

FEM-integrierendes Berechnungskonzept für den Ermüdungs- festigkeitsnachweis von Behälter-Stutzen-Verbindungen unter Berücksichtigung von Innendruck und Rohrleitungslasten

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Dr.-Ing.
von dem Fachbereich Chemietechnik der Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Matthias Rauth
aus
Bochum

Tag der mündlichen Prüfung: 11. November 2002

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. E. Weiß
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing.K. Thermann

Dortmund 2002

Berichte aus dem Apparatebau

Matthias Rauth

**FEM-integrierendes Berechnungskonzept für
den Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Behälter-
Stutzen-Verbindungen unter Berücksichtigung
von Innendruck und Rohrleitungslasten**

D 290 (Diss. Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2003

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Rauth, Matthias:

FEM-integrierendes Berechnungskonzept für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Behälter-Stutzen-Verbindungen unter Berücksichtigung von Innendruck und Rohrleitungslasten/Matthias Rauth.

Aachen : Shaker, 2003

(Berichte aus dem Apparatebau)

Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2002

ISBN 3-8322-1088-1

Copyright Shaker Verlag 2003

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-1088-1

ISSN 1437-7667

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Chemietechnik, Arbeitsgruppe Chemieapparatebau der Universität Dortmund.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Weiß für die Anregung zu dieser Arbeit, für sein fortwährendes persönliches Interesse und für die wertvollen kritischen Hinweise, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Thermann möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates bedanken.

Allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Chemieapparatebau danke ich für die in einer positiven Atmosphäre stattgefundene Zusammenarbeit.

Dortmund, im Juli 2002

Matthias Rauth

Abstract

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zu dem Problem der konzeptkonformen Beanspruchungsermittlung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode auf Basis vollparametrisierter 3D-Modelle bei Behälter-Stutzen-Verbindungen unter zyklischer Einwirkung von Innendruck und zusätzlichen Rohrleitungslasten. Im Gegensatz zu früher durchgeführten FEM-Reihenuntersuchungen an vollparametrisierten Modellen spezieller Konstruktionsformen und Anpassung der Ergebnisse durch Formeln, die für eine spätere Beanspruchungsermittlung dienen, werden durch die vorliegende Arbeit dem Berechnungsingenieur hochwertige vollparametrisierte Modelle in Form von sogenannten batch-files an die Hand gegeben, mit denen er gezielt Bauteiluntersuchungen durchführen kann. Durch die Bereitstellung von batch-files für wesentliche, im Druckbehälterbau vorkommende Grundkörperformen, Stutzenstellungen und Stutzeneinschweißungen entfällt für den Berechnungsingenieur die aufwendige Modellierung.

Mit einem an die batch-files gekoppelten AD-S2-Tool gestattet es einem Berechnungsingenieur, ohne eigenen Modellierungsaufwand spezielle Festigkeitsanalysen durchzuführen.

Aus einem kritischen Vergleich zwischen den gültigen Regelwerken und den Nachweiskonzepten wurden Schlussfolgerungen für eine konzeptkonforme Modellbildung gezogen.

Für die im Apparatebau gebräuchlichen Grundkörperformen Zylinder, Konus, Halbkugel, Klöpfer- und Korbbojenboden wurden Varianten der Behälter-Stutzen-Verbindungen modelliert. Für die 3D-Vollmodelle sind sowohl der eingesetzte, der aufgesetzte und in Sonderfällen der durchgesteckte Stutzen modelltechnisch umgesetzt worden. Anhand des senkrechten und des axialgeneigten Stutzens auf zylindrischem Grundkörper werden ausführlich der Aufbau des Solid-Modells und die dazu erforderlichen geometrischen Grundkonstruktionen gezeigt, mit denen die singularitätsfreie Hohlkehle sowie die mit Übergansradien versehene Flachkehle modelliert wurden. Bei der 3D-Modellierung wurde anhand des senkrechten Stutzens auf zylindrischem Grundkörper für den Lastfall Innendruck untersucht, mit welcher Vernetzung ein Optimum aus Rechenaufwand und Genauigkeit zu erzielen ist. Das Ergebnis dieser Optimierungsuntersuchung wurde auf die anderen Modelle übertragen. Mit den erarbeiteten Grundlagen wurde das Modulpaket AutoFatigue für die automatisierte Beanspruchungsermittlung als Voraussetzung für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit einem AD-S2-Tool geschaffen und in Einzelschritten sowie an dem Beispiel eines Klöpferbodens mit achsparallelem Stutzen dargelegt.

Vergleichende Betrachtungen mit Ergebnissen aus der Literatur wurden angestellt. Die zum Teil vorhandenen Abweichungen wurden diskutiert. Darüber hinaus wurden an einem Versuchsbehälter Dehnungsmessungen mit Dehnungsmessstreifen durchgeführt. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung wurden anschließend mit Ergebnissen einer Finite-Elemente-Berechnung auf Basis des Modulpakets AutoFatigue für diesen Versuchsbehälter verglichen.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
	Inhaltsverzeichnis	I
	Zeichentabelle	III
	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	VII
1.	Einleitung	1
2.	Motivation und Zielsetzung	3
3.	Grundlagen der Ermüdungsfestigkeit	6
3.1	Phänomen Ermüdung	6
3.2	Schädigungsverlauf	7
3.3	Mikro- und Makrokerben	8
4.	Nachweiskonzepte der Ermüdungsfestigkeit	11
4.1	Konzeptübersicht	11
4.1.1	Nennspannungskonzept	11
4.1.2	Strukturspannungskonzept	13
4.1.3	Konzept der örtlich elastischen Beanspruchung	17
4.1.4	Konzept der örtlichen Beanspruchung	18
4.2	Vergleich zwischen Regelwerk und Konzepten	21
4.2.1	Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach AD-Merkblatt S2	21
4.2.2	Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach europäischem Regelwerk	24
4.2.3	Kritische Betrachtung des deutschen und europäischen Regelwerks	24
4.3	Schlussfolgerung für die Modellbildung unter Berücksichtigung der in den Regelwerken enthaltenen Konzepte.	28
5.	Modelltechnische Umsetzung der Behälter-Stutzen-Verbindung	31
5.1	Modelltechnische Grundüberlegungen	31
5.2	Varianten der Behälter-Stutzen-Verbindungen	32
5.3	Varianten der Stutzeneinschweißungen	37
5.4	Geometrische Konstruktionen für konzeptkonformes Modellieren	41
5.5	Vernetzung bei der 3D-Modellierung	48
5.6	Randbedingungen und Lastaufgabe	56
6.	Programmtechnische Umsetzung	62
6.1	Dateneingabe in das Modulpaket AutoFatigue	62
6.2	FEM-Berechnung innerhalb des Modulpakets AutoFatigue	67

	Seite	
6.3	Beanspruchungsbewertung mit dem Auswertungstool nach AD-Merkblatt S2	69
7.	Ermittlung und Verifikation von Ergebnissen	71
7.1	Beispiel für die Durchführung des Ermüdungsfestigkeitsnachweises	71
7.1.1	Dateneingabe	71
7.1.2	FEM-Berechnung	74
7.1.3	Beanspruchungsbewertung	77
7.2	Vergleiche mit Ergebnissen aus der Literatur	85
7.2.1	Senkrechter Stutzen auf zylindrischem Grundkörper unter Innendruck	85
7.2.2	Senkrechter Stutzen auf zylindrischem Grundkörper bei Lastaufgabe von Axialkraft und Biegemomenten	88
7.2.3	Axialgeneigter Stutzen auf zylindrischem Grundkörper unter Innendruck, und bei Lastaufgabe von Axialkraft, Biegemomenten sowie Torsionsmoment	91
7.2.4	Zentraler Stutzen auf sphärischem Grundkörper unter Innendruck	95
7.2.5	Senkrecht auf der Wand des konischen Grundkörpers stehender Stutzen unter Innendruck	96
8.	Experimentelle und modelltechnische Untersuchung an einem Druckbehälter	99
8.1	Versuchdurchführung und Modellierung	99
8.2	Spannungsberechnung aus Dehnungsmesswerten	103
8.3	Vergleich der Ergebnisse aus Versuch und Modellrechnung	104
9.	Zusammenfassung und Ausblick	108
10.	Literaturverzeichnis	110

Zeichentabelle

Zeichen	Maßeinheit	Bedeutung
α	[Grad]	Öffnungswinkel des Konus
γ	[Grad]	Winkel in einer Grundkonstruktion
δ	[Grad]	Winkel in einer Grundkonstruktion
ε	[Grad]	Winkel in einer Grundkonstruktion
$\varepsilon_{1,2,3}$	[mm]	Hauptdehnungen
$\varepsilon_{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ}$	[mm]	Dehnungsmesswerte der R-Rosette
$\varepsilon_{a, el}$	[-]	Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a, pl}$	[-]	Plastische Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a, t}$	[-]	Gesamtdehnungsamplitude
ε'_f	[mm/mm]	Duktilitätskoeffizient
θ	[Grad]	Winkel in einer Grundkonstruktion
μ	[-]	Querkontraktionszahl
ρ_i, ρ_a	[mm]	Übergangsradien
$\sigma_{1,2,3}$	[N/mm ²]	Hauptspannungen
σ_a	[N/mm ²]	Spannungsamplitude
σ'_f	[N/mm ²]	Schwingfestigkeitskoeffizient
σ_N	[N/mm ²]	Nennspannung
$\sigma_{Gru, ax}$	[N/mm ²]	Membranspannung der Grundkörperschale in Axialrichtung
σ_m	[N/mm ²]	Mittelspannung
σ_o	[N/mm ²]	Oberspannung
$\sigma_{Stu, ax}$	[N/mm ²]	Membranspannung am Stutzenende in Axialrichtung
σ_u	[N/mm ²]	Unterspannung
σ_v	[N/mm ²]	Vergleichsspannung
$2\sigma_a^*$	[MPa]	Maßgebende Vergleichsspannungsschwingbreite
$2\sigma_{aD}$	[MPa]	Dauerfestigkeitsgrenze (einstufig)
$2\sigma_{a 108}$	[MPa]	Dauerfestigkeitsgrenze (mehrstufig)
$2\sigma_{Vazul}$	[MPa]	zulässige Vergleichsspannungsschwingbreite
$2\sigma_{Va}$	[MPa]	Vergleichsspannungsschwingbreite
$2\sigma_{Vm}$	[MPa]	Vergleichsmittelspannung
φ	[Grad]	Neigungswinkel des Stutzens
[B]	[-]	Beanspruchbarkeit allgemein
B	[-]	Beanspruchung allgemein
B1	[-]	Konstante nach AD-Regelwerk

Zeichen	Maßeinheit	Bedeutung
β	[-]	Schwingfestigkeitsexponent
b	[mm]	Schweißnahtbreite
ϵ	[-]	Duktilitätskoeffizient
C	[-]	Konstante
D_e	[mm]	Außendurchmesser des Grundkörpers
D_i	[-]	Schadensbeitrag (Miner)
d_{eb}	[mm]	Außendurchmesser des Stutzens
d_{mb}	[mm]	mittlerer Durchmesser des Stutzens
e	[mm]	Wanddicke
e_b	[mm]	Wanddicke des Stutzens
e_s	[mm]	Wanddicke des Grundkörpers
F_{ax}	[N/mm ²]	Axialkraft
f_d	[-]	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Wanddickeneinflusses
f_i	[-]	diverse Korrekturfaktoren
f_M	[-]	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Mittelspannung
f_O	[-]	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Kerbwirkung von Oberflächen
f_{T^*}	[-]	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Temperatur
h	[mm]	Schweißnahthöhe
H_i	[-]	Hilfszylinderbezeichnung
K'	[N/mm ²]	Festigkeitskoeffizient
k_e	[-]	Korrekturfaktor für mechanische Spannungen im überelastisch beanspruchten Bereich
$K_O, K_1, K_2, K_3,$	[-]	Kennzeichnung von Bauteilwöhlerlinien
l_b	[mm]	Abklinglänge
l_i	[mm]	Länge des i-ten Elementes
l_T	[mm]	Länge des letzten Elementes
L	[mm]	Gesamtlänge der Linie
l_s	[mm]	Abklinglänge
M	[Nmm]	Biegemoment
m	[-]	Steigung der Wöhlerlinie
M_t	[Nmm]	Torsionsmoment
M_x, M_y	[Nmm]	Biegemomente

Zeichen	Maßeinheit	Bedeutung
N	[-]	Lastwechselzahl
N _D	[-]	Lastwechselzahl am Übergang zur Dauerfestigkeit
N _P	[-]	Lastwechselzahl bis zur wiederkehrenden Prüfung
N _T	[-]	Übergangslastwechselzahl
N _{Zul}	[-]	zulässige Lastwechselzahl
n	[-]	Gesamtteilung
n _{tats.}	[-]	tatsächliche Lastwechselzahl
n'	[-]	Festigkeitsexponent
n	[-]	n-ter Lastschritt
P _a	[%]	Ausfallwahrscheinlichkeit
p _b	[mm]	Fasensbreite
p _h	[mm]	Fasenhöhe
p _i	[N/mm ²]	Innendruck
Q	[N/mm ²]	sekundäre Spannungen
R	[-]	Spannungsverhältnis
R _D	[N/mm ²]	Dauerfestigkeit
R _e	[N/mm ²]	Streckgrenze
R _m	[MPa]	Zugfestigkeit
R _{p 0.2}	[MPa]	technische Steckgrenze
R _Z	[mm]	Oberflächenrauigkeit
r	[mm]	Neuber-Radius
r ₂	[mm]	Radius nach DIN 28011 bzw.28013
r _e	[mm]	Außenradius des Grundkörpers
r _{eb}	[mm]	Außenradius des Stutzens
r _{H1} , r _{H1} , r _{H3}	[mm]	Radien der Hilfszylinder
r _{ik}	[mm]	Radius der Lochrandinnenkante
r _{snu}	[mm]	Radius am Schweißnahtübergang
S	[-]	Sicherheitsbeiwert
SCF	[-]	Spannungserhöhungsfaktor
S _m	[N/mm ²]	Berechnungsspannung
S _{nua} , S _{nub}	[mm]	Grundkonstruktionsgrößen
T	[-]	Teilung einer Linie
T*	[°C]	Maßgebende Berechnungstemperatur
t _{ra}	[-]	Teilung der Lochrandinnenkante

Zeichentabelle

Zeichen	Maßeinheit	Bedeutung
t_{sl}	[-]	Teilung der Schmiegeinie
t_{ul}	[-]	Teilung der Umfangslinie des Schweißnahtvolumens
t_{wr}	[-]	Teilung der restlichen Wanddicke
u_x, u_y, u_z	[mm]	Verschiebungen
V	[-]	Teilungsverhältnis einer Linie
W_b	[mm ³]	Widerstandsmoment gegen Biegung
x, y, z	[-]	Koordinaten
x_{ij}	[-]	Extrapolationspunkte

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildung/Tabelle	Bezeichnung	Seite
Abb. 2.1	Möglichkeiten der FEM-gestützten Beanspruchungsermittlung	3
Abb. 4.1	Wöhlerlinien für Struktur- und Kerbspannungskonzepte	13
Abb. 4.2	Beanspruchungsermittlung nach Hot-Spot-Verfahren	15
Abb. 4.3	Dehnungsorientierte Werkstoffwöhlerlinie	18
Abb. 4.4	Abgeleitete CAB-Wöhlerlinie	27
Abb. 4.5	Zusammenhang zwischen Nominalnaht, Konzeptwahl und Modellnaht	30
Abb. 5.1	Bauteilformen	33
Abb. 5.2	Modelle der Bauteilformen	34
Abb. 5.3	Stutzeneinschweißungen	37
Abb. 5.4	Modelle der Stutzeneinschweißungen	38
Abb. 5.5	Senkrechter und axialgeneigter Stutzen auf zylindrischem Grundkörper	41
Abb. 5.6	Modellierung der Abklingbereiche	42
Abb. 5.7	Modellierung der Nominalnaht	43
Abb. 5.8	Nominalnaht	44
Abb. 5.9	FE-Ersatzmodell	44
Abb. 5.10	Schweißnaht am senkrechten Stutzen mit Übergängen	45
Abb. 5.11	Lochrandinnenkante des axialgeneigten Stutzens	46
Abb. 5.12	Schweißnaht am axialgeneigten Stutzen mit Übergängen	47
Abb. 5.13	Netzverdichtung	49
Abb. 5.14	Übergänge zwischen Abklingbereich und anschließenden Volumina	49
Abb. 5.15	An die Schweißnaht anschließende Elemente	50
Abb. 5.16	Einfluss der Teilung t_{ra} der Lochrandinnenkante auf SCF	51
Abb. 5.17	Einfluss der Teilungen t_{sj} und $\frac{t_{sl}}{2}$ auf SCF	52
Abb. 5.18	Teilung der Umfangslinien t_{uj} auf SCF	53
Abb. 5.19	Teilung der restlichen Wanddicke t_{wr} auf SCF	53
Abb. 5.20	Elementierung des Flachkehlnahtmodells	54

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildung/Tabelle	Bezeichnung	Seite
Abb. 5.21	Verlauf von SCF bei gleichmäßiger Teilung t_{wr} bei der Flachkehle	54
Abb. 5.22	Einfluss der Teilung t_{sl} der Schweißnahtflanke auf SCF	55
Abb. 5.23	Einfluss der Teilung t_{ra} der Schweißnahtübergänge auf SCF	55
Abb. 5.24	Lastaufgabe bei Stutzen auf zylindrischem Grundkörper	57
Abb. 5.25	Lastaufgabe bei Stutzen auf konischem Grundkörper	58
Abb. 5.26	Lastaufgabe bei Stutzen auf sphärischem Grundkörper	59
Abb. 5.27	Lastaufgabe bei Stutzen auf Klöpperboden	60
Abb. 6.1	Start des Programmpakets AutoFatigue im ANSYS® Rev.5.7- Main Menu	62
Abb. 6.2	Übersichtsfließbild der Dateneingabe	63
Abb. 6.3	Verschiedene Auswahlmöglichkeiten zur Festlegung des batch-files	64
Abb. 6.4	Eingabe der geometrischen Abmessungen, der Werkstoffkennwerte und der Anzahl der Lastschritte	65
Abb. 6.5	Eingabe der diskretisierten Lastverläufe für Innendruck und Rohrleitungslasten	66
Abb. 6.6	Festlegung des Vernetzungsgrades und Start der FEM-Berechnung	67
Abb. 6.7	Übersichtsfließbild der FEM-Berechnung	67
Abb. 6.8	Auswahl der Beanspruchungsdarstellung und des Lastschrittes	68
Abb. 6.9	Übersichtsfließbild der Beanspruchungsbewertung	69
Abb. 7.1	Auswahl zur Festlegung des batch-files	72
Abb. 7.2	Eingegebene geometrische Abmessungen, Werkstoffkennwerte und Lasten	73
Abb. 7.3	Konturplots des Modells mit Hohlkehle	75
Abb. 7.4	Konturplots des Modells mit Flachkehle	76
Tab. 7.1	Ermüdungsfestigkeitsnachweis für Punkt 1 im Modell mit Hohlkehle	78
Tab. 7.2	Ermüdungsfestigkeitsnachweis für Punkt 2 im Modell mit Hohlkehle	79
Tab. 7.3	Ermüdungsfestigkeitsnachweis für Punkt 3 im Modell mit Hohlkehle	80

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildung/Tabelle	Bezeichnung	Seite
Tab. 7.4	Ermüdungsfestigkeitsnachweis für Punkt 1 im Modell mit Flachkehle	81
Tab. 7.5	Ermüdungsfestigkeitsnachweis für Punkt 2 im Modell mit Flachkehle	82
Tab. 7.6	Ermüdungsfestigkeitsnachweis für Punkt 3 im Modell mit Flachkehle	83
Abb. 7.5	SCF-Werte für den senkrecht auf zylindrischem Grundkörper unter Innendruck für das Wanddickenverhältnis 0,5	86
Abb. 7.6	SCF-Werte für den senkrecht auf zylindrischem Grundkörper unter Innendruck für das Wanddickenverhältnis 1,0	87
Abb. 7.7	SCF-Werte für den senkrecht auf zylindrischem Grundkörper unter Innendruck für das Wanddickenverhältnis 2,0	87
Abb. 7.8	SCF-Werte für den senkrechten Stutzen auf zylindrischem Grundkörper bei Lastaufgabe Axialkraft F_{ax}	89
Abb. 7.9	SCF-Werte für den senkrechten Stutzen auf zylindrischem Grundkörper bei Lastaufgabe Biegemoment M_{by}	90
Abb. 7.10	SCF-Werte für den senkrechten Stutzen auf zylindrischem Grundkörper bei Lastaufgabe Biegemoment M_{bx}	90
Abb. 7.11	SCF-Werte für den axialgeneigten Stutzen auf zylindrischem Grundkörper unter Innendruck p_i	91
Abb. 7.12	SCF-Werte für den axialgeneigten Stutzen auf zylindrischem Grundkörper bei Lastaufgabe Axialkraft F_{ax}	92
Abb. 7.13	SCF-Werte für den axialgeneigten Stutzen auf zylindrischem Grundkörper bei Lastaufgabe Biegemoment M_{by}	92
Abb. 7.14	SCF-Werte für den axialgeneigten Stutzen auf zylindrischem Grundkörper bei Lastaufgabe Biegemoment M_{bx}	93
Abb. 7.15	SCF-Werte für den axialgeneigten Stutzen auf zylindrischem Grundkörper bei Lastaufgabe Torsionsmoment M_t	93
Abb. 7.16	SCF-Werte für den zentralen Stutzen auf sphärischem Grundkörper unter Innendruck	95
Abb. 7.17	SCF-Werte für den senkrecht auf der Wand des konischen Grundkörpers stehenden Stutzen unter Innendruck p_i	97
Abb. 8.1	Lage der Dehnungsmessstreifen (DMS) auf der Außenseite des Versuchsbehälters	99

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildung/Tabelle	Bezeichnung	Seite
Abb. 8.2	Lage der Dehnungsmessstreifen (DMS) auf der Innenseite des Versuchsbehälters	100
Abb. 8.3	Schweißnahtbereich des Finite-Elemente-Modells	101
Abb. 8.4	Vernetzung der Flachkehlnaht des Behälterstutzens	102
Abb. 8.5	Vernetzung der Hohlkehlnaht des Behälterstutzens	102
Abb. 8.6	Vergleich von Messung und Finite-Elemente-Berechnung für die Flachkehlnaht	105
Abb. 8.7	Vergleich von Messung und Finite-Elemente-Berechnung für die Hohlkehlnaht	106
Abb. 8.8	Vergleich Flachkehlnaht und Hohlkehlnaht bei 0,5 MPa	106
Abb. 8.9	Vergleich von Messung und Finite-Elemente-Berechnung für die Innenseite	107