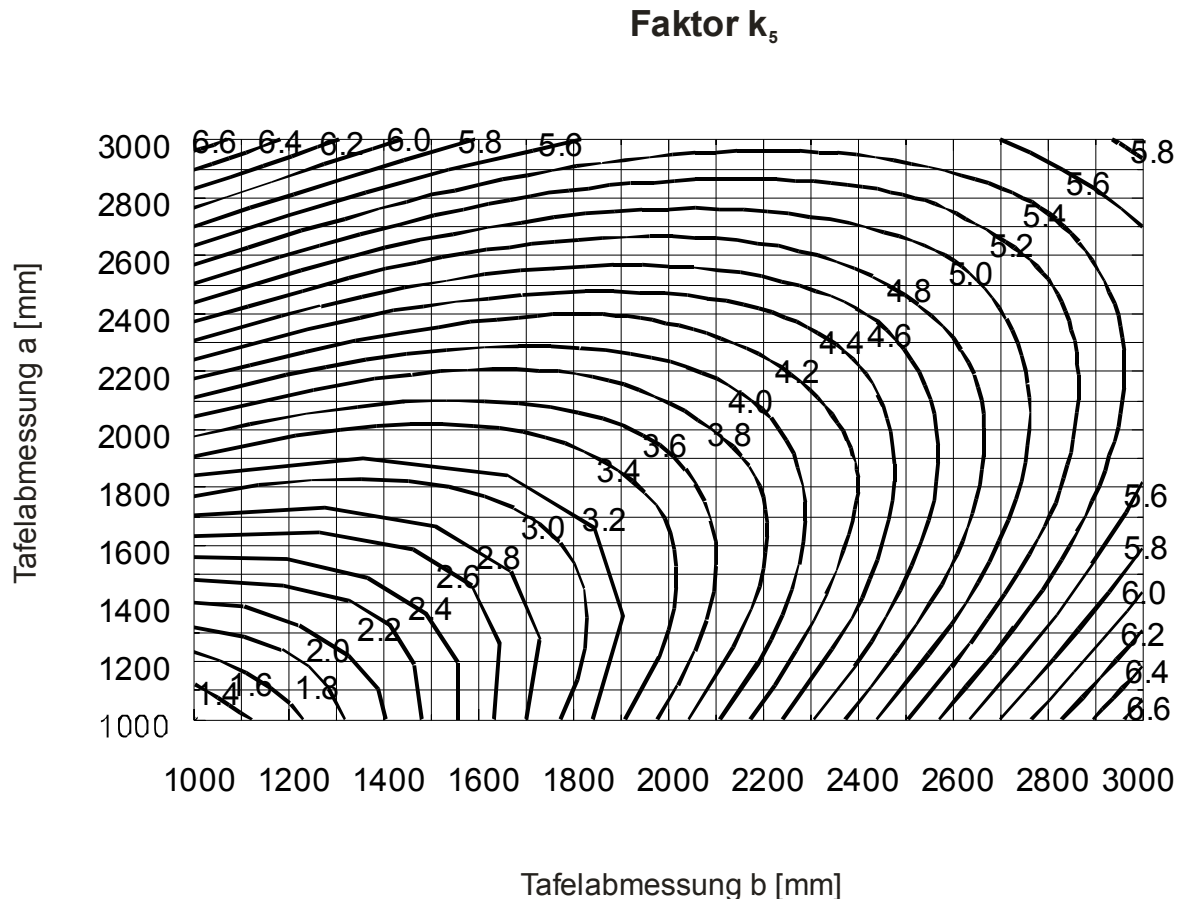


Bild 7.26: Tafel zur Bestimmung der horizontalen Auflagerkräfte (Randabstand 100 mm)

7.6 Anwendbarkeit der Tafeln für die VSG-Bemessung

Bei der Entwicklung der Vordimensionierungstafeln und -formeln in den vorangegangenen Abschnitten erfolgte eine Beschränkung auf monolithische, gebohrte Glastafeln. Diese Art der Verglasung wird im Überkopfbereich und im Fassadenbereich immer seltener eingesetzt, da von bauaufsichtlicher Seite oft VSG-Verglasungen gefordert werden. Die Folien der VSG-Tafeln sollen im Falle eines Bruches der Glasscheiben dafür sorgen, dass sich keine großen, scharfkantigen Glasbruchstücke ablösen können, sondern an der Folie haften bleiben. Darüber hinaus sollen die Folien eine Verbundwirkung zwischen den einzelnen Glasscheiben der VSG-Tafel gewährleisten. Die Frage nach dem ansetzbaren Grad dieser Verbundwirkung bei der Glastafelbemessung ist Ausgangspunkt zahlreicher Untersuchungen, da die Verbundwirkung von einer großen Anzahl von Parametern abhängt. Diese sind z.B.:

- Lastdauer
- Foliendicke

- Belastungsgröße
- Tafelabmessungen
- Herstellprozess
- Folienmaterial
- Temperatur

Die Arbeiten zum Normenentwurf DIN 18008 „Bemessungs- und Konstruktionsregeln für Bauprodukte aus Glas“ zeigen, dass selbst mit den neuen Erkenntnissen aus [36] und [73] verbindliche Aussagen über den ansetzbaren Verbundgrad schwierig sind. Auch über das Verhalten des Verbundes im Lochbereich gibt es nur wenige Untersuchungen [31], [36].

Zur einfachen Lösung des Problems wird deshalb in [14] vereinfacht ein Scherungsübertragungskoeffizient vorgeschlagen. Dieser wird je nach Belastungsdauer zu 0 oder zu 1 gewählt. Ist die Belastungsdauer sehr kurz, z.B. bei einem Personenanprall auf eine Fassadenverglasung, so wird der Scherungsübertragungskoeffizient zu 1 angenommen und das Tragverhalten der VSG-Einheit entspricht dem einer monolithischen Tafel.

Bei längerer Lasteinwirkung darf keine Verbundtragwirkung angesetzt werden. Die Glasscheiben der VSG-Einheit tragen wie Einzelscheiben. Für die Vordimensionierung von Einfachverglasungen im Überkopfbereich ist es ausreichend, nur diesen Fall zu betrachten. Die von den Einzelscheiben aufzunehmenden Flächenlasten ergeben sich nach [76] zu:

$$p_v = \frac{h_v^3}{\sum_{v=1}^m h_v^3} \cdot p \quad (7.7)$$

Hier sind:

v = Nummer der Einzelscheiben im Laminat

m = Anzahl der Einzelscheiben im Laminat

p = Gesamte Flächenlast

h = Plattendicken

Mit diesen Flächenlasten und den Dicken der Einzelscheiben des VSG, kann die Vordimensionierung von punktgestützten VSG-Tafeln auch mit den in Kapitel 7.5 vorgestellten Tafeln und Formeln erfolgen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die Einflüsse folgender Faktoren auf die Lastabtragungsmechanismen im Lochbereich vierpunktgestützter Glastafeln untersucht:

- Einfluss der Lochverfüllung
- Einfluss der Randabstände
- Einfluss der EPDM-Steifigkeit
- Einfluss der Halterausführung
- Einfluss der Bohrlochgröße
- Einfluss der Tafeldicke

Grundlage der Untersuchungen waren numerische Berechnungen mit einem in dieser Arbeit entwickelten FE-Modell der punktgestützten Glastafel, das durch Verwendung von Volumen- und Kontaktelementen alle möglichen Lastabtragungsmechanismen realitätsnah abbilden konnte. Die Frage nach der notwendigen Netzdichte im Stützbereich der abgebildeten Glastafeln wurde dadurch beantwortet, dass das vierpunktgestützte System schrittweise zur Kreisringplatte mit Ringlast abstrahiert wurde. Durch dieses Vorgehen wurde eine ausreichende Netzdichte für die hier verwendeten Volumenelemente festgelegt.

Die mit dem FE-Modell berechneten Spannungs- und Kontaktkräfteverteilungen im Lochbereich punktgestützter Glastafeln wurden dreidimensional dargestellt. Diese Darstellungen ermöglichten, die Aktivierung der einzelnen Lastabtragungsmechanismen in Abhängigkeit der oben aufgelisteten Faktoren aufzuzeigen und deren Einfluss auf die bemessungsrelevanten Größen (Spannung, Durchbiegung, Auflagerkräfte) zu beschreiben. Es wurde gezeigt, dass die Lastabtragung über drei Lastwege erfolgen kann:

1. Über Kontakt zwischen den Punkthaltertellern und der Glasfläche
2. Über Reibung zwischen den Punkthaltertellern und der Glasfläche

3. Über Kontakt zwischen dem Punkthalterglasdickebolzen und dem Bohrungsrand des Glases

Dabei hat die Lastübertragung über Reibung zwischen den Punkthaltertellern und der Glasfläche nur bei unverfüllten Bohrlöchern einen Einfluss. Bei verfüllten Bohrlöchern ist die Abbildung dieses Lastweges nicht unbedingt erforderlich, während die Abbildung der beiden anderen Lastwege für eine korrekte Bemessung dieser Systeme notwendig ist.

Die Verifikation des mit dem FE-Programm ANSYS [4] aufgebauten Modells der vierpunktgestützten Glastafel erfolgte durch Vergleichsberechnungen mit dem FE-Programm SJ MEPLA [80] sowie durch Nachrechnung verschiedener im Rahmen dieser Arbeit durchgeführter Versuchsreihen.

Das verifizierte FE-Modell bildete auch den Ausgangspunkt der numerischen Parameterstudien, mit deren Ergebnissen Vordimensionierungstafeln und -formeln für vierpunktgestützte, monolithische Glastafeln unter gleichförmiger Flächenlast entwickelt wurden. Die Entwicklung der Bemessungshilfen erfolgte für den in dieser Arbeit verwendeten Punkthaltertyp. Sie sind trotzdem auch für andere Punkthaltervarianten mit gleicher Tellergröße (mit Ausnahme von Senkkopfhaltern) als vorsichtige Abschätzung verwendbar, da bei der Entwicklung günstig wirkende Einflüsse (Nachgiebigkeit der Unterkonstruktion) nicht berücksichtigt wurden. Darüber hinaus sind die Bemessungshilfen unter Vernachlässigung der Verbundwirkung auch für die Bemessung von Verbundsicherheitstafeln anwendbar.

8.2 Ausblick

Die Untersuchungen dieser Arbeit beschränkten sich auf den in der Praxis am häufigsten auftretenden Fall der vierpunktgestützten, doppeltsymmetrischen Glastafel.

Aufgrund der Wünsche der Architekten kommen heute Konstruktionen mit unsymmetrischen, mehrpunktgelagerten Glastafeln zum Einsatz. Zudem werden statt Tellerkopfhaltern zur Schaffung einer planen Glasfläche vermehrt Senkkopfhalter eingesetzt. Das Tragverhalten solcher Systeme ist bisher nicht untersucht worden.

Ebenfalls nicht untersucht wurde bislang der Einfluss der Nachgiebigkeit der Unterkonstruktion. Auch diese Arbeit geht von einer unnachgiebigen Unterkonstruktion aus, die zu hohen horizontalen Auflagerkräften im Anschluss führt.

Eine weitere Einschränkung erfolgte in dieser Arbeit durch die ausschließliche Betrachtung von Horizontalverglasungen. Werden punktgestützte Glastafeln als Fassadenelemente verwendet, so muss dem Lastfall der gleichförmigen Flächenlast aus Wind noch der Lastfall Eigengewicht der Glastafel überlagert werden.

Auch die Berücksichtigung der Verbundwirkung von Verbundsicherheitsglastafeln ist trotz der zahlreichen neuen Untersuchungen noch nicht vollständig gelöst. Insbesondere über die Verbundwirkung im Stützbereich gebohrter Glastafeln gibt es nur wenige, noch nicht abgesicherte, Aussagen. Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode, Spannungs- und Kontaktkräfteverteilungen im Lochbereich punktgestützter Glastafeln dreidimensional darzustellen, kann dazu beitragen, über diesen Fragepunkt nähere Erkenntnisse zu gewinnen.

9 **Schrifttum**

- [1] Aalami, B.; Williams, D.G.: Thin Plate Design for Transverse Loading, Halsted Press Book, Wiley, New York, 1975.
- [2] Albrecht, G.; Gräf, H.; Siebert, G.: Konstruktiver Glasbau an der TU München – Untersuchungen zum Tragverhalten von Verbundglas, Stahlbau, Heft 68, Ernst & Sohn, 1999.
- [3] Albrecht, G.; Gräf, H.; Siebert, G.: Das Verhalten von Verbundsicherheitsglas unter dynamischer Beanspruchung, VDI-Berichte 1572, März 2000.
- [4] ANSYS Release 6.1; Manuals; ANSYS, Inc.; CAD-FEM GmbH, München, 2002.
- [5] Beck, Kh.: Punktgestützte Glastafeln - Einfluss der Netzdichte auf den Spannungsgradienten im Bohrlochbereich, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, TH Karlsruhe, Mai 2003.
- [6] Blank, K.: Dickenbemessung von vierseitig gelagerten rechteckigen Glasscheiben unter gleichförmiger Flächenlast, Institut für konstruktiven Glasbau, Gelsenkirchen, 1993.
- [7] Bohmann, D.: Ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Verbundglasscheiben, Dissertation, Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen, Shaker Verlag Aachen, 1999.
- [8] Brendler, S.; Albrecht, N.: Verifizierung und Kalibrierung von FE-Punkthaltermo-Modellierungen an Bauteilversuchen und Modellrechnungen als Grundlage für die ingenieurmäßige Bemessung punktgelagerter Glastafeln mit verschiedenen Geometrien, Fachseminar „Glas im konstruktiven Ingenieurbau 3“, FH München, 2002.
- [9] Brookes ; Greek: Konstruktive Lösungen in der High-Tech Architektur, Birkhäuser, Juni 1998.
- [10] Bucak, Ö.: Glas im konstruktiven Ingenieurbau, Stahlbaukalender, Verlag Ernst & Sohn, 1999.
- [11] Burmeister, A.: Auf den Punkt gebracht, Glaswelt, Januar 2002.
- [12] Burmeister, A.: Bemessung punktgelagerter Fassaden-Konstruktionen, Glas im Bauwesen, Darmstädter Statik Seminar, Bericht Nr. 13, 1998.

- [13] Buselmeier, M.: Untersuchung zur Spannungsverteilung im Lochbereich punktgestützter Glastafeln, Vertiefearbeit, Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, TH Karlsruhe, Januar 2001.
- [14] BÜV-Empfehlungen für die Bemessung und Konstruktion von Glas im Bauwesen, Der Prüfenieur, April 2001.
- [15] Danz, R.: Glasdach auf Schloss Juval in Südtirol, Glas - Architektur und Technik, Sonderheft, Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart, Januar 1997.
- [16] Deutscher Ausschuss für Stahlbau (DASt): Experimentelle und analytische Untersuchungen an neuartigen Glas-Stahl-Verbindungen im Hinblick auf zukünftige Einsatzgebiete und Bemessungskonzepte, Forschungsbericht, Stahlbau Verlags- und Service GmbH, 2003.
- [17] Deutsches Institut für Bautechnik, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-70.3-29: Vordachsysteme ROOFLITE-PK und ROOFLITE-PZ, Juni 1999.
- [18] Deutsches Institut für Bautechnik, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.3-6: Bauteile und Verbindungsmittel aus nichtrostenden Stählen, September 1998.
- [19] Deutsches Institut für Bautechnik, Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen – und Zulassungsverfahren, Berlin, Mai 1986.
- [20] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-70.2-19: Punktförmig gelagerte Vertikalverglasung LITEWALL-Mono, September 1999.
- [21] Deutsches Institut für Bautechnik: Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C, Ausgabe 2002/1, DIBt Mitteilungen Sonderheft Nr. 26 vom 31.07.2002, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2002.
- [22] Deutsches Institut für Bautechnik: Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen, in: Mitteilungen Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Nr.6, 1998.
- [23] DIN 1055, Teil 4: Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten; Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken, Berlin, August 1986.
- [24] DIN 1249: Flachglas im Bauwesen
- Teil 11: Glaskanten, Begriff, Kantenform und Ausführung, 1986.
 - Teil 12: Einscheibensicherheitsglas, 1990.

- [25] DIN EN 13474: Glas im Bauwesen
- Teil 1: Allgemeine Grundlagen für Entwurf, Berechnung und Bemessung, 1999.
 - Teil 2: Bemessung von Glasscheiben; Bemessung für gleichmäßig verteilte Belastungen, 2000.
- [26] DIN EN ISO 12543: Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas
- Teil 1: Definitionen und Beschreibung von Bestandteilen
 - Teil 2: Verbund-Sicherheitsglas
 - Teil 3: Verbundglas
 - Teil 4: Verfahren zur Prüfung der Beständigkeit
 - Teil 5: Maße und Kantenbearbeitung
 - Teil 6: Aussehen
- [27] DIN 18516 – Teil 4: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet; Einscheibensicherheitsglas, Anforderungen, Bemessung, Prüfung, Februar 1990.
- [28] DIN EN 10088, Teile 1 - 3 : Nichtrostende Stähle, Deutsche Fassung , 1995.
- [29] DIN EN 12150-1: Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas, Teil 1, Definition und Beschreibung, Deutsche Fassung, 2000.
- [30] DIN V ENV 1991-2: Grundlagen von Entwurf, Berechnung und Bemessung sowie Einwirkungen auf Tragwerke.
- [31] Dinger, C.: Vergleich der Spannungsverteilung im Lochbereich von punktgestützten, monolithischen Glastafeln mit Verbundsicherheitstafeln, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, TH Karlsruhe, September 2001.
- [32] Feldmeier, F.: Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens zur Berücksichtigung der Klimabelastung bei der Bemessung von Isolierglas bei Überkopfverglasungen, Forschungsvorhaben, März 1995.
- [33] Feldmeier, F.: Belastung des tragenden Randverbundes von Isolierglas bei Structural Glazing durch klimatische Einflüsse, März 1995.
- [34] Gehring, A.: Berechnung punktgehaltener Glastafeln unter Berücksichtigung von Reibung und Kontakt, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, TH Karlsruhe, November 1999.
- [35] Glastik 2.1: Berechnungsprogramm zur Ermittlung von Glasdicken für Einfach-, Verbund- und Isolierglas, mkt Marketing-Kommunikations-Team GmbH, D-52477 Alsdorf, 1999.

- [36] Gräf, H.: Untersuchungen zum Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas bei linienförmig und punktueller Belastung, TU München, Dissertation, Juli 2003.
- [37] Haller, M.: Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Kirchhoff'schen Plattengleichung auf punktgestützte Glastafeln, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, TH Karlsruhe, Juni 1998.
- [38] Handbuch Üko Version 4.0 / 4.1, Sommer-Informatik GmbH, Rosenheim, 1999.
- [39] Hees, G.; Wulf, A.: Ermittlung der Bemessungsmomente in großformatigen Fassadenplatten, Die Bautechnik, Heft 5, 1978.
- [40] Hess, G.; Läer, R.; Latzke, E.: Stützkräfte und Bemessungsmomente zwei – und dreireihig starr lochrandgestützter dünnwandiger Fassadenplatten unter besonderer Berücksichtigung des Randüberstandes, Berichte aus dem konstruktiven Ingenieurbau, TU Berlin, 1983.
- [41] Hess, R.: Die Membranwirkung bei Platten großer Durchbiegung und deren Einfluss auf die Bemessung von Einfach- und Isolierverglasungen, Dissertation, ETH Zürich, 1985.
- [42] Hess, R.: Glas und Stahl; Dickenbemessung von Einfachverglasungen und Mehrfachisolierungen, Wissenschaft und Praxis, Band 56, 11. Stahlbauseminar Fachhochschule Biberach, 1988.
- [43] Hess, R.: Glasdickenbemessung, Verlag der Fachvereine an den Schweizer Hochschulen, Zürich, 1986.
- [44] Hilber, R.; Bergmeister, K.; Taferner, J.: Verbundsicherheitsglas: State of the Art – Ein Überblick, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur Wien, November 1999.
- [45] Hildebrand, B.: Punktgestützte Glastafeln, Diplomarbeit, Institut für Bauwesen, TU Berlin, 2001.
- [46] Hirschfeld, K.: Baustatik, Springer –Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1984.
- [47] Jäger, B.: Untersuchungen zum Einfluss von Stützweiten und Anordnung der Glastafelhalter auf die maximalen Hauptzugspannungen bei punktgestützten Glastafeln, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, TH Karlsruhe, August 1997.
- [48] Klinkenberg, A.; Jäger, B.; Saal, H.: Untersuchungen zur statisch optimalen Halterposition bei punktgestützten Glastafeln, Stahlbau, Heft 4, Ernst & Sohn, 1998.

- [49] Krtscha, A.: Bemessungshilfen für punktgestützte Glastafeln, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, TH Karlsruhe, Februar 2002.
- [50] Kutterer, M.; Görzig, R.: Glasfestigkeiten im Bohrlochbereich, Forschungsbericht IL Stuttgart, Dezember 1997.
- [51] Landesstelle für Bautechnik, Baden-Württemberg: Vereinfachtes Zustimmungsverfahren, Stand 12/2002.
- [52] Landesstelle für Bautechnik, Baden-Württemberg: Zusammenfassungen der wesentlichen Anforderungen an Verwendbarkeitsnachweise von Glashaltern im Rahmen von Zustimmungsverfahren in Baden-Württemberg, Stand 2/2000.
- [53] Laufs, W.: Die Bestimmung der Festigkeit thermisch vorgespannter Gläser, VDI –Berichte 1527, März 2000.
- [54] Laufs, W.: Ein Bemessungskonzept zur Festigkeit thermisch vorgespannter Gläser, Dissertation, Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen, 2000.
- [55] Lehmann, R.: Auslegung punktgehaltener Gläser. Stahlbau, Heft 4, Ernst & Sohn, 1998.
- [56] Lehmann, R.: Punktförmig gelagerte Glasscheiben, Glas – Architektur und Technik, Sonderheft, Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart, Juni 1996.
- [57] Markus, G.: Theorie und Berechnung rotationssymmetrischer Bauwerke, Werner –Verlag, Düsseldorf, 1967.
- [58] Mauthe, P.: Hit-HY50 – Relevante Produkteigenschaften für den Einsatz im Glasbau, HILTI Entwicklung Befestigungstechnik GmbH, Kaufering, 1999.
- [59] Meißner, M.: Berechnung punktgehaltener (vertikaler) Isolierglasscheiben, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, TH Karlsruhe, September 1998.
- [60] Mohren, R.: Lochleibungsversuche an gebohrtem ESG mit Verspritzungen, Fachverband Konstruktiver Glasbau, 6. Forschungsbericht, RWTH Aachen, Juli 2001.
- [61] Prüfbericht Nr. M 3090: Ermittlung mechanischer Kennwerte einer Elastomerplatte, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Universität Stuttgart, 1997.
- [62] Quint, M.: Glaskonstruktionen – Berechnung von punktförmig gehaltenen Systemen, Seminar Sofistik, München, Juni 1997.

- [63] Rupert, A.: Zum Tragverhalten punkt- und lochrandgestützter Platten unter besonderer Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Unterkonstruktion, Berichte aus dem konstruktiven Ingenieurbau, TU Berlin, 1983.
- [64] Saal, H.; Albrecht, N.: RODAN[®]-Glasklemmhalter Verwendbarkeitsnachweise: Beschreibung, Montage, Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität (TH) Karlsruhe, März 2000.
- [65] Saal, H.; Bergmeister, K., Albrecht, N. et al.: Abschlussbericht Craft – Forschungsprojekt „New Architectural Design through the Application of Innovative Cutting and Joining Methods using Laser“, TH Karlsruhe, 2001.
- [66] Saal, H.; Buca, J.: Experimentelle Untersuchung des Tragverhaltens der Befestigung von Glastafeln mittels RODAN[®]-Glasklemmhaltern, Bericht Nr. 953049/1, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität (TH) Karlsruhe, August 1996.
- [67] Saal, H.; Steidl, G.: Nichtrostende Stähle im Bauwesen, Stahlbaukalender, Verlag Ernst & Sohn, 2001.
- [68] Schneider, H.: Mindestanforderungen an Verwendbarkeitsnachweise punktförmig gestützter Glaskonstruktionen, Arbeitskreis Punktstützung des Fachverbandes Konstruktiver Glasbau e.V., Stuttgart, 1998.
- [69] Schneider, J.: Ein Beitrag zum Nachweis der Tragfähigkeit von Flachglas, Punktgelagerte und absturzsichernde Verglasungen, Dissertation, TU Darmstadt, 2001.
- [70] Schneider, J.: Festigkeit gebohrter Gläser, FE-Analysen und experimentelle Untersuchungen, Glas im Bauwesen, Darmstädter Statik Seminar, Bericht Nr. 13, 1998.
- [71] Schneider, J.: Mechanische Festigkeit und Bemessung gebohrter, punktgelagerter Gläser, VDI- Berichte Nr. 1527, 2000.
- [72] Schneider, J.; Shen, X.: FE-Modellierung für die Bemessung von Glas, Glas im Bauwesen, IKI, Universität Wien, Heft 34, November 1998.
- [73] Schuler, C.: Einfluss des Materialverhaltens von Polyvinylbutyral auf das Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas in Abhängigkeit von Temperatur und Belastung, TU München, Dissertation, Juli 2003.
- [74] Schuler, C.; Gräf, H.: Verbundtragverhalten von VSG, Fachseminar „Glas im konstruktiven Ingenieurbau 2“, München, 2001.
- [75] Sedlacek, G.; Laufs, W.: Stress Distribution in Thermally Tempered Glass Near The Edge, Corner and Hole, part 2: Distribution of thermal stresses, Glass Science and Technology, Heft 2, 1999.

- [76] Sedlacek, G.; Blank, K.; Laufs, W.; Güssen, J.: Glas im konstruktiven Ingenieurbau, Ernst & Sohn-Verlag, 1999.
- [77] Siebert, B.: Beitrag zur Berechnung punktgehaltener Gläser, TU München, Dissertation, in Vorbereitung.
- [78] Siebert, G.: Beitrag zum Einsatz von Glas als tragendes Bauteil im konstruktiven Ingenieurbau, TU München, Dissertation, Mai 1999.
- [79] Siebert, G.: Entwurf und Bemessung von tragenden Bauteilen aus Glas, Ernst & Sohn-Verlag, Berlin, 2001.
- [80] SJ MEPLA: Ein Statik-Programm zur Dimensionierung und Berechnung mehrschichtiger Platten (Sandwich-Systeme), Einführung in Theorie und praktische Beispiele aus dem Glasbaubereich, Schlösser & Jasper GmbH, Aachen.
- [81] Sobek, W.: Konstruieren mit Glas – Festigkeit und Tragverhalten. Glasbauatlas, Birkhäuser -Verlag, 1998.
- [82] Sobek, W.; Kutterer, M.; Messmer, R.: Rheologisches Verhalten von PVB im Schubverbund, Forschungsbericht IL Stuttgart, April 1998.
- [83] Sobek, W.; Kutterer, M.; Messmer, R.: Untersuchungen zum Schubverbund bei Verbundsicherheitsglas, Bauingenieur, Band 75, Januar 2000.
- [84] Stiglat, K.; Wippel, H.: Punktgestützte Rechteckplatten, Schweizerische Bauzeitung, 80. Jahrgang, Heft 29, Juli 1962.
- [85] Techen, H.: Fügetechnik im konstruktiven Glasbau, Dissertation, TU Darmstadt, Juni 1997.
- [86] Vahl, G.: Auszugversuche von Punkthaltern aus kreisringgestützten Glasscheiben, Diplomarbeit, Institut für Bauingenieurwesen, TU Berlin, 2000.
- [87] Wohlfahrt, R.: Determination of the Load Bearing Capacity of Large Scale Glass Panes by Detail Tests, Otto Graf Journal, Vol. 5, 1994.
- [88] Wohlfahrt, R.: Punktförmig gehaltene Glasscheiben – Erkenntnisse aus Schadensfällen, VDI – Berichte 1572, März 2000.
- [89] Wörner, J.-D.; Schneider, J.; Fink, A.: Glasbau: Grundlagen, Berechnung, Konstruktion, Springer -Verlag, Berlin, 2001.
- [90] ZSE Electronic Mess-Systeme & Sensortechnik GmbH: Auswerten von Messungen mit DMS-Rosetten von KYOWA, Technische Information 00/03.

Bildverzeichnis

Bild 1.1: Glasdach auf Schloss Juval [15].....	5
Bild 1.2: Lagerungsarten von Glastafeln.....	6
Bild 2.1: Belastung der Glastafel normal zur Glastafelebene	11
Bild 2.2: Belastung der Glastafel in der Glastafelebene	12
Bild 2.3: Kraftübertragung über Reibung	12
Bild 2.4: Messergebnisse der Reibungsversuche an Glastafeln mit einem Punkthalter [66]	13
Bild 2.5: Toleranzen an Glastafeln nach [10]	14
Bild 2.6: Lagerungsarten von Glastafeln nach [12]	16
Bild 2.7: Ausgleichselemente.....	17
Bild 2.8: Versagensmechanismen eines Punkthalters	22
Bild 2.9: Querkraftversuch 1	23
Bild 2.10: Querkraftversuch 2	23
Bild 2.11: Hebelarme bei den Querkraftversuchen 2	24
Bild 2.12: Normalkraftversuche	25
Bild 2.13: Interaktionsdiagramm zwischen Querkraft und Normalkraft [64].....	26
Bild 3.1: Produktionsbereich für Glastafeln nach [47]	28
Bild 3.2: Randabstand bei punktgestützten Glastafeln.....	30
Bild 4.1: SOLID 45 [4]	33
Bild 4.2: SHELL 63 [4].....	34
Bild 4.3: LINK 10 [4].....	35
Bild 4.4: CONTAC 52 [4].....	36
Bild 4.5: Modellierung der Glastafel (schematisch)	37
Bild 4.6: Lochbereich (schematisch).....	38
Bild 4.7: Modellierung des Punkthalters.....	38
Bild 4.8: Schubverformung der Elastomerringe	39
Bild 4.9: Modellierung des Übergangsbereiches Elastomerring-Glastafel	40
Bild 4.10: Vorgehensweise zur Überprüfung der Netzdichte	42

Bild 4.11: Lagerung der Kreisringplatte und Lastaufbringung.....	43
Bild 4.12: Verlauf der Krafteinleitung vom Punkthalter in die Platte über die Kontaktelemente für verschiedene Außenradien und Bohrlochdurchmesser (h = 10 mm)	44
Bild 4.13: Netzunterteilung der Kreisringplatte	47
Bild 4.14: Kreisringplatte mit Ringlast nach [57].....	48
Bild 4.15: Erhöhung der tangentialen Netzunterteilung A für eine Kreisringplatte (h = 10 mm) mit Außenradius 1000 mm und 15 mm Bohrloch bei einer Ringlast von $1000 \text{ N}/(2 \cdot \pi \cdot 31,5 \text{ mm})$	51
Bild 4.16: Erhöhung der tangentialen Netzunterteilung A für eine Kreisringplatte (h = 10 mm) mit Außenradius 1000 mm und 15 mm Bohrloch bei einer Ringlast von $1000 \text{ N}/(2 \cdot \pi \cdot 31,5 \text{ mm})$	51
Bild 4.17: Verlauf der Radialspannung für eine Kreisringplatte (h = 10 mm) mit Außenradius 100 mm und 15 mm Bohrloch bei einer Ringlast von $1000 \text{ N}/(2 \cdot \pi \cdot 31,5 \text{ mm})$ bzw. Einzellast von 1000 N	53
Bild 4.18: Verlauf der Tangentialspannung für eine Kreisringplatte (h = 10 mm) mit Radius 100 mm und 15 mm Bohrloch bei einer Ringlast von $1000 \text{ N}/(2 \cdot \pi \cdot 31,5 \text{ mm})$ bzw. Einzellast von 1000 N	53
Bild 4.19: Tangentialspannungsplot [N/mm^2] für eine Glastafel 1200 mm x 1200 mm x 10 mm.....	54
Bild 4.20: Vergleich der tangentialen Spannungsverläufe von Kreisringplatte und quadratischer vierpunktgestützter Glastafel.....	55
Bild 4.21: Tafel 1000 mm x 1000 mm x 4 mm mit Bohrlochrandabstand 100 mm.....	56
Bild 4.22: Tafel 1200 mm x 3000 mm x 4 mm mit Bohrlochrandabstand 100 mm.....	56
Bild 4.23: Tafel 3000 mm x 3000 mm x 4 mm mit Bohrlochrandabstand 100 mm.....	57
Bild 4.24: Maximaler Spannungsgradient im direkten Bohrlochbereich	58
Bild 4.25: Vergleich des Tangentialspannungsverlaufes bei radialer Netzverfeinerung im Punkthalterbereich (Tafel 3000 mm x 3000 mm x 4 mm).	59
Bild 4.26: Erhöhung der Netzunterteilung in Dickenrichtung für eine 10 mm Kreisringplatte mit Außenradius 1000 mm und 15 mm Bohrloch bei einer Ringlast von $1000\text{N}/(2 \cdot \pi \cdot 31,5\text{mm})$	60
Bild 4.27: Schalenmodell.....	61
Bild 4.28: Abbildung von Punkthaltern im Programm SJ-MEPLA [80]	62
Bild 5.1: Auszugversuch [10]	63
Bild 5.2: Biegezugversuch an einer Referenztafel 1100 mm x 360 mm [10]	63

Bild 5.3: Abscherversuche [10].....	64
Bild 5.4: Versuchsaufbau	65
Bild 5.5: Abmessungen der getesteten Glastafeln.....	66
Bild 5.6: Starrer Halter	67
Bild 5.7: Gelenkiger Halter	68
Bild 5.8: Nicht verfülltes Bohrloch	69
Bild 5.9: Verfülltes Bohrloch	69
Bild 5.10: Anordnung der DMS bei engem Loch ($d = 15 \text{ mm}$).....	71
Bild 5.11: Anordnung der DMS bei weitem Loch ($d = 35 \text{ mm}$).....	71
Bild 5.12: Bezeichnung der Messstellen	72
Bild 5.13: Viertelbrückenschaltung.....	74
Bild 5.14: Messeinrichtung	74
Bild 5.15: Bestimmung der Dehnungen im FE-Modell	77
Bild 6.1: Tafel 1600mm x 1200mm x 12mm links: unverfülltes Loch rechts: Füllmörtel (2750 N/mm^2)	88
Bild 6.2: Tafel 1600 mm x 1200 mm x 12 mm links: Füllmörtel (7000 N/mm^2) rechts: Füllmörtel (70000 N/mm^2)	89
Bild 6.3: Abtragung der Belastung aus Moment und Querkraft	91
Bild 6.4: Kontaktkraftverteilung in den Punkthalterdeckeln (Füllmörtelsteifigkeit 3000 N/mm^2) und am Bohrlochrand	92
Bild 6.5: Kontaktkraftverteilung in den Punkthalterdeckeln (Füllmörtelsteifigkeit 70000 N/mm^2) und am Bohrlochrand	93
Bild 6.6: Ort der maximalen Tangentialspannung für unverfülltes Bohrloch und verfülltes Bohrloch (Füllmörtelsteifigkeit 3000 N/mm^2).....	94
Bild 6.7: Einfluss der Lochpressung auf die Tangentialspannung.....	95
Bild 6.8: Radialspannung bei reiner Bolzenverschiebung	96
Bild 6.9: Tangentialspannung bei reiner Bolzenverschiebung.....	97
Bild 6.10: Biegelinien gelenkig aufgelagerter Glastafeln bei Variation des Randabstandes.....	98
Bild 6.11: Lastabtragungsmechanismen im Lochbereich bei verschiedenen Randabständen der Glastafelbohrungen.....	99

Bild 6.12: Abtragung der Belastung aus Moment und Querkraft bei Glastafeln mit großem Randabstand der Glastafelbohrungen.....	100
Bild 6.13: Tafel 1200 mm x 1200 mm x 300 mm x 300 mm x 12 mm links: unverfülltes Bohrloch rechts: Füllmörtelsteifigkeit 1250 N/mm ²	103
Bild 6.14: Tafel 1200 mm x 1200 mm x 300 mm x 300 mm x 12 mm links: Füllmörtelsteifigkeit 2750 N/mm ² rechts: Füllmörtelsteifigkeit 70000 N/mm ²	104
Bild 6.15: Tafel 1200 mm x 1200 mm x 100 mm x 100 mm x 12 mm links: unverfülltes Bohrloch rechts: Füllmörtelsteifigkeit 1250 N/mm ²	105
Bild 6.16: Tafel 1200 mm x 1200 mm x 100 mm x 100 mm x 12 mm links: Füllmörtelsteifigkeit 2750 N/mm ² rechts: Füllmörtelsteifigkeit 70000 N/mm ²	106
Bild 6.17: Kontaktkraftverteilungen in den Punkthalterdeckeln	107
Bild 6.18: Kontaktkraftverteilung in den Punkthalterdeckeln (EPDM-Steifigkeit 25 N/mm ²).....	109
Bild 6.19: Kontaktkraftverteilung in den Punkthalterdeckeln (EPDM-Steifigkeit 70000 N/mm ²).....	110
Bild 6.20: Vergleich EPDM Steifigkeit 25 N/mm ² (links) - 70000 N/mm ² (rechts)....	111
Bild 6.21: Statische Systeme	112
Bild 6.22: Biegelinien starr gelagerter Glastafel bei Variation des Randabstandes.....	113
Bild 6.23: Horizontalkräfte in Abhängigkeit der Halterausführung bei großen Randabständen.....	116
Bild 6.24: Vergleich großes (links) und kleines Bohrloch (rechts).....	118
Bild 6.25: Einfluss der Glastafeldicke	119
Bild 7.1: Annähernd linear-elastisches Verhalten bis zum Glasbruch	123
Bild 7.2: Angabe der Spannungen in N/mm ² für eine 4 mm dicke Glastafel unter einer Belastung von 1 kN/m ²	129
Bild 7.3: Angabe der Spannungen in N/mm ² für eine 20 mm dicke Glastafel unter einer Belastung von 1 kN/m ²	130
Bild 7.4: Maximale Hauptspannung in N/mm ² für alle Glastafeldicken (a = 1600 mm)	130
Bild 7.5: Faktor k ₁ für alle Glastafeldicken (a = 1600 mm)	131
Bild 7.6: Faktor k ₁ über alle Glastafeldicken (a = 1600 mm).....	132

Bild 7.7: Ersatzgeraden für den Faktor k_1	132
Bild 7.8: Faktor k_2	133
Bild 7.9: Faktor k_1 für alle Tafelabmessungen ($a_r = b_r = 100$ mm).....	134
Bild 7.10: Faktor k_2 für alle Tafelabmessungen ($a_r = b_r = 100$ mm).....	134
Bild 7.11: Dreidimensionale Darstellung des Faktors k_1 über den Abmessungen.....	135
Bild 7.12: Umrissdiagramm für den Faktor k_1	135
Bild 7.13: Angabe der Durchbiegungen in mm für eine 4 mm dicke Glastafel unter einer Belastung von 1 kN/m ²	136
Bild 7.14: Angabe der Durchbiegungen in mm für eine 20 mm dicke Glastafel unter einer Belastung von 1 kN/m ²	136
Bild 7.15: Maximale Durchbiegung [mm] für alle Glastafeldicken ($a = 1600$ mm)	137
Bild 7.16: Faktor k_3 für alle Glastafeldicken ($a = 1600$ mm).....	138
Bild 7.17: Faktor k_3 über alle Glastafeldicken ($a = 1600$ mm)	138
Bild 7.18: Ersatzgeraden für den Faktor k_3	139
Bild 7.19: Faktor k_4	140
Bild 7.20: Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Auflagerkraft für einen Randabstand von 100 mm	141
Bild 7.21: Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Auflagerkraft für einen Randabstand von 200 mm	141
Bild 7.22: Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Auflagerkraft für einen Randabstand von 300 mm	142
Bild 7.23: Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Auflagerkraft in Abhängigkeit der Tafelabmessungen ($h = 20$ mm, Randabstand 100 mm).....	143
Bild 7.24: Plattentragwirkung mit Druckring	144
Bild 7.25: Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Auflagerkraft in Abhängigkeit der Tafeldicke ($a = 1800$ mm, $a_r = b_r = 300$ mm).....	145
Bild 7.26: Tafel zur Bestimmung der horizontalen Auflagerkräfte (Randabstand 100 mm)	146

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Einteilung der Punkthalter.....	19
Tabelle 2.1 Fortsetzung: Einteilung der Punkthalter.....	20
Tabelle 4.1: Untersuchtetes Parameterspektrum.....	43
Tabelle 4.2: Abstand der Resultierenden der Kontaktkräfte vom Bohrlochmittelpunkt in mm (h = 10 mm)	45
Tabelle 5.1: Durchgeführte Versuche	70
Tabelle 5.2: Bezeichnung der Messstellen.....	72
Tabelle 5.3: Vergleich der Versuchsreihe 1 (starrer Punkthalter mit 15 mm Lochbohrung) mit den Ergebnissen der FE-Berechnung.....	78
Tabelle 5.4: Vergleich der Versuchsreihen 2 und 3 (gelenkiger Punkthalter mit 15 mm Lochbohrung) mit den Ergebnissen der FE-Berechnung.....	79
Tabelle 5.5: Vergleich Versuchsreihe 4 (starrer Punkthalter mit 35 mm Lochbohrung, unverfüllt) mit den Ergebnissen der FE-Berechnung.....	80
Tabelle 5.6: Vergleich Versuchsreihe 5 (gelenkiger Punkthalter mit 35 mm Lochbohrung, unverfüllt) mit den Ergebnissen der FE-Berechnung.....	81
Tabelle 5.7: Vergleich Versuchsreihe 6 (starrer Punkthalter mit 35 mm Lochbohrung, verfüllt) mit den Ergebnissen der FE-Berechnung.....	82
Tabelle 5.8: Vergleich Versuchsreihe 7 (gelenkiger Punkthalter mit 35 mm Lochbohrung, verfüllt) mit den Ergebnissen der FE-Berechnung	83
Tabelle 6.1: Einfluss der Füllmörtelsteifigkeit Tafel 1600 mm x 1200 mm x 12 mm....	87
Tabelle 6.2: Einfluss der Füllmörtelsteifigkeit Tafel 1200 mm x 1200 mm x 12 mm..	101
Tabelle 6.3: Einfluss der Füllmörtelsteifigkeit Tafel 1200 mm x 1200 mm x 12 mm..	101
Tabelle 6.4: Einfluss der EPDM-Steifigkeit Tafel 3000 mm x 3000 mm x 12 mm	108
Tabelle 6.5: Einfluss der Halterausführung Tafel 1200 mm x 1200 mm x 12 mm	114
Tabelle 6.6: Einfluss der Halterausführung Tafel 3000 mm x 3000 mm x 12 mm	114
Tabelle 6.7: Einfluss der Füllmörtelsteifigkeit Tafel 1200 mm x 1200 mm x 12 mm..	117
Tabelle 7.1: Zulässige Spannungswerte für verschiedene Glassorten in N/mm ²	124
Tabelle 7.2: Ermittlung der Bemessungswerte [25].....	125
Tabelle 7.3: Faktor k ₁ für die Berechnung der Spannung [25]	126
Tabelle 7.4: Faktor k ₄ für die Berechnung der Durchbiegung [25]	127

Anhang

Anhang A1: Versuchsreihe 1: Starrer Halter mit 15 mm Loch

Diagramm	Messstellenbezeichnung [nach Bild 5.12]	Ausführliche Bezeichnung [nach Tabelle 5.2]
A1.1	MS 1	Durchbiegung in Tafelmitte
A1.2	MS 7	Durchbiegung am Tafelrand
A1.3	MS 2 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflager- ring
A1.4	MS 2 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflager- ring
A1.5	MS 2 o	Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflager- ring
A1.6	MS 2 u	Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Aufla- gerring
A1.7	MS 3 o	Radiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflagerring
A1.8	MS 3 u	Radiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflagerring
A1.9	MS 3 o	Radiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring
A1.10	MS 3 u	Radiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring
A1.11	MS 4 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Lochrand
A1.12	MS 4 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Lochrand
A1.13	MS 4 o	Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Lochrand
A1.14	MS 4 u	Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Loch- rand
A1.15	MS 5 o	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längs- richtung
A1.16	MS 5 u	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Quer- richtung
A1.17	MS 5 o	Spannungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längs- richtung
A1.18	MS 5 u	Spannungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Quer- richtung

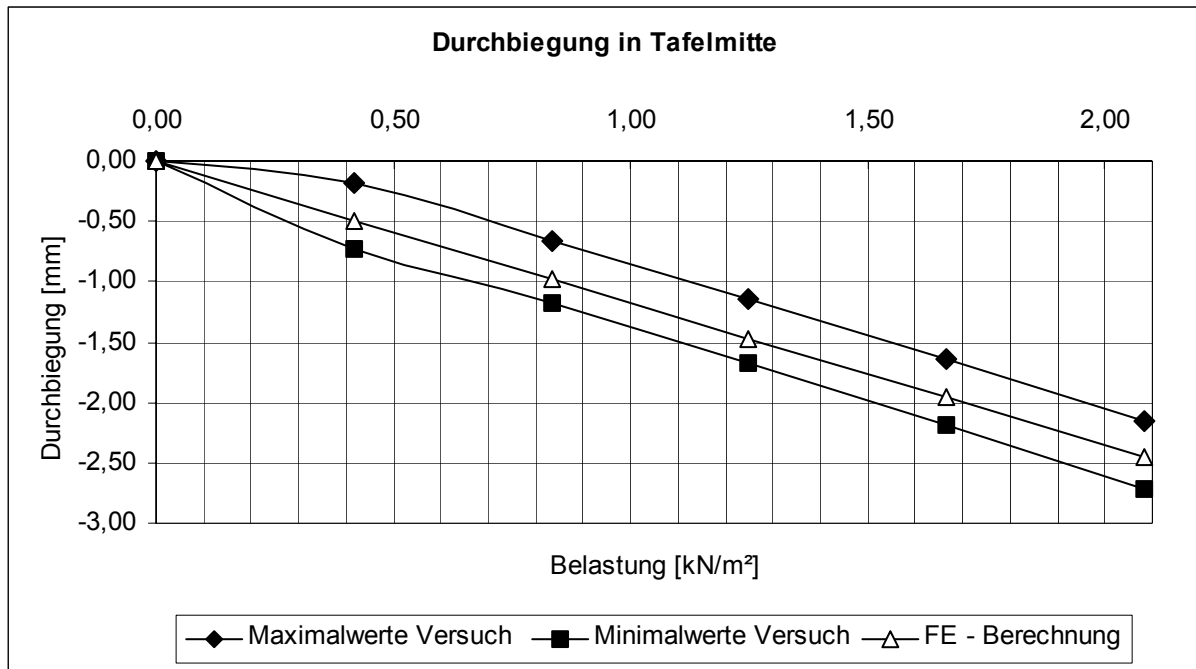


Diagramm A1.1

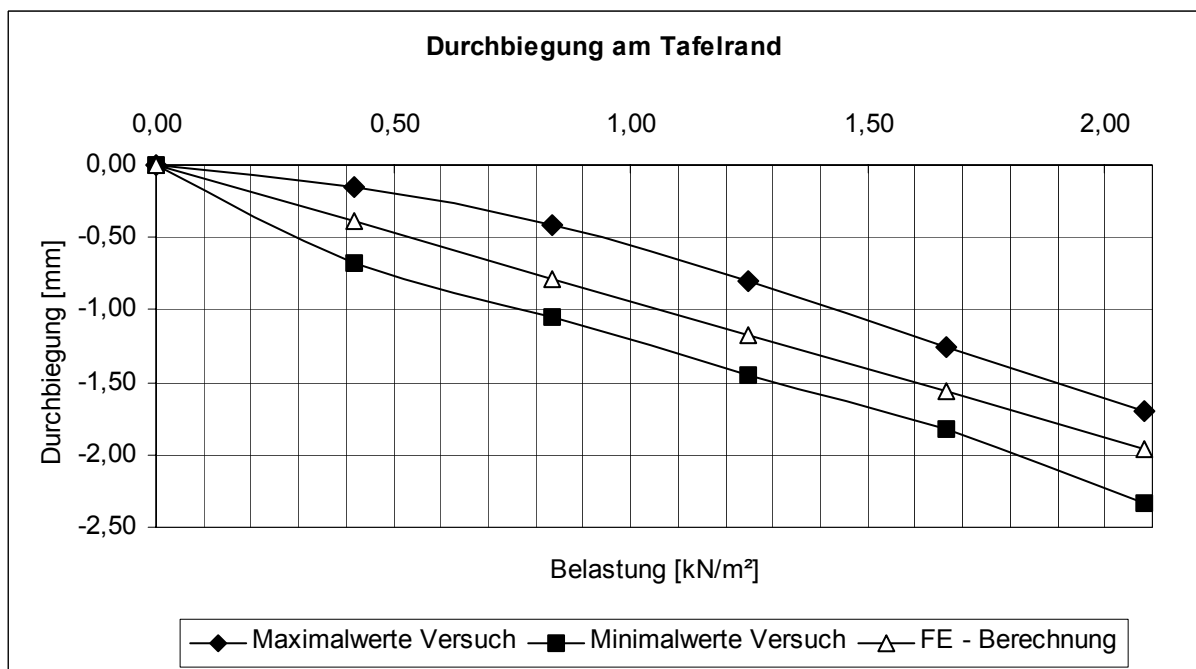


Diagramm A1.2

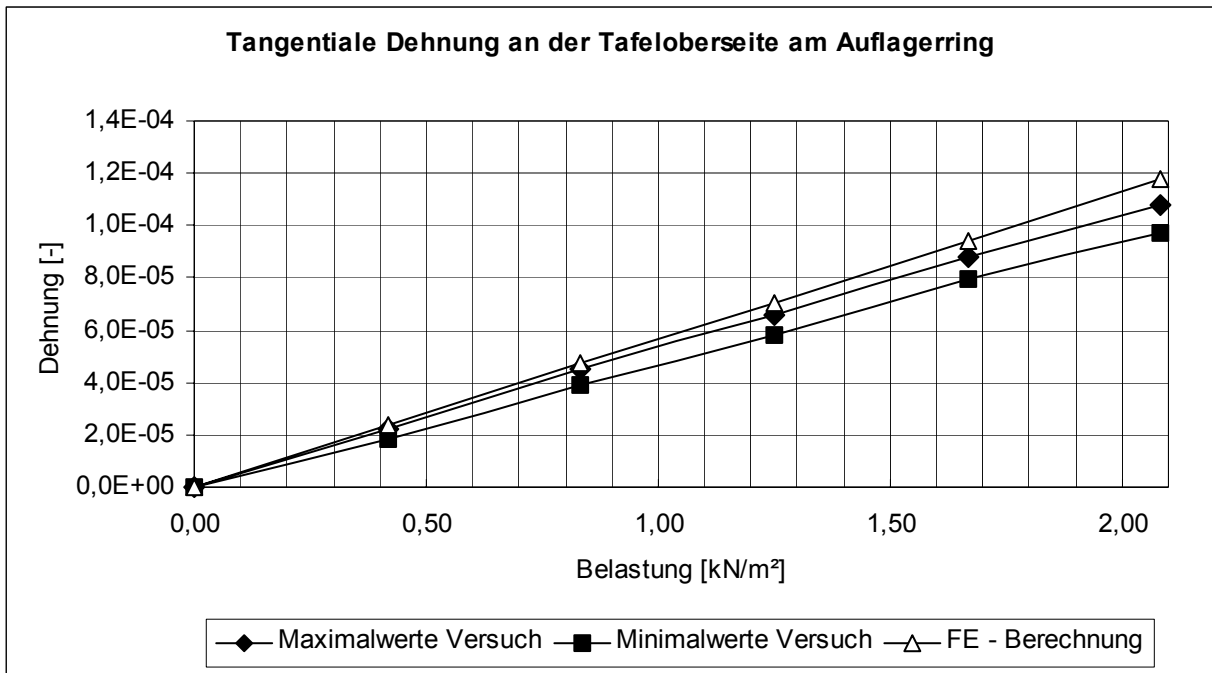


Diagramm A1.3

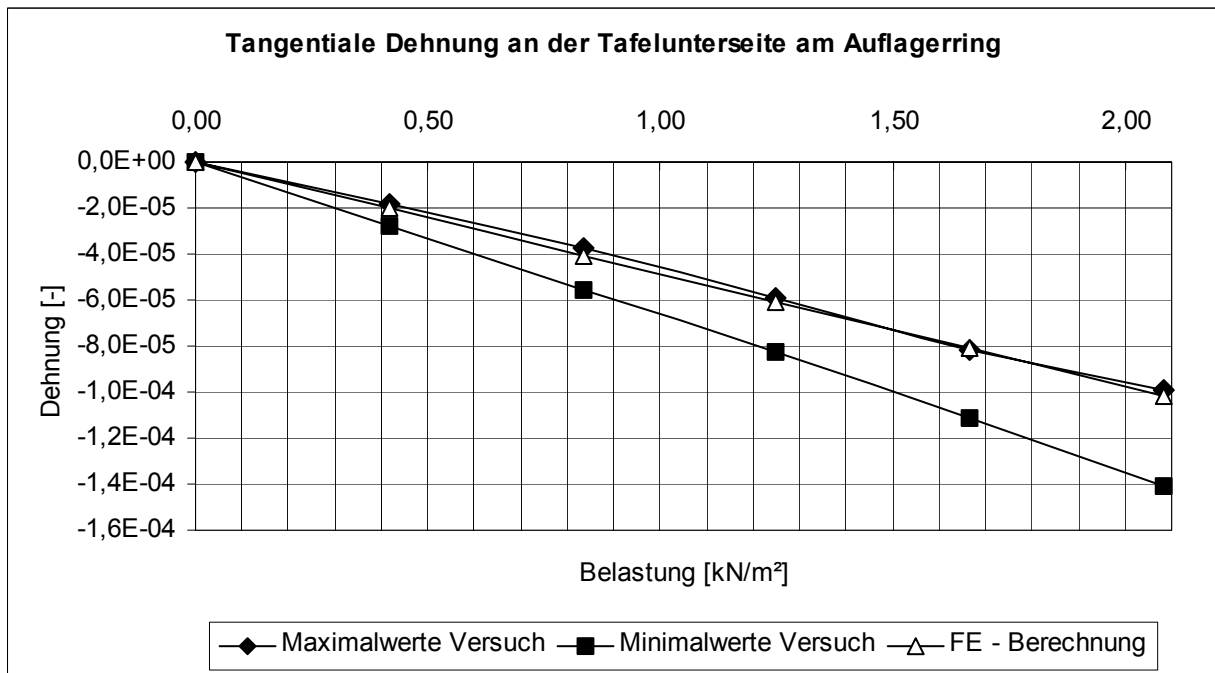


Diagramm A1.4

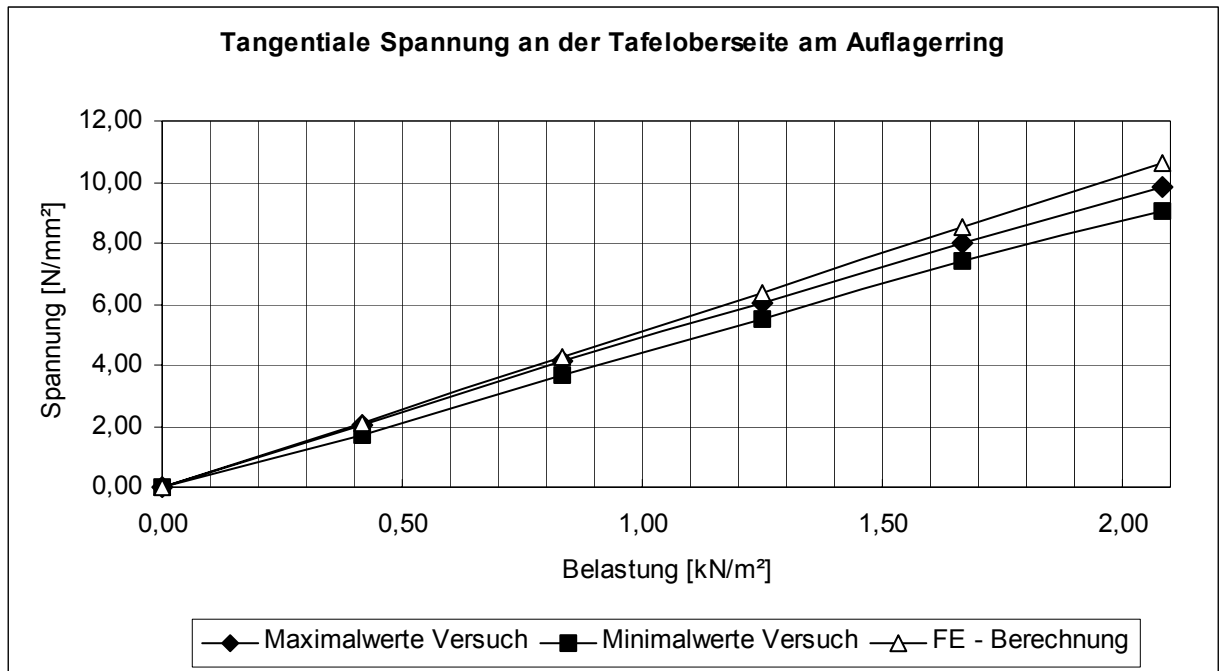


Diagramm A1.5

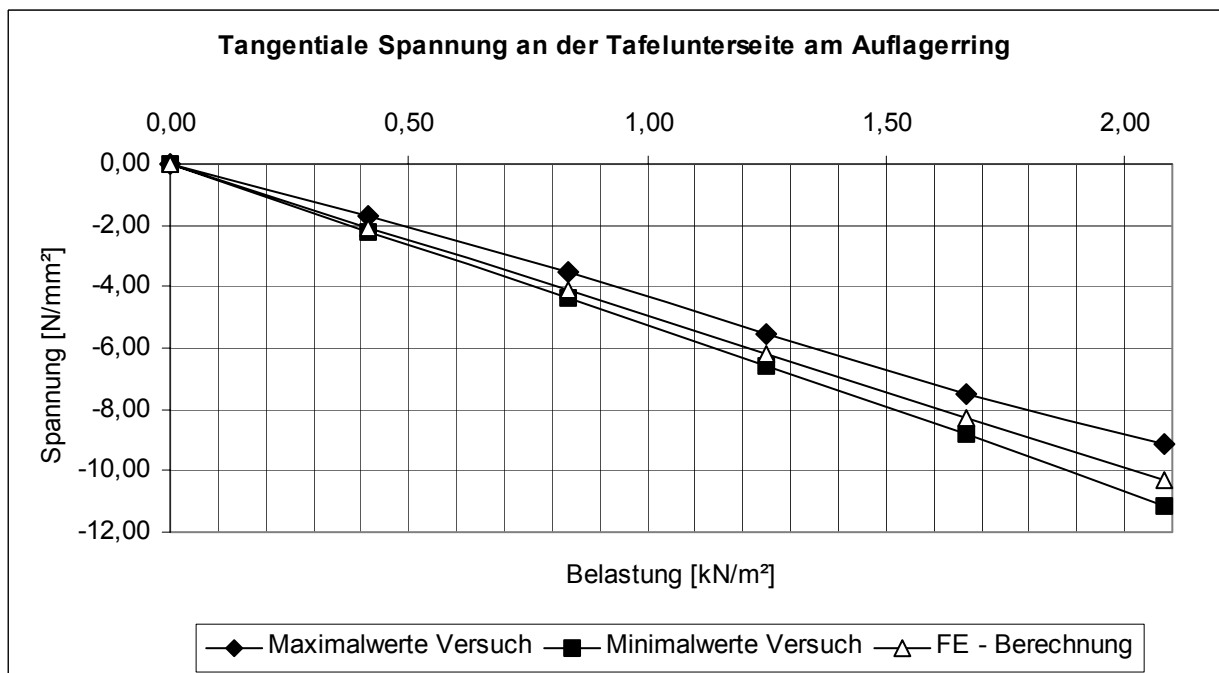


Diagramm A1.6

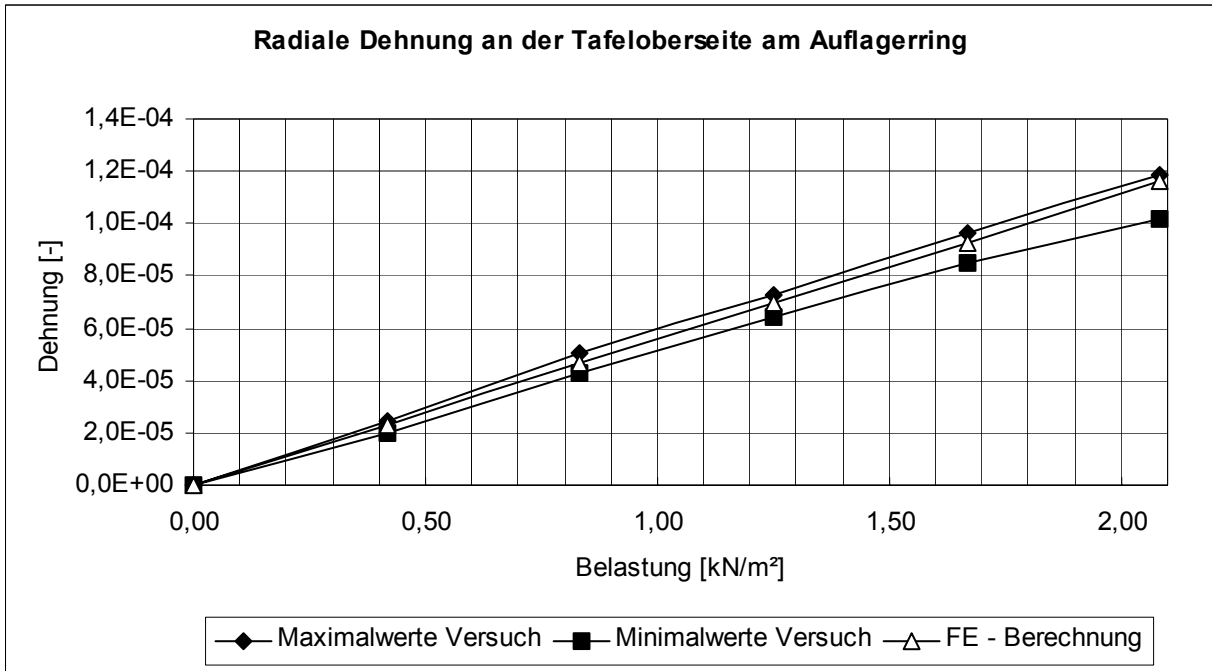


Diagramm A1.7

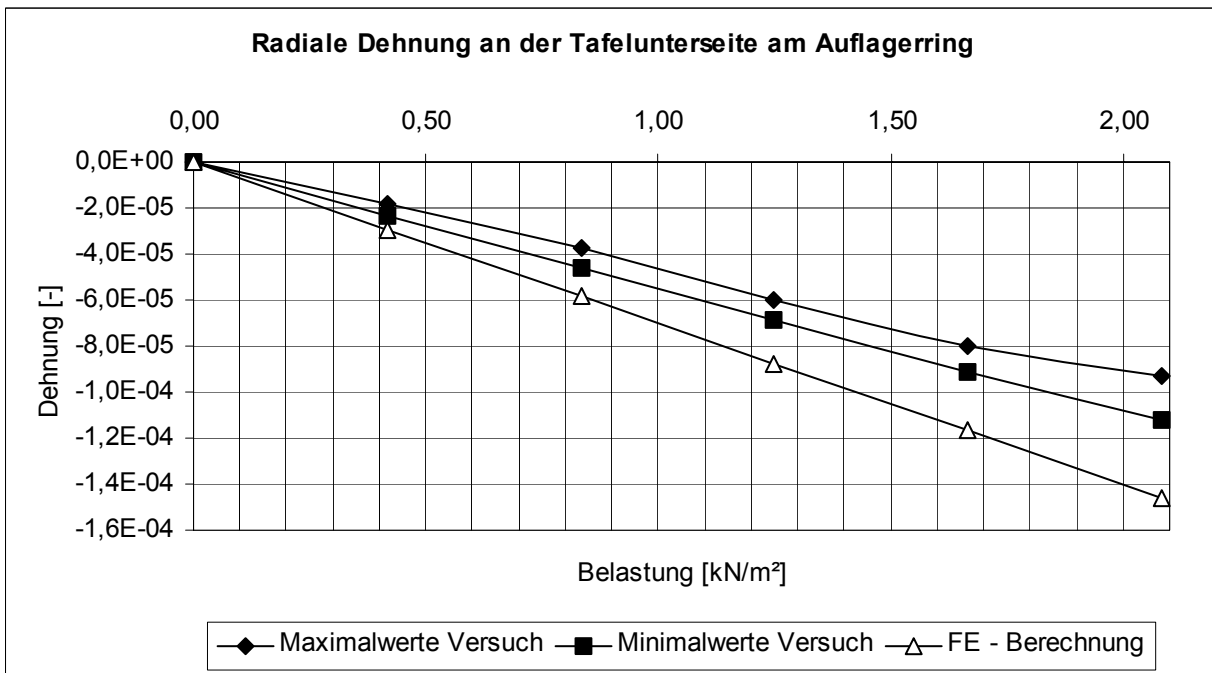


Diagramm A1.8

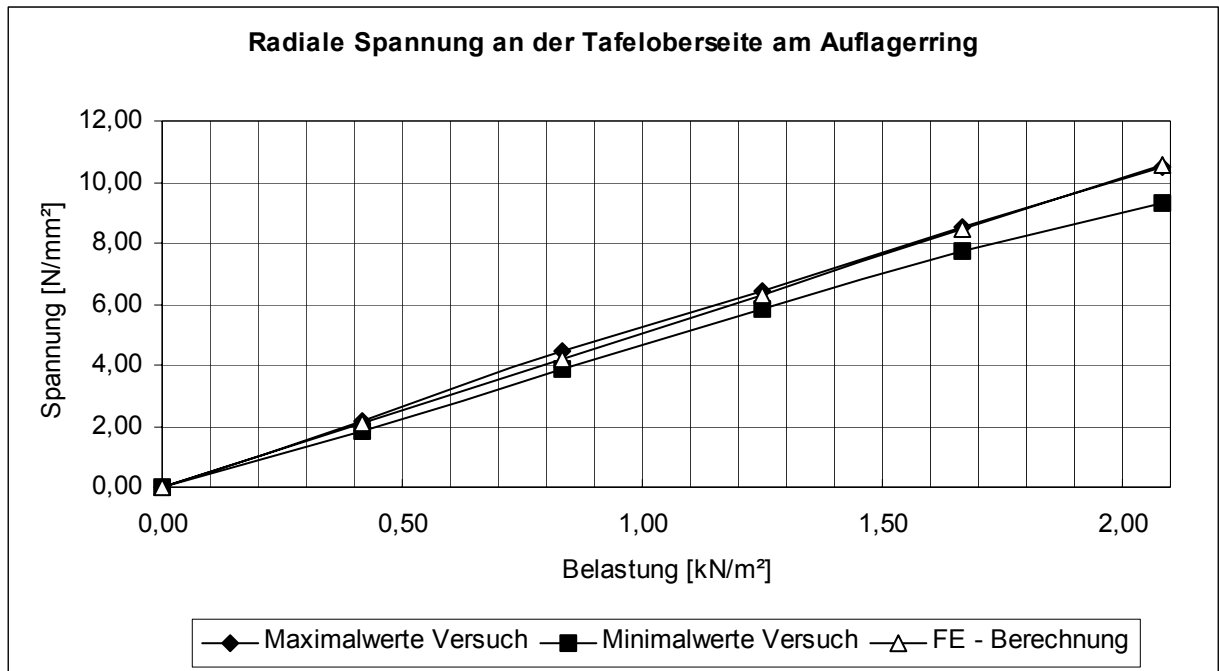


Diagramm A1.9

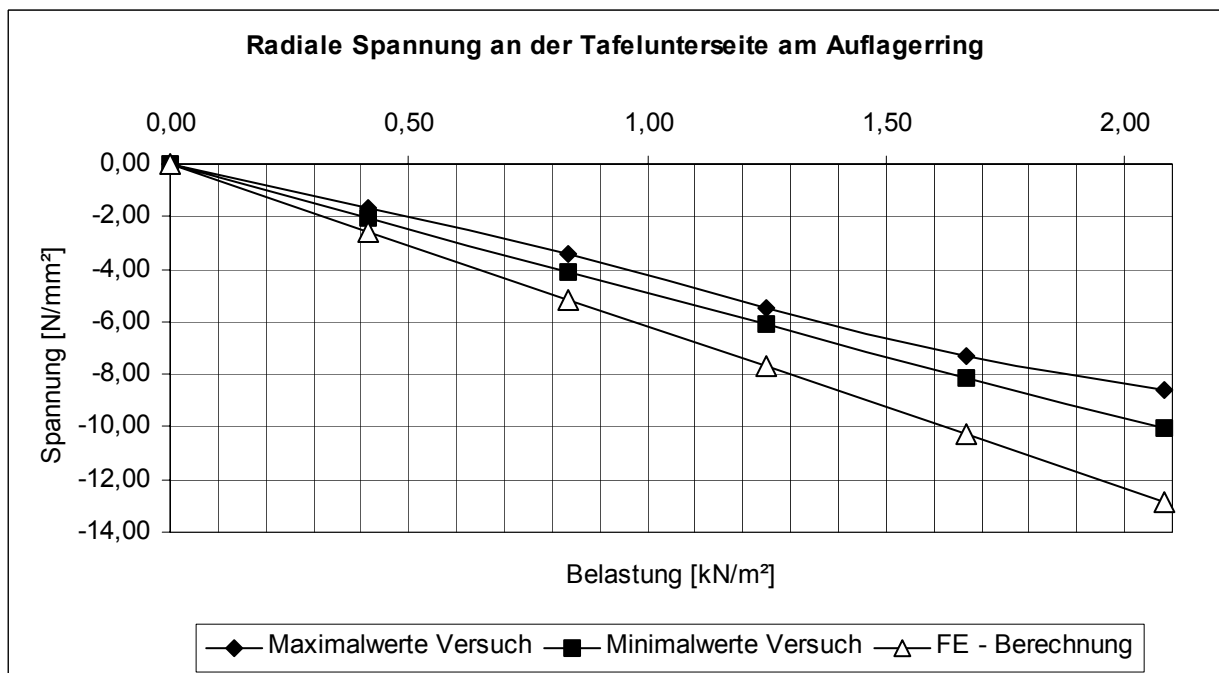


Diagramm A1.10

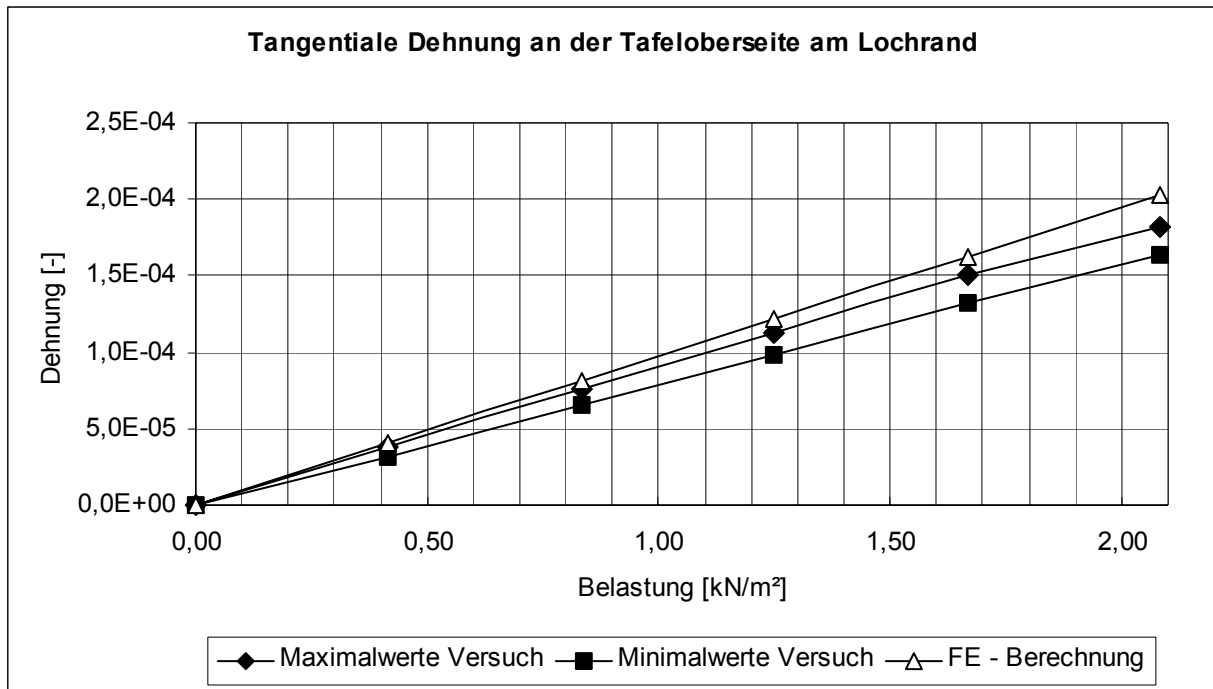


Diagramm A1.11

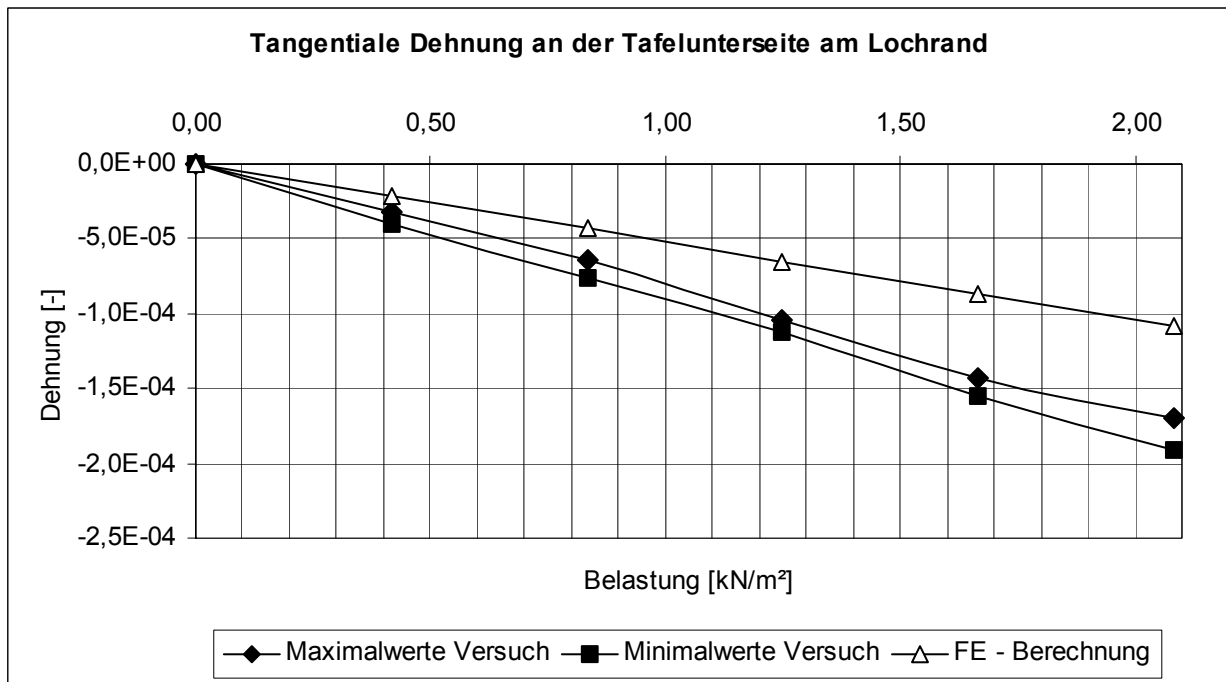


Diagramm A1.12

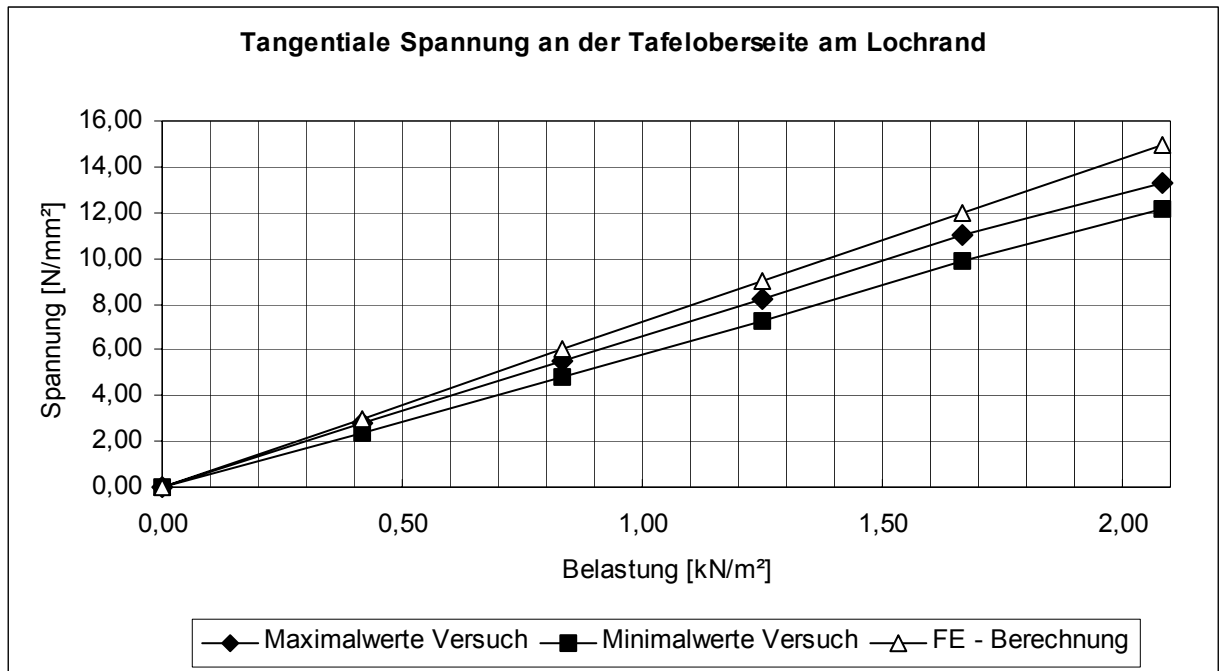


Diagramm A1.13

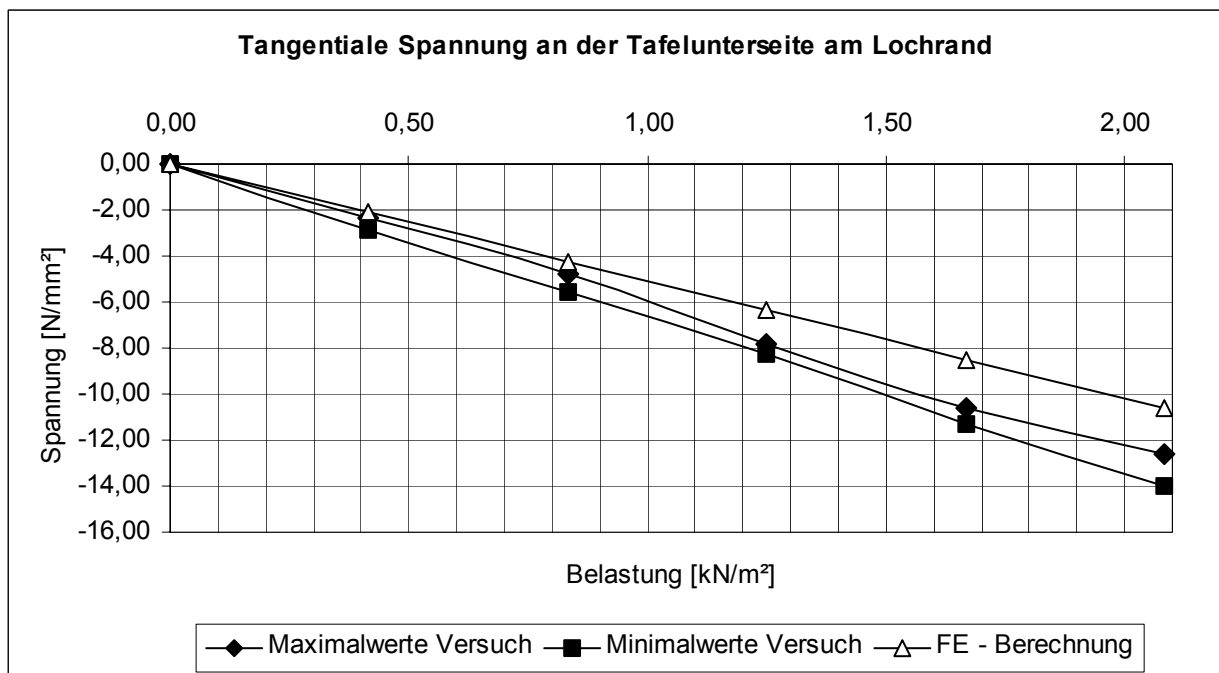


Diagramm A1.14

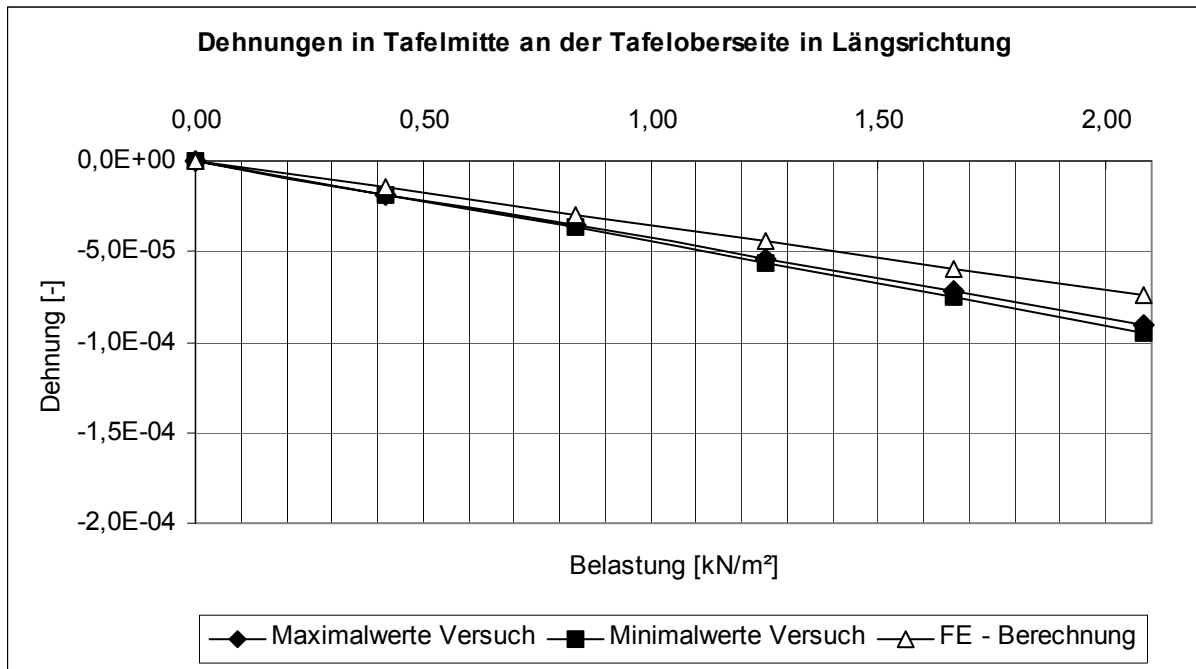


Diagramm A1.15

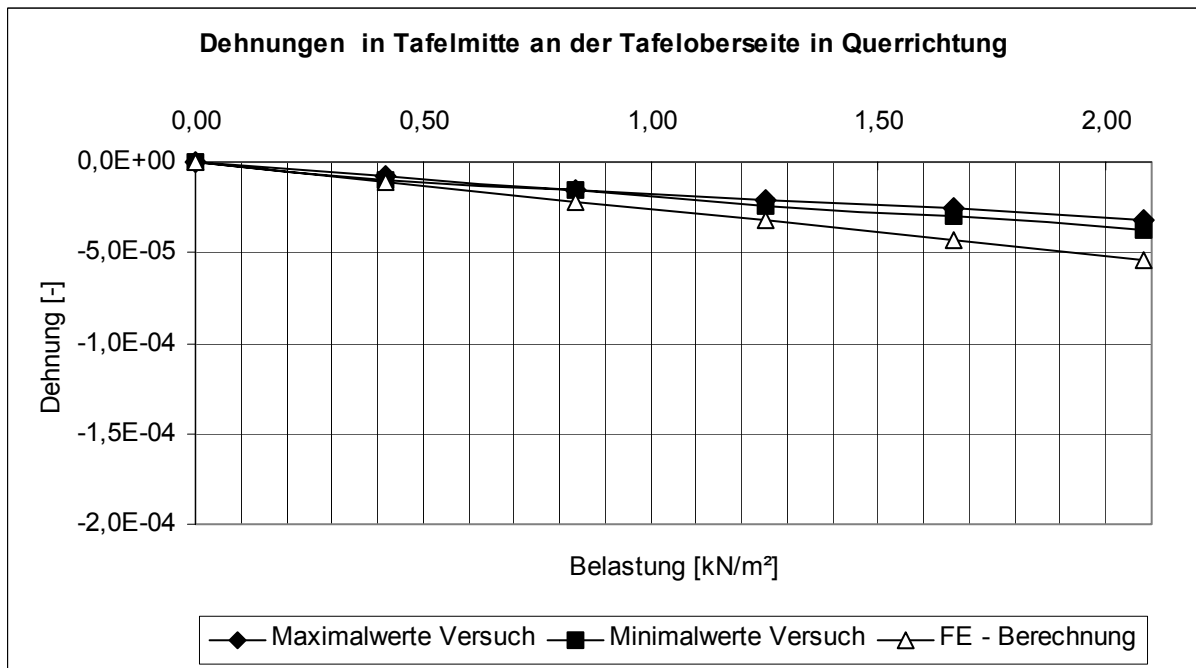


Diagramm A1.16

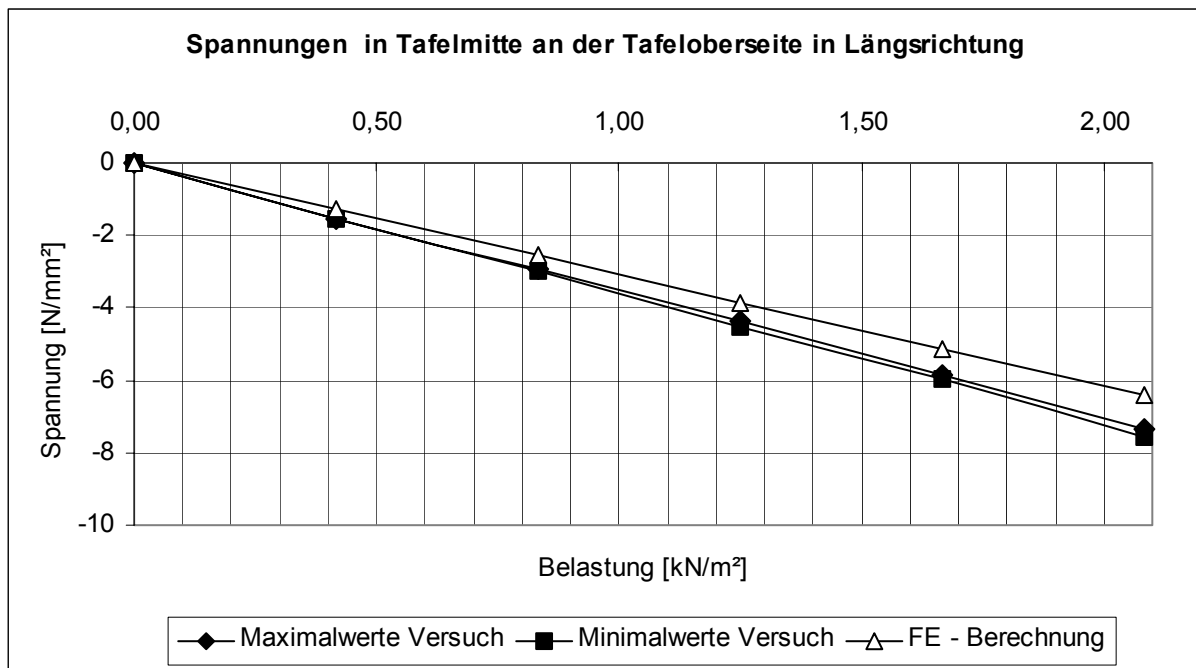


Diagramm A1.17

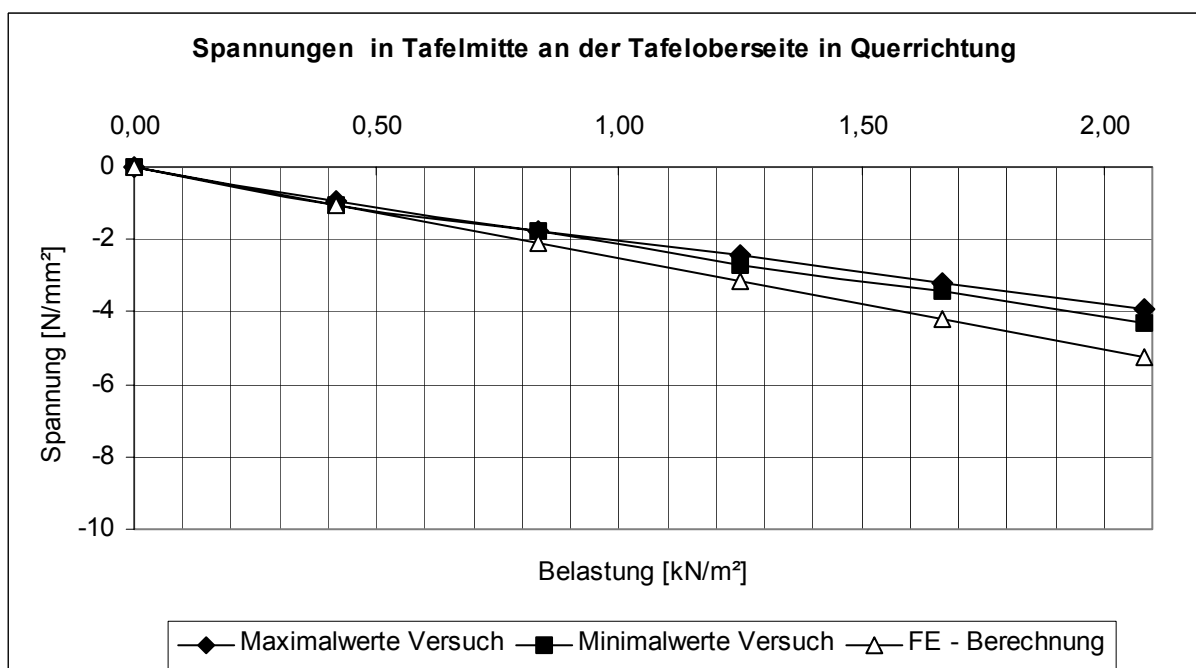


Diagramm A1.18

Anhang A2: Versuchsreihen 2 und 3: Gelenkiger Halter mit 15 mm Loch

Diagramm	Messstellenbezeichnung [nach Bild 5.12]	Ausführliche Bezeichnung [nach Tabelle 5.2]
A2.1	MS 1	Durchbiegung in Tafelmitte
A2.2	MS 7	Durchbiegung am Tafelrand
A2.3	MS 2 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflager- ring
A2.4	MS 2 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflager- ring
A2.5	MS 2 o	Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflager- ring
A2.6	MS 2 u	Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Aufla- gerring
A2.7	MS 3 o	Radiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflagerring
A2.8	MS 3 u	Radiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflagerring
A2.9	MS 3 o	Radiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring
A2.10	MS 3 u	Radiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring
A2.11	MS 4 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Lochrand
A2.12	MS 4 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Lochrand
A2.13	MS 4 o	Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Lochrand
A2.14	MS 4 u	Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Loch- rand
A2.15	MS 5 o	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längs- richtung
A2.16	MS 5 u	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Quer- richtung
A2.17	MS 5 o	Spannungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längs- richtung
A2.18	MS 5 u	Spannungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Quer- richtung

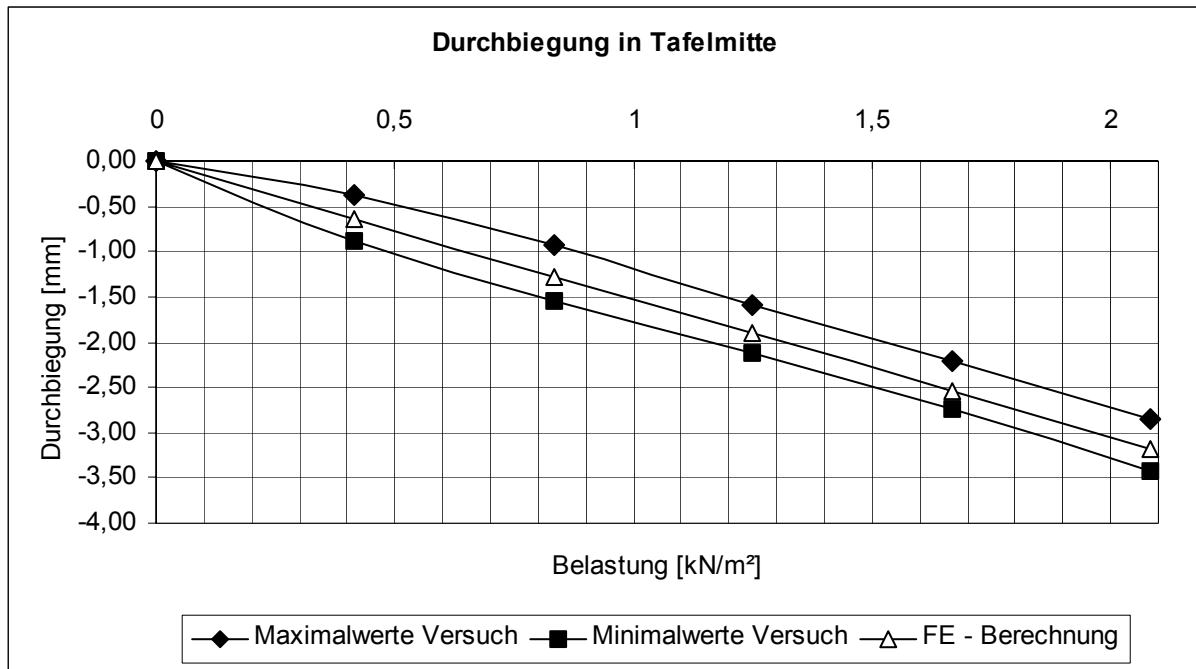


Diagramm A2.1

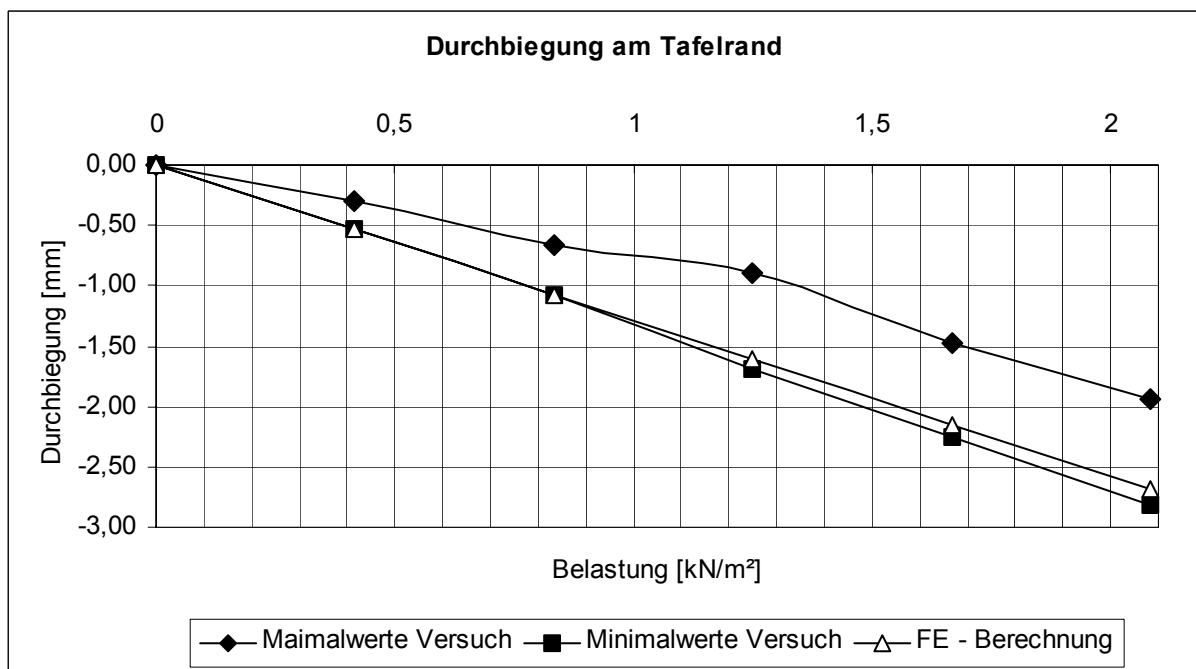


Diagramm A2.2

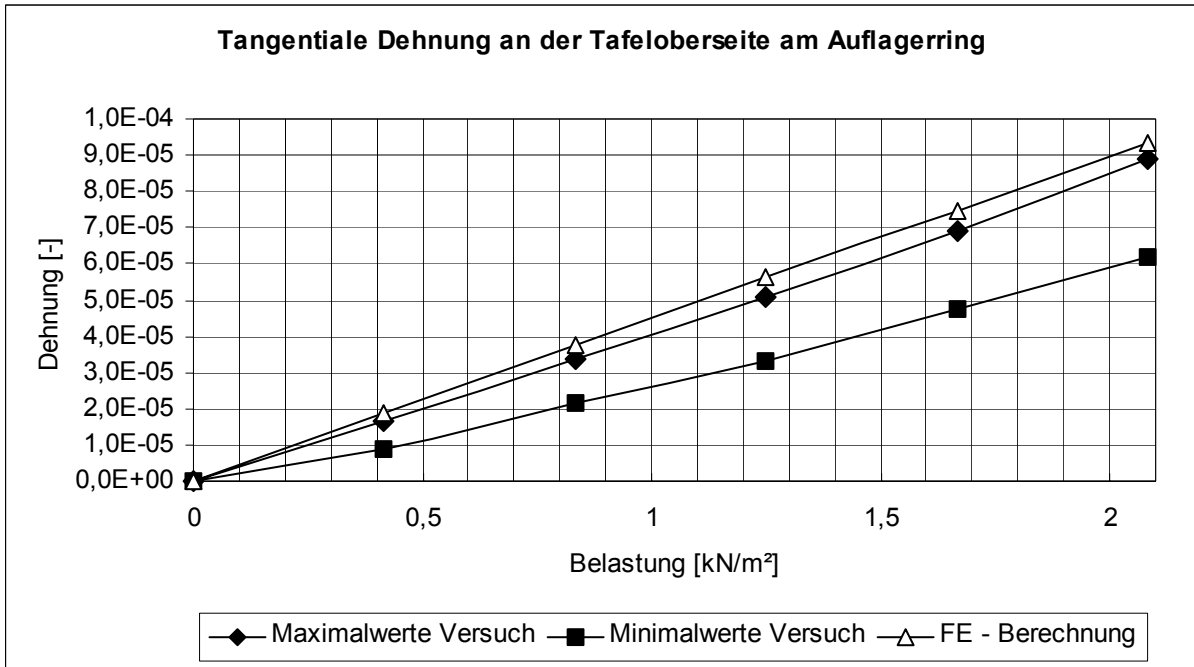


Diagramm A2.3

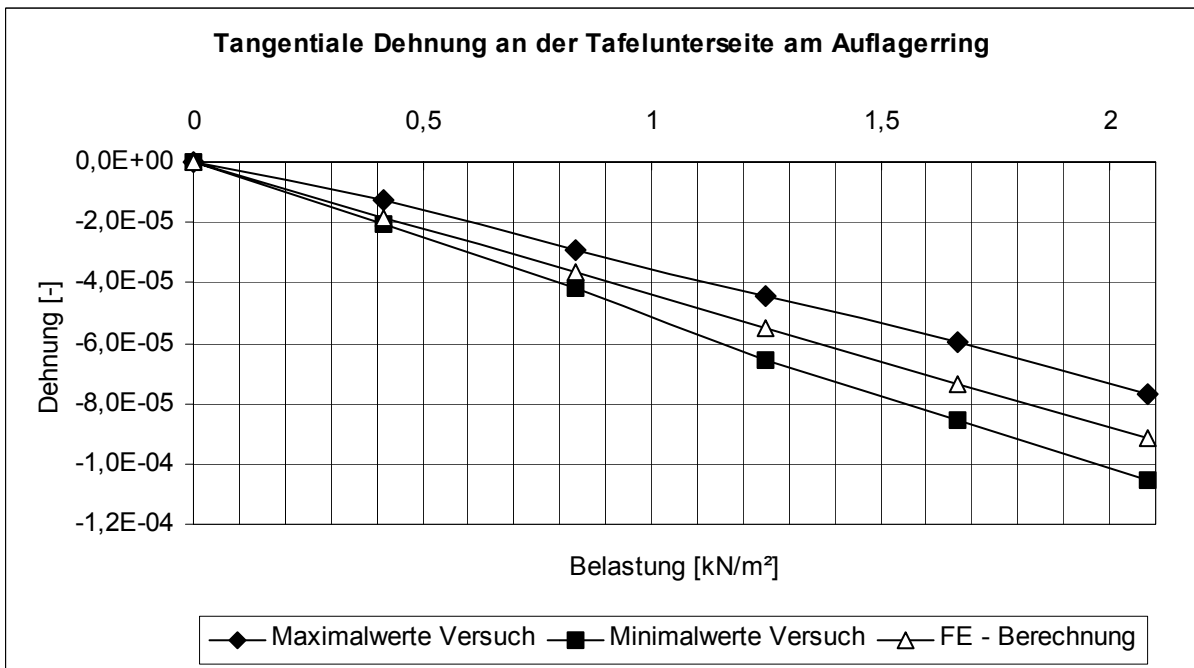


Diagramm A2.4

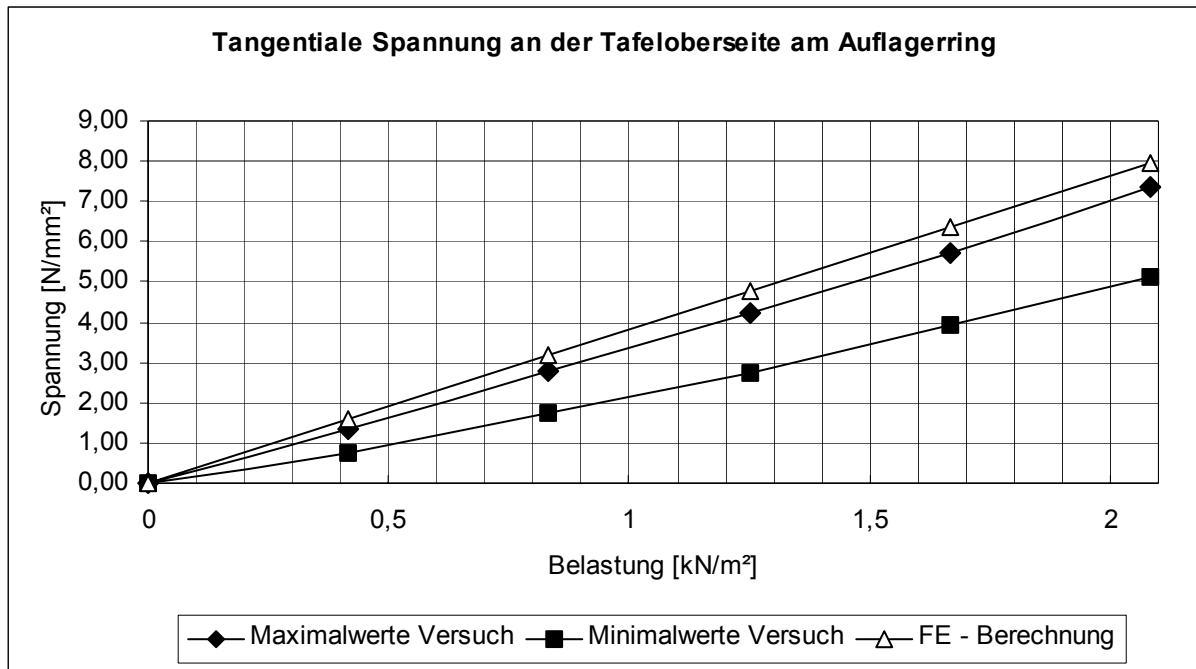


Diagramm A2.5

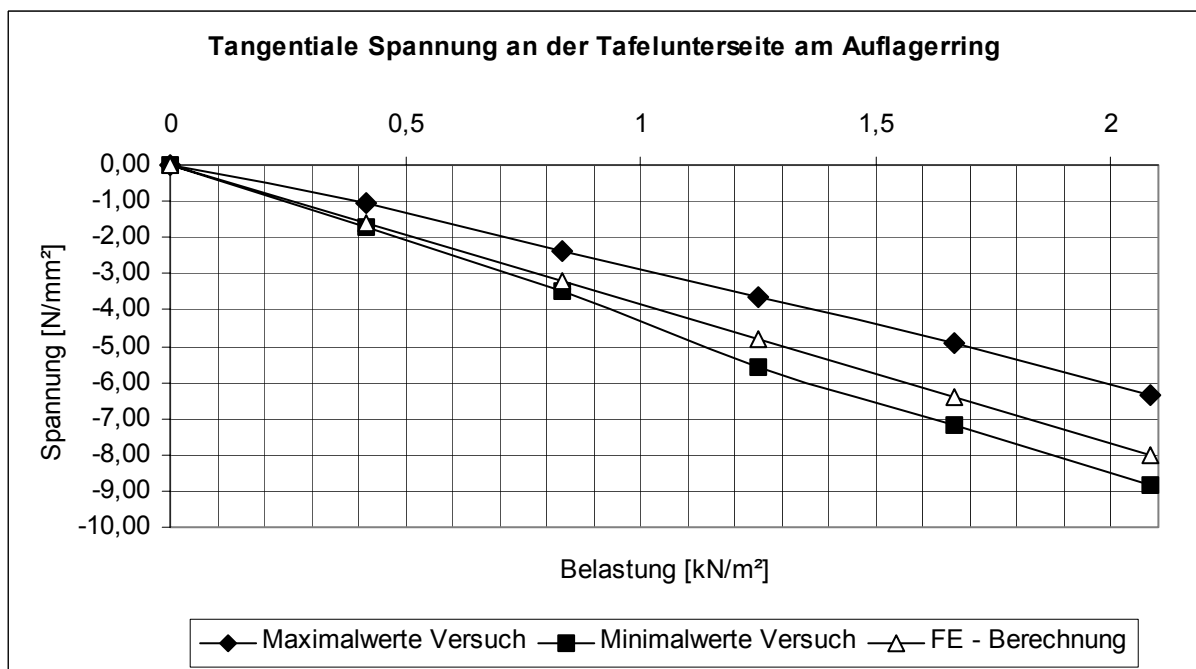


Diagramm A2.6

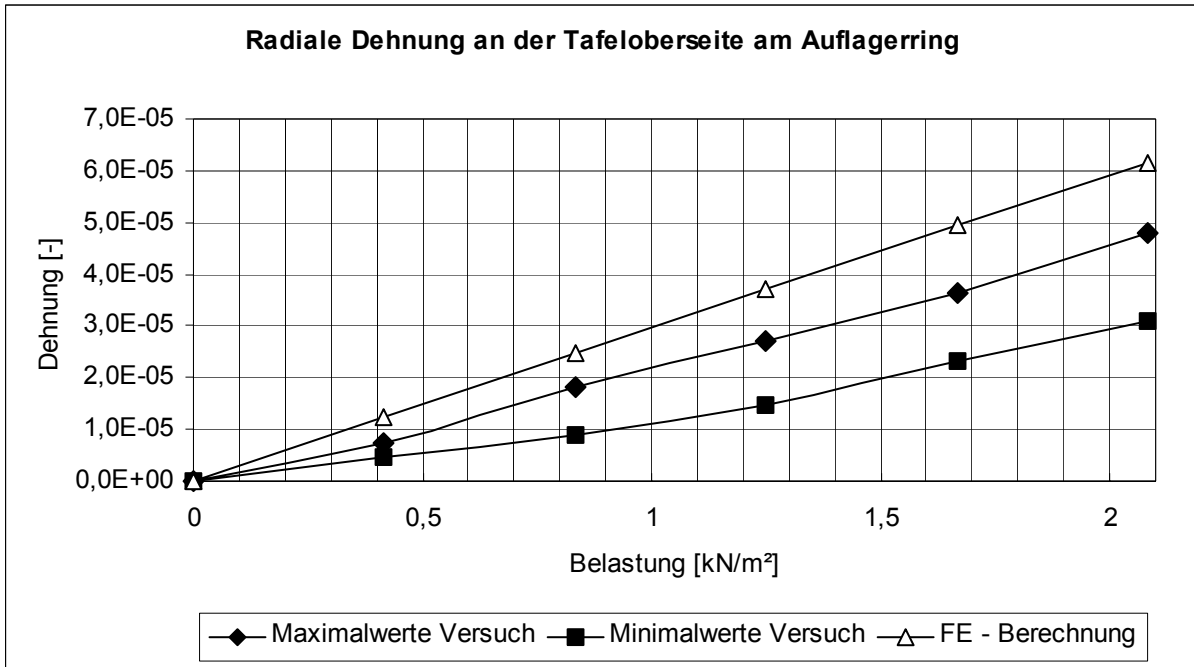


Diagramm A2.7

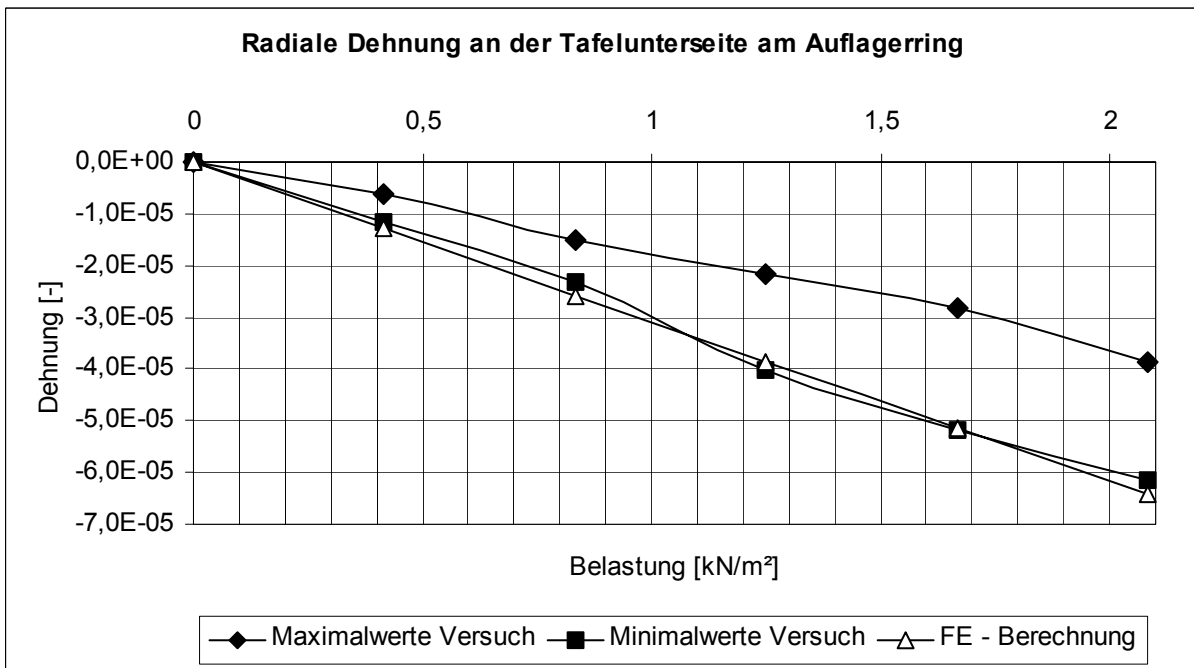


Diagramm A2.8

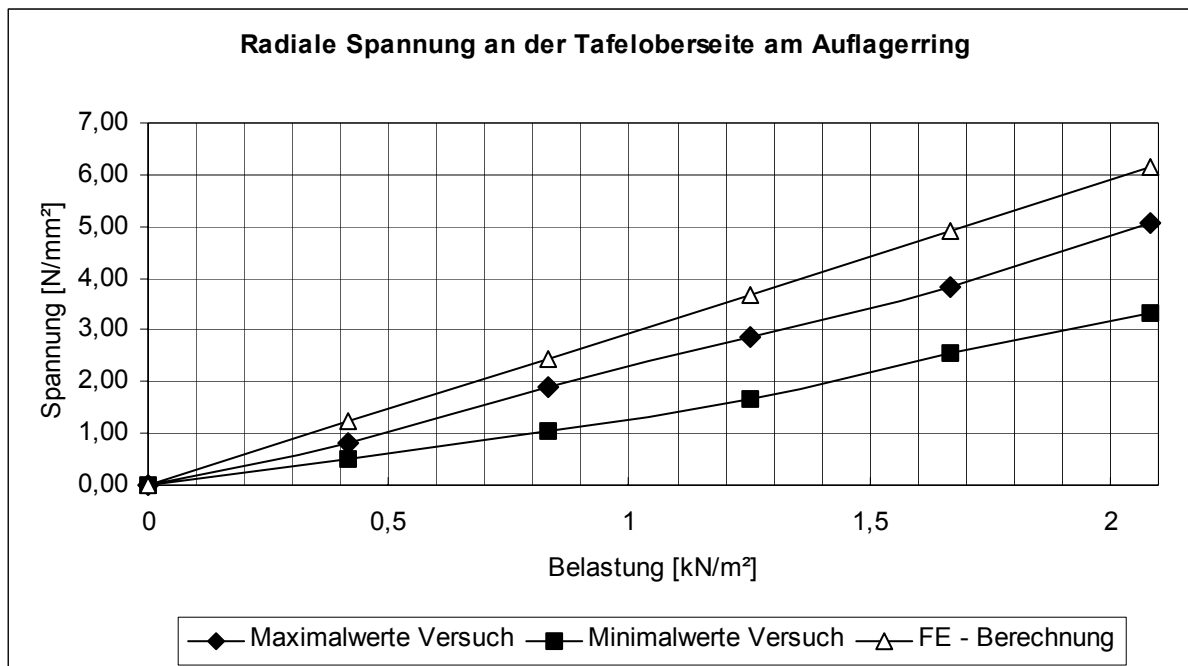


Diagramm A2.9

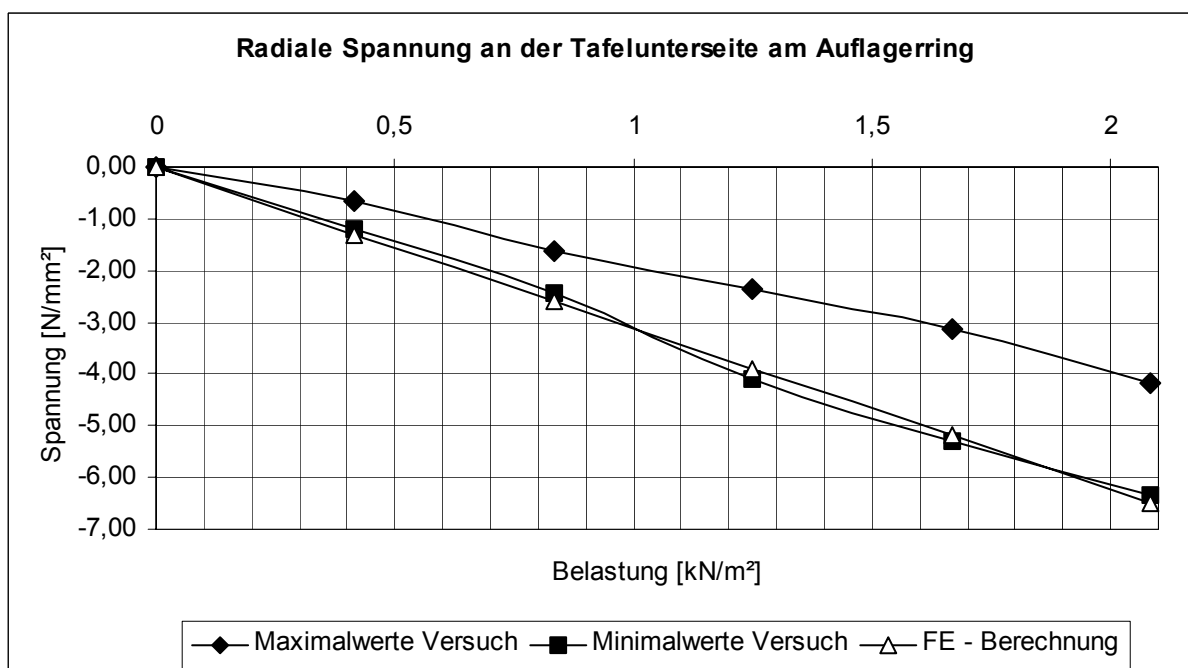


Diagramm A2.10

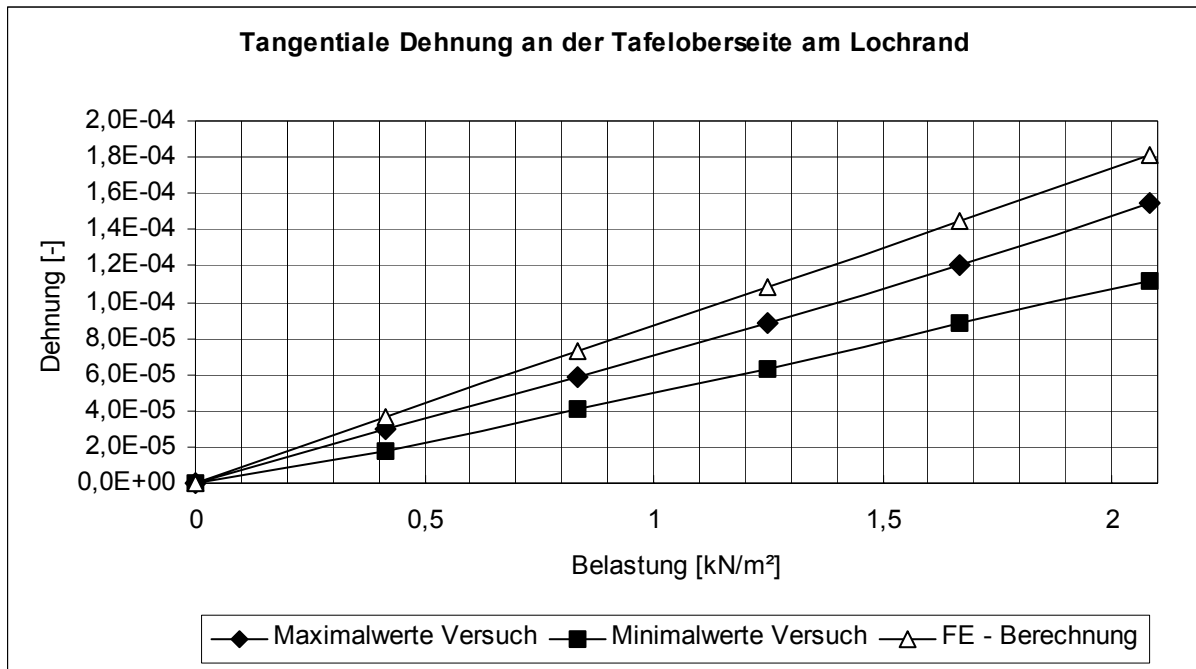


Diagramm A2.11

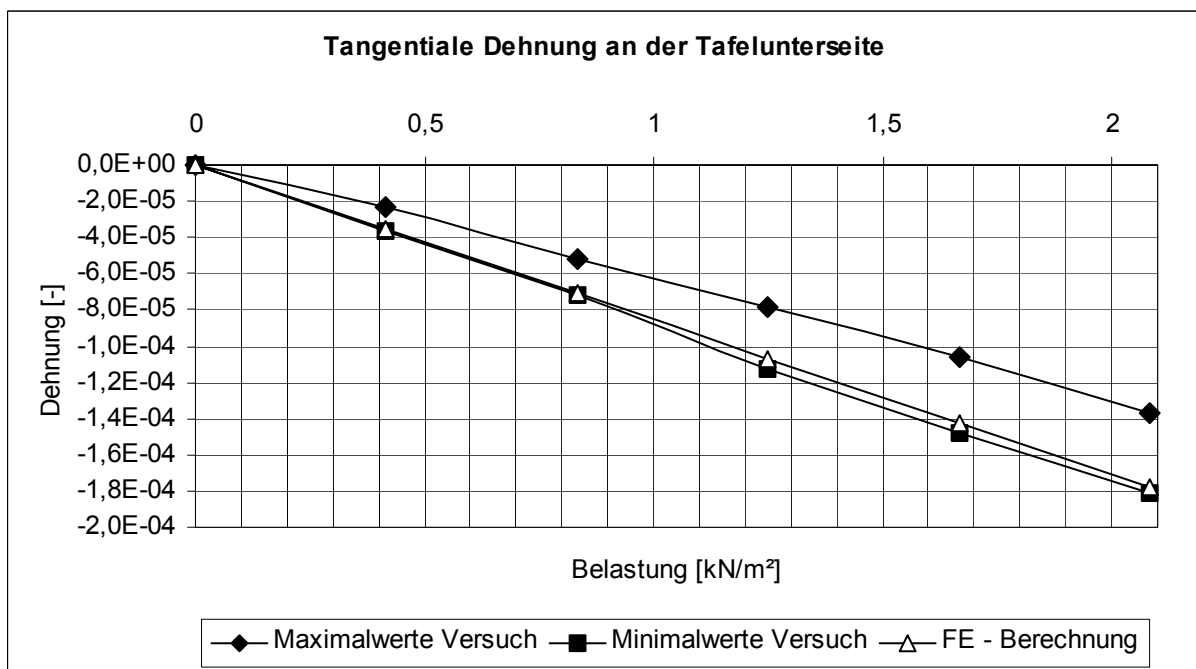


Diagramm A2.12

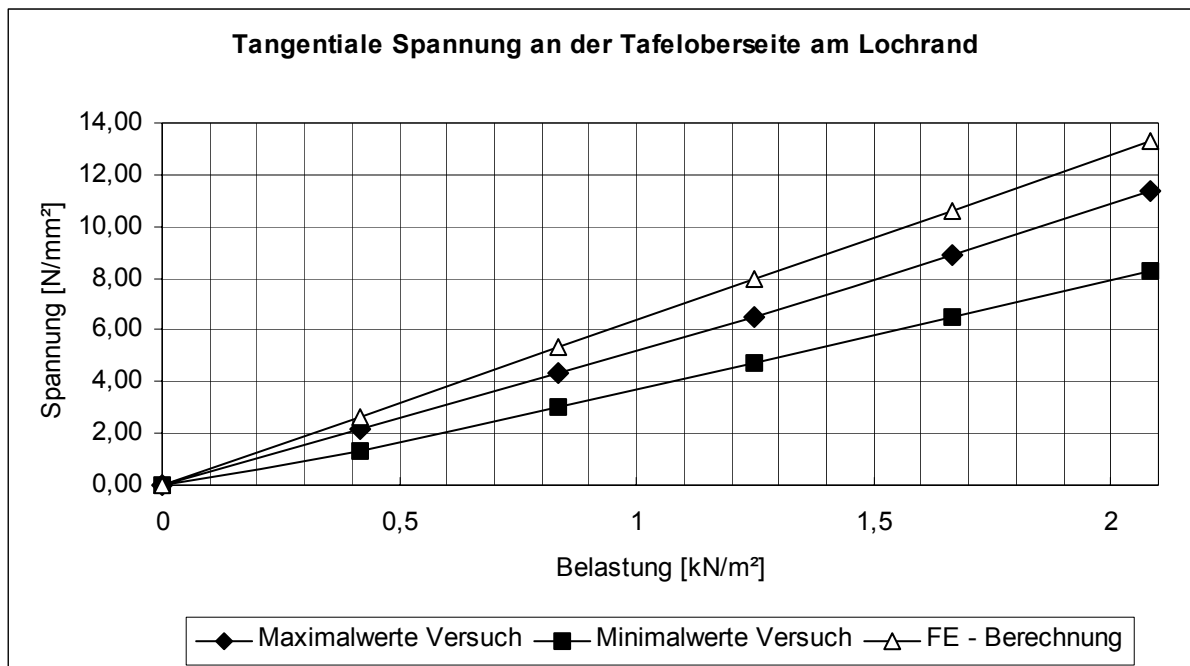


Diagramm A2.13

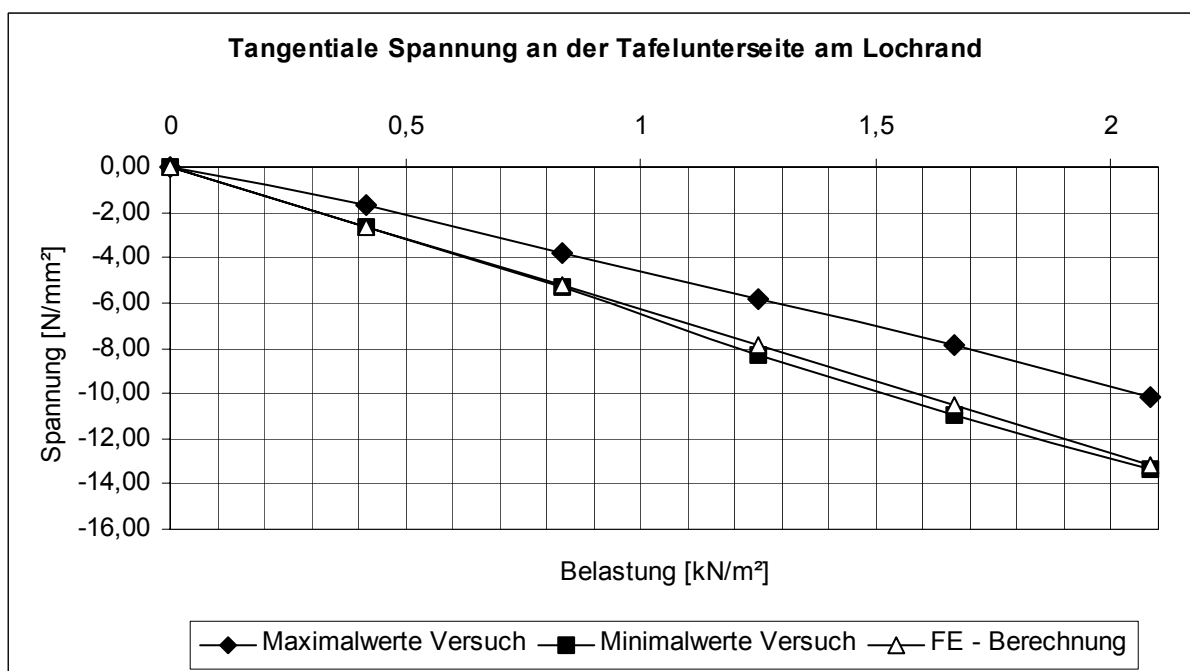


Diagramm A2.14

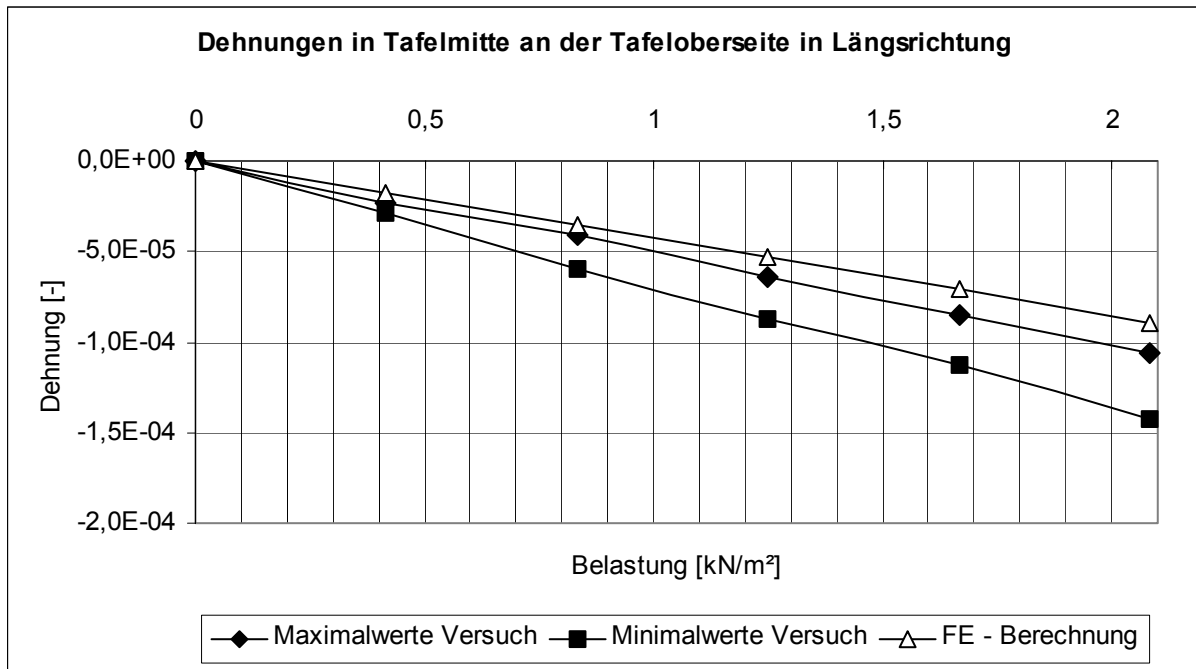


Diagramm A2.15

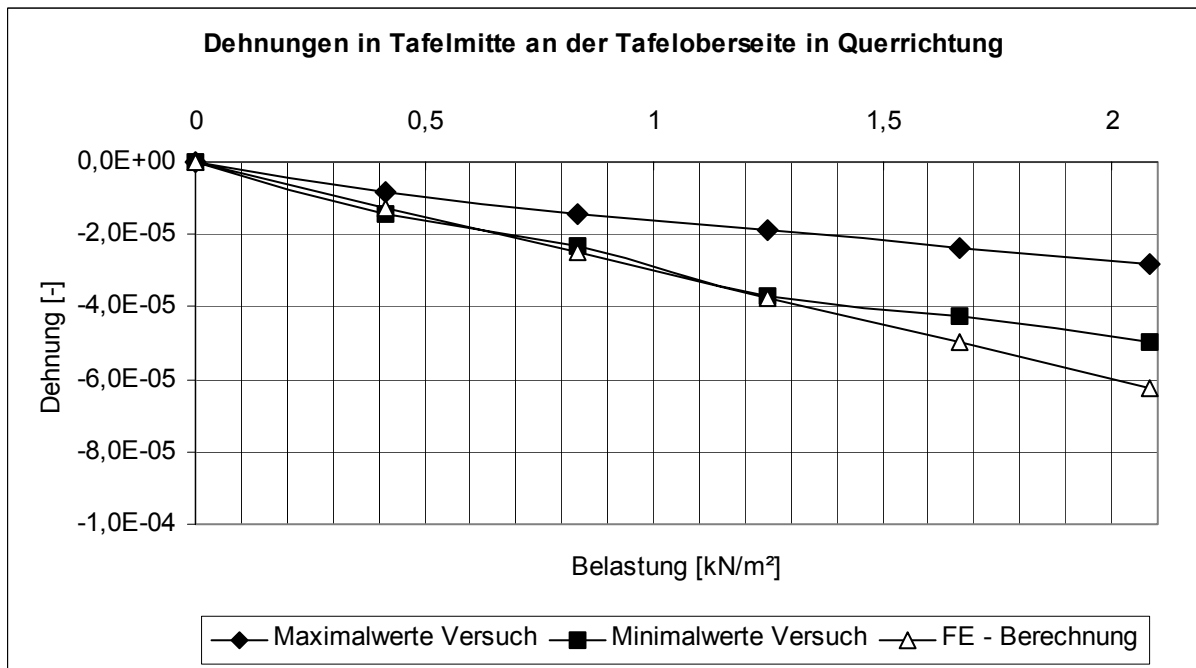


Diagramm A2.16

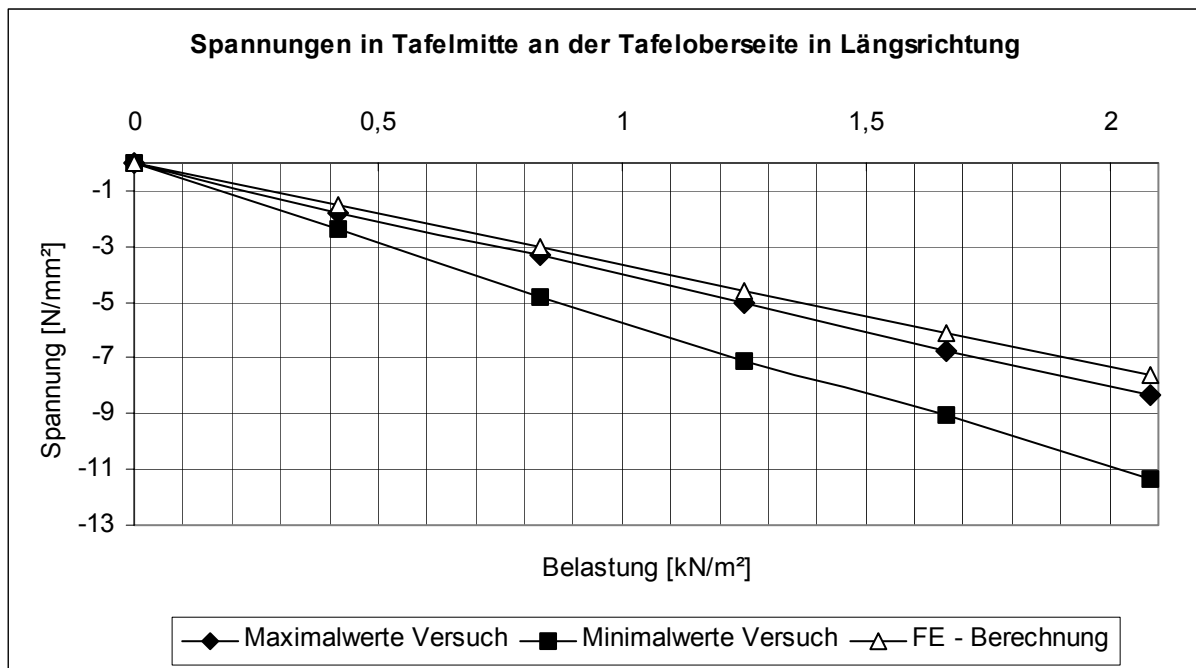


Diagramm A2.17

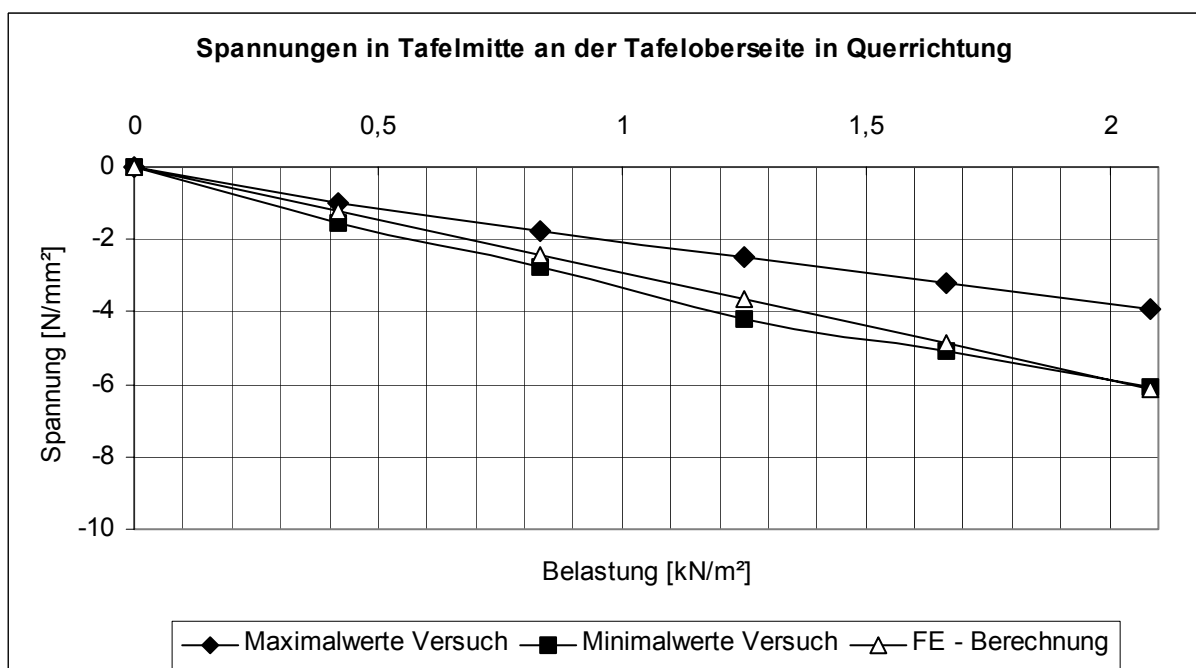


Diagramm A2.18

Anhang A3: Versuchsreihe 4: Starrer Halter mit 35 mm Loch

Diagramm	Messstellenbezeichnung [nach Bild 5.12]	Ausführliche Bezeichnung [nach Tabelle 5.2]
A3.1	MS 1	Durchbiegung in Tafelmitte
A3.2	MS 7	Durchbiegung am Tafelrand
A3.3	MS 2 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflager- ring
A3.4	MS 2 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflager- ring
A3.5	MS 2 o	Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflager- ring
A3.6	MS 2 u	Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Aufla- gerring
A3.7	MS 3 o	Radiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflagering
A3.8	MS 3 u	Radiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflagering
A3.9	MS 3 o	Radiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagering
A3.10	MS 3 u	Radiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagering
A3.11	MS 4 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Lochrand
A3.12	MS 4 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Lochrand
A3.13	MS 4 o	Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Lochrand
A3.14	MS 4 u	Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Loch- rand
A3.15	MS 5 o	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längs- richtung
A3.16	MS 5 u	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Quer- richtung
A3.17	MS 5 o	Spannungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längs- richtung
A3.18	MS 5 u	Spannungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Quer- richtung

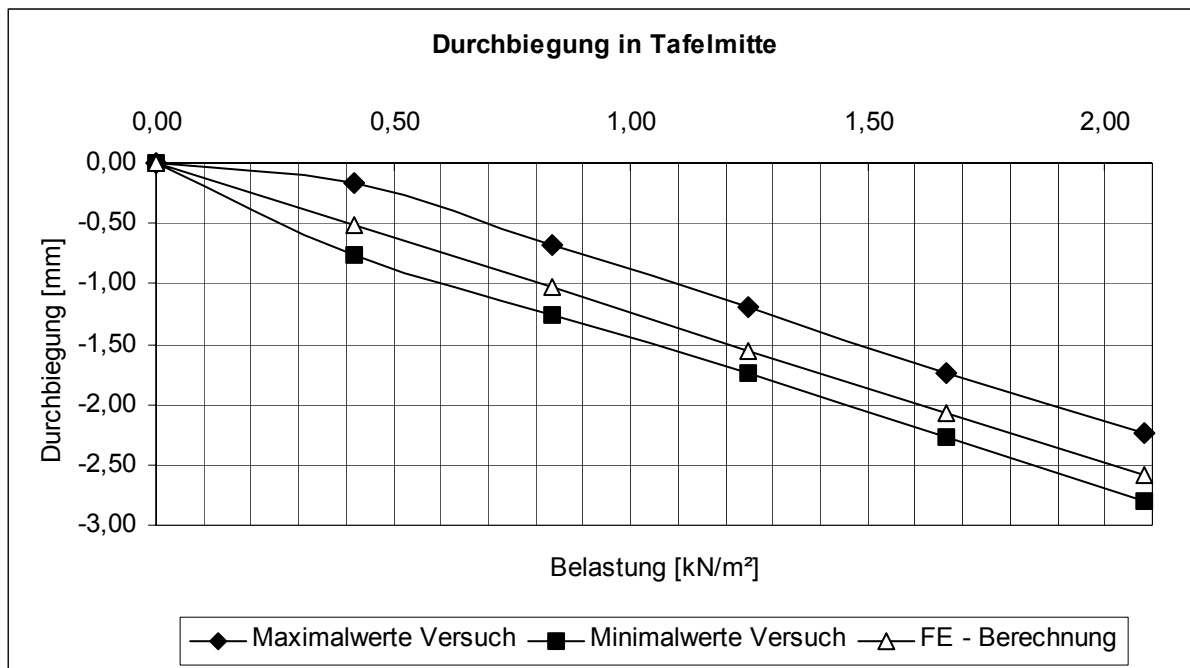


Diagramm A3.1

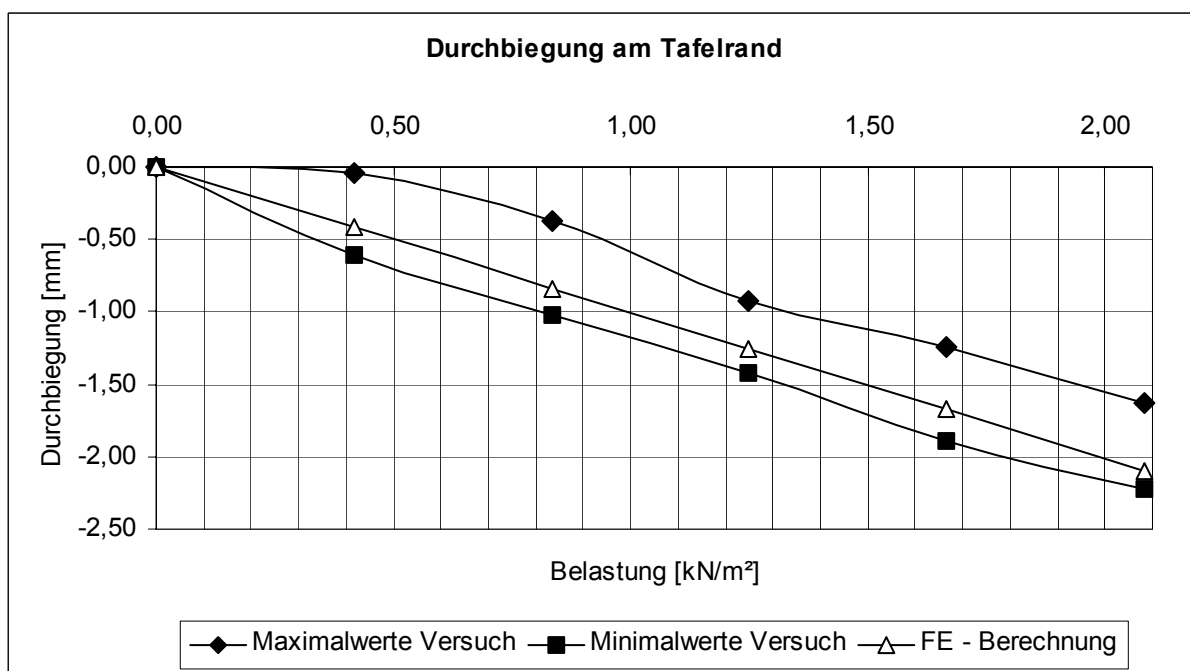


Diagramm A3.2

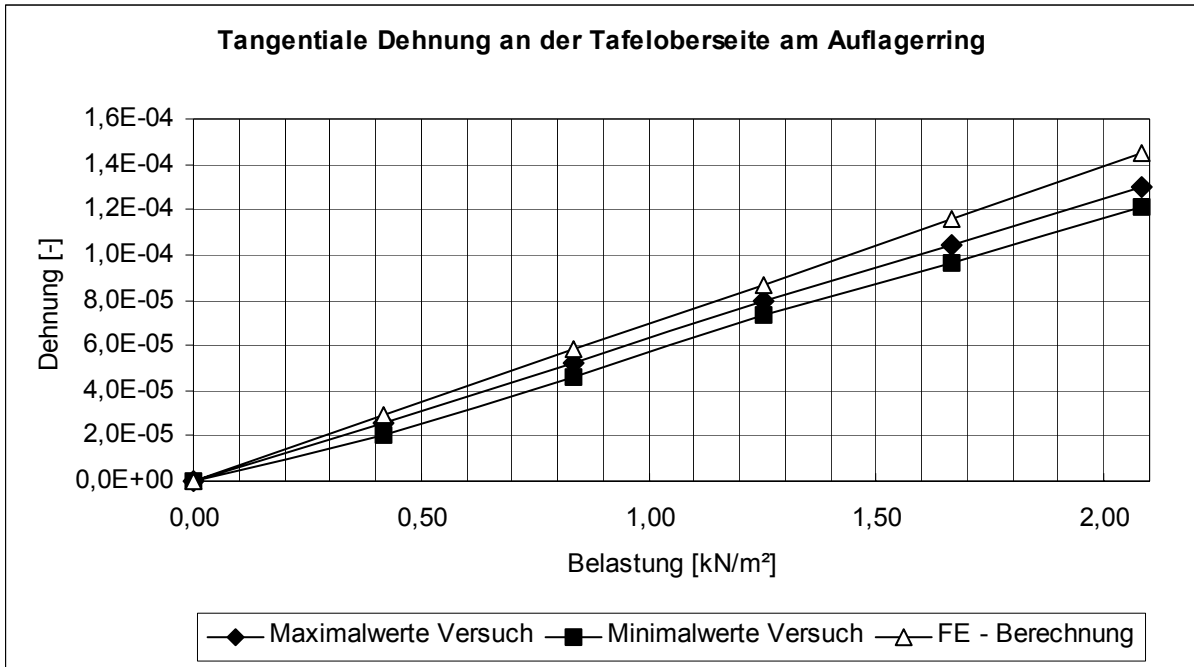


Diagramm A3.3

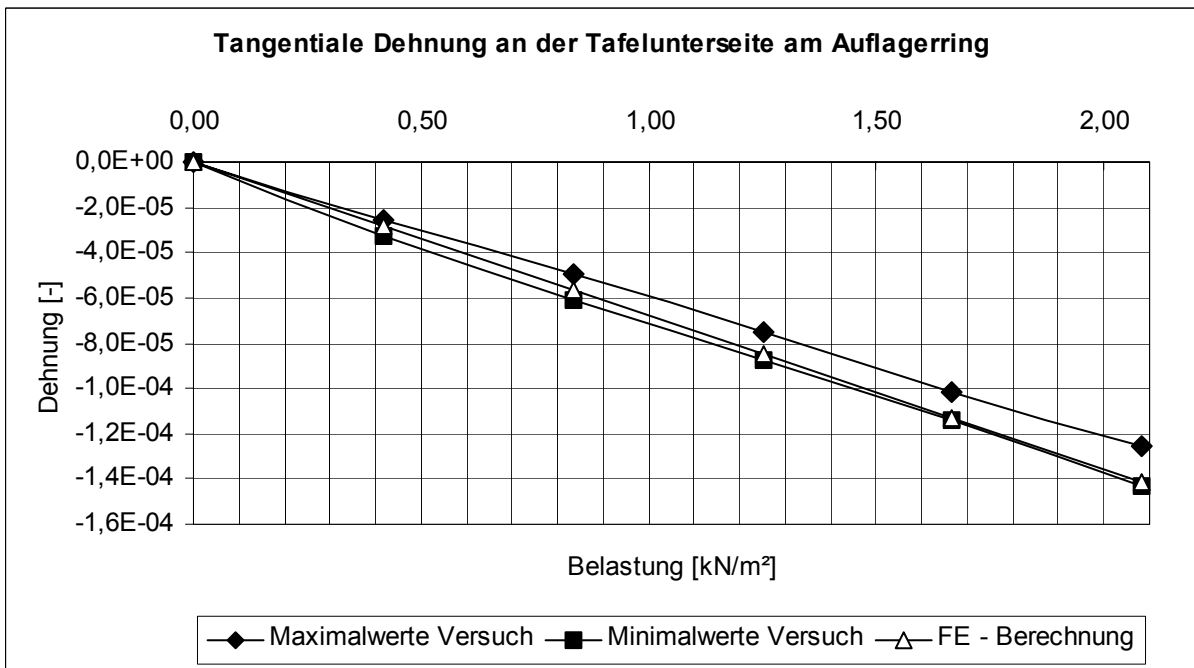


Diagramm A3.4

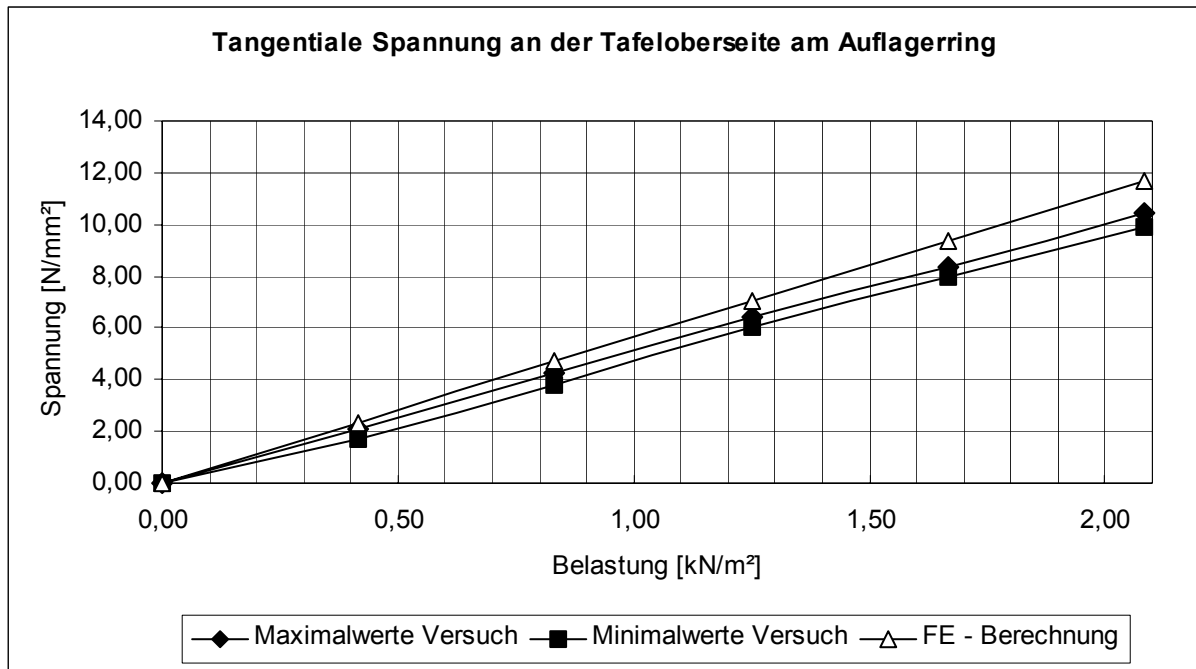


Diagramm A3.5

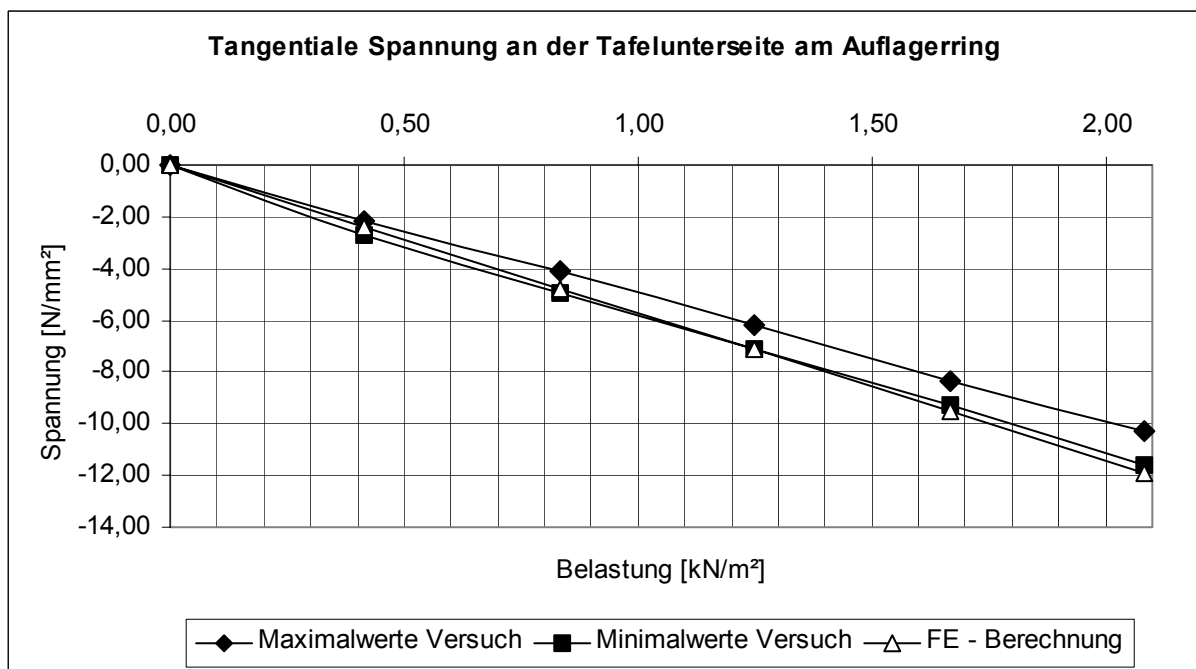


Diagramm A3.6

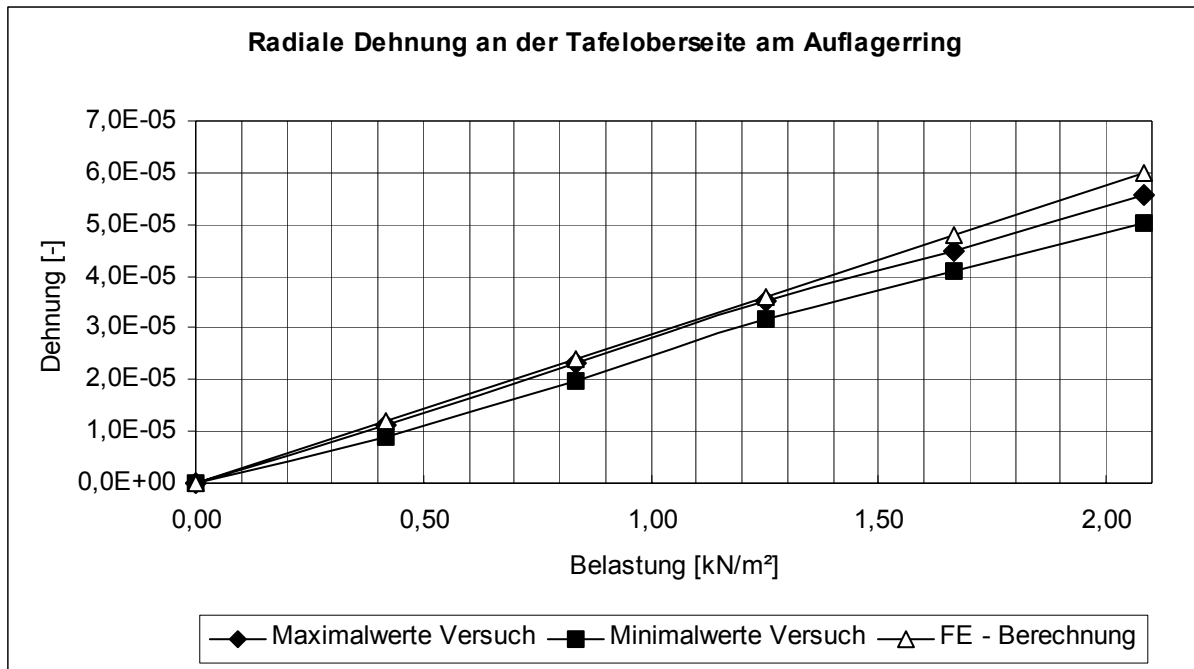


Diagramm A3.7

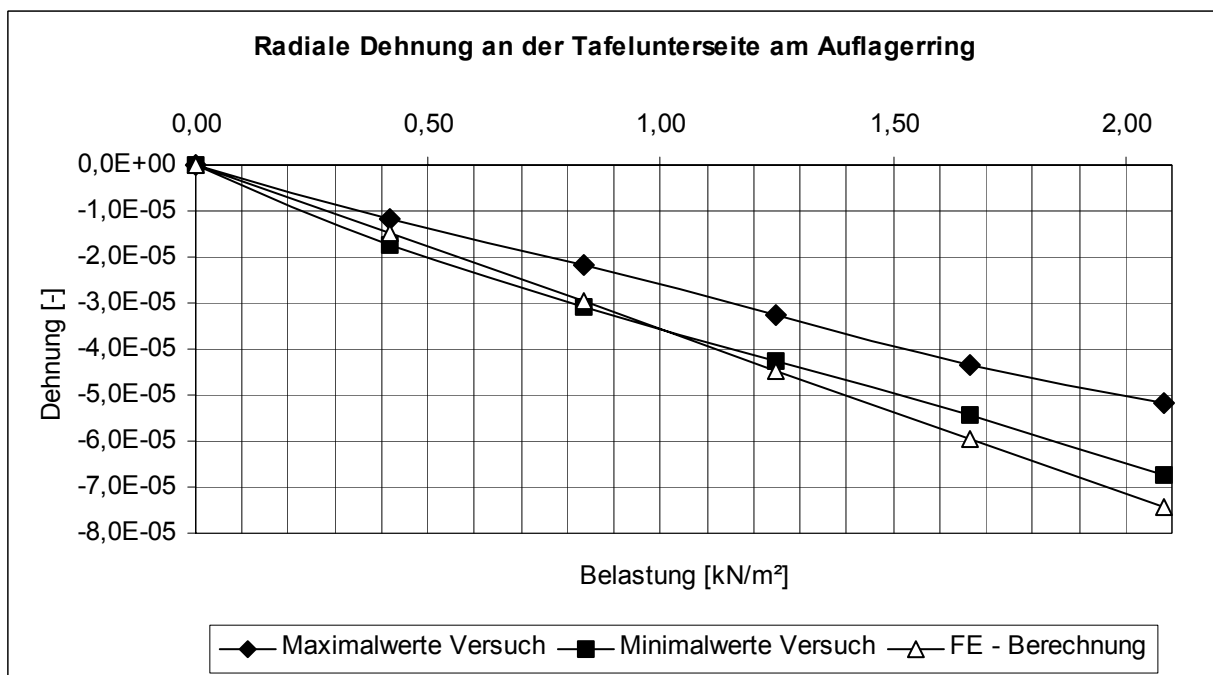


Diagramm A3.8

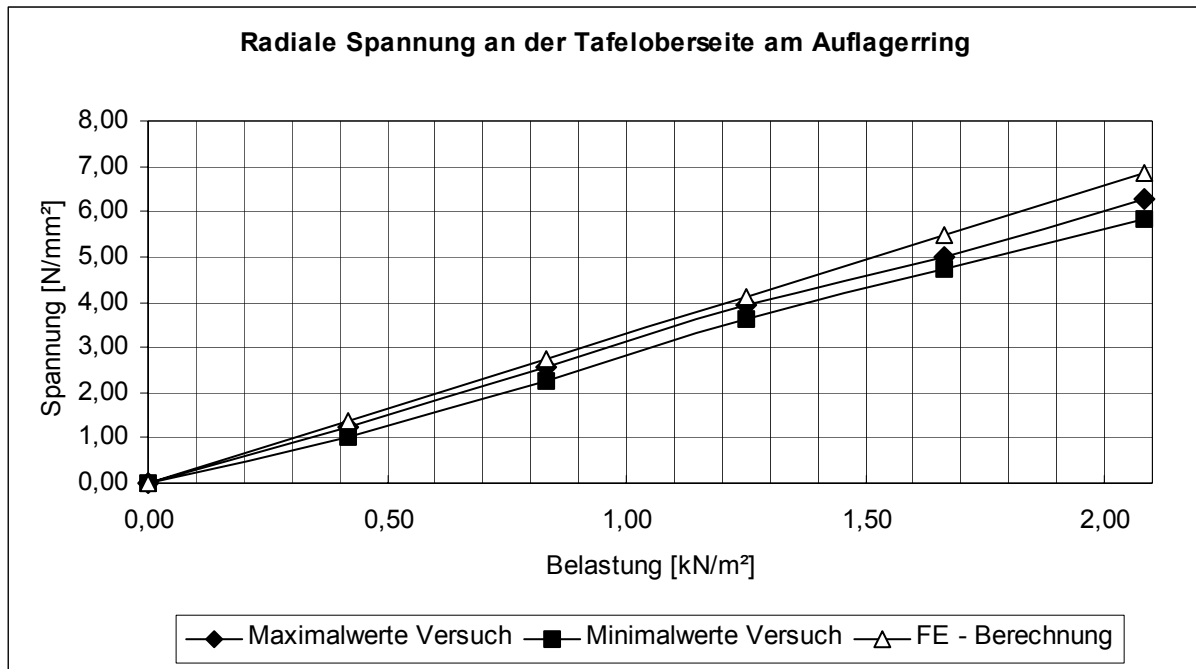


Diagramm A3.9

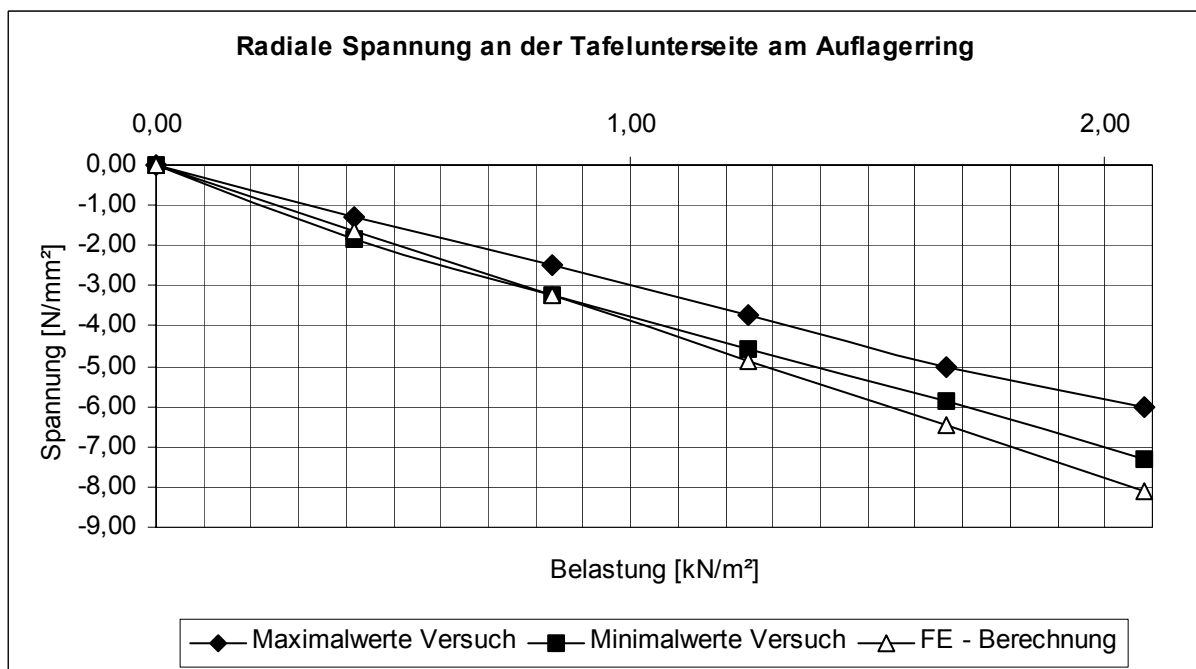


Diagramm A3.10

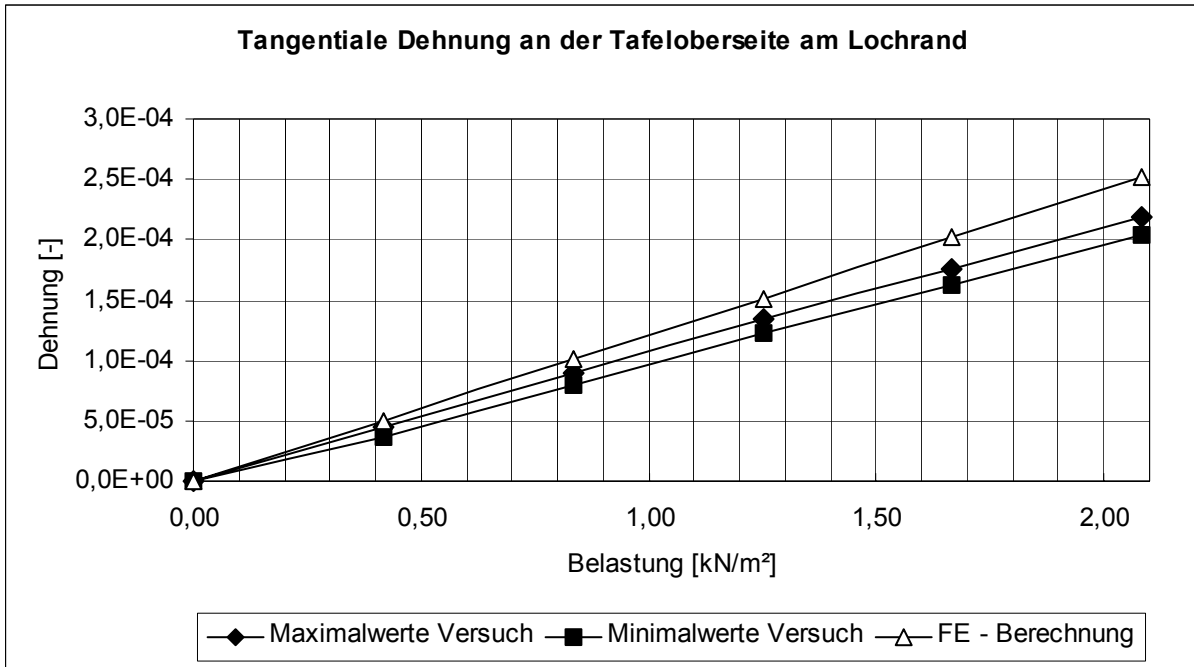


Diagramm A3.11

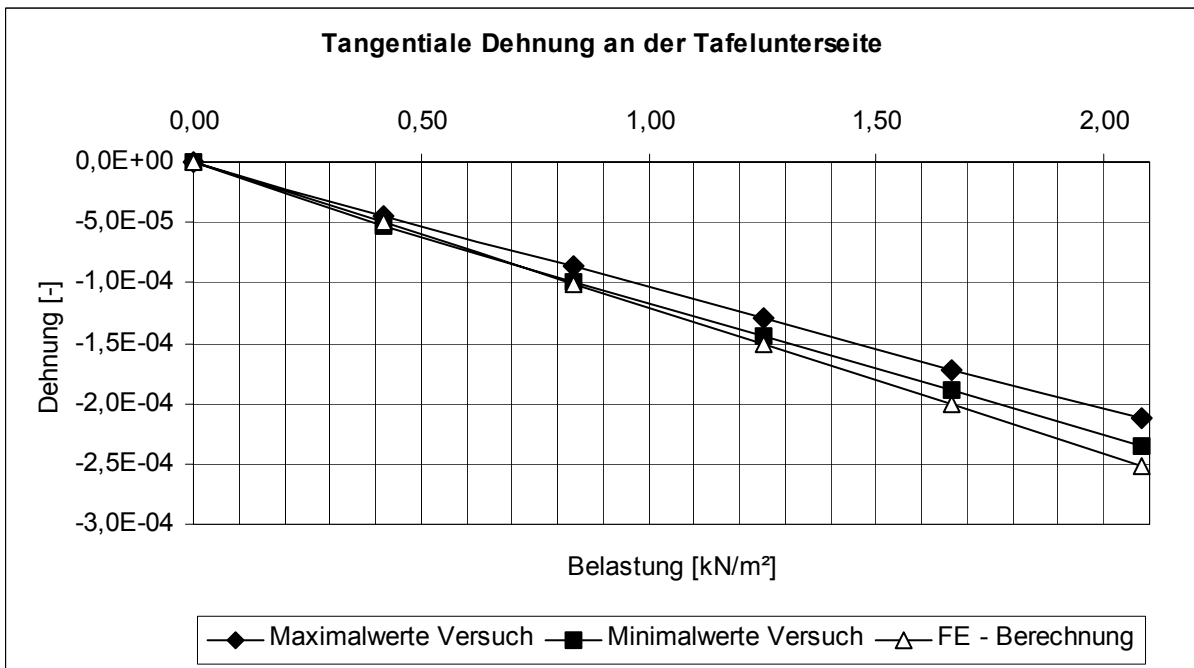


Diagramm A3.12

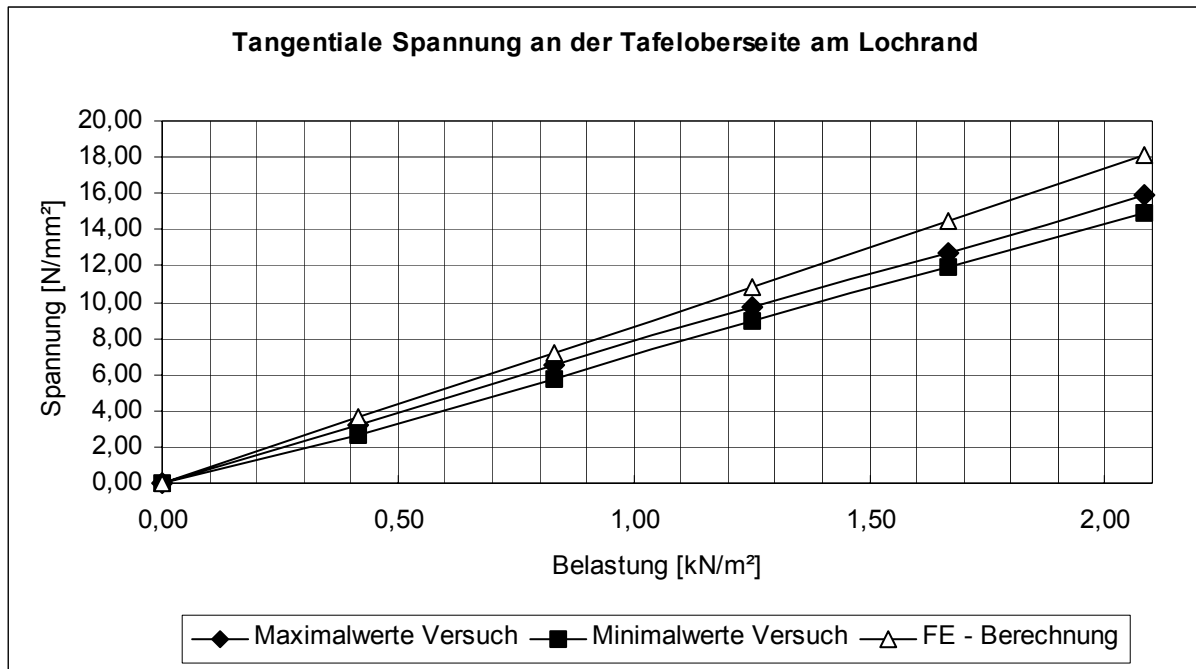


Diagramm A3.13

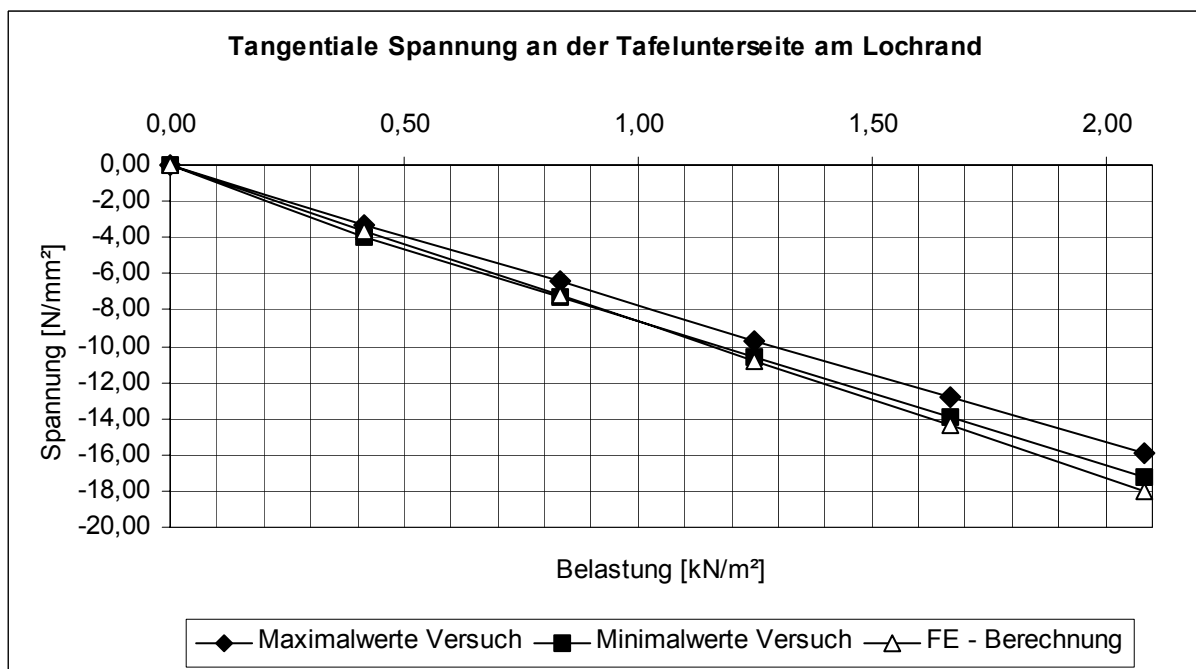


Diagramm A3.14

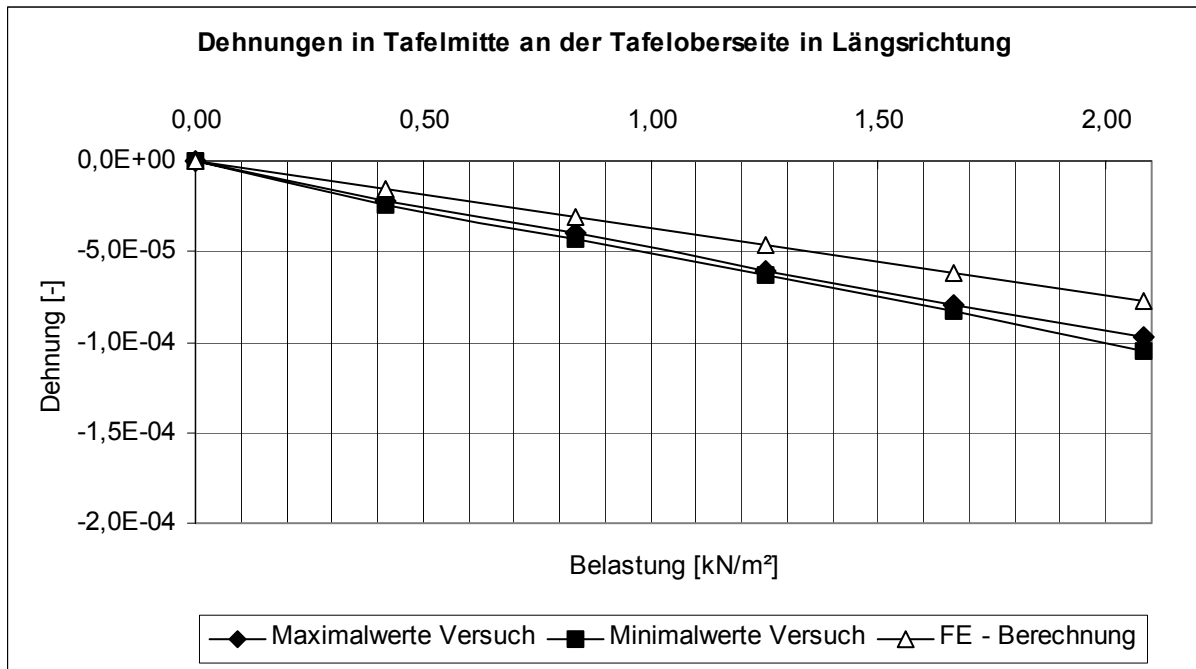


Diagramm A3.15

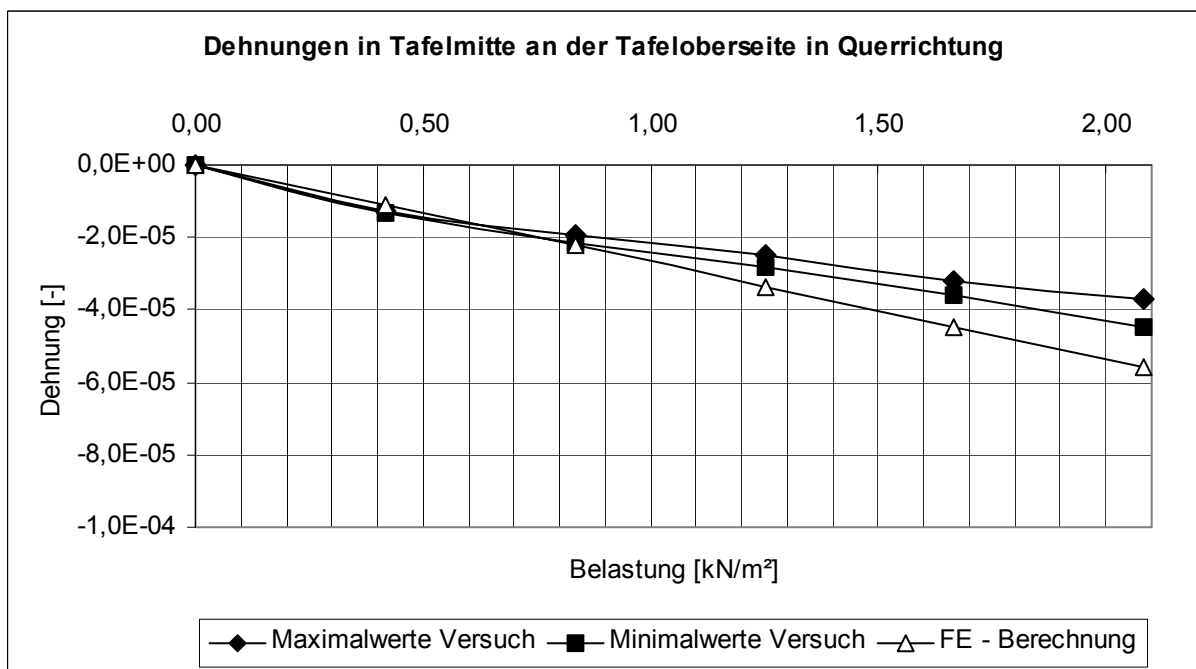


Diagramm A3.16

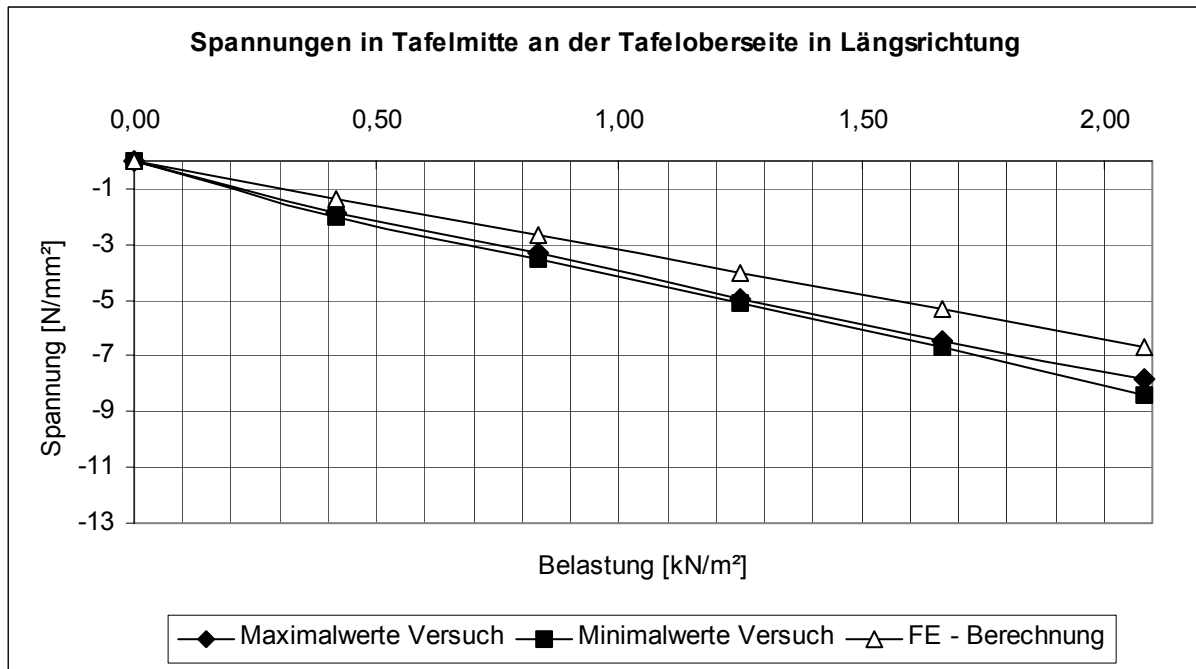


Diagramm A3.17

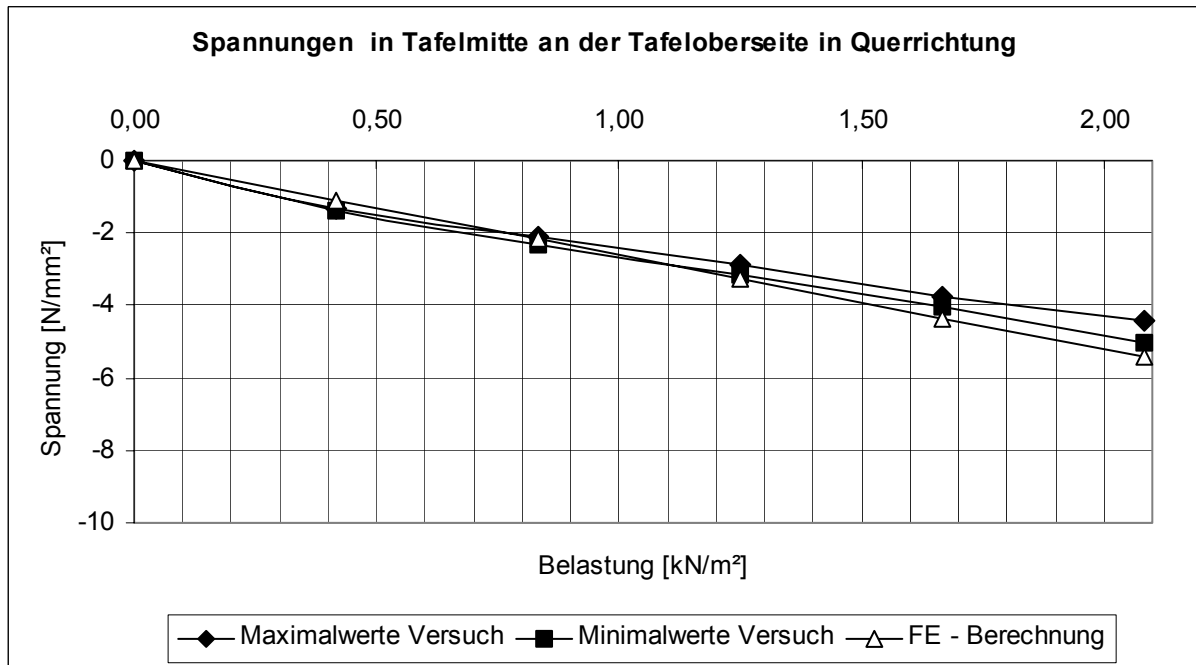


Diagramm A3.18

Anhang A4: Versuchsreihe 5: Gelenkiger Halter mit 35 mm Loch

Diagramm	Messstellenbezeichnung [nach Bild 5.12]	Ausführliche Bezeichnung [nach Tabelle 5.2]
A4.1	MS 1	Durchbiegung in Tafelmitte
A4.2	MS 7	Durchbiegung am Tafelrand
A4.3	MS 2 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflager- ring
A4.4	MS 2 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflager- ring
A4.5	MS 2 o	Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflager- ring
A4.6	MS 2 u	Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Aufla- gerring
A4.7	MS 3 o	Radiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflagering
A4.8	MS 3 u	Radiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflagering
A4.9	MS 3 o	Radiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagering
A4.10	MS 3 u	Radiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagering
A4.11	MS 4 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Lochrand
A4.12	MS 4 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Lochrand
A4.13	MS 4 o	Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Lochrand
A4.14	MS 4 u	Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Loch- rand
A4.15	MS 5 o	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längs- richtung
A4.16	MS 5 u	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Quer- richtung
A4.17	MS 5 o	Spannungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längs- richtung
A4.18	MS 5 u	Spannungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Quer- richtung

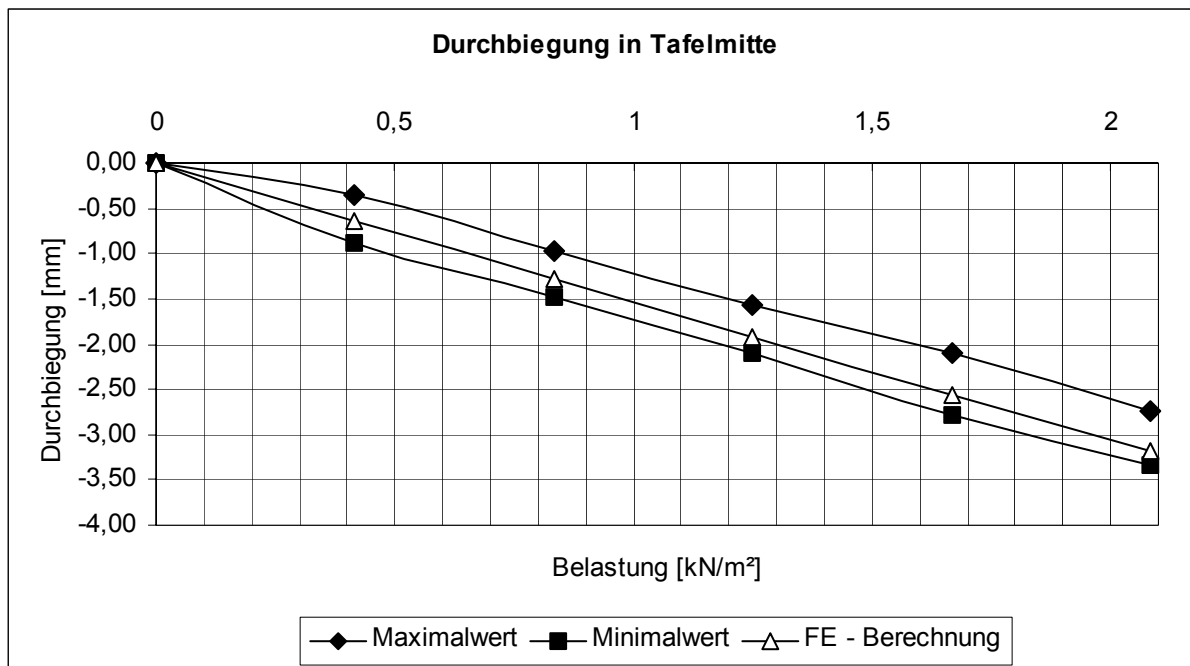


Diagramm A4.1

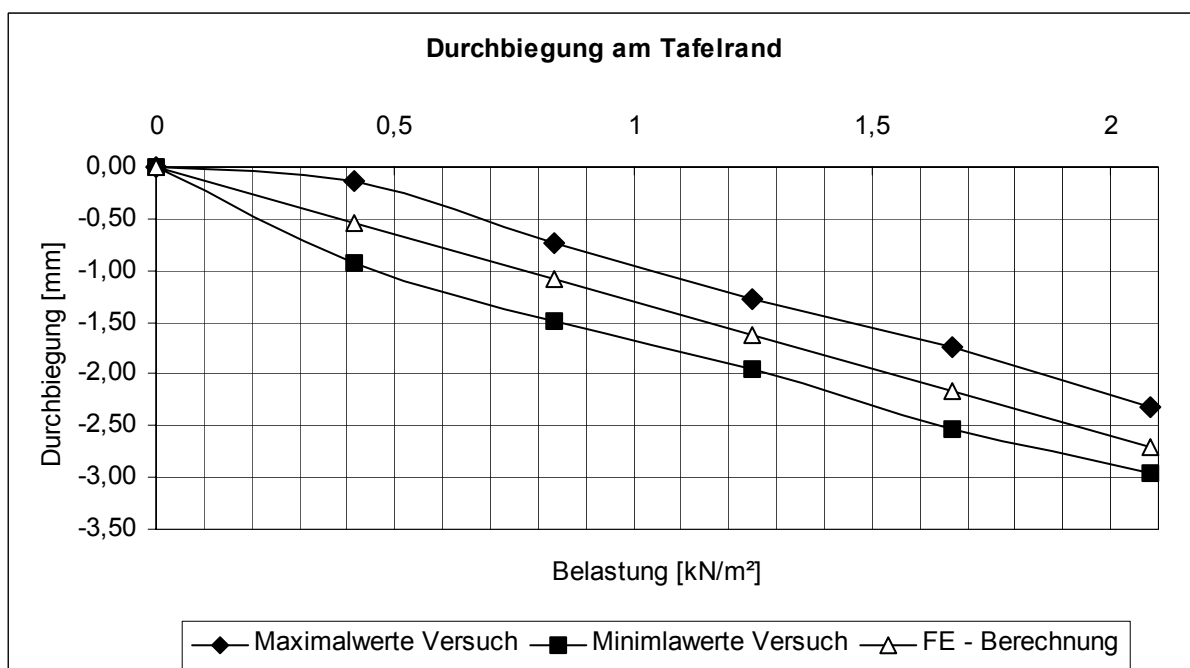


Diagramm A4.2

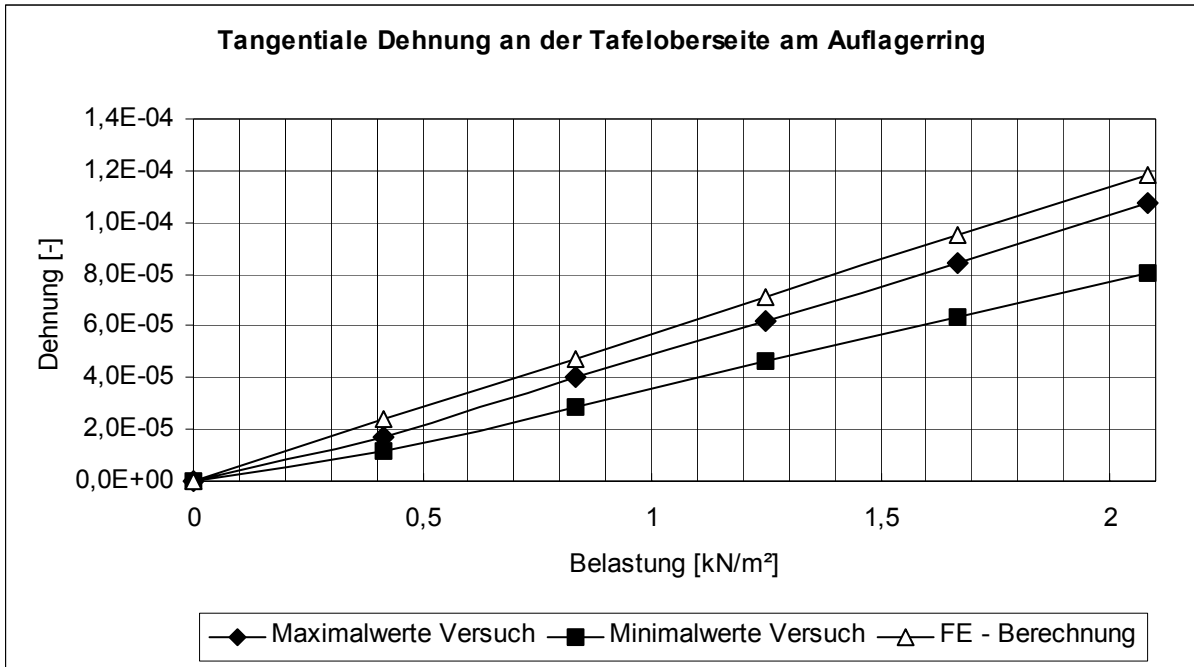


Diagramm A4.3

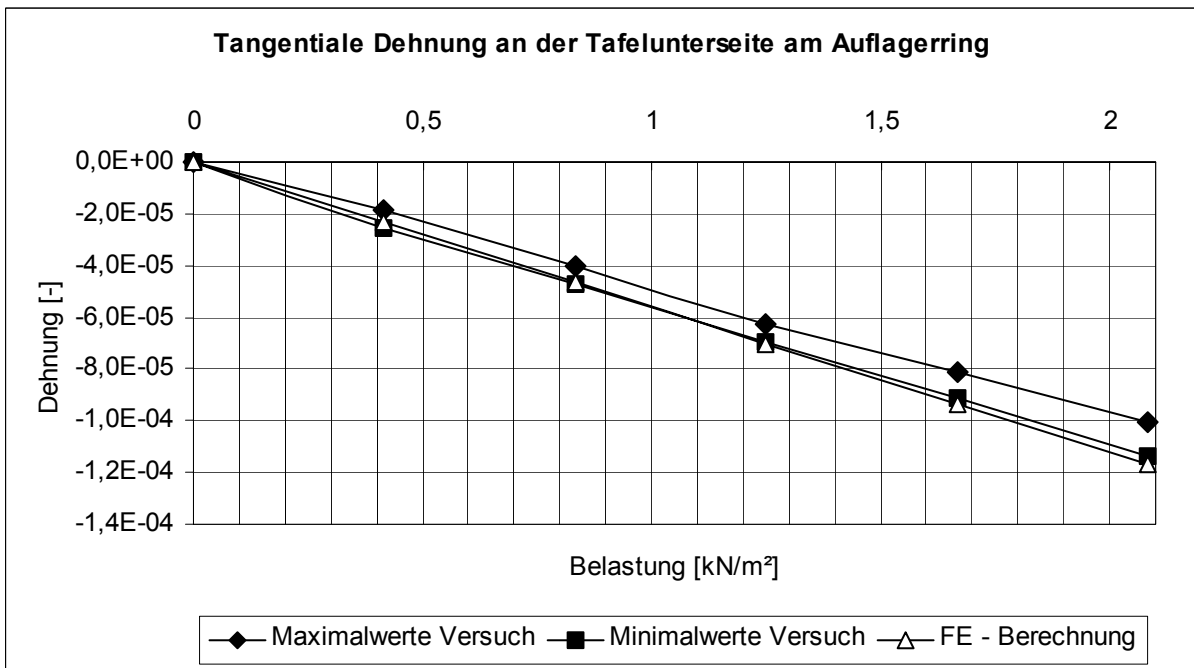


Diagramm A4.4

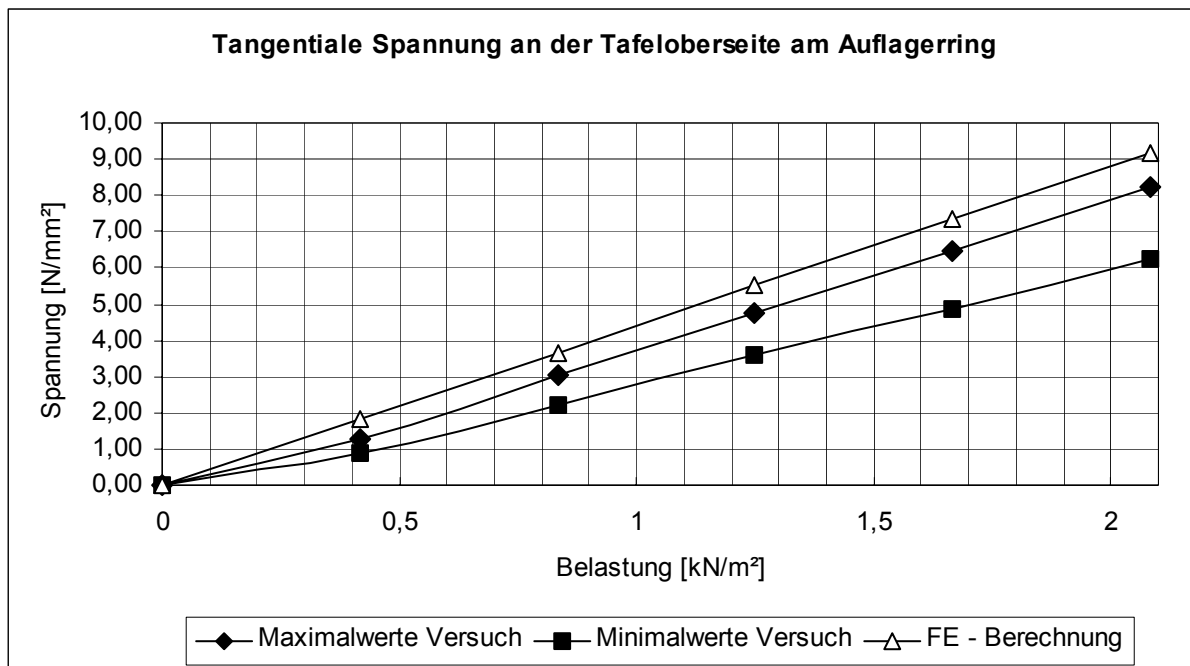


Diagramm A4.5

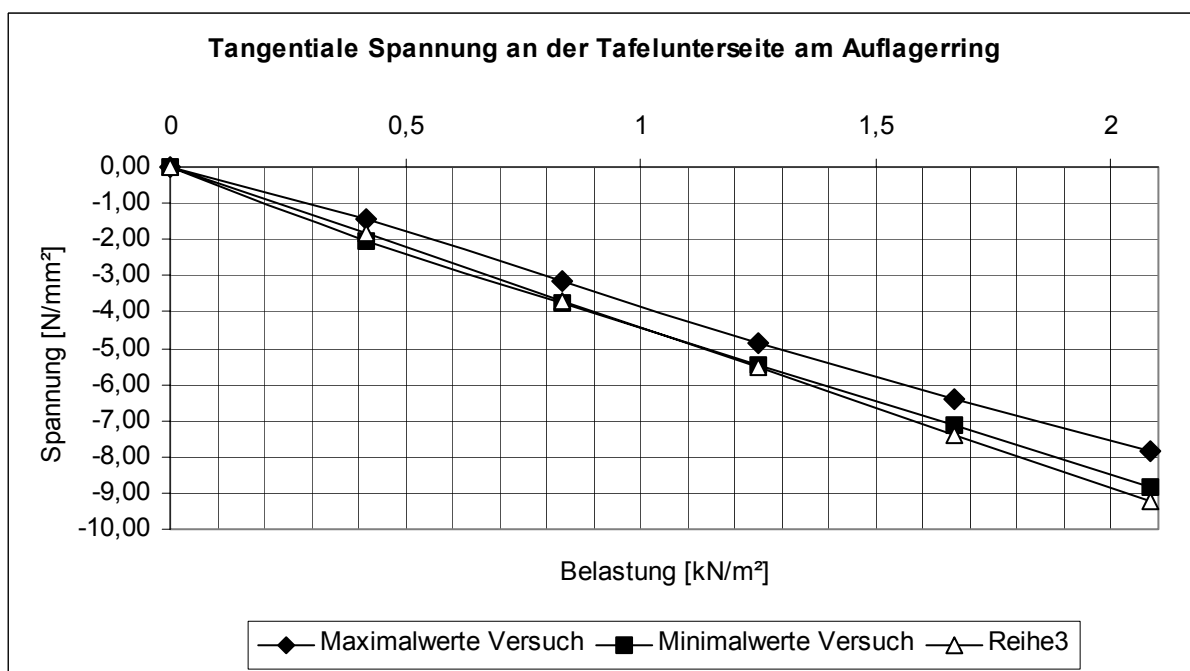


Diagramm A4.6

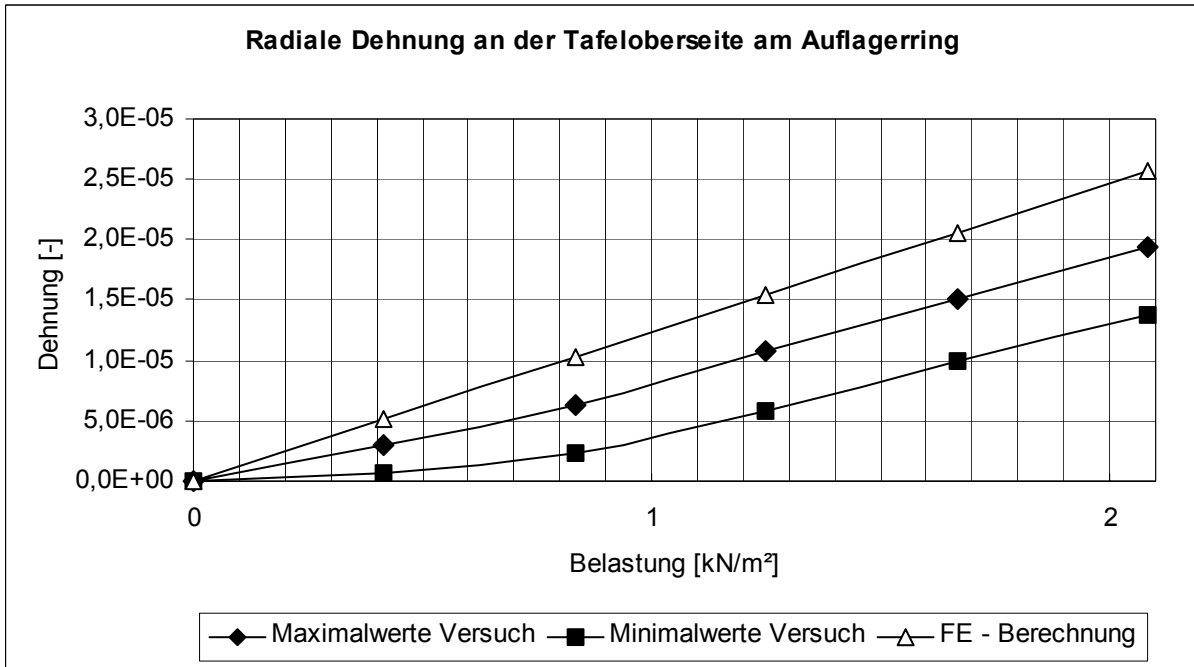


Diagramm A4.7

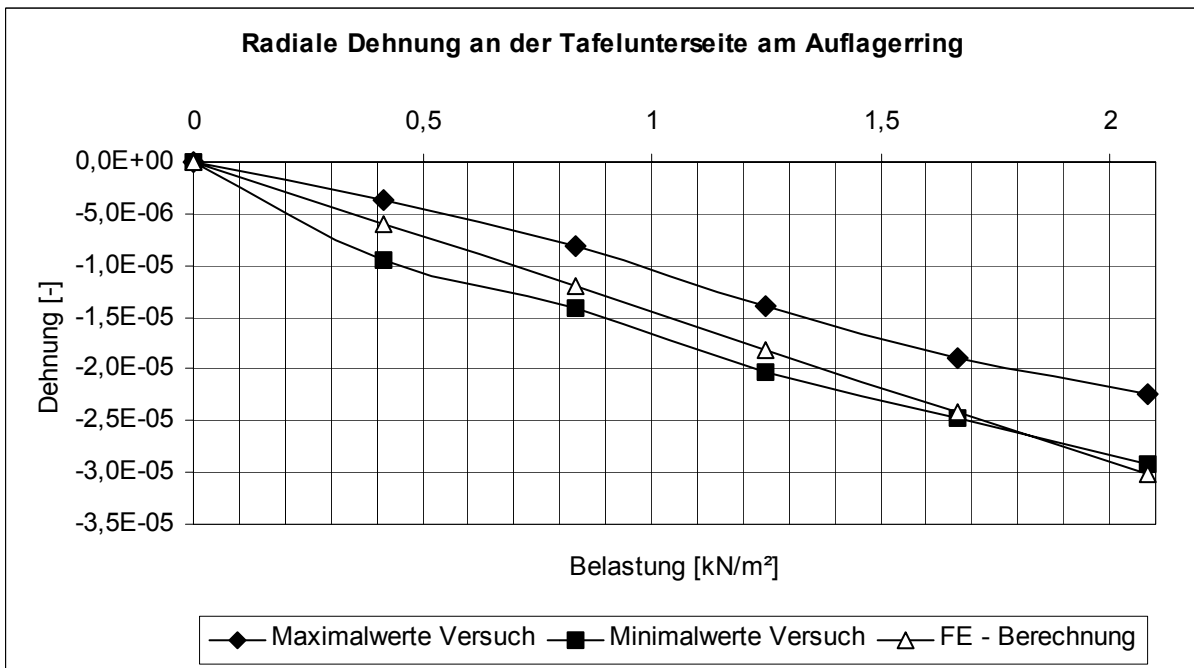


Diagramm A4.8

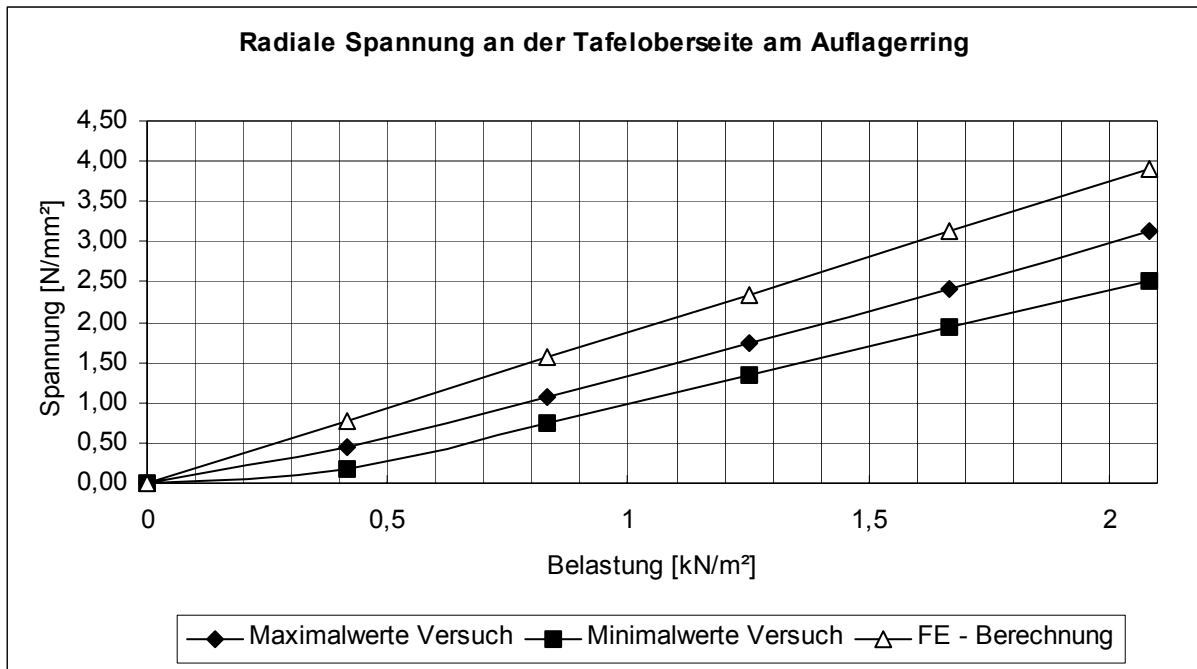


Diagramm A4.9

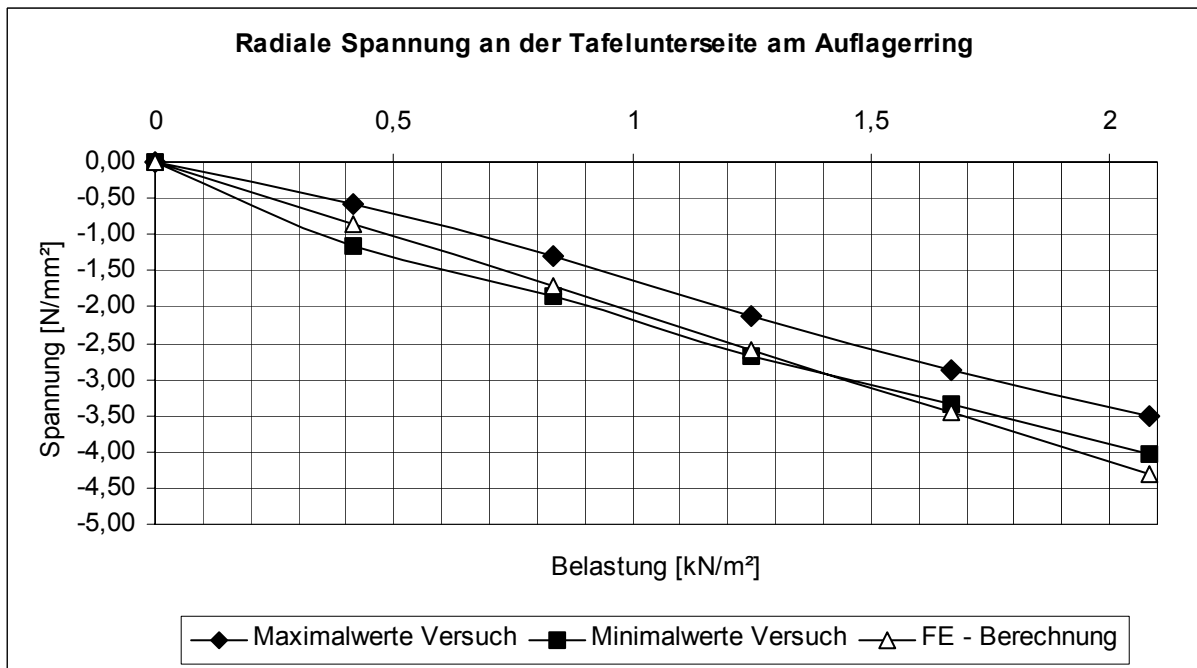


Diagramm A4.10

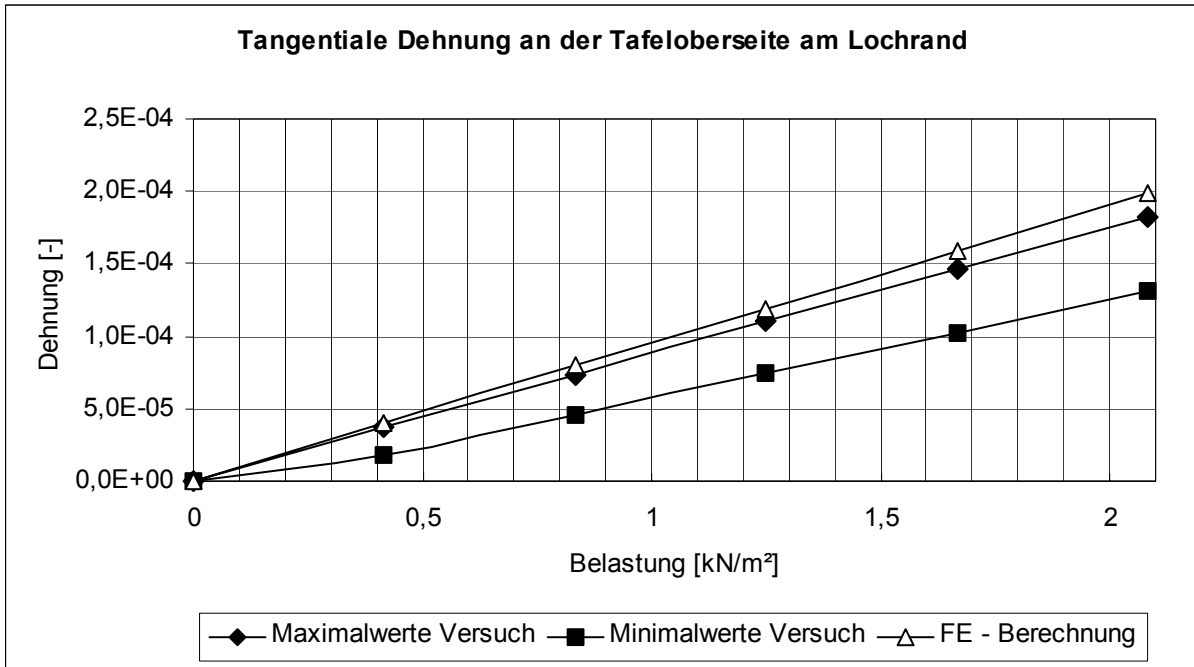


Diagramm A4.11

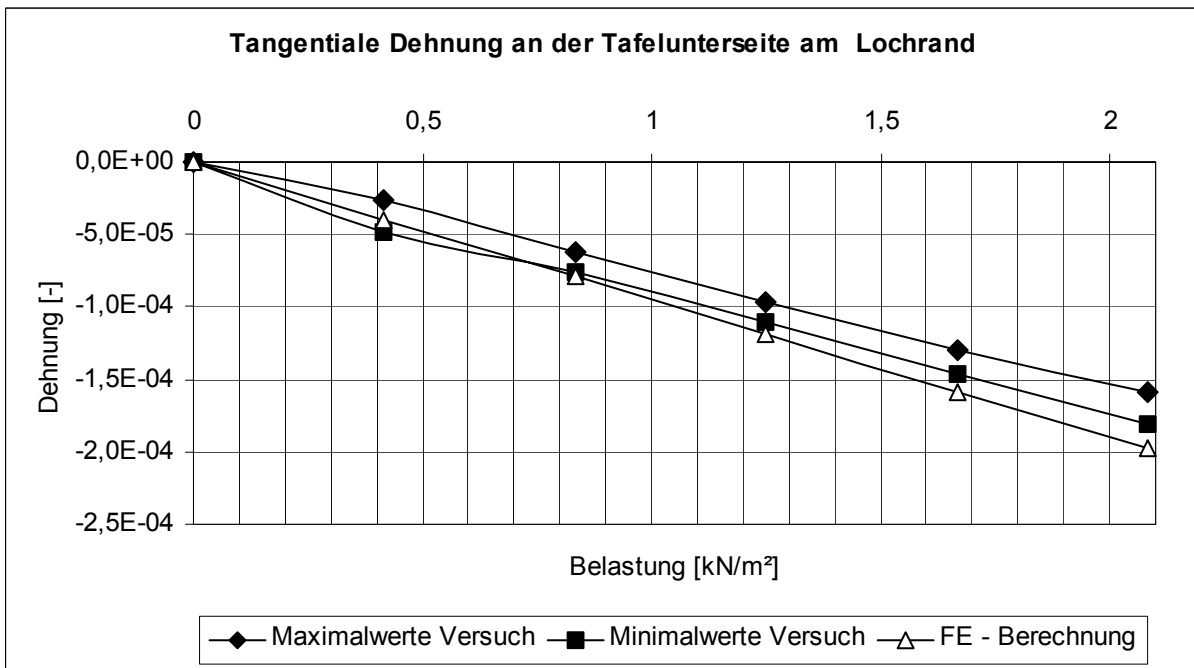


Diagramm A4.12

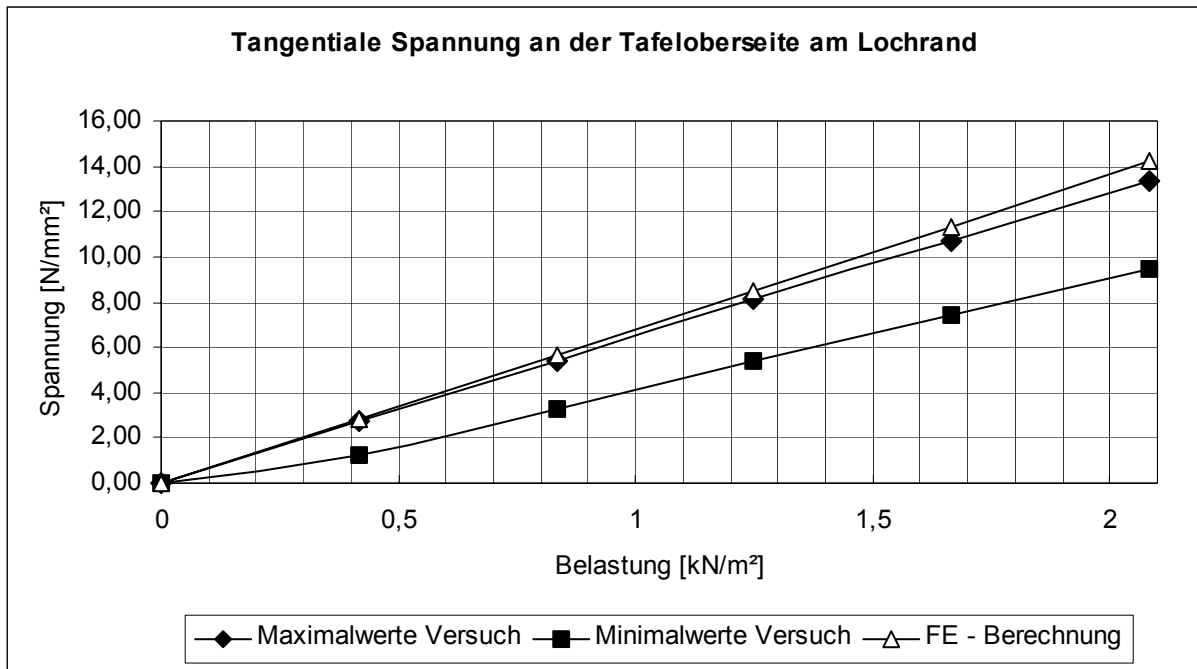


Diagramm A4.13

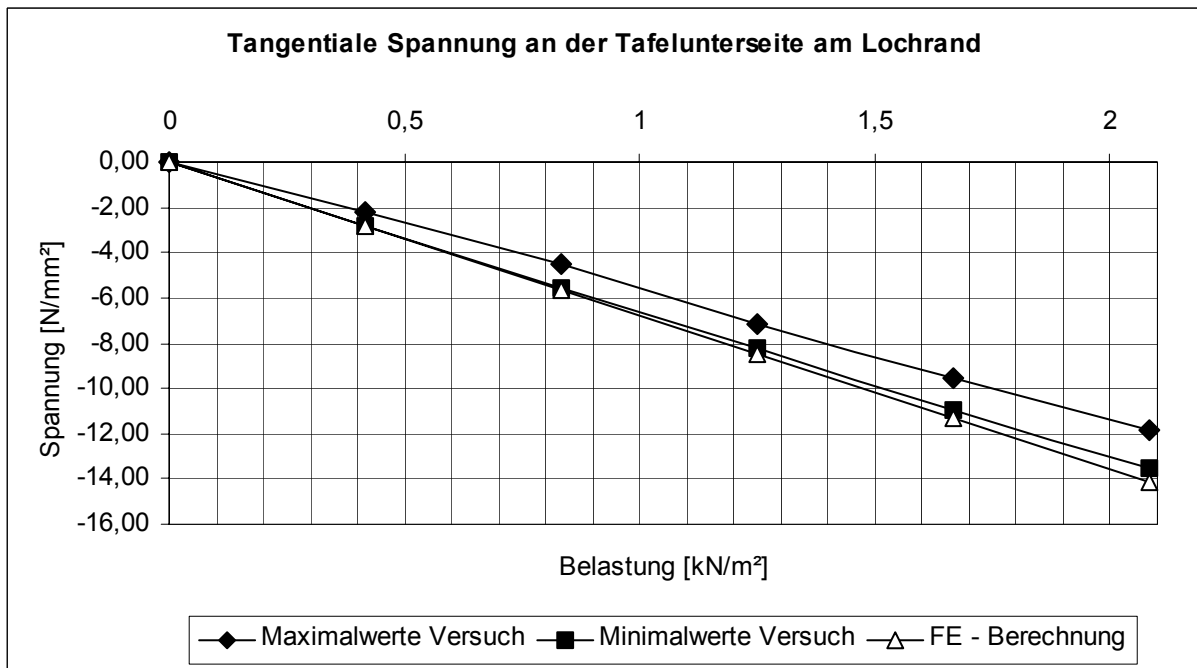


Diagramm A4.14

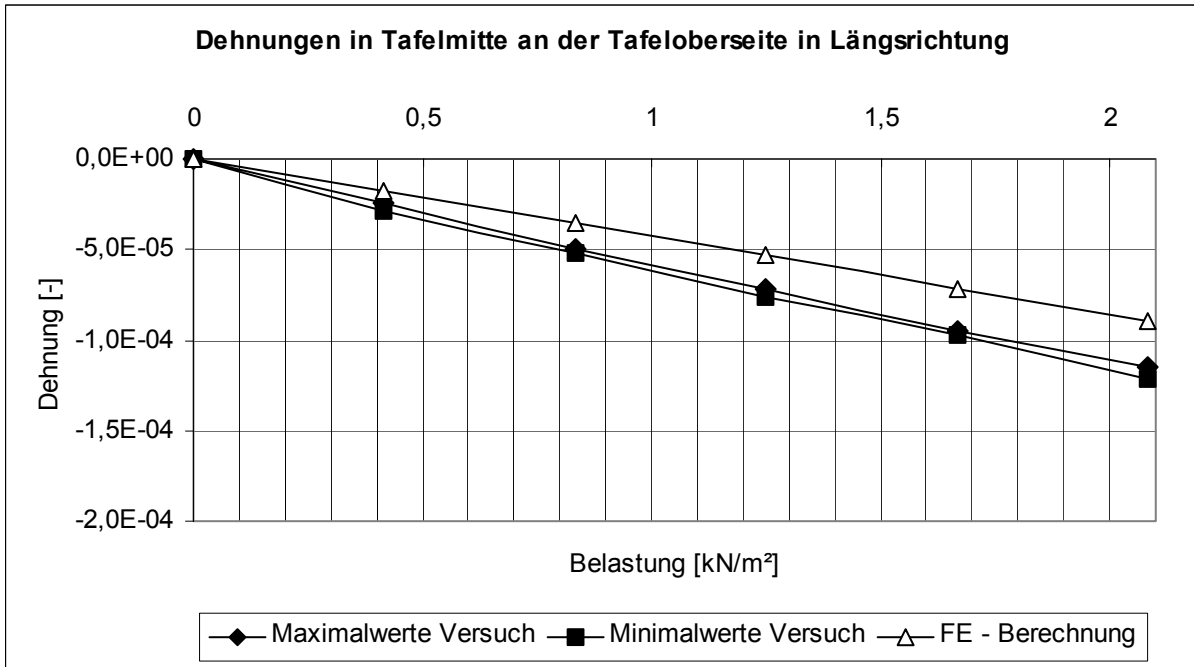


Diagramm A4.15

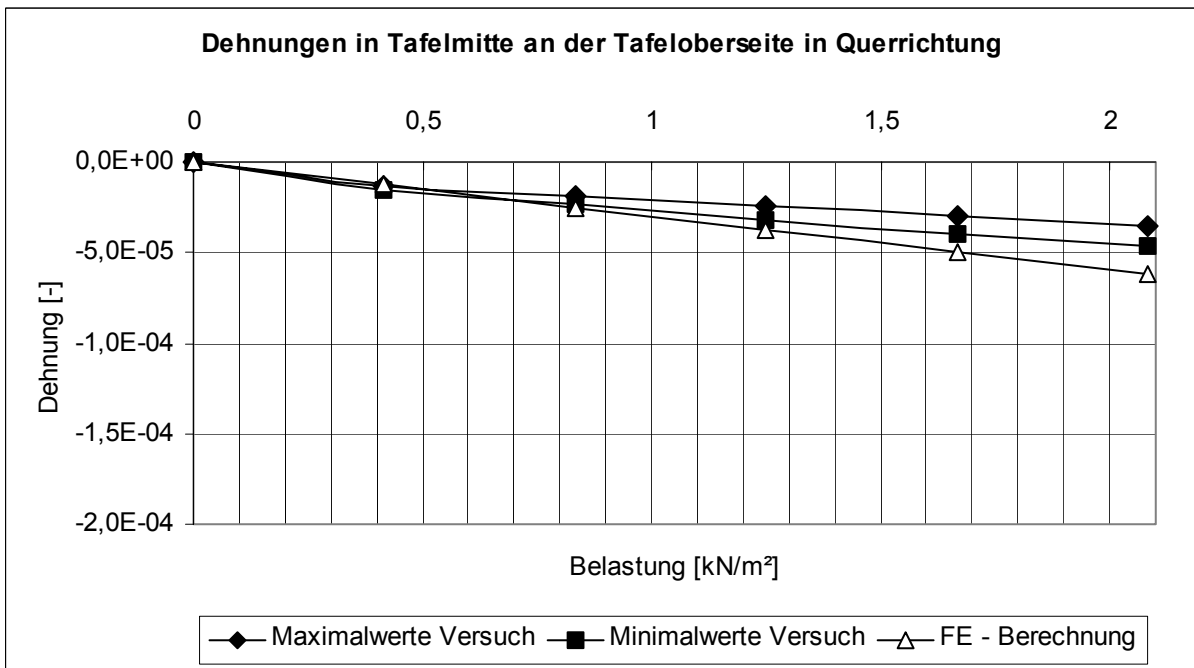


Diagramm A4.16

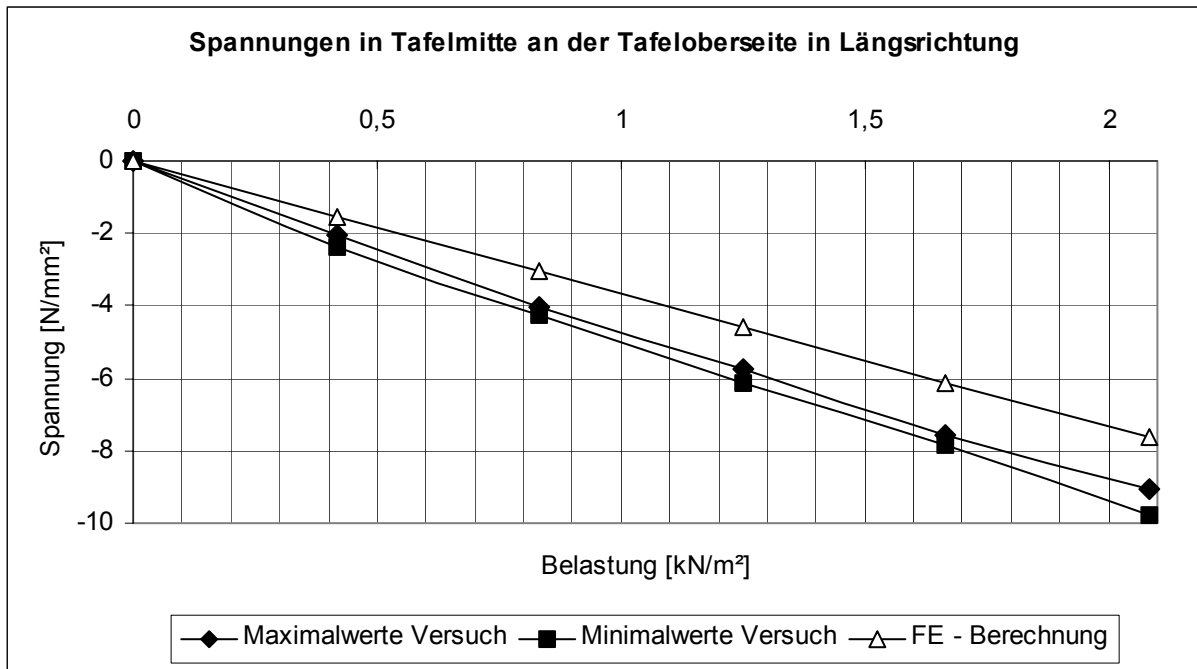


Diagramm A4.17

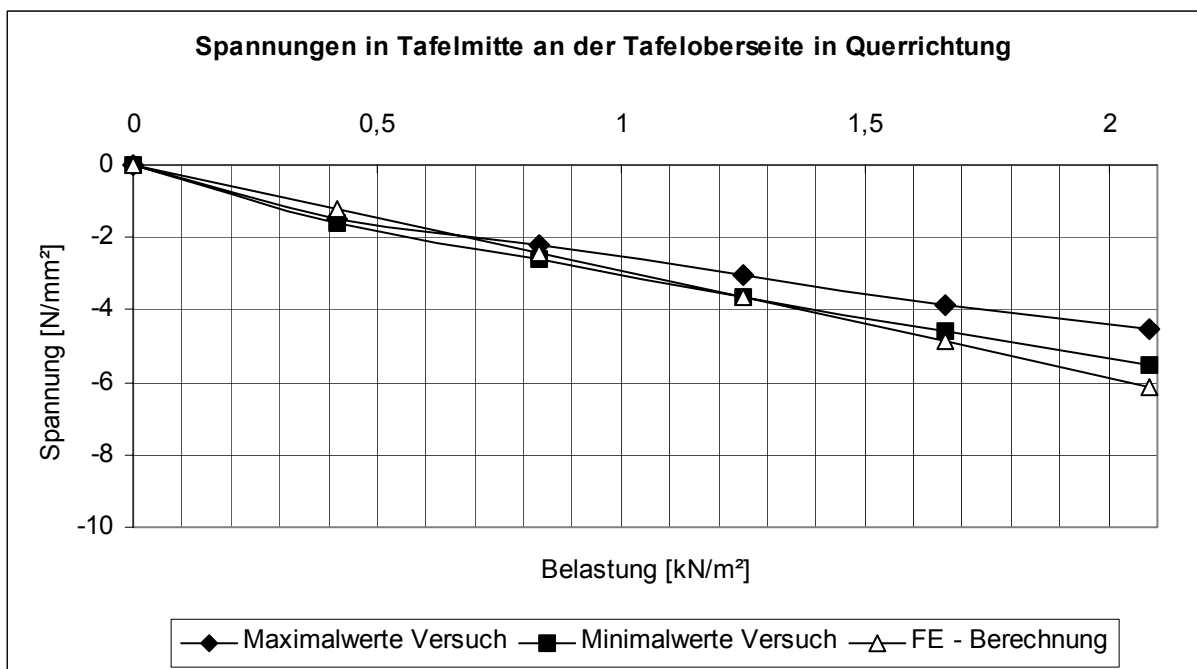


Diagramm A4.18

Anhang A5: Versuchsreihe 6: Starrer Halter mit 35 mm Loch / verfüllt

Diagramm	Messstellenbezeichnung [nach Bild 5.12]	Ausführliche Bezeichnung [nach Tabelle 5.2]
A5.1	MS 1	Durchbiegung in Tafelmitte
A5.2	MS 7	Durchbiegung am Tafelrand
A5.3	MS 2 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflager- ring
A5.4	MS 2 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflager- ring
A5.5	MS 2 o	Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflager- ring
A5.6	MS 2 u	Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Aufla- gerring
A5.7	MS 3 o	Radiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflagering
A5.8	MS 3 u	Radiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflagering
A5.9	MS 3 o	Radiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagering
A5.10	MS 3 u	Radiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagering
A5.11	MS 4 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Lochrand
A5.12	MS 4 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Lochrand
A5.13	MS 4 o	Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Lochrand
A5.14	MS 4 u	Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Loch- rand
A5.15	MS 5 o	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längs- richtung
A5.16	MS 5 u	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Quer- richtung
A5.17	MS 5 o	Spannungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längs- richtung
A5.18	MS 5 u	Spannungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Quer- richtung

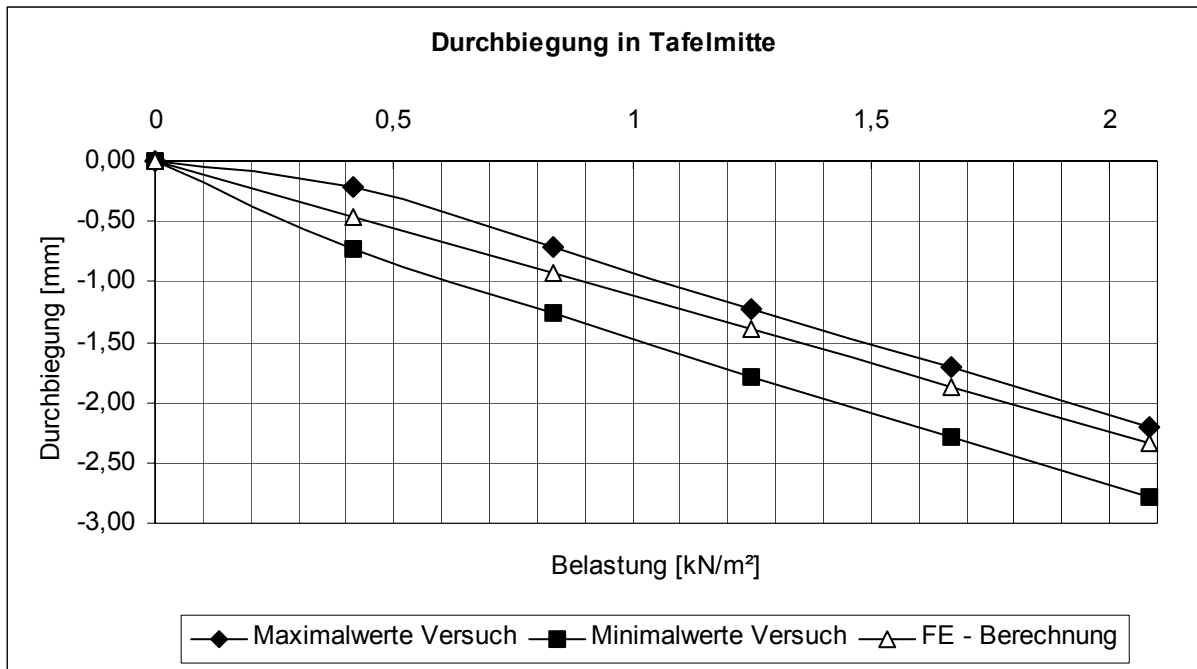


Diagramm A5.1

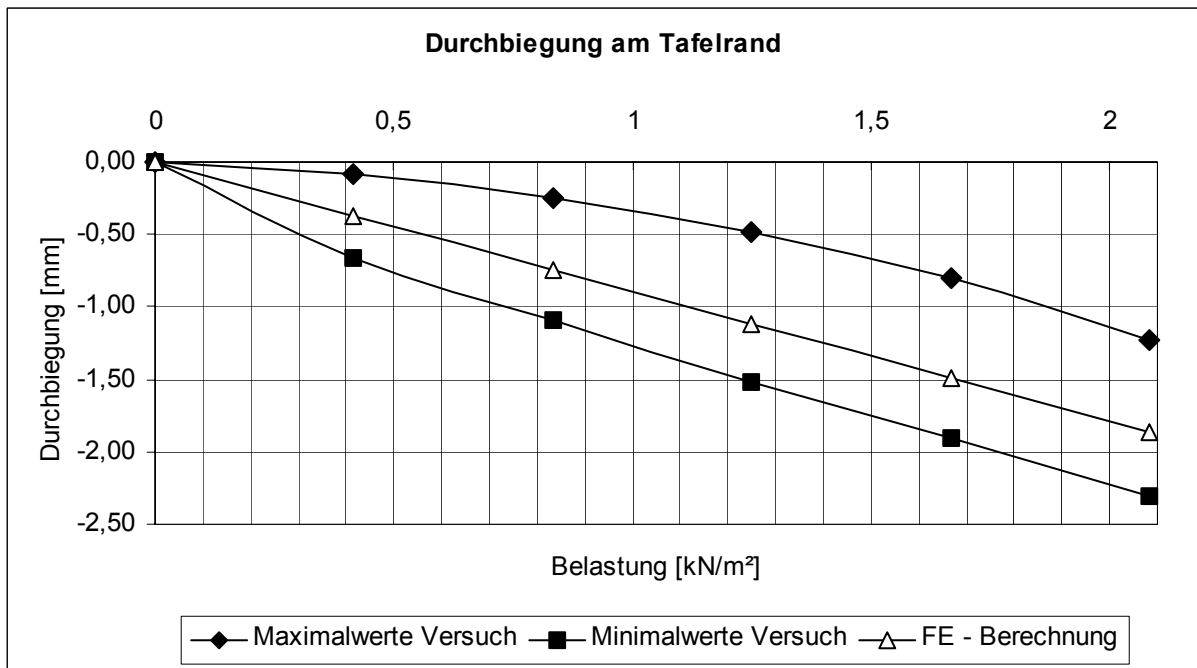


Diagramm A5.2

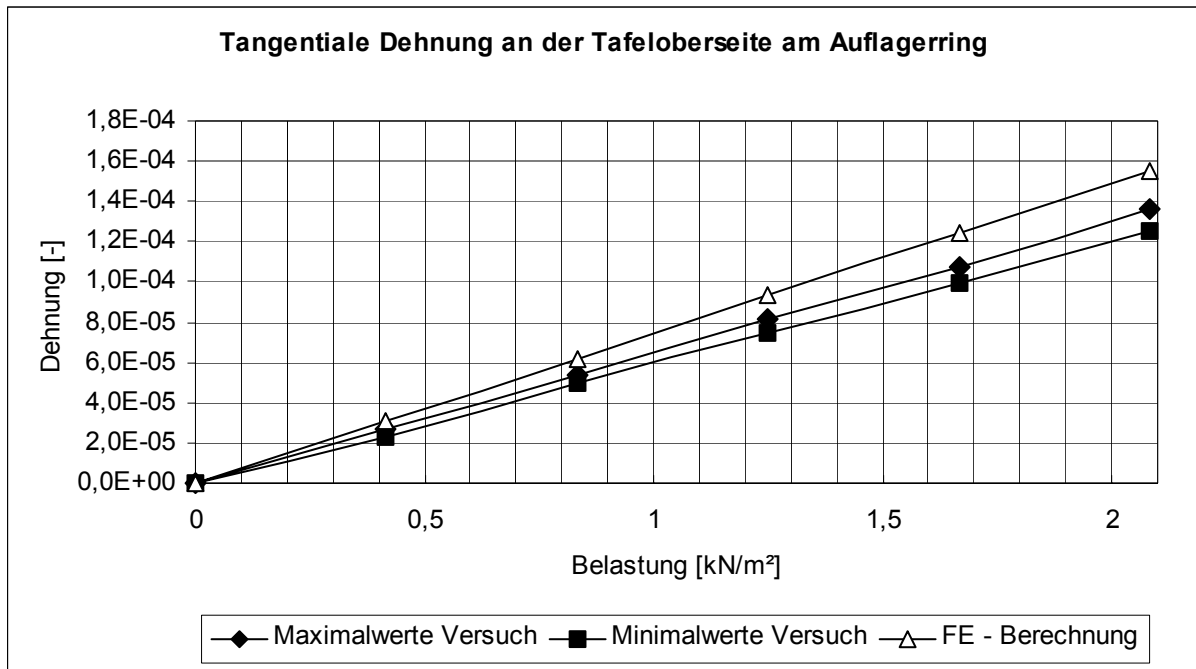


Diagramm A5.3

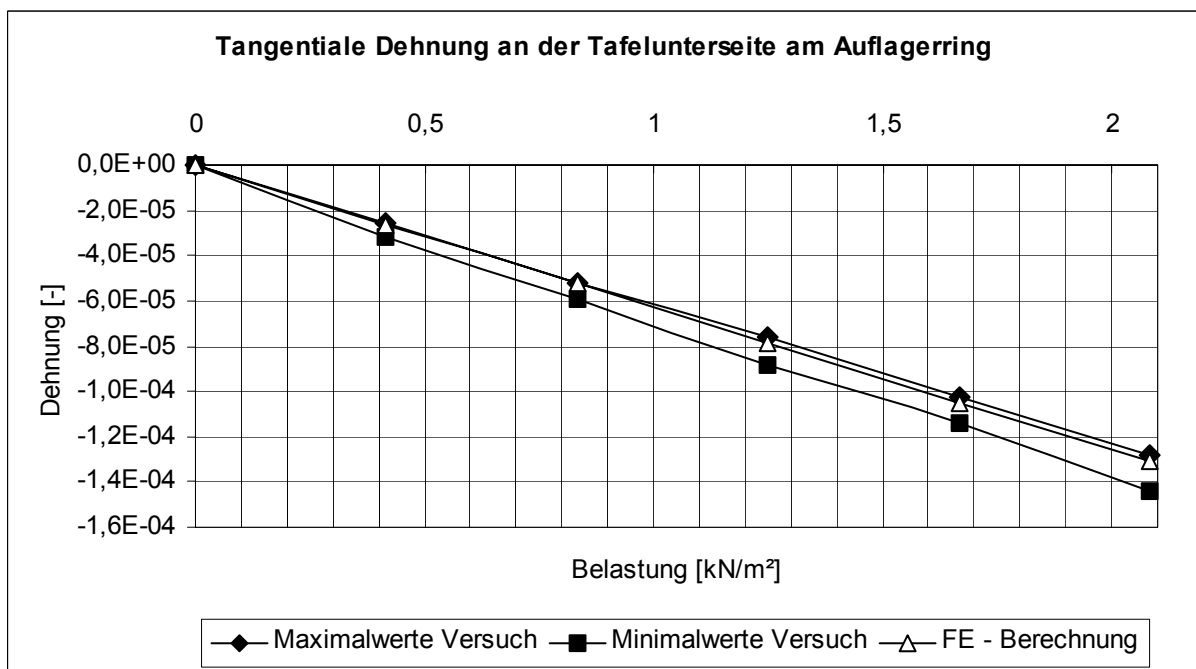


Diagramm A5.4

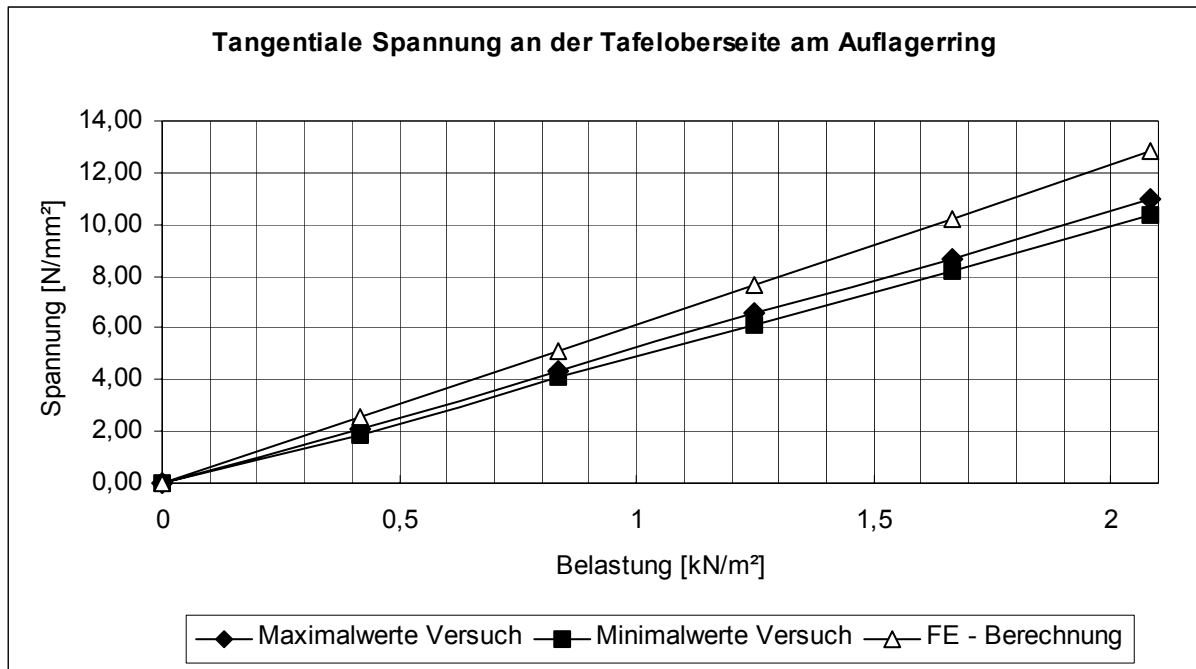


Diagramm A5.5

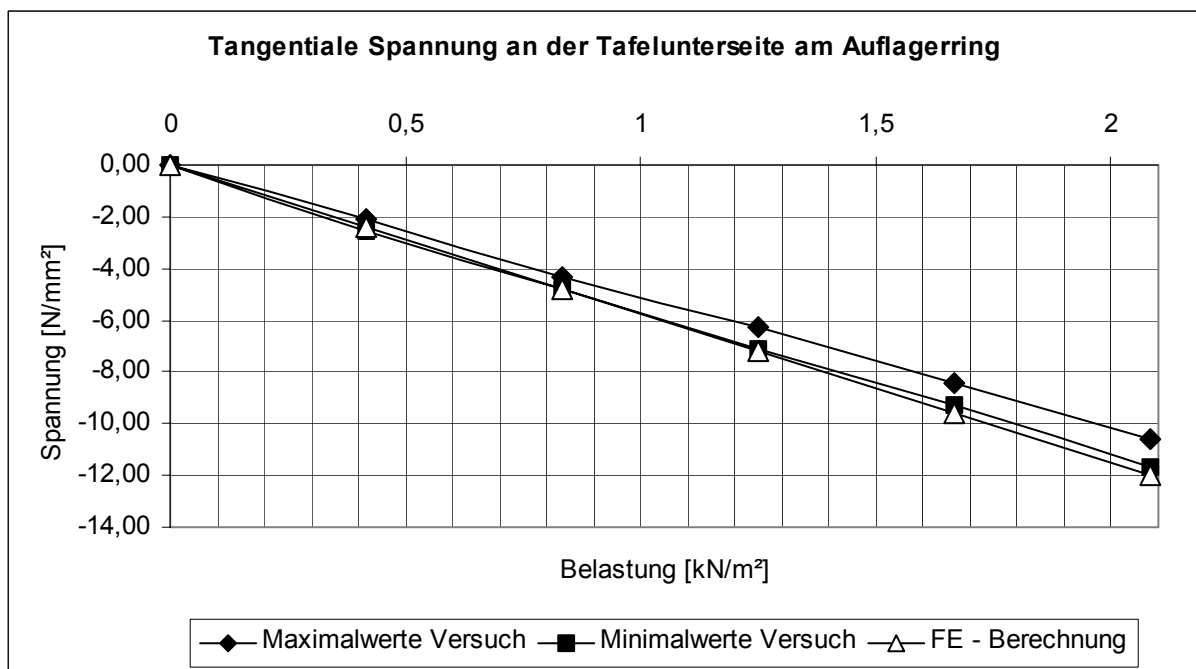


Diagramm A5.6

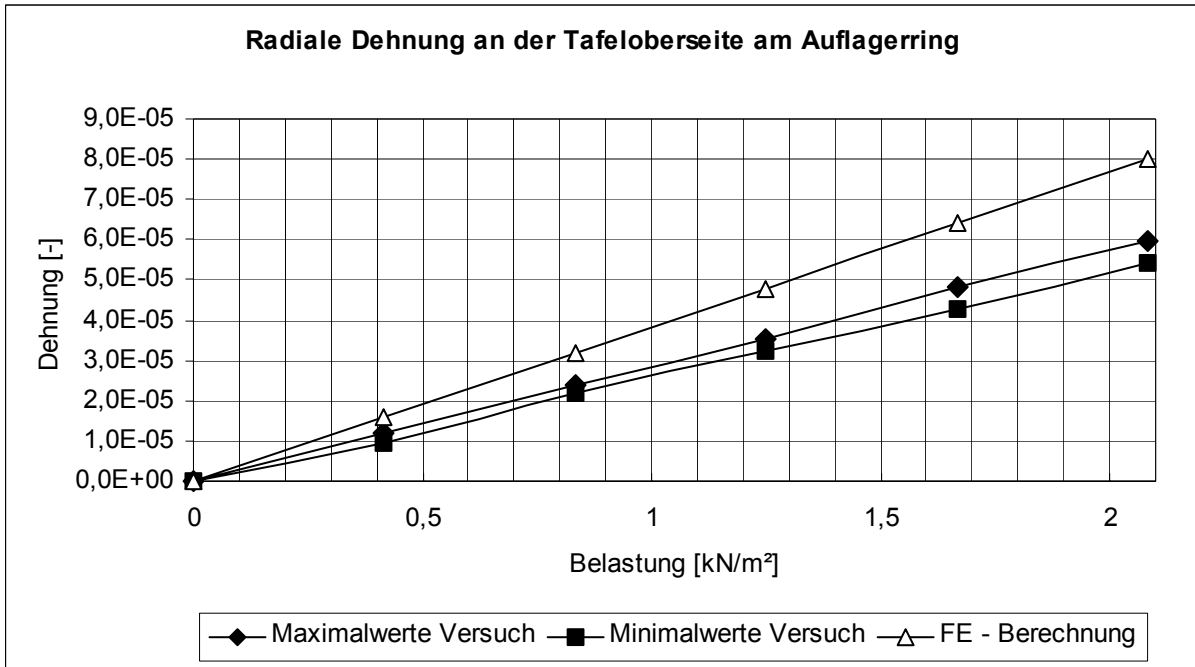


Diagramm A5.7

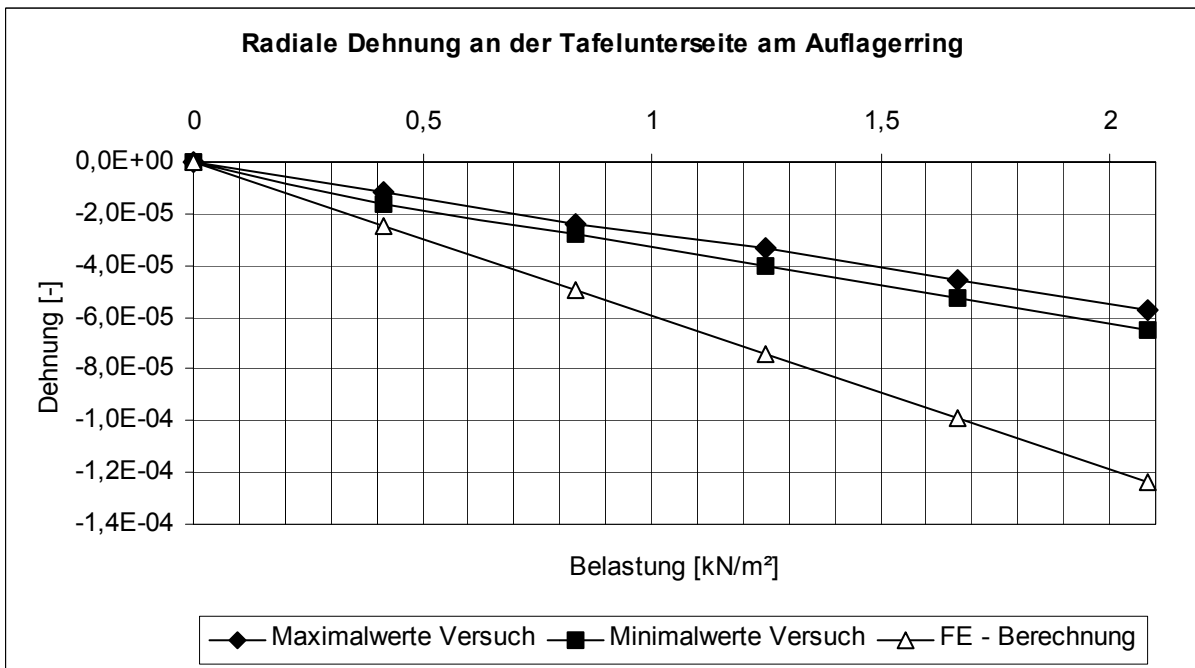


Diagramm A5.8

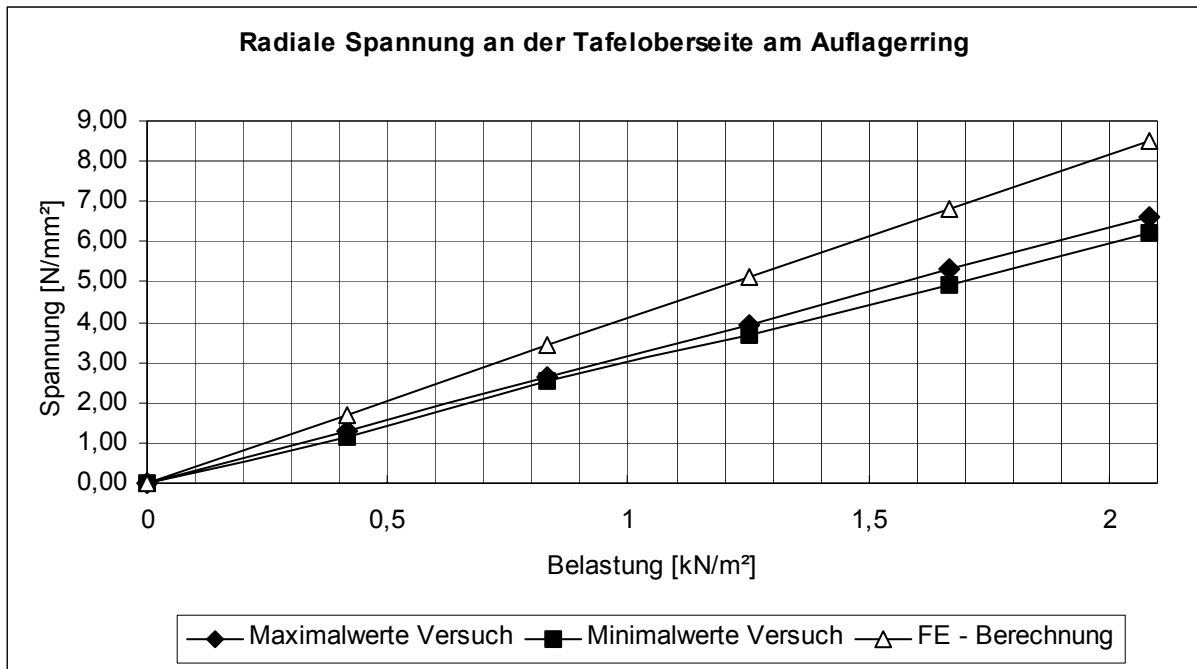


Diagramm A5.9

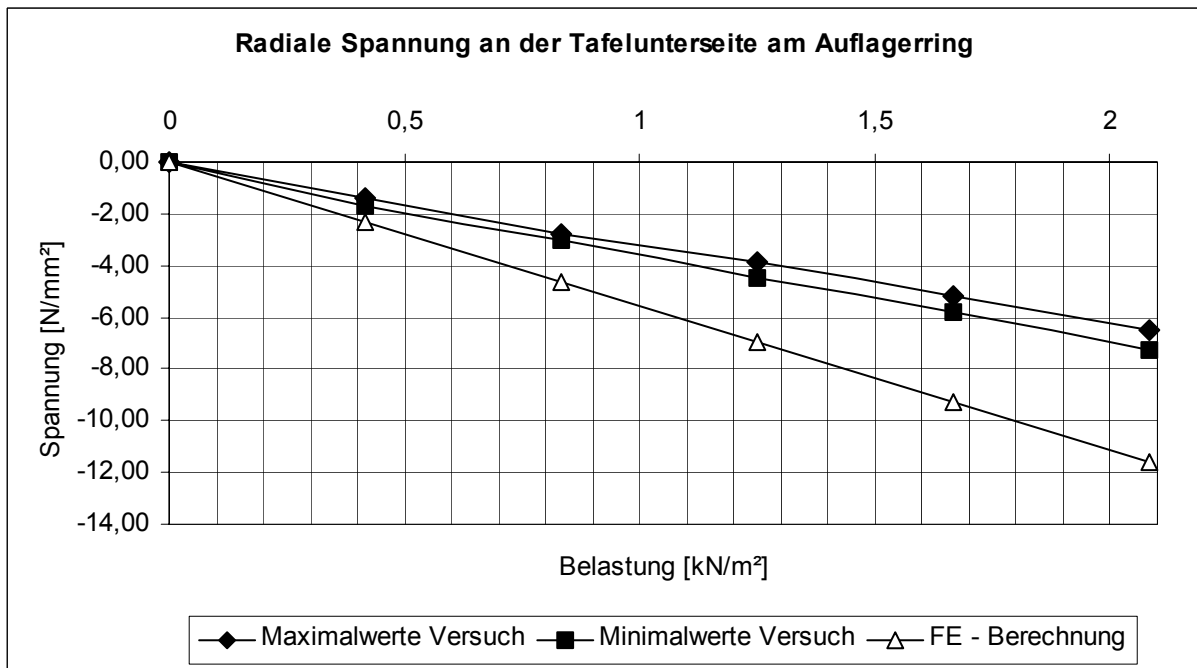


Diagramm A5.10

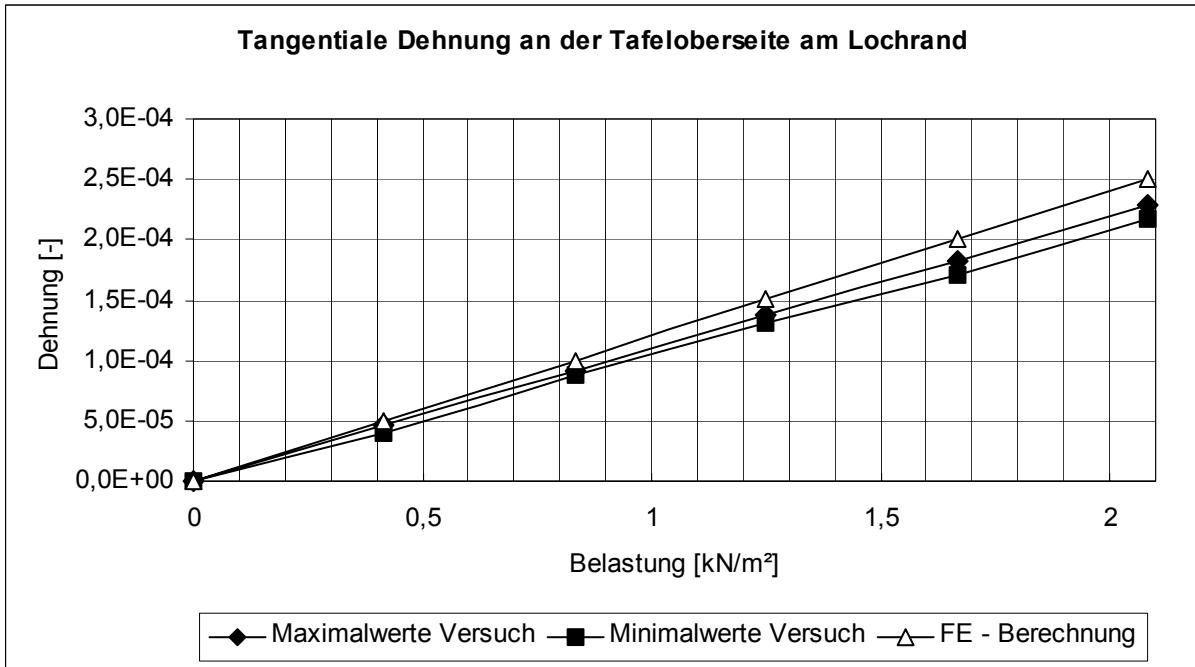


Diagramm A5.11

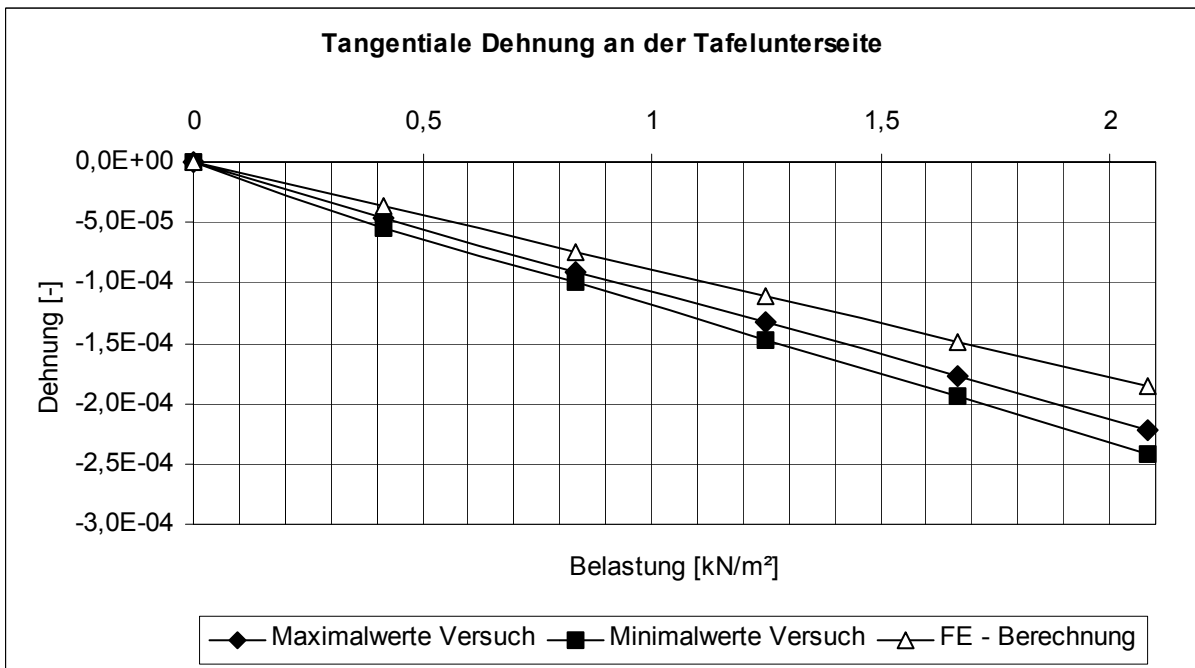


Diagramm A5.12

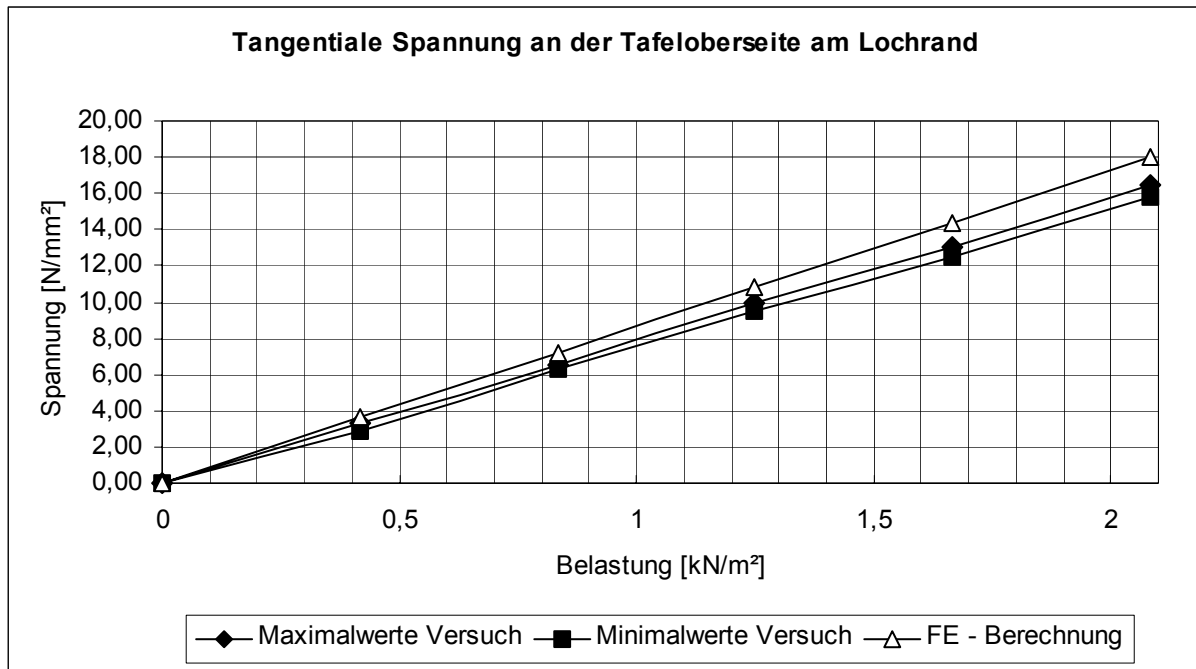


Diagramm A5.13

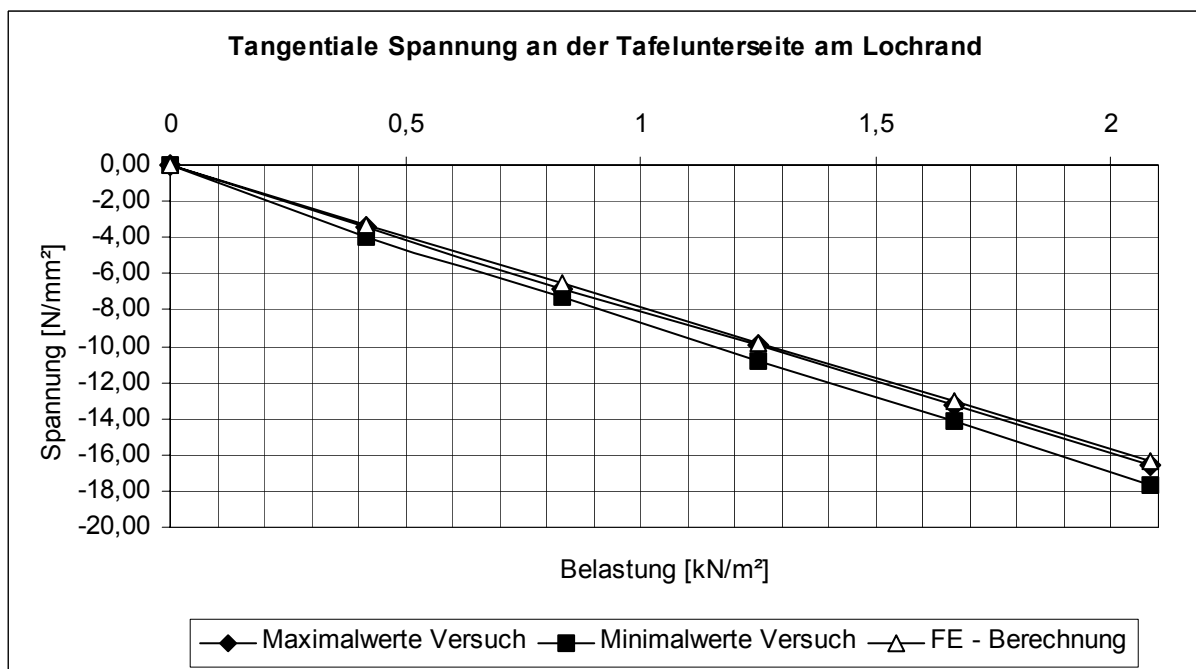


Diagramm A5.14

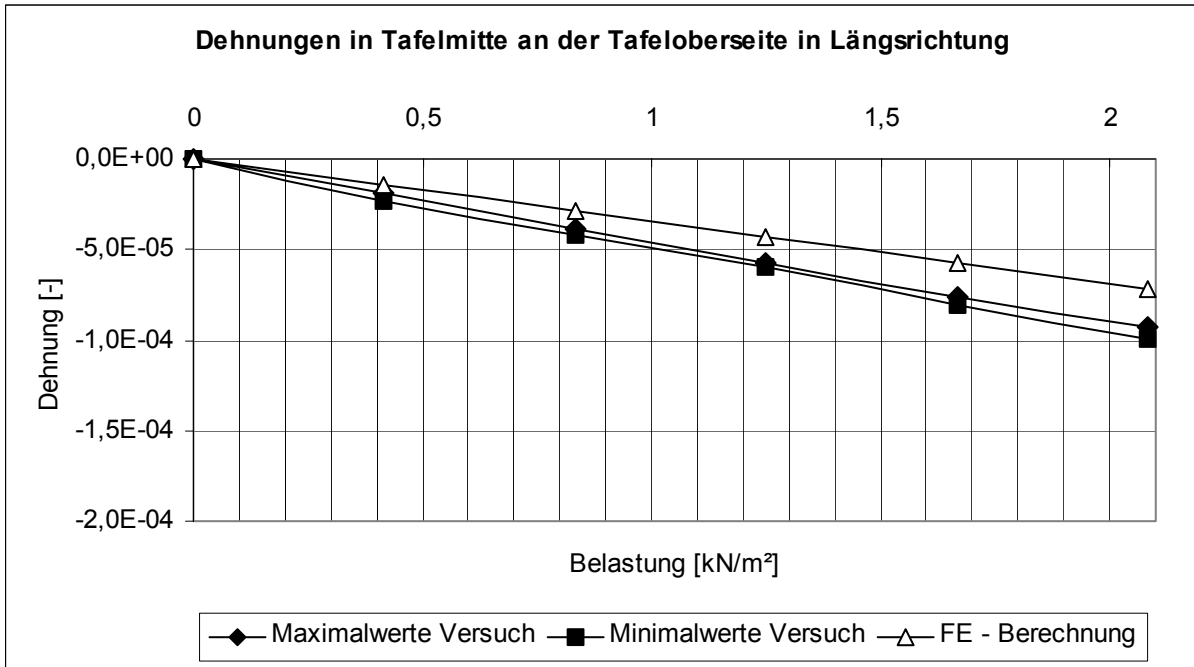


Diagramm A5.15

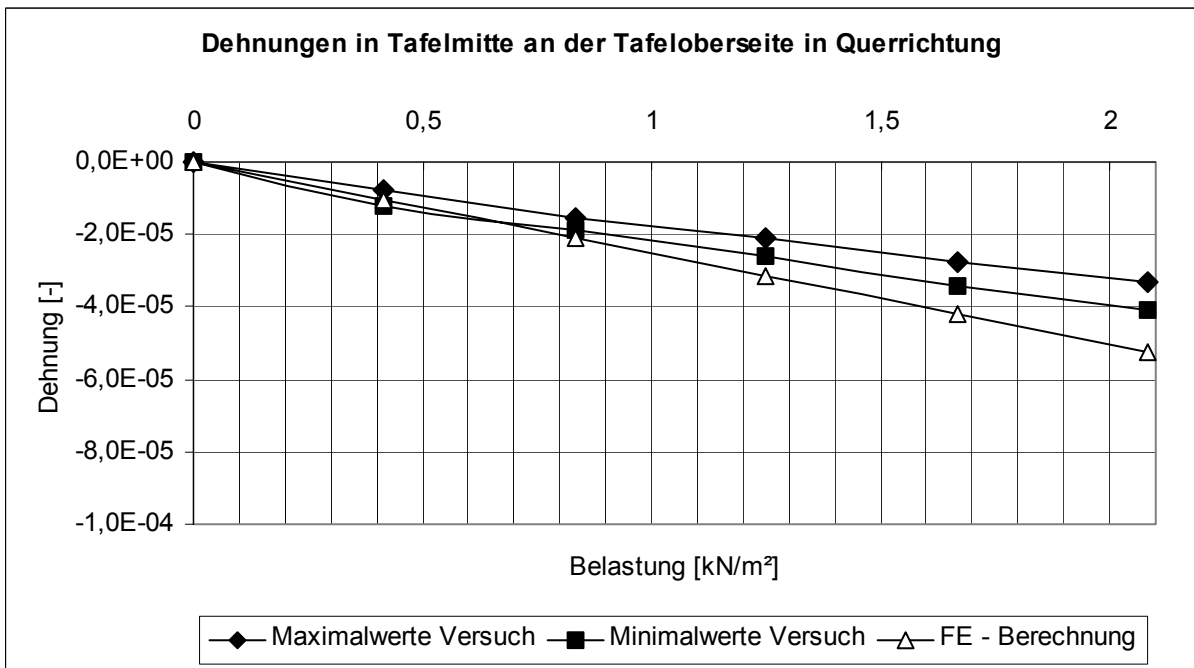


Diagramm A5.16

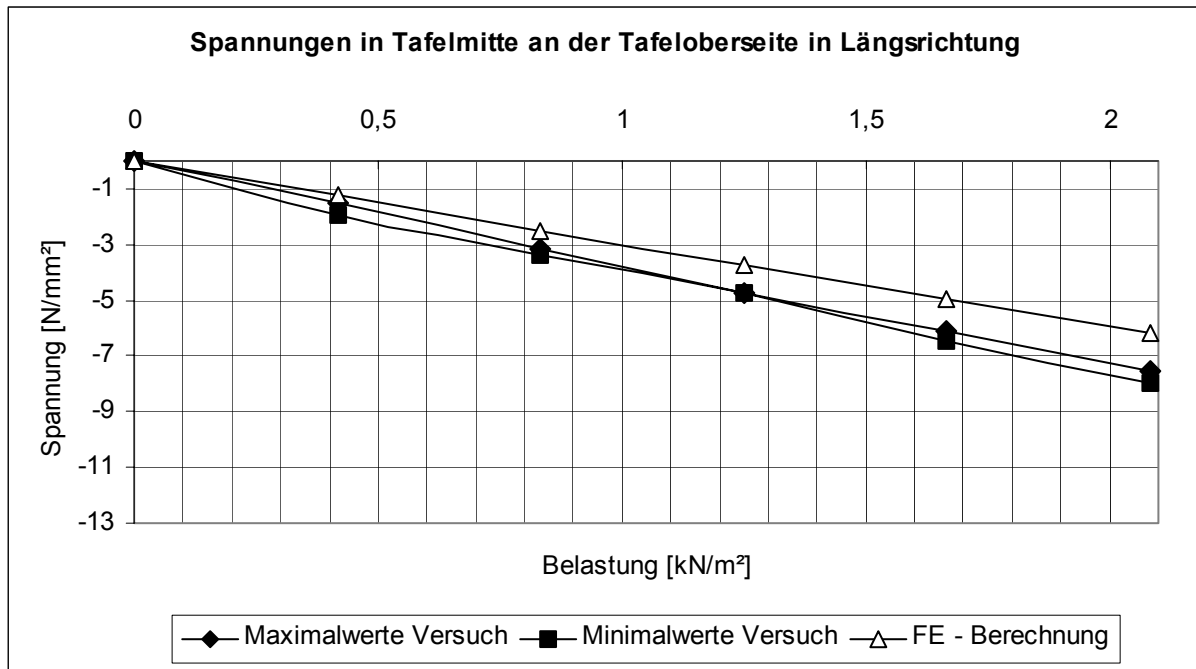


Diagramm A5.17

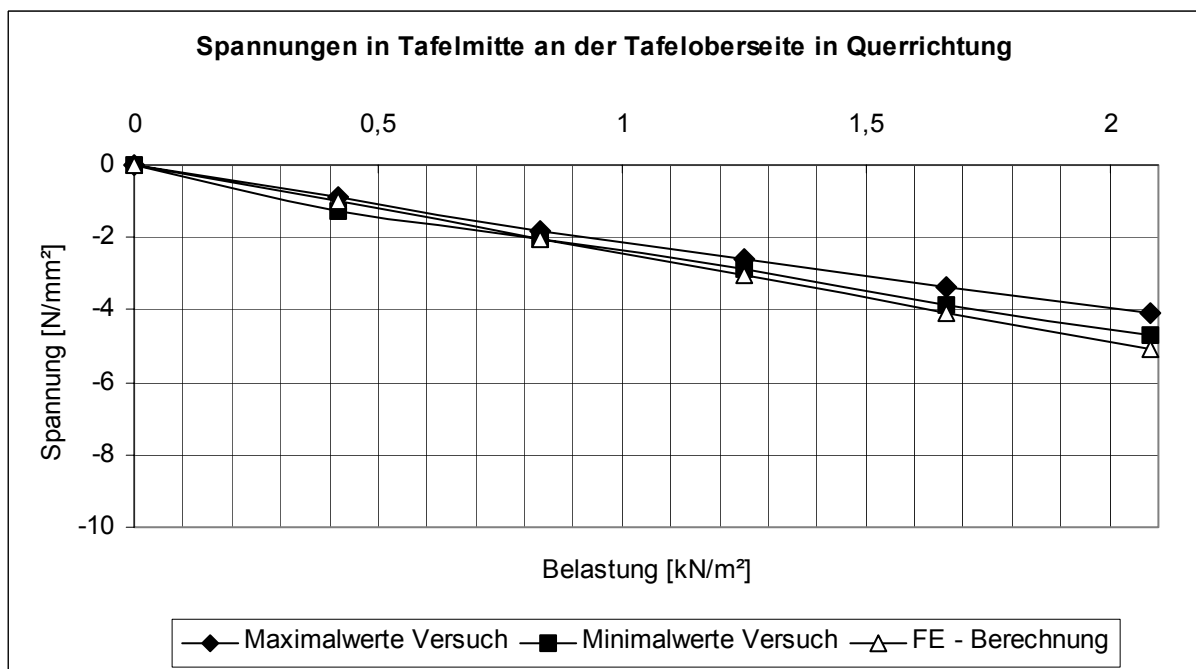


Diagramm A5.18

Anhang A6: Versuchsreihe 7: Gelenkiger Halter mit 35 mm Loch / verfüllt

Diagramm	Messstellenbezeichnung [nach Bild 5.12]	Ausführliche Bezeichnung [nach Tabelle 5.2]
A6.1	MS 1	Durchbiegung in Tafelmitte
A6.2	MS 7	Durchbiegung am Tafelrand
A6.3	MS 2 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflager- ring
A6.4	MS 2 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflager- ring
A6.5	MS 2 o	Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflager- ring
A6.6	MS 2 u	Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Aufla- gerring
A6.7	MS 3 o	Radiale Dehnung an der Tafeloberseite am Auflagerring
A6.8	MS 3 u	Radiale Dehnung an der Tafelunterseite am Auflagerring
A6.9	MS 3 o	Radiale Spannung an der Tafeloberseite am Auflagerring
A6.10	MS 3 u	Radiale Spannung an der Tafelunterseite am Auflagerring
A6.11	MS 4 o	Tangentiale Dehnung an der Tafeloberseite am Lochrand
A6.12	MS 4 u	Tangentiale Dehnung an der Tafelunterseite am Lochrand
A6.13	MS 4 o	Tangentiale Spannung an der Tafeloberseite am Lochrand
A6.14	MS 4 u	Tangentiale Spannung an der Tafelunterseite am Loch- rand
A6.15	MS 5 o	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längs- richtung
A6.16	MS 5 u	Dehnungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Quer- richtung
A6.17	MS 5 o	Spannungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Längs- richtung
A6.18	MS 5 u	Spannungen in Tafelmitte an der Tafeloberseite in Quer- richtung

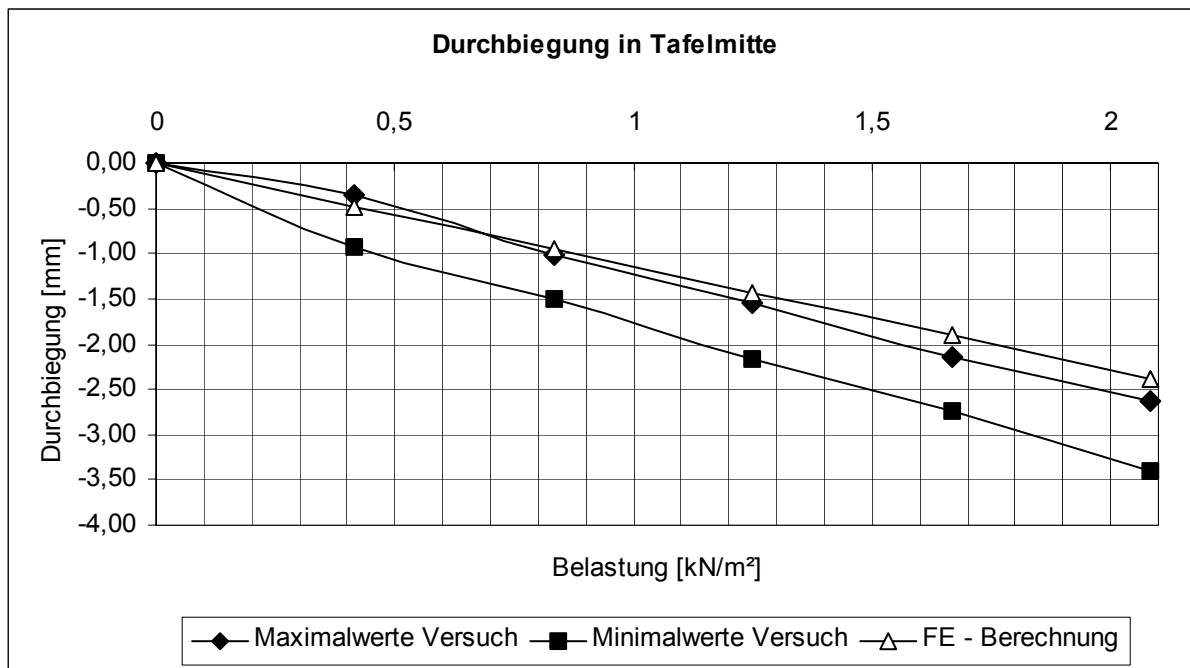


Diagramm A6.1

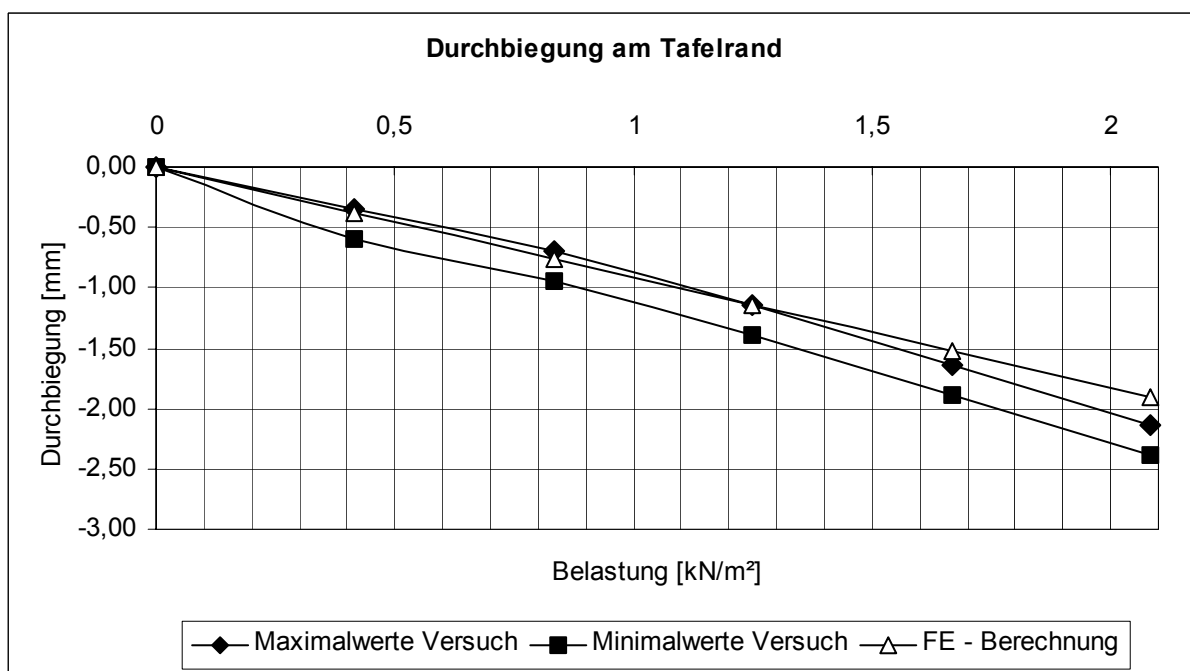


Diagramm A6.2

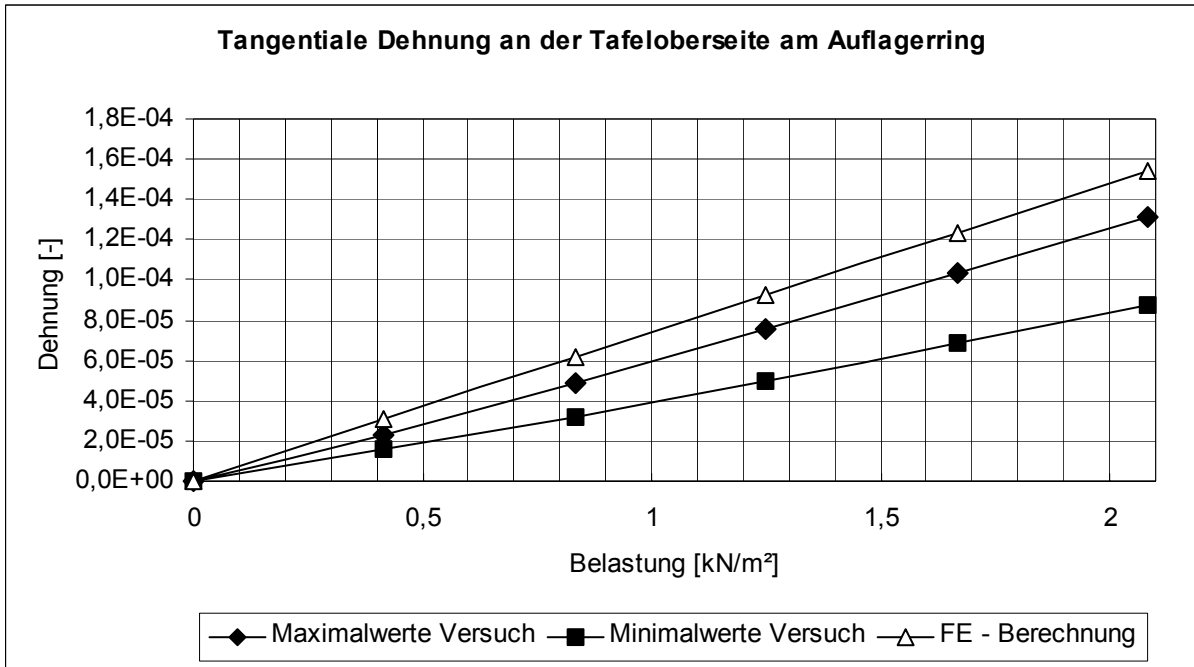


Diagramm A6.3

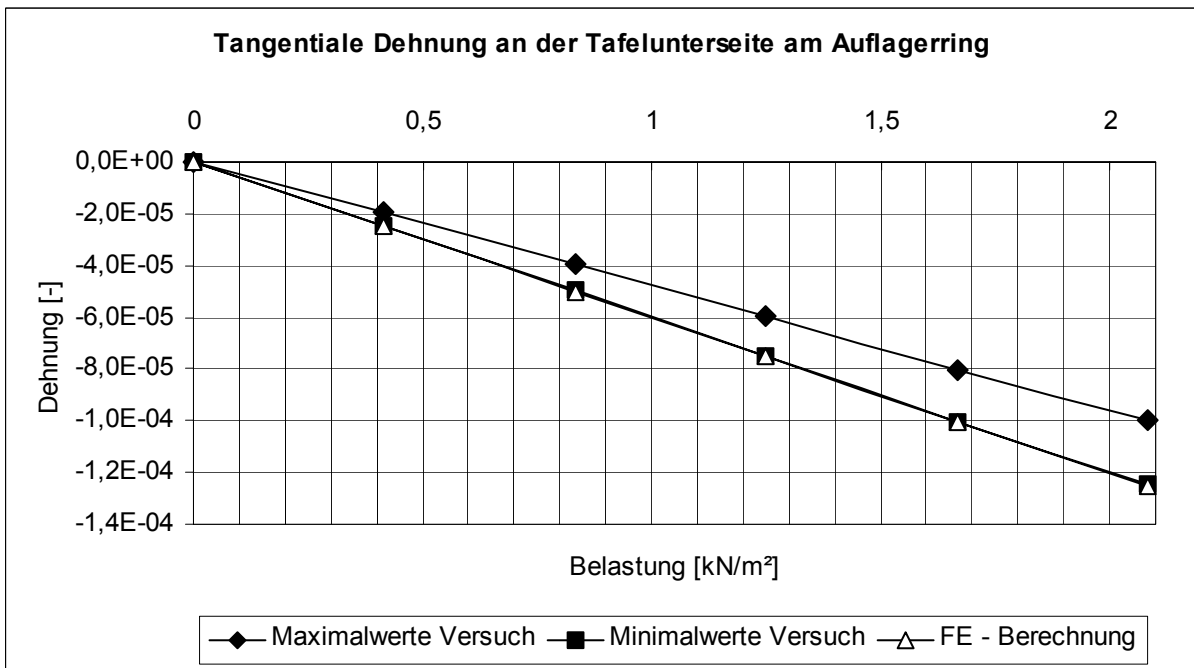


Diagramm A6.4

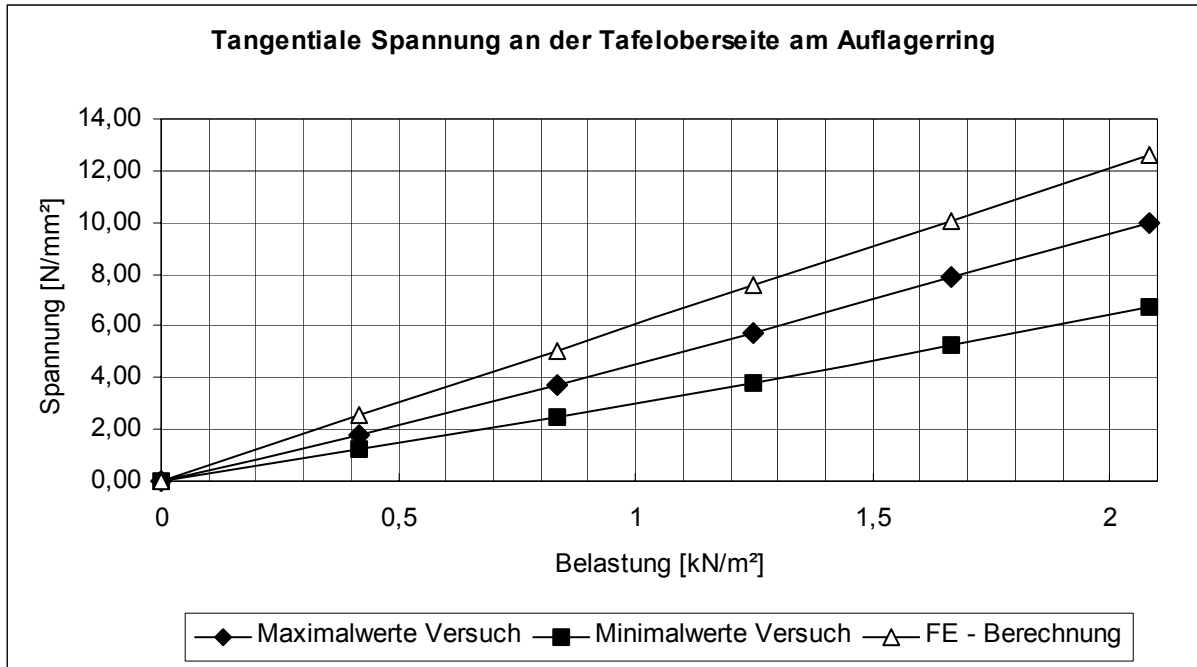


Diagramm A6.5

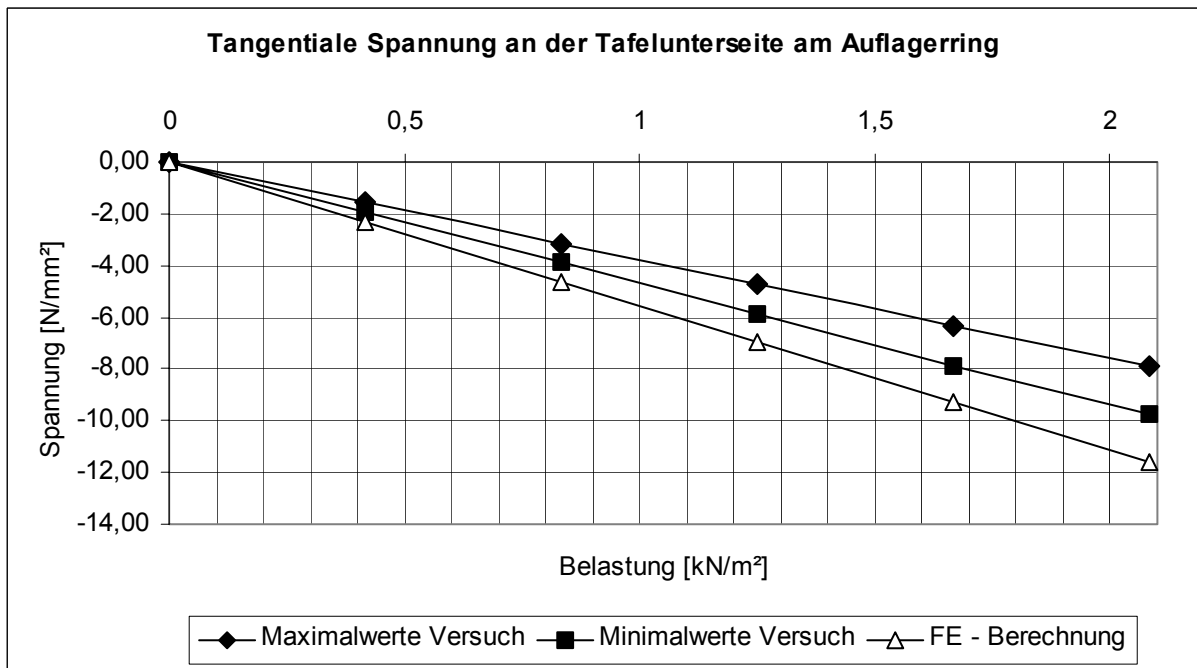


Diagramm A6.6

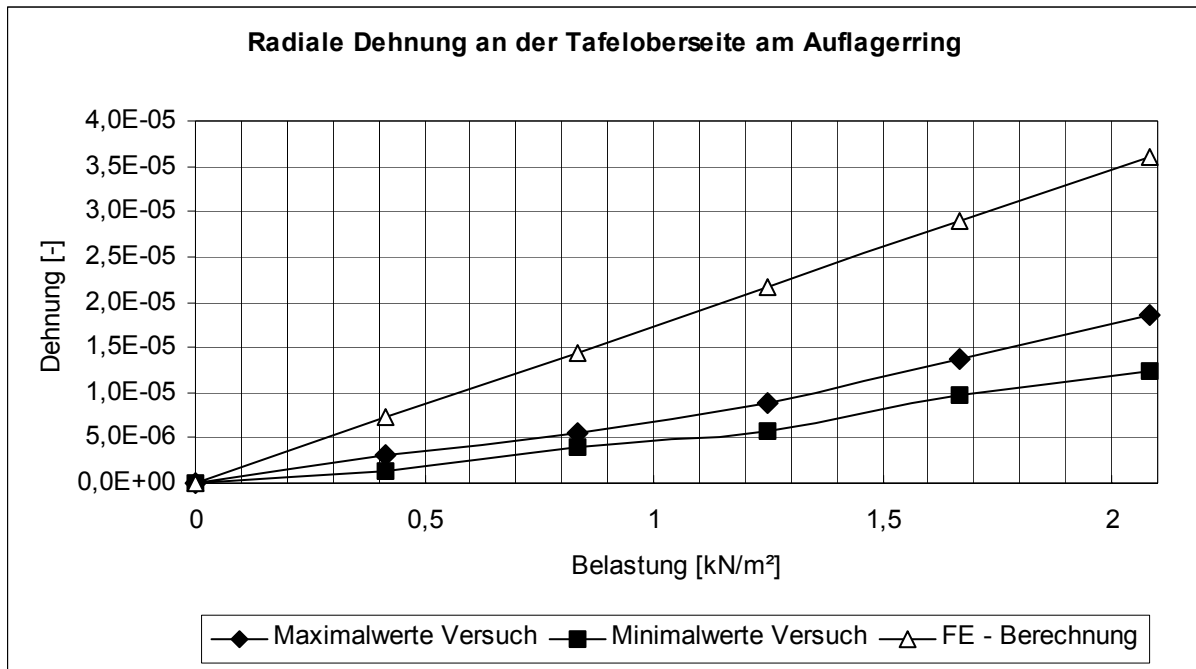


Diagramm A6.7

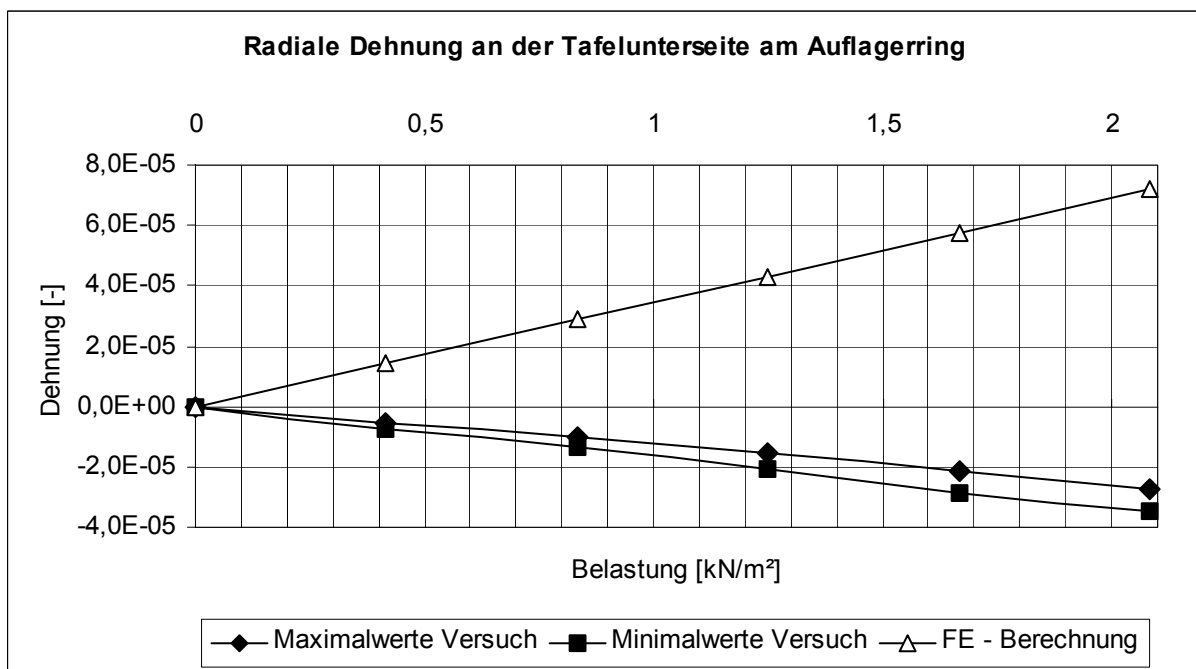


Diagramm A6.8

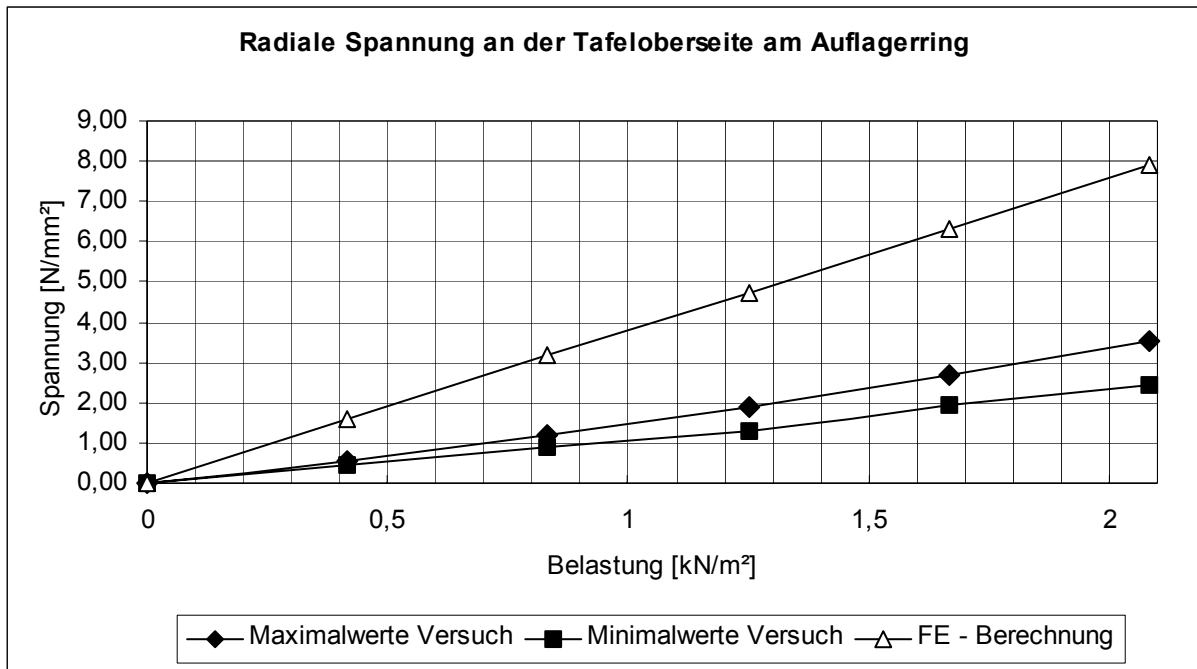


Diagramm A6.9

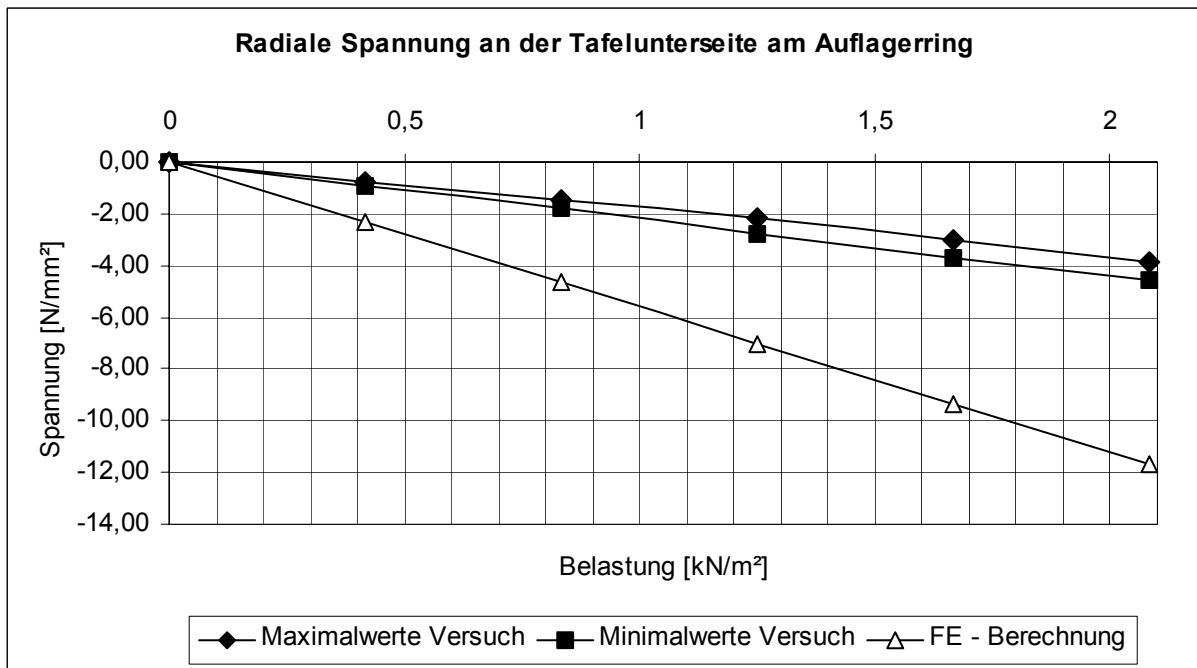


Diagramm A6.10

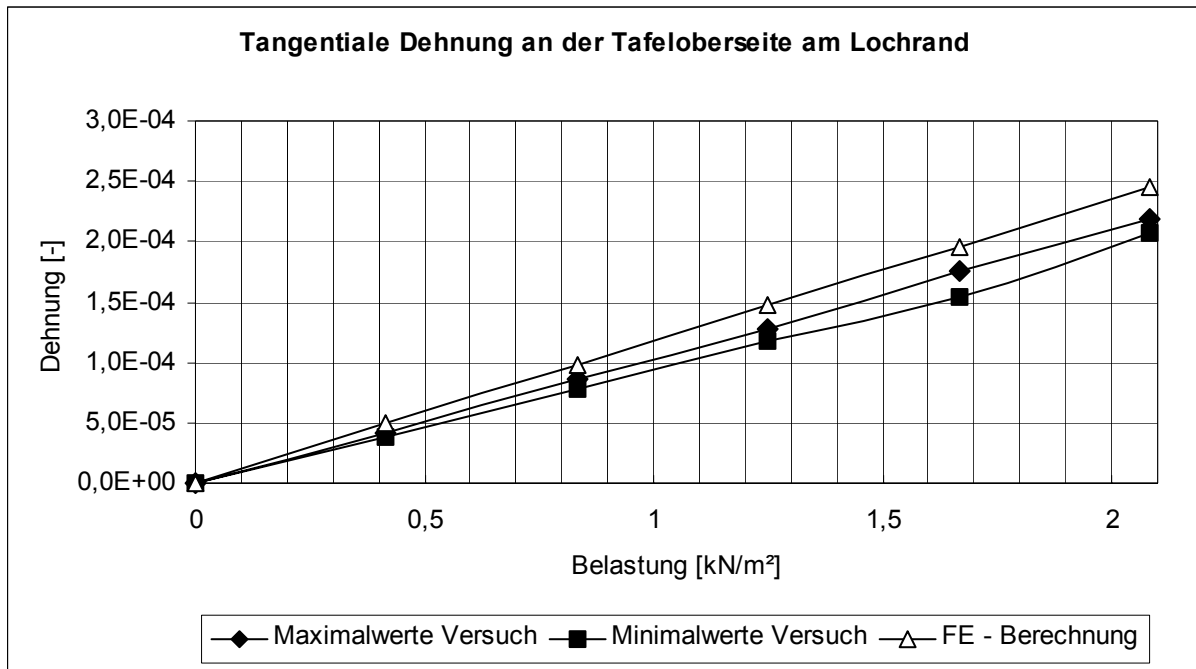


Diagramm A6.11

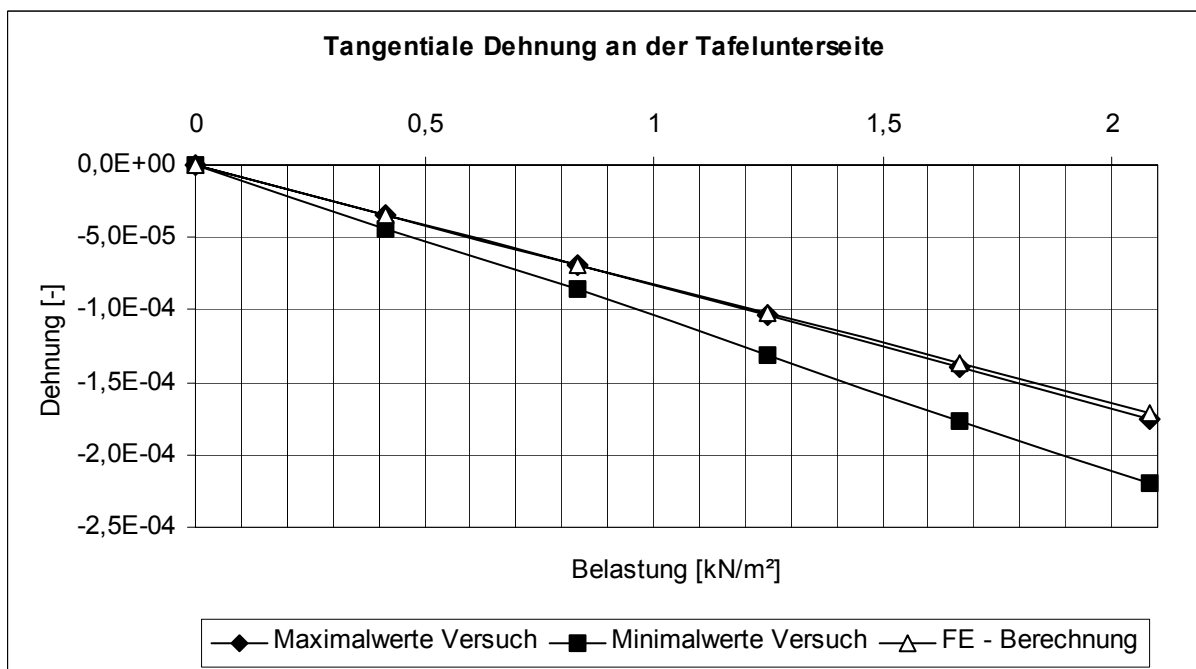


Diagramm A6.12

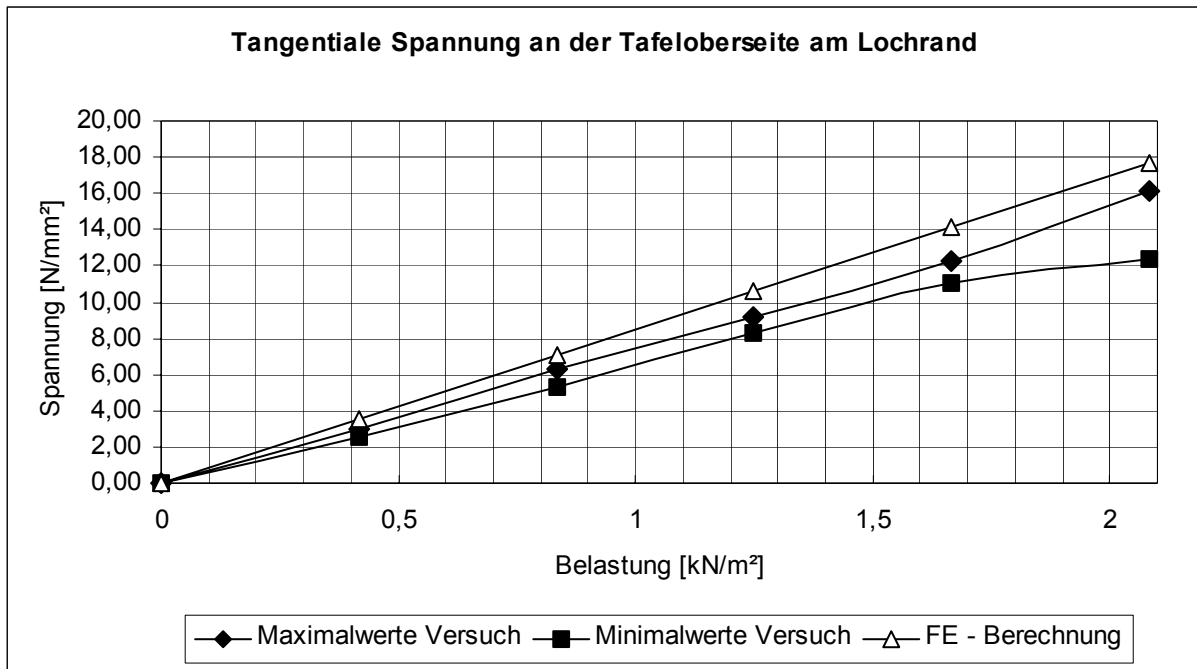


Diagramm A6.13

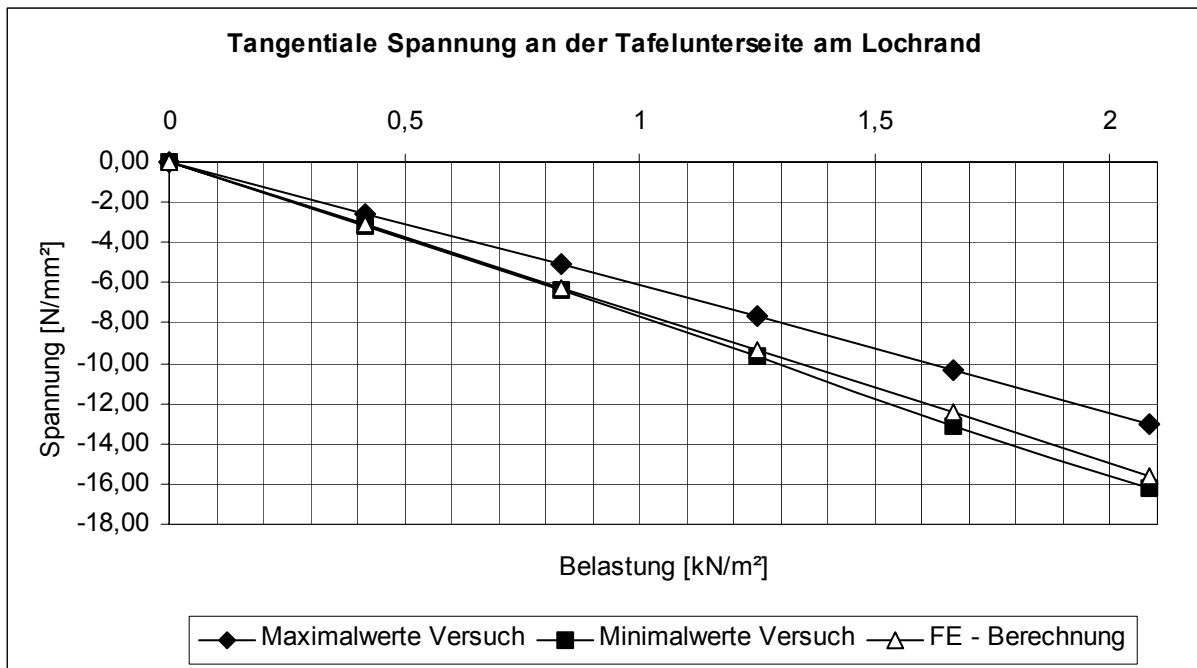


Diagramm A6.14

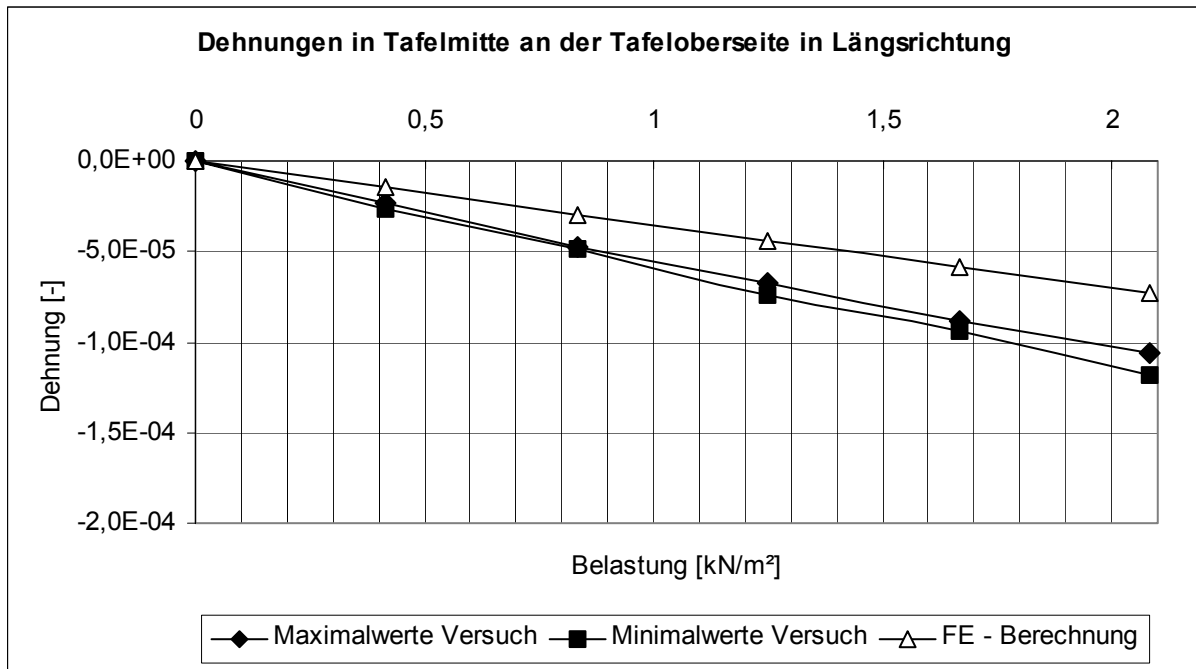


Diagramm A6.15

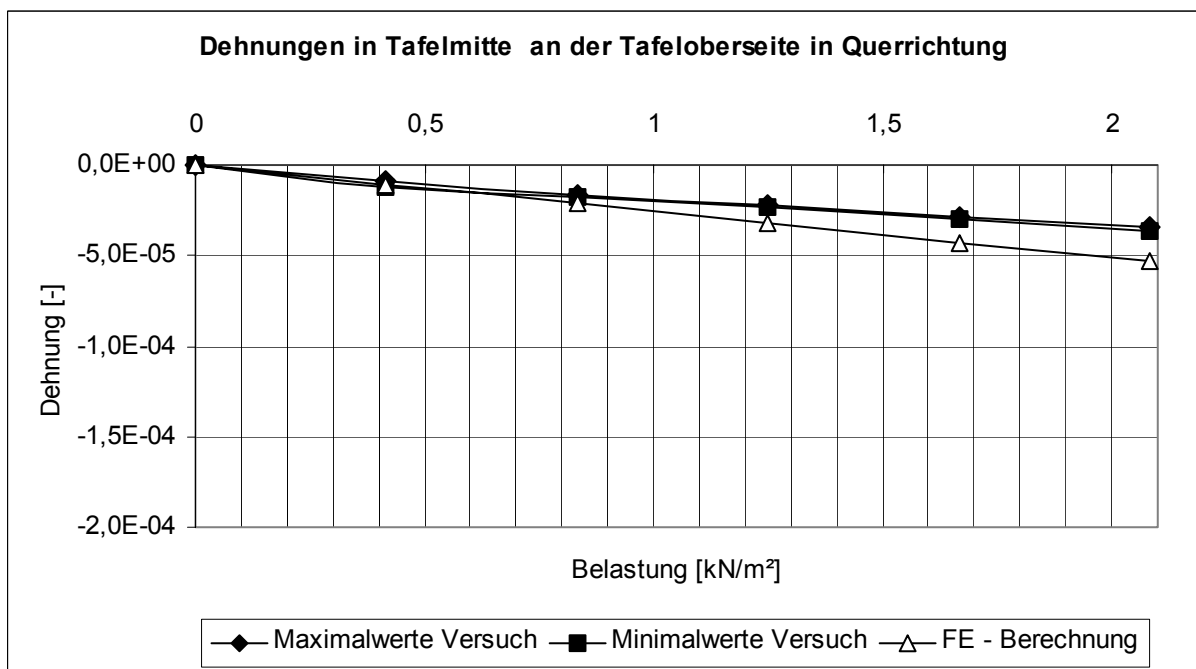


Diagramm A6.16

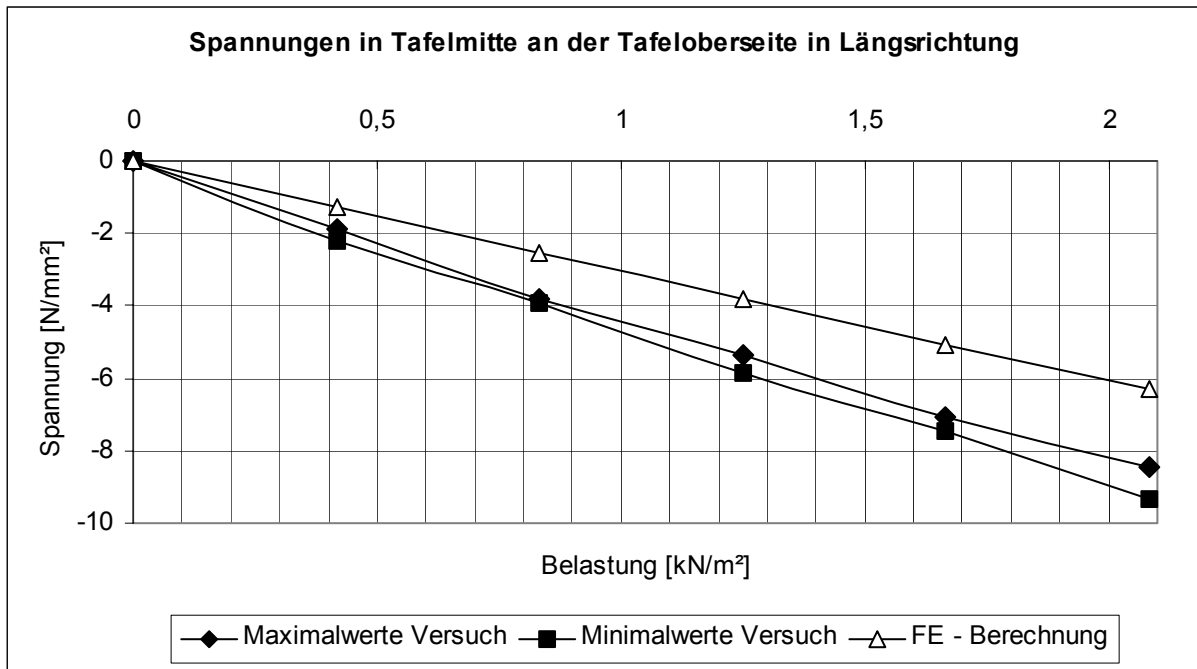


Diagramm A6.17

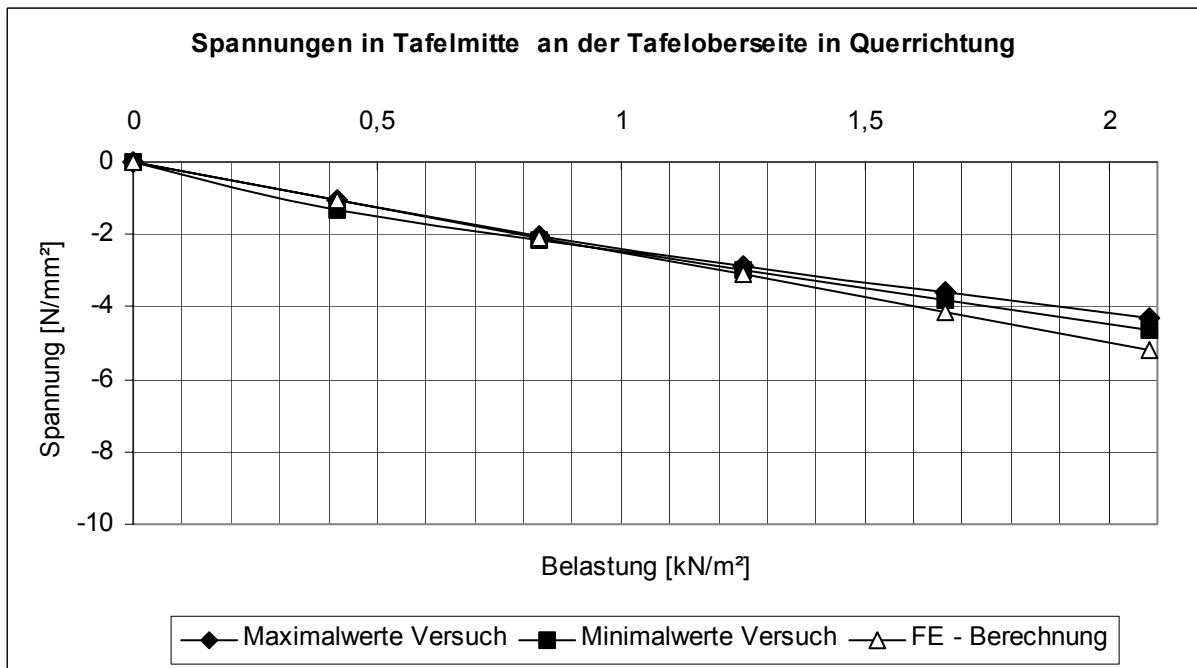
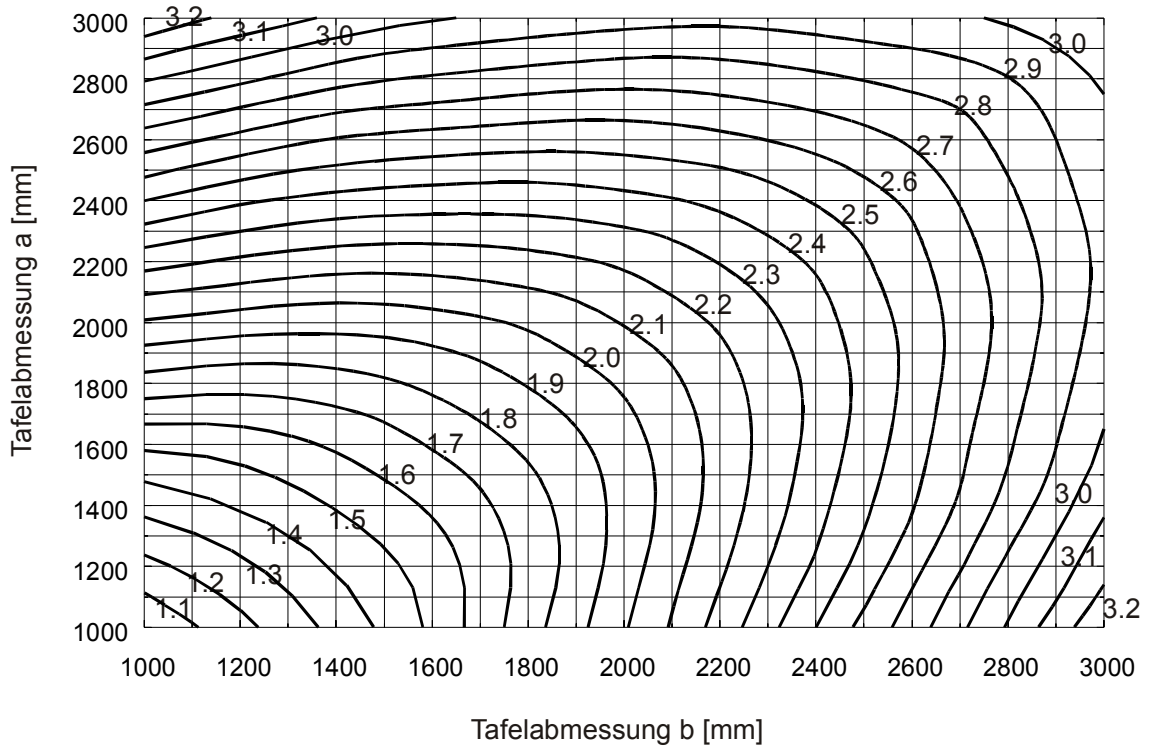


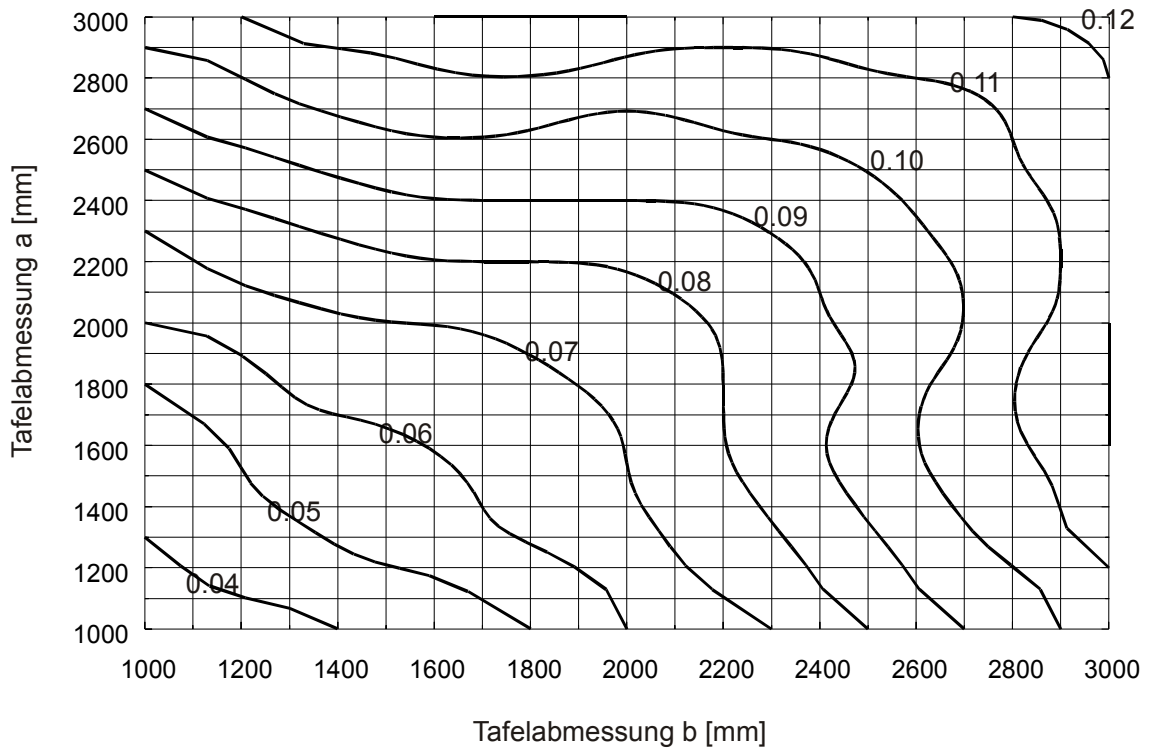
Diagramm A6.18

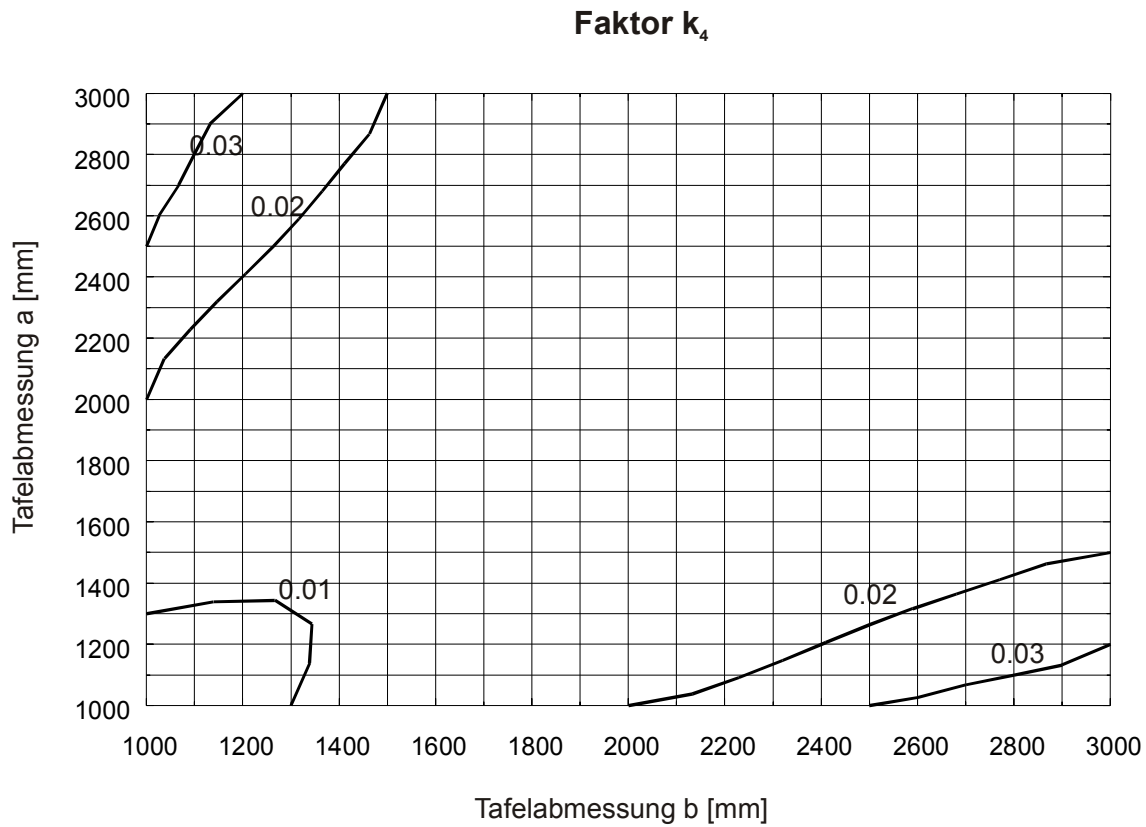
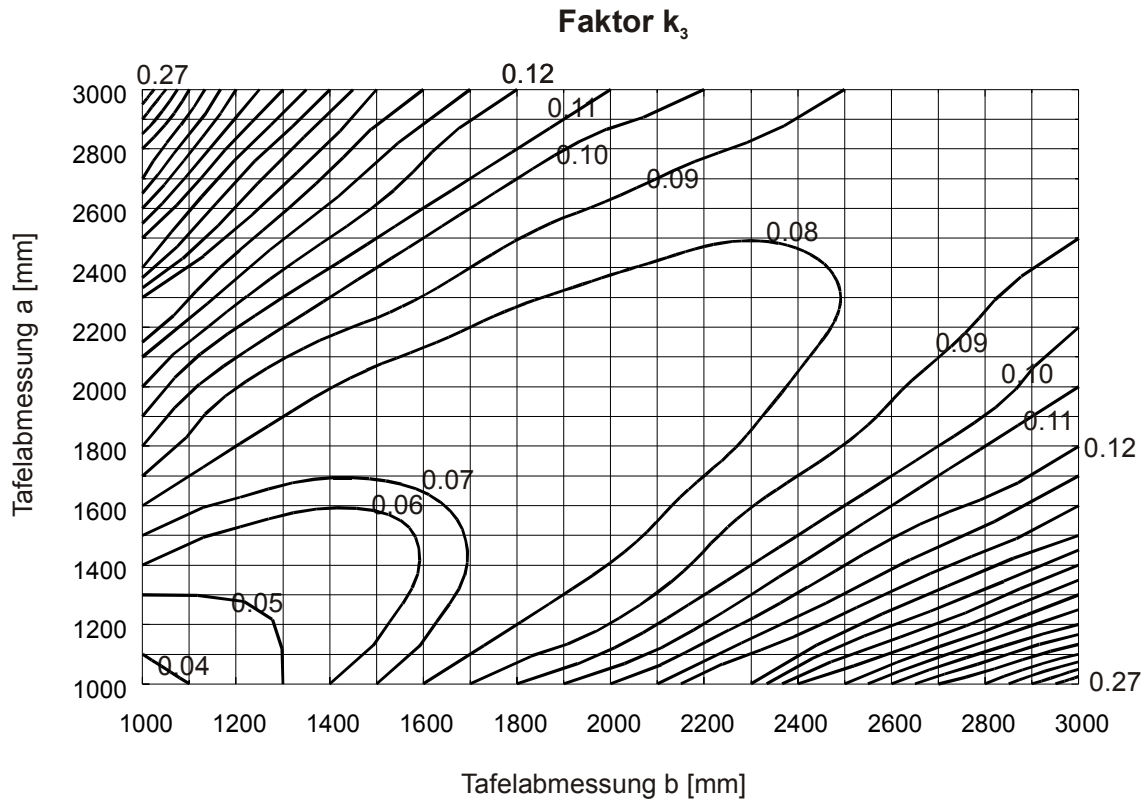
Anhang A7: Bemessungstabeln für Randabstände 100 mm

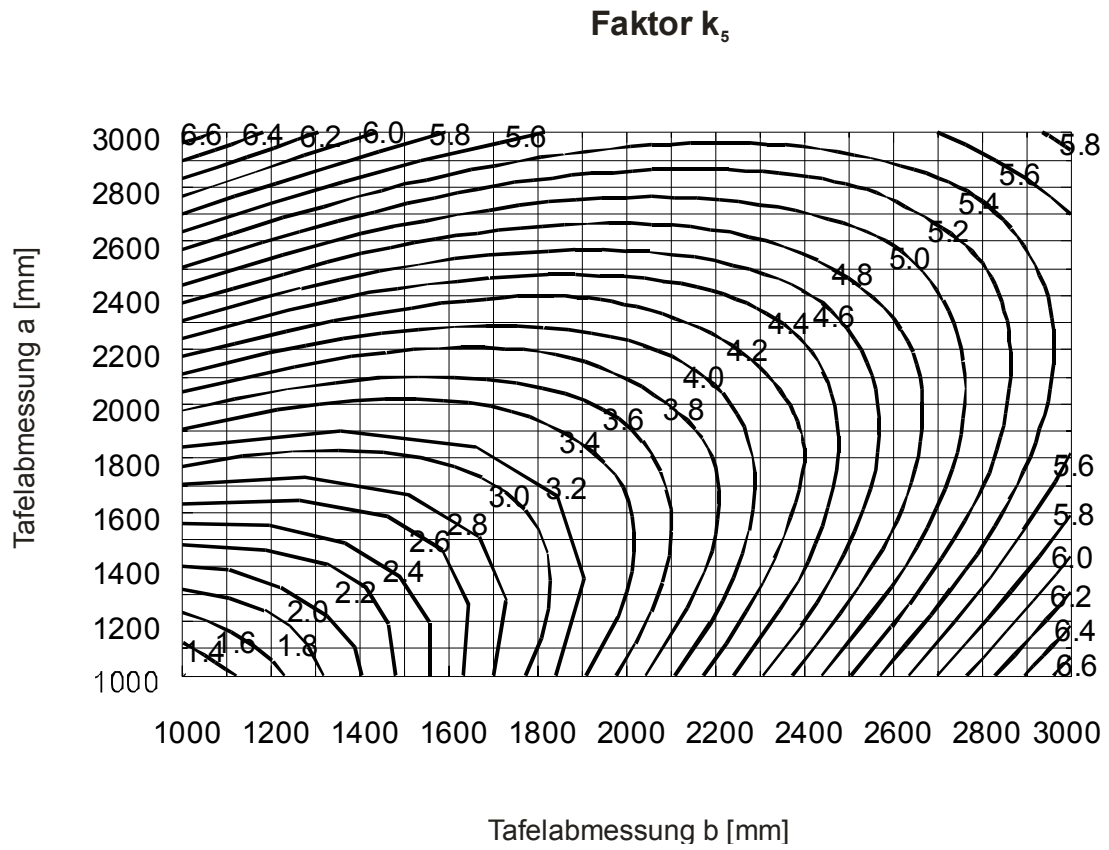
Faktor k_1



Faktor k_2

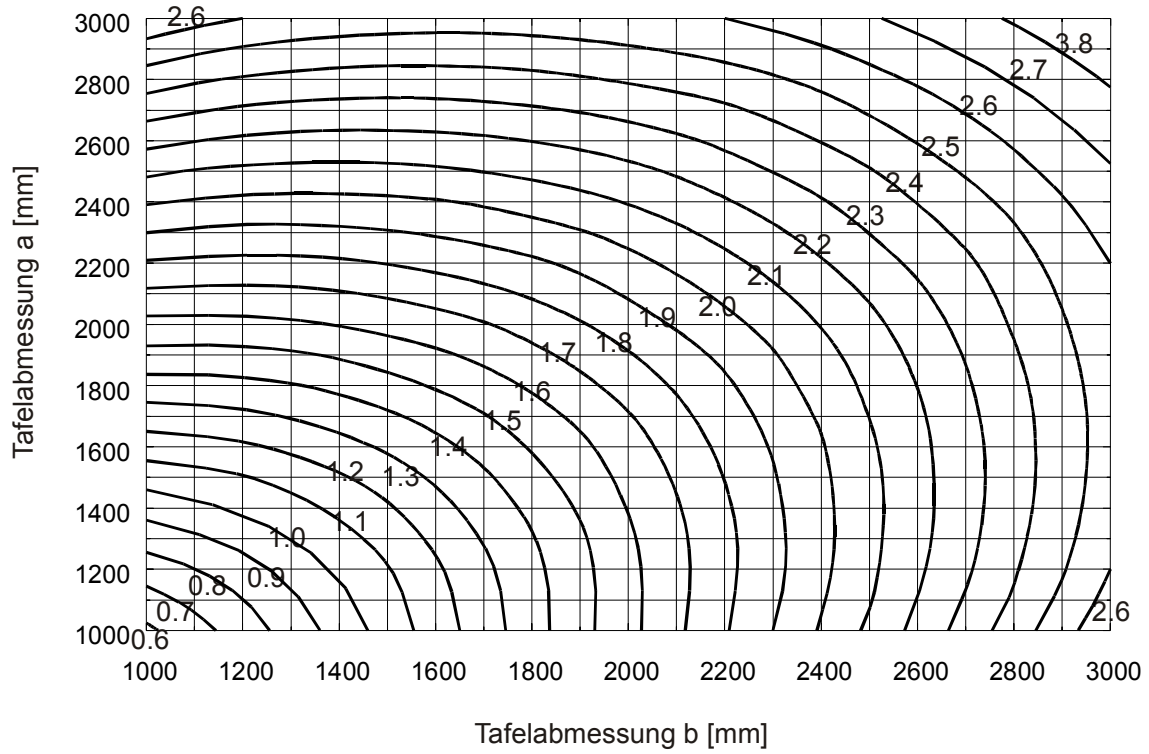




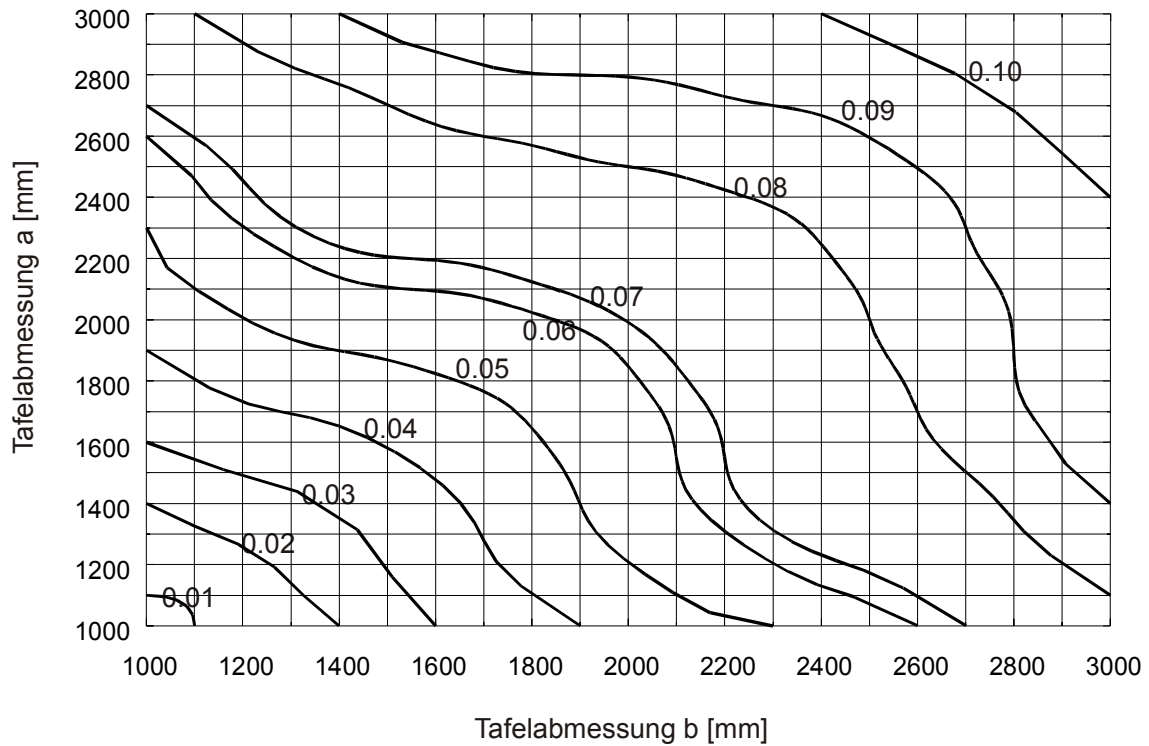


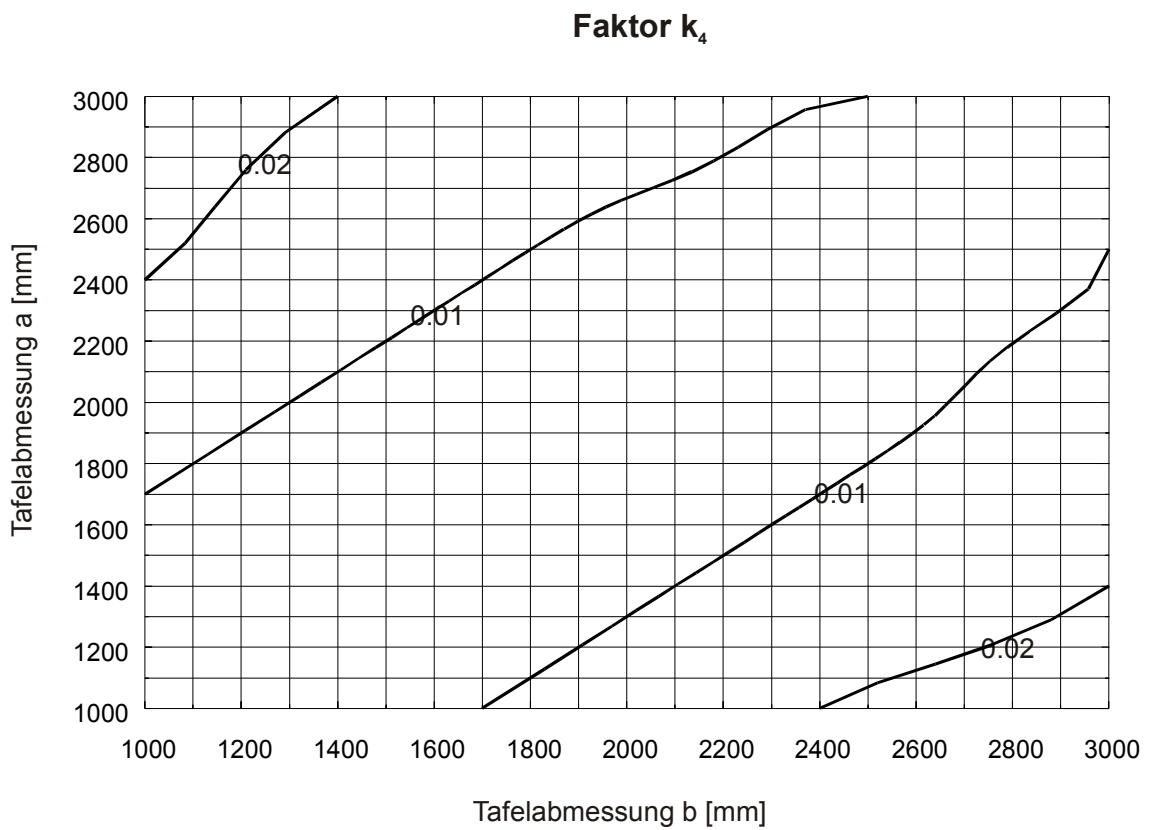
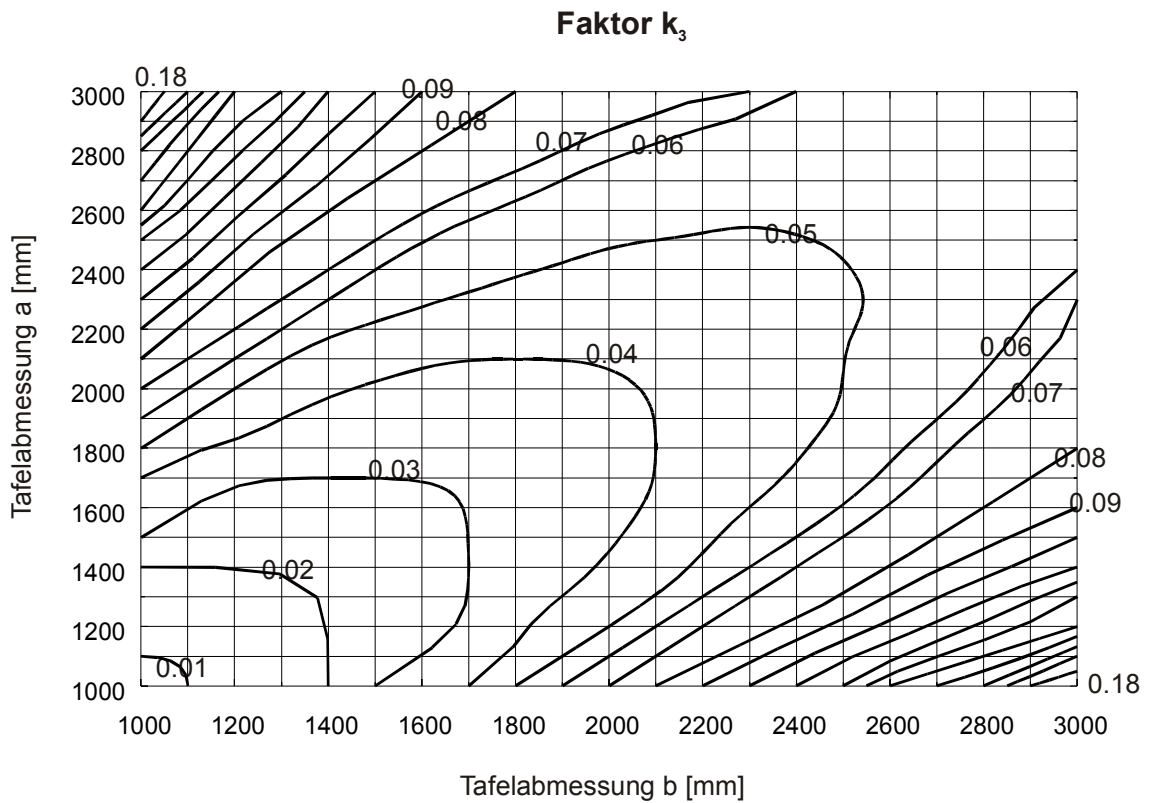
Anhang A8: Bemessungstabeln für Randabstände 200 mm

Faktor k_1

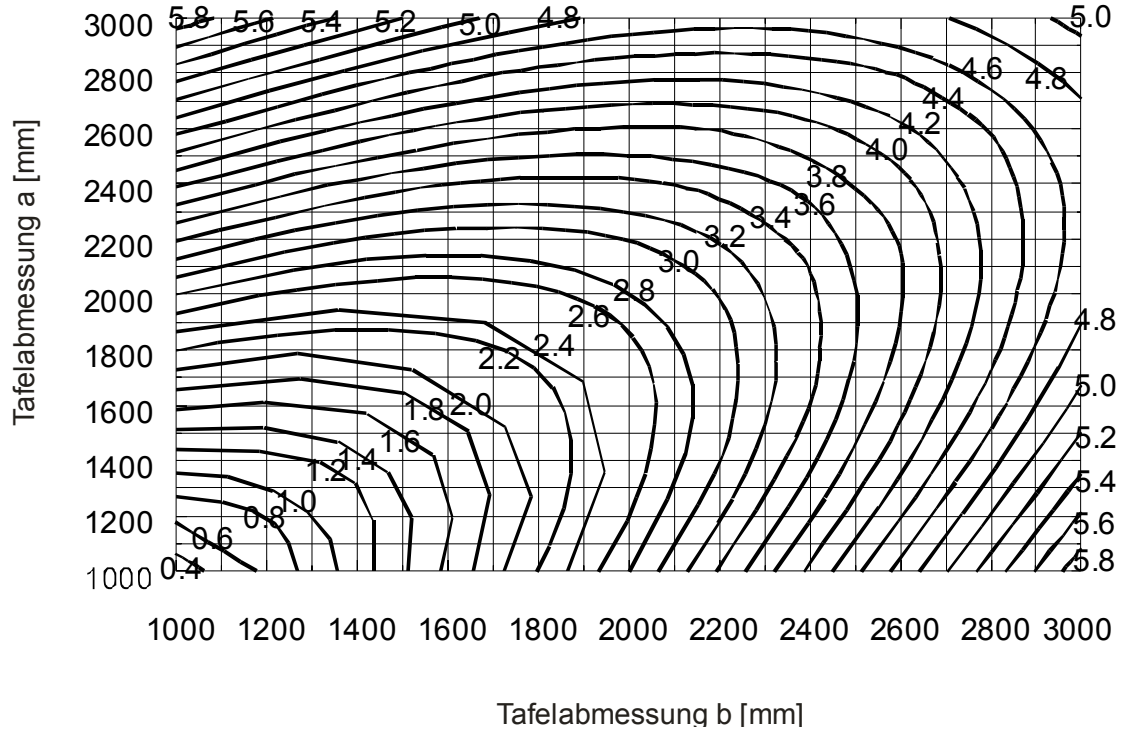


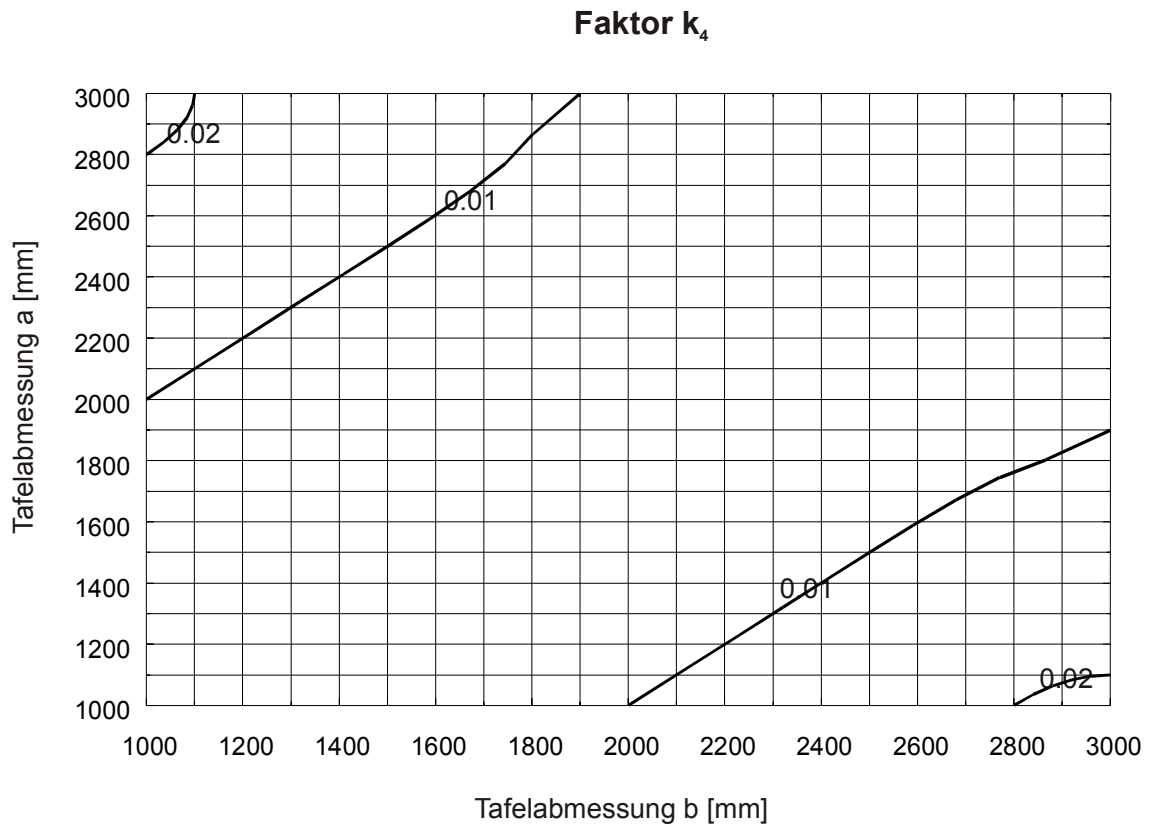
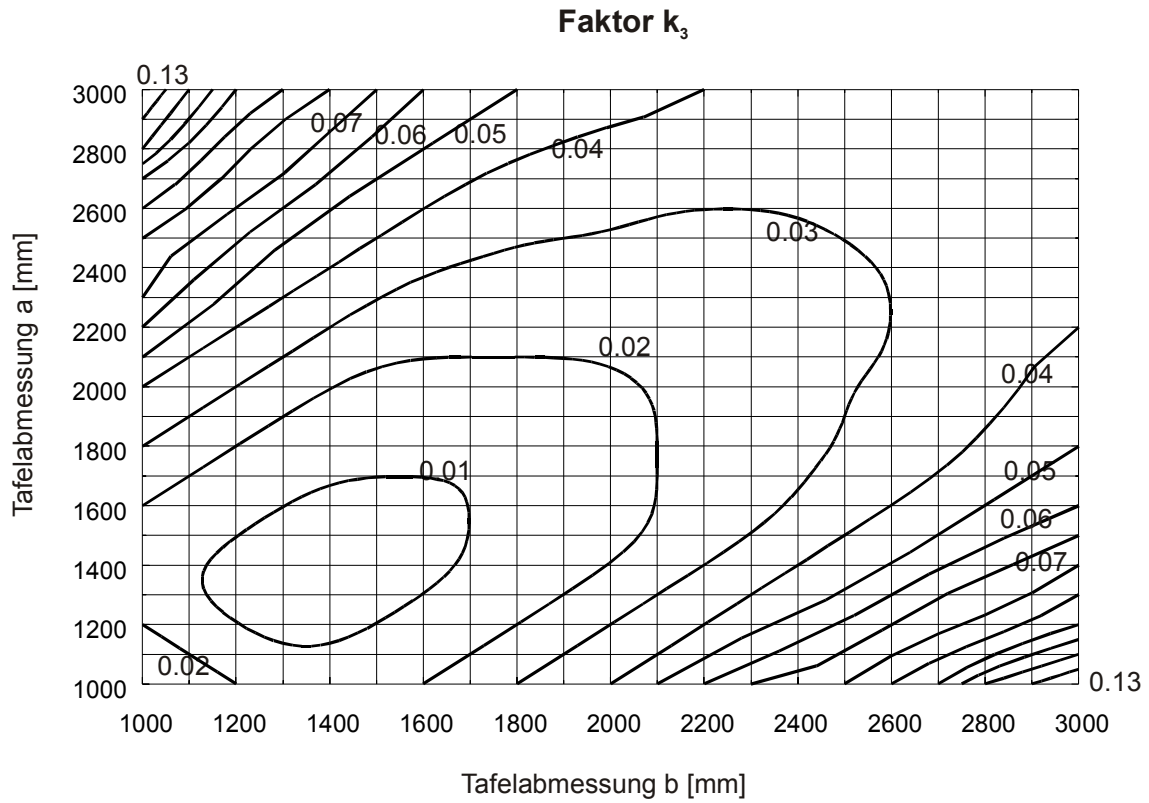
Faktor k_2

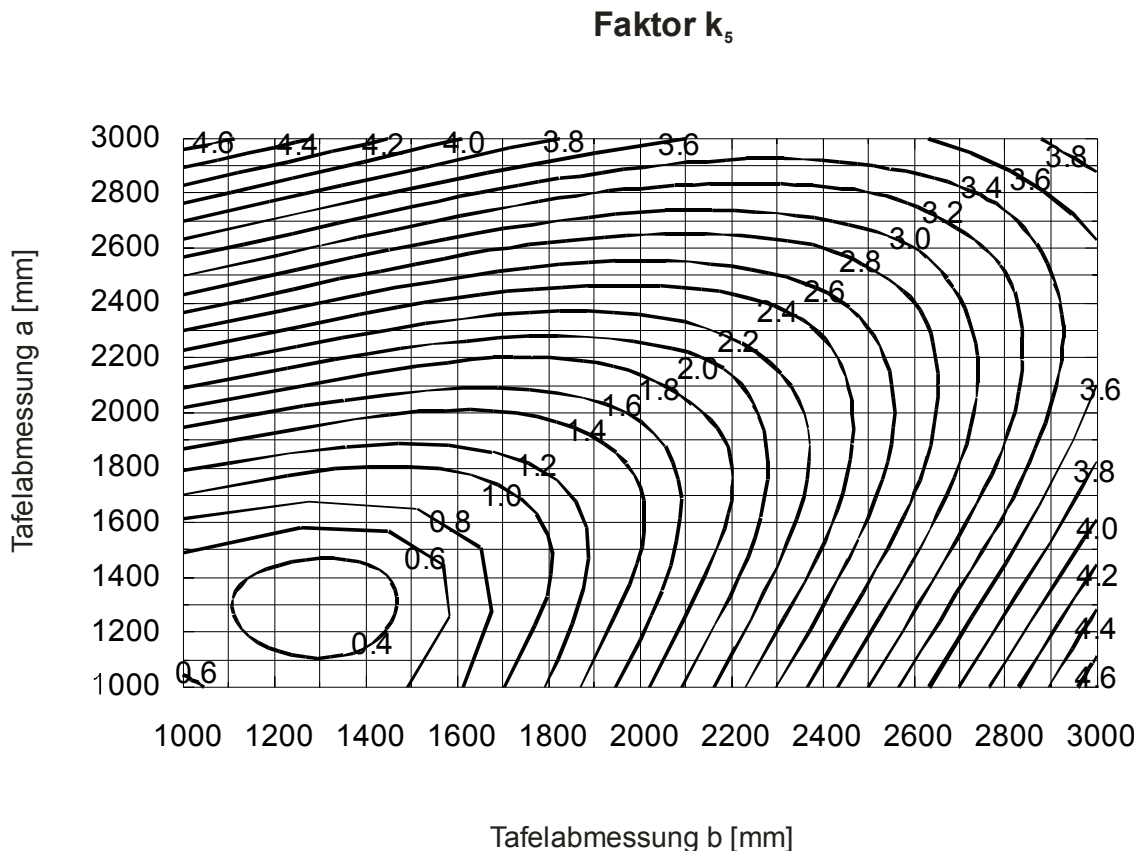




Faktor k_s







Lebenslauf

Persönliche Daten:

Vor- und Zuname: Nils-Roman Albrecht

Geburtsdatum: 04.06.1971

Staatsangehörigkeit: deutsch

Ausbildung:

1977 – 1981: Friedrich Silcher Schule, Birkenfeld

1981 – 1990: Theodor-Heuss Gymnasium, Pforzheim

Abschluss: Abitur

1990 – 1991: Wehrdienst in Nagold

1991 – 1997: Studium des Bauingenieurwesens

an der Universität Karlsruhe (TH)

Vertiefungsrichtung: Konstruktiver Ingenieurbau

Vertiefungsschwerpunkt: Stahlbetonbau

Abschluss: Diplom

Beschäftigungsdaten:

seit 11/97: Wissenschaftlicher Angestellter an der
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
der Universität Karlsruhe (TH)