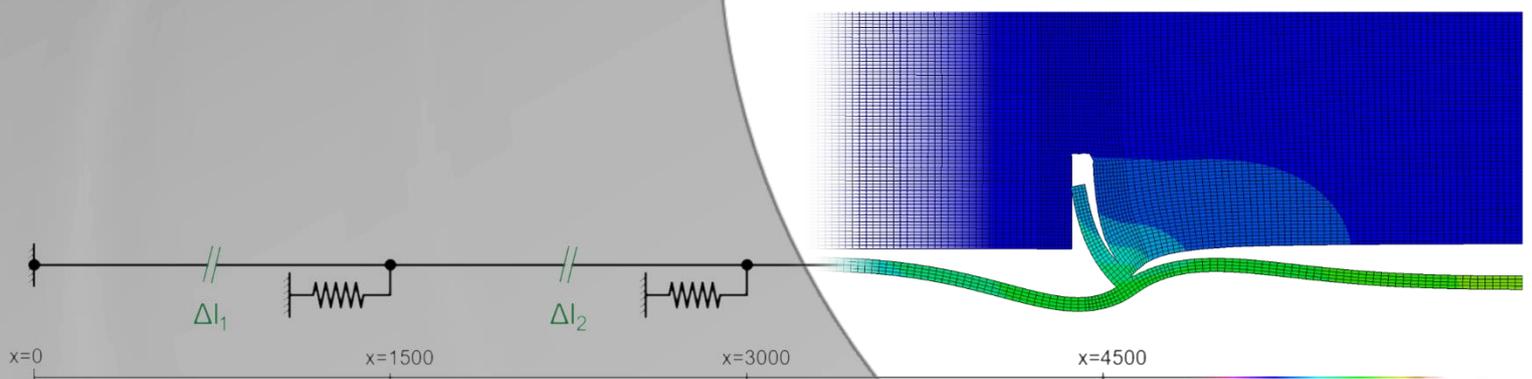


# MASTERARBEIT

## Gesamtbeanspruchung an Schubringen von Druckschachtpanzerungen – FEM-Modell versus Stabmodell



Eingereicht am

Institut für Stahlbau  
technische Universität Graz



Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Unterwiesing

betreuender Assistent

Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Ecker

Verfasser

David Funke-Kaiser BSc.

Graz, Juni 2019



## Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

(Ort, Datum)

David Funke-Kaiser .....

(Unterschrift)



## Danksagung

Den größten Dank möchte ich an meine Eltern Silvia und Oliver Funke-Kaiser aussprechen. Dafür, dass sie mich während meines gesamten Bildungswegs stets bedingungslos unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt auch meinem Onkel Markus Rieser, welcher mir den Studienalltag in Graz näherbrachte und meinem Bruder Jonathan Funke-Kaiser, für die umfangreichen Erläuterungen über alle chemischen Vorgänge auf einer Baustelle.

Ich bedanke mich beim Institut für Stahlbau für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit, den zur Verfügung gestellten Arbeitsplatz am Institut und den ausgezeichneten Unterricht.

Vielen Dank an meine Betreuer: Harald Unterweger und Alexander Ecker, für die großartige Zusammenarbeit und Unterstützung.



In dieser Arbeit werden rein numerische Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt. Untersucht wird dabei ein 1D-Stabmodell mit Erfassung der Nachgiebigkeit der Schubringe durch Federn und dessen Möglichkeiten, komplexe Lastfallüberlagerungen aus Innendruck, Temperatur und Längskraft abbilden zu können.

Ausgelegt werden Schubringe grundsätzlich auf die Längskraftbeanspruchung in einer Druckschachtpanzerung. Es entstehen aber auch durch Zwangsbeanspruchungen aus Innendruck und Temperatur, bei mehreren Schubringen hintereinander, Längskräfte, welche nicht zu vernachlässigen sind und die Schubringe belasten.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Masterarbeit von Alexander Farkas, welche bereits umfangreiche Ergebnisse für die Einzellastfälle Innendruck und Temperatur in gepanzerten Druckstollen lieferte, werden diese ergänzt, wofür zur Vergleichbarkeit die gleichen Randbedingungen im Finite Elemente Modell verwendet wurden. Die Ergebnisse aus der Finiten Elemente Berechnung werden anschließend übersichtlich mit denen aus dem 1D-Stabmodell, bei dem die Schubringe mittels Einzelfedern modelliert werden, verglichen.

Ein Vergleich beider Modelle ist vor allem durch deren unterschiedliche Wirkungsweise bei Lastfallüberlagerungen interessant. Im 1D-Stabmodell werden verschiedene Lastfälle unabhängig voneinander superponiert, wohingegen in der Finite Elemente Analyse ein realitätsnahes Zusammenwirken der überlagerten Lastfälle untersucht werden kann.



In this paper only numerical research and development is being used. A 1D-beam-model, with additional springs for the stiffness of the individual thrust rings, is studied for complex superpositions of load cases, resulting from internal pressure, temperature and longitudinal forces.

Thrust rings are basically designed to transfer the longitudinal forces in a steel liner to the rock mass. But also due to internal pressure and temperature, in case of several thrust rings in a row, additional forces act on the thrust rings.

Based on the results of the master thesis of Alexander Farkas, who already provided extensive results for the individual load cases internal pressure and temperature in steel liners, their findings are going to be complemented. The same boundary conditions were used for comparability of the results of the Finite Element model. The results from the Finite Element calculation are then compared with those from the 1D-beam-model, in which the thrust rings are modeled using single springs.

A comparison of both models is particularly interesting, because of their different behavior in superpositions of load cases. In the 1D-beam-model, different load cases are superimposed independently of each other, whereas in the finite element analysis a realistic interaction of the load cases and their interactions are investigated.



<b>1</b>	<b>Grundlagen.....</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung.....	1
1.2	Zielsetzung.....	1
1.3	Modellierung und Geometrie.....	2
1.4	Erläuterung der gegenübergestellten Modelle.....	3
1.4.1	FEA (Finite Elemente Analyse) - Modell.....	3
1.4.2	1D-Stabmodell.....	6
1.5	Untersuchte Lastfälle.....	8
1.5.1	Rohrdruck: Innen- oder Außendruck.....	9
1.5.2	Temperatur: Erwärmung oder Abkühlung.....	10
1.5.3	Deckeldruck.....	11
1.6	Auslesen der Ergebnisse.....	12
<b>2</b>	<b>Vergleich der Grundlastfälle – Innendruck, Temperaturänderung und Deckeldruck.....</b>	<b>13</b>
2.1	Einleitung.....	13
2.2	Grundlastfälle mit Geometrie 1.....	14
2.2.1	Aufteilung der Normalkräfte $\Delta N$ auf die einzelnen Schubringe.....	14
2.2.2	Vergleich der Umfangsspannungen $\sigma_{\varphi,m}$ .....	15
2.2.3	Vergleich der Längsspannungen $\sigma_{x,m}$ .....	16
2.2.4	Kontaktspannungen.....	18
2.3	Grundlastfälle mit Geometrie 2.....	26
2.3.1	Aufteilung der Normalkräfte $\Delta N$ .....	26
2.3.2	Vergleich der Umfangsspannung $\sigma_{\varphi,m}$ .....	28
2.3.3	Vergleich der Längsspannung $\sigma_{x,m}$ .....	29
2.3.4	Kontaktspannungen.....	30
2.4	Grundlastfälle mit Geometrie 3.....	36
2.4.1	Aufteilung der Normalkräfte $\Delta N$ .....	36
2.4.2	Vergleich der Umfangsspannung $\sigma_{\varphi,m}$ .....	38
2.4.3	Vergleich der Längsspannungen $\sigma_{x,m}$ .....	39
2.4.4	Kontaktspannungen.....	40
<b>3</b>	<b>Weiterführende Untersuchung zu den Lastfällen Innendruck und Temperaturerhöhung.....</b>	<b>47</b>
3.1	Rohrsteifigkeitsmodifikation EA.....	47
3.2	Rohrsteifigkeitsuntersuchung Geometrie 1.....	48
3.2.1	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte.....	48
3.2.2	Relativer Vergleich der Schubringkräfte.....	48
3.2.3	Umfangsspannungen im Vergleich.....	49
3.2.4	Längsspannungen im Vergleich.....	50
3.3	Rohrsteifigkeitsuntersuchung Geometrie 2.....	50
3.3.1	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte.....	50

3.3.2	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	51
3.3.3	Umfangsspannungen im Vergleich.....	52
3.3.4	Längsspannungen im Vergleich .....	53
3.4	Rohrsteifigkeitsuntersuchung Geometrie 3 .....	53
3.4.1	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	53
3.4.2	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	54
3.4.3	Umfangsspannungen im Vergleich.....	55
3.4.4	Längsspannungen im Vergleich .....	56
3.4.5	Fazit zur Steifigkeitsmodifikation des Rohres.....	56
3.5	Schubringsteifigkeitsmodifikation $C^*$ für die Lastfälle Innendruck, Temperaturänderung und Deckeldruck.....	57
3.5.1	Erforderliche Schubringsteifigkeiten für Innendruck $9 \text{ N/mm}^2$ .....	57
3.5.2	Erforderliche Schubringsteifigkeiten für Deckeldruck $1 \text{ N/mm}^2$ .....	59
3.5.3	Erforderliche Schubringsteifigkeiten für Temperatur $-10^\circ$ .....	61
3.5.4	Erforderliche Schubringsteifigkeiten für Temperatur $+10^\circ$ .....	63
3.5.5	Fazit zur Steifigkeitsmodifikation der Schubringe .....	65
<b>4</b>	<b>Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck – Vergleich 1D-Stabmodell – FEA ohne Reibung..</b>	<b>66</b>
4.1	Einleitung.....	66
4.1.1	Bestimmung des Deckeldrucks.....	66
4.2	Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 1 .....	68
4.2.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	68
4.2.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	70
4.2.3	Verformungsplots.....	71
4.2.4	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	74
4.2.5	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	75
4.3	Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 2 .....	76
4.3.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	76
4.3.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	78
4.3.3	Verformungsplots.....	79
4.3.4	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	81
4.3.5	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	82
4.4	Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 3 .....	83
4.4.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	83
4.4.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	85
4.4.3	Verformungsplots.....	86
4.4.4	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	88
4.4.5	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	89
<b>5</b>	<b>Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck – Vergleich 1D-Stabmodell – FEA mit Reibung.....</b>	<b>90</b>
5.1	Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 1 .....	90
5.1.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	90
5.1.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	93
5.1.3	Analyse der Reibungswirkung .....	94
5.1.4	Verformungsplots.....	95

5.1.5	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	97
5.1.6	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	98
5.2	Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 2 .....	99
5.2.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	99
5.2.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung .....	101
5.2.3	Analyse der Reibungswirkung .....	102
5.2.4	Verformungsplots.....	103
5.2.5	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	105
5.2.6	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	106
5.3	Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 3 .....	107
5.3.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	107
5.3.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung .....	109
5.3.3	Analyse der Reibungswirkung .....	110
5.3.4	Verformungsplots.....	111
5.3.5	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	113
5.3.6	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	114
<b>6</b>	<b>Besonderheiten der verschiedenen Lastkombinationen.....</b>	<b>115</b>
6.1	Kapitel 4 und Kapitel 5: Vergleich von Innendruck und Deckeldruck .....	115
6.2	Anhang 1: Vergleich von Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringerng .....	115
6.3	Anhang 2: Vergleich von Innendruck und Temperaturverringerng .....	116
6.4	Anhang 3: Vergleich von Außendruck und Temperaturerhöhung .....	116
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Lastfallüberlagerungen .....	117
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>118</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>119</b>

# Anhang 1

<b>1</b>	<b>Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringerng ohne Reibung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringerng - Geometrie 1.....	1
1.1.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	1
1.1.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	3
1.1.3	Verformungsplots.....	4
1.1.4	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	6
1.1.5	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	7
1.2	Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringerng - Geometrie 2.....	8
1.2.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	8
1.2.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	10
1.2.3	Verformungsplots.....	11
1.2.4	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	13
1.2.5	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	14
1.3	Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringerng - Geometrie 3.....	15
1.3.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	15
1.3.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	17
1.3.3	Verformungsplots.....	18
1.3.4	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	20
1.3.5	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	21
<b>2</b>	<b>Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringerng mit Reibung .....</b>	<b>22</b>
2.1	Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringerng - Geometrie 1.....	22
2.1.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	22
2.1.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	24
2.1.3	Analyse der Reibungswirkung .....	25
2.1.4	Verformungsplots.....	25
2.1.5	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	27
2.1.6	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	28
2.2	Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringerng - Geometrie 2.....	29
2.2.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	29
2.2.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	31
2.2.3	Analyse der Reibungswirkung .....	32
2.2.4	Verformungsplots.....	32
2.2.5	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	34
2.2.6	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	35
2.3	Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringerng - Geometrie 3.....	36
2.3.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	36
2.3.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	38
2.3.3	Analyse der Reibungswirkung .....	39
2.3.4	Verformungsplots.....	39
2.3.5	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	41
2.3.6	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	42

## Anhang 2

<b>1</b>	<b>Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringerng ohne Reibung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringerng - Geometrie 1.....	1
1.1.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	1
1.1.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	3
1.1.3	Verformungsplots.....	4
1.1.4	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	6
1.1.5	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	7
1.2	Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringerng - Geometrie 2.....	8
1.2.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	8
1.2.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	10
1.2.3	Verformungsplots.....	11
1.2.4	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	13
1.2.5	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	14
1.3	Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringerng - Geometrie 3.....	15
1.3.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	15
1.3.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	17
1.3.3	Verformungsplots.....	18
1.3.4	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	20
1.3.5	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	21
<b>2</b>	<b>Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringerng mit Reibung .....</b>	<b>22</b>
2.1	Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringerng - Geometrie 1.....	22
2.1.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	22
2.1.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	24
2.1.3	Analyse der Reibungswirkung .....	25
2.1.4	Verformungsplots.....	25
2.1.5	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	27
2.1.6	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	28
2.2	Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringerng - Geometrie 2.....	29
2.2.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	29
2.2.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	31
2.2.3	Analyse Reibungswirkung.....	32
2.2.4	Verformungsplots.....	32
2.2.5	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	34
2.2.6	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	35
2.3	Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringerng - Geometrie 3.....	36
2.3.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	36
2.3.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	38
2.3.3	Analyse der Reibungswirkung .....	39
2.3.4	Verformungsplots.....	39
2.3.5	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	41
2.3.6	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	42

## Anhang 3

<b>1</b>	<b>Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung ohne Reibung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung - Geometrie 1 .....	1
1.1.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	1
1.1.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	3
1.1.3	Verformungsplots.....	4
1.1.4	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	6
1.1.5	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	7
1.2	Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung - Geometrie 2 .....	8
1.2.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	8
1.2.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	10
1.2.3	Verformungsplots.....	11
1.2.4	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	13
1.2.5	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	14
1.3	Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung - Geometrie 3 .....	15
1.3.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	15
1.3.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	17
1.3.3	Verformungsplots.....	18
1.3.4	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	20
1.3.5	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	21
<b>2</b>	<b>Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung mit Reibung .....</b>	<b>22</b>
2.1	Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung - Geometrie 1 .....	22
2.1.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	22
2.1.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	24
2.1.3	Analyse der Reibungswirkung .....	25
2.1.4	Verformungsplots.....	25
2.1.5	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	27
2.1.6	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	28
2.2	Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung - Geometrie 2 .....	29
2.2.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	29
2.2.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	31
2.2.3	Analyse der Reibungswirkung .....	32
2.2.4	Verformungsplots.....	32
2.2.5	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	34
2.2.6	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	35
2.3	Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung - Geometrie 3 .....	36
2.3.1	Ergebnisvergleich in Längsrichtung .....	36
2.3.2	Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung.....	38
2.3.3	Analyse der Reibungswirkung .....	39
2.3.4	Verformungsplots.....	39
2.3.5	Absoluter Vergleich der Schubringkräfte .....	41
2.3.6	Relativer Vergleich der Schubringkräfte .....	42

## Abkürzungen

Die Bedeutungen der verwendeten Abkürzungen in Formeln und Diagrammen sind wie folgt definiert:

$x$	...	Laufvariable zur Darstellung der Rohrlänge
$\sigma_{x,m}$	...	Längsnormalspannung im Rohr in Rohrwandmitte
$\sigma_{\varphi,m}$	...	Umfangsnormalspannung im Rohr in Rohrwandmitte
$u_{x,m}$	...	Längsverschiebung in Rohrwandmitte
$u_{r,m}$	...	Radialverschiebung in Rohrwandmitte
$e_{sr}$	...	Abstand zwischen den Schubringen
$t_{rohr}$	...	Rohrwanddicke
$t_{ring}$	...	Schubringdicke
$h_{ring}$	...	Schubringhöhe
$R$	...	Rohrradius bis Rohrwandmitte
$r_a$	...	Rohrradius außen
$d_a$	...	Rohraußendurchmesser
$d_c$	...	Betonmanteldicke
$V_F$	...	Verformungsmodul des Gebirges
$\mu$	...	Reibungskoeffizient
$C_{press}$	...	Anpressdruck in Kontaktfugen, normal zur Auflagerfläche
$p_{innen}$	...	Innendruck
$p_{deckel}$	...	Deckeldruck
$F_D$	...	Deckelkraft
$\Delta T$	...	Temperaturdifferenz
$\alpha_T$	...	linearer Temperaturexpansionskoeffizient für Baustahl, $\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-5}$
$C^*$	...	Federsteifigkeit für Schubringe im 1D-Stabmodell (in Rohrlängsrichtung wirkend)
$E$	...	Elastizitätsmodul für Baustahl, $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
$A_{rohr}$	...	Querschnittsfläche der Stahlpanzerung (Rohrquerschnitt)
$EA$	...	Stabsteifigkeit im 1D-Stabmodell, E-Modul Stahl * $A_{rohr}$
$\Delta l$	...	Längenänderung in Rohrlängsrichtung
$\Delta N$	...	Längskraftdifferenz an einem Schubring, ident zu übertragener Längskraft an das Gebirge
$\Delta n$	...	Längskraftdifferenz im Stahlrohr zwischen Schubringen



# 1 Grundlagen

## 1.1 Einleitung

Als Übergang zwischen dem Speichersee und dem Krafthaus stellt der Druckstollen einen wichtigen Bestandteil im Wasserkraftwerksbau für Hochdruckanlagen dar. Die Druckleitung ist im Betrieb mit Wasser ausgefüllt, wodurch sich ein hydrostatischer Wasserdruck als Innendruck aufbaut. Um eine Versickerung des Wassers in das Gebirge zu vermeiden, werden Druckstollen wasserdicht und druckfest verkleidet. Diese Verkleidung ist bei geringen Drücken aus Stahlbeton und bei hohen Drücken mit einer zusätzlichen Stahlpanzerung ausgeführt (vgl. Abbildung 1).

In dieser Arbeit wird ein Rohrquerschnitt betrachtet, welcher aus einem Stahlrohr mit Hinterfüllbeton und zusätzlicher Gebirgsbettung besteht. Um Längskräfte aus der Rohrleitung in das umgebende Gebirge einleiten zu können, werden sogenannte Schubringe auf das Stahlrohr geschweißt. Ein Schubring ist ein kreisförmiges Stahlblech, mit rechteckigem Querschnitt, welches außenseitig an das Stahlrohr angeschweißt wird (vgl. Abbildung 2). Namhaft dienen die Schubringe in erster Linie zur Übertragung von Längskräften in den Hinterfüllbeton und in weiterer Folge in das umliegende Gebirge. Des Weiteren wirken sie ebenfalls mittragend in Umfangsrichtung und reduzieren die Spannung im Stahlrohr in Umfangsrichtung.

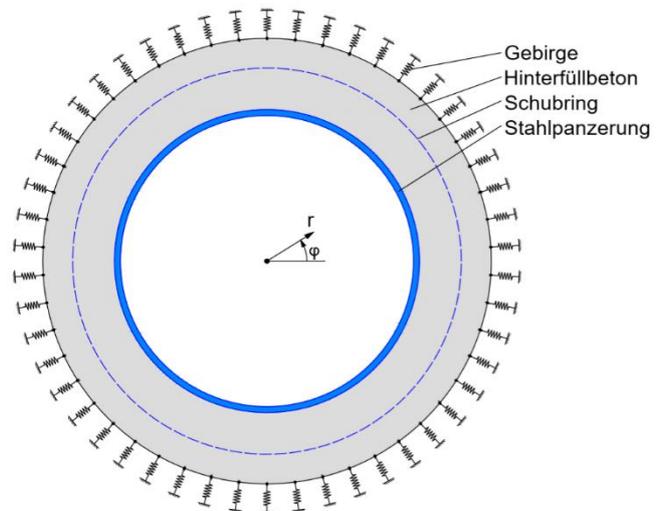


Abbildung 1 Querschnitt eines Druckschachtes mit Stahlpanzerung

## 1.2 Zielsetzung

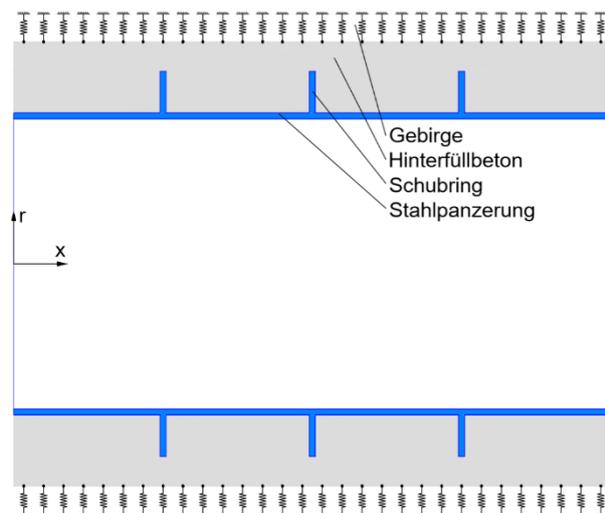


Abbildung 2 Druckschacht und Stahlpanzerung - Längsschnitt

Um Schubringe bemessen zu können, ist es essentiell die Tragfähigkeit dieser zu kennen, sowie, bei mehreren Schubringen hintereinander, die Längskraftaufteilung auf die einzelnen Schubringe zutreffend zu bestimmen. Mit dieser Thematik beschäftigt sich die Doktorarbeit von Ecker [2] und weiterführend die Masterarbeit von Farkas zum Thema „Realitätsnahe Schubringkräfte an Druckschachtpanzerungen infolge Innendruck und Temperatur“ [1]. Diese lieferte bereits interessante Ergebnisse über die Einzellastfälle Innendruck und Temperatur.

In der Fortsetzung werden in dieser Arbeit vor allem die Überlagerungen einzelner Lastfälle untersucht und gleiche Randbedingungen verwendet, um eine direkte Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Genau

genommen wird eine einseitig längsfeste Auflagerbedingung, welche in der Arbeit von Alexander Farkas als „Fall 1“ bezeichnet wird, näher untersucht. Dabei stellt das längsfest gelagerte Ende die zutreffende Randbedingung dar für das weiterführende Rohr ins Gebirge (vgl. Abbildung 3). Das statische Modell bildet also den Eintritt einer Rohrleitung in das Gebirge ab.



Die Abmessungen des untersuchten Rohrabschnittes bleiben in der gesamten Arbeit gleich. Dabei handelt es sich immer um ein 6 m langes Rohrstück mit einem Radius von  $R = 1,5 \text{ m}$ , bis zur Mitte der Rohrwanddicke. Die Schichtdicke des Betonmantels  $d_c$  ist immer 750 mm und der Abstand der Schubringe  $e_{sr}$  bleibt ebenfalls für alle Untersuchungen gleich, mit  $e_{sr} = R = 1,5 \text{ m}$  (siehe Abbildung 3).

Alle durchgeführten Untersuchungen und Vergleiche beschränken sich dabei auf drei unterschiedliche Schubringabmessungen und Rohrwanddicken, welche ebenfalls aus der Arbeit von Alexander Farkas (Kapitel 5, Ermittlung der Rohrwanddicken mit Hilfe des analytischen Modells nach Seeber) [1] übernommen worden sind. Durch die Annahme von drei unterschiedlichen Gebirgsbettungen nach Tabelle 1, ergeben sich unterschiedliche Wandstärken  $t_{rohr}$ . Die Rohrgeometrie ist dabei grundsätzlich darauf ausgelegt, dass bei einem Innendruck von  $p_{innen} = 9 \text{ N/mm}^2$  die Umfangsspannungen im Rohr 60% der Fließgrenze  $f_y$  entsprechen. Dabei ergeben sich entsprechende Blechstärken  $t_{rohr}$ , abhängig von der Gebirgssteifigkeit  $V_F$ .

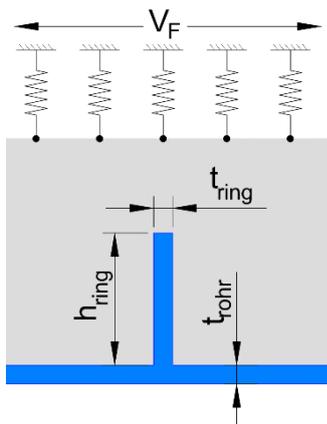


Abbildung 4 Schubringabmessungen

Mit dieser Blechstärke  $t_{rohr}$  wird auch die Schubringgeometrie definiert, wobei für die Dicke des Schubrings  $t_{ring}$  gilt:

$$t_{ring} = t_{rohr}$$

Die Seitenverhältnisse von Ringhöhe  $h_{ring}$  zu Ringdicke  $t_{ring}$  betragen immer:

$$\frac{h_{ring}}{t_{ring}} = 7$$

Die Geometrien, welche zum Vergleich herangezogen werden, sind in Tabelle 1 aufgelistet:

	$t_{ring}$ [mm]	$t_{rohr}$ [mm]	$h_{ring}$ [mm]	$V_F$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Geometrie 1	20	20	140	7000
Geometrie 2	45	45	315	4000
Geometrie 3	60	60	420	1000

Tabelle 1 Angabe der drei verwendeten Rohrgeometrien

Alle drei Rohrgeometrien sind also gegenüber Innendruck annähernd gleich tragfähig. Der Unterschied liegt darin, dass Geometrie 1 eine vergleichsweise dünne Blechstärke ( $t_{rohr} = 20 \text{ mm}$ ) aufweist, da ein größerer Teil Innendruckbelastung durch das steife Gebirge ( $V_F = 7000 \text{ N/mm}^2$ ) abgetragen wird. Dem steht als Geometrie 3 ein massives Rohr ( $t_{rohr} = 60 \text{ mm}$ ) und ein vergleichsweise weiches Gebirge ( $V_F = 1000 \text{ N/mm}^2$ ) gegenüber.

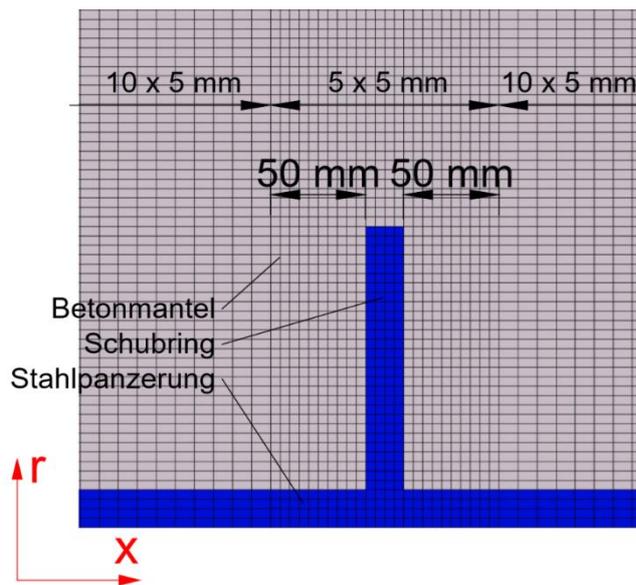
## 1.4 Erläuterung der gegenübergestellten Modelle

In diesem Kapitel werden die zwei unterschiedlichen Modelle – das Finite Elemente Modell, sowie das 1D-Stabmodell - erläutert. Des Weiteren wird die Umsetzung und Modellierung der einzelnen Lastfälle in den unterschiedlichen Modellen erläutert.

### 1.4.1 FEA (Finite Elemente Analyse) - Modell

Da ein definiertes Modell für die FEA bereits vorliegt, kann dieses je nach Bedarf ergänzt, adaptiert oder direkt verwendet werden. Eine umfangreiche Erläuterung findet sich in der Arbeit von Alexander Farkas [1] in Kapitel 3 „FE-Modell“ und Kapitel 4 „Materialmodell“. Nachfolgend werden die wichtigsten Rahmenbedingungen zusammengefasst.

#### 1.4.1.1 Netz



Sowohl Stahlrohr, als auch Betonmantel werden mit 10 x 5 mm großen axialsymmetrischen Elementen modelliert. Die Größe 10 mm gilt dabei immer in Längsrichtung (x) und 5 mm immer in Radialrichtung (r). 50 mm vor und nach den Schubringen, sind die Elemente auf eine Größe von 5 x 5 mm verfeinert (vgl. Abbildung 5).

Alle Simulationen werden mit CAX4R-Elementen ausgeführt:

C	...	Continuumselement
AX	...	axialsymmetrisch
4	...	4 Knoten
R	...	reduzierte Integration

Abbildung 5 FE-Netz im Bereich der Schubringe

#### 1.4.1.2 Kontaktfuge

Für alle Kontaktflächen gilt eine sogenannte „Hard Contact“ Bedingung. Das bedeutet, dass zur Kraftübertragung zwischen zwei Körpern, der geometrische Kontakt vorhanden sein und aufrechterhalten werden muss. Ein Ablösen der Körper untereinander ist dabei also auch möglich, aber kein gegenseitiges Eindringen. Bei der Kontaktfläche zwischen Stahl und Betonmantel können entsprechend des Anpressdrucks  $C_{press}$  und des Reibungskoeffizienten  $\mu$  Reibungskräfte aktiviert werden (vgl. Abbildung 3).

#### 1.4.1.3 Modellierung des Gebirges

Das Gebirge selbst wird nicht modelliert, nur dessen radiale Stützwirkung. Der Rand zwischen Betonmantel und Gebirge ist dabei radialsymmetrisch gefedert, entsprechend der Gebirgssteifigkeit  $V_F$ , gelagert und kann tangential keine Reibungskräfte aus dem Betonmantel übertragen.

#### 1.4.1.4 Materialmodell - Stahl

Zur Darstellung des Stahlrohrs und der Schubringe ist ein einfaches linear elastisches Materialmodell ausreichend, da die Simulation bei allen Lastfällen in allen Bereichen im elastischen Bereich bleibt. Das Stahlmodell kann daher mit nur 3 linearen Materialkonstanten dargestellt werden.

$$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2 \qquad \nu = 0,3 \qquad \alpha_t = 1,2 * 10^{-7} \text{ K}^{-1}$$

Für alle Stahlbauteile wird Baustahl der Festigkeitsklasse S355 gemäß EN 10025 verwendet.

#### 1.4.1.5 Materialmodell - Beton

Für das Betonmodell wird das in ABAQUS zur Verfügung gestellte Concrete Damaged Plasticity (CDP) Modell verwendet, welches auch bereits in der Arbeit von Alexander Farkas Verwendung fand und dort im Kapitel „4.2 Betonmodell in ABAQUS“ [1] bereits ausführlich beschrieben wurde.

Für den Betonmantel wird Beton der Festigkeitsklasse C25/30, gemäß den hinterlegten Materialeigenschaften in ABAQUS 6.14, verwendet.

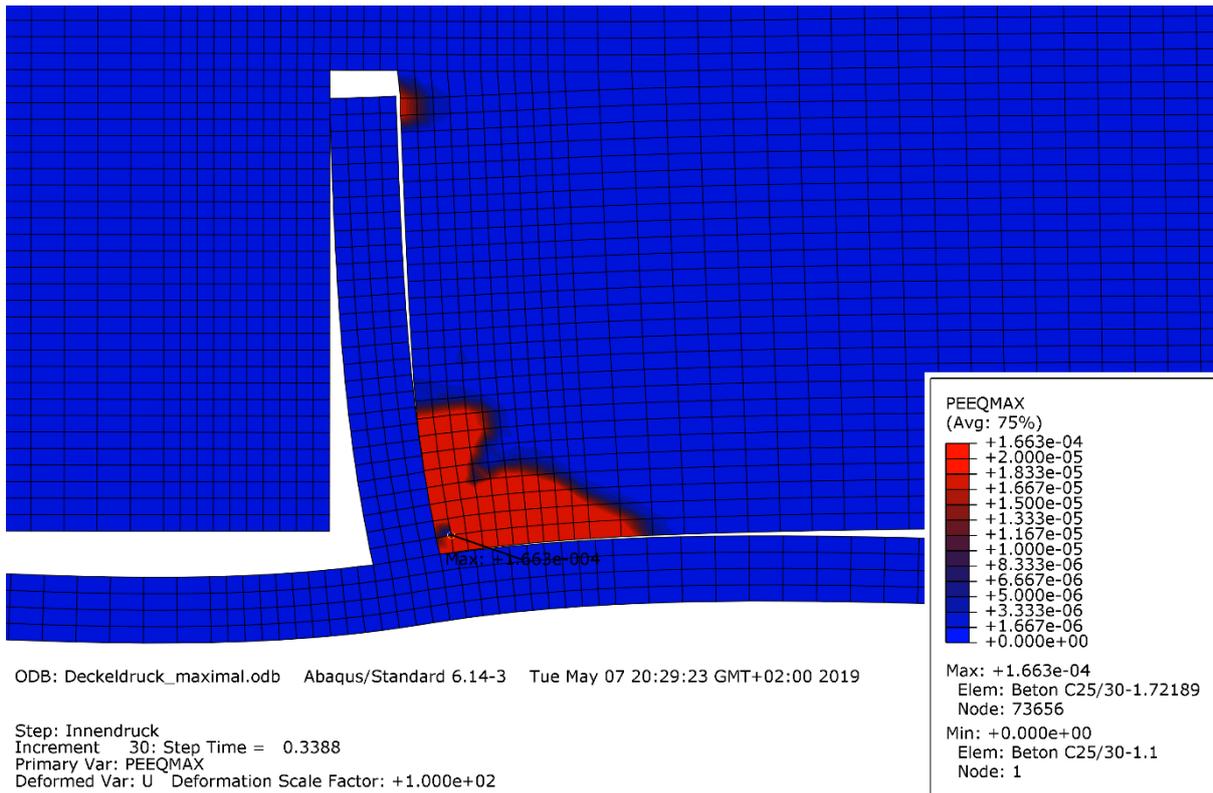


Abbildung 6 Plastische Dehnung im Betonmantel am Schubring 3 unter Lastfall Deckeldruck

Durch die Belastungssituation, welche durch den Deckeldruck-Lastfall (vgl. Abbildung 17) entsteht, entstehen im Bereich des Schubrings im Betonmantel große lokale plastische Dehnungen, welche sozusagen einen Riss im Beton darstellen. Dies zeigt Abbildung 6. Durch die großen plastischen Dehnungen und Verzerrungen der betroffenen Elemente kommt es zum Abbruch der numerischen Berechnung, bevor 100% der aufgetragenen Last erreicht werden. Zeitpunkt des Abbruchs ist die Entstehung eines zusätzlichen Risses am äußeren Ende des Schubrings (vgl. Abbildung 6).

Um der Abbruchbedingung bei gerissenem Beton jedoch endgültig entgegen zu wirken, wird im Gegensatz zum Modell von Alexander Farkas [1], in den weiterführenden Simulationen die Bruchenergie von 0,05 auf 0,5 Nmm/mm<sup>2</sup> erhöht (vgl. Abbildung 7). Für das Modell bedeutet das, dass eine erhöhte Bruchdehnung und Rissöffnung zugelassen wird, wodurch lokale Überlastungen besser auf umgebende Elemente übertragen werden können.

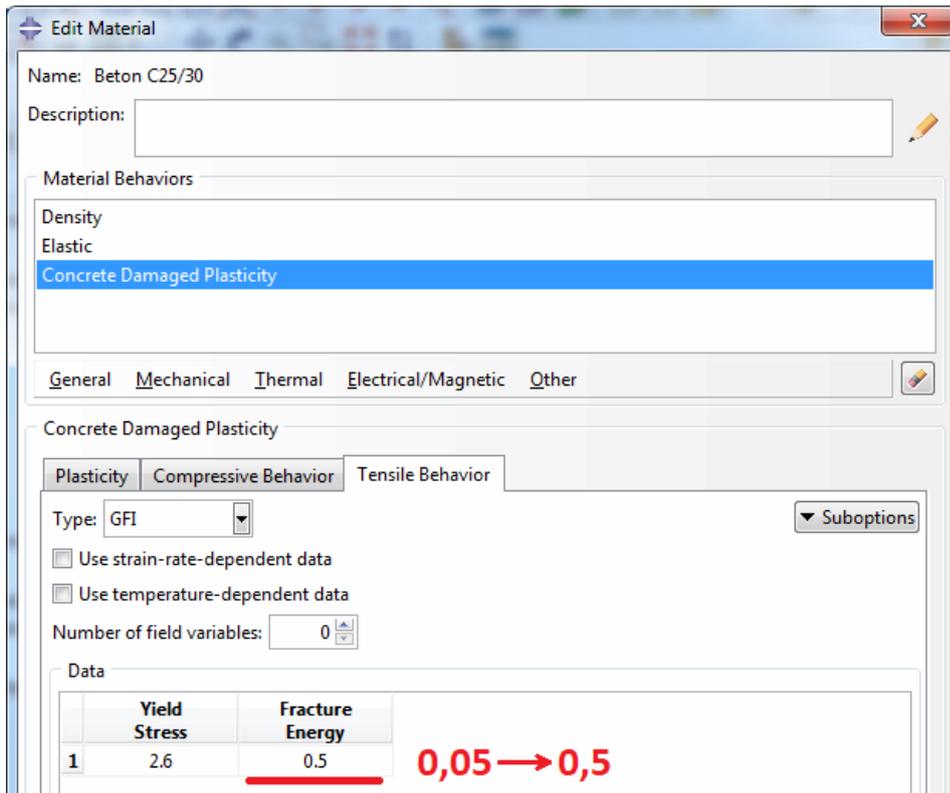


Abbildung 7 Concrete Damaged Plasticity Modell und Modifikation der Bruchenergie (Screenshot aus Abaqus 6.14)

#### 1.4.2 1D-Stabmodell

Eine umfangreiche Herleitung zur Ermittlung der Schubringsteifigkeiten für das 1D-Stabmodell befindet sich im Forschungsbericht „*Tragverhalten von Verankerungsringen (Schubringen) infolge Rohrlängsbeanspruchungen*“. [2]

Anbei folgt eine kurze Zusammenfassung der Vorgehensweise zur Ermittlung der Federsteifigkeiten der Schubringe, um diese im 1D-Stabmodell darstellen zu können. Die Vorgehensweise wird dabei anhand von Geometrie 1 (siehe Tabelle 1) erläutert.

Grundsätzlich basiert die Ermittlung der Schubringsteifigkeiten, in Rohrlängsrichtung wirkend, auf der Radialsteifigkeit des Rings mit mitwirkendem Rohr (vgl. Abbildung 8).

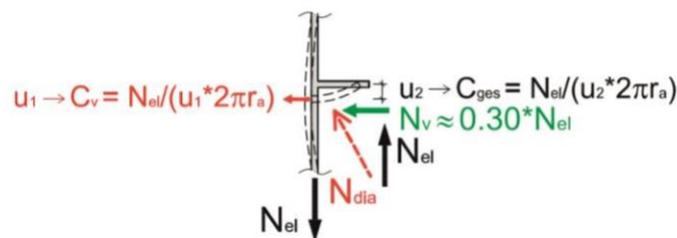
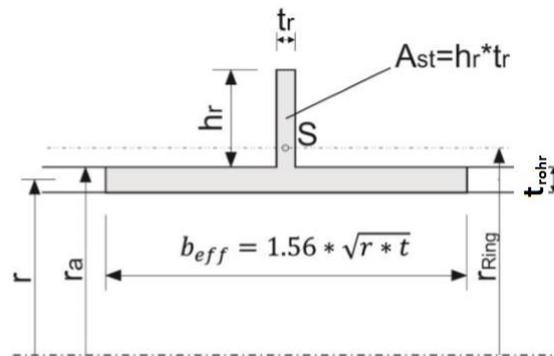


Abbildung 8 Schubringsteifigkeit aus Forschungsbericht [2], Seite 166

Zur Umrechnung in eine Schubringsteifigkeit wird auf dieser Basis der betroffene Querschnitt ermittelt (vgl. Abbildung 9).



$$C_{Ring} = \frac{E * (A_{st} + b_{eff} * t)}{r_{Ring}^2}$$

vereinfacht:  $r_{Ring} = r_a$

Abbildung 9 Ermittlung der Radialsteifigkeit des Schubrings, aus dem Forschungsbericht [2] Seite 166

Die mitwirkende Breite  $b_{eff}$  (siehe Abbildung 9) des Rohres zur Ermittlung der Radialsteifigkeit  $C_{ring}$ , kann nun mit Hilfe von Gleichung (1) ermittelt werden. Nachfolgend erfolgt die Berechnung für Geometrie 1.

$$b_{eff} = 1,56 * \sqrt{r * t_{rohr}} \quad \text{Gl. (1)}$$

$$b_{eff} = 1,56 * \sqrt{1500 * 20} = 270 \text{ mm}$$

In weiterer Folge kann der Gesamtquerschnitt des T-Stücks mit Gleichung (2) ermittelt werden.

$$A_{ring} = h_{ring} * t_{ring} + b_{eff} * t_{rohr} \quad \text{Gl. (2)}$$

$$A_{ring} = 140 * 20 + 270 * 20 = 8204 \text{ mm}^2$$

Mit Gleichung (3) kann nun die Radialsteifigkeit mit mitwirkendem Rohrteil berechnet werden.

$$C_{ring} = \frac{E * A_{ring}}{r_a^2} \quad \text{Gl. (3)}$$

$$C_{ring} = \frac{210\,000 * 8204}{1510^2} = 756 \text{ N/mm}^2$$

Im elastischen Bereich kann die Längssteifigkeit  $C_{ges}$  ausreichend genau über einen linearen Zusammenhang mit  $C_{ring}$  berechnet werden (vgl. Gleichung (6)). Der Beiwert  $K_{tr}$  ist dabei abhängig von der Rohrdicke  $t_{rohr}$  und wird mit Gleichung (4) oder Gleichung (5) ermittelt.

$$K_{tr} = 2,1 + \frac{0,8}{20} * (t_{rohr} - 20) \quad [\text{kN/mm}^2] \quad \text{für } 20 \leq t_{rohr} < 40 \text{ mm} \quad \text{Gl. (4)}$$

$$K_{tr} = 2,9 \text{ kN/mm}^2 \quad \text{für } t_{rohr} \geq 40 \text{ mm} \quad \text{Gl. (5)}$$

$$K_{tr} = 2,1 + \frac{0,8}{20} * (20 - 20) = 2,1 \text{ kN/mm}^2 \cong 2100 \text{ N/mm}^2$$

$$C_{ges} = 0,28 * C_{ring} + K_{tr} \quad \text{Gl. (6)}$$

$$C_{ges} = 0,28 * 756 + 2100 = 2312 \text{ N/mm}^2$$

Die Längssteifigkeit  $C_{ges}$  kann nun einfach entlang des Rohrumfangs mit Gleichung (8) in eine eindimensionale Federsteifigkeit  $C^*$  umgerechnet werden.

$$d_a = 2 * r + t_{ring} \quad \text{Gl. ( 7 )}$$

$$d_a = 2 * 1500 + 20 = 3020 \text{ mm}$$

$$C^* = C_{ges} * d_a * \pi \quad \text{Gl. ( 8 )}$$

$$C^* = 2312 * 3020 * \pi = 21\,931\,250 \text{ N/mm}$$

Mithilfe von  $C^*$  für die Federsteifigkeit der einzelnen Schubringe und der Größe  $EA$  für die Dehnsteifigkeit des Stahlrohrs zwischen den Schubringen, kann nun das gesamte 1D-Stabmodell beschrieben werden (vgl. Abbildung 10).

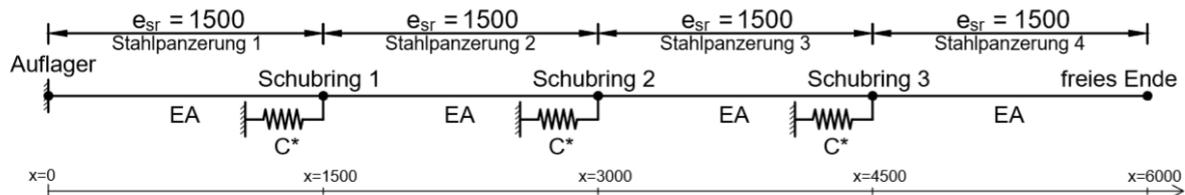


Abbildung 10 1D-Stabmodell Grundsystem; Maße in mm

Für die Dehnsteifigkeit der Stäbe, wird der tatsächliche Stahlquerschnitt der Stahlpanzerung verwendet. Die in Tabelle 1 angegebenen Rohrgeometrien können nun in Federsteifigkeiten laut Tabelle 2 umgerechnet.

	Fläche Stahlrohr	Dehnsteifigkeit Rohr	Stabsteifigkeit zwischen Schubringen	Federsteifigkeit Schubring
	$A_{rohr}$	$E * A_{rohr}$	$\frac{E * A_{rohr}}{e_{sr}}$	$C^*$
	[mm <sup>2</sup> ]	[MN]	[N/mm]	[N/mm]
Geometrie 1	188 496	39 584	26 389 378	21 931 250
Geometrie 2	424 115	89 064	59 376 101	35 607 323
Geometrie 3	565 487	118 752	79 168 135	40 744 091

Tabelle 2 Steifigkeiten im 1D-Stabmodell

## 1.5 Untersuchte Lastfälle

Beide Modelle (1D-Stabmodell und FE-Modell) werden hinsichtlich ihrer Ergebnisse für fünf verschiedene Lastfälle und deren Überlagerungen verglichen, um die Treffsicherheit des 1D-Stabmodells verifizieren zu können. Die untersuchten Lastfälle sind:

- Rohrdruck: Innen- oder Außendruck (Betriebsdruck bzw. Bergwasserdruck bei Rohrentleerung)
- Temperatur: Erwärmung oder Abkühlung
- Längskraft: Deckeldruck

Dieses Kapitel dient einer kurzen Erläuterung, wie die verschiedenen Lastfälle auf beide Systeme aufgebracht werden.

### 1.5.1 Rohrdruck: Innen- oder Außendruck

In der FE-Analyse werden hydraulisch statische Drucklastfälle als Flächenlast aufgebracht. Der Innendrucklastfall wird dabei direkt auf die Innenkante der Rohrpanzerung aufgebracht. Der Außendruck wird entlang der Rohraußenkante in der Kontaktfuge zwischen Stahlbauteil und Betonmantel aufgebracht (vgl. Abbildung 11).

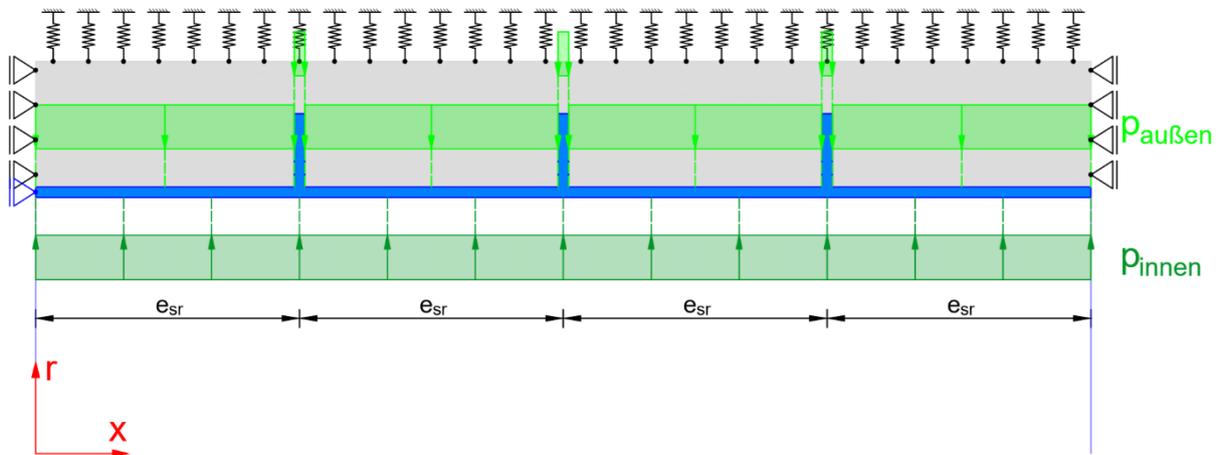


Abbildung 11 Lage von Innen- und Außendruck in der FEA

Da im 1D-Stabmodell der Innendruck nicht direkt aufgebracht werden kann, erfolgt eine Umrechnung in eine gleichwertige Längenänderung  $\Delta l$ .

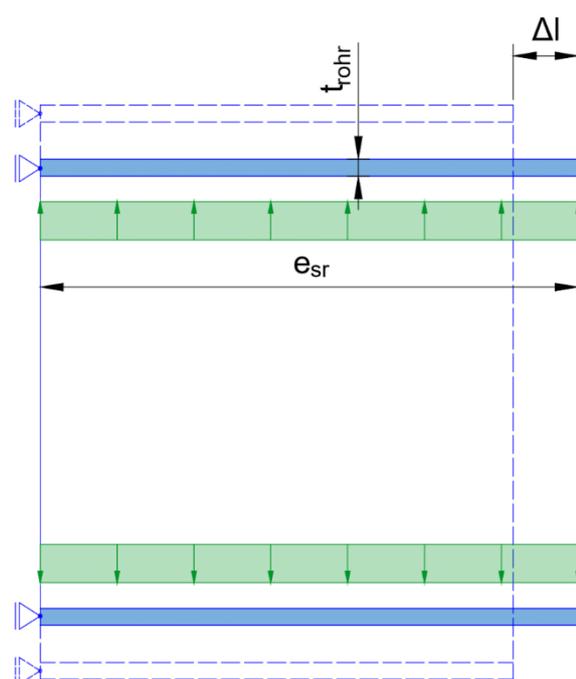


Abbildung 12 Querkontraktion durch Innendruck führt zu Rohrverkürzung

Die aufgetragene Längenänderung  $\Delta l$  zwischen zwei Schubringen entspricht dabei der gleichen Längenänderung eines Rohrstücks, welche das Rohr durch die Umfangsspannung  $\sigma_\varphi$  (Ermittlung aus der FE-Analyse) und der daraus folgenden Querkontraktion in Längsrichtung erfahren würde, ohne jegliche Längsbehinderung (vgl. Abbildung 12).

Exemplarisch wird die Umrechnung anhand von Geometrie 1 und einer Innendruckbelastung von  $p_{\text{innen}} = 9 \text{ N/mm}^2$ , mithilfe von Gleichung (9) vorgeführt. Die abgelesene Umfangsspannung aus der FEA entspricht in diesem Fall:

$$\sigma_{\varphi, \text{mittel}} = 225,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta l = e_{sr} * \frac{\nu * \sigma_{\varphi, \text{mittel}}}{E} \quad \text{Gl. (9)}$$

$$\Delta l = 1500 * \frac{0,3 * 225,5}{210\,000} = 0,48 \text{ mm}$$

Die nun ermittelte Stabverkürzung von  $\Delta l = 0,48 \text{ mm}$  dient nun dazu, den Drucklastfall gleichwertig im 1D-Stabmodell darstellen zu können (vgl. Abbildung 13).

Dabei gilt:  $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l_3 = \Delta l_4 = 0,48 \text{ mm}$

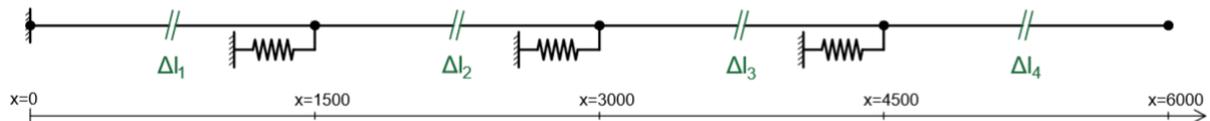


Abbildung 13 Wiedergabe von Innen- oder Außendruckbelastung im 1D-Stabmodell, durch Stablängenänderungen  $\Delta l_i$  zwischen den Schubringen. Maße in mm

### 1.5.2 Temperatur: Erwärmung oder Abkühlung

Die Temperaturbelastungen  $\Delta T$  werden sowohl in der FE-Analyse als auch im Stabmodell gleich modelliert. Der Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha_T$  für Stahl bleibt in beiden Modellen gleich, mit  $\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

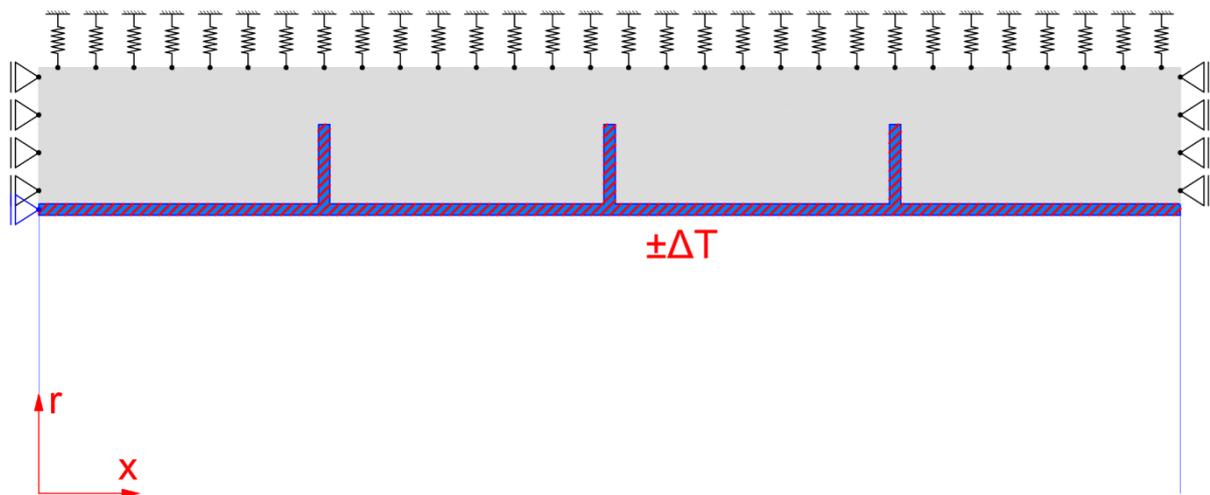


Abbildung 14 Lastfall Temperatur in der FEA

In der FEA wird dabei immer der gesamte Stahlkörper (Panzerung und Schubringe) einer Temperaturdifferenz unterzogen (vgl. Abbildung 14). Weitere Wärmeübergänge werden aufgrund der geringeren Wärmeleitung von Beton nicht angenommen und die Temperatur des Betonmantels bleibt daher in der Simulation unverändert.

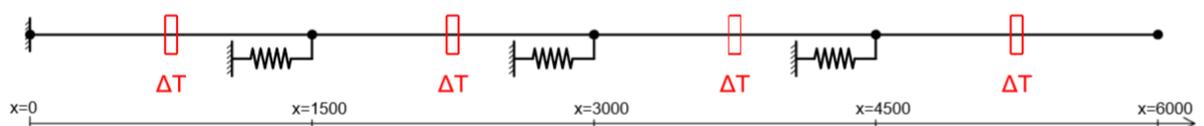


Abbildung 15 Lastfall Temperatur im 1D-Stabmodell

Abhängig vom linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha_T$ , bewirkt die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  bei der FE-Analyse eine räumliche Volumsänderung des Stahlkörpers. Im 1D-Stabmodell kann die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  einfach linear in eine gleichwertige Längenänderung  $\Delta l_T$  zwischen zwei Schubringen umgerechnet werden (vgl. Gleichung (10)).

$$\Delta l_T = \alpha_T * \Delta T * e_{sr} \quad \text{Gl. ( 10 )}$$

### 1.5.3 Deckeldruck

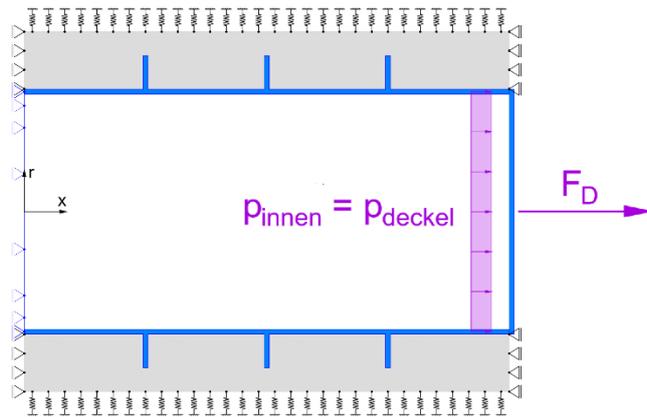


Abbildung 16 dhdh

Der Deckeldruck  $p_{\text{deckel}}$  wird entsprechend der Rohrfläche  $A_{\text{rohr}}$  direkt in eine Längskraft  $F_D$  umgerechnet (vgl. Gleichung (11) und Gleichung (12)).

$$A_{\text{rohr}} = R^2 * \pi \quad \text{Gl. ( 11 )}$$

$$F_D = p_{\text{deckel}} * A_{\text{rohr}} \quad \text{Gl. ( 12 )}$$

$$F_D = 3,3 * 1500^2 * \pi = 23,3 \text{ MN}$$

Die Berechnung der Deckelkraft  $F_D$  ist hierbei exemplarisch mit einem Deckeldruck von  $p_{\text{deckel}} = 3,3 \text{ N/mm}^2$  vorgeführt und entspricht der maximalen Deckeldruckbelastung  $N_{\text{rd,ges}}$  für Geometrie 1, welche in Kapitel 4.1.1 ermittelt wird.

In der FEA wird der Deckel selbst nicht mit simuliert. Stellvertretend für diesen, wird die ermittelte Deckelkraft  $F_D$  über den Umfang der Stahlpanzerung verteilt als Linienlast  $p_D$  aufgebracht und die Simulation kann ohne tatsächlichen Deckel durchgeführt werden (vgl. Abbildung 17).

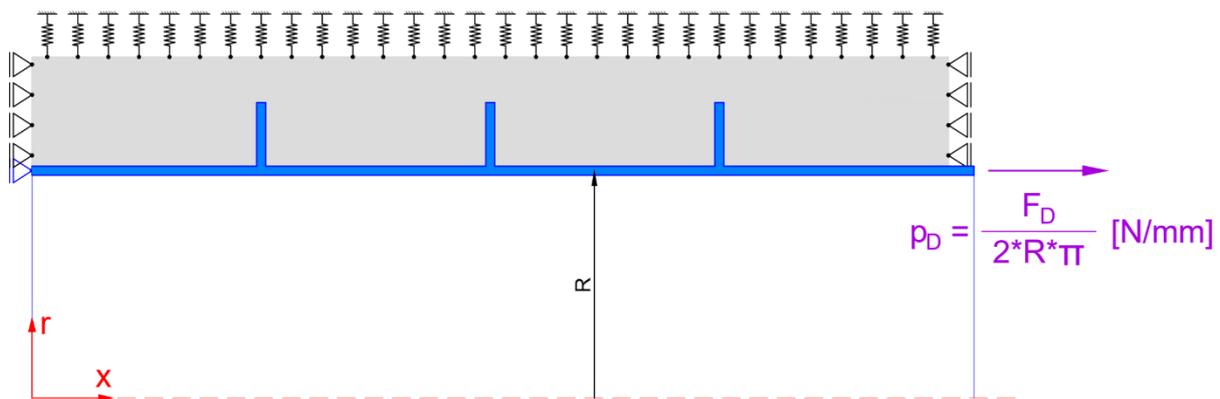


Abbildung 17 Aufbringen des Deckeldrucks in der FEA

Die bereits ermittelte Deckelkraft  $F_D$  kann im 1D-Stabmodell direkt als Einzellast am Stabende angesetzt werden (vgl. Abbildung 18).

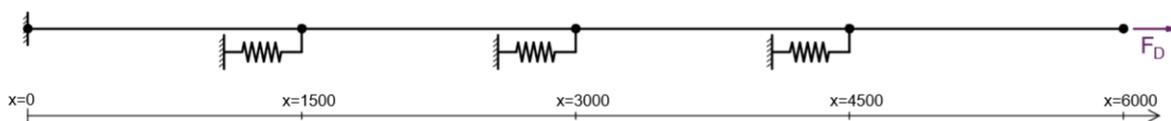


Abbildung 18 Deckeldruck im 1D-Stabmodell

## 1.6 Auslesen der Ergebnisse

Die Längs- und Umfangsspannungen,  $\sigma_{x,m}$  und  $\sigma_{\varphi,m}$ , sowie die Längs- und Radialverschiebungen,  $u_{x,m}$  und  $u_{r,m}$  der Stahlpanzerung werden in dessen Mitte abgelesen. Wie bereits im Kapitel 1.4.1 erwähnt, liegen alle Ergebnisse durch die verwendeten Elementgrößen mit einer Auflösung von 10 mm vor, wobei die Auflösung um die Schubringe auf 5 mm verfeinert wurde.

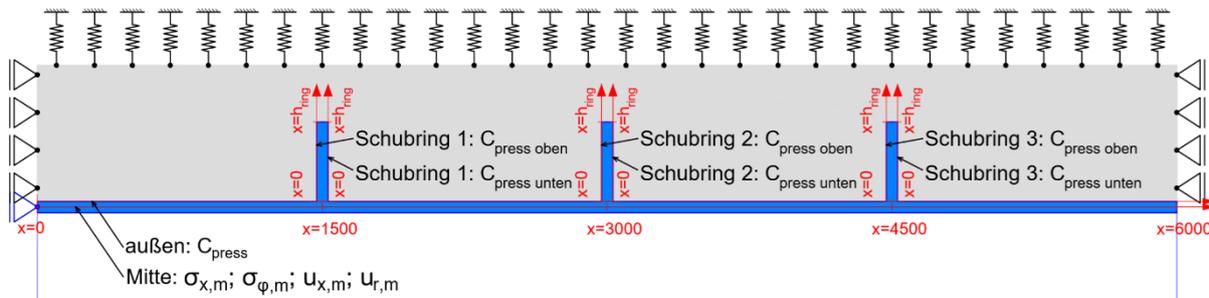


Abbildung 19 Lage der ausgelesenen Ergebnisse aus der FEA

Die für das 1D-Stabmodell analytisch hergeleiteten Federsteifigkeiten (vgl. Abschnitt 1.4.2) beruhen auf einer dreieckigen Pressungsverteilung am Schubring, welche in Kapitel 2 näher erläutert wird. Um die FEA auch an diesen Stellen mit rückgerechneter Pressungsverteilung aus dem 1D-Stabmodell vergleichen zu können, werden die Pressungsverteilungen aufgrund von Längskräften auch direkt an den Schubringen der FEA abgelesen. Die zum festen Auflager gerichtete Seite der Schubringe (in Abbildung 19 links), wird dabei immer als „oben“ bezeichnet und die jeweils Gegenüberliegende als „unten“.

In Kapitel 3 wird auch das Verhalten der Reibung zwischen Stahlpanzerung und Betonmantel näher untersucht, weshalb hierfür an der Außenkante der Stahlpanzerung ebenfalls eine Kontaktspannung abgelesen wird.

Alle Auflagerkräfte des 1D-Stabmodells und die ausgewerteten Kräfte der FEA werden laut Vorzeichenkonvention des Freischnitts in Abbildung 20 betrachtet.

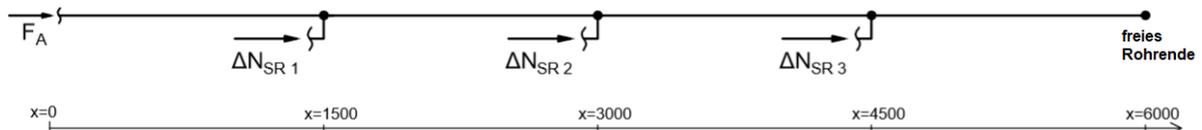


Abbildung 20 Freischnitt am 1D-Stabmodell und Vorzeichenregel für die Schubringkräfte  $\Delta N_{SR i}$

## 2 Vergleich der Grundlastfälle – Innendruck, Temperaturänderung und Deckeldruck

### 2.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die drei verschiedenen Rohrgeometrien, welche im Kapitel 1.3 in Tabelle 1 zusammengefasst wurden, anhand von alleinig wirkenden Lastfällen untersucht. Für die Kontaktfuge zwischen Stahlrohr und Betonmantel, wird dabei für alle Berechnungen in diesem Kapitel keine Reibung berücksichtigt (vgl. Abbildung 3).

Die in Kapitel 1.4 präsentierten Modelle – die Finite Elemente Analyse (kurz FEA) und das 1D-Stabmodell – werden dabei anhand folgender alleinig wirkender Lastfälle verglichen (vgl. Kapitel 1.5):

- Innendruck  $p_{\text{innen}} = 9 \text{ N/mm}^2$
- Deckeldruck  $p_{\text{deckel}} = 1 \text{ N/mm}^2$
- Temperatur  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$
- Temperatur  $\Delta T = +10^\circ\text{C}$

Für den Lastfall Innendruck  $p_{\text{innen}} = 9 \text{ N/mm}^2$  und Temperatur  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$ , konnten bereits ausgearbeitete Daten der FEA aus der Masterarbeit von Alexander Farkas [1] verwendet werden. Die Lastfälle für Innendruck wurden in dieser, mit den Kurzbezeichnungen „A. 3“, „A. 6“ und „A. 9“ [1] geführt. Die Daten für die Temperaturverringering wurden als „A. 2.1“, „A. 2.5“ und „A. 2.9“ [1] bezeichnet.

Der Lastfall Innendruck  $p_{\text{innen}} = 9 \text{ N/mm}^2$  führt dabei zu einer ähnlichen Ausnutzung der drei Rohrgeometrien in Umfangsrichtung ( $\varphi$ ) und ist in Kapitel 1.3 begründet. Die gewählte Temperaturdifferenz  $\Delta T = \pm 10^\circ\text{C}$  entspricht dabei üblichen Temperaturschwankungen im Stahlwasserbau. Da ein Deckeldruck von  $p_{\text{deckel}} = 9 \text{ N/mm}^2$  nicht von allen Rohrquerschnitten aufgenommen werden könnte, wird dieser Lastfall vorerst einheitlich mit  $p_{\text{deckel}} = 1 \text{ N/mm}^2$  untersucht.

Der Vergleich der zwei Modelle - FEA und 1D-Stab - erfolgt in drei Abschnitten, wobei in jedem Abschnitt eine der drei Rohrgeometrien (vgl. Tabelle 1) untersucht wird. Die Präsentation der Ergebnisse erfolgt dabei in den folgenden Kapiteln

- 2.2 Grundlastfälle mit Geometrie 1
- 2.3 Grundlastfälle mit Geometrie 2
- 2.4 Grundlastfälle mit Geometrie 3

Jedes Kapitel enthält dabei:

- Eine plakative Darstellung der ausgewerteten Ergebnisse, über die Längsnormalkraftaufteilung  $\Delta N_i$  in Form von Balkendiagrammen, anhand ihrer absoluten und relativen Aufteilungen.
- Darstellung der Umfangsspannungen  $\sigma_{\varphi,m}$  aus der FEA.
- Darstellung der Längsspannungen  $\sigma_{x,m}$  aus der FEA, mit direktem Vergleich zum 1D-Stabmodell.
- Tabellarische Zusammenfassung der ausgewerteten Ergebnisse aus FEA und 1D-Stabmodell, über die Längsnormalkräfte  $\Delta N$
- Tabellarische Zusammenfassung der Längsverschiebungen  $u_{x,m}$  aus beiden Modellen.
- Darstellung aller Pressungsverteilungen  $C_{\text{press}}$  aus der FEA an den Schubringen und Vergleich mit der theoretisch angenommenen Pressungsverteilung, auf welcher die Federsteifigkeit  $C^*$  des 1D-Stabmodells beruht.

Die genaue Herangehensweise für die Darstellung der Ergebnisse, ist exemplarisch in Kapitel 2.2 anhand von Geometrie 1 erläutert und erfolgt in weiterer Folge gleich für Geometrie 2 und Geometrie 3.

## 2.2 Grundlastfälle mit Geometrie 1

### 2.2.1 Aufteilung der Normalkräfte $\Delta N$ auf die einzelnen Schubringe

Für alle Geometrien und Randbedingungen werden am Beginn des jeweiligen Kapitels die einzelnen Schubringkräfte  $\Delta N_i$  in absoluten Werten in MN als Balkendiagramm präsentiert. Die Beschriftung des Balkendiagramms stellt dabei die einzelnen Schubringkräfte  $\Delta N_i$  direkt mit deren Summe gegenüber (vgl. Abbildung 21, Beschriftung  $\Delta N_i/\Sigma\Delta N_i$ ). Die Ermittlung der Ergebnisse wird im Verlauf dieses Kapitels erläutert.

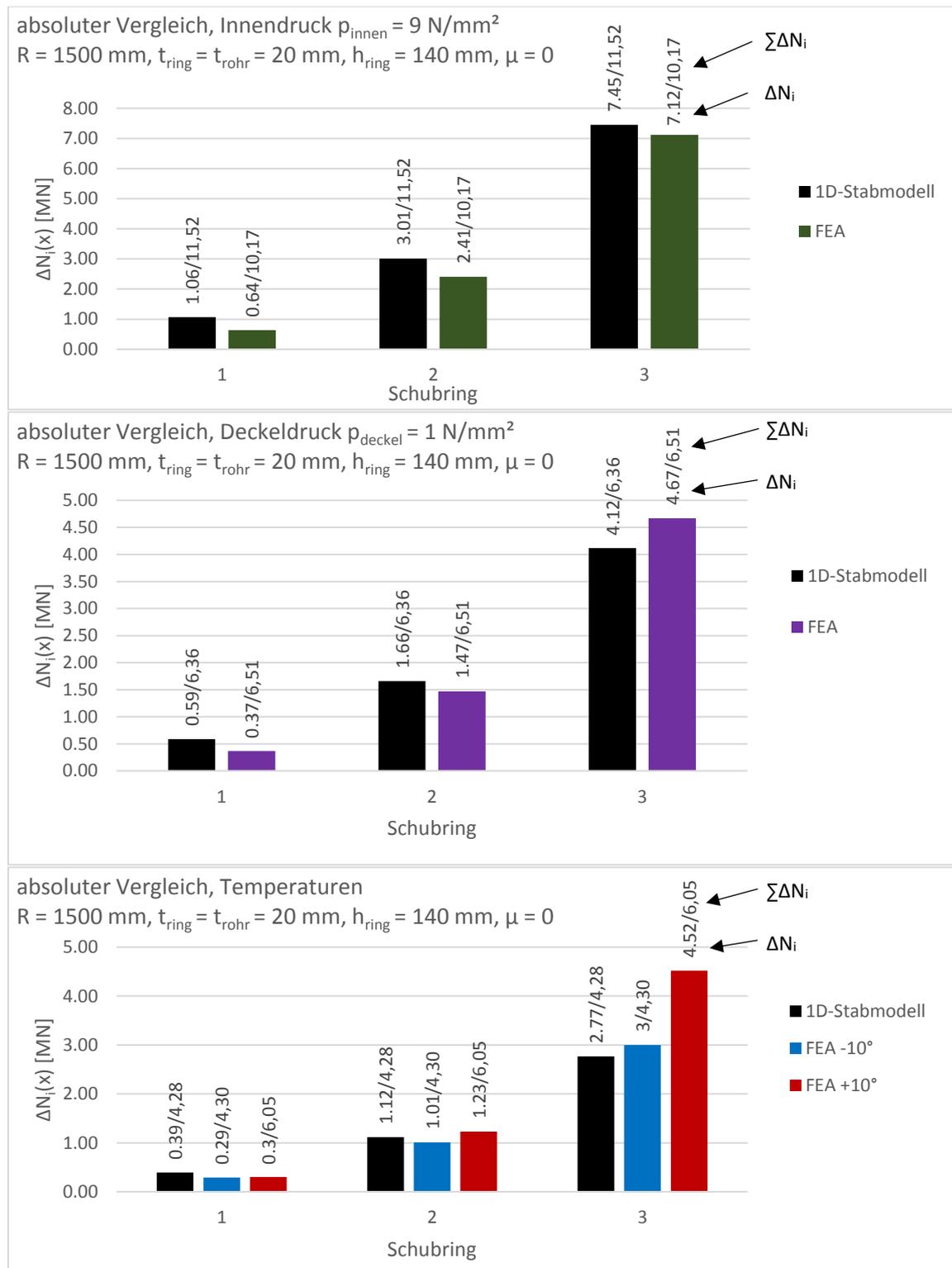


Abbildung 21 Geometrie 1,  $\mu=0$ : absolute Aufteilung der Normalkräfte auf die einzelnen Schubringe

In der anschließenden Abbildung 22 werden die ermittelten Ergebnisse anhand ihrer relativen Aufteilung auf die drei Schubringe verglichen (Summe  $\sum \Delta N_i = 100\%$ ). Die relative Aufteilung des 1D-Stabmodells bleibt für alle Lastfälle gleich, da im einfachen Federmodell nur lineare Zusammenhänge dargestellt werden können und die Federsteifigkeit  $C^*$  für alle Schubringe gleich groß ist. Außerdem ist in allen Lastfällen die Belastung zwischen den Schubringen konstant.

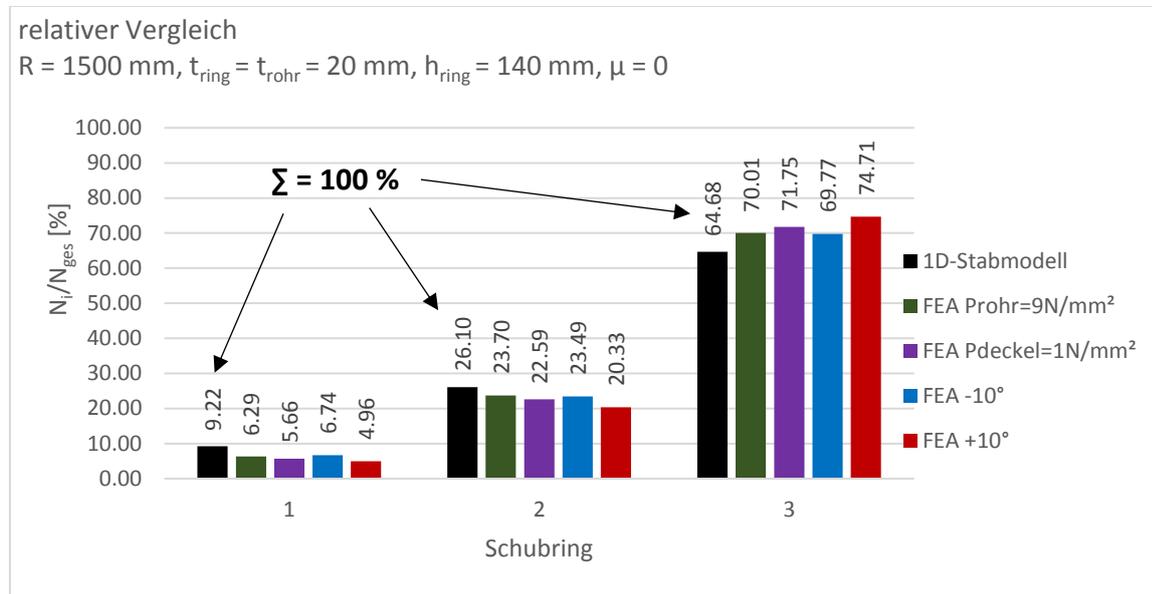


Abbildung 22 Geometrie 1,  $\mu=0$ : relative Aufteilung der Normalkräfte auf die einzelnen Schubringe

Bereits bei Geometrie 1 ist ersichtlich, dass beim Lastfall der Abkühlung um  $-10^\circ\text{C}$  eine sehr gute Übereinstimmung mit dem 1D-Stabmodell gefunden werden kann. Im Gegensatz dazu gibt das gleiche Modell, für den Lastfall einer Erwärmung um  $+10^\circ\text{C}$ , eine deutliche unterschiedliche absolute Lastaufnahme und auch unterschiedliche relative Lastverteilungen an (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 22).

Der Lastfall Innendruck  $p_{\text{innen}} = 9 \text{ N/mm}^2$  wird sich durch dessen ähnliche Wirkungsweise, auf die radiale Ausdehnung des Rohrs, wie der Lastfall der Temperaturerhöhung  $\Delta T = +10^\circ\text{C}$ , dargestellt in Kapitel 2.3 und 2.4 für Geometrie 2 und 3, noch als ähnlich unterschiedlich herausstellen. Für Geometrie 1 kann für den Lastfall Innendruck  $p_{\text{innen}} = 9 \text{ N/mm}^2$  noch eine gute Übereinstimmung zwischen den Modellen gefunden werden (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 22).

Das 1D-Stabmodell unterschätzt, für den Lastfall mit reinem Deckeldruck  $p_{\text{deckel}} = 1 \text{ N/mm}^2$ , die Belastung des erstbelasteten Schubrings (Schubring 3) immer knapp (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 22). Dies kann für das 1D-Stabmodell durchaus als ausreichend konservatives Ergebnis bezeichnet werden, da sich sowohl realitätsnahe Lastüberlagerungen, als auch eine Berücksichtigung von Reibung zwischen Stahlkörper und Betonmantel, außerordentlich positiv auf diesen Lastfall auswirken, wie sich durch die Lastüberlagerungen in Kapitel 4, Kapitel 5 und den folgenden Anhängen 1-3 herausstellen wird.

## 2.2.2 Vergleich der Umfangsspannungen $\sigma_{\varphi, m}$

In diesem Kapitel werden die vorhandenen Umfangsspannungen  $\sigma_{\varphi, m}$  in Blechmitte (vgl. Kapitel 1.6) der Stahlpanzerung dargestellt und verglichen. Da im Zuge dieser Arbeit das Verhalten der Schubringe in Längsrichtung untersucht werden soll, wird beim 1D-Stab auf eine separate Berechnung der vorhandenen Umfangsspannung verzichtet. Um in dieser Hinsicht möglichst präzise zu sein, wird für den Lastfall mit Innendruck, die durchschnittliche Umfangsspannung direkt aus der FEA ausgelesen und, wie bereits in den Grundlagen in Kapitel 1.5.1 beschrieben, als vorhandene Verkürzung in Längsrichtung  $\Delta l$  für das 1D-Stabmodell umgerechnet. Ausgangspunkt dieser Berechnung stellt also der ermittelte Mittelwert (Mittelwert aus  $x = 2250 \text{ mm}$  und  $x = 3750 \text{ mm}$ ), wie beispielsweise in Abbildung 23 strichliert dargestellt, dar.

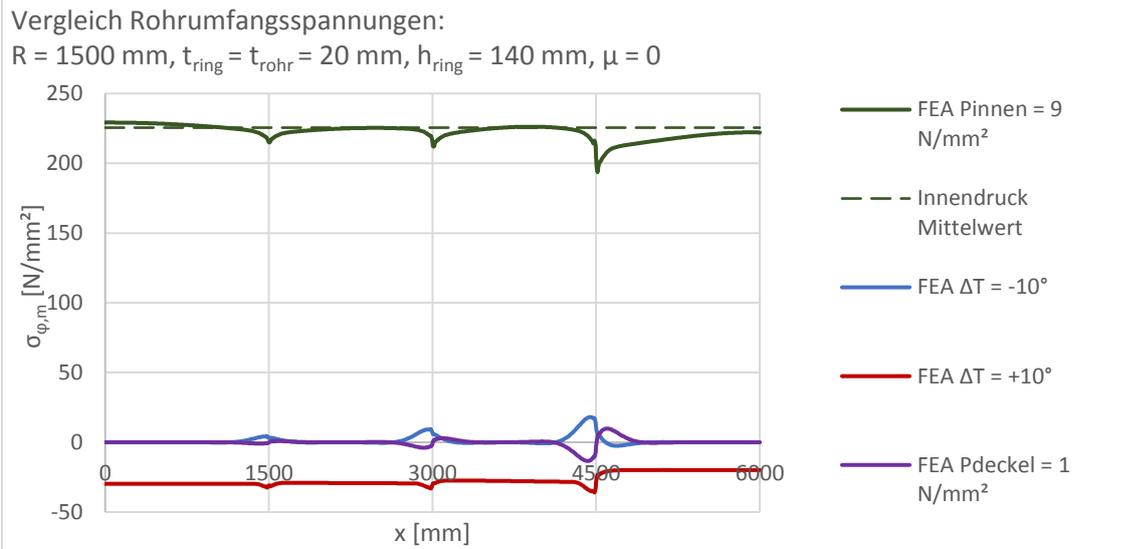


Abbildung 23 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Umfangsspannungen infolge aller Lastfälle

Gut sichtbar ist hier vor allem die unterschiedliche Wirkung von Erwärmung und Abkühlung  $\Delta T$ . Anhand der Umfangsspannung  $\sigma_{\varphi,m}$  ist ersichtlich, dass die Erwärmung und deren einhergehende Ausdehnung in radialer Richtung ( $r$ ) durch den Betonmantel behindert wird und entsprechende Zwangsspannungen in Umfangsrichtung ( $\varphi$ ) entstehen. Bei der Abkühlung hingegen kann sich das Rohr ungehindert vom Betonmantel ablösen und es entstehen keine weiteren Umfangsspannungen (vgl. Abbildung 23).

### 2.2.3 Vergleich der Längsspannungen $\sigma_{x,m}$

Die vorhandenen Normalkräfte können am jeweiligen 1D-Stabmodell abgelesen werden. Mit der dort genutzten Fläche  $A_{\text{rohr}}$  kann auf eine Spannung umgerechnet werden, welche mit den Ergebnissen der ausgelesenen Rohrlängsspannungen in Blechmitte  $\sigma_{x,m}$  aus der FEA direkt verglichen werden kann (vgl. Abbildung 24).

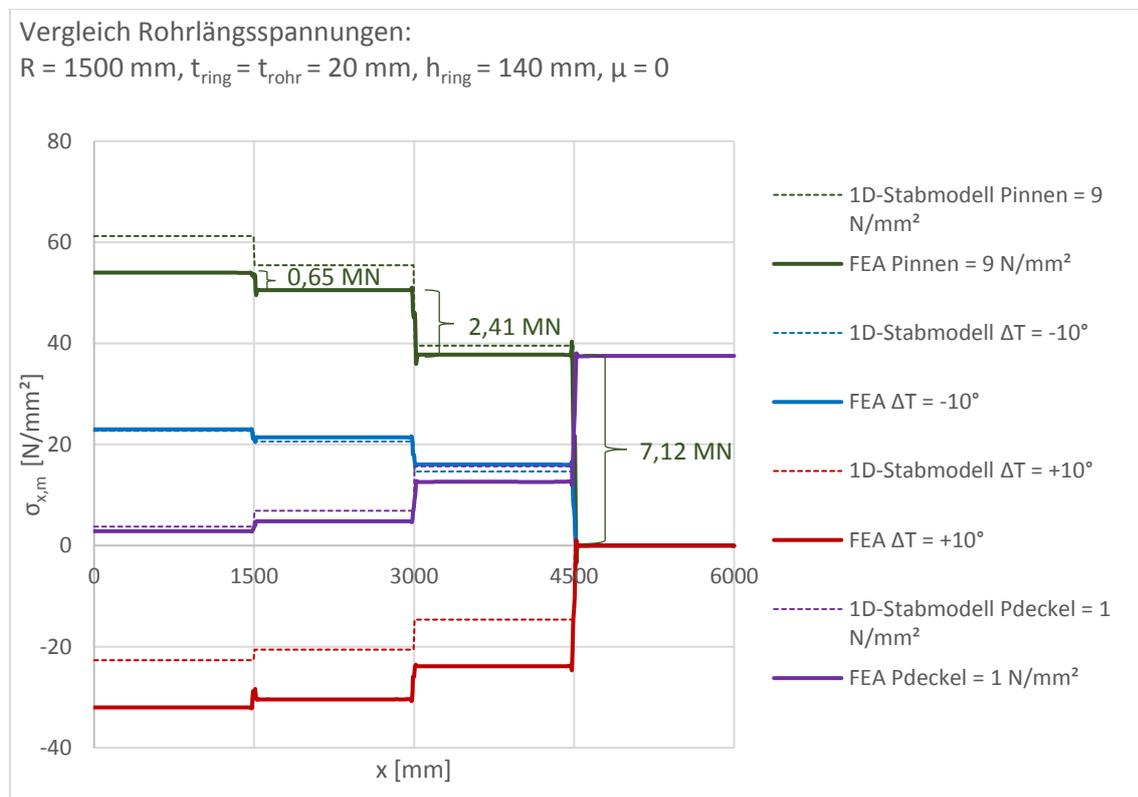


Abbildung 24 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Längsspannungen infolge aller Lastfälle

In diesem Fall ist zu erkennen, wie präzise sich das 1D-Stabmodell mit der FEA deckt, solange die Stahlpanzerungen, zwischen den Schubringen, nicht vollflächig in den Betonmantel gedrückt werden. Wenn die Zwangswirkung durch Innendruck oder Erwärmung verglichen wird, beginnen die FEA Ergebnisse vom 1D-Stabmodell abzuweichen (vgl. Abbildung 23 und Abbildung 24).

Die in Tabelle 3 zusammengefassten Schubringkräfte, werden aus der Längsspannungsdifferenz  $\Delta\sigma_{x,m}$  der FE-Analyse in Abbildung 24 ermittelt. Dabei wird  $\sigma_{x,m}$ , an den in Spalte 2 angegebenen Werten für den Abstand x, abgelesen und mit  $A_{\text{rohr}}$  wird die dortige Längsspannungsdifferenz  $\Delta\sigma_{x,m}$  in eine Kraft  $\Delta N$  umgerechnet ( $\Delta N = \Delta\sigma_{x,m} \cdot A_{\text{rohr}}$ ). Die Spannungen werden in ausreichend großer Distanz zu den dortigen Schubringen ausgelesen, so dass lokale Spannungsspitzen im Bereich der Schubringe im Stahlrohr ausgeschlossen werden können und die Differenz der aufgenommenen Schubringkraft  $\Delta N$  entspricht.

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur -10° 1D-Stab	$\Delta N$ [MN] Temperatur -10° FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur +10° 1D-Stab	$\Delta N$ [MN] Temperatur +10° FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck 1D-Stab	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck FEA
<b>Schubring 1</b>	1445-1555	1,06	0,65	0,39	0,29	-0,39	-0,30	-0,59	-0,37
<b>Schubring 2</b>	2945-3055	3,01	2,41	1,12	1,01	-1,12	-1,23	-1,66	-1,47
<b>Schubring 3</b>	4445-4555	7,45	7,12	2,77	3,00	-2,77	-4,49	-4,12	-4,67

Tabelle 3 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Aufteilung der Normalkräfte auf die einzelnen Schubringe, (für FE-Analyse ermittelt aus Längsspannungsdifferenz), Werte in MN

Zum direkten Vergleich werden in Tabelle 4 Verschiebungen dargestellt. In beiden Modellen werden diese an den Schubringen und am Rohrende ausgegeben.

	x [mm]	u(x) [mm] Innendruck 1D-Stab	u(x) [mm] Innendruck FEA	u(x) [mm] Temperatur -10° 1D-Stab	u(x) [mm] Temperatur -10° FEA	u(x) [mm] Temperatur +10° 1D-Stab	u(x) [mm] Temperatur +10° FEA	u(x) [mm] Deckeldruck 1D-Stab	u(x) [mm] Deckeldruck FEA
<b>Schubring 1</b>	1500	0.05	0.08	0.02	0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.01
<b>Schubring 2</b>	3000	0.14	0.19	0.05	0.05	-0.05	-0.04	-0.08	-0.03
<b>Schubring 3</b>	4500	0.34	0.38	0.13	0.12	-0.13	-0.11	-0.19	-0.09
<b>Rohrende</b>	6000	0.83	0.83	0.31	0.30	-0.31	-0.34	-0.46	-0.30

Tabelle 4 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Längsverschiebungen Zusammenfassung, Werte in mm

Dabei ist zu betonen, dass die Längsverschiebungen  $u_{x,m}$  in Relation zu einem Rohrdurchmesser  $d_a$  von  $\sim 3$  m und einem Schubringabstand  $e_{SR}$  von 1,5 m, mit Verschiebungen unter 1 mm, in jedem Fall relativ gering bleiben.

## 2.2.4 Kontaktspannungen

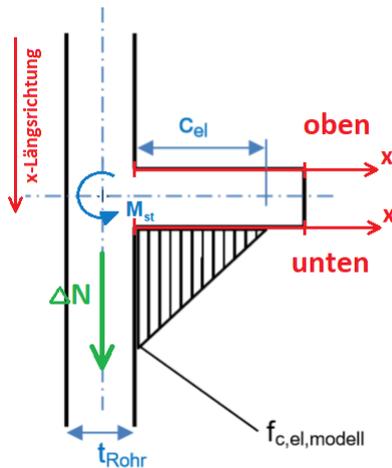


Abbildung 25 Kragarmmodell für Schubringe [2]

Die Kontaktspannungen  $C_{press}$  werden an allen Schubringen beidseitig, wie in Kapitel 1.6 beschrieben, ausgelesen (vgl. Abbildung 19). Die jeweils als „unten“ bezeichnete Seite wird dabei immer mit negativem Vorzeichen eingetragen. Dies ermöglicht eine einfache Addition beider Kontaktspannungen und ermöglicht so ein klareres Bild auf die tatsächlichen Auflagerreaktionen der Schubringe.

Die resultierende Auflagerreaktion auf den Schubringen  $N_{res}$  kann dadurch auch direkt mit den Annahmen verglichen werden, auf denen das 1D-Stabmodell basiert. Im Gesamtbericht von Unterweger, Ecker [2], wird die Schubringbelastung an einem Kragarmmodell wiedergegeben. Dabei ergibt sich, abhängig von der Schubringgeometrie, eine entsprechende Auflagerfläche  $c_{el}$ .

$$c_{el} = 0,85 * t_{rohr} + t_{ring} * [1 + 0,1 * \left(\frac{h_{ring}}{t_{ring}} - 2\right)] \quad \text{Gl. ( 13 )}$$

Über die Auflagerfläche und die resultierende Kraft  $\Delta N$  kann nun einfach auf die maximale Pressung  $f_{c,el,modell}$  zurückgerechnet werden, wodurch ein anschaulicher Vergleich mit den Ergebnissen der FEA ermöglicht wird. Dabei gilt:

$$\Delta N = 2 * \left(d_a + \frac{c_{el}}{2}\right) * \pi * c_{el} * \frac{f_{c,el,modell}}{2}$$

### 2.2.4.1 Darstellung der Pressungsverteilung

In diesem Kapitel wird die Darstellung der Pressungsverteilungen an den Schubringen in Abbildung 28 erläutert. Abbildung 29 stellt eine Zusammenfassung aller resultierenden Pressungsverteilungen, wie in Kapitel 2.2.4.1.3 erläutert, dar. Für jeden einzelnen Schubring werden dafür folgende Größen ermittelt (Anmerkung: Die Überschriften entsprechen der Legendenbeschriftung in Abbildung 28 und Abbildung 29):

#### 2.2.4.1.1 Werte - Cpress oben FEA

„Cpress oben FEA“ entspricht der abgelesenen Kontaktspannung aus der Finite Elemente Analyse (kurz FEA). Wie in Abbildung 19 und Abbildung 25 dargestellt, wird die Kontaktspannung an den jeweiligen Schubringen an der als „oben“ bezeichneten Seite abgelesen.

#### 2.2.4.1.2 Werte - Cpress unten FEA

„Cpress unten FEA“ entspricht der abgelesenen Kontaktspannung aus der FEA. Wie in Abbildung 19 und Abbildung 25 dargestellt, wird die Kontaktspannung an den jeweiligen Schubringen an der als „unten“ bezeichneten Seite abgelesen. Für die spätere Addition als „Cpress o + Cpress u“ werden die Kontaktspannungen in diesem Fall negativ dargestellt.

#### 2.2.4.1.3 Werte - Cpress o + Cpress u

„Cpress o + Cpress u“ ist eine einfache Addition der Kontaktspannungen von „oben“ und „unten“

$$C_{press\ o} + C_{press\ u}(x) = C_{press\ oben\ FEA}(x) + C_{press\ unten\ FEA}(x)$$

Durch die Addition der Kontaktspannung auf beiden Seiten, kann dadurch die Auflagersituation, bereinigt von Klemmspannungen des Schubringblechs in Dickenrichtung, dargestellt werden.

#### 2.2.4.1.4 Werte - Cpress 1D-Stabmodell

„Cpress 1D-Stabmodell“ dient dazu die Schubringkraft „Nres 1D-Stabmodell“ als dreieckige Spannung darzustellen. „Nres 1D-Stabmodell“ wird dabei direkt aus dem Stabmodell abgelesen. Die Vorgehensweise wird in diesem Kapitel exemplarisch für Schubring 1 vorgerechnet und erfolgt in gleicher Art und Weise für Schubring 2 und Schubring 3.

Die Normalkraft  $\Delta N$  kann für Geometrie 1 aus Tabelle 3 entnommen werden und entspricht für Schubring 1 für den Lastfall Innendruck:

$$N_{res \text{ 1D-Stabmodell}} = \Delta N_{SR1} = 1\,062\,000 \text{ N}$$

Die betroffene Auflagerfläche entspricht dabei:

$$A_{Cel} = 2 * \left( d_a + \frac{c_{el}}{2} \right) * \pi * c_{el} \approx 2 * d_a * \pi * c_{el} \quad \text{Gl. ( 14 )}$$

$$A_{Cel} = 2 * \left( 1510 + \frac{47}{2} \right) * \pi * 47 = 452\,857 \text{ mm}^2$$

Anmerkung: Im Zuge des Forschungsprojektes [2] und [3] wurde vereinfacht  $A_{Cel} \approx 2 * d_a * \pi * c_{el}$  gesetzt.

Über den, von der Auflagerpressung betroffenen Ring, kann mit ausreichender Genauigkeit die maximale Pressung  $f_{c,el,modell}$  errechnet werden zu:

$$f_{c,el,modell} = \frac{N_{res \text{ 1D-Stabmodell}}}{A_{Cel}} * 2 \quad \text{Gl. ( 15 )}$$

$$f_{c,el,modell} = \frac{1062000}{452857} * 2 = 4,69 \text{ N/mm}^2$$

#### 2.2.4.1.5 Werte - Nc,o FEA

„Nc,o FEA“ stellt die Resultierende Kraft aus der Auflagerpressung von „Cpress oben FEA“ dar und errechnet sich über numerische Integration entlang des Schubrings:

$$N_{c,o \text{ FEA}} = 2\pi \int_{x=0}^{h_{ring}} (r_a + x) * C_{press \text{ oben FEA}}(x) dx$$

Für Geometrie 1 und Schubring 1 errechnet sich dabei:  $N_{c,o \text{ FEA}} = 3,72 \text{ MN}$

Für die Lage der resultierenden Kraft wird der Schwerpunktabstand, ausgehend von  $x=0$  ermittelt:

$$e_o = \frac{\int_{x=0}^{h_{ring}} (r_a + x) * C_{press \text{ oben FEA}}(x) * x dx}{\int_{x=0}^{h_{ring}} (r_a + x) * C_{press \text{ oben FEA}}(x) dx}$$

Der errechnete Schwerpunktabstand für „Nc,o FEA“ entspricht  $e_o = 72 \text{ mm}$ .

#### 2.2.4.1.6 Werte - Nc,u FEA

Die Darstellung von „Nc,u FEA“ erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie es in Kapitel 2.2.4.1.5 für „Nc,o FEA“ erläutert wird. Der einzige Unterschied ist, dass „Cpress unten FEA“ verwendet wird, um die Pressung an der gegenüberliegenden Seite des Schubrings darstellen zu können.

#### 2.2.4.1.7 Werte - Nres+ FEA und Nres- FEA

Die Darstellung von „Nres+ FEA“ und „Nres- FEA“ erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie es in Kapitel 2.2.4.1.5 erläutert wird. Dabei werden die Daten der Addition beider Kontaktspannungen „Cpress o + Cpress u“ verwendet. Da es sich dabei nun um einen Spannungszustand handelt der beide Seiten betrifft, müssen die

Kontaktspannungen „oben“ im positiven und „unten“ im negativen Bereich getrennt ausgewertet werden. Dadurch entsteht auf den beiden Seiten das Kräftepaar „N<sub>res+ FEA</sub>“ und „N<sub>res- FEA</sub>“.

#### 2.2.4.1.8 Werte - N<sub>res</sub> 1D-Stabmodell

Die Kraft „N<sub>res</sub> 1D-Stabmodell“ ist die Grundlage für „C<sub>press</sub> 1D-Stabmodell“ und wird auch direkt aus diesem ausgelesen. Durch die dreiecksförmige Spannungsverteilung wird die Lage der Kraft auf der Position  $c_{el}/3$  dargestellt.

#### 2.2.4.2 Stülpmomente $M_{st}$

Das Stülpmoment  $M_{st}$  wird um den Kreuzungspunkt der Achsen des Schubrings und des Stahlrohrs ermittelt (vgl. Abbildung 25). In diesem Abschnitt wird das Stülpmoment exemplarisch für den Innendruck-Lastfall  $p_{innen} = 9 \text{ N/mm}^2$  anhand von Geometrie 1 an Schubring 1 vorgerechnet (siehe Abbildung 26 und Abbildung 27) und erfolgt gleich für alle weiteren Schubringe, Lastfälle und Geometrien.

$$M_{st,FEA} = \left( e_{res+} + \frac{t_{rohr}}{2} \right) * N_{res+ FEA} + \left( e_{res-} + \frac{t_{rohr}}{2} \right) * N_{res- FEA}$$

$$M_{st,FEA} = \left( 21,56 + \frac{20}{2} \right) * 0,69 + \left( 115,57 + \frac{20}{2} \right) * 0,04 = 17,24 \text{ kNm}$$

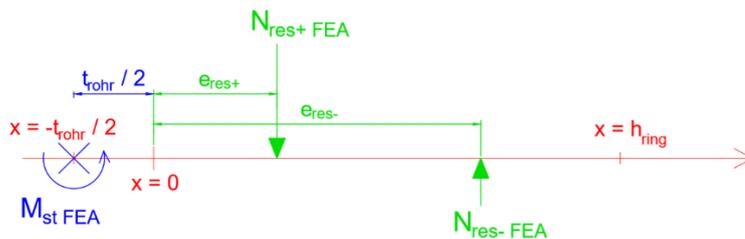


Abbildung 26 Berechnung des Stülpmoments aus der FEA

$$M_{st,1d-Stabmodell} = \left( \frac{c_{el}}{3} + \frac{t_{rohr}}{2} \right) * N_{res 1d-Stabmodell}$$

$$M_{st,1d-Stabmodell} = \left( \frac{47}{3} + \frac{20}{2} \right) * 15,67 = 27,26 \text{ kNm}$$

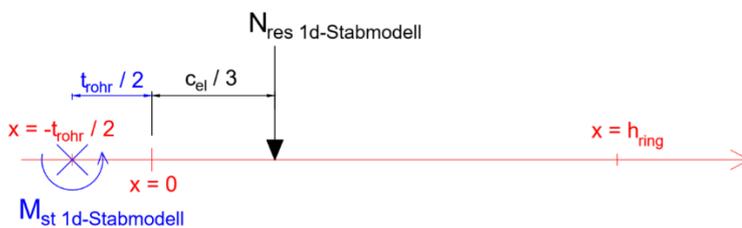


Abbildung 27 Berechnung des Stülpmoments aus dem 1D-Stabmodell

#### 2.2.4.3 Geometrie 1, $\mu=0$ : Kontaktspannungen infolge Innendruck $9 \text{ N/mm}^2$

In diesem Kapitel wird die Auflagerpressung für den Lastfall Innendruck  $p_{innen} = 9 \text{ N/mm}^2$  (vgl. Kapitel 1.5.1) in Geometrie 1 (vgl. Tabelle 1) dargestellt. Die Ermittlung der Ergebnisse ist dabei in Kapitel 2.2.4.1 erläutert.

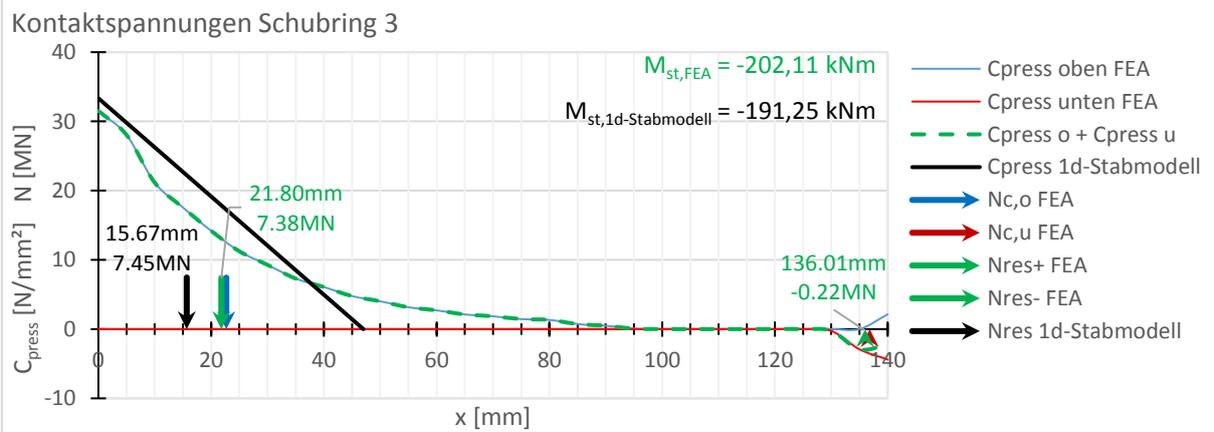
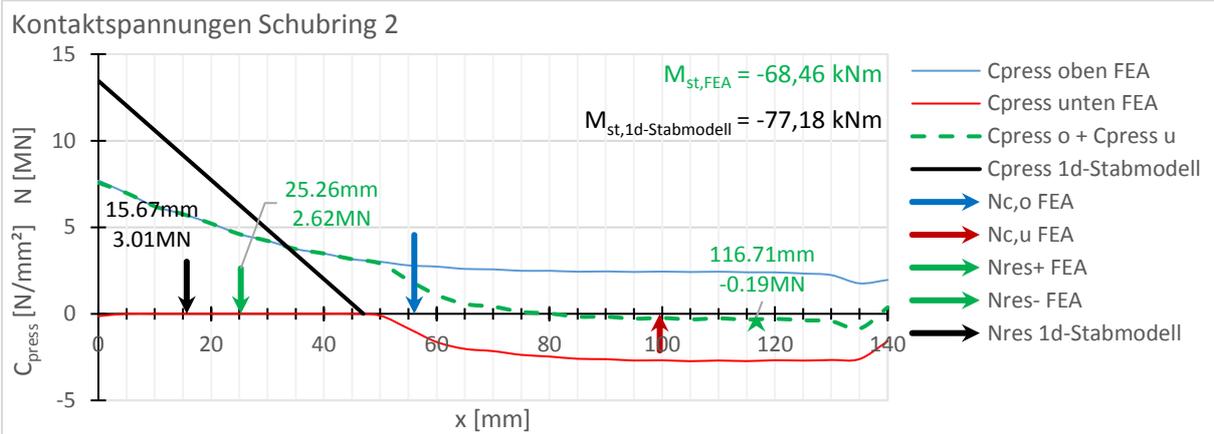
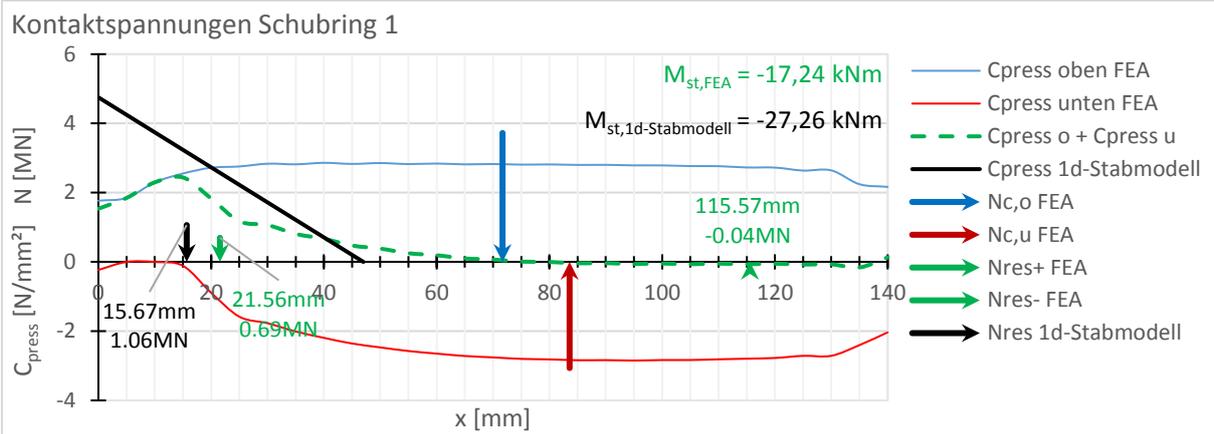


Abbildung 28 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen, Innendruck 9 N/mm<sup>2</sup>

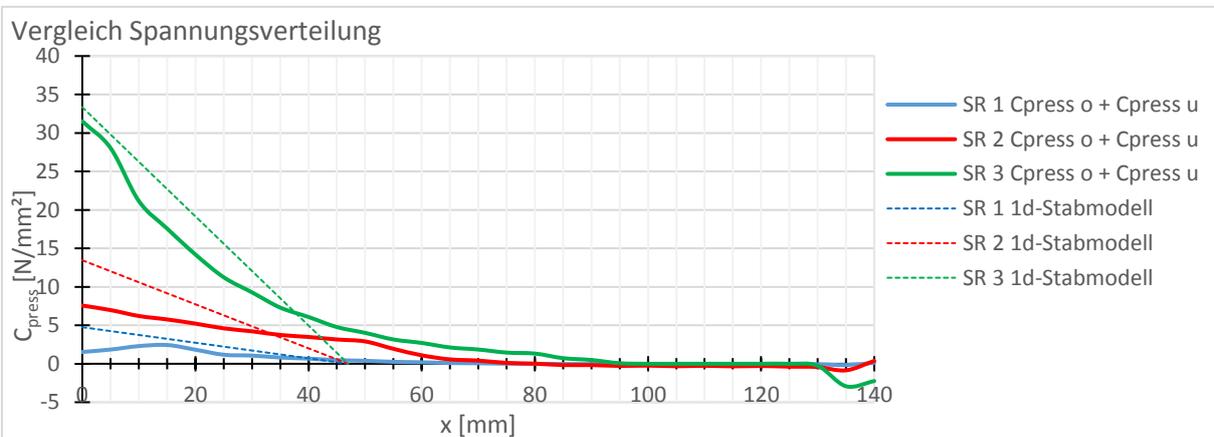


Abbildung 29 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Zusammenfassung der Kontaktspannungen, Innendruck 9 N/mm<sup>2</sup>

Die weit über  $c_{el}$  hinaus auslaufende Pressungsverteilung ist für den Lastfall Innendruck charakteristisch. Einer umfangreichen Untersuchung, der Pressungsverteilungen und deren Auswirkung auf die Federsteifigkeit  $C^*$  ist Kapitel 3.5.1 gewidmet.

#### 2.2.4.4 Geometrie 1, $\mu=0$ : Kontaktspannungen infolge Deckeldruck $1 \text{ N/mm}^2$

In diesem Kapitel wird die Auflagerpressung für den Lastfall Deckeldruck  $p_{deckel} = 1 \text{ N/mm}^2$  (vgl. Kapitel 1.5.3) in Geometrie 1 (vgl. Tabelle 1) dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse ist dabei in Kapitel 2.2.4.1 erläutert.

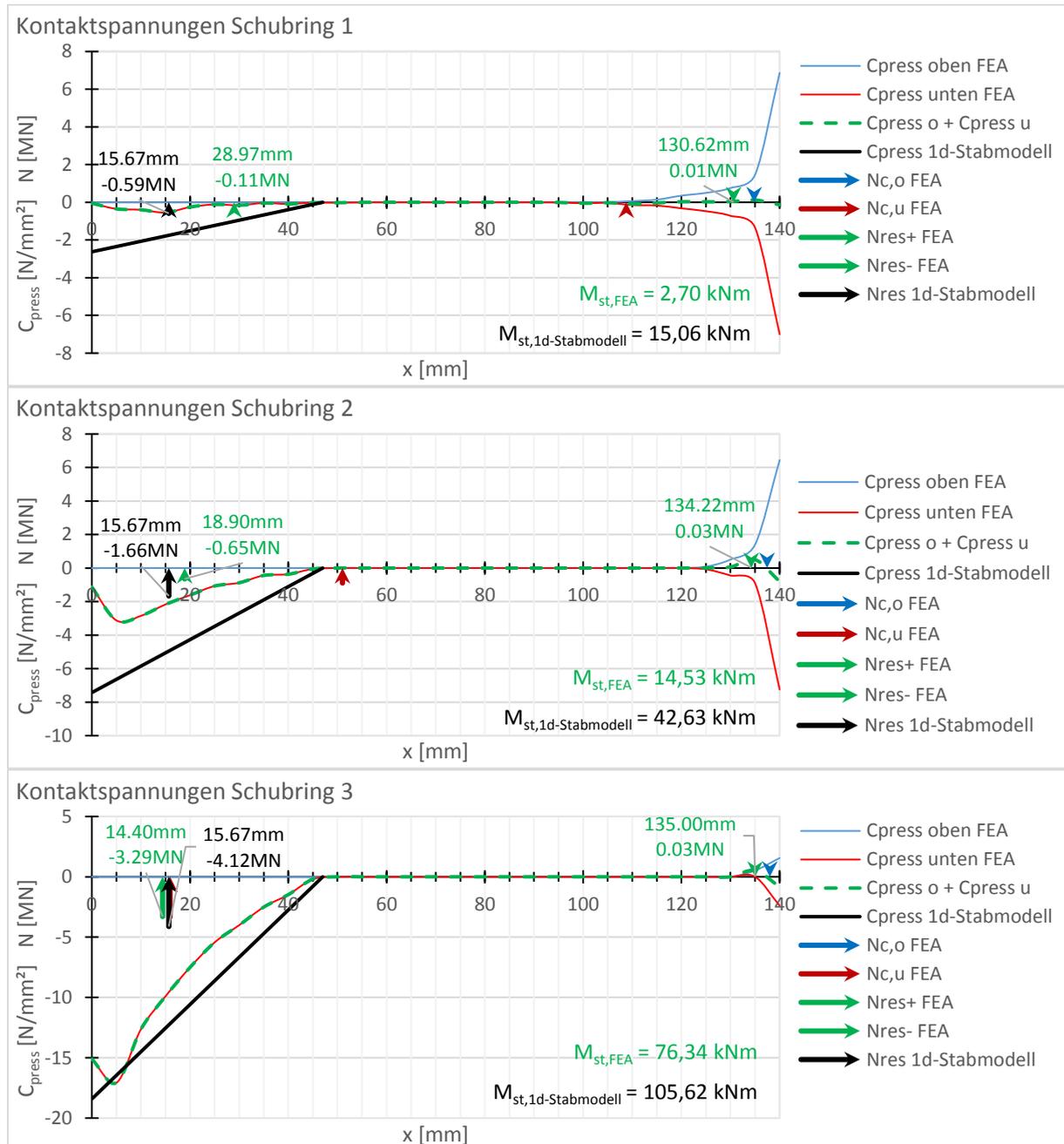


Abbildung 30 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen, Deckeldruck  $1 \text{ N/mm}^2$

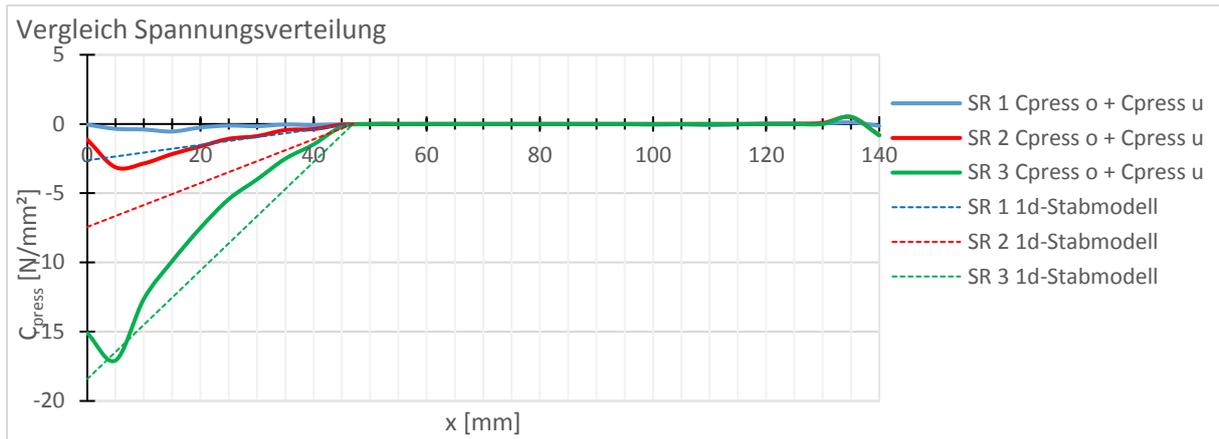


Abbildung 31 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Zusammenfassung der Kontaktspannungen, Deckeldruck 1 N/mm<sup>2</sup>

Die Pressungsverteilung stimmt bei einer Belastung mit alleinigem Deckeldruck sehr gut mit der theoretischen Lage der Pressungsverteilung im Modell von 0 bis  $c_{el}$ , mit dem vorausgesetzten dreieckigen Verlauf überein. Einer umfangreichen Untersuchung, der Pressungsverteilungen und deren Auswirkung auf die Federsteifigkeit  $C^*$  ist Kapitel 3.5.2 gewidmet.

#### 2.2.4.5 Geometrie 1, $\mu=0$ : Kontaktspannungen infolge Temperatur $-10^\circ$

In diesem Kapitel wird die Auflagerpressung für den Lastfall Temperatur  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$  (vgl. Kapitel 1.5.2) in Geometrie 1 (vgl. Tabelle 1) dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse ist dabei in Kapitel 2.2.4.1 erläutert.

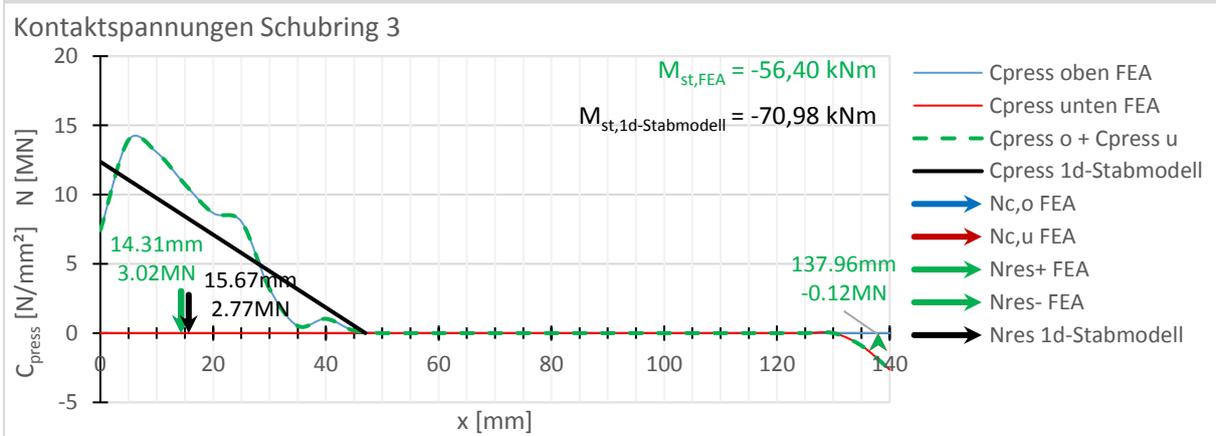
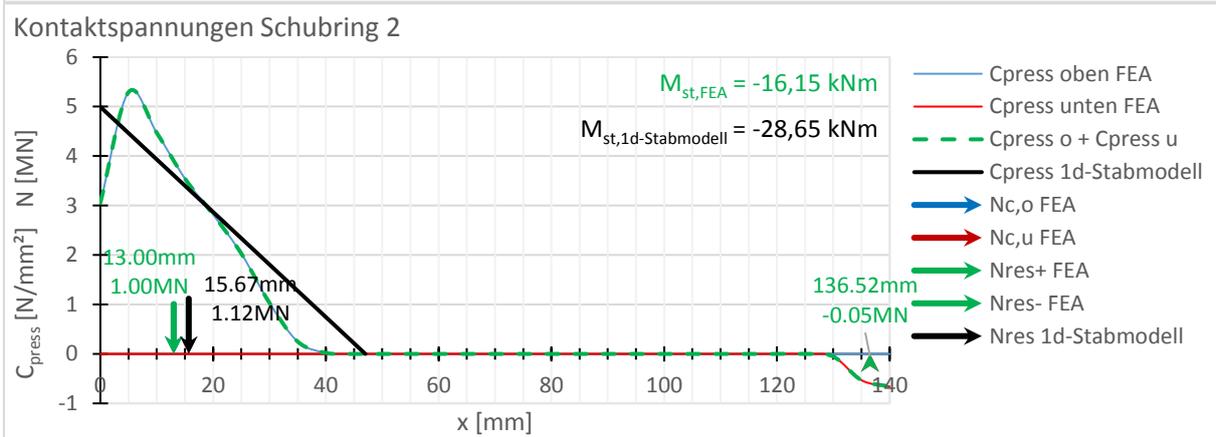
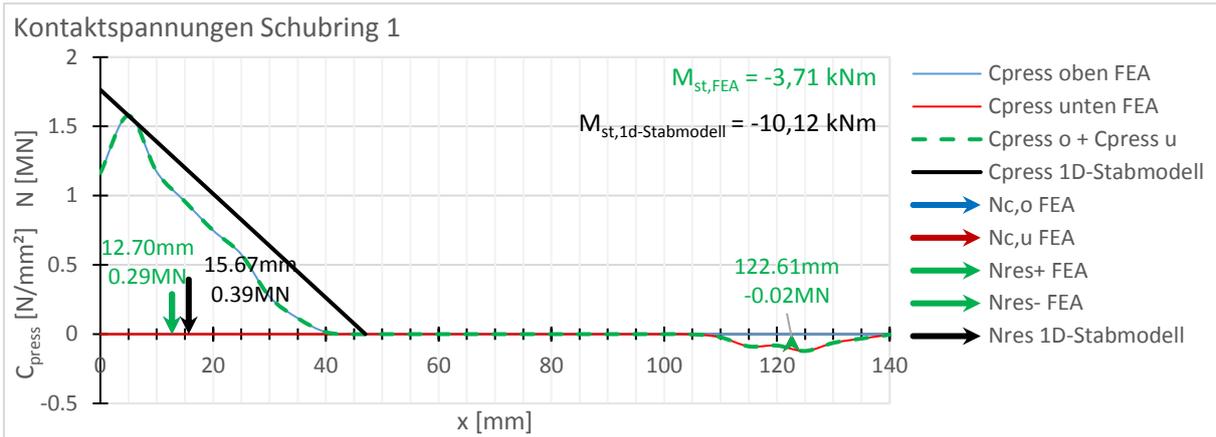


Abbildung 32 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen, Temperatur  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$

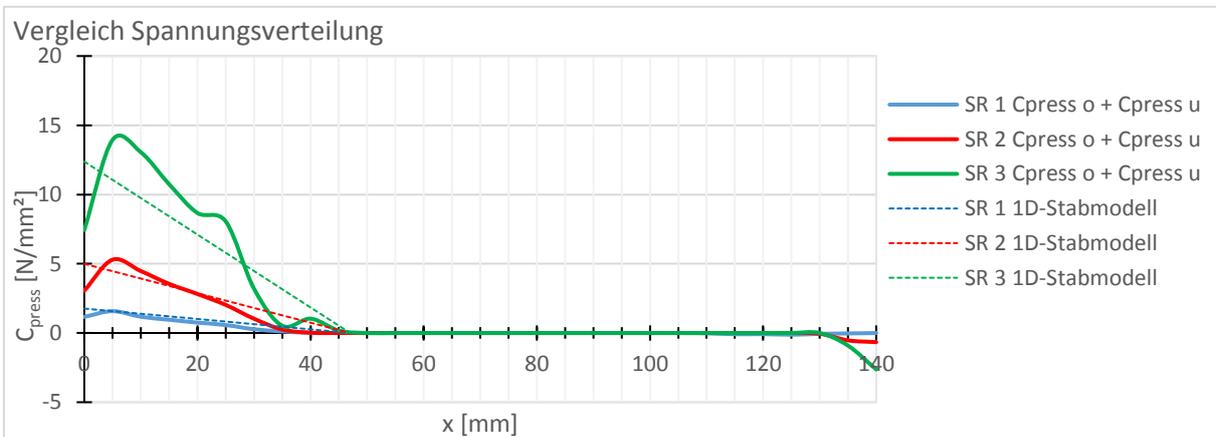


Abbildung 33 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Zusammenfassung der Kontaktspannungen, Temperatur  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$

Die Pressungsverteilung stimmt bei einer Abkühlung um  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$  nahezu perfekt mit der theoretischen Lage von 0 bis  $C_{el}$ , auf Basis des dreieckigen Verlaufs überein. Einer umfangreichen Untersuchung, der Pressungsverteilungen und deren Auswirkung auf die Federsteifigkeit  $C^*$  ist Kapitel 3.5.3 gewidmet.

#### 2.2.4.6 Geometrie 1, $\mu=0$ : Kontaktspannungen infolge Temperatur $+10^\circ$

In diesem Kapitel wird die Auflagerpressung für den Lastfall Temperatur  $\Delta T = +10^\circ\text{C}$  (vgl. Kapitel 1.5.2) in Geometrie 1 (vgl. Tabelle 1) dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse ist dabei in Kapitel 2.2.4.1 erläutert.

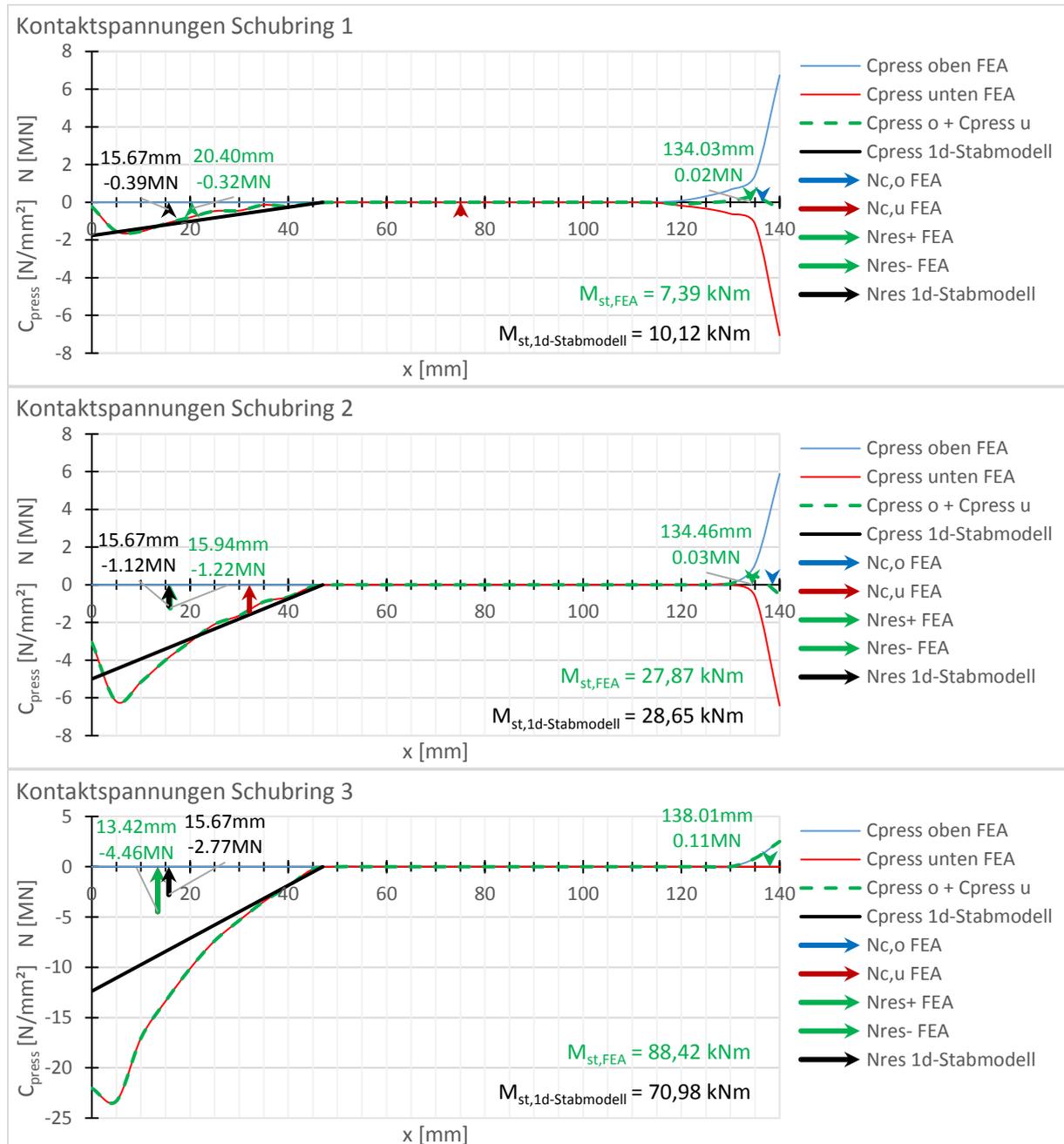


Abbildung 34 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen, Temperatur  $\Delta T = +10^\circ$

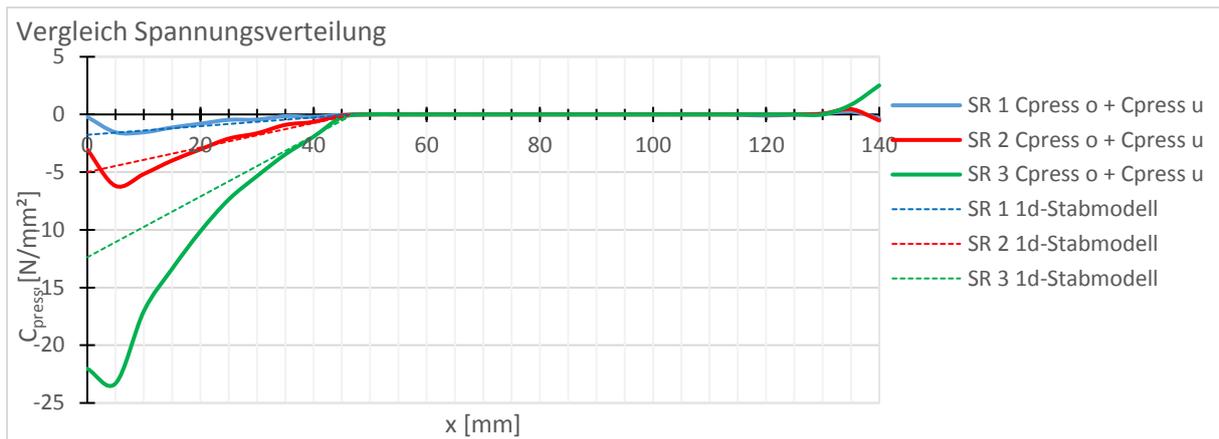


Abbildung 35 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Zusammenfassung der Kontaktspannungen,  $\Delta T = +10^\circ\text{C}$

Die Pressungsverteilung stimmt bei einer Erwärmung um  $\Delta T = +10^\circ\text{C}$  noch mit der theoretischen Lage von 0 bis  $c_{el}$  überein, jedoch wird der prognostizierte dreieckige Verlauf mitunter stark überschritten. Der große Unterschied zwischen Erwärmung und Abkühlung wird auf die ausgelösten Zwangskräfte in Umfangsrichtung zurückgeführt (vgl. Abbildung 23), welche im 1D-Stabmodell nicht berücksichtigt werden. Einer umfangreichen Untersuchung, der Pressungsverteilungen und deren Auswirkung auf die Federsteifigkeit  $C^*$  ist Kapitel 3.5.4 gewidmet.

## 2.3 Grundlastfälle mit Geometrie 2

Die Darstellung der ausgearbeiteten Ergebnisse wird einleitend im Kapitel 2 zusammengefasst. Die einzelnen Schritte wurden bereits in Kapitel 2.2 ausgearbeitet und sind dort anhand von Geometrie 1 detailliert erläutert. In diesem Kapitel erfolgt eine Aufarbeitung der gleichen Lastfälle anhand von Geometrie 2.

### 2.3.1 Aufteilung der Normalkräfte $\Delta N$

Zu Beginn des Kapitels 2.3 werden für Geometrie 2 die Schubringkräfte  $\Delta N_i$  in absoluten Werten in MN als Balkendiagramm präsentiert. Die Beschriftung des Balkendiagramms stellt dabei die einzelnen Schubringkräfte  $\Delta N_i$  direkt mit deren Summe gegenüber (vgl. Abbildung 36, Beschriftung  $\Delta N_i / \sum \Delta N_i$ ). Die Ermittlung der Ergebnisse wird im Verlauf dieses Kapitels erläutert.

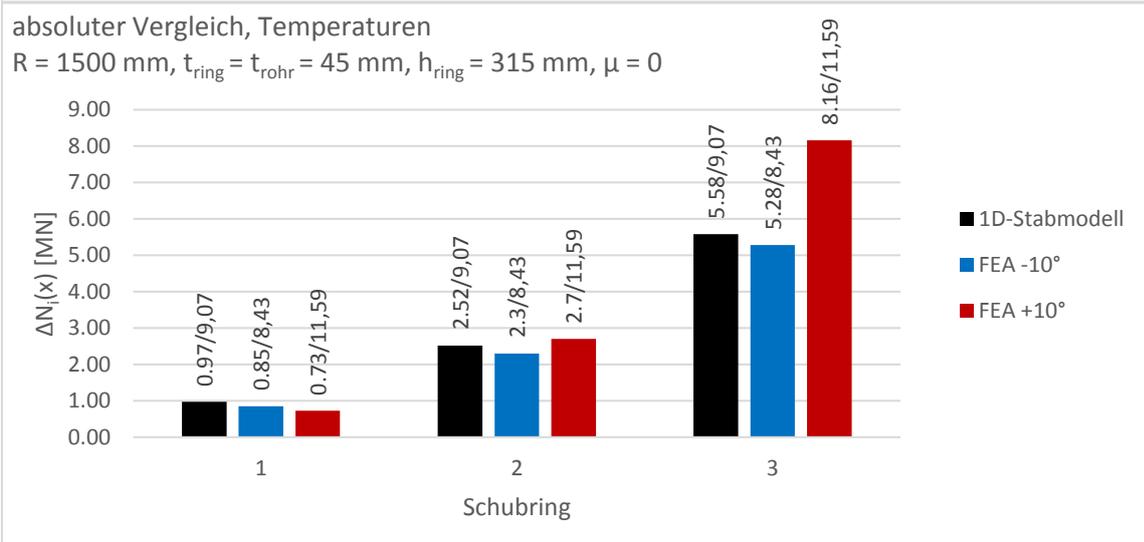
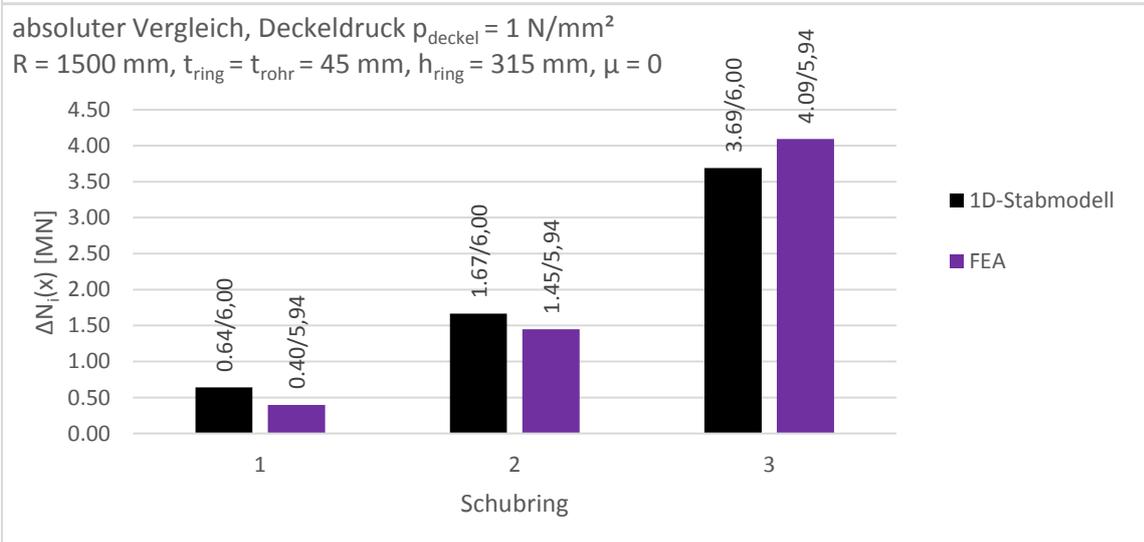
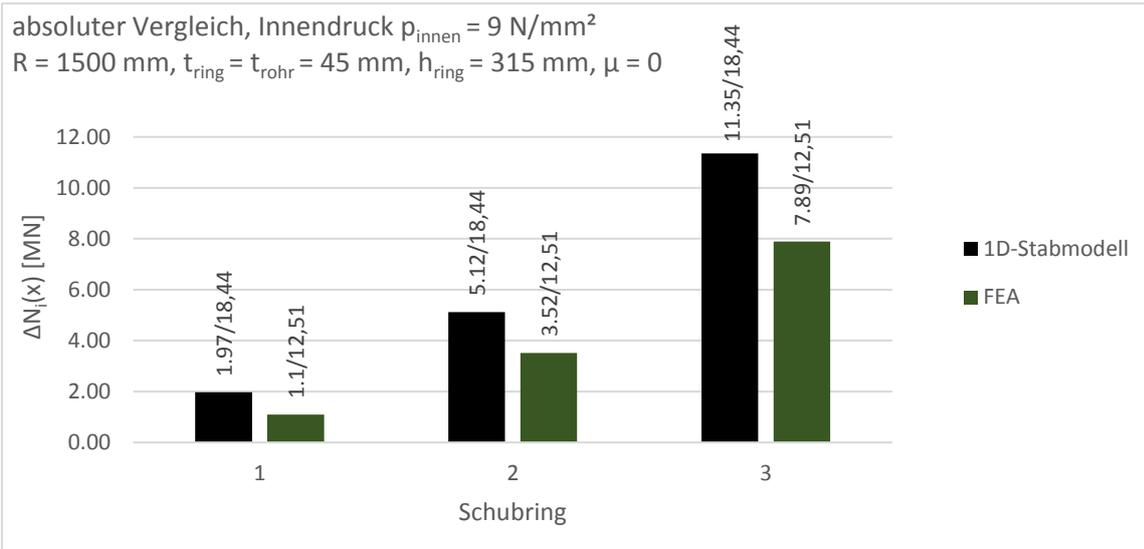


Abbildung 36 Geometrie 2,  $\mu=0$ : absolute Aufteilung der Normalkräfte auf die einzelnen Schubringe

Wo hingegen bei Geometrie 1 noch eine sehr gute Treffsicherheit für den Lastfall Innendruck gefunden werden kann (vgl. Abbildung 21), werden für Geometrie 2 hier sehr starke Abweichungen sichtbar (vgl. Abbildung 36, absoluter Vergleich Innendruck).

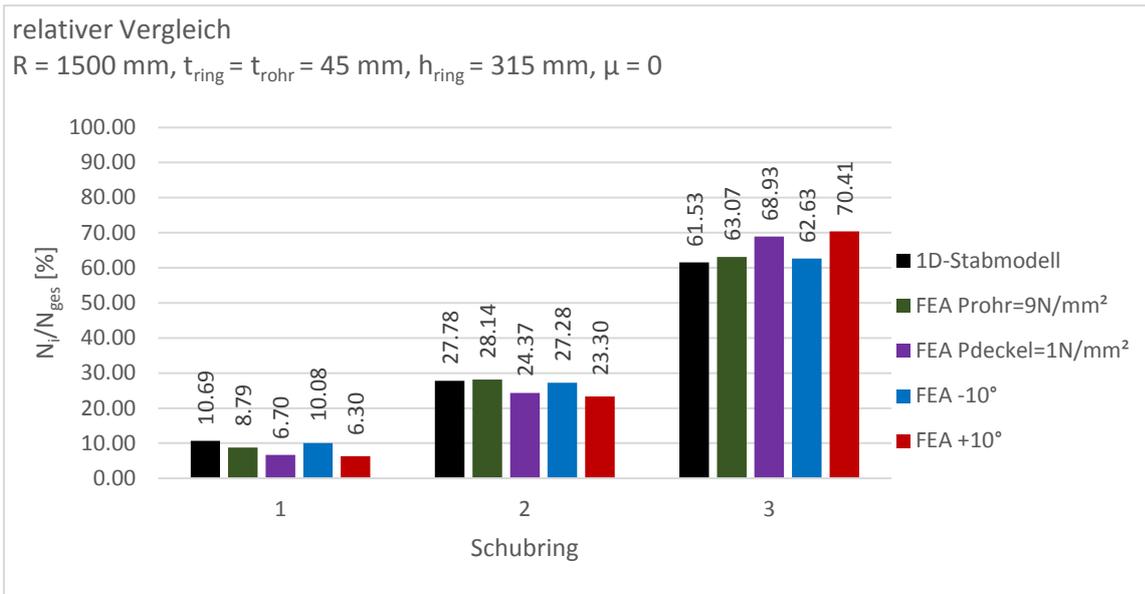


Abbildung 37 Geometrie 2,  $\mu=0$ : relative Aufteilung der Normalkräfte auf die einzelnen Schubringe

Betrachtet man die relative Aufteilung der Normalkräfte auf die Schubringe, so zeigen, sowohl das 1D-Stabmodell, als auch die FEA, einen durchwegs geringeren Anteil für den höchstbelasteten Schubring 3 (vgl. Abbildung 37), gegenüber dem System mit Geometrie 1.

### 2.3.2 Vergleich der Umfangsspannung $\sigma_{\varphi,m}$

In diesem Kapitel werden die vorhandenen Umfangsspannungen  $\sigma_{\varphi,m}$  in Blechmitte der Stahlpanzerung dargestellt und verglichen.

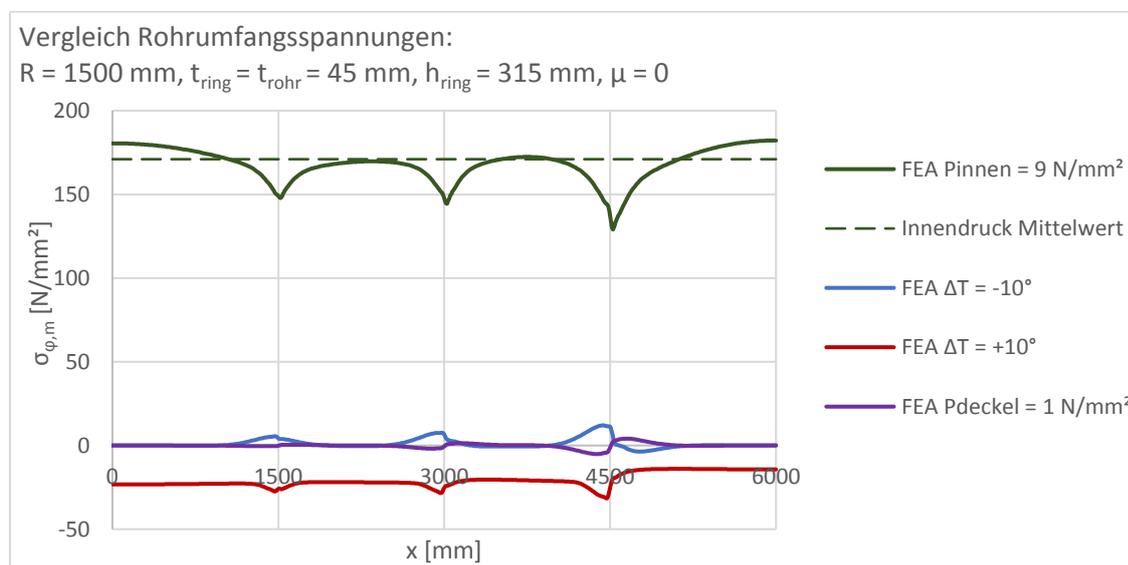


Abbildung 38 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Umfangsspannungen

Im Vergleich zur Geometrie 1, ist anhand der Wirkung in Umfangsrichtung, durch die deutlich massivere Ausführung der Schubringe, ein deutlich stärkerer Einfluss durch diese zu erkennen. Anhand des Innendruck Lastfalls (in Abbildung 38, grün) kann ein gekrümmter Verlauf bis in die Mitte der Stahlpanzerung zwischen den Schubringen festgestellt werden (siehe Abbildung 38, bei  $x = 2250 \text{ mm}$  und  $x = 3750 \text{ mm}$ ), wohingegen bei Geometrie 1 nur ein lokaler Einfluss der Schubringe festgestellt werden kann, und sich dadurch in der Stahlpanzerung weitgehend konstante Umfangsspannungsverläufe ausbilden können (vgl. Abbildung 23, bei  $x = 2250 \text{ mm}$  und  $x = 3750 \text{ mm}$ ).

### 2.3.3 Vergleich der Längsspannung $\sigma_{x,m}$

Die vorhandenen Normalkräfte können am jeweiligen 1D-Stabmodell abgelesen werden. Mit der dort genutzten Fläche  $A_{\text{rohr}}$  kann auf eine Spannung umgerechnet werden, welche mit den Ergebnissen der ausgelesenen Längsspannungen in Blechmitte  $\sigma_{x,m}$  aus der FEA direkt verglichen werden können (vgl. Abbildung 39).

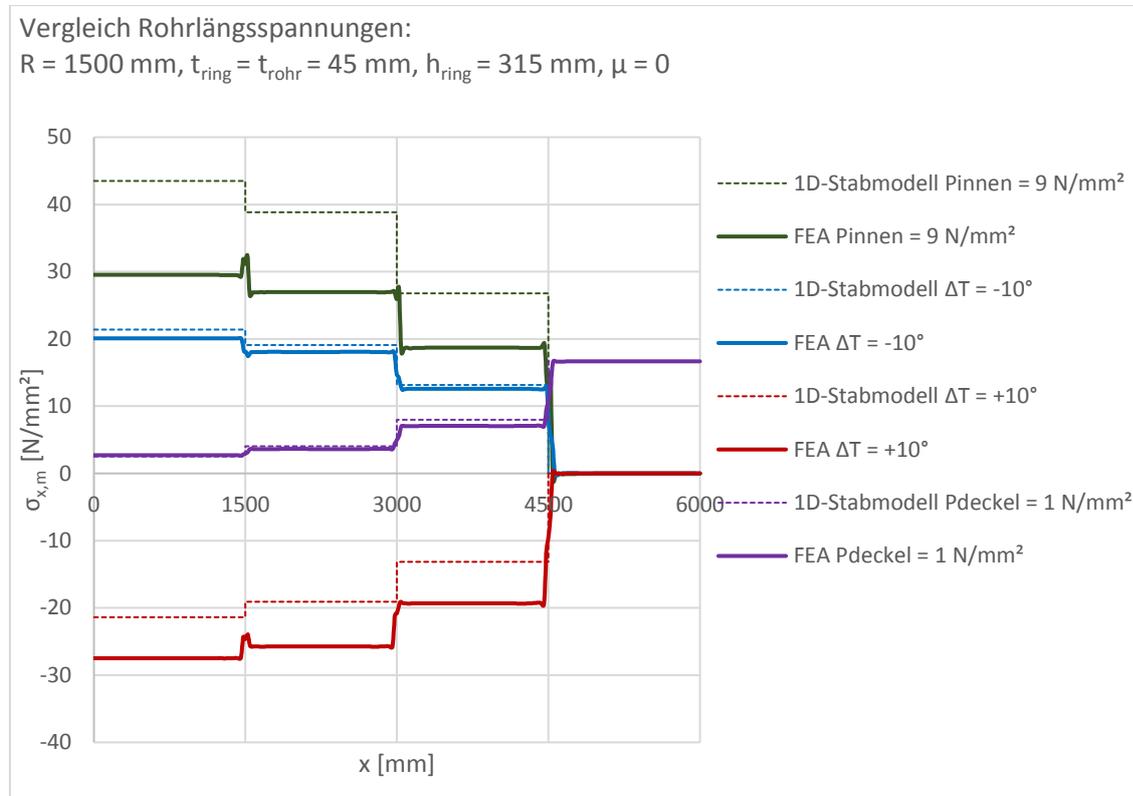


Abbildung 39 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Längsspannungen

Im Gegensatz zu Geometrie 1 (vgl. Abbildung 24), bilden sich mit Geometrie 2 für den Innendruck-Lastfall bereits deutlich erkennbare Unterschiede zwischen den beiden Modellen aus (vgl. Abbildung 39, grün).

Die übrigen Lastfälle zeigen in dieser Hinsicht keinen weiteren Geometrieinfluss auf. Die Abweichung beim Lastfall Temperatur  $+10^\circ\text{C}$  bleibt bestehen. Die Lastfälle ohne Umfangsspannung erzielen auch für Geometrie 2 eine nahezu deckungsgleiche Übereinstimmung (vgl. Abbildung 24 mit Abbildung 39).

Die in Tabelle 5 zusammengefassten Schubringkräfte, werden aus der Längsspannungsdifferenz  $\Delta\sigma_{x,m}$  der FE-Analyse in Abbildung 39 ermittelt. Dabei wird  $\sigma_{x,m}$ , an den in Spalte 2 angegebenen Werten für den Abstand  $x$ , abgelesen und mit  $A_{\text{rohr}}$  wird die dortige Längsspannungsdifferenz  $\Delta\sigma_{x,m}$  in eine Kraft  $\Delta N$  umgerechnet. Die Spannungen werden damit in ausreichend großer Distanz zu den dortigen Schubringen ausgelesen, so dass lokale Spannungsspitzen im Rohr im Bereich der Schubringe ausgeschlossen werden und die Differenz der aufgenommenen Schubringkraft  $\Delta N$  entspricht.

	$x$ [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur $-10^\circ$ 1D-Stab	$\Delta N$ [MN] Temperatur $-10^\circ$ FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur $+10^\circ$ 1D-Stab	$\Delta N$ [MN] Temperatur $+10^\circ$ FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck 1D-Stab	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck FEA
<b>Schubring 1</b>	1445-1555	1,97	1,10	0,97	0,85	-0,97	-0,73	-0,64	-0,40
<b>Schubring 2</b>	2945-3055	5,12	3,50	2,52	2,31	-2,52	-2,72	-1,67	-1,45
<b>Schubring 3</b>	4445-4555	11,35	7,90	5,58	5,39	-5,58	-8,28	-3,69	-4,09

Tabelle 5 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Aufteilung der Normalkräfte auf die einzelnen Schubringe, (für FE-Analyse ermittelt aus Längsspannungsdifferenz), Werte in MN

Zum direkten Vergleich werden in Tabelle 6 die Längsverschiebungen dargestellt. In beiden Modellen werden diese an den Schubringen und am Rohrende ausgegeben.

	x [mm]	u(x) [mm] Innendruck 1D-Stab	u(x) [mm] Innendruck FEA	u(x) [mm] Temperatur -10° 1D-Stab	u(x) [mm] Temperatur -10° FEA	u(x) [mm] Temperatur +10° 1D-Stab	u(x) [mm] Temperatur +10° FEA	u(x) [mm] Deckeldruck 1D-Stab	u(x) [mm] Deckeldruck FEA
<b>Schubring 1</b>	1500	0.06	0.15	0.03	0.04	-0.03	-0.04	-0.02	-0.02
<b>Schubring 2</b>	3000	0.14	0.29	0.07	0.09	-0.07	-0.08	-0.05	-0.05
<b>Schubring 3</b>	4500	0.35	0.50	0.16	0.19	-0.16	-0.17	-0.10	-0.10
<b>Rohrende</b>	6000	0.69	0.85	0.34	0.36	-0.34	-0.38	-0.22	-0.21

Tabelle 6 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Längsverschiebungen Zusammenfassung, Maße in mm

Auffällig beim Vergleich der Verschiebungen ist, dass der Lastfall Innendruck bei Geometrie 2 auch starke Differenzen in den Modellen zeigt (vgl. Tabelle 4 mit Tabelle 6). Interessant ist dabei, dass der Lastfall der Temperaturerhöhung um +10°C, trotz der Differenzen in den Längsspannungen/Längskräften, weitgehend gleiche Verschiebungen aufzeigt (siehe Tabelle 6, rot).

## 2.3.4 Kontaktspannungen

### 2.3.4.1 Geometrie 2, $\mu=0$ : Kontaktspannungen infolge Innendruck 9 N/mm<sup>2</sup>

In diesem Kapitel wird die Auflagerpressung für den Lastfall Innendruck  $p_{\text{innen}} = 9 \text{ N/mm}^2$  (vgl. Kapitel 1.5.1) in Geometrie 2 (vgl. Tabelle 1) dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse ist dabei in Kapitel 2.2.4.1 erläutert.

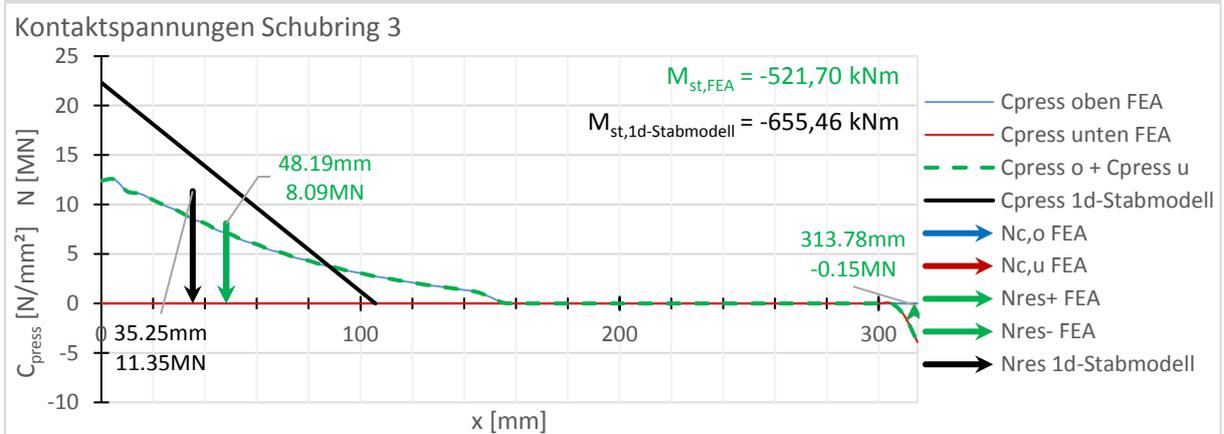
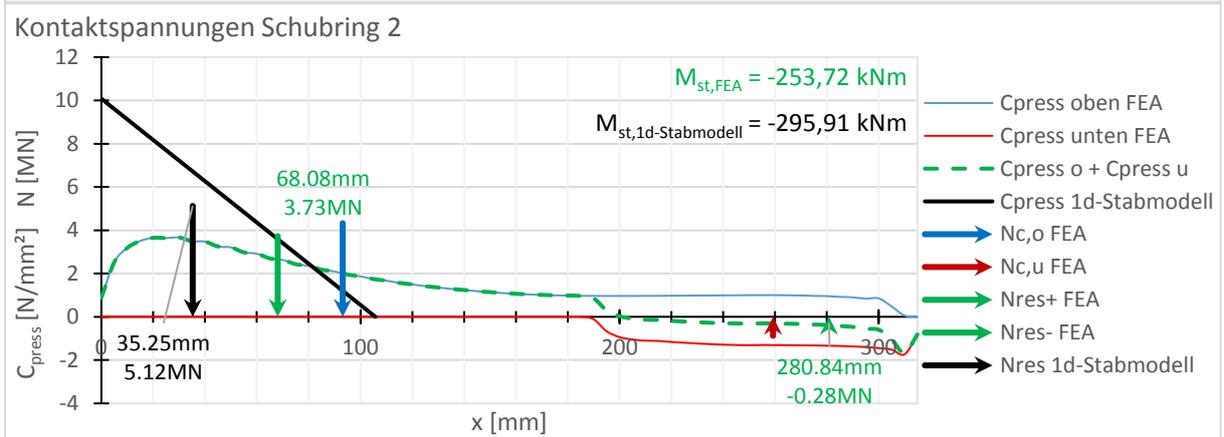
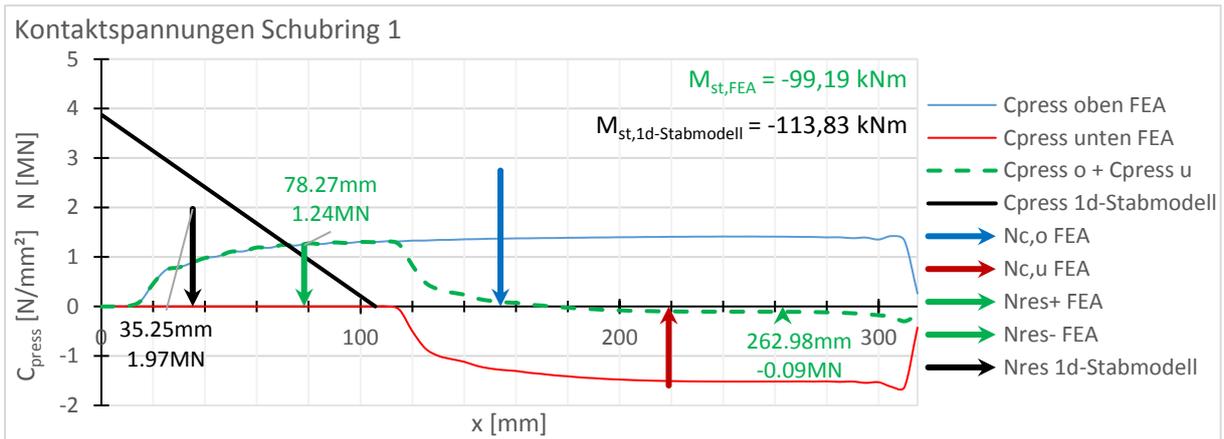


Abbildung 40 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen, Innendruck 9 N/mm<sup>2</sup>

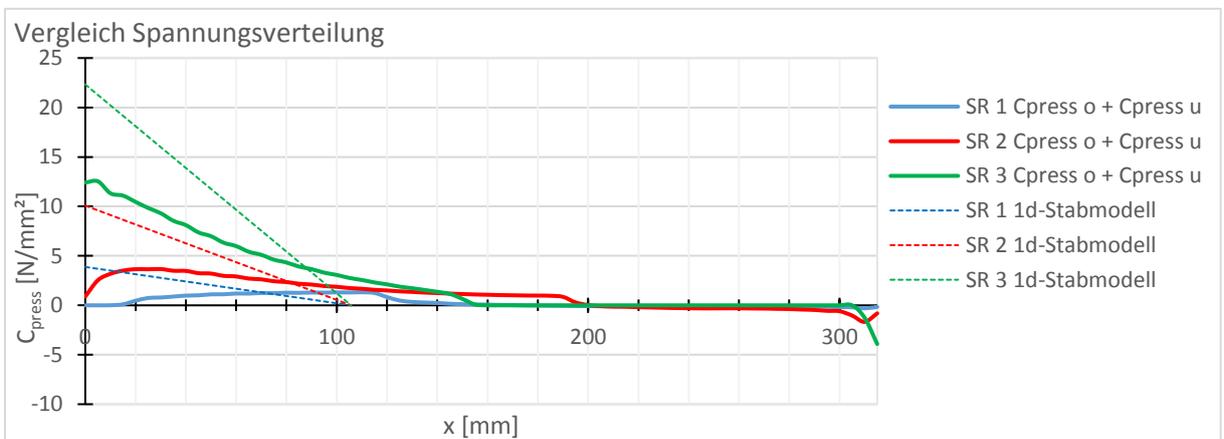


Abbildung 41 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen, Innendruck 9 N/mm<sup>2</sup>, Zusammenfassung

Die weit über  $c_{el}$  hinaus auslaufende Pressungsverteilung ist für den Lastfall Innendruck charakteristisch und kann bereits bei Geometrie 1 in Kapitel 2.2.4.3 festgestellt werden (vgl. Abbildung 29 mit Abbildung 41). Einer umfangreichen Untersuchung, der Pressungsverteilungen und deren Auswirkung auf die Federsteifigkeit  $C^*$  ist Kapitel 3.5.1 gewidmet.

### 2.3.4.2 Geometrie 2, $\mu=0$ : Kontaktspannungen infolge Deckeldruck $1 \text{ N/mm}^2$

In diesem Kapitel wird die Auflagerpressung für den Lastfall Deckeldruck  $p_{deckel} = 1 \text{ N/mm}^2$  (vgl. Kapitel 1.5.3) in Geometrie 2 (vgl. Tabelle 1) dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse ist dabei in Kapitel 2.2.4.1 erläutert.

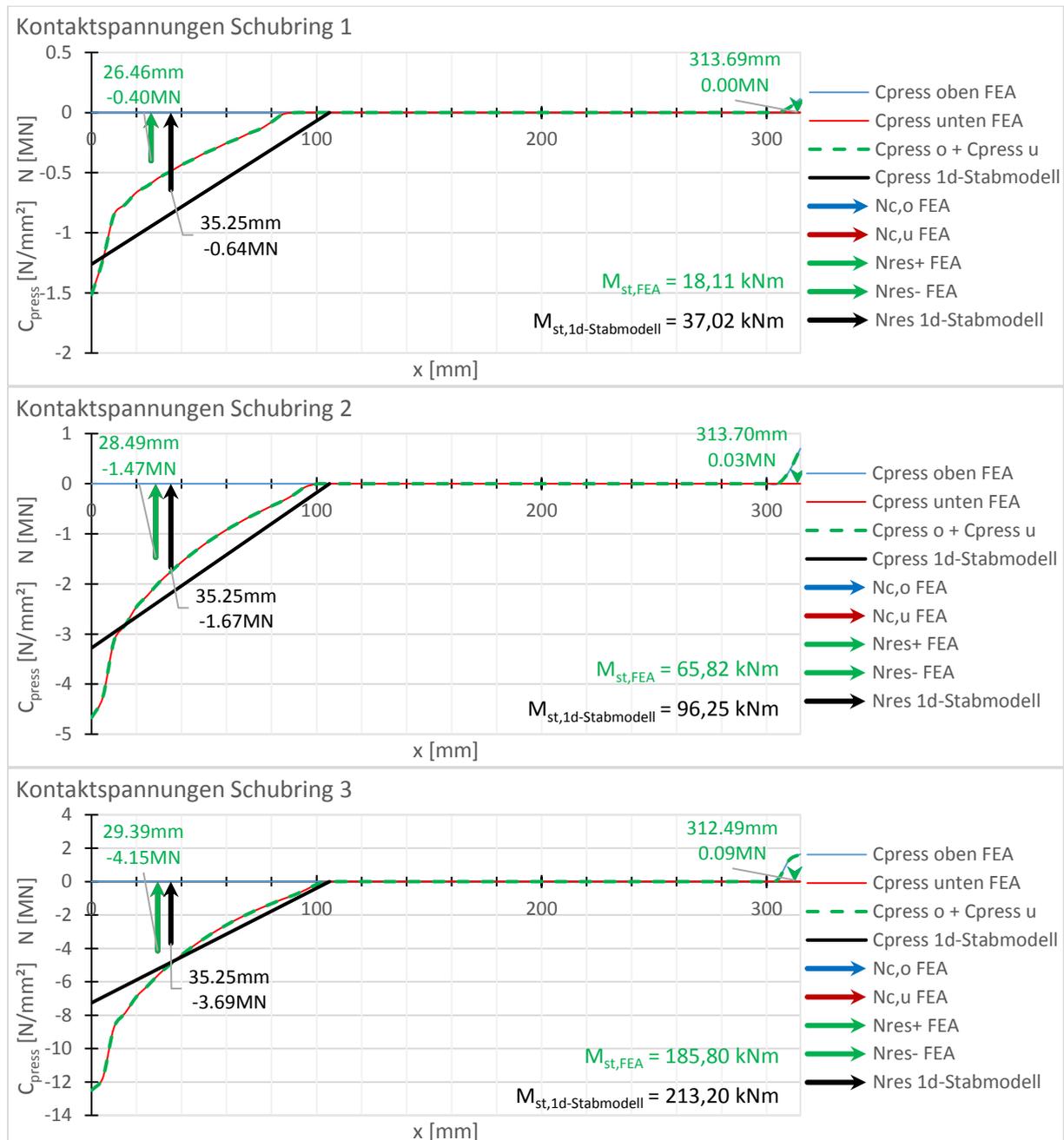


Abbildung 42 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen, Deckeldruck  $1 \text{ N/mm}^2$

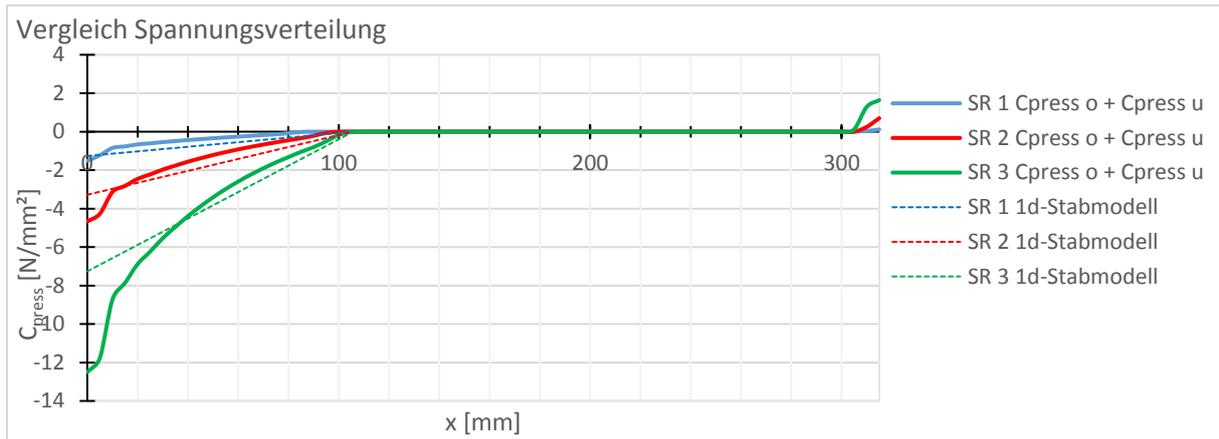


Abbildung 43 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen Zusammenfassung, Deckeldruck 1 N/mm<sup>2</sup>

Die Pressungsverteilung stimmt bei einer Belastung mit Deckeldruck, auch für Geometrie 2, sehr gut mit der theoretischen Lage von 0 bis  $c_{el}$ , und dem angenommenen dreieckigen Verlauf überein. Einer umfangreichen Untersuchung, der Pressungsverteilungen und deren Auswirkung auf die Federsteifigkeit  $C^*$  ist Kapitel 3.5.2 gewidmet.

### 2.3.4.3 Geometrie 2, $\mu=0$ : Kontaktspannungen infolge Temperatur $-10^\circ$

In diesem Kapitel wird die Auflagerpressung für den Lastfall Temperatur  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$  (vgl. Kapitel 1.5.2) in Geometrie 2 (vgl. Tabelle 1) dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse ist dabei in Kapitel 2.2.4.1 erläutert.

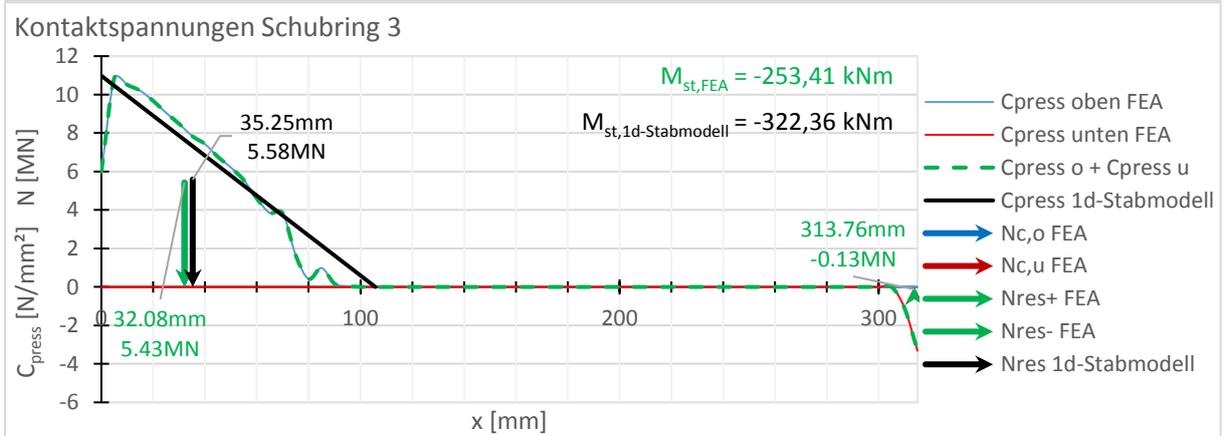
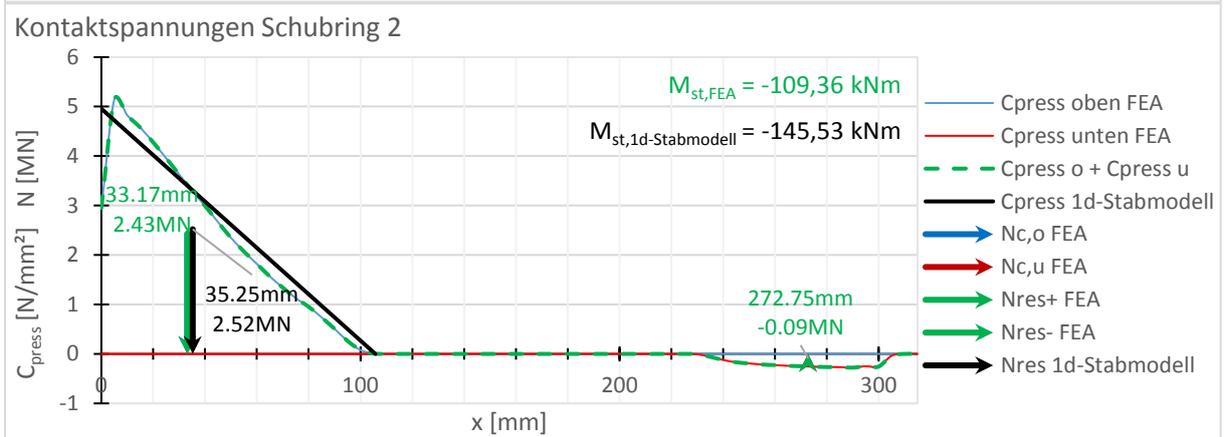
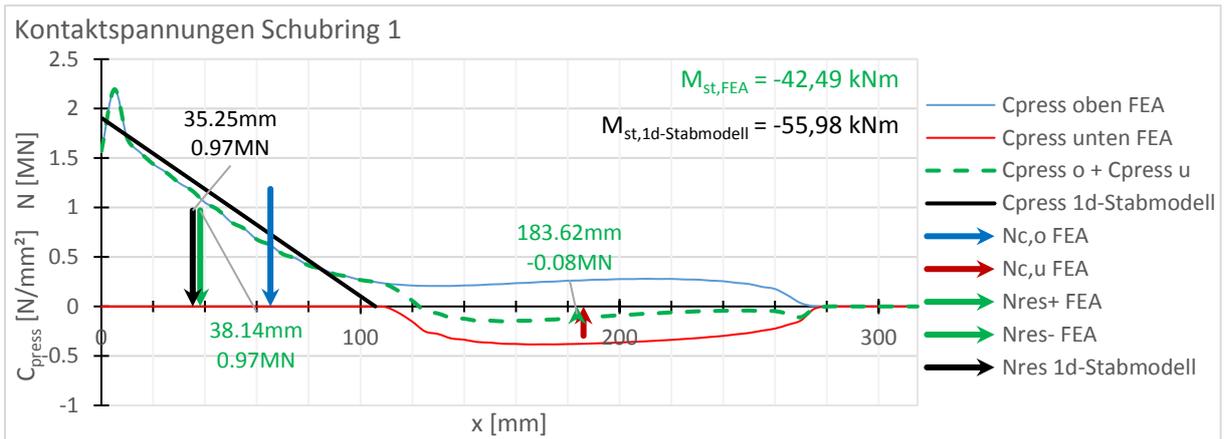


Abbildung 44 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen Temperatur  $-10^\circ$

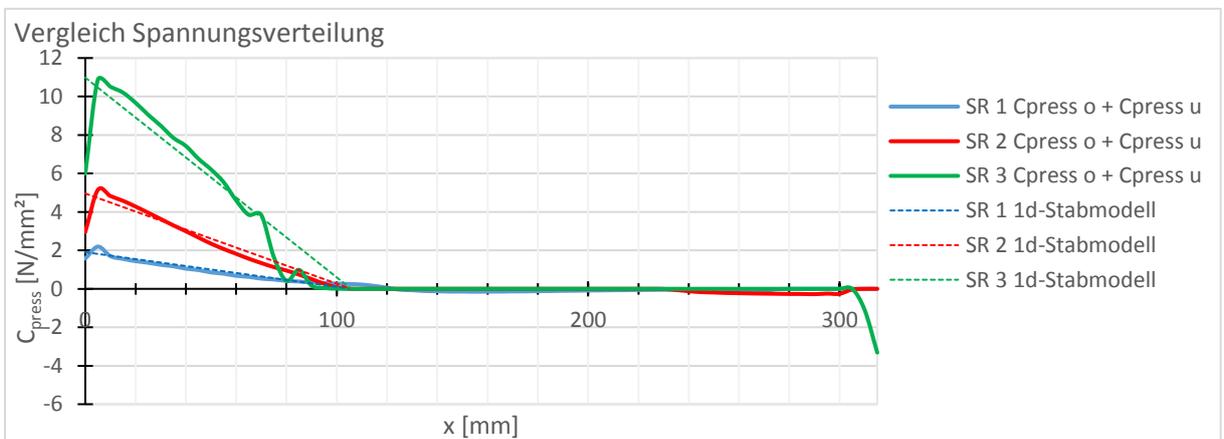


Abbildung 45 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Zusammenfassung der Kontaktspannungen, Temperatur  $-10^\circ\text{C}$

Die Pressungsverteilung stimmt bei einer Abkühlung um  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$  nahezu perfekt mit der theoretischen Lage von 0 bis  $c_{el}$ , und dem angenommenen dreieckigen Verlauf überein. Einer umfangreichen Untersuchung der Pressungsverteilungen und deren Auswirkung auf die Federsteifigkeit  $C^*$  ist Kapitel 3.5.3 gewidmet.

#### 2.3.4.4 Geometrie 2, $\mu=0$ : Kontaktspannungen infolge Temperatur $+10^\circ$

In diesem Kapitel wird die Auflagerpressung für den Lastfall Temperatur  $\Delta T = +10^\circ\text{C}$  (vgl. Kapitel 1.5.2) in Geometrie 2 (vgl. Tabelle 1) dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse ist dabei in Kapitel 2.2.4.1 erläutert.

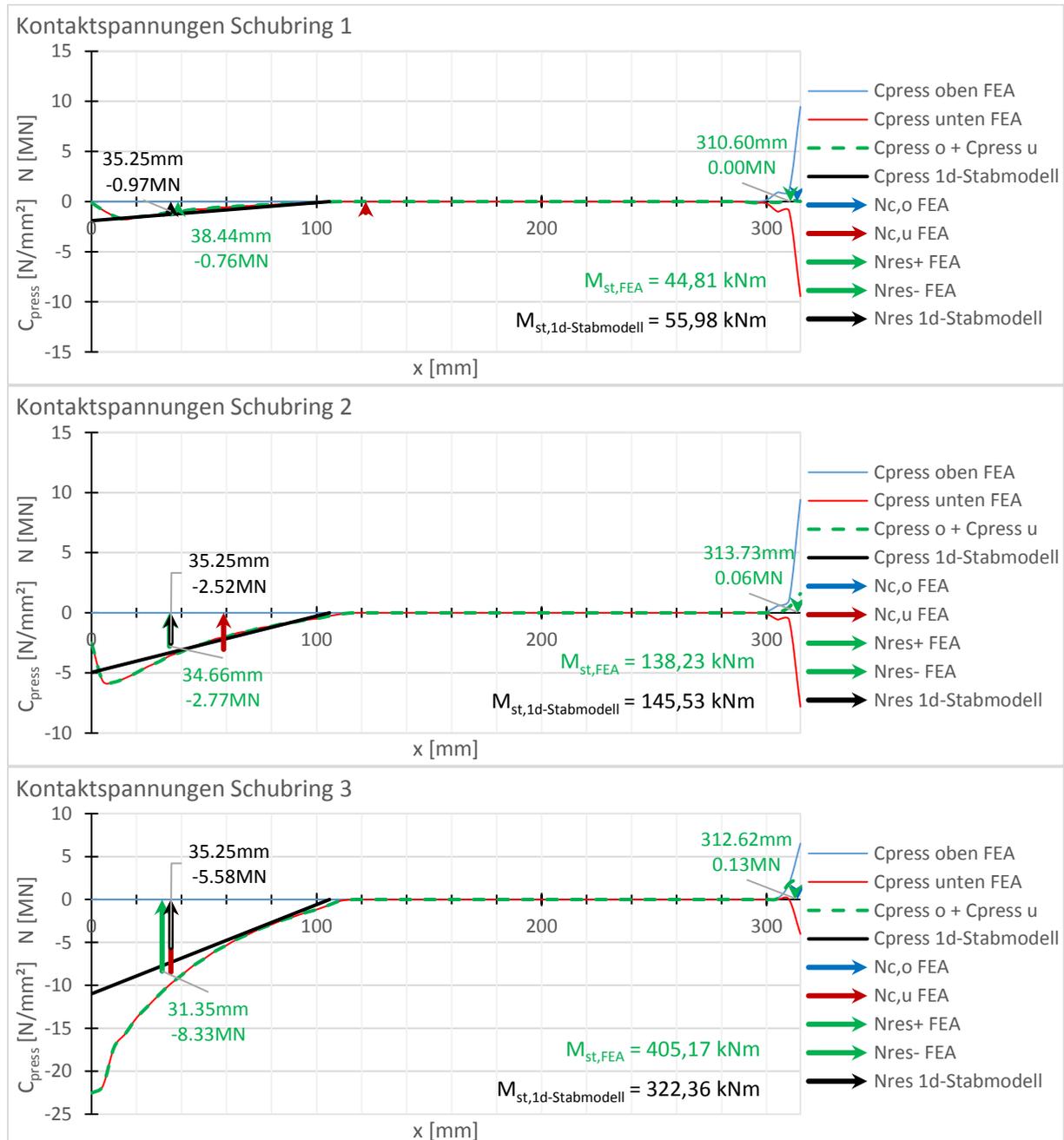


Abbildung 46 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen Temperatur  $+10^\circ$

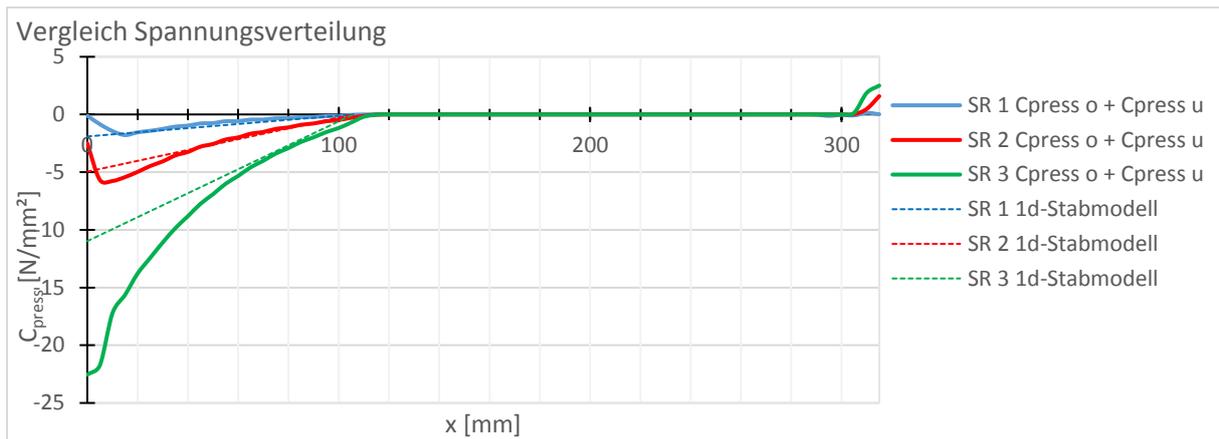


Abbildung 47 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Zusammenfassung der Kontaktspannungen, Temperatur  $+10^\circ\text{C}$

Die Pressungsverteilung stimmt bei einer Erwärmung um  $\Delta T = +10^\circ\text{C}$  noch mit der theoretischen Lage von 0 bis  $c_{el}$  überein, jedoch wird der angenommene dreieckige Verlauf stark überschritten. Einer umfangreichen Untersuchung, der Pressungsverteilungen und deren Auswirkung auf die Federsteifigkeit  $C^*$  ist Kapitel 3.5.4 gewidmet.

## 2.4 Grundlastfälle mit Geometrie 3

Die Darstellung der ausgearbeiteten Ergebnisse wird einleitend im Kapitel 2 zusammengefasst. Die einzelnen Schritte wurden bereits in Kapitel 2.2 ausgearbeitet und sind dort anhand von Geometrie 1 detailliert erläutert. In diesem Kapitel erfolgt eine Aufarbeitung der gleichen Lastfälle anhand von Geometrie 3.

### 2.4.1 Aufteilung der Normalkräfte $\Delta N$

Zu Beginn des Kapitels 2.4 werden für Geometrie 3 die Schubringkräfte  $\Delta N_i$  in absoluten Werten in MN als Balkendiagramm präsentiert. Die Beschriftung des Balkendiagramms stellt dabei die einzelnen Schubringkräfte  $\Delta N_i$  direkt mit deren Summe gegenüber (vgl. Abbildung 48, Beschriftung  $\Delta N_i/\sum \Delta N_i$ ). Die Ermittlung der Ergebnisse wird im Verlauf dieses Kapitels erläutert.

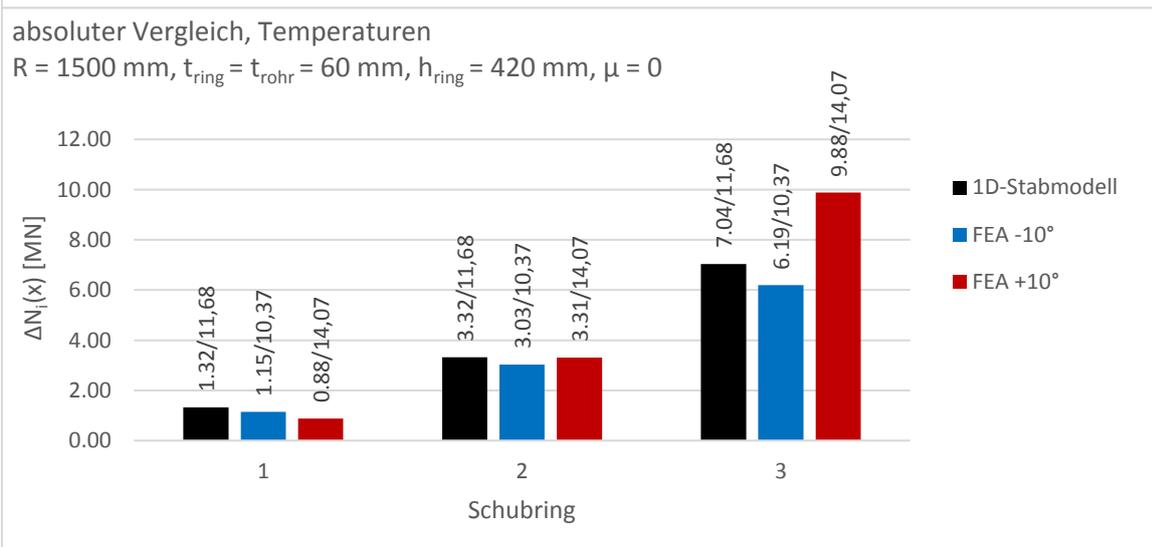
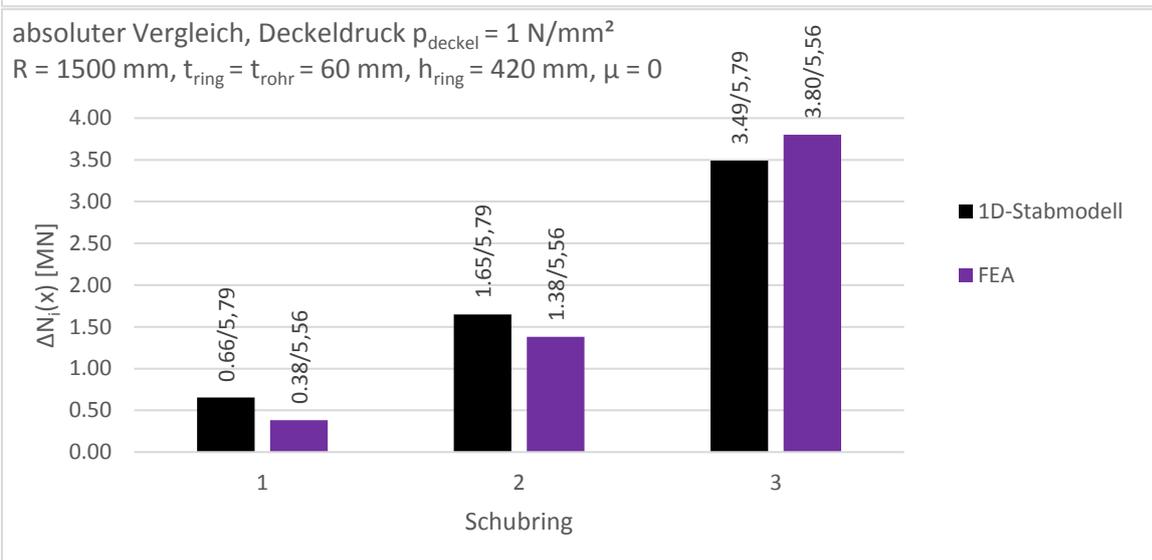
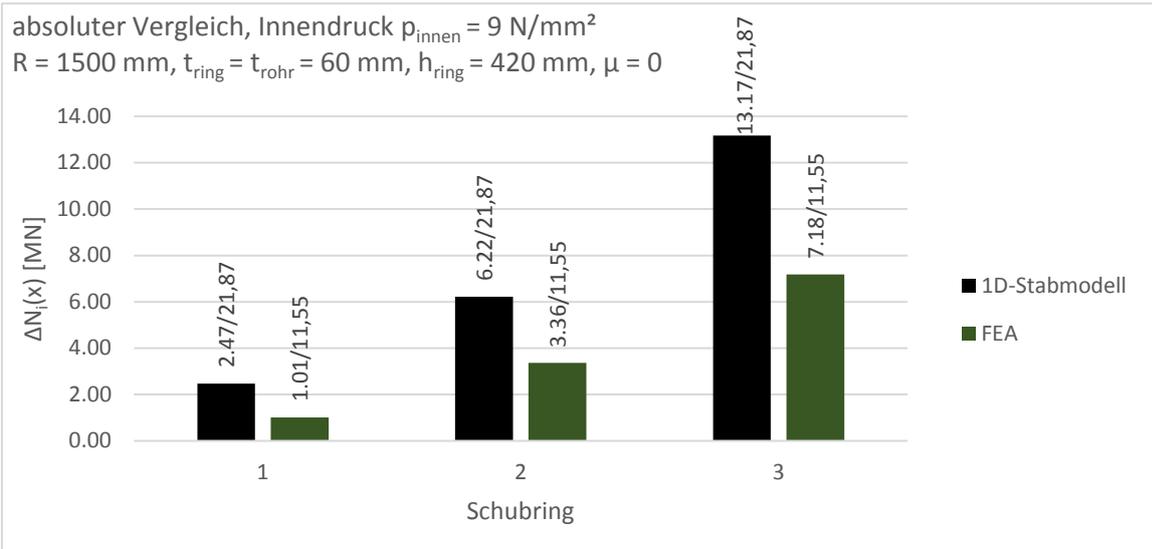


Abbildung 48 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Vergleich: absolute Verteilung der Schubringkräfte

Wo hingegen bei Geometrie 1 noch eine sehr gute Treffsicherheit für den Lastfall Innendruck gefunden werden kann (vgl. Abbildung 21), werden für Geometrie 2 und Geometrie 3 hier sehr starke Abweichungen sichtbar (vgl. Abbildung 36 und Abbildung 48, absoluter Vergleich Innendruck).

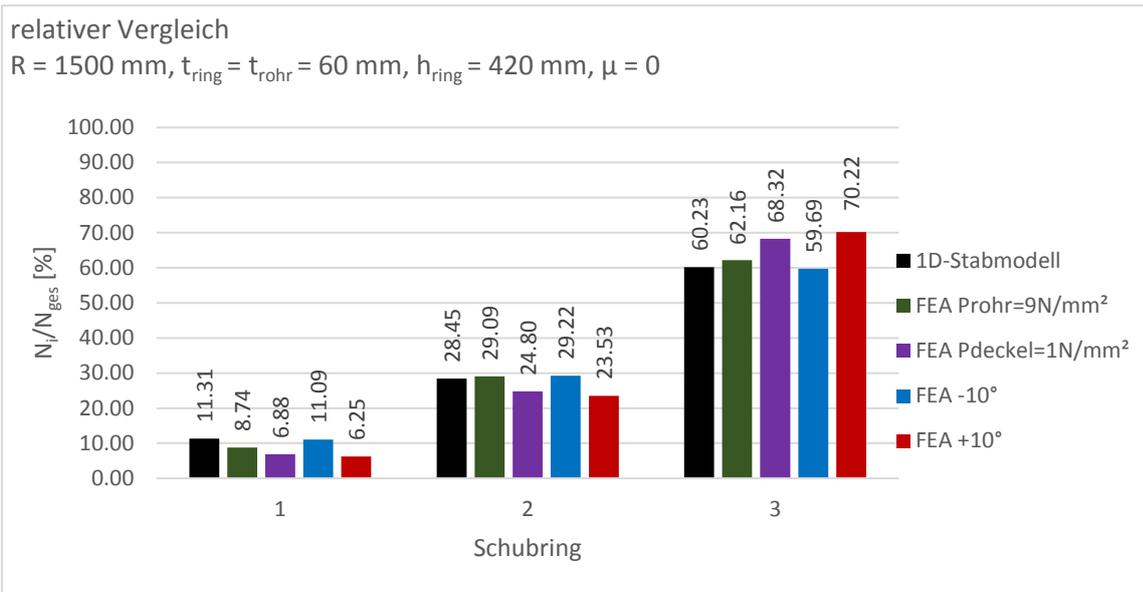


Abbildung 49 Geometrie 3,  $\mu=0$ : relative Aufteilung der Schubringkräfte

Betrachtet man die relative Aufteilung der Normalkräfte auf die Schubringe, so zeigen, sowohl das 1D-Stabmodell, als auch die FEA, einen durchwegs geringeren Anteil für den höchstbelasteten Schubring 3 (vgl. Abbildung 49), gegenüber Geometrie 1.

#### 2.4.2 Vergleich der Umfangsspannung $\sigma_{\varphi,m}$

In diesem Kapitel werden die vorhandenen Umfangsspannungen  $\sigma_{\varphi,m}$  in Blechmitte der Stahlpanzerung dargestellt und verglichen.

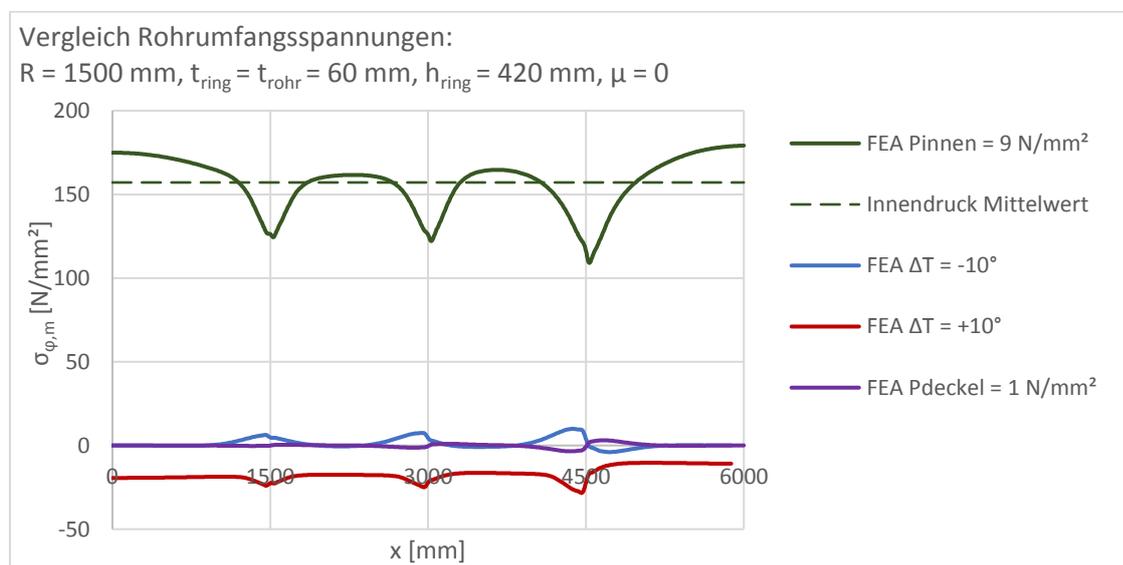


Abbildung 50 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Umfangsspannungen

Im Vergleich zur Geometrie 1, ist anhand der Wirkung in Umfangsrichtung ein deutlich stärkerer Einfluss aus den Schubringen zu erkennen. Anhand des Innendruck Lastfalls (in Abbildung 50, grün) kann ein gekrümmter Verlauf bis in die Mitte der Stahlpanzerung zwischen den Schubringen festgestellt werden (siehe Abbildung 50, bei  $x = 2250 \text{ mm}$  und  $x = 3750 \text{ mm}$ ), wohingegen bei Geometrie 1 nur ein lokaler Einfluss der Schubringe festgestellt werden kann, und sich dadurch in der Stahlpanzerung weitgehend konstante Umfangsspannungsverläufe ausbilden können (vgl. Abbildung 23, bei  $x = 2250 \text{ mm}$  und  $x = 3750 \text{ mm}$ ).

### 2.4.3 Vergleich der Längsspannungen $\sigma_{x,m}$

Im Gegensatz zu Geometrie 1 (vgl. Abbildung 24), bilden sich wie bei Geometrie 2, auch mit Geometrie 3 für den Innendruck Lastfall deutlich erkennbare Unterschiede zwischen den Modellen aus (vgl. Abbildung 50, grün).

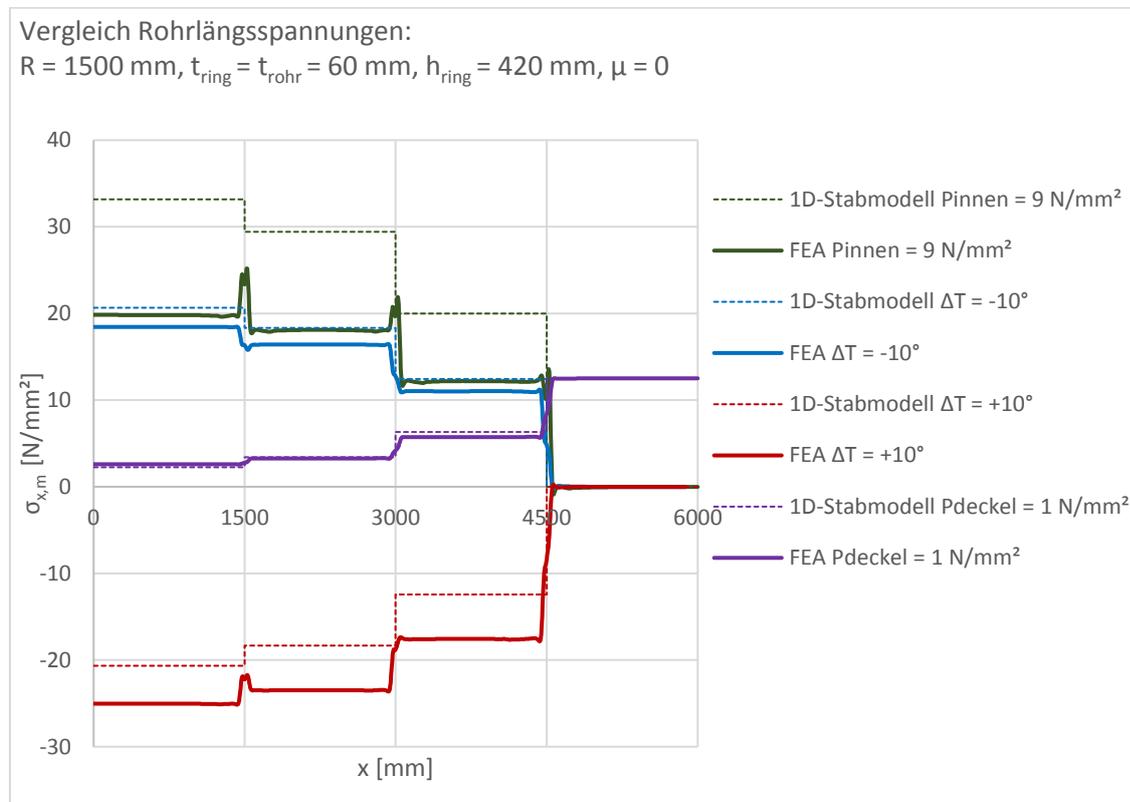


Abbildung 51 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Längsspannungen

Die übrigen Lastfälle zeigen in dieser Hinsicht, wie bereits für Geometrie 2, ebenfalls keinen weiteren Geometrieinfluss auf. Die Abweichung beim Lastfall Temperatur +10°C bleibt bestehen. Die Lastfälle ohne Umfangsspannung erzielen auch für Geometrie 3 eine nahezu deckungsgleiche Übereinstimmung (vgl. Abbildung 24 mit Abbildung 39 und Abbildung 51).

Die in Tabelle 7 zusammengefassten Schubringkräfte, werden aus der Längsspannungsdifferenz  $\Delta\sigma_{x,m}$  in Abbildung 51 ermittelt. Dabei wird  $\sigma_{x,m}$ , an den in Spalte 2 angegebenen Werten für den Abstand  $x$ , aus der FEA abgelesen und mit  $A_{\text{rohr}}$  wird die dortige Längsspannungsdifferenz  $\Delta\sigma_{x,m}$  in eine Kraft  $\Delta N$  umgerechnet. Die Spannungen werden damit in ausreichend großer Distanz zu den dortigen Schubringen ausgelesen, so dass lokale Spannungsspitzen im Rohr im Bereich der Schubringe ausgeschlossen werden und die Differenz der aufgenommenen Schubringkraft  $\Delta N$  entspricht.

x [mm]	Innendruck		Temperatur -10°		Temperatur +10°		Deckeldruck	
	$\Delta N$ [MN] 1D-Stab	$\Delta N$ [MN] FEA	$\Delta N$ [MN] 1D-Stab	$\Delta N$ [MN] FEA	$\Delta N$ [MN] 1D-Stab	$\Delta N$ [MN] FEA	$\Delta N$ [MN] 1D-Stab	$\Delta N$ [MN] FEA
<b>Schubring 1</b> 1300-1700	2,12	0,96	1,32	1,15	-1,32	-0,88	-0,66	-0,38
<b>Schubring 2</b> 2800-3200	5,34	3,29	3,32	3,02	-3,32	-3,34	-1,65	-1,38
<b>Schubring 3</b> 4300-4700	11,30	6,93	7,04	6,17	-7,04	-9,91	-3,49	-3,80

Tabelle 7 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Aufteilung der Normalkräfte auf die einzelnen Schubringe, (für FE-Analyse ermittelt aus Längsspannungsdifferenz), Werte in MN

Zum direkten Vergleich werden in Tabelle 8 die Längsverschiebungen dargestellt. In beiden Modellen werden diese an den Schubringen und Rohrende ausgegeben.

	x [mm]	u(x) [mm] Innendruck 1D-Stab	u(x) [mm] Innendruck FEA	u(x) [mm] Temperatur -10° 1D-Stab	u(x) [mm] Temperatur -10° FEA	u(x) [mm] Temperatur +10° 1D-Stab	u(x) [mm] Temperatur +10° FEA	u(x) [mm] Deckeldruck 1D-Stab	u(x) [mm] Deckeldruck FEA
<b>Schubring 1</b>	1500	0.05	0.13	0.03	0.05	-0.03	-0.04	-0.02	-0.02
<b>Schubring 2</b>	3000	0.13	0.26	0.08	0.12	-0.08	-0.10	-0.04	-0.04
<b>Schubring 3</b>	4500	0.28	0.43	0.17	0.23	-0.17	-0.20	-0.09	-0.09
<b>Rohrende</b>	6000	0.57	0.70	0.35	0.40	-0.35	-0.40	-0.18	-0.17

Tabelle 8 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Längsverschiebungen Zusammenfassung, Maße in mm

Auffällig beim Vergleich der Verschiebungen ist, dass der Lastfall Innendruck bei Geometrie 3 auch starke Differenzen in den Modellen zeigt (vgl. Tabelle 4 mit Tabelle 8). Interessant ist dabei, dass der Lastfall der Temperaturerhöhung um +10°C, trotz der Differenzen in den Längsspannungen/Längskräften, weitgehend gleiche Verschiebungen in beiden Modellen aufzeigt (siehe Tabelle 8, rot).

## 2.4.4 Kontaktspannungen

### 2.4.4.1 Geometrie 3, $\mu=0$ : Kontaktspannungen infolge Innendruck 9 N/mm<sup>2</sup>

In diesem Kapitel wird die Auflagerpressung für den Lastfall Innendruck  $p_{\text{innen}} = 9 \text{ N/mm}^2$  (vgl. Kapitel 1.5.1) in Geometrie 3 (vgl. Tabelle 1) dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse ist dabei in Kapitel 2.2.4.1 erläutert.

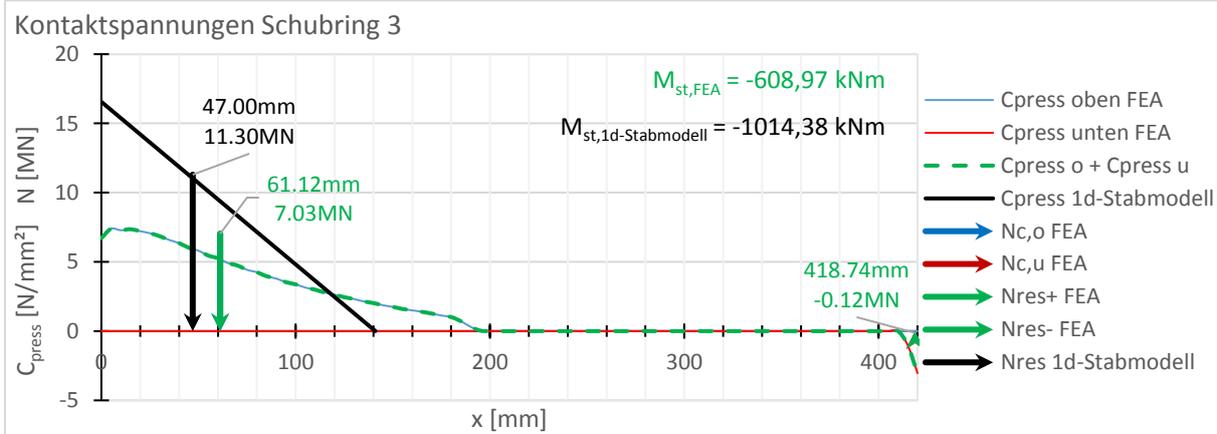
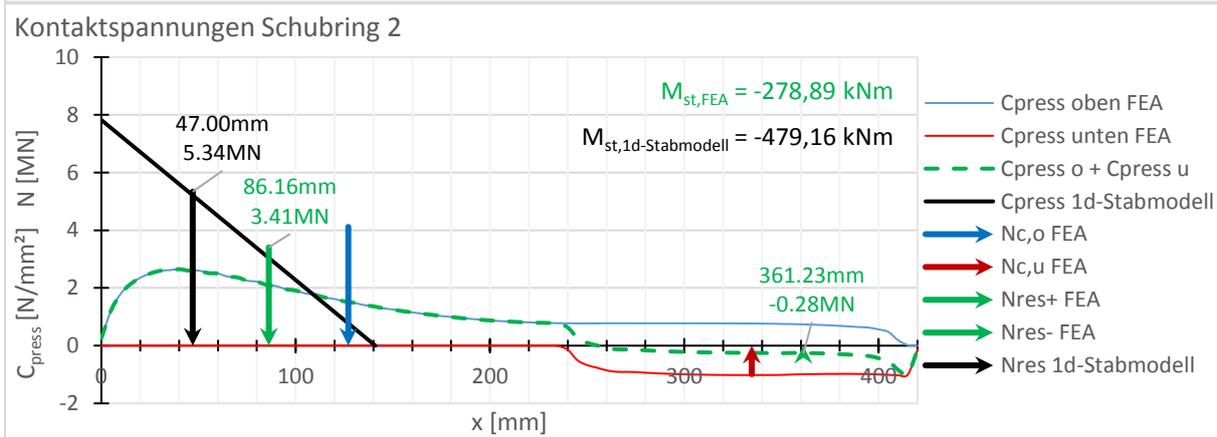
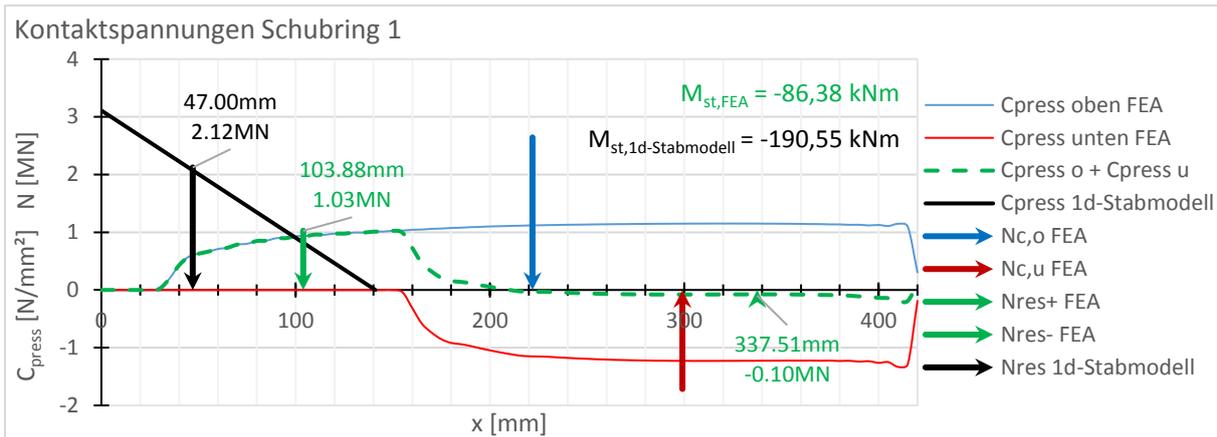


Abbildung 52 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen Innendruck 9 N/mm<sup>2</sup>

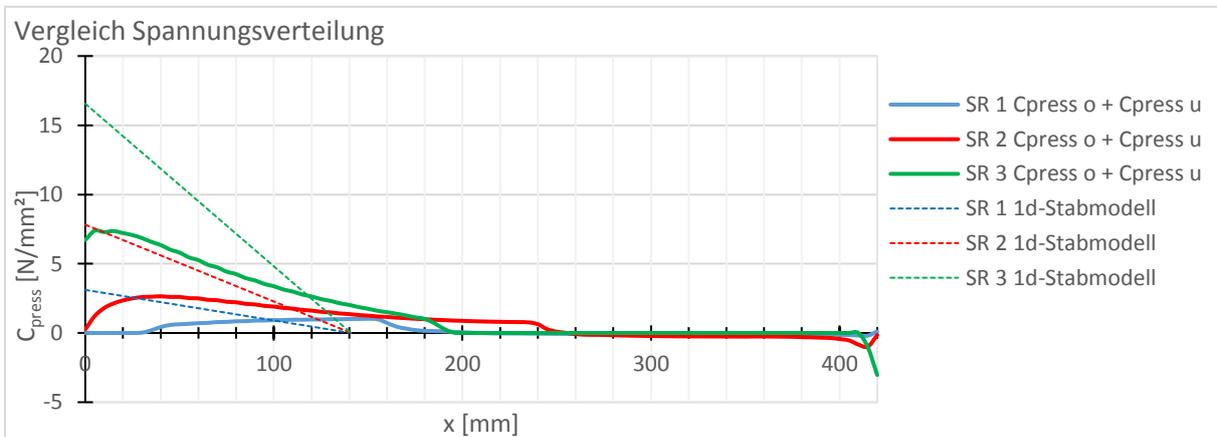


Abbildung 53 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen Zusammenfassung, Innendruck 9 N/mm<sup>2</sup>

Die weit über  $c_{el}$  hinaus auslaufende Pressungsverteilung ist für den Lastfall Innendruck charakteristisch und kann bereits bei Geometrie 1 in Kapitel 2.2.4.3 und Geometrie 2 in 2.3.4.1 festgestellt werden (vgl. Abbildung 29 und Abbildung 41 mit Abbildung 53). Einer umfangreichen Untersuchung, der Pressungsverteilungen und deren Auswirkung auf die Federsteifigkeit  $C^*$  ist Kapitel 3.5.1 gewidmet.

#### 2.4.4.2 Geometrie 3, $\mu=0$ : Kontaktspannungen infolge Deckeldruck $1 \text{ N/mm}^2$

In diesem Kapitel wird die Auflagerpressung für den Lastfall Deckeldruck  $p_{deckel} = 1 \text{ N/mm}^2$  (vgl. Kapitel 1.5.3) in Geometrie 3 (vgl. Tabelle 1) dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse ist dabei in Kapitel 2.2.4.1 erläutert.

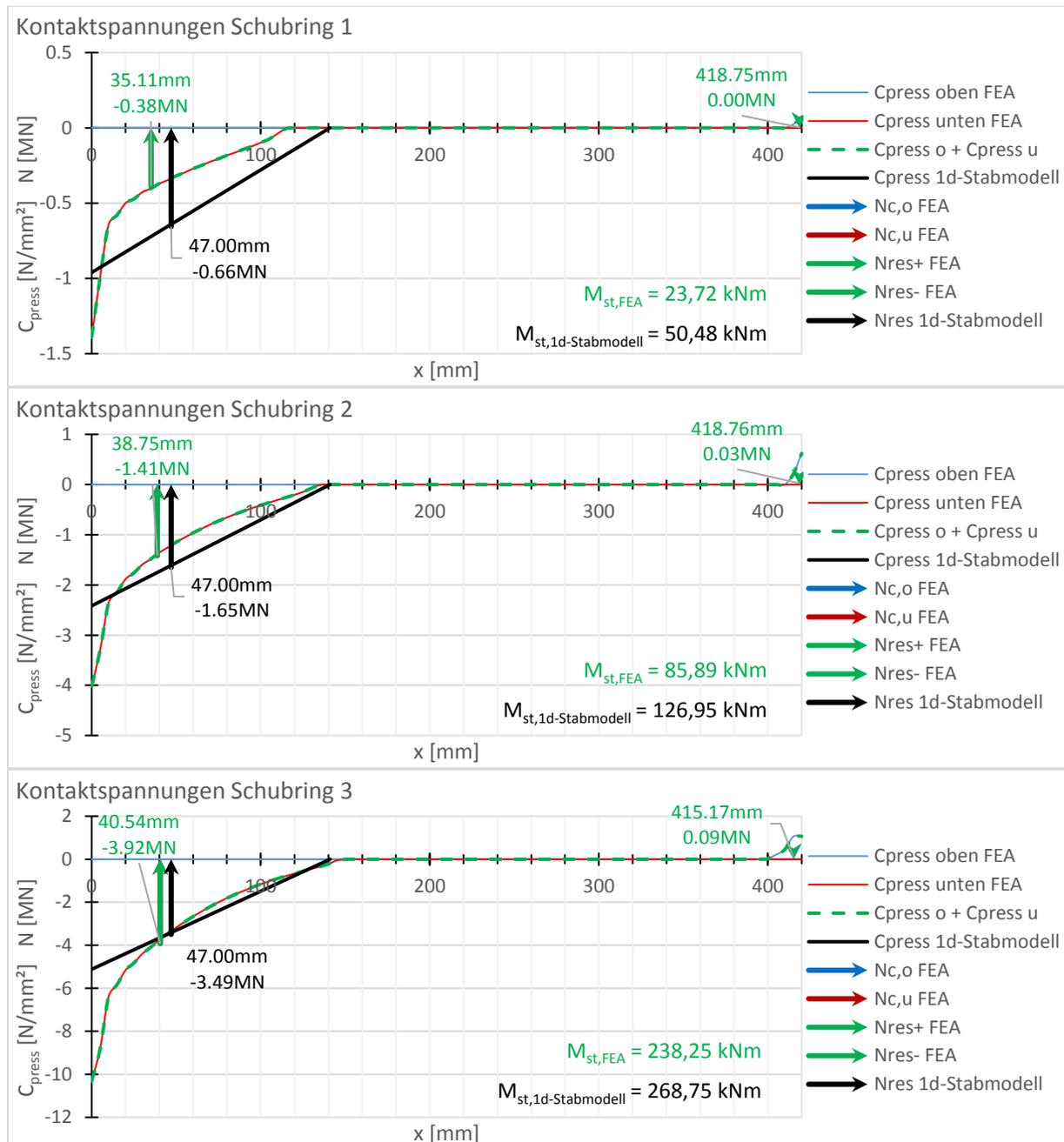


Abbildung 54 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen, Deckeldruck  $1 \text{ N/mm}^2$

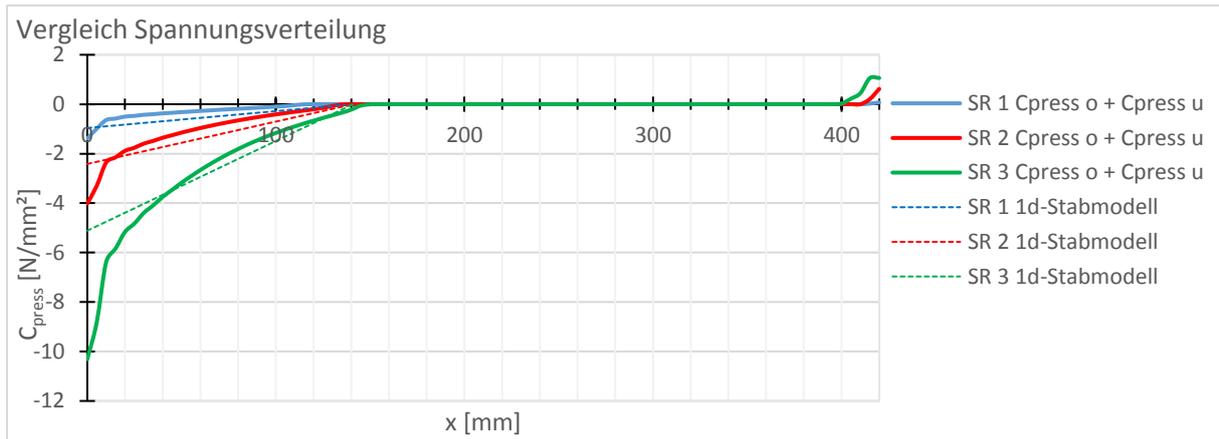


Abbildung 55 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen Zusammenfassung, Deckeldruck 1  $\text{N/mm}^2$

Die Pressungsverteilung stimmt bei einer Belastung mit Deckeldruck, auch für Geometrie 3, sehr gut mit der theoretischen Lage von 0 bis  $c_{el}$ , und dem angenommenen dreieckigen Verlauf überein. Einer umfangreichen Untersuchung, der Pressungsverteilungen und deren Auswirkung auf die Federsteifigkeit  $C^*$  ist Kapitel 3.5.2 gewidmet.

#### 2.4.4.3 Geometrie 3, $\mu=0$ : Kontaktspannungen infolge Temperatur $-10^\circ$

In diesem Kapitel wird die Auflagerpressung für den Lastfall Temperatur  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$  (vgl. Kapitel 1.5.2) in Geometrie 3 (vgl. Tabelle 1) dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse ist dabei in Kapitel 2.2.4.1 erläutert.

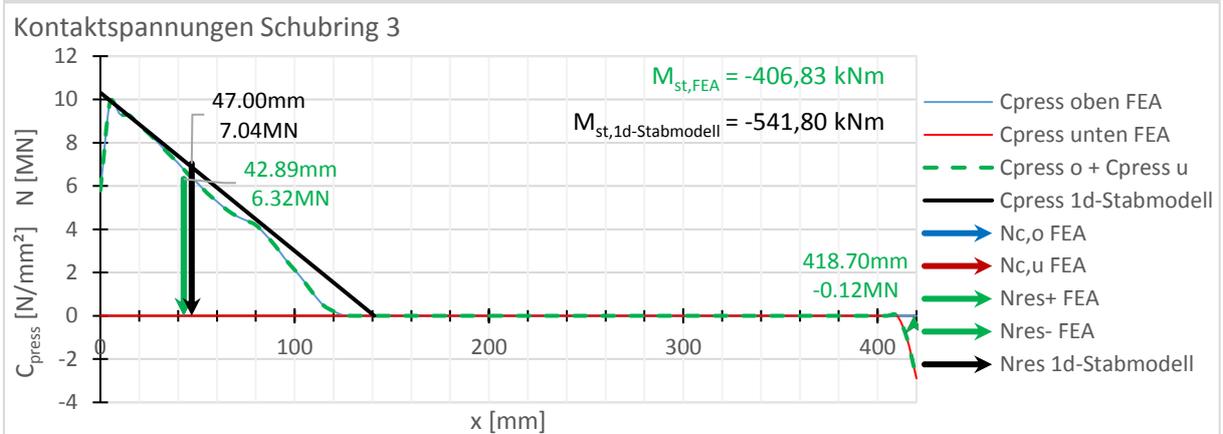
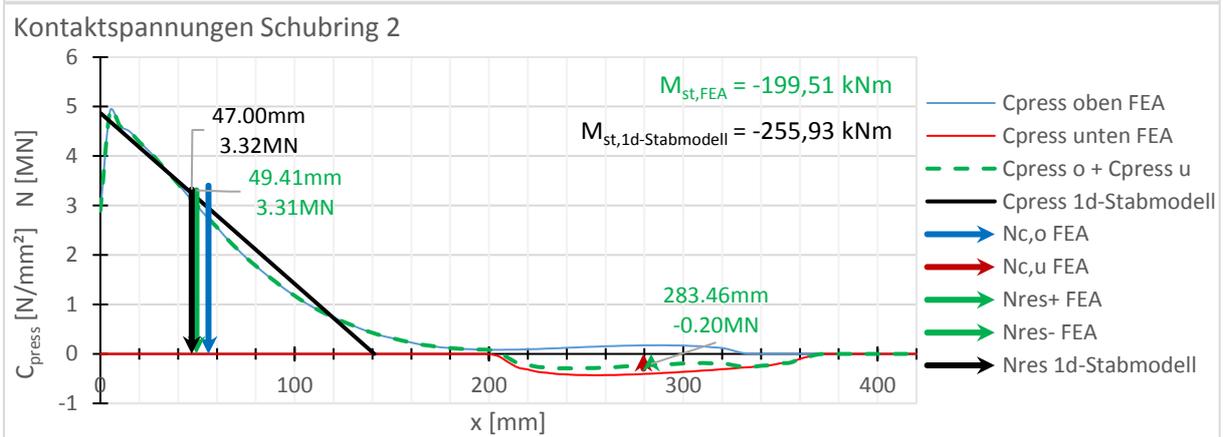
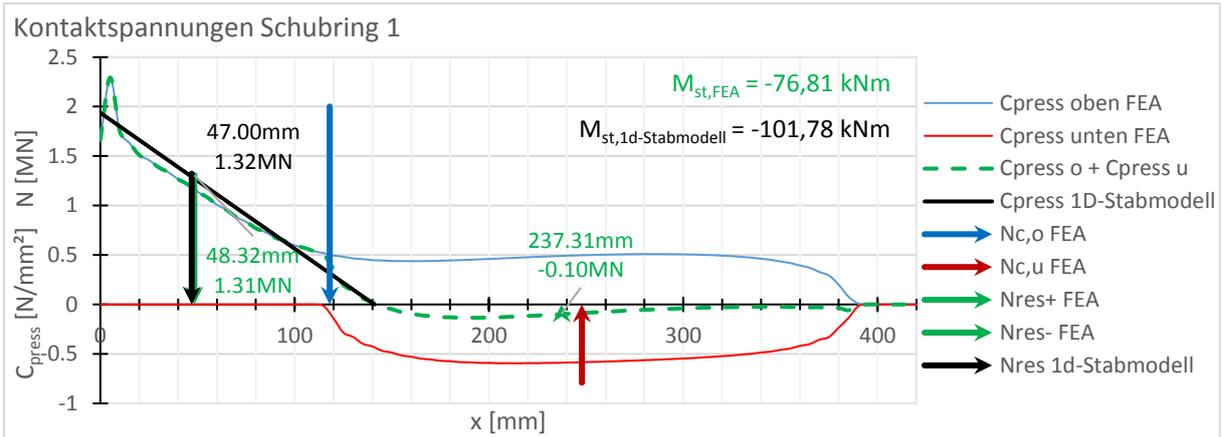


Abbildung 56 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen Temperatur  $-10^\circ$

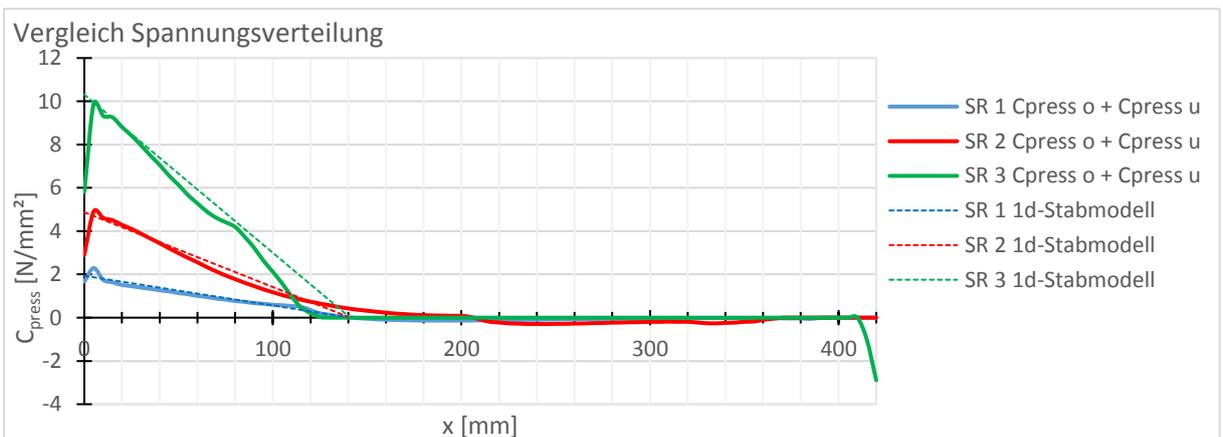


Abbildung 57 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen Zusammenfassung, Temperatur  $-10^\circ\text{C}$

Die Pressungsverteilung stimmt bei einer Abkühlung um  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$  nahezu perfekt mit der theoretischen Lage von 0 bis  $c_{el}$ , und dem angenommenen dreieckigen Verlauf überein. Einer umfangreichen Untersuchung der Pressungsverteilungen und deren Auswirkung auf die Federsteifigkeit  $C^*$  ist Kapitel 3.5.3 gewidmet.

#### 2.4.4.4 Geometrie 3, $\mu=0$ : Kontaktspannungen infolge Temperatur $+10^\circ$

In diesem Kapitel wird die Auflagerpressung für den Lastfall Temperatur  $\Delta T = +10^\circ\text{C}$  (vgl. Kapitel 1.5.2) in Geometrie 3 (vgl. Tabelle 1) dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse ist dabei in Kapitel 2.2.4.1 erläutert.

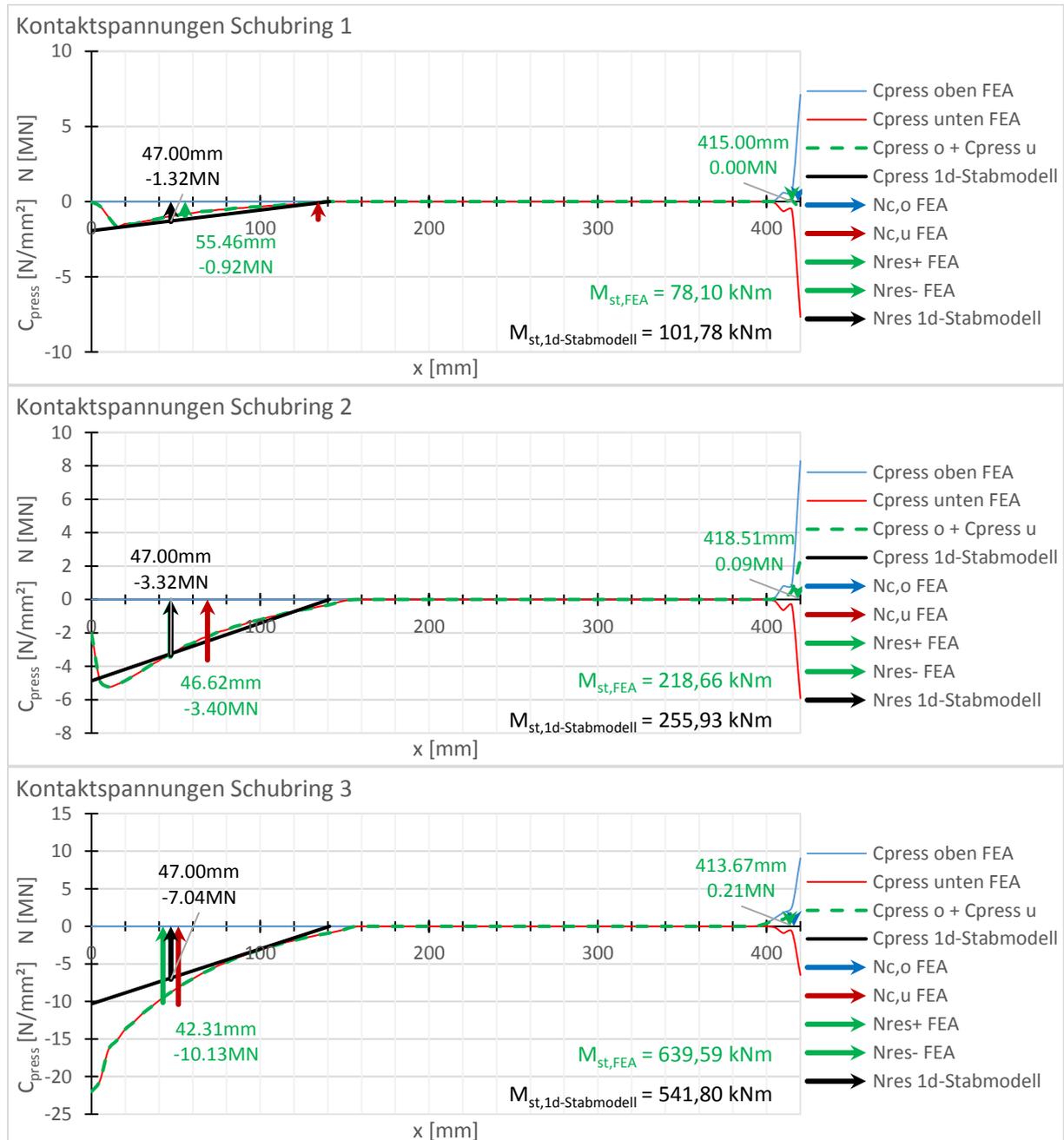


Abbildung 58 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen Temperatur  $+10^\circ$

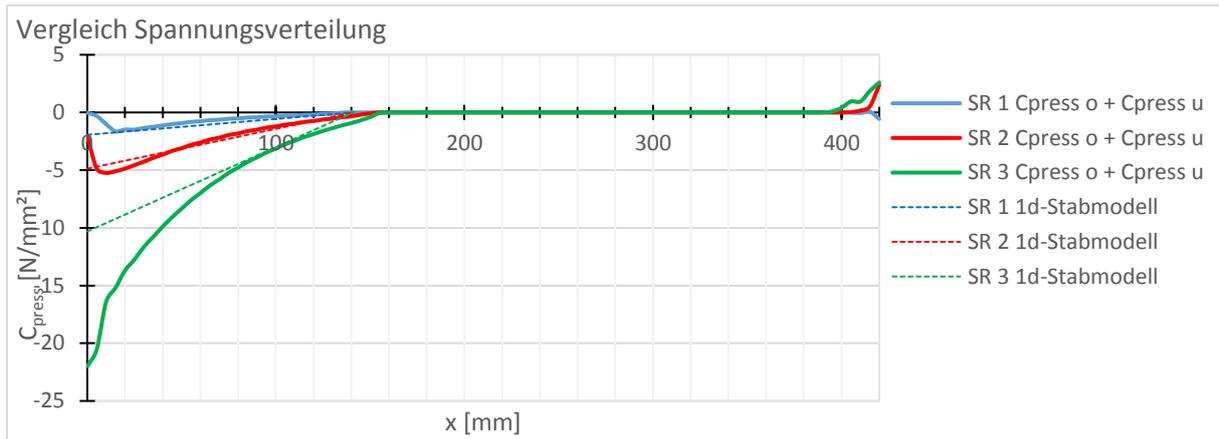


Abbildung 59 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Kontaktspannungen Zusammenfassung, Temperatur  $+10^\circ\text{C}$

Die Pressungsverteilung stimmt bei einer Erwärmung um  $\Delta T = +10^\circ\text{C}$  noch mit der theoretischen Lage von 0 bis  $c_{el}$  überein, jedoch wird der angenommene dreieckige Verlauf stark überschritten. Einer umfangreichen Untersuchung, der Pressungsverteilungen und deren Auswirkung auf die Federsteifigkeit  $C^*$ , ist Kapitel 3.5.4 gewidmet.

### 3 Weiterführende Untersuchung zu den Lastfällen Innendruck und Temperaturerhöhung

#### 3.1 Rohrsteifigkeitsmodifikation EA

Wie in den Auswertungen in Kapitel 2, auch anhand der Ergebnisse in Abbildung 21, Abbildung 36 und Abbildung 48 ersichtlich, zeigt das 1D-Stabmodell starke Abweichungen beim Lastfall der Temperaturerhöhung und des Innendrucks. Dem gegenüber steht eine bessere Treffsicherheit beim Lastfall der Temperaturverringerung und des Deckeldrucks.

Aufgrund der Abweichungen des 1D-Stabmodells zur FEA, werden für Innendrucklastfälle, in diesem und allen nachfolgenden Kapiteln, die ermittelten Mittelwerte der Umfangsspannungen  $\sigma_\varphi$  für jeden der 4 Stahlpanzerungen zwischen den Schubringen separat ermittelt. Die dadurch erzielte Verbesserung wird in diesem Kapitel als „1D-Stabmodell verfeinert“ bezeichnet und dargestellt. (vgl. Abbildung 64 für Geometrie 1)

Die Ergebnisse zeigen, dass die stärkeren Abweichungen bei Lastfällen vorkommen, bei welchen die Stahlpanzerung vom Betonmantel an seiner Verformung gehindert wird. Diese Tatsache stützt die Annahme, dass sich die Steifigkeit des Stahlrohrs zumindest als teilweise querdehnungsbehinderter Stahlbauteil verhält. In einer ersten Annahme wird dabei der E-Modul eines voll querdehnungsbehinderten Stahlquerschnittes angenommen. Für die Ermittlung von  $\Delta l$  aus dem Innendrucklastfall wird nun der E-Modul auf den Wert  $E^*$  erhöht.

$$E^* = \frac{E_s}{1-\nu^2} \quad \text{Gl. ( 16 )}$$

$$E^* = \frac{210\,000}{1-0,3^2} = 230\,770 \text{ N/mm}^2$$

In einem zweiten Schritt werden dann die Umfangsspannungen in Längsdehnungen  $\Delta l_{\text{neu}}$ , wie bereits in Kapitel 1.5.1 erläutert, mithilfe von Gleichung (9) ermittelt, jedoch wird hier der erhöhte E-Modul  $E^*$  verwendet. Exemplarisch wird der Rechenweg für den Innendrucklastfall  $p_{\text{innen}} = 9 \text{ N/mm}^2$  für die Stahlpanzerung 1 in Geometrie 1 vorgeführt.

$$\sigma_{\varphi, \text{mittel, Stahlpanzerung 1}} = 226,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta l_{\text{neu}} = e_{sr} * \frac{\nu * \sigma_{\varphi, \text{mittel}}}{E_s^*} \quad \text{aus Gl. ( 9 )}$$

$$\Delta l_{1, 1D\text{-Stabmodell verfeinert}} = 1500 * \frac{0,3 * 226,6}{210\,000} = 0,486 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{1, \text{neu}} = 1500 * \frac{0,3 * 226,6}{230\,770} = 0,442 \text{ mm}$$

Die aus diesem System ermittelten Längsänderungen  $\Delta l_{\text{neu}}$  werden nun wieder auf das ursprüngliche System mit der normalen Dehnsteifigkeit EA aufgebracht. Daraus resultiert ein neues Modell, welches in diesem Kapitel als „1D-Stabmodell modifizierte Dehnung“ bezeichnet wird. Die erhöhte Längssteifigkeit durch Querdehnungsbehinderung wird also in Form einer reduzierten Verkürzung  $\Delta l$  dargestellt.

**Die Temperaturerhöhung** wird dahingehend modifiziert, dass im 1D-Stabmodell die neue querdehnungsbehinderte Steifigkeit verwendet wird.

$$EA \rightarrow E^*A$$

Die dadurch erzielten neuen Ergebnisse werden in diesem Kapitel als „1D-Stabmodell modifizierte Rohrsteifigkeit“ bezeichnet und dargestellt.

## 3.2 Rohrsteifigkeitsuntersuchung Geometrie 1

### 3.2.1 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

Durch die Modifikation der Rohrsteifigkeiten, kann im Falle der Temperaturlast keine signifikante Verbesserung erzielt werden (vgl. Abbildung 60).

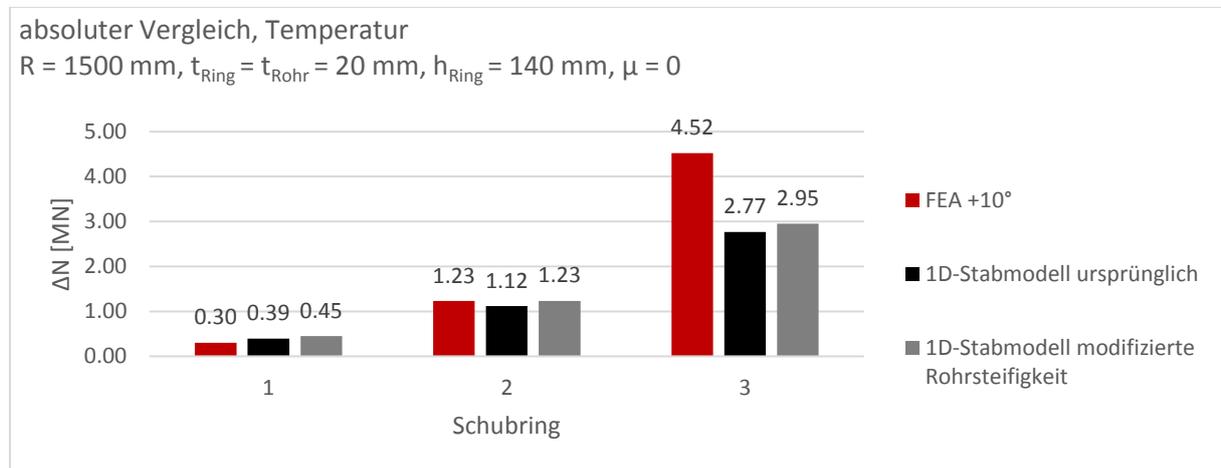


Abbildung 60 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Absoluter Vergleich Temperatur

Die Maßnahmen zur Verbesserung des 1D-Stabmodells im Bereich Innendruck, wurden für Geometrie 1, mit dem „1D-Stabmodell modifizierte Dehnung“, sogar zu stark modifiziert. Die Ergebnisse unterschreiten dabei beispielsweise für Schubring 3  $\Delta N_{\text{SR3}}$  den Sollwert von 7,12 MN und erreichen lediglich noch 6,71 MN (vgl. Abbildung 61).

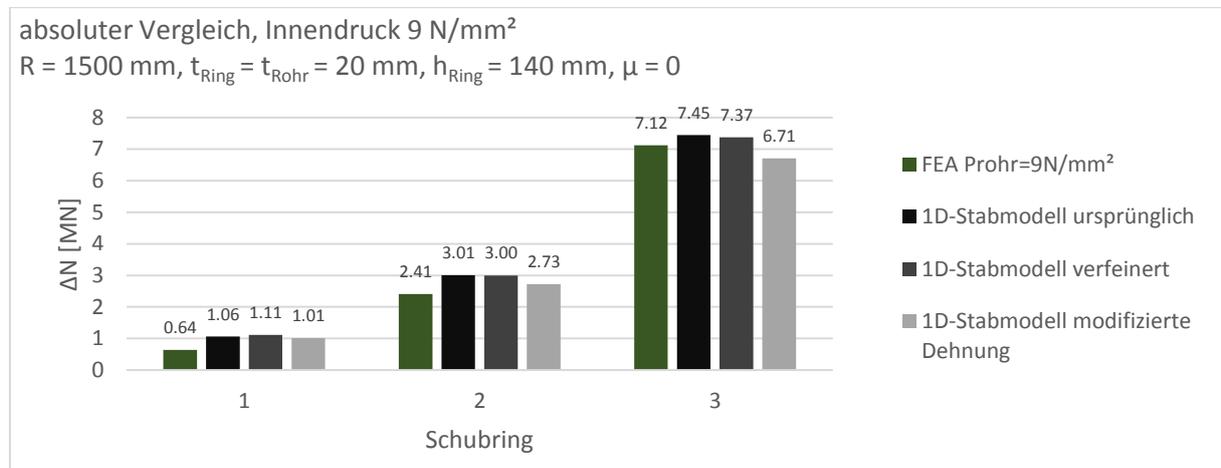


Abbildung 61 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck

### 3.2.2 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

Die relative Aufteilung der Schubringkräfte wird durch die Verbesserungsmaßnahmen praktisch nicht beeinflusst, da die Belastungssituation nahezu ident bleibt und die Steifigkeitsverhältnisse im System sonst gleichbleiben. Lediglich die verfeinerte Berechnung der Mittelwerte für alle 4 Stahlpanzerungen zeigt hier einen geringfügigen Einfluss (vgl. Abbildung 62 und Abbildung 63).

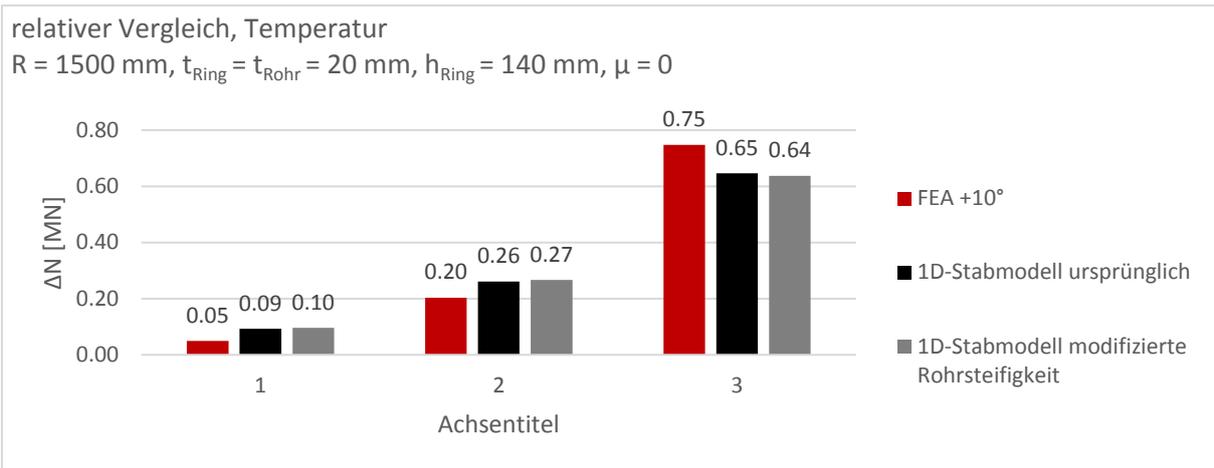


Abbildung 62 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Relativer Vergleich der Schubringkräfte, Temperatur

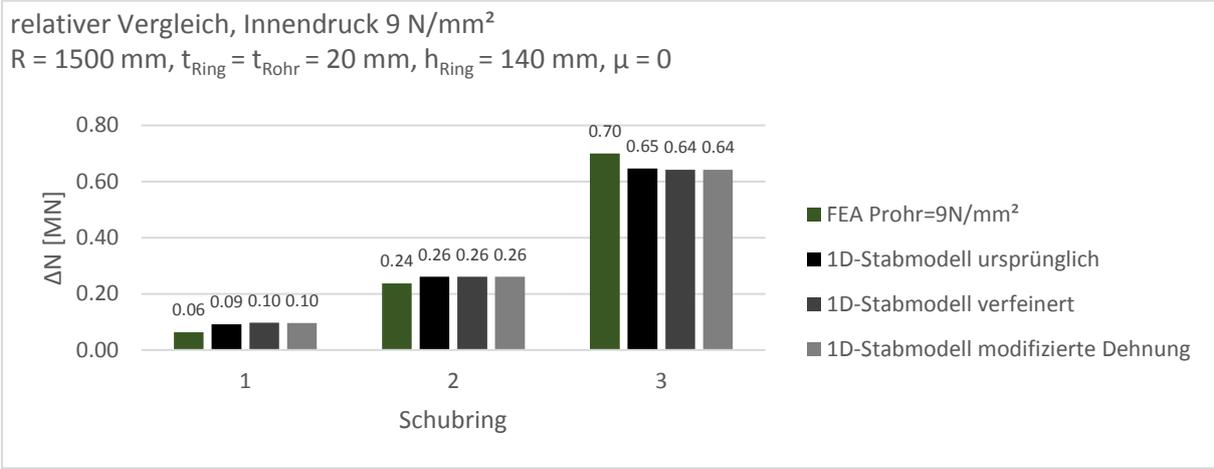


Abbildung 63 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Relativer Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck

### 3.2.3 Umfangsspannungen im Vergleich

Anhand von Abbildung 64 werden die neuen Mittelwerte („Mittelwert verfeinert“) in den Umfangsspannungen sichtbar. Für jede der vier Stahlpanzerungen zwischen den Schubringen wird nun ein eigener Mittelwert errechnet und führt dadurch zu vier verschiedenen Längenänderungen  $\Delta l_1$ ,  $\Delta l_2$ ,  $\Delta l_3$  und  $\Delta l_4$  (vgl. Abbildung 13).

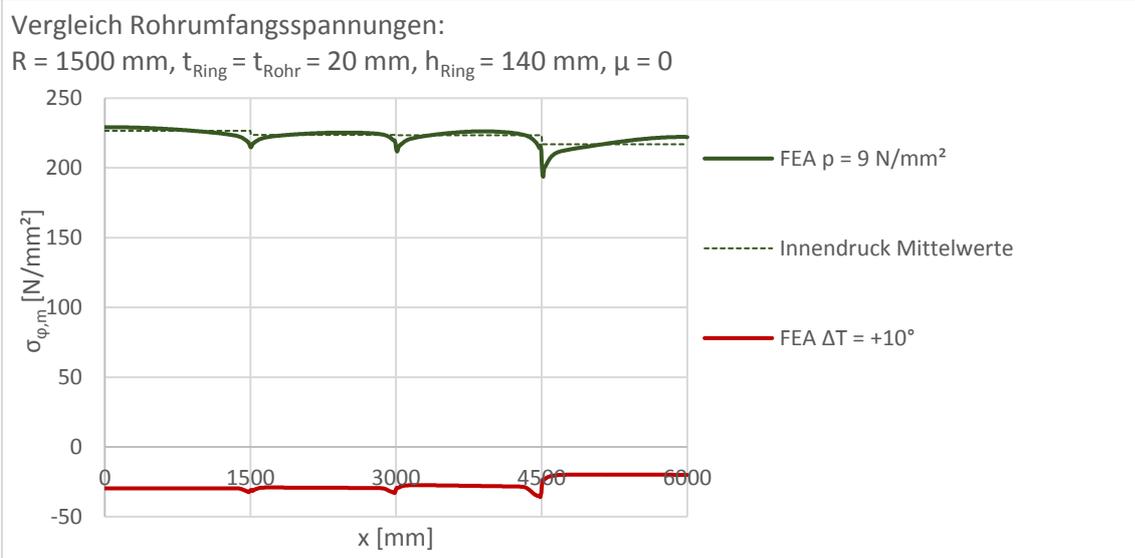


Abbildung 64 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Rohrumfangsspannungen im Vergleich

### 3.2.4 Längsspannungen im Vergleich

Die Vorgehensweise über die Anpassungen am 1D-Stabmodell ist im Kapitel 3.1 genau erläutert. Anhand der Längsspannungen in Abbildung 65 wird die Verbesserung schrittweise dargestellt und mit dem ursprünglichen 1D-Stabmodell, ohne querdehnungsbehinderten Querschnitt, verglichen (vgl. Abbildung 24 und Kapitel 2.2.3).

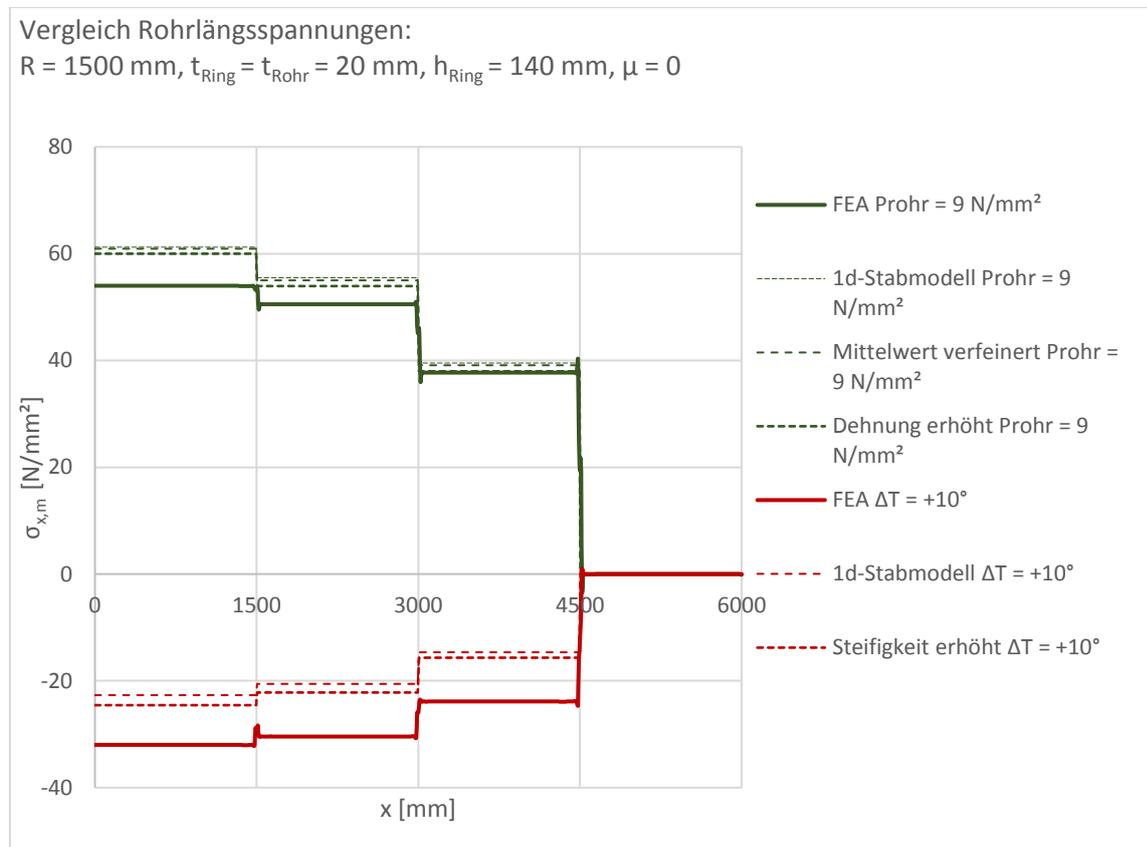


Abbildung 65 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Rohrlängsspannungen im Vergleich

Die vorgenommenen Modifikationen am 1D-Stabmodell, zeigen anhand der Längsspannungsverteilung nur eine unzureichende Annäherung an die Soll-Linie der FEA auf. Lediglich der Lastfall Innendruck für Geometrie 1, zeigt für die Stahlpanzerung 3 ( $3000 < x < 4500$ ) eine ausreichende Modifikation (vgl. Abbildung 65).

## 3.3 Rohrsteifigkeitsuntersuchung Geometrie 2

### 3.3.1 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

Durch die Modifikation der Rohrsteifigkeiten, kann im Falle der Temperaturlast, auch für Geometrie 2 keine signifikante Verbesserung erzielt werden (vgl. Abbildung 60 mit Abbildung 66).

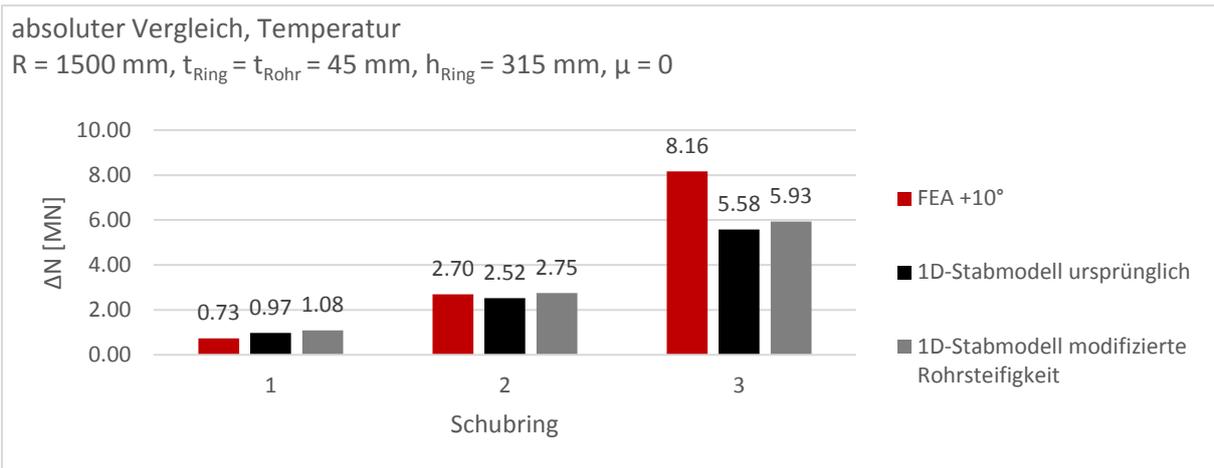


Abbildung 66 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Temperatur

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit Geometrie 1, kann für den Innendruck Lastfall mit Geometrie 2 keine ausreichende Modifikation mehr erreicht werden (vgl. Abbildung 61 mit Abbildung 67).

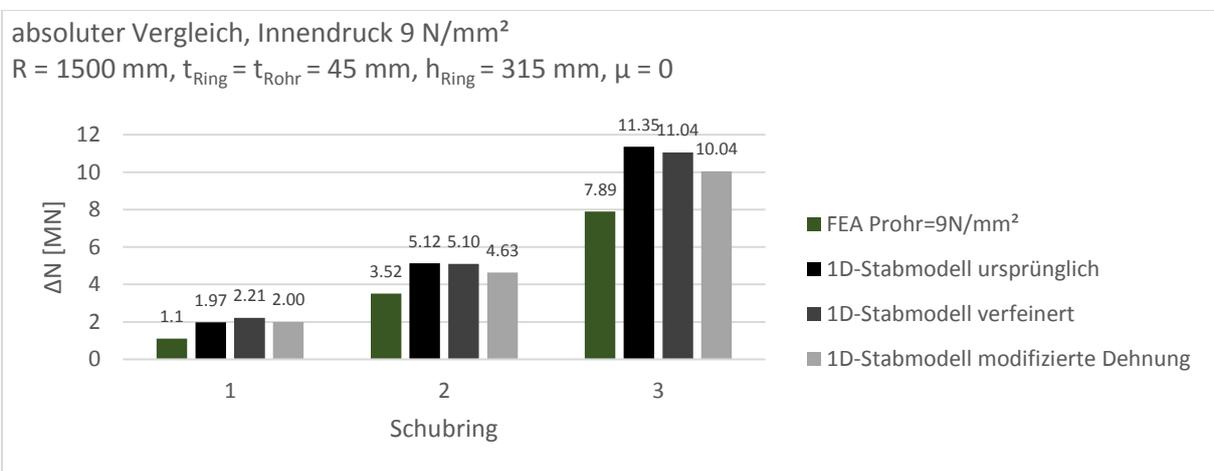


Abbildung 67 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck

Anzumerken ist hierbei, dass der Lastfall Innendruck für Geometrie 1, bereits ohne Modifikation des 1D-Stabmodells, eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der FEA hatte (vgl. Abbildung 61, Schubring 3: 7,12 – 7,45 MN), wohingegen bei Geometrie 2 von Grund auf größere Abweichungen zu bewältigen gewesen sind (vgl. Abbildung 67, Schubring 3: 7,89 – 11,35 MN).

Während bei Geometrie 1 im Falle des Innendrucks (vgl. Abbildung 61) noch eine Lösung zwischen freiem oder querdehnungsbehindertem Rohr gefunden werden könnte, ist dies bei Geometrie 2 und später auch bei Geometrie 3 (vgl. Abbildung 67 und Abbildung 73) nicht mehr der Fall.

### 3.3.2 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

Die relative Aufteilung der Schubringkräfte wird durch die Verbesserungsmaßnahmen praktisch nicht beeinflusst, da die Belastungssituation nahezu ident bleibt und die Steifigkeitsverhältnisse im System sonst gleichbleiben. Lediglich die verfeinerte Berechnung der Mittelwerte für alle vier Stahlpanzerungen zeigt hier einen geringfügigen Einfluss (vgl. Abbildung 68 und Abbildung 69).

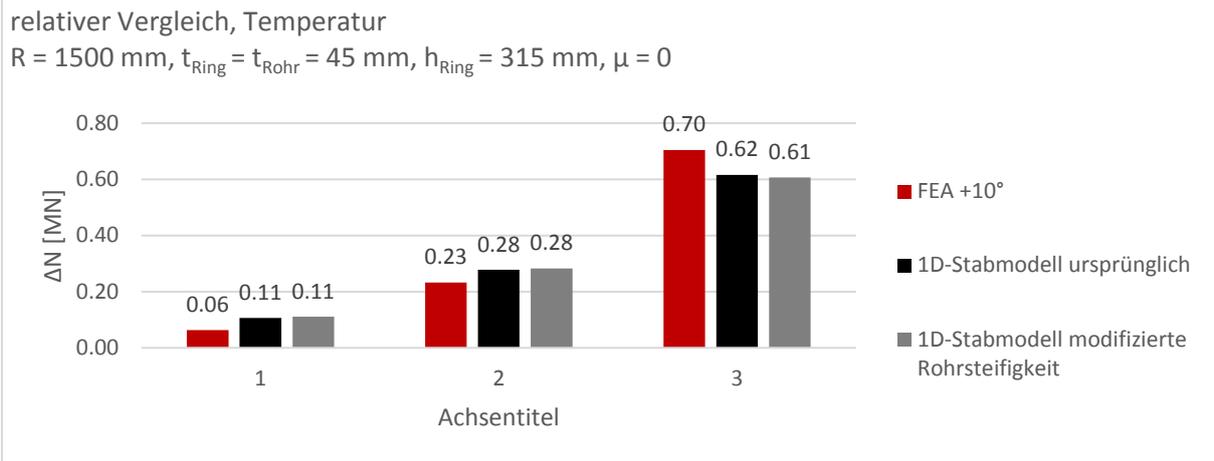


Abbildung 68 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Relativer Vergleich der Schubringkräfte, Temperatur

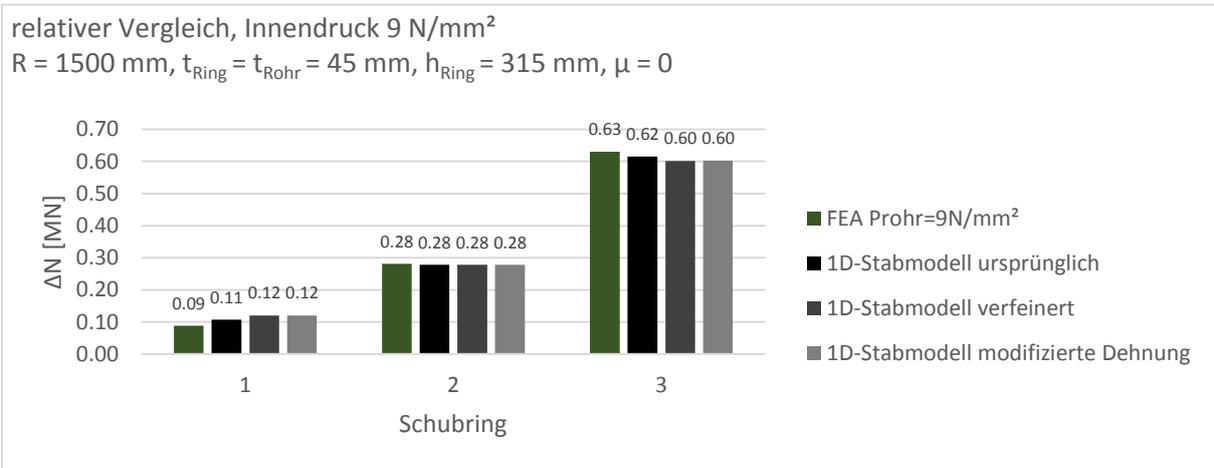


Abbildung 69 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Relativer Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck

### 3.3.3 Umfangsspannungen im Vergleich

Anhand von Abbildung 70 werden die neuen Mittelwerte („Mittelwert verfeinert“) in den Umfangsspannungen sichtbar. Für jede der vier Stahlpanzerungen zwischen den Schubringen wird nun ein eigener Mittelwert errechnet und führt dadurch zu vier verschiedenen Längenänderungen  $\Delta l_1$ ,  $\Delta l_2$ ,  $\Delta l_3$  und  $\Delta l_4$  (vgl. Abbildung 13).

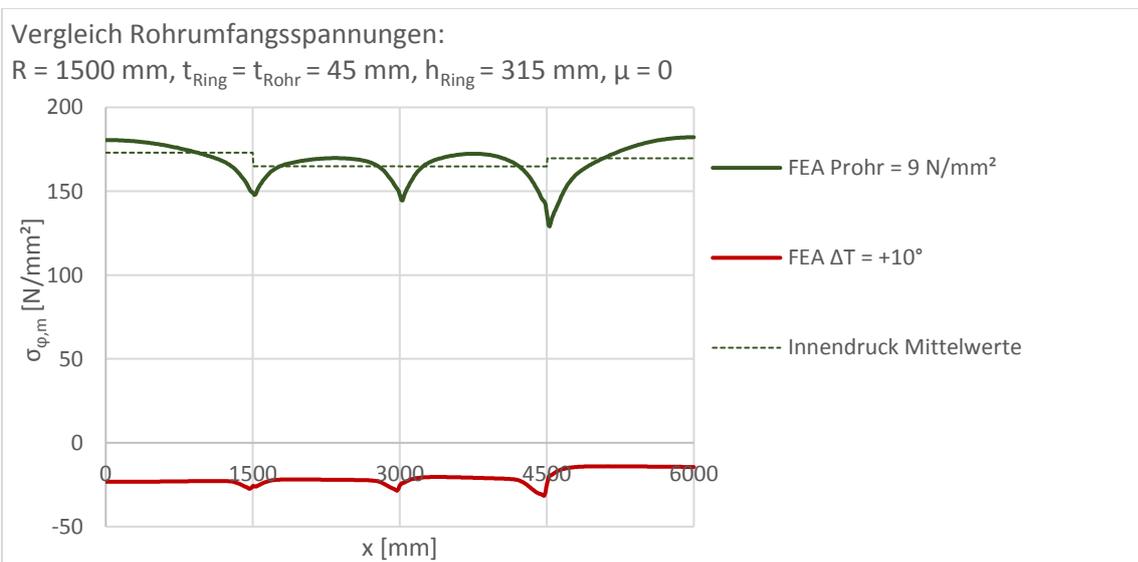


Abbildung 70 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Rohrumfangsspannungen im Vergleich

### 3.3.4 Längsspannungen im Vergleich

Die Vorgehensweise über die Anpassungen am 1D-Stabmodell ist im Kapitel 3.1 genau erläutert. Anhand der Längsspannungen in Abbildung 71 wird die Verbesserung schrittweise dargestellt und mit dem ursprünglichen 1D-Stabmodell, ohne querdehnungsbehinderten Querschnitt, verglichen (vgl. Abbildung 39 und Kapitel 2.3.3).

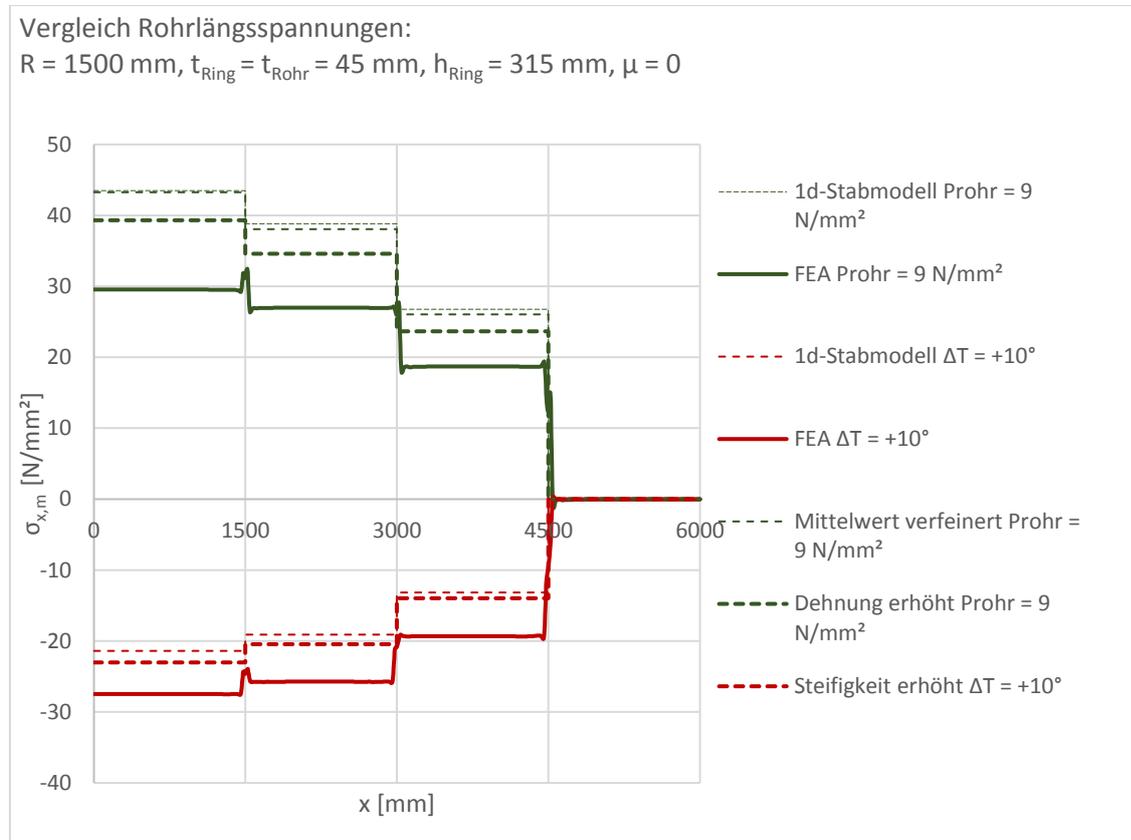


Abbildung 71 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Rohrlängsspannungen im Vergleich

Für Geometrie 2 können keine ausreichenden Modifikationen erzielt werden. Die Soll-Linie der FEA kann an keiner Stelle unterschritten oder erreicht werden (siehe Abbildung 71).

## 3.4 Rohrsteifigkeitsuntersuchung Geometrie 3

### 3.4.1 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

Durch die Modifikation der Rohrsteifigkeiten, kann im Falle der Temperaturlast, auch für Geometrie 3 keine signifikante Verbesserung erzielt werden (vgl. Abbildung 60 und Abbildung 66 mit Abbildung 72).

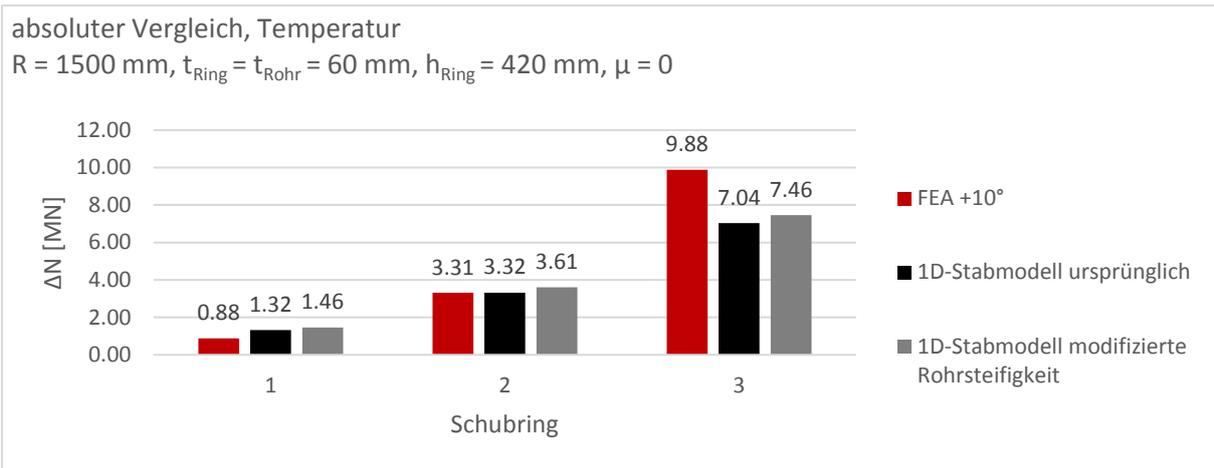


Abbildung 72 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Temperatur

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit Geometrie 1, kann für den Innendruck Lastfall mit Geometrie 3, wie auch bei Geometrie 2, keine ausreichende Modifikation mehr erreicht werden (vgl. Abbildung 61 und Abbildung 67 mit Abbildung 73).

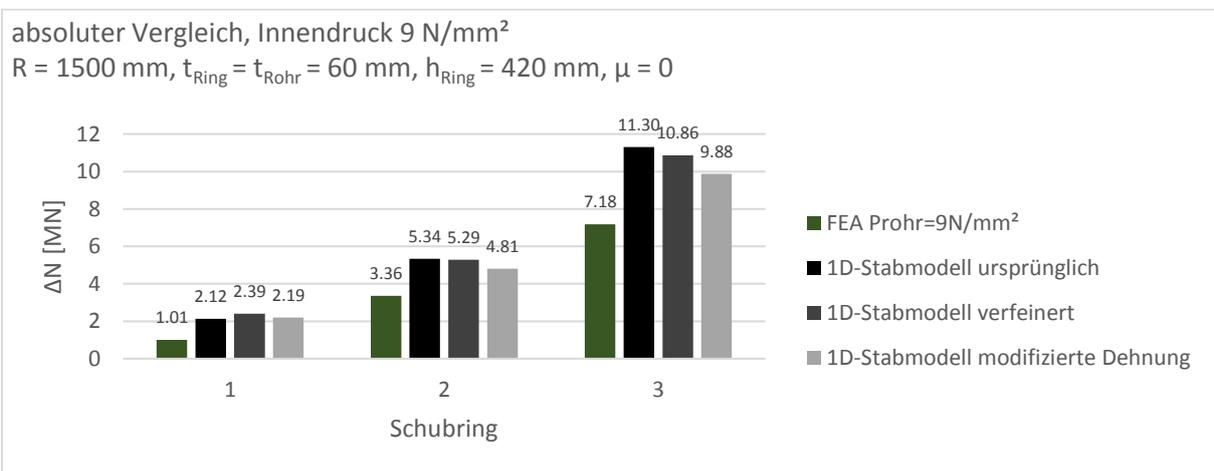


Abbildung 73 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck

Anzumerken ist hierbei, dass der Lastfall Innendruck für Geometrie 1, bereits ohne Modifikation des 1D-Stabmodells, eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der FEA hatte (vgl. Abbildung 61, Schubring 3: 7,12 – 7,45 MN), wohingegen bei Geometrie 3, wie auch bei Geometrie 2, von Grund auf größere Abweichungen zu bewältigen sind (vgl. Abbildung 73, Schubring 3: 7,18 – 11,30 MN).

Während bei Geometrie 1 im Falle des Innendrucks (vgl. Abbildung 61) noch eine Lösung zwischen freiem oder querdehnungsbehindertem Rohr gefunden werden könnte, ist dies bei Geometrie 3 und (siehe Abbildung 73), wie vorangehend auch für Geometrie 2 (vgl. Abbildung 67), nicht mehr der Fall.

### 3.4.2 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

Die relative Aufteilung der Schubringkräfte wird durch die Verbesserungsmaßnahmen praktisch nicht beeinflusst, da die Belastungssituation nahezu ident bleibt und die Steifigkeitsverhältnisse im System sonst gleichbleiben. Lediglich die verfeinerte Berechnung der Mittelwerte für alle vier Stahlpanzerungen zeigt hier einen geringfügigen Einfluss (vgl. Abbildung 74 und Abbildung 75).

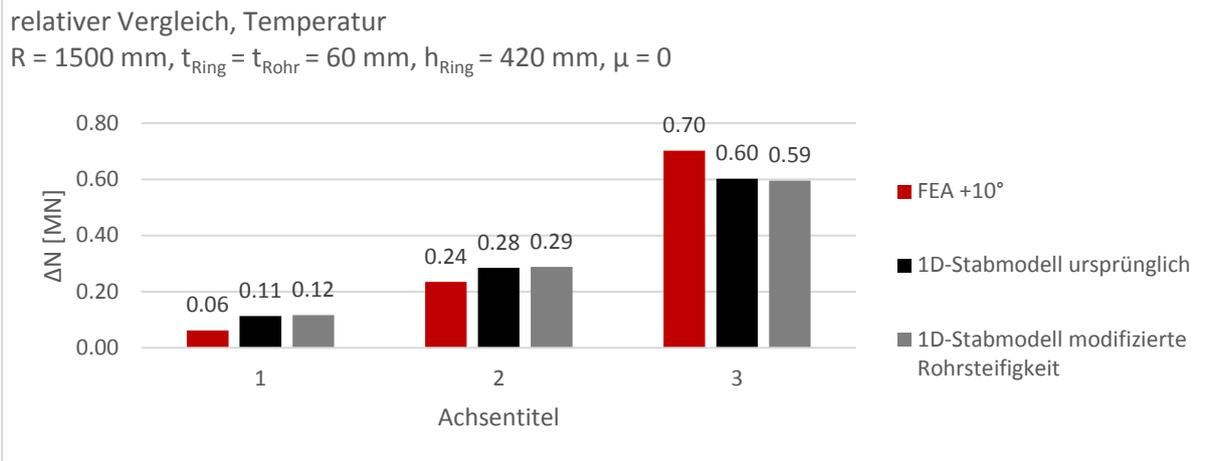


Abbildung 74 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Relativer Vergleich der Schubringkräfte, Temperatur

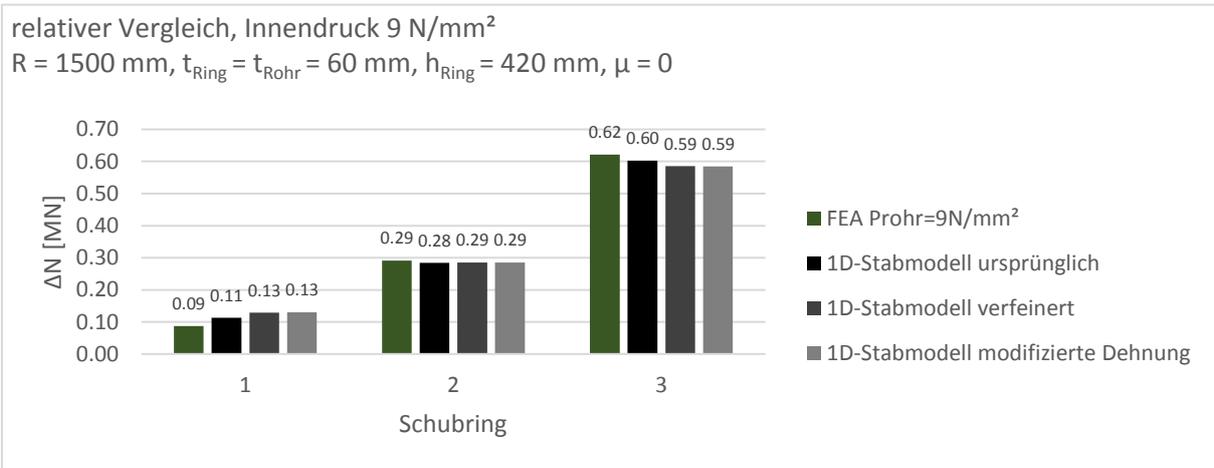


Abbildung 75 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Relativer Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck

### 3.4.3 Umfangsspannungen im Vergleich

Anhand von Abbildung 76 werden die neuen Mittelwerte („Mittelwert verfeinert“) in den Umfangsspannungen sichtbar. Für jede der vier Stahlpanzerungen zwischen den Schubringen wird nun ein eigener Mittelwert errechnet und führt dadurch zu vier verschiedenen Längenänderungen  $\Delta l_1$ ,  $\Delta l_2$ ,  $\Delta l_3$  und  $\Delta l_4$  (vgl. Abbildung 13).

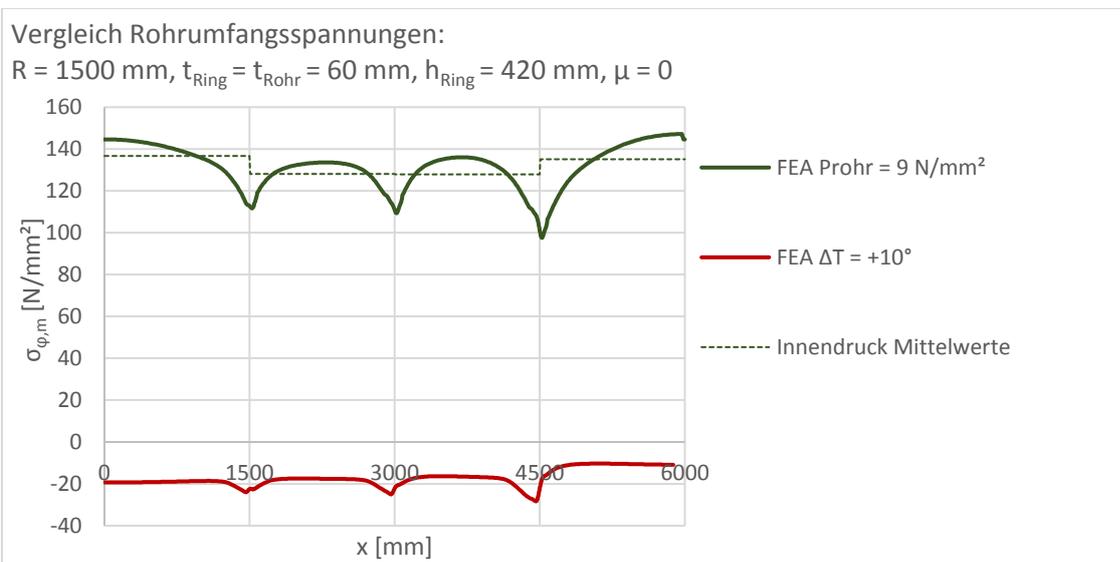


Abbildung 76 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Umfangsspannungen im Vergleich

### 3.4.4 Längsspannungen im Vergleich

Die Vorgehensweise über die Anpassungen am 1D-Stabmodell ist im Kapitel 3.1 genau erläutert. Anhand der Längsspannungen in Abbildung 77 wird die Verbesserung schrittweise dargestellt und mit dem ursprünglichen 1D-Stabmodell, ohne querdehnungsbehinderten Querschnitt, verglichen (vgl. Abbildung 51).

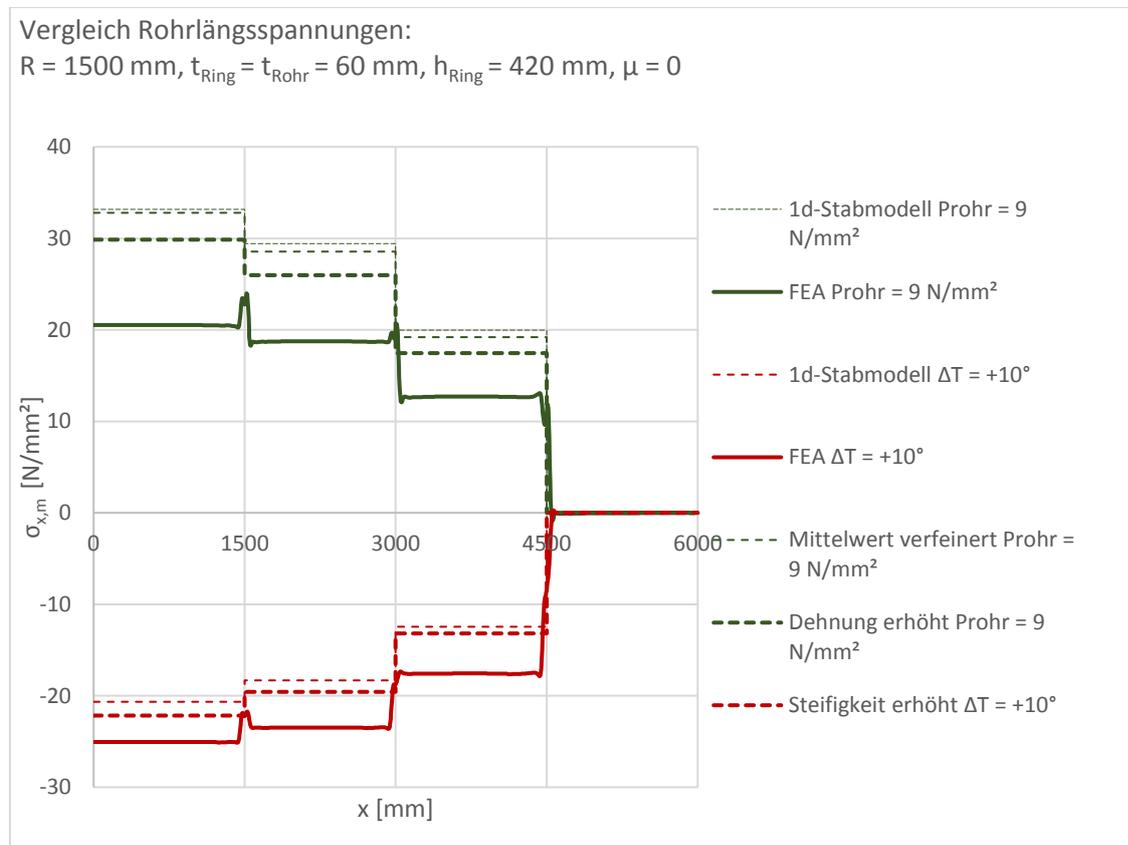


Abbildung 77 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Längsspannungen im Vergleich

Für Geometrie 3 können keine ausreichenden Modifikationen erzielt werden. Die Soll-Linie der FEA kann an keiner Stelle unterschritten oder erreicht werden (siehe Abbildung 77).

### 3.4.5 Fazit zur Steifigkeitsmodifikation des Rohres

Mit Ausnahme des Lastfalls Innendruck mit  $p_{\text{innen}} = 9$  N/mm<sup>2</sup> bei Geometrie 1, (vgl. Abbildung 61) konnte in keinem Fall eine ausreichende Verbesserung erzielt werden. Bei allen übrigen Lastfällen und Geometrien kann die Abweichung der Ergebnisse nicht auf eine alleinige Querdehnungsbehinderung der Stahlpanzerung zurückgeführt werden.

Unabhängig von der Rohrsteifigkeitsmodifikation, ist aus den Ergebnissen der 2 Lastfälle abschätzbar, dass im Falle des Innendrucks eine geringere Schubringsteifigkeit  $C^*$  erforderlich wäre und umgekehrt im Falle der Temperaturerhöhung eine höhere Schubringsteifigkeit vorhanden sein müsste, um die Ergebnisse der FEA korrekt darstellen zu können.

### 3.5 Schubringsteifigkeitsmodifikation $C^*$ für die Lastfälle Innendruck, Temperaturänderung und Deckeldruck

Wie aus dem Fazit (Kapitel 3.4.5) der Rohrsteifigkeitsmodifikationen in Kapitel 3.1 hervorgeht, ist eine Federsteifigkeitsmodifikation der Schubringe erforderlich um eine bessere Übereinstimmung zwischen den Modellen (1D-Stabmodell und FEA) finden zu können.

Aus den Ergebnissen der Kontaktspannungen aus Kapitel 2 geht hervor, dass die Kontaktspannungen der Schubringe, für den Lastfall Innendruck und Erwärmung ( $+\Delta T$ ), durchaus von der theoretischen dreiecksförmigen Kontaktspannung (vgl. Abbildung 8) des 1D-Stabmodells abweicht.

Vergleicht man jeweils die Kontaktspannungen miteinander, so zeigt sich ein charakteristischer Verlauf, welcher in erster Linie vom Lastfall und nicht der Rohrgeometrie abhängt (vgl. Abbildung 79, Abbildung 80, Abbildung 81 und Abbildung 82).

Auch wenn, aufgrund der größeren Abweichung, nur die Lastfälle Innendruck und Temperaturerhöhung von größerem Interesse sind, werden in diesem Kapitel jedoch alle Lastfälle aus Kapitel 2 näher untersucht, was den Lastfall Deckeldruck und Temperaturverringung ( $-\Delta T$ ) mit einschließt.

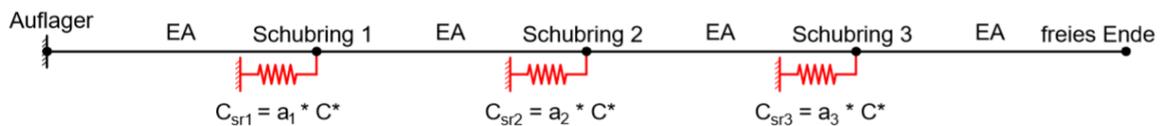


Abbildung 78 Skizze: modifizierte Schubringsteifigkeiten im 1D-Stabmodell

Für die reine Federsteifigkeitsuntersuchung der Schubringe, wird die nicht modifizierte Stabsteifigkeit EA zwischen den Schubringen verwendet. Das 1D Stabmodell wird dahingehend untersucht, dass für jeden Schubring ein Vorfaktor  $a_i$  rückgerechnet wird. Die so ermittelten Federsteifigkeiten dienen damit als Soll-Werte für das 1D-Stabmodell, um die Schubringkräfte  $\Delta N$  der FEA genau abbilden zu können. Die in diesem Kapitel ermittelten Ergebnisse sollten in weiterer Folge für eine neue oder modifizierte Theorie zur Ermittlung der Federsteifigkeiten dienen.

#### 3.5.1 Erforderliche Schubringsteifigkeiten für Innendruck $9 \text{ N/mm}^2$

Zu einer direkten Vergleichbarkeit werden in diesem Kapitel die ermittelten Pressungsverteilungen der Schubringe, anhand des Lastfalls Innendruck  $p_{\text{innen}} = 9 \text{ N/mm}^2$ , dargestellt. Dabei werden jeweils die zusammengefassten Kontaktspannungen der drei verschiedenen Geometrien zusammengefasst (vgl. Abbildung 29, Abbildung 41 und Abbildung 53) und übersichtlich miteinander dargestellt, um einen guten Einblick in die qualitativen Verläufe der Belastungssituation am Schubring zu erhalten (siehe Abbildung 79).

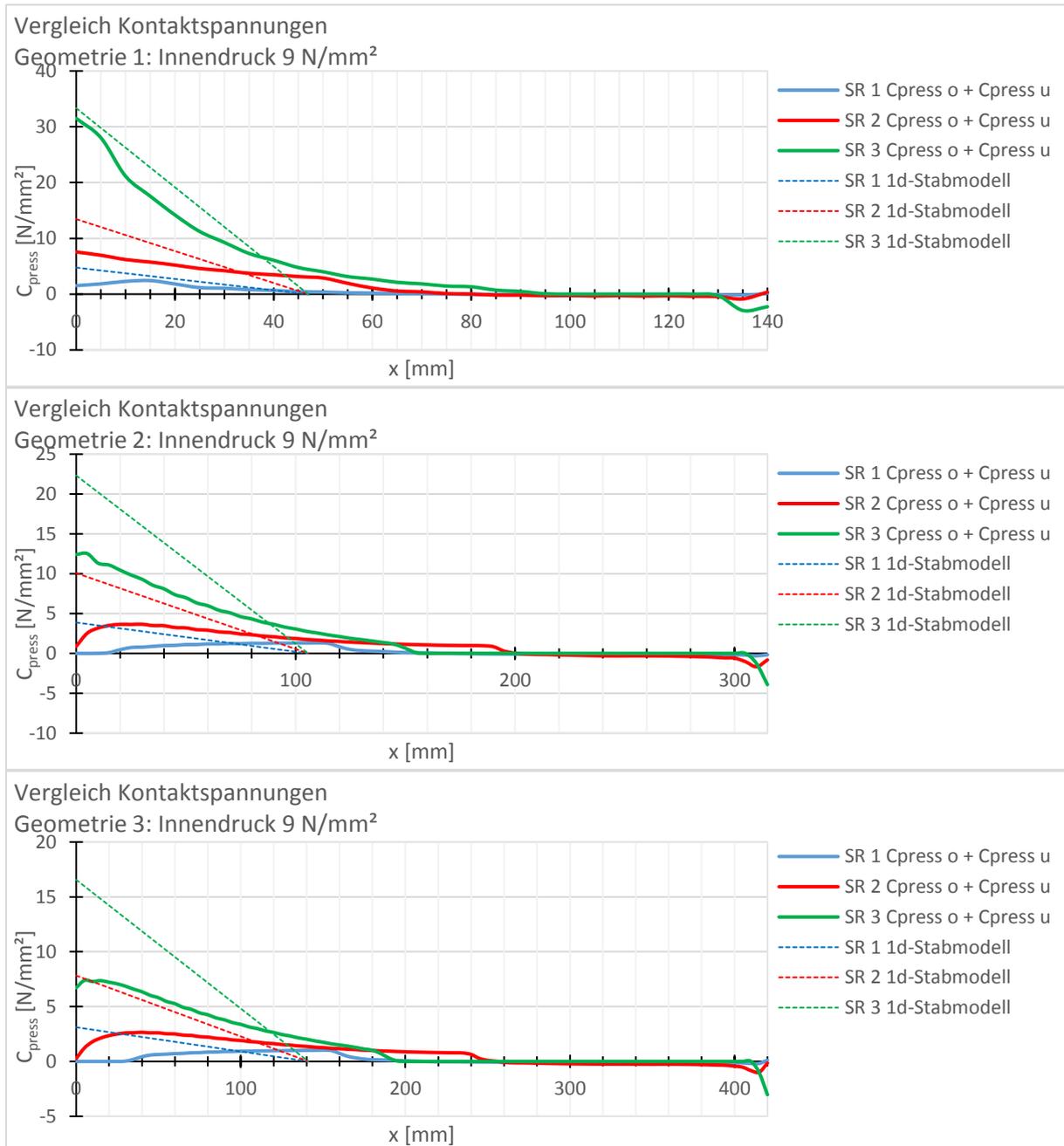


Abbildung 79 Geometrie 1, 2 und 3,  $\mu=0$ : Zusammenfassung aller Kontaktspannungen an den Schubringen infolge Innendruck 9 N/mm<sup>2</sup>

Charakteristisch für den Lastfall Innendruck ist dabei die weit auslaufende Pressungsverteilung, weit über das Maß  $c_{el}$  hinaus. Sehr gut zu erkennen, sind auch die immer stärker werdenden Abweichungen zwischen FEA und 1D-Stabmodell von Geometrie 1 zu Geometrie 3.

Wie einleitend im Kapitel 3.5 erläutert und in Abbildung 78 dargestellt, wird in Tabelle 9 nach einer Möglichkeit zur Modifikation der Schubringsteifigkeiten gesucht. Ausgangspunkt dafür sind, die in Kapitel 1.4.2 in Tabelle 2 ermittelten Federsteifigkeiten  $C^*$  für das 1D-Stabmodell. Die vorhandenen Schubringkräfte aus der FEA dienen dabei als Soll-Lösung für das 1D-Stabmodell (vgl. Tabelle 3, Tabelle 5 und Tabelle 7). Auf dieser Basis werden Soll-Werte für Schubringsteifigkeiten ermittelt, um genau die vorhandenen Schubringkräfte der FEA erreichen zu können ( $C_{sr2}$ ,  $C_{sr2}$  und  $C_{sr3}$ ). Um eine anschauliche Vergleichbarkeit mit dem 1D-Stabmodell zu ermöglichen, werden die neuen Schubringsteifigkeiten (vgl. Abbildung 78) dargestellt als  $a_i \cdot C^* = C_{sr i}$ .

### **Innendruck**

<b>9 N/mm<sup>2</sup></b>	<b>a<sub>1</sub></b>	<b>a<sub>2</sub></b>	<b>a<sub>3</sub></b>	<b>C* [N/mm]</b>	<b>C<sub>Sr1</sub> [N/mm]</b>	<b>C<sub>Sr2</sub> [N/mm]</b>	<b>C<sub>Sr3</sub> [N/mm]</b>
<i>Geometrie 1</i>	0.305	0.5	0.75	21 931 251	6 689 031	10 965 625	16 448 438
<i>Geometrie 2</i>	0.198	0.298	0.394	35 607 323	7 050 250	10 610 982	14 029 285
<i>Geometrie 3</i>	0.12	0.2005	0.261	40 744 091	4 889 291	8 169 190	10 634 208

Tabelle 9 Steifigkeitsmodifikation der Schubringe für Lastfall Innendruck

Gut erkennbar ist, dass der Lastfall Innendruck bei allen Geometrien eine geringere Federsteifigkeit für die Schubringe erfordern würde ( $a_i$  immer  $<1$ ). Die erforderlichen Faktoren werden dabei von Geometrie 1 zu Geometrie 3 immer kleiner. Eine einheitliche Richtung für eine mögliche Modifikation des 1D-Stabmodells ist ersichtlich, jedoch zeigt die erforderliche Modifikation zu große Unterschiede (siehe Tabelle 9 für  $a_3 = 0,75$  bis  $0,261$ ).

---

#### 3.5.2 Erforderliche Schubringsteifigkeiten für Deckeldruck 1 N/mm<sup>2</sup>

Zu einer direkten Vergleichbarkeit, werden in diesem Kapitel die ermittelten Pressungsverteilungen der Schubringe anhand des Lastfalls Deckeldruck  $p_{\text{deckel}} = 1 \text{ N/mm}^2$  dargestellt. Dabei werden jeweils die zusammengefassten Kontaktspannungen der drei verschiedenen Geometrien zusammengefasst (vgl. Abbildung 31, Abbildung 43 und Abbildung 55) und übersichtlich miteinander dargestellt, um einen guten Einblick in die qualitativen Verläufe der Belastungssituation zu erhalten (siehe Abbildung 80).

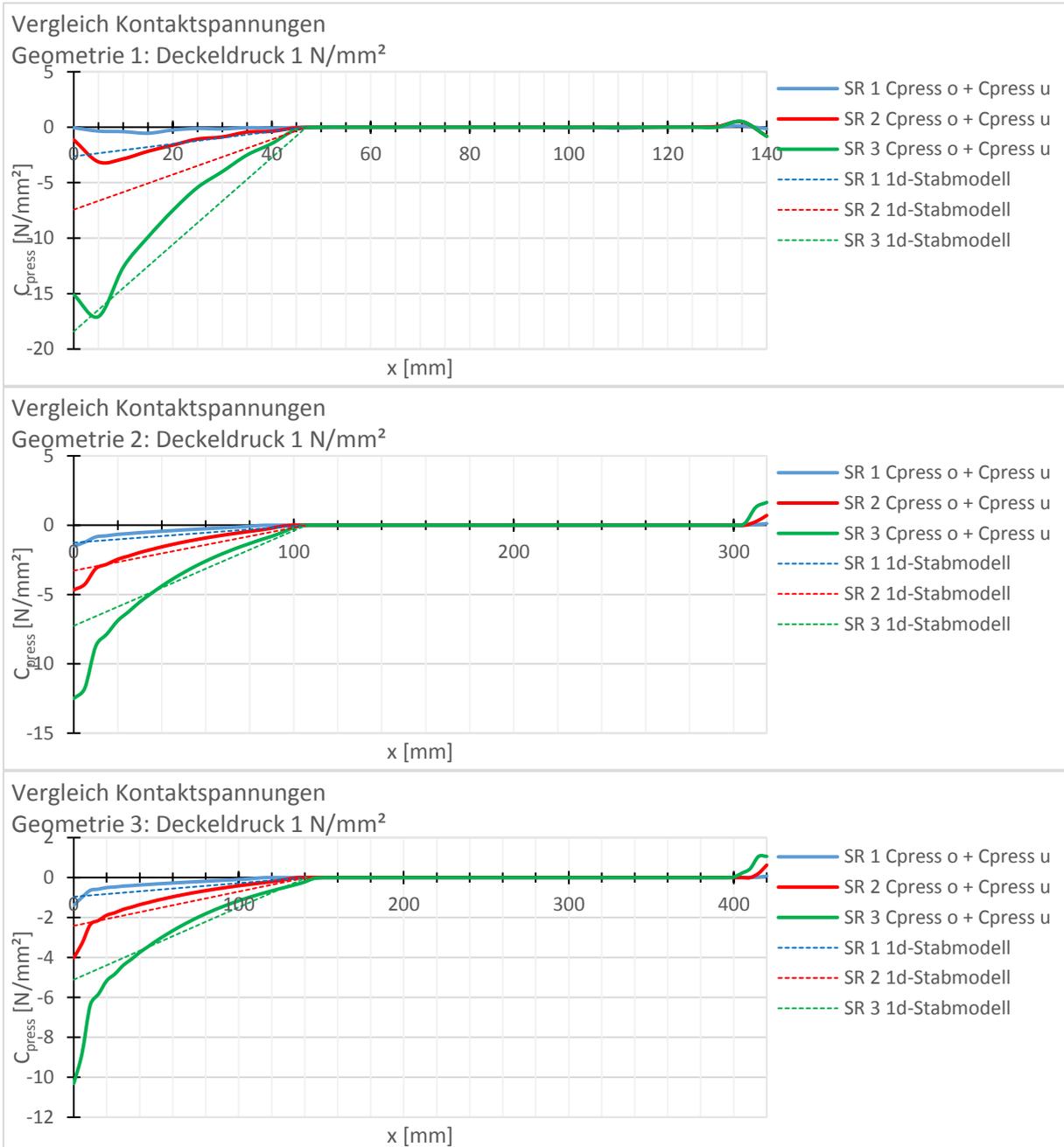


Abbildung 80 Geometrie 1, 2 und 3,  $\mu=0$ : Zusammenfassung aller Kontaktspannungen an den Schubringen infolge Deckeldruck 1 N/mm<sup>2</sup>

Die Pressungsverteilung der FEA stimmt beim Lastfall Deckeldruck für alle drei Geometrien sehr gut mit dem 1D-Stabmodell überein.

Wie einleitend im Kapitel 3.5 erläutert und in Abbildung 78 dargestellt, wird in Tabelle 10 nach einer Möglichkeit zur Modifikation der Schubringsteifigkeiten gesucht, auch wenn diese nicht erforderlich wäre. Ausgangspunkt dafür sind, die in Kapitel 1.4.2 in Tabelle 2 ermittelten Federsteifigkeiten  $C^*$  für das 1D-Stabmodell. Die vorhandenen Schubringkräfte aus der FEA dienen dabei als Soll-Lösung für das 1D-Stabmodell (vgl. Tabelle 3, Tabelle 5 und Tabelle 7). Auf dieser Basis werden Soll-Werte für Schubringsteifigkeiten ermittelt, um genau die vorhandenen Kräfte der FEA erreichen zu können ( $C_{sr2}$ ,  $C_{sr2}$  und  $C_{sr3}$ ). Um eine anschauliche Vergleichbarkeit mit dem 1D-Stabmodell zu ermöglichen, werden die neuen Schubringsteifigkeiten (vgl. Abbildung 78) dargestellt als  $a_i \cdot C^* = C_{sr i}$ .

### Deckeldruck

$1 \text{ N/mm}^2$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$C^* \text{ [N/mm]}$	$C_{sr1} \text{ [N/mm]}$	$C_{sr2} \text{ [N/mm]}$	$C_{sr3} \text{ [N/mm]}$
Geometrie 1	0.8	1.2	1.45	21 931 251	17 545 001	26 317 501	31 800 314
Geometrie 2	0.6	0.91	1.21	35 607 323	21 364 394	32 402 664	43 084 861
Geometrie 3	0.49	0.79	1.11	40 744 091	19 964 605	32 187 832	45 225 941

Tabelle 10 Steifigkeitsmodifikation der Schubringe für Lastfall Deckeldruck

Beim Lastfall Deckeldruck wäre keine Modifikation notwendig, da die Modelle bereits sehr gut übereinstimmen. Dennoch ist anhand dieses Lastfalls gut erkennbar, wie erheblich die Federsteifigkeitsmodifikationen  $a_3$  bereits abgeändert werden müssten, um bereits kleine Korrekturen vornehmen zu können (siehe Tabelle 10, für  $a_3 = 1,45$  bis  $1,11$ ).

---

### 3.5.3 Erforderliche Schubringsteifigkeiten für Temperatur $-10^\circ$

Zu einer direkten Vergleichbarkeit, werden in diesem Kapitel die ermittelten Pressungsverteilungen der Schubringe anhand des Lastfalls Temperaturverringeringung  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$  dargestellt. Dabei werden jeweils die zusammengefassten Kontaktspannungen der drei verschiedenen Geometrien zusammengefasst (vgl. Abbildung 33, Abbildung 45 und Abbildung 57) und übersichtlich miteinander dargestellt, um einen guten Einblick in die qualitativen Verläufe der Belastungssituation zu erhalten (siehe Abbildung 81).

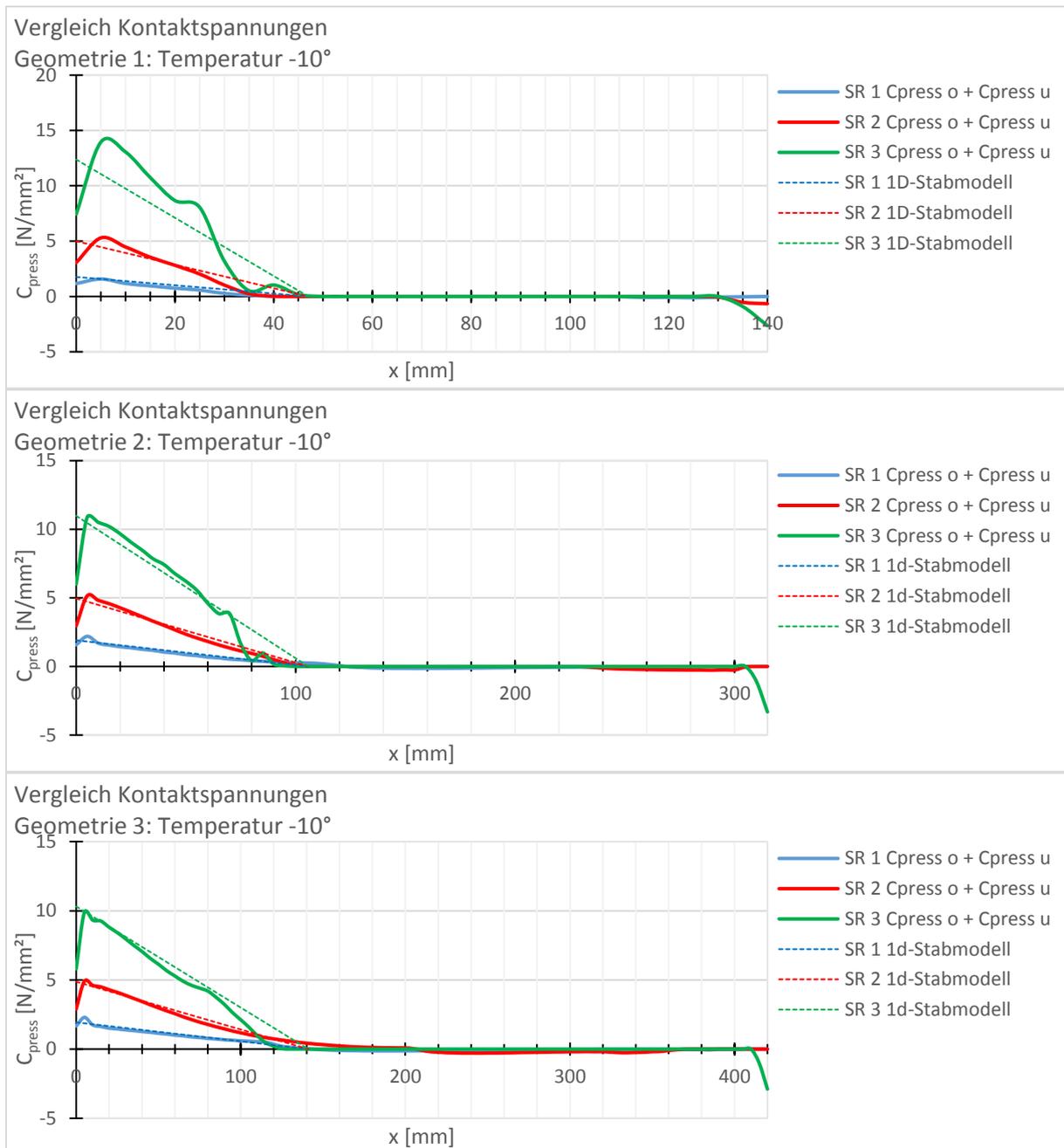


Abbildung 81 Geometrie 1, 2 und 3,  $\mu=0$ : Zusammenfassung aller Kontaktspannungen an den Schubringen infolge Temperatur -10°

Die Pressungsverteilung der FEA stimmt beim Lastfall Temperaturverringerung  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$  für alle drei Geometrien nahezu perfekt mit dem 1D-Stabmodell überein.

Wie einleitend im Kapitel 3.5 erläutert und in Abbildung 78 dargestellt, wird in Tabelle 11 nach einer Möglichkeit zur Modifikation der Schubringsteifigkeiten gesucht, auch wenn diese nicht erforderlich wäre. Ausgangspunkt dafür sind, die in Kapitel 1.4.2 in Tabelle 2 ermittelten Federsteifigkeiten  $C^*$  für das 1D-Stabmodell. Die vorhandenen Schubringkräfte aus der FEA dienen dabei als Soll-Lösung für das 1D-Stabmodell (vgl. Tabelle 3, Tabelle 5 und Tabelle 7). Auf dieser Basis werden Soll-Werte für Schubringsteifigkeiten ermittelt, um genau die vorhandenen Kräfte der FEA erreichen zu können ( $C_{sr2}$ ,  $C_{sr2}$  und  $C_{sr3}$ ). Um eine anschauliche Vergleichbarkeit mit dem 1D-Stabmodell zu ermöglichen, werden die neuen Schubringsteifigkeiten dargestellt als  $a_i \cdot C^* = C_{sr i}$  (vgl. Abbildung 78).

### Temperatur

-10°	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	C* [N/mm]	C <sub>Sr1</sub> [N/mm]	C <sub>Sr2</sub> [N/mm]	C <sub>Sr3</sub> [N/mm]
Geometrie 1	0.77	1.02	1.225	21 931 251	16 887 063	22 369 876	26 865 782
Geometrie 2	0.66	0.75	0.862	35 607 323	23 500 833	26 705 493	30 693 513
Geometrie 3	0.57	0.655	0.703	40 744 091	23 224 132	26 687 380	28 643 096

Tabelle 11 Steifigkeitsmodifikation der Schubringe für Lastfall Temperatur -10°

Beim Lastfall Temperaturverringering wäre keine Modifikation notwendig, da die Modelle bereits perfekt übereinstimmen. Dennoch ist anhand dieses Lastfalls gut erkennbar, dass auch bei einer nahezu perfekten Übereinstimmung der Modelle, erhebliche Korrekturfaktoren für ein genau identes Ergebnis erforderlich wären (siehe Tabelle 11, für a<sub>3</sub> = 1,225 bis 0,703). Die relativ geringen Auswirkungen, von großen „Hebelwirkungen“ auf die Schubringsteifigkeiten, auf das Gesamtsystem zeigen hier sehr deutlich, dass durch eine alleinige Korrektur der Federsteifigkeiten keine vernünftigen Modifikationen gefunden werden kann.

---

#### 3.5.4 Erforderliche Schubringsteifigkeiten für Temperatur +10°

Zu einer direkten Vergleichbarkeit, werden in diesem Kapitel die ermittelten Pressungsverteilungen der Schubringe anhand des Lastfalls Temperaturerhöhung  $\Delta T = +10^\circ\text{C}$  dargestellt. Dabei werden jeweils die zusammengefassten Kontaktspannungen der drei verschiedenen Geometrien zusammengefasst (vgl. Abbildung 35, Abbildung 47 und Abbildung 59) und übersichtlich miteinander dargestellt, um einen guten Einblick in die qualitativen Verläufe der Belastungssituation zu erhalten (siehe Abbildung 82).

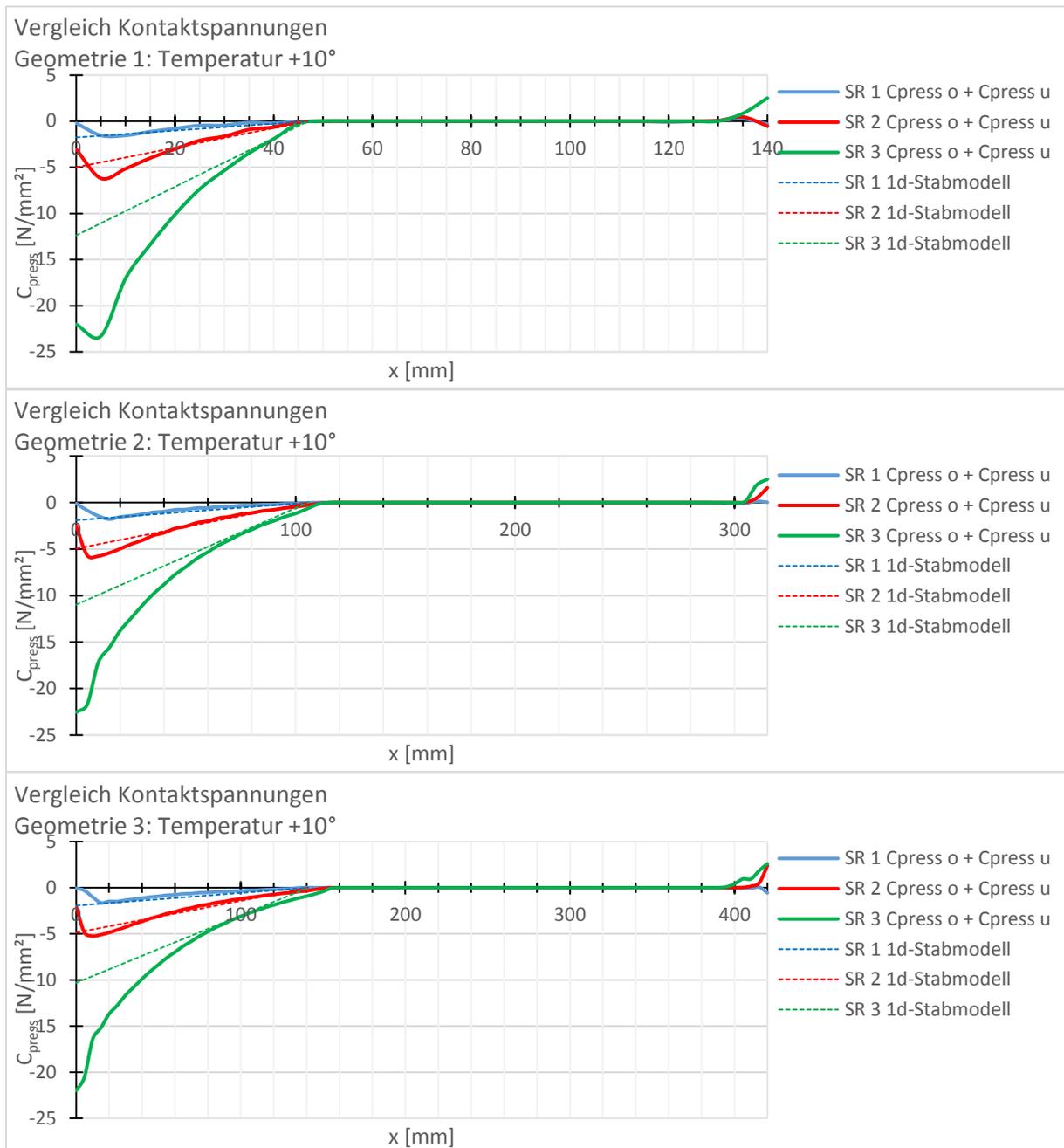


Abbildung 82 Geometrie 1, 2 und 3,  $\mu=0$ : Zusammenfassung aller Kontaktspannungen an den Schubringen infolge Temperatur  $+10^\circ$

Die Pressungsverteilung der FEA stimmt beim Lastfall Temperaturerhöhung  $\Delta T = +10^\circ\text{C}$  für alle drei Geometrien mit der Pressungslänge  $c_{el}$  aus dem 1D-Stabmodell überein. Der Verlauf der Kontaktspannungen weicht jedoch bei allen drei Geometrien vom dreieckigen Verlauf ab und bildet einen größeren und gekrümmten Verlauf aus, welcher für diesen Lastfall charakteristisch ist. Dies wird durch die erhöhte Zwängung in Umfangsrichtung ausgelöst und schlägt sich in höheren Schubringkräften in der FEA nieder (vgl. Abbildung 82 mit Abbildung 81).

Wie einleitend im Kapitel 3.5 erläutert und in Abbildung 78 dargestellt wird in Tabelle 12 nach einer Möglichkeit zur Modifikation der Schubringsteifigkeiten gesucht. Ausgangspunkt dafür sind, die in Kapitel 1.4.2 in Tabelle 2 ermittelten Federsteifigkeiten  $C^*$  für das 1D-Stabmodell. Die vorhandenen Schubringkräfte aus der FEA dienen dabei als Soll-Lösung für das 1D-Stabmodell (vgl. Tabelle 3, Tabelle 5 und Tabelle 7). Auf dieser Basis werden Soll-Werte für Schubringsteifigkeiten ermittelt, um genau die vorhandenen Kräfte der FEA erreichen zu können ( $C_{sr2}$ ,  $C_{sr2}$  und  $C_{sr3}$ ). Um eine anschauliche Vergleichbarkeit mit dem 1D-Stabmodell zu ermöglichen, werden die neuen Schubringsteifigkeiten dargestellt als  $a_i \cdot C^* = C_{sr i}$  (vgl. Abbildung 78).

### Temperatur

+10°	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	C* [N/mm]	C <sub>Sr1</sub> [N/mm]	C <sub>Sr2</sub> [N/mm]	C <sub>Sr3</sub> [N/mm]
Geometrie 1	-	-	-	21 931 251	-	-	-
Geometrie 2	-	-	-	35 607 323	-	-	-
Geometrie 3	13	5.7	3.51	40 744 091	529 673 187	232 241 320	143 011 760

Tabelle 12 Steifigkeitsmodifikation der Schubringe für Lastfall Temperatur +10°

Für Geometrie 1 und Geometrie 2 kann durch alleinige Schubringsteifigkeitsmodifikation, trotz Verwendung von festen Auflagermodellen, keine Lösung gefunden werden (vgl. Tabelle 12).

### 3.5.5 Fazit zur Steifigkeitsmodifikation der Schubringe

Die notwendigen Vorfaktoren a<sub>i</sub> bewegen sich von null (kein Auflager mehr vorhanden) bis unendlich (festes Auflager). trotz der charakteristischen Verläufe der einzelnen Belastungssituationen lässt sich mit ergänzenden Vorfaktoren kein allgemeiner Zusammenhang für alle Lastfälle finden. Beim Lastfall der Temperaturerhöhung kann für Geometrie 1 und Geometrie 2 keine Lösung gefunden werden.

In Tabelle 13 werden die Schubringsteifigkeiten erneut untersucht. Dabei wird jedoch im Gegensatz zu Tabelle 12 eine voll querdehnungsbehinderte Stabsteifigkeit laut Gleichung (16) in Kapitel 3.1 angenommen.

### Temperatur

+10°

EA → E*A	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	C* [N/mm]	C <sub>Sr1</sub> [N/mm]	C <sub>Sr2</sub> [N/mm]	C <sub>Sr3</sub> [N/mm]
Geometrie 1	-	-	-	21 931 251	-	-	-
Geometrie 2	90	6.6	3.6	35 607 323	3 204 659 107	235 008 335	128 186 364
Geometrie 3	1.24	1.82	2.19	40 744 091	50 522 673	74 154 246	89 229 560

Tabelle 13 Steifigkeitsmodifikation der Schubringe, Temperatur +10°, Stabsteifigkeit E\*A

Ein treffsicheres 1D-Stabmodell könnte für Geometrie 1 nur durch eine Modifikation der Rohrsteifigkeiten auf über E\* erreicht werden. Ein Modell mit einer höheren Stabsteifigkeit als E\*A wird jedoch nicht mehr gesucht, da hierfür keine analytische Grundlage mehr möglich ist.

Der Lastfall der Temperaturerhöhung kann also weder auf falsche Schubringsteifigkeiten, noch auf falsche Stabsteifigkeiten oder sogar beide Effekte gleichzeitig zurückgeführt werden. Des Weiteren beinhalten die Modellannahmen der FEA folgende konservative Vereinfachungen:

- Die Doppelkehlnaht zum Anschweißen des Schubrings an die Stahlpanzerung, und die damit einhergehende erhöhte Schubringsteifigkeit, wird nicht berücksichtigt.
- Das Auflagermodell für das Gebirge ist in Längsrichtung frei verschieblich und Längskräfte im Betonmantel müssen bis zum fixen Auflager für diesen abgetragen werden. Dadurch können sich die Schubringe über den freien Betonmantel/Betonzylinder auch bei großen Schubringabständen e<sub>SR</sub> gegenseitig beeinflussen.

Jedoch handelt es sich hierbei nur um kleine Abweichungen, wie die Lastfälle Deckeldruck und Temperaturverringerung belegen. Zur Anpassung des Modells wäre also ein anderes Modell erforderlich, welches die Zwangsspannungen in Umfangsrichtungen zusätzlich berücksichtigen könnte.

Zur Darstellung der fehlenden Längskräfte im 1D-Stabmodell, würden die entstehenden Umfangsspannungen aus  $\Delta T = +10^\circ$  beispielsweise für Geometrie 1 in Abbildung 23 zusätzlich abgelesen und das Stabmodell um eine Dehnung  $\Delta l$  ergänzt werden können, oder der Temperaturlastfall mit Temperaturerhöhung direkt mit einer fiktiv höheren Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ins 1D-Stabmodell übersetzt werden.

## 4 Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck – Vergleich 1D-Stabmodell – FEA ohne Reibung

### 4.1 Einleitung

Die in Kapitel 1.4 präsentierten Modelle – die Finite Elemente Analyse (kurz FEA) und das 1D-Stabmodell – werden nachfolgend anhand folgender Lastfälle verglichen:

- Alleiniger Innendruck  $p_{\text{innen}}$ , mit  $p_{\text{deckel}} = p_{\text{innen}}$
- Alleiniger Deckeldruck  $p_{\text{deckel}}$
- Gesamtwirkung  $p = \text{Innendruck } p_{\text{innen}} + \text{Deckeldruck } p_{\text{deckel}}$

Es erfolgt auch ein Vergleich anhand der FE-Ergebnisse zwischen Superposition der beiden Einzellastfälle und dem Gesamtlastfall. Die Untersuchung der Zusammenwirkung der oben genannten Lastfälle wird nachfolgend als „Gesamtwirkung“ oder in späteren Kapiteln auch als „Gesamtdruck“ bezeichnet und erfolgt dabei in drei Abschnitten, wobei in jedem Abschnitt eine der drei Rohrgeometrien (vgl. Tabelle 1) behandelt wird.

- 4.2 Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 1
- 4.3 Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 2
- 4.4 Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 3

Jedes Kapitel enthält dabei:

- Einen Ergebnisvergleich in Längsrichtung ( $x$ ), mit einer Darstellung von Längsspannungen  $\sigma_{x,m}$  und Längsverschiebungen.
- Die tabellarische Auswertung der Längskräfte (ob im Vergleich zum 1D-Stabmodell in der FEA auch eine einfache Superposition der beiden Lastfälle möglich ist, wird ebenfalls betrachtet).
- Einen Vergleich in Umfangsrichtung ( $\varphi$ ), mit einer Darstellung von Umfangsspannungen  $\sigma_{\varphi,m}$  und Radialverschiebungen  $u_{r,m}$ .
- Eine anschauliche qualitative Darstellung der Verformungsfigur aus der FEA mit Überhöhung, sowie eine Detaildarstellung der höchstbelasteten Schubringe (Schubring 3).
- Eine plakative Darstellung der ausgewerteten Ergebnisse, über die Längsnormalkraftaufteilung  $\Delta N$  in Form von Balkendiagrammen, anhand ihrer absoluten und relativen Aufteilungen auf die einzelnen Schubringe

Die genaue Herangehensweise über die Darstellung der Ergebnisse, ist exemplarisch in Kapitel 4.2 anhand von Geometrie 1 erläutert und erfolgt in weiterer Folge gleich für Geometrie 2 und Geometrie 3.

#### 4.1.1 Bestimmung des Deckeldrucks

Um einen praxisnahen Vergleich darzustellen, wurden beide Drucklastfälle mit gleich hohen Drücken abgebildet. Maßgebend für die gewählte Belastung ist der Lastfall Deckeldruck und die daraus resultierende Längsnormalkraft auf den letzten Schubring (Schubring 3), denn die Schubringbelastung soll im elastischen Bereich bleiben.

Exemplarisch wird die Ermittlung des elastischen Deckeldrucks für Geometrie 1 vorgeführt. Zur Dimensionierung kann aufgrund des mehrdimensionalen Druckzustandes im Betonkörper direkt am Schubring eine erhöhte Druckfestigkeit von

$$f_{cm,mod} = 2 * f_{cm} \quad \text{Gl. ( 17 )}$$

$$f_{cm,mod} = 2 * 33 = 66 \text{ N/mm}^2$$

angesetzt werden (In Druckschächten wären sogar  $3 \cdot f_{cm}$  möglich, es wird jedoch mit der reduzierten Festigkeit für Festpunkte gerechnet). Für den realitätsnahen Vergleich der Modelle werden keine Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt. Mit Hilfe des Bemessungsmodells aus dem Forschungsbericht [2] kann die maximal aufnehmbare Normalkraft  $N_{Rd,el}$  eines Schubrings (hier Schubring 3 maßgebend), bei welcher sich die Betonpressung am Schubring noch im elastischen Zustand befindet, anhand der Betondruckfestigkeit und der Pressungslänge  $c_{el}$  ermittelt werden (vgl. Abbildung 25 und Gleichung (13)).

$$c_{el} = 0,85 \cdot t_{rohr} + t_{ring} \cdot \left[1 + 0,1 \cdot \frac{h_{ring}}{t_{ring}} - 2\right] \quad \text{Gl. ( 13 )}$$

$$c_{el} = 0,85 \cdot 20 + 20 \cdot \left[1 + 0,1 \cdot \frac{140}{20} - 2\right] = 47 \text{ mm}$$

$$N_{Rd,el} = \frac{f_{cm,mod} \cdot c_{el}}{2} \cdot d_a \cdot \pi \quad \text{Gl. ( 18 )}$$

$$N_{Rd,el} = \frac{66 \cdot 47}{2} \cdot 3020 \cdot \pi = 14,7 \text{ MN}$$

Mit Hilfe des Aufteilungsparameters AG aus dem Bemessungsbehelf [3] kann nun der mitwirkende Anteil der Schubringe 1 und 2 ermittelt werden (vgl. Abbildung 83).

$$AG = \frac{E \cdot A_{rohr}}{e_{sr} \cdot C^*} \quad \text{Gl. ( 19 )}$$

Mit:  $A_{rohr} = 188\,496 \text{ mm}^2$  (siehe Tabelle 2)

$C^* = 21\,931\,250 \text{ N/mm}$  (siehe Tabelle 2)

$$AG = \frac{210\,000 \cdot 188\,496}{1500 \cdot 21\,931\,250} = 1,2$$

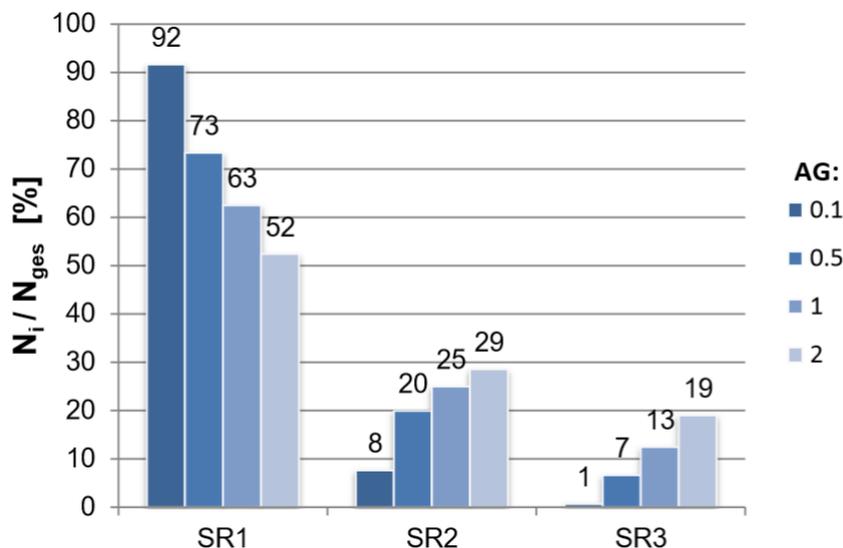


Abbildung 83 Aufteilung der Längskraft  $N_{ges}$  in Abhängigkeit vom AG-Parameter, für 3 Schubringe hintereinander [2] Seite 328

Mithilfe der in Abbildung 83 vorgegebenen Lösungen für den Aufteilungsparameter AG kann nun linear interpoliert werden. Für Geometrie 1 und  $AG = 1,2$  ergibt sich dadurch ein Lastanteil von 61% auf den ersten Schubring (Schubring 3). Da der Lastanteil für den ersten, höchstbelasteten Schubring ermittelt wurde, kann auf die aufnehmbare Gesamtlängskraft für alle drei Schubringe rückgerechnet werden.

$$N_{Rd,ges} = N_{Rd,el} \cdot \frac{(N_{i,max}/N_{ges})}{100} \quad \text{Gl. ( 20 )}$$

$$N_{Rd,ges} = 14,7 / \frac{61}{100} = 23,8 \text{ MN}$$

Daraus ergibt sich ein Deckeldruck von

$$p_{deckel} = \frac{N_{Rd,ges}}{R^2 * \pi} = \frac{23\,800\,000}{1500^2 * \pi} = 3,36 \text{ N/mm}^2$$

Welcher für Geometrie 1 auf  $p_{deckel} = 3,3 \text{ N/mm}^2$  abgerundet wird.

Für die drei untersuchten Geometrien ergeben sich demnach jeweils ein Deckeldruck und eine entsprechende Deckelkraft, laut Tabelle 14.

	<b>F<sub>D</sub> = N<sub>Rd,ges</sub></b> <b>[MN]</b>	<b>p<sub>deckel</sub></b> <b>[N/mm<sup>2</sup>]</b>
Geometrie 1	23,8	3,3
Geometrie 2	58,6	8,28
Geometrie 3	82,8	11,72

Tabelle 14 Übersicht der Deckeldrucklastfälle

## 4.2 Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 1

### 4.2.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

Zu Beginn dieses Abschnitts werden nochmals die Längsspannungsverläufe der einzelnen Lastfälle Innendruck „Pinnen=3,3 N/mm<sup>2</sup>“ und Deckeldruck „Pdeckel=3,3 N/mm<sup>2</sup>“ sowie die Überlagerung beider „P=3,3N/mm<sup>2</sup>“ gezeigt.

Die Gegenüberstellung von FEA und 1D-Stabmodell erfolgt dabei gleich wie bereits in Kapitel 2. Lediglich die Mittelwerte der Umfangsspannungen aus Abbildung 86 werden genauer, für jede Stahlpanzerung zwischen den Schubringen separat, ermittelt und laut Kapitel 1.5.1 ins 1D-Stabmodell übersetzt („1D-Stabmodell verfeinert“).

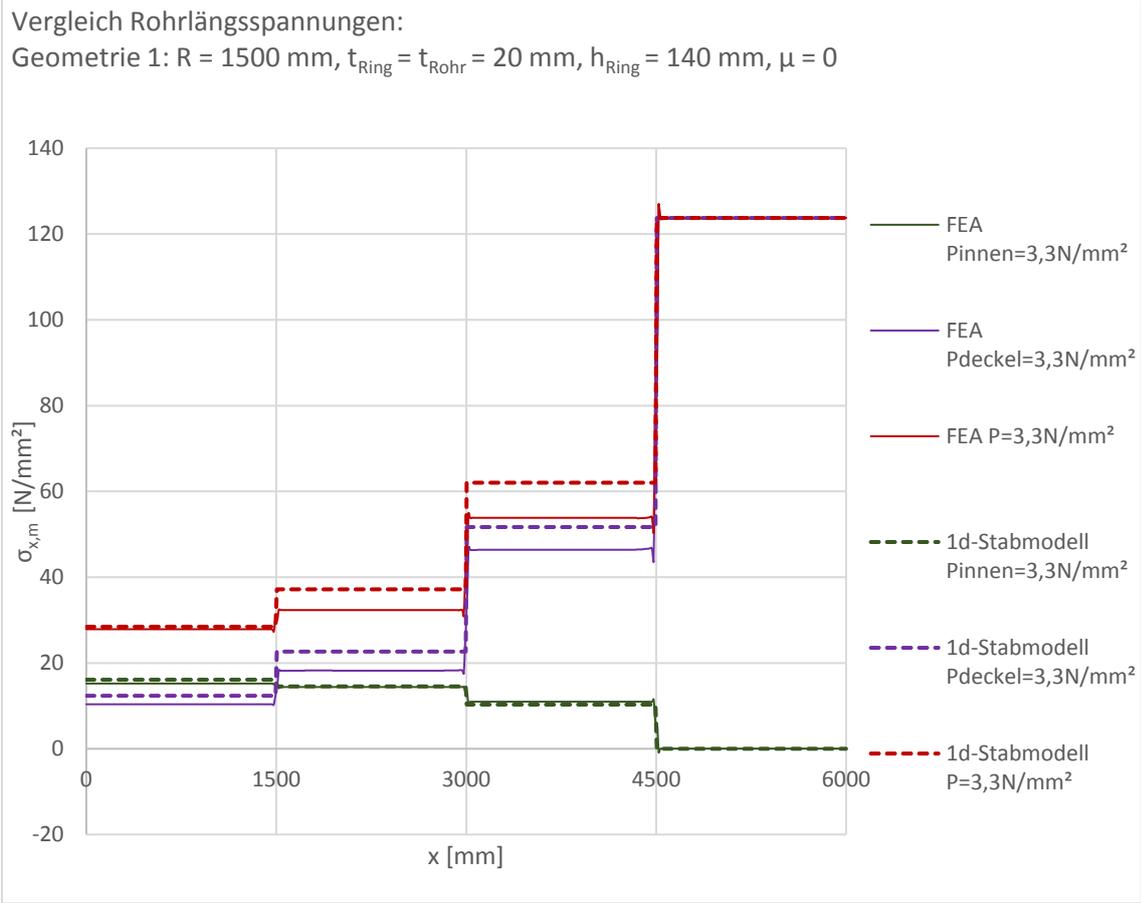


Abbildung 84 Geometrie 1,  $\mu=0$ , Längsspannungen  $\sigma_{x,m}$ , Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

Die Verschiebungen werden in diesem Kapitel grafisch dargestellt. Da die Längsverschiebung des 1D-Stabs, durch Umrechnen des Innendrucks, auf eine punktuelle Stabverkürzung  $\Delta l$  umgerechnet wird, macht ein Vergleich nur an den entscheidenden Stellen Sinn und ist deshalb auch nur punktuell in allen Längsverschiebungsdiagrammen eingetragen (vgl. Abbildung 85).

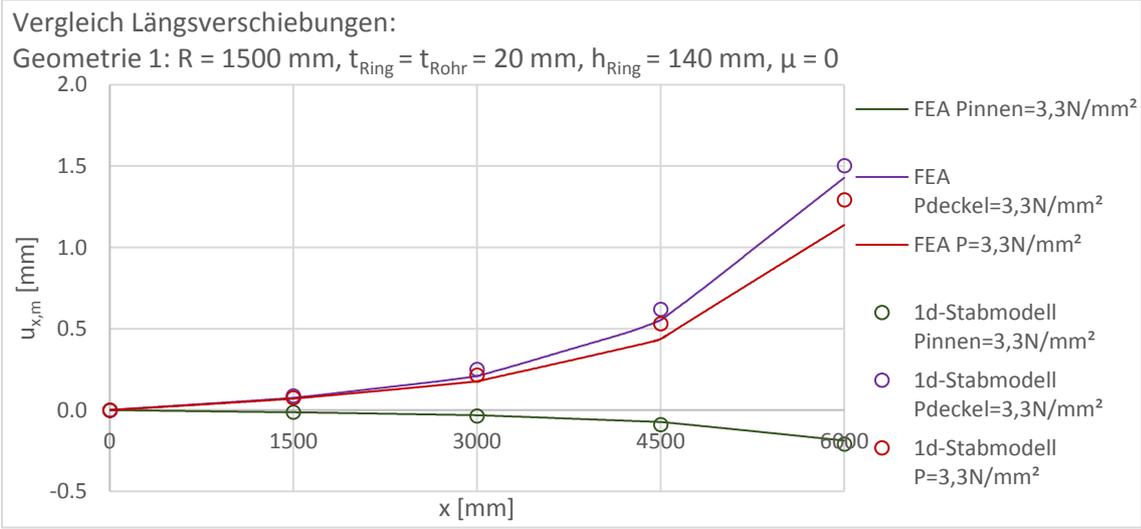


Abbildung 85 Geometrie 1,  $\mu=0$ , Längsverschiebungen  $u_{x,m}$ , Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

Sowohl anhand des Längsspannungsverlaufs, als auch der Längsverschiebungen ist gut ersichtlich, wie der Lastfall Innendruck dem Deckeldruck entgegenwirkt.

Bereits bei der Längsspannungsdifferenz in Abbildung 84 und der Längsverschiebung in Abbildung 85 ist qualitativ ersichtlich, dass der Innendruck auf die Belastung in Längsrichtung eher eine untergeordnete Rolle spielt. Die

Auswertung in Tabelle 15 bestätigt die große Differenz (vgl. Tabelle 15:  $\Sigma$ Schubringe Innendruck 3,03 MN  $\ll$  Deckeldruck -21,41 MN  $\approx$  Gesamtwirkung -18,38 MN).

In Tabelle 15 werden die Schubringkräfte  $\Delta N$  der FEA, wie bereits in Kapitel 2 gezeigt, mit Hilfe der Längsspannungsdifferenz  $\Delta\sigma_{x,m}$  errechnet und mit den Kräften des 1D-Stabmodells verglichen. Die Abweichung des 1D-Stabmodells von der FEA sind dabei als %-Wert angegeben und errechnen sich durch eine einfache Schlussrechnung.

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	2.87	3.03	5.8%	1.96	2.33	19%
<b>Schubring 1</b>	1445-1555	0.15	0.29	92%	-1.47	-1.94	31%
<b>Schubring 2</b>	2945-3055	0.65	0.80	23%	-5.29	-5.48	3.7%
<b>Schubring 3</b>	4445-4555	2.06	1.94	-5.8%	-14.49	-13.58	-6.3%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>2.86</b>	<b>3.03</b>	<b>5.9%</b>	<b>-21.25</b>	<b>-21.00</b>	<b>-1.2%</b>

Tabelle 15 Geometrie 1,  $\mu=0$ , Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>

In Tabelle 16 ist der Gesamtlastfall in der FEA dargestellt und wird mit der Überlagerung im 1D-Stabmodell verglichen. Das gleichzeitige Zusammenwirken beider Lastfälle wird dabei als „Gesamtwirkung“ bezeichnet. Zusätzlich wird eine einfache Superposition mit den Ergebnissen der FEA erstellt (Bsp. Superposition für Auflager: 2,87 + 1,96 = 4,82 MN) und mit der Gesamtwirkung (5,25 MN) verglichen (vgl. Tabelle 15 und Tabelle 16). Ermittelt wird dadurch inwiefern eine Superposition der FEA-Ergebnisse überhaupt zutreffend ist.

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
<b>Auflager</b>	0	5.25	5.36	2.2%	4.82	-8.2%
<b>Schubring 1</b>	1445-1555	-0.85	-1.64	94%	-1.32	56%
<b>Schubring 2</b>	2945-3055	-4.06	-4.68	15%	-4.64	14%
<b>Schubring 3</b>	4445-4555	-13.14	-11.63	-11%	-12.43	-5.5%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-18.05</b>	<b>-17.96</b>	<b>-0.5%</b>	<b>-18.39</b>	<b>1.9%</b>

Tabelle 16 Geometrie 1,  $\mu=0$ , Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

Unter üblichen Druckbedingungen liefert das 1D-Stabmodell für beide Drucklastfälle nahezu idente Ergebnisse wie die Simulation. Da beide Lastfälle unterschiedlich wirken und sich gegenseitig nur geringfügig zu beeinflussen scheinen, ergibt auch eine Superposition der einzelnen Berechnungsergebnisse noch ein für die Bemessungspraxis brauchbares Ergebnis.

#### 4.2.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

In diesem Kapitel werden die vorhandenen Umfangsspannungen  $\sigma_{\varphi,m}$  und Radialverschiebungen  $u_{r,m}$  in Blechmitte der Stahlpanzerung dargestellt und verglichen.

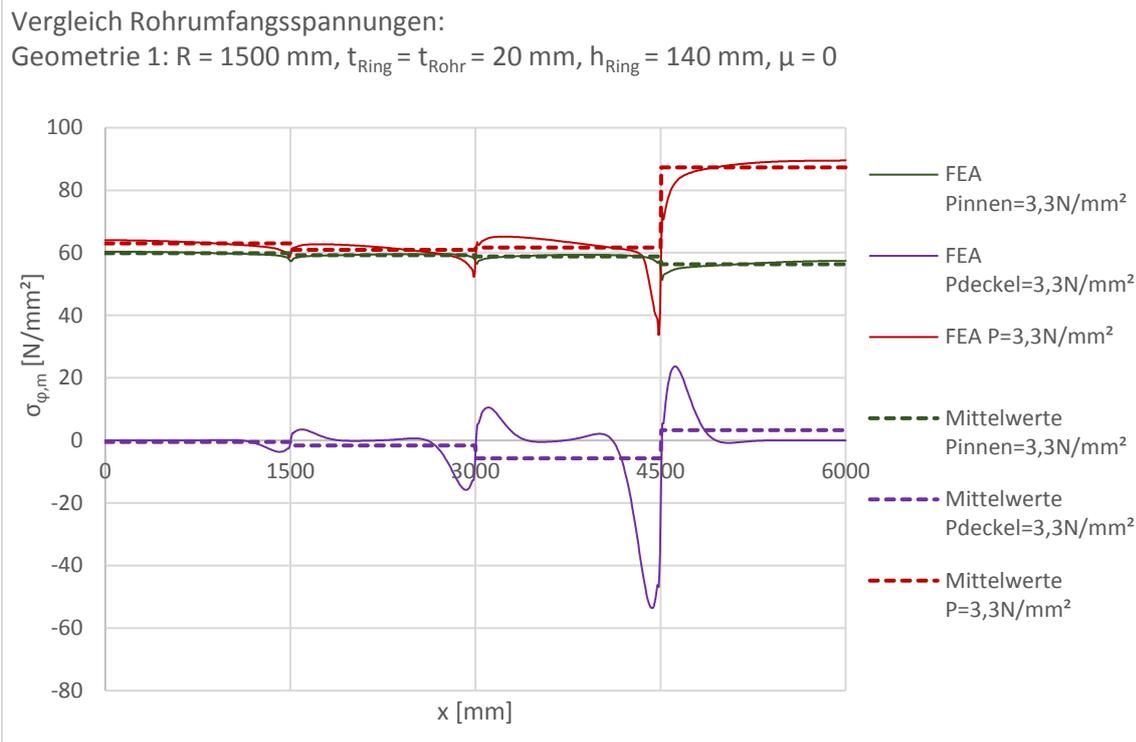


Abbildung 86 Geometrie 1,  $\mu=0$ , Umfangsspannungen  $\sigma_{\phi,m}$ , Innendruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$ , Deckeldruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung

Bemerkenswert ist die große Differenz der Rohrumfangsspannungen zwischen Superposition der Einzellastfälle und Gesamtwirkung im Bereich der Stahlpanzerung 4 ( $x=4500-6000$  in Abbildung 86). Diese ist dadurch begründet, dass durch die große Längsdehnung des Deckeldruck Lastfalls und infolge dessen Querkontraktion sich der Rohrquerschnitt verkleinert und dadurch vom Betonmantel abhebt (siehe Abbildung 87 und Abbildung 92). Dadurch bleibt bei einer folgenden Belastung mit Innendruck der Stahlrohrquerschnitt auf sich allein gestellt, bis dieser durch erneute Ausdehnung in Umfangsrichtung die entstandene Lücke überbrückt hat und wieder am Betonmantel anliegt.

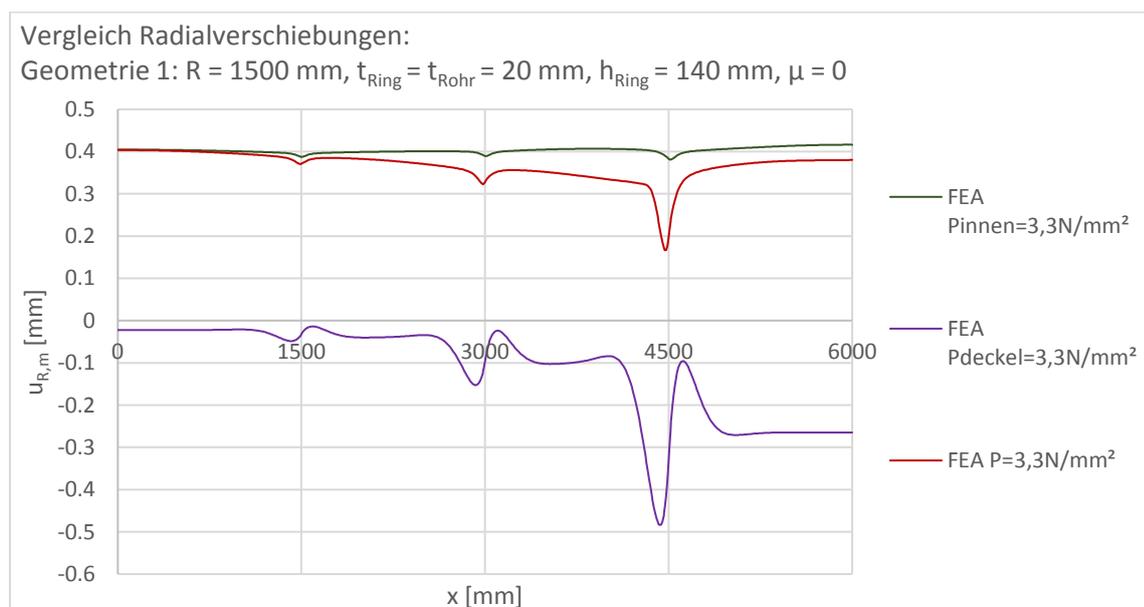


Abbildung 87 Geometrie 1,  $\mu=0$ , Radialverschiebungen  $u_{r,m}$ , Innendruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$ , Deckeldruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung

#### 4.2.3 Verformungsplots

Für alle Lastfallüberlagerungen sowie Einzellastfälle werden umfangreiche Verformungsplots erstellt. Alle Lastfälle werden dabei zur besseren Vergleichbarkeit einheitlich mit einem Faktor 100 überhöht dargestellt. Das

ursprüngliche Gebirge, vor der Verformung, ist dabei in Form einer roten Linie ersichtlich. Gut erkennbar wird dadurch vor allem der Innendruck Lastfall und dessen Wirkung in radialer Richtung auf das Gebirge (vgl. Abbildung 88).

---

#### 4.2.3.1 Verformungsplot - Innendruck

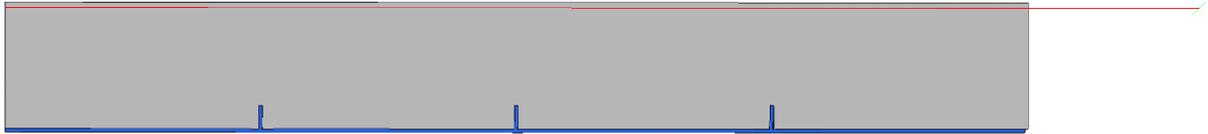


Abbildung 88 Geometrie 1,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 4.2.3.2 Verformungsplot - Deckeldruck



Abbildung 89 Geometrie 1,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 4.2.3.3 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck gemeinsam

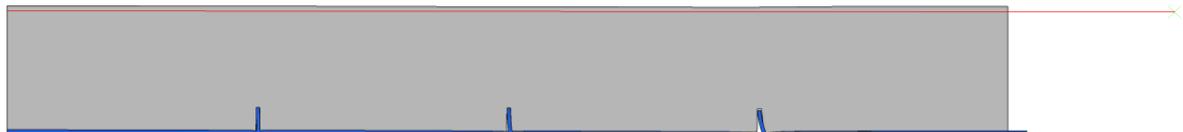


Abbildung 90 Geometrie 1,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup> und Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 4.2.3.4 Verformungsplot – Innendruck, Detail Schubring 3

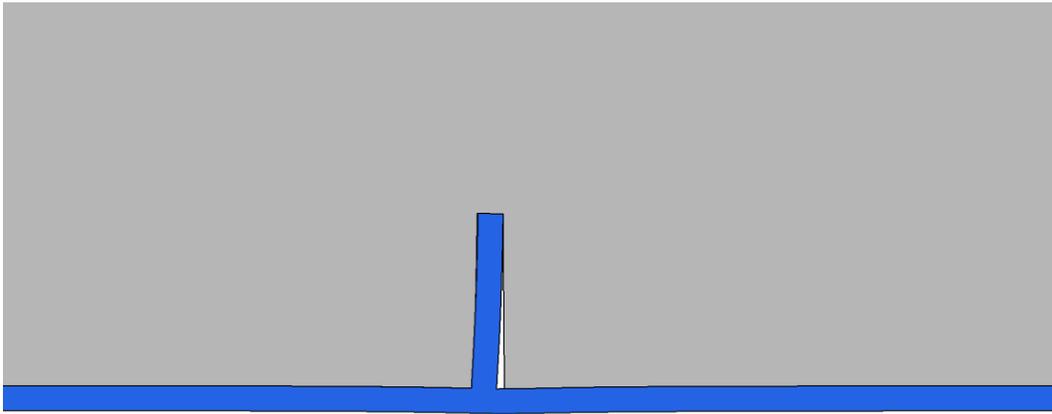


Abbildung 91 Geometrie 1,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 4.2.3.5 Verformungsplot – Deckeldruck, Detail Schubring 3

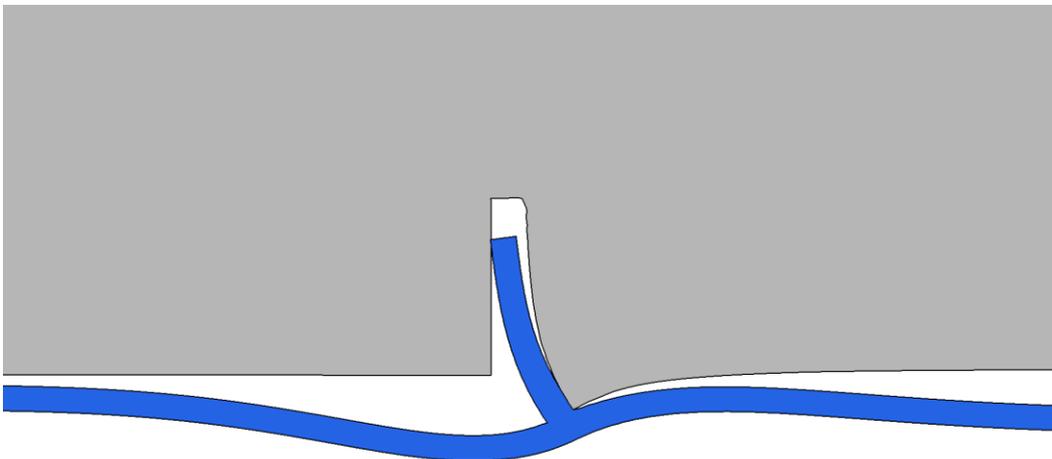


Abbildung 92 Geometrie 1,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 4.2.3.6 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck gemeinsam, Detail Schubring 3

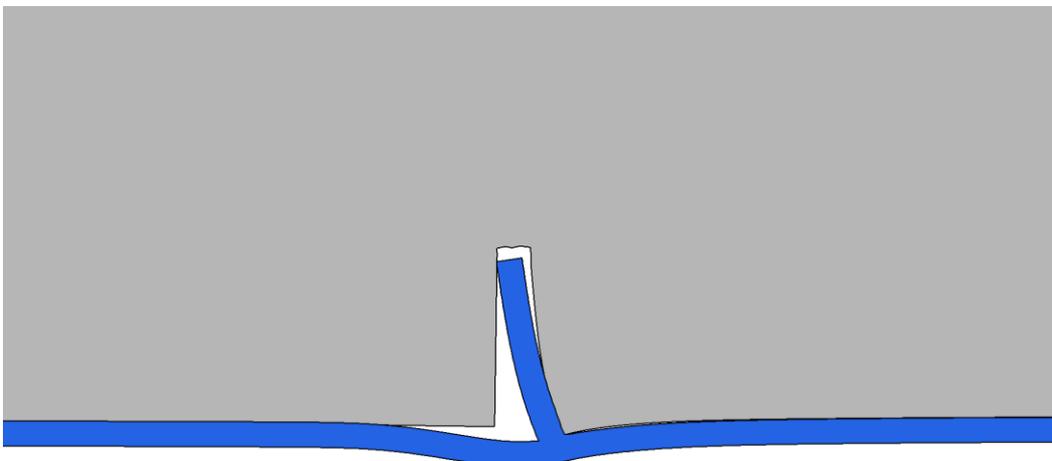


Abbildung 93 Geometrie 1,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup> und Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>

#### 4.2.4 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

In diesem Kapitel werden die Schubringkräfte  $\Delta N_i$  in absoluten Werten in MN als Balkendiagramm präsentiert.

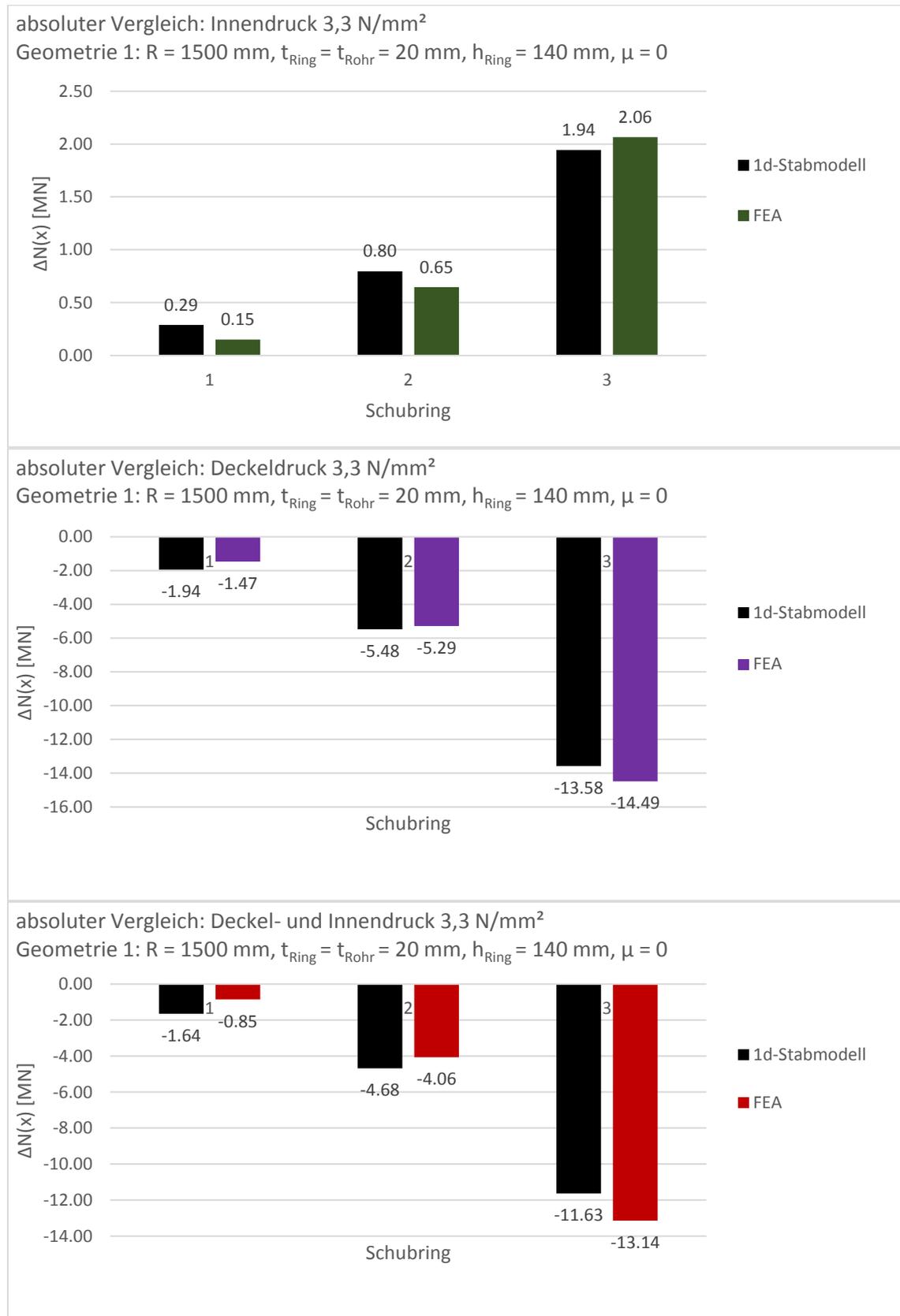


Abbildung 94 Geometrie 1,  $\mu=0$ , absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

#### 4.2.5 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

Im Vergleich zu Kapitel 2 wird die relative Aufteilung der Schubringkräfte  $\Delta N_i$  für jeden Lastfall separat dargestellt, da sich die Aufteilung auch im 1D-Stabmodell unterscheidet.

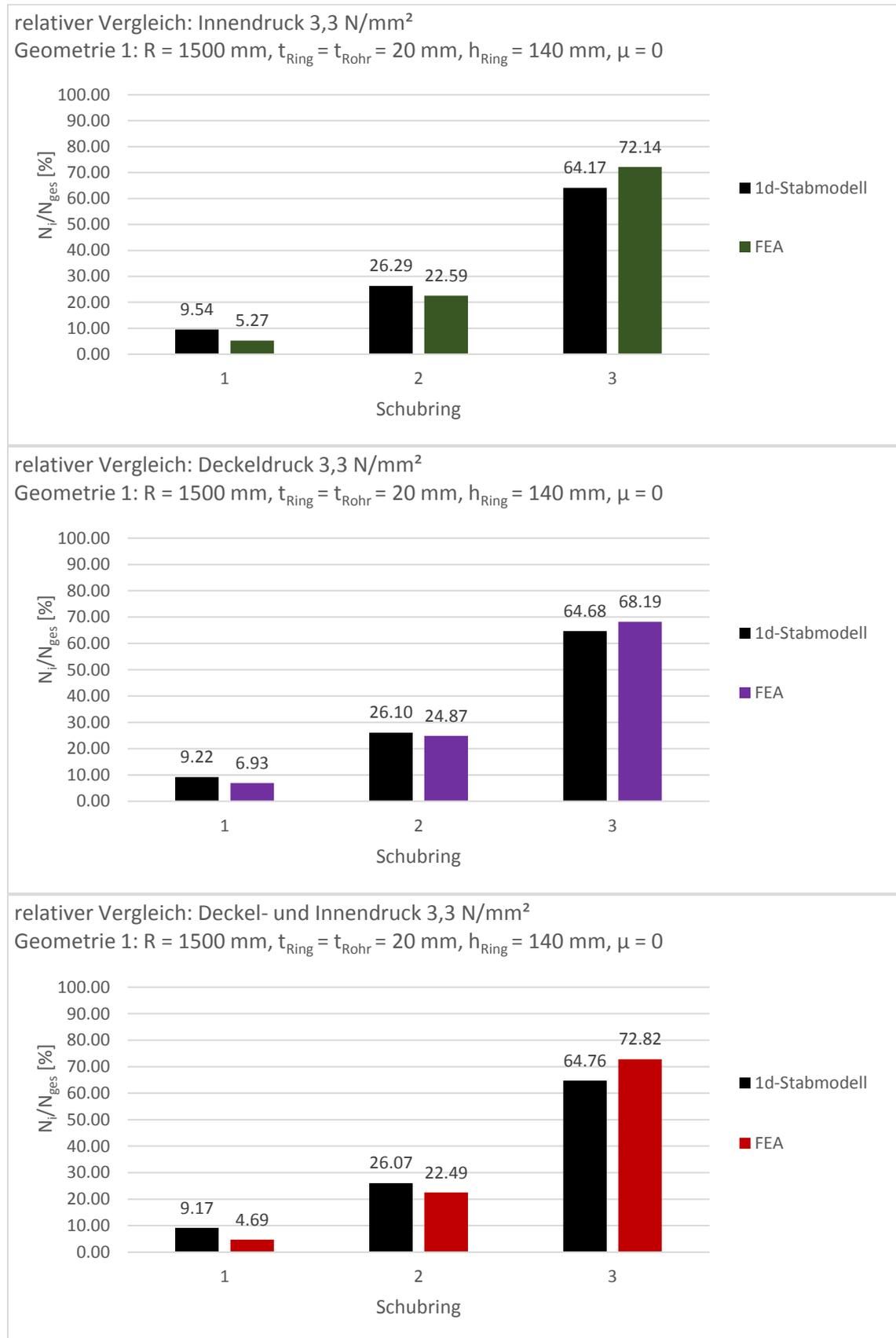


Abbildung 95 Geometrie 1,  $\mu=0$ , absoluter Vergleich, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

### 4.3 Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 2

Die Darstellung der ausgearbeiteten Ergebnisse wird einleitend im Kapitel 4 zusammengefasst. Dieselben Vergleiche wurden bereits in Kapitel 4.2 ausgearbeitet und sind dort anhand von Geometrie 1 erläutert. In diesem Kapitel erfolgt eine Aufarbeitung in der gleichen Art und Weise anhand von Geometrie 2.

#### 4.3.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

Die Gegenüberstellung von FEA und 1D-Stabmodell erfolgt, gleich wie bereits in Kapitel 4.2.1 für Geometrie 1, in diesem Kapitel jedoch für Geometrie 2.

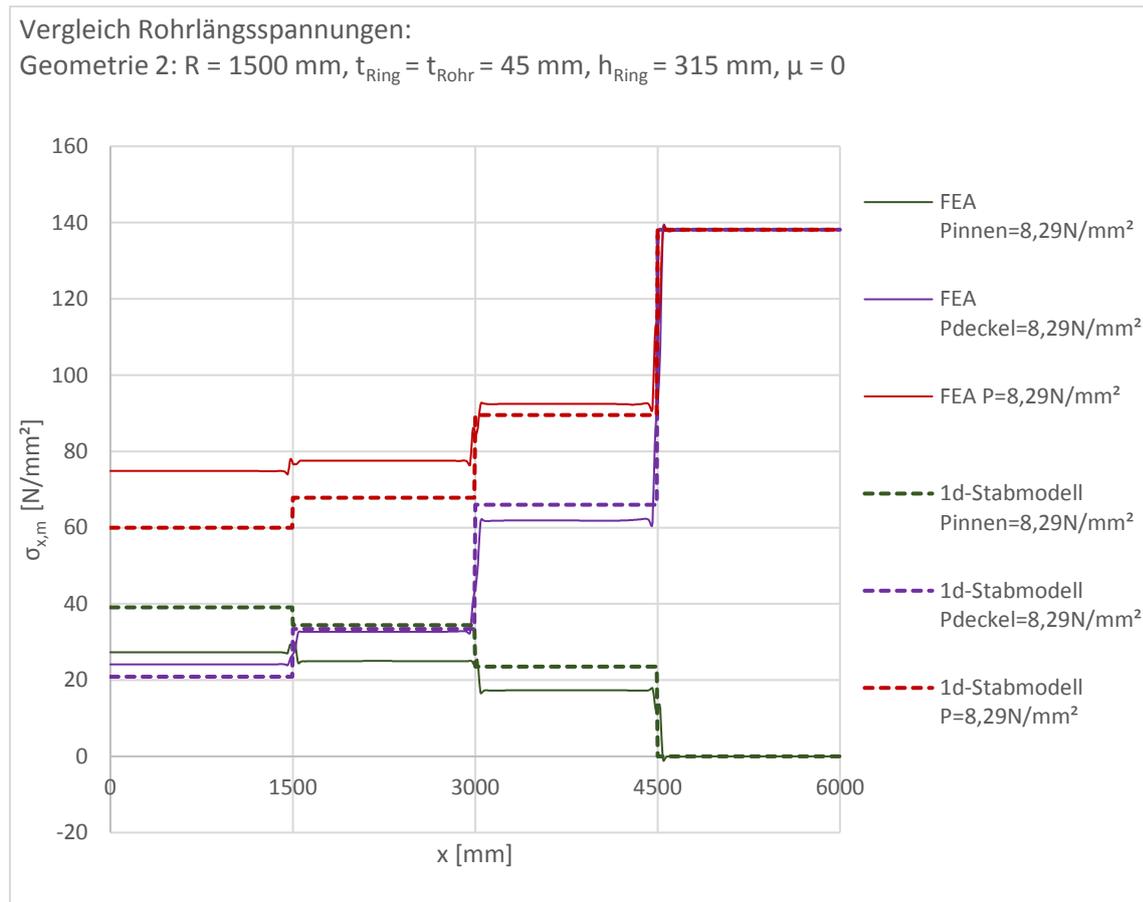


Abbildung 96 Geometrie 2,  $\mu=0$ , Längsspannungen  $\sigma_{x,m}$ , Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

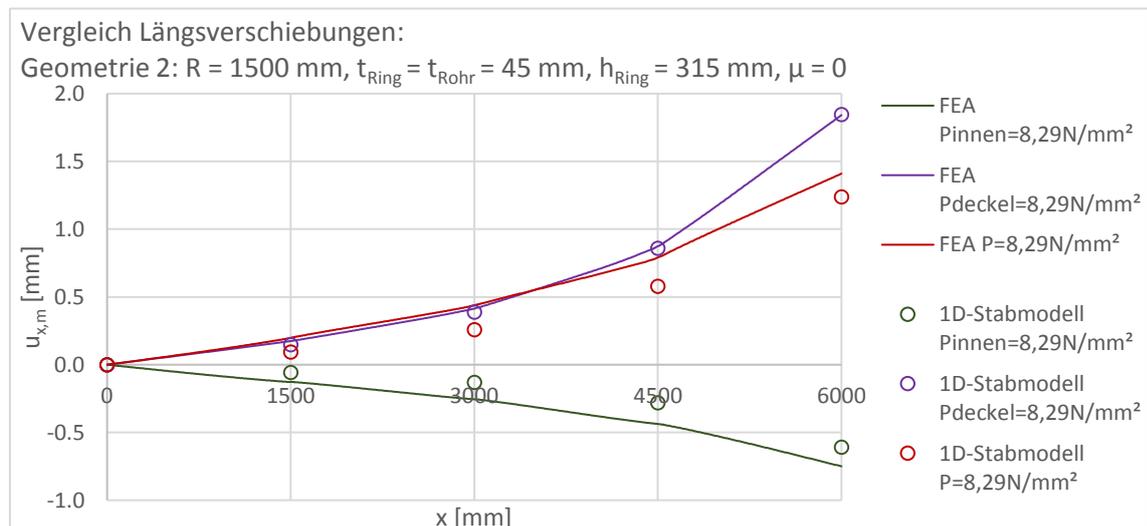


Abbildung 97 Geometrie 2,  $\mu=0$ , Längsverschiebungen  $u_{x,m}$ , Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

Durch das verhältnismäßig nachgiebiger werdende Gebirge (von Geometrie 1 mit  $V_F = 7000$  auf Geometrie 2 mit  $V_F = 4000 \text{ N/mm}^2$ ) gewinnt der Lastfall Innendruck an Einfluss (vgl. Abbildung 84 und Abbildung 85 mit Abbildung 96 und Abbildung 97).

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	11.58	16.57	43%	10.23	8.86	-13%
<b>Schubring 1</b>	1400-1600	0.99	1.99	100%	-3.59	-5.31	48%
<b>Schubring 2</b>	2900-3100	3.32	4.60	38%	-12.34	-13.81	12%
<b>Schubring 3</b>	4400-4600	7.70	9.98	30%	-32.72	-30.60	-6.5%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>12.01</b>	<b>16.57</b>	<b>38%</b>	<b>-48.66</b>	<b>-49.72</b>	<b>2.2%</b>

Tabelle 17 Geometrie 2,  $\mu=0$ , Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
<b>Auflager</b>	0	31.75	25.43	-20%	21.82	-31%
<b>Schubring 1</b>	1400-1600	-1.16	-3.32	186%	-2.60	124%
<b>Schubring 2</b>	2900-3100	-6.40	-9.21	44%	-9.02	41%
<b>Schubring 3</b>	4400-4600	-19.74	-20.62	4.5%	-25.03	27%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-27.30</b>	<b>-33.15</b>	<b>21%</b>	<b>-36.65</b>	<b>34%</b>

Tabelle 18 Geometrie 2,  $\mu=0$ , Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Gesamtdruck und Superposition der Einzellastfälle

Im Gegensatz zur Geometrie 1, nimmt die Übereinstimmung der Ergebnisse mit zunehmender Rohrwandstärke und nachgiebigerem Gebirge im Zuge von Geometrie 2 ab. Das 1D-Stabmodell bleibt jedoch sowohl bei der Gesamtbelastung aller Schubringe mit 21% und 38%, als auch beim höchst belasteten Schubring 3 mit 30% und 4,5% im konservativen Bereich gegenüber der FE-Analyse.

#### 4.3.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

Die Gegenüberstellung von FEA und 1D-Stabmodell erfolgt, gleich wie bereits in Kapitel 4.2.2 für Geometrie 1, in diesem Kapitel jedoch für Geometrie 2.

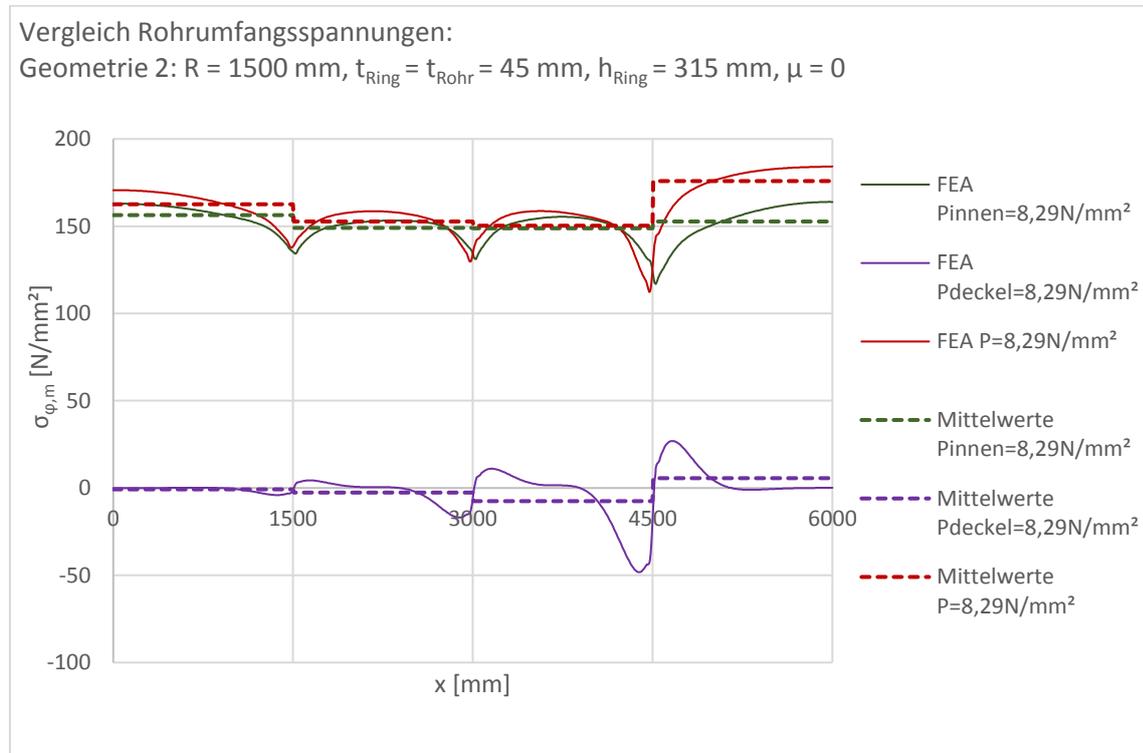


Abbildung 98 Geometrie 2,  $\mu=0$ , Umfangsspannungen  $\sigma_{\varphi,m}$ , Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

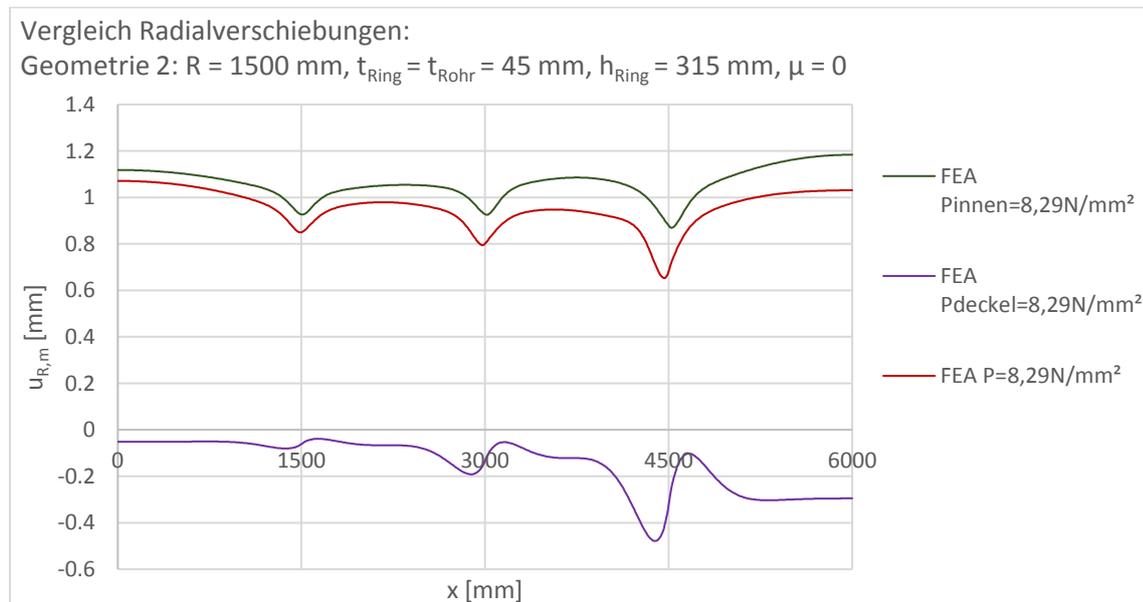


Abbildung 99 Geometrie 2,  $\mu=0$ , Radialverschiebungen  $u_{R,m}$ , Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

---

### 4.3.3 Verformungsplots

Für alle Lastfallüberlagerungen sowie Einzellastfälle werden umfangreiche Verformungsplots erstellt. Alle Lastfälle werden dabei zur besseren Vergleichbarkeit einheitlich mit einem Faktor 100 überhöht dargestellt. Das ursprüngliche Gebirge, vor der Verformung, ist dabei in Form einer roten Linie ersichtlich.

---

#### 4.3.3.1 Verformungsplot - Innendruck

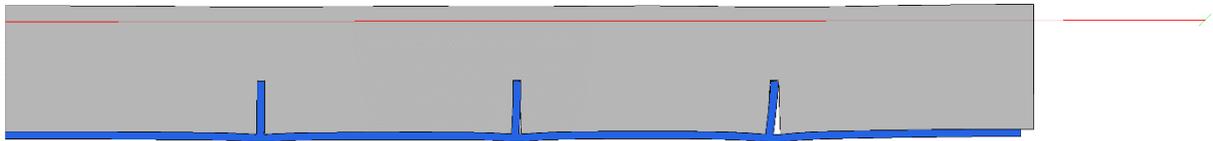


Abbildung 100 Geometrie 2,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 4.3.3.2 Verformungsplot - Deckeldruck



Abbildung 101 Geometrie 2,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 4.3.3.3 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck

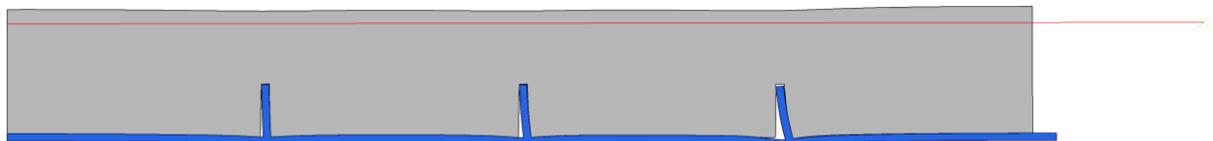


Abbildung 102 Geometrie 2,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 4.3.3.4 Verformungsplot – Innendruck, Detail Schubring 3

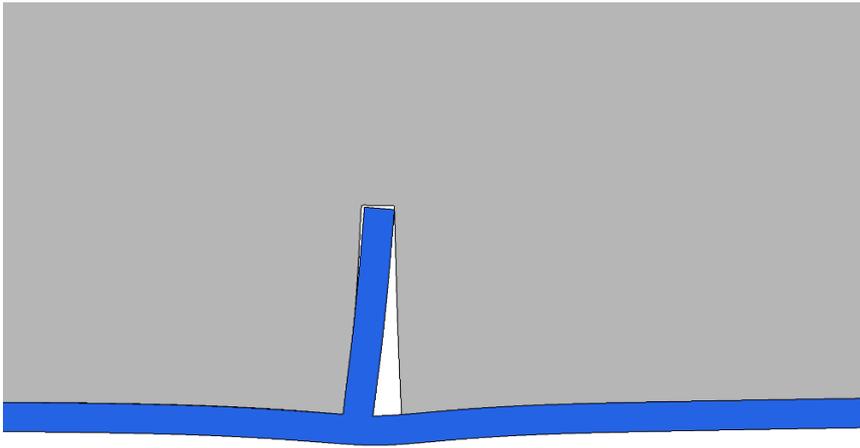


Abbildung 103 Geometrie 2,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 4.3.3.5 Verformungsplot – Deckeldruck, Detail Schubring 3

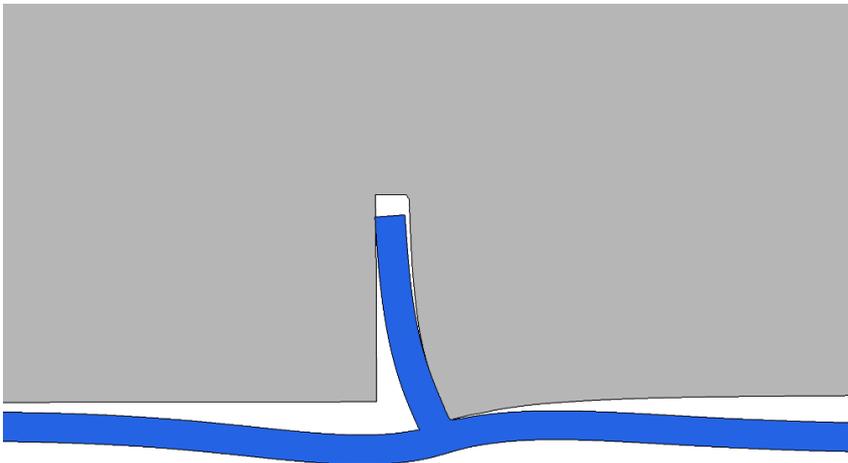


Abbildung 104 Geometrie 2,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 4.3.3.6 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck, Detail Schubring 3

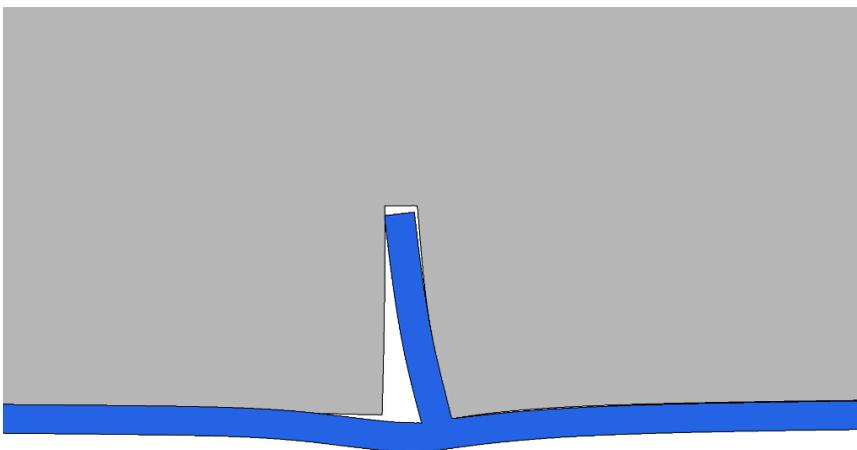


Abbildung 105 Geometrie 2,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>

#### 4.3.4 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

In diesem Kapitel werden die Schubringkräfte  $\Delta N_i$  in absoluten Werten in MN als Balkendiagramm präsentiert.

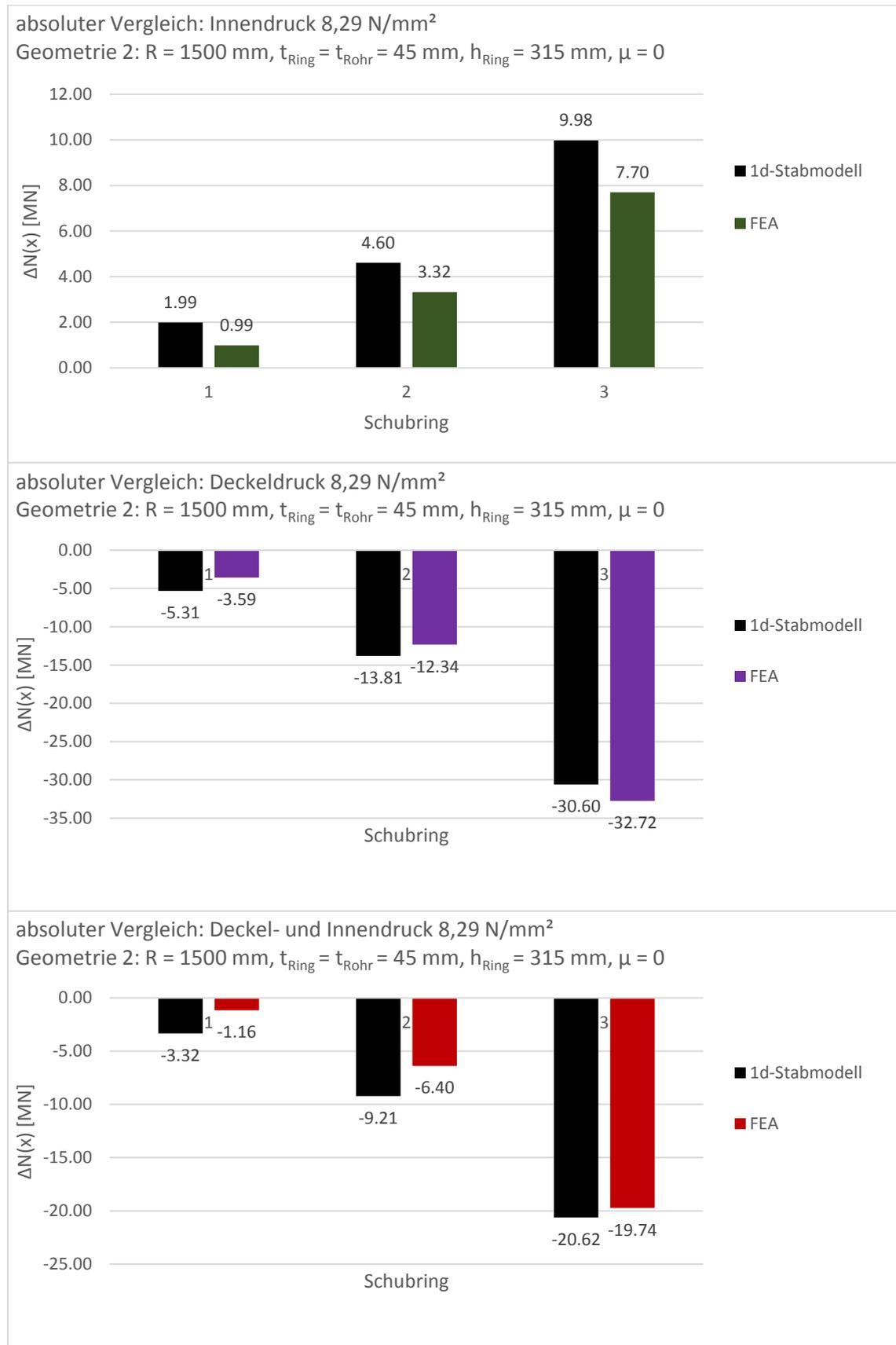


Abbildung 106 Geometrie 2,  $\mu=0$ , absoluter Vergleich, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

#### 4.3.5 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

Im Vergleich zu Kapitel 2 wird die relative Aufteilung der Schubringkräfte  $\Delta N_i$  für jeden Lastfall separat dargestellt, da sich die Aufteilung auch im 1D-Stabmodell unterscheidet.

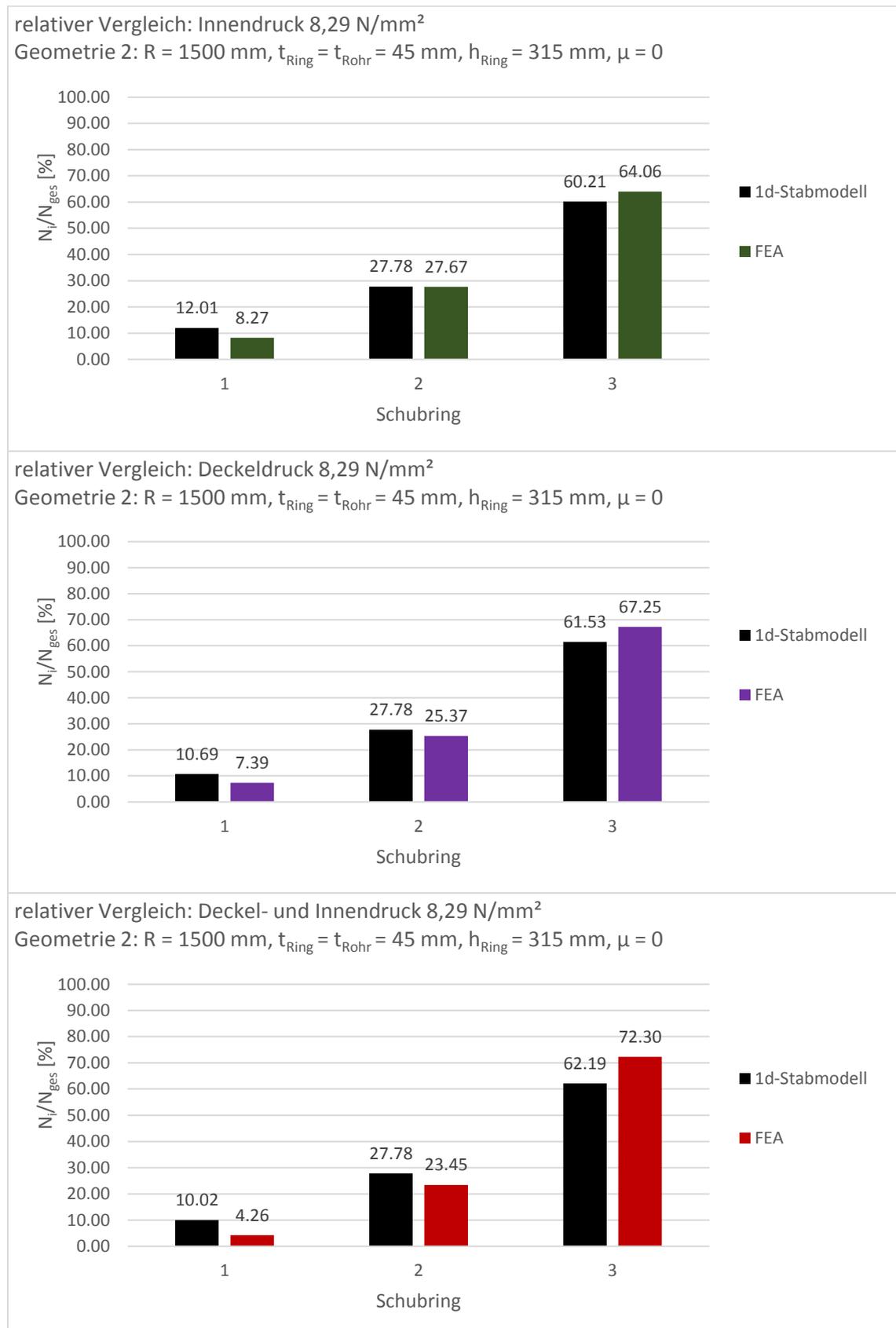


Abbildung 107 Geometrie 2,  $\mu=0$ , relativer Vergleich, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

#### 4.4 Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 3

Die Darstellung der ausgearbeiteten Ergebnisse wird einleitend im Kapitel 4 zusammengefasst. Dieselben Vergleiche wurden bereits in Kapitel 4.2 ausgearbeitet und sind dort anhand von Geometrie 1 erläutert. In diesem Kapitel erfolgt eine Aufarbeitung in der gleichen Art und Weise anhand von Geometrie 3.

##### 4.4.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

Die Gegenüberstellung von FEA und 1D-Stabmodell erfolgt, gleich wie bereits in Kapitel 4.2.1 für Geometrie 1, in diesem Kapitel jedoch für Geometrie 3.

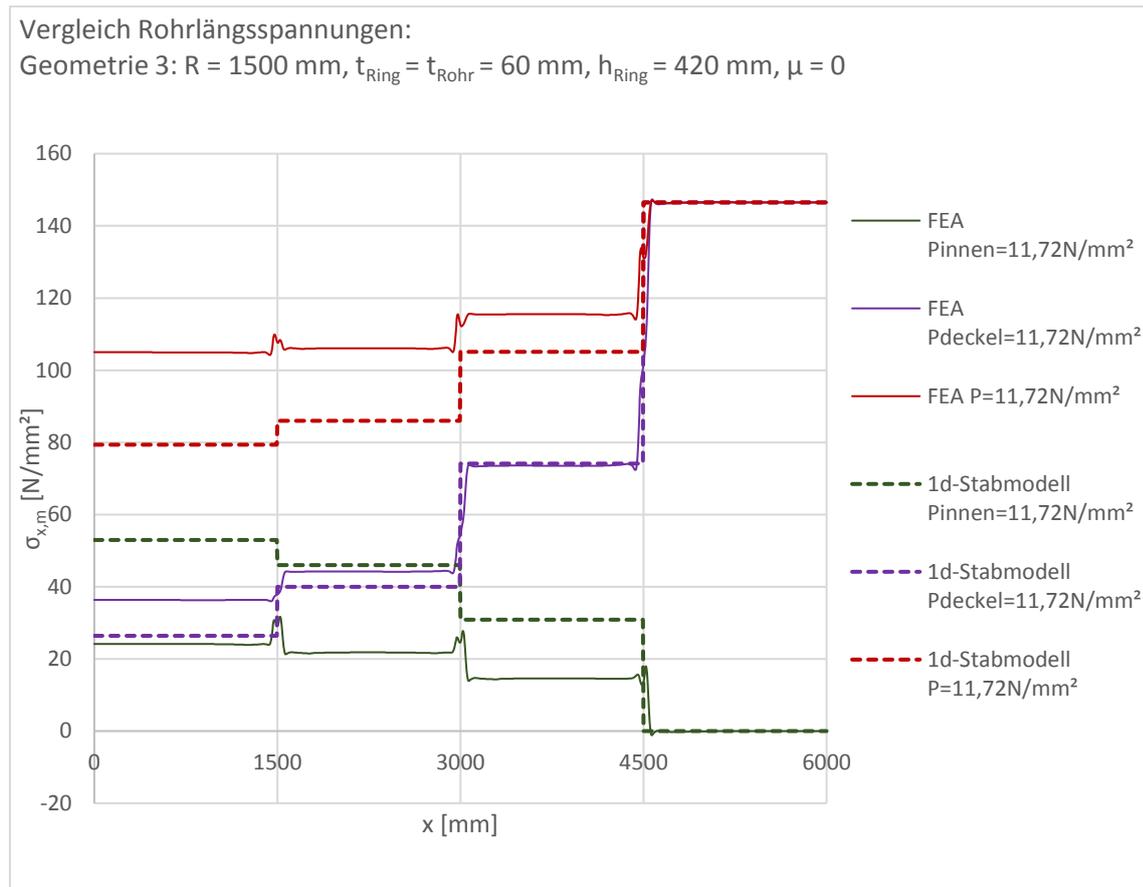


Abbildung 108 Geometrie 3,  $\mu=0$ , Längsspannungen  $\sigma_{x,m}$ , Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

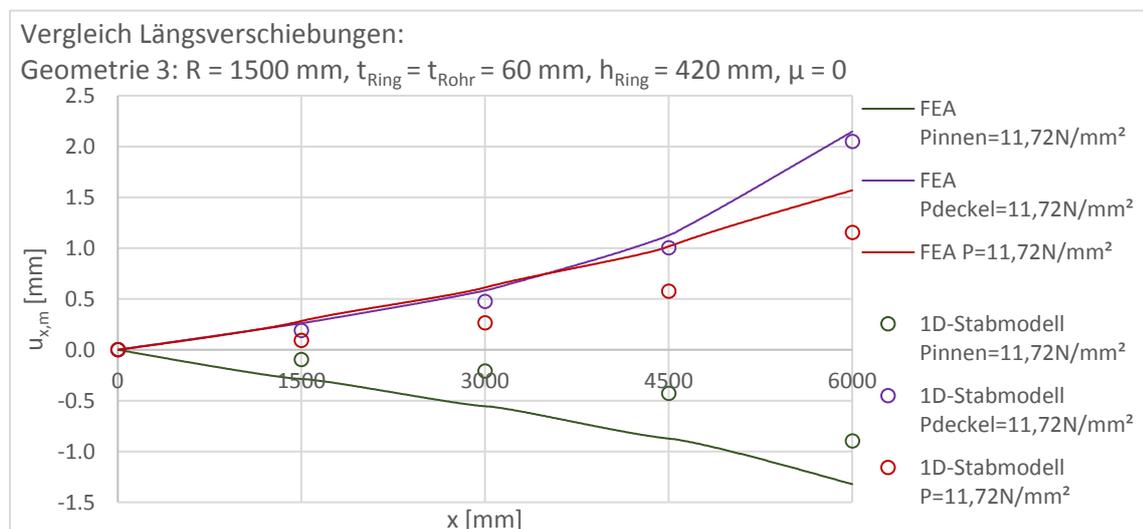


Abbildung 109 Geometrie 3,  $\mu=0$ , Längsverschiebungen  $u_{x,m}$ , Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

Durch das verhältnismäßig nachgiebiger werdende Gebirge (von Geometrie 1 mit  $V_F = 7000 \rightarrow$  Geometrie 2 mit  $V_F = 4000 \text{ N/mm}^2 \rightarrow$  Geometrie 3 mit  $V_F = 1000 \text{ N/mm}^2$ ) gewinnt der Lastfall Innendruck weiter an Einfluss (vgl. Abbildung 84, Abbildung 85, Abbildung 96 und Abbildung 97 mit Abbildung 108 und Abbildung 109).

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	13.64	29.94	119%	20.53	14.93	-27%
<b>Schubring 1</b>	1300-1700	1.30	3.94	204%	-4.43	-7.68	73%
<b>Schubring 2</b>	2800-3200	4.02	8.53	112%	-16.48	-19.32	17%
<b>Schubring 3</b>	4300-4700	8.29	17.47	111%	-40.95	-40.91	-0.1%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>13.61</b>	<b>29.94</b>	<b>120%</b>	<b>-61.86</b>	<b>-67.91</b>	<b>9.8%</b>

Tabelle 19 Geometrie 3,  $\mu=0$ , Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
<b>Auflager</b>	0	59.36	44.87	-24%	34.17	-42%
<b>Schubring 1</b>	1300-1700	-0.64	-3.74	485%	-3.13	390%
<b>Schubring 2</b>	2800-3200	-5.35	-10.79	102%	-12.46	133%
<b>Schubring 3</b>	4300-4700	-17.46	-23.44	34%	-32.66	87%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-23.45</b>	<b>-37.97</b>	<b>62%</b>	<b>-48.25</b>	<b>106%</b>

Tabelle 20 Geometrie 3,  $\mu=0$ , Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Gesamtdruck und Superposition der Einzellastfälle

Wie in Kapitel 2 festgestellt wurde, nimmt die Übereinstimmung der Modelle bei einer Belastung mit alleinigem Innendruck von Geometrie 1 nach Geometrie 3 ab. In diesem Kapitel ist ersichtlich, dass der Einfluss des Innendrucks von Geometrie 1 nach Geometrie 3 jedoch weiter steigt. Aus diesem Grund schlägt sich die Abweichung der Modelle von Geometrie 1 nach Geometrie 3 auch bei der Gesamtwirkung immer stärker durch (vgl. Tabelle 16, Tabelle 18 und Tabelle 20).

Abweichung Schubring 3:      -9,4%     $\rightarrow$     4,5%     $\rightarrow$     34%

Abweichung  $\Sigma$ Schubringe:      1,8%     $\rightarrow$     21%     $\rightarrow$     62%

Glücklicherweise handelt es sich hierbei um eine konservative Entwicklung, da der Innendruck Lastfall in Längsrichtung dem Deckeldruck Lastfall entgegenwirkt.

#### 4.4.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

Die Gegenüberstellung von FEA und 1D-Stabmodell erfolgt, gleich wie bereits in Kapitel 4.2.2 für Geometrie 1, in diesem Kapitel jedoch für Geometrie 3.

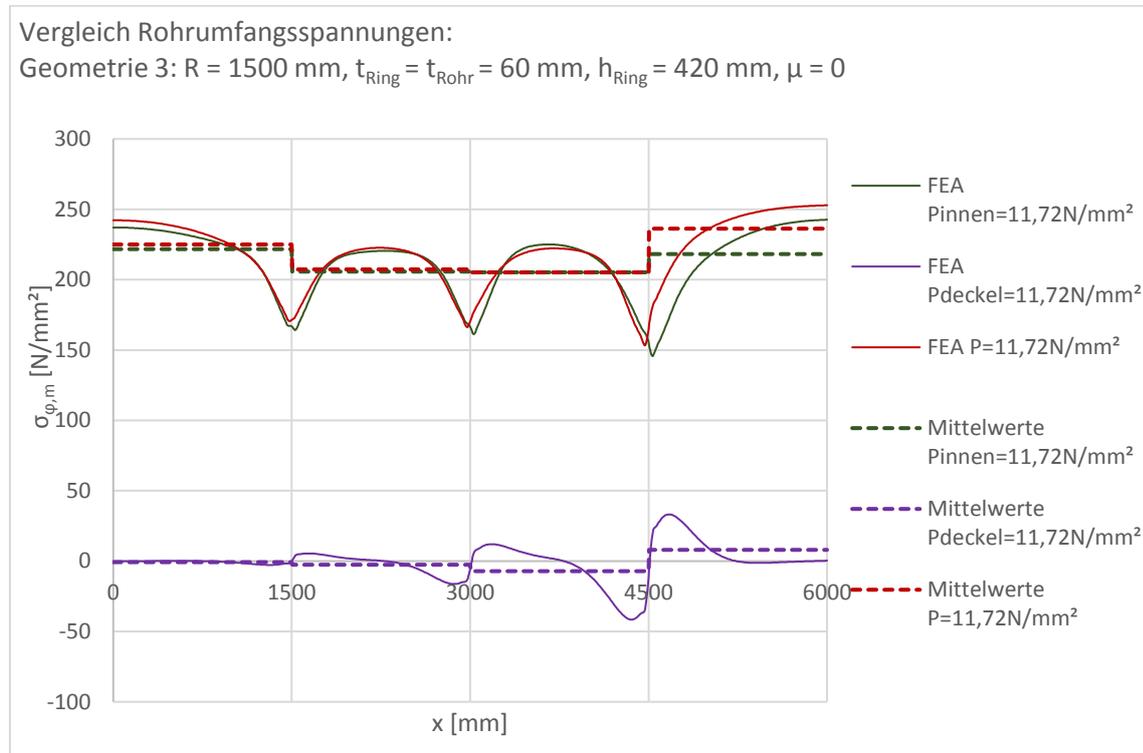


Abbildung 110 Geometrie 3,  $\mu=0$ , Umfangsspannungen  $\sigma_{\phi,m}$ , Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

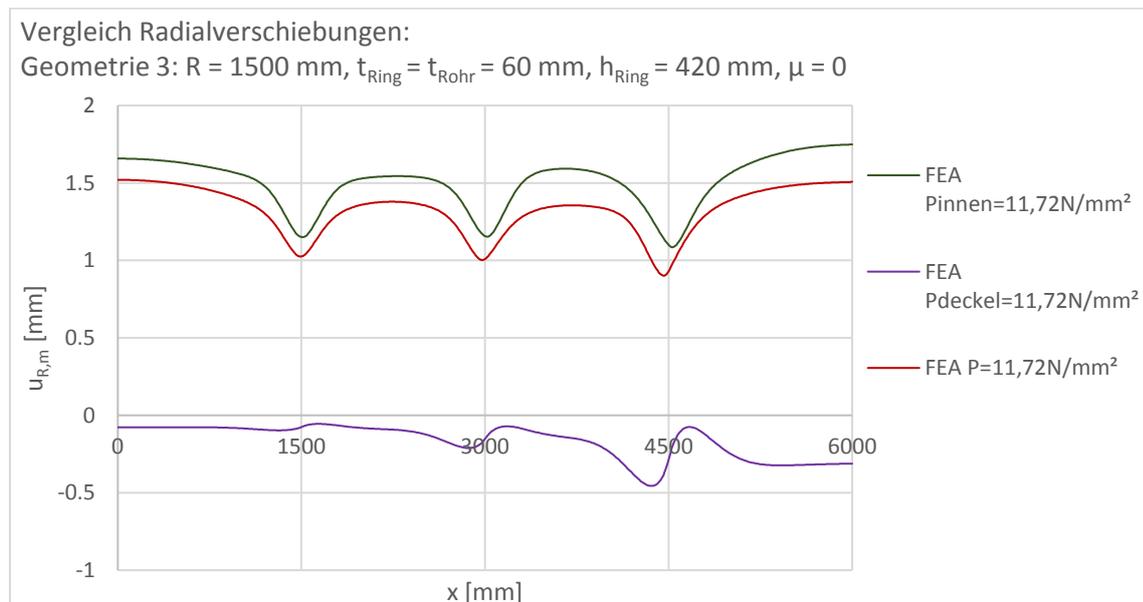


Abbildung 111 Geometrie 3,  $\mu=0$ , Radialverschiebungen  $u_{R,m}$ , Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

---

#### 4.4.3 Verformungsplots

Für alle Lastfallüberlagerungen und die Einzellastfälle werden jeweils umfangreiche Verformungsplots erstellt. Alle Lastfälle werden dabei zur besseren Vergleichbarkeit einheitlich mit einem Faktor 100 überhöht dargestellt. Das ursprüngliche Gebirge, vor der Verformung, ist dabei in Form einer roten Linie ersichtlich.

---

##### 4.4.3.1 Verformungsplot - Innendruck



Abbildung 112 Geometrie 3,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>

---

##### 4.4.3.2 Verformungsplot - Deckeldruck

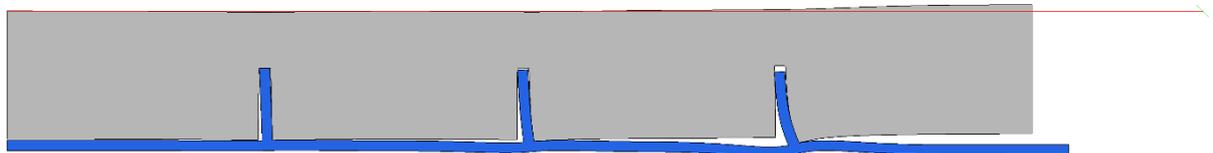


Abbildung 113 Geometrie 3,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>

---

##### 4.4.3.3 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck

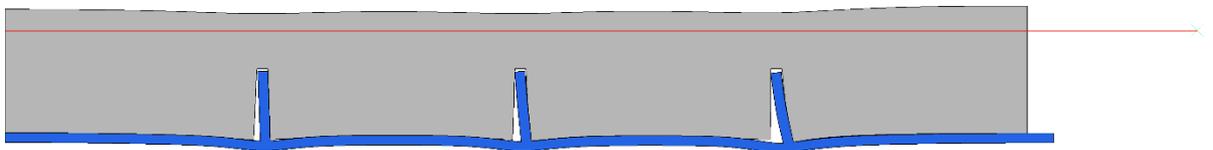


Abbildung 114 Geometrie 3,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 4.4.3.4 Verformungsplot – Innendruck, Detail Schubring 3

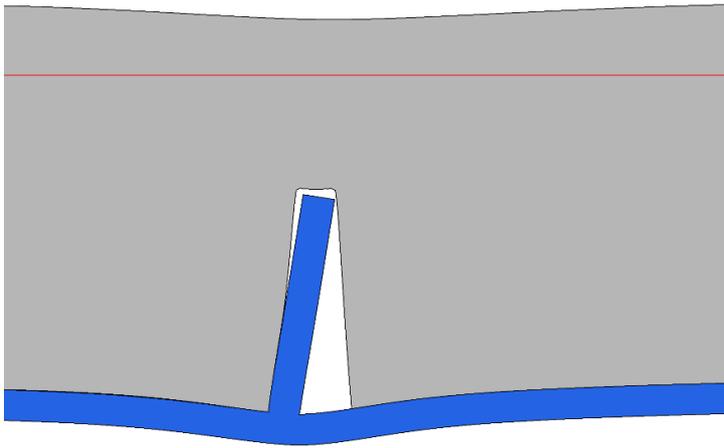


Abbildung 115 Geometrie 3,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 4.4.3.5 Verformungsplot – Deckeldruck, Detail Schubring 3

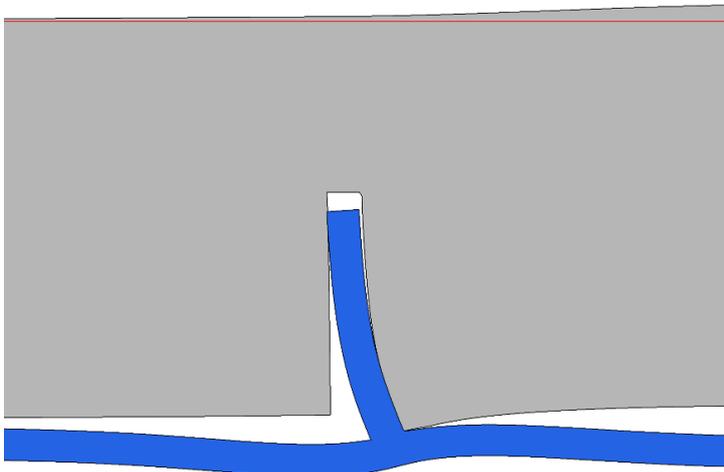


Abbildung 116 Geometrie 3,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 4.4.3.6 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck, Detail Schubring 3

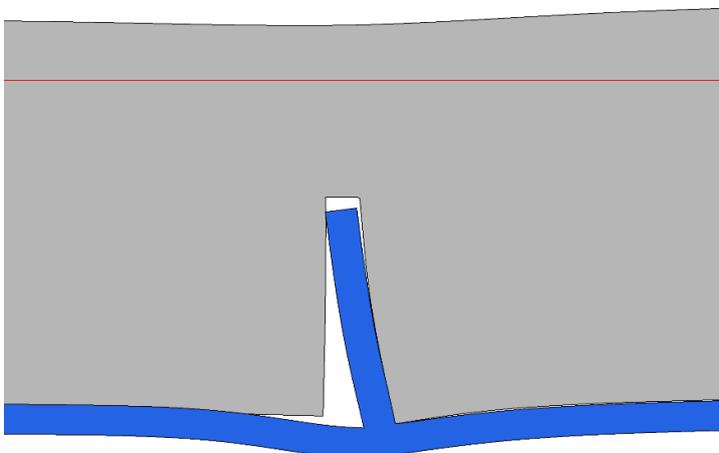


Abbildung 117 Geometrie 3,  $\mu=0$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>

#### 4.4.4 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

In diesem Kapitel werden die Schubringkräfte  $\Delta N_i$  in absoluten Werten in MN als Balkendiagramm präsentiert.

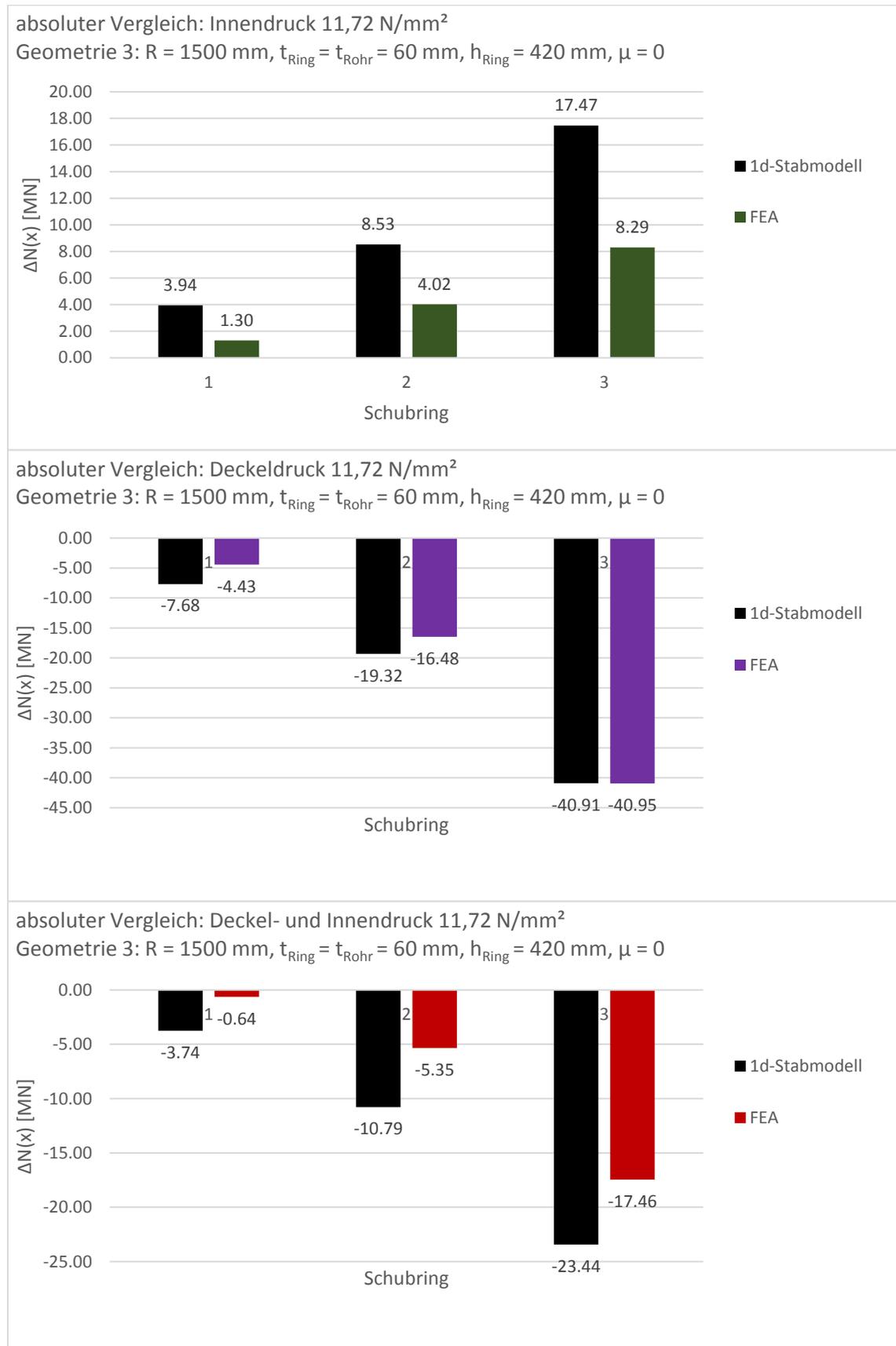


Abbildung 118 Geometrie 3,  $\mu=0$ , absoluter Vergleich, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

#### 4.4.5 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

Im Vergleich zu Kapitel 2 wird die relative Aufteilung der Schubringkräfte  $\Delta N_i$  für jeden Lastfall separat dargestellt, da sich die Aufteilung auch im 1D-Stabmodell unterscheidet.

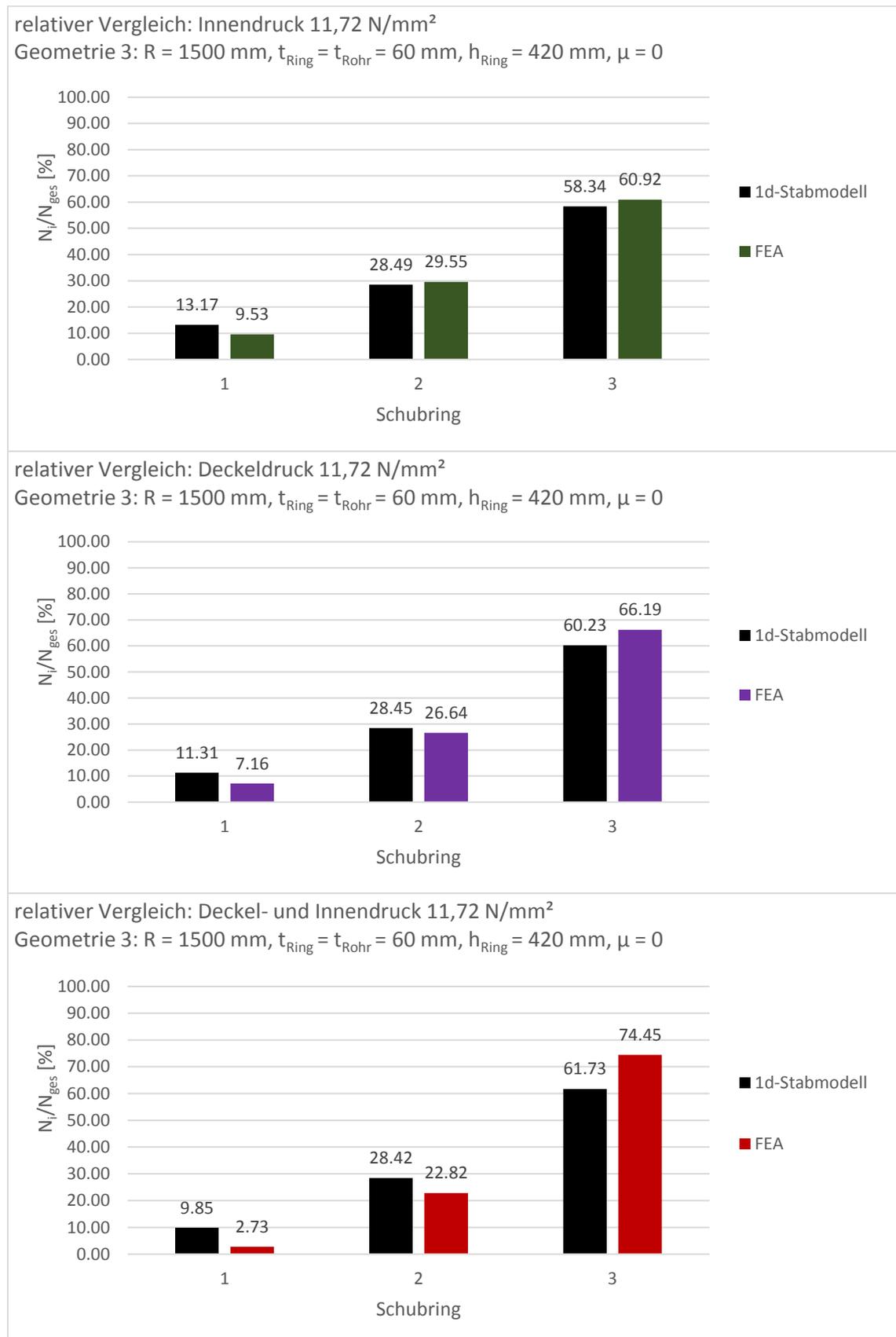


Abbildung 119 Geometrie 3,  $\mu=0$ , relativer Vergleich, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

## 5 Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck – Vergleich 1D-Stabmodell – FEA mit Reibung

In diesem Kapitel wird die Zusammenwirkung der gleichen Lastfälle anhand der gleichen Geometrien, wie in Kapitel 4 dargestellt. Der einzige Unterschied ist dabei, dass in diesem Kapitel eine Reibung von  $\mu=0,25$  zwischen Stahlkörper und Betonmantel berücksichtigt wird.

Des Weiteren ist der Reibungswirkung entlang der Stahlpanzerung ein zusätzliches Kapitel gewidmet (siehe Kapitel 5.1.3, Kapitel 5.2.3 und Kapitel 5.3.3).

### 5.1 Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 1

Die Darstellung der ausgearbeiteten Ergebnisse wird einleitend im Kapitel 4 zusammengefasst. Dieselben Vergleiche wurden bereits in Kapitel 4.2 ausgearbeitet und sind dort erläutert. In diesem Kapitel erfolgt eine Aufarbeitung in der gleichen Art und Weise, jedoch mit der Berücksichtigung von Reibung  $\mu=0,25$  zwischen Stahlkörper und Betonmantel (vgl. Abbildung 3). Des Weiteren wird der mittragende Anteil der Reibung in Tabelle 21 und Tabelle 22 ermittelt und der Reibungswirkung ein eigenes Kapitel (Kapitel 5.1.3) gewidmet.

#### 5.1.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

Die Gegenüberstellung von FEA und 1D-Stabmodell erfolgt, gleich wie bereits in Kapitel 4.2.1, in diesem Kapitel jedoch mit Reibung und Ergänzungen laut Einleitung Kapitel 5. Im 1D-Stabmodell kann die Reibung nicht berücksichtigt werden, daher werden für den Vergleich mit der FEA die Lösungen ohne Reibung herangezogen.

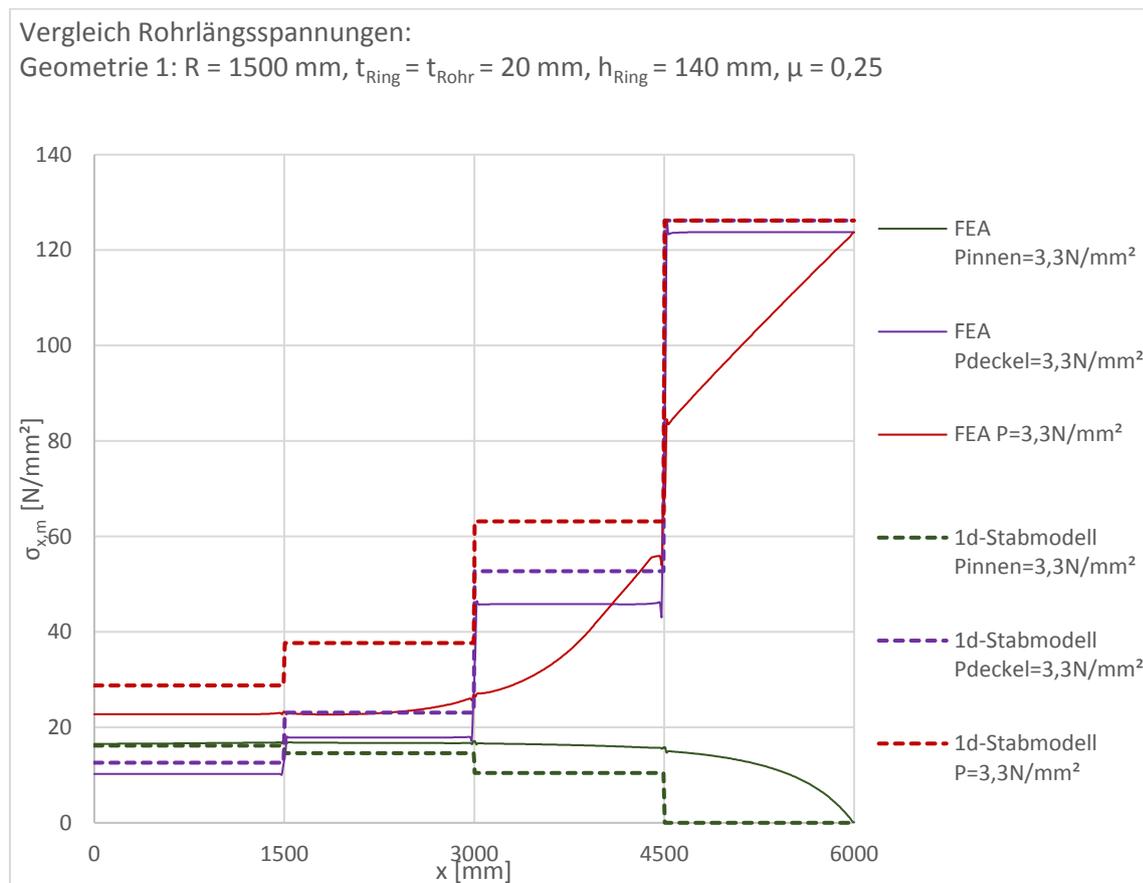


Abbildung 120 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , Längsspannungen  $\sigma_{x,m}$ , Innendruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$ , Deckeldruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung

Wie in Abbildung 87 bereits ersichtlich war, löst sich aufgrund der Querkontraktion das unter Längszugspannung stehende Rohr, im Falle eines alleinigen Deckeldrucks, aus dem Betonmantel. Durch den nun fehlenden Kontakt kann keine Reibung aktiviert werden, was zu den gleichen Ergebnissen in der FEA mit Reibung führt, wie in

Abbildung 99 ohne Reibung ersichtlich war. Im Längsspannungsdiagramm Abbildung 120 bleibt der Verlauf für den alleinigen Deckeldruck deshalb auch gleich, mit horizontalen Verläufen zwischen den Schubringen, wie er bereits im Längsspannungsdiagramm Abbildung 84 erkennbar ist.

Der Lastfall Innendruck ist durch seine Wirkungsweise am stärksten von der Reibung betroffen und löst bei alleiniger Wirkung so große Reibungswirkungen aus, dass die Schubringkräfte kaum noch ablesbar werden. Der annähernd stetige, gekrümmte Verlauf kann vom 1D-Stabmodell nicht mehr dargestellt werden (vgl. Abbildung 120, dunkelgrün).

Das Ablösen des Stahlkörpers aus dem Betonmantel für die Deckeldruckbelastung kann durch den zusätzlichen Innendruck Lastfall verhindert werden. Die Zusammenwirkung von beiden Lastfällen bewirkt eine erhebliche Verringerung der Belastung der Schubringe, da über die Stahlpanzerungen, erkennbar durch die Steigung im Verlauf der Längsspannung, ein erheblicher Anteil der Längskräfte über die Reibungswirkung abgetragen werden kann (vgl. Abbildung 120, dunkelrot).

Auch anhand der Längsverschiebung  $u_{x,m}$  zeichnet sich das gleiche Bild ab. Der Lastfall Innendruck verursacht keine nennenswerten Längsverschiebungen. Die alleinige Wirkung von Deckeldruck bleibt unverändert und bei der Gesamtwirkung kann ebenfalls eine erhebliche Verringerung der Längsverschiebung festgestellt werden, durch die Einwirkung des Innendrucks und dessen Reibungswirkung.

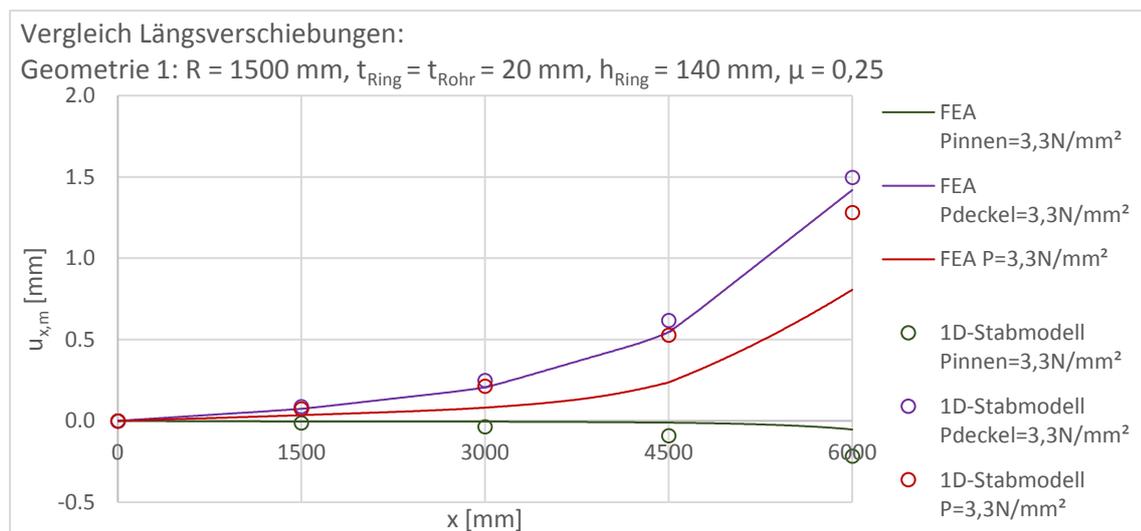


Abbildung 121 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , Längsverschiebungen  $u_{x,m}$ , Innendruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$ , Deckeldruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung

Die Reibungswirkung der Stahlpanzerungen wird, gleich wie die Schubringkräfte, ebenfalls aus der Längsspannungsdifferenz  $\Delta\sigma_{x,m}$  in Abbildung 120 ermittelt. Dabei wird  $\sigma_{x,m}$ , an den in Spalte 2 angegebenen Werten für den Abstand  $x$ , abgelesen und mit  $A_{\text{Rohr}}$  wird die dortige Längsspannungsdifferenz  $\Delta\sigma_{x,m}$  in eine Kraft  $\Delta N$  umgerechnet. Die abgelesene Längsspannungsdifferenz zwischen benachbarten Schubringen entspricht dabei immer der gesamten Kraft, welche von der dazwischenliegenden Stahlpanzerung aufgenommen wird.

Die Abweichung des 1D-Stabmodells von den Ergebnissen der FEA werden dabei nur für die Schubringe dargestellt, da im 1D-Stabmodell keine Reibungswirkung zwischen den Schubringen dargestellt werden kann.

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
Auflager	0	3.12	3.05	-2.3%	1.93	2.38	23%
Stahlpanzerung 1	0-1440	-0.05	0.00		0.00	0.00	
Schubring 1	1445-1555	0.00	0.29	>>	-1.44	-1.97	37%
Stahlpanzerung 2	1560-2950	0.02	0.00		-0.02	0.00	
Schubring 2	2945-3055	0.01	0.79	5699%	-5.24	-5.59	6.7%
Stahlpanzerung 3	3060-4440	0.17	0.00		-0.06	0.00	
Schubring 3	4445-4555	0.14	1.96	1263%	-14.60	-13.85	-5.2%
Stahlpanzerung 4	4560-6000	2.80	0.00		-0.03	0.00	
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>0.16</b>	<b>3.05</b>	<b>1842%</b>	<b>-21.28</b>	<b>-21.41</b>	<b>0.62%</b>

Tabelle 21 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>

Erkennbar wird auch in Tabelle 21, dass der Deckeldruck Lastfall unverändert bleibt, während der Innendruck Lastfall keinen sinnvollen Vergleich mehr mit dem 1D-Stabmodell zulässt (Abweichungen > 1000%).

In der Überlagerung beider Drucklastfälle wird deutlich erkennbar, wie stark entlastend sich die durch den Innendruck ermöglichte Reibung auswirkt (vgl. Tabelle 22).

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
Auflager	0	4.29	5.43	26%	5.05	18%
Stahlpanzerung 1	0-1440	-0.04	0.00		-0.06	38%
Schubring 1	1445-1555	0.00	-1.68	>>	-1.44	>>
Stahlpanzerung 2	1560-2950	-0.56	0.00		0.00	-100%
Schubring 2	2945-3055	-0.24	-4.80	1939%	-5.22	2120%
Stahlpanzerung 3	3060-4440	-5.41	0.00		0.12	-102%
Schubring 3	4445-4555	-5.35	-11.88	122%	-14.46	170%
Stahlpanzerung 4	4560-6000	-7.41	0.00		2.77	-137%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-5.58</b>	<b>-18.36</b>	<b>229%</b>	<b>-21.12</b>	<b>278%</b>

Tabelle 22 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Gesamtdruck und Superposition der Einzellastfälle

### 5.1.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

Die Gegenüberstellung von FEA und 1D-Stabmodell erfolgt, gleich wie bereits in Kapitel 4.2.2 ohne Reibung im Stabmodell.

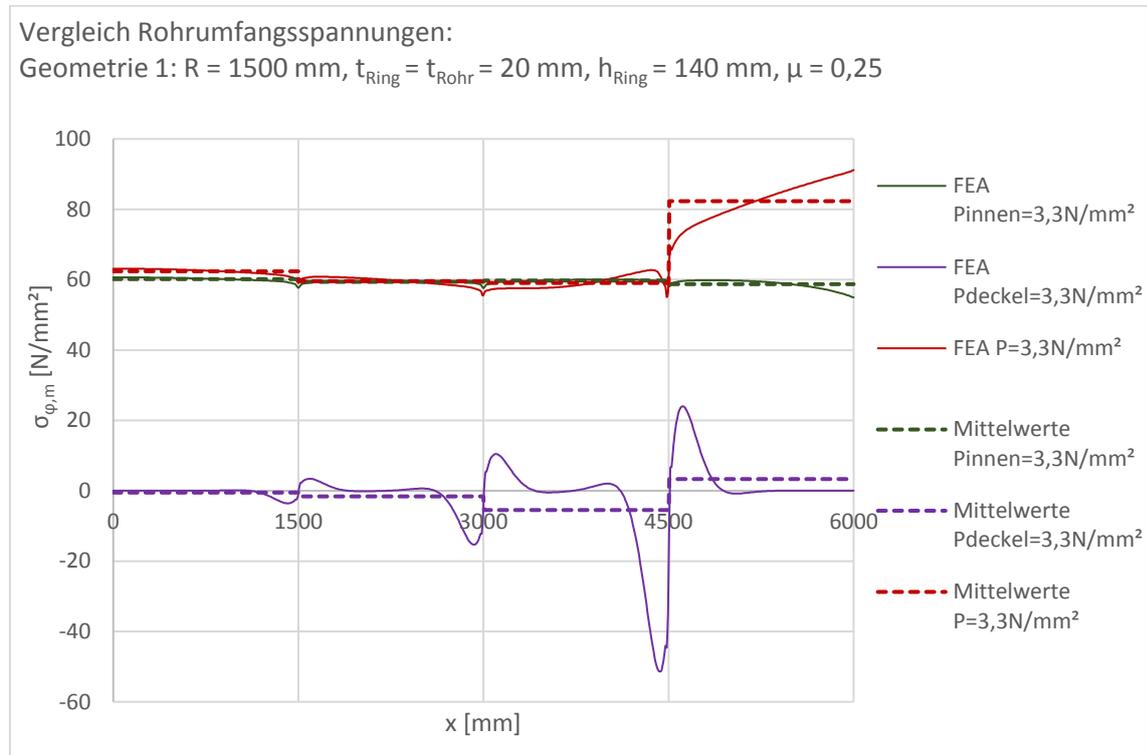


Abbildung 122 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , Rohrumfangsspannungen  $\sigma_{\phi,m}$ , Innendruck 3,3  $\text{N/mm}^2$ , Deckeldruck 3,3  $\text{N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung

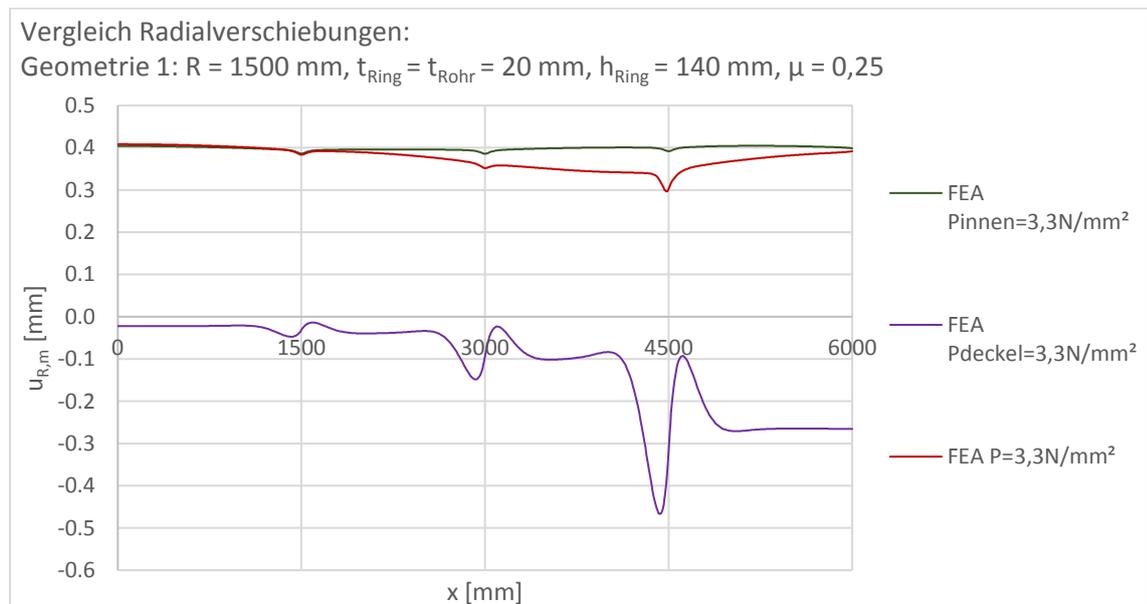
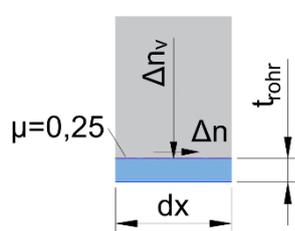


Abbildung 123 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , Radialverschiebungen  $u_{r,m}$ , Innendruck 3,3  $\text{N/mm}^2$ , Deckeldruck 3,3  $\text{N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung

### 5.1.3 Analyse der Reibungswirkung

Die **maximal mögliche Reibungswirkung** der Stahlpanzerung ergibt sich durch die Kontaktspannung  $C_{press}$ , welche wie in Kapitel 1.6 erläutert laut Abbildung 19 aus der FEA abgelesen wird. Die Kontaktspannung  $C_{press}$  kann nun mit dem Außendurchmesser  $d_a$  entlang der Stahlpanzerung  $dx$  in eine Kontaktkraftdifferenz  $\Delta n_v$  umgerechnet werden, welche lotrecht auf die Rohrachse (in Radialrichtung  $r$ ) wirkt.



$$\Delta n_v = \frac{C_{press} \cdot d_a \cdot \pi}{dx}$$

Diese Kraft kann nun eine vom Reibungskoeffizienten  $\mu$  abhängige Längskraftdifferenz aktivieren (vgl. Abbildung 124).

$$\Delta n = \frac{C_{press} \cdot d_a \cdot \pi \cdot \mu}{dx} \quad \rightarrow \quad \Delta n \text{ aus } C_{press} \cdot \mu$$

Abbildung 124 Reibungswirkung am Rohr

Die auf diese Weise ermittelte Längskraftdifferenz stellt somit eine Obergrenze für die theoretisch mögliche Reibung dar und wird im Diagramm als „ $\Delta n$  aus  $C_{press} \cdot \mu$ “ bezeichnet (vgl. Abbildung 125, strichlierte Linie).

Die **tatsächlich vorhandene Längskraftdifferenz** kann direkt aus dem Längsspannungsdiagramm (Abbildung 120) nach  $x$  abgeleitet werden.

$$\Delta n = \Delta \sigma_{x,m} \cdot A_{rohr} = A_{rohr} \cdot \Delta x \cdot \frac{d\sigma_{x,m}}{dx} \quad \rightarrow \quad \Delta n \text{ aus } \Delta \sigma x$$

Die nach  $x$  abgeleitete Längskraft stellt die vorhandene Längskraftdifferenz der FEA dar und wird im Diagramm als „ $\Delta n$  aus  $\Delta \sigma x$ “ bezeichnet (vgl. Abbildung 125, dünne Linie).

Durch Gegenüberstellung der beiden Größen wird die Aktivierung der Reibung entlang der Stahlpanzerung ersichtlich (vgl. Abbildung 125).

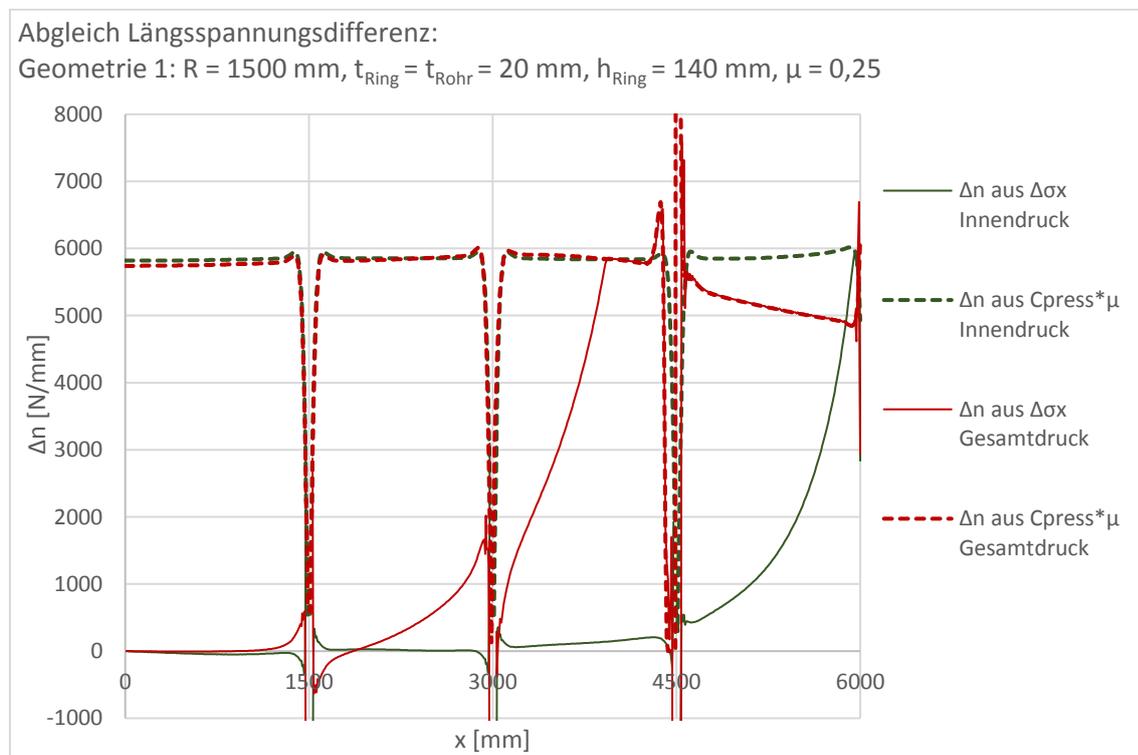


Abbildung 125 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , Reibungswirkung  $\Delta n$ , Innendruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$ , Gesamtdruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$

Interessant ist dabei, dass für den Lastfall des Innendrucks (in Abbildung 125 **dunkelgrün**), die Reibung kaum ausnutzbar ist. Dies ist begründet durch den zwar hohen Anpressdruck  $C_{press}$ , jedoch die fehlende Längsverschiebung zwischen Rohr und Beton (vgl. Abbildung 121). Der Lastfall des Gesamtdrucks (in Abbildung 125 **dunkelrot**), welcher sich aus der gemeinsamen Wirkung von Deckel- und Innendruck zusammensetzt, verfügt durch den Deckeldruck über eine stärkere Belastung in Längsrichtung und aktiviert dadurch in der Stahlpanzerung 4 die maximal mögliche Reibung.

Bemerkenswert ist auch, dass sich die Ausnutzung der Reibung beim Gesamtdruck, in einem annähernd linearen Längsspannungsverlauf äußert (vgl. Abbildung 120 zwischen  $\sim 4000 < x < 6000$ ). Dies ist durch den annähernd konstanten Verlauf der möglichen Längskraftdifferenz  $\Delta n$  begründet und schlägt sich, durch ihre Charakteristik als Ableitung, daher als linearer Verlauf in der Längsspannung entlang der Stahlpanzerung nieder.

---

#### 5.1.4 Verformungsplots

Für alle Lastfallüberlagerungen sowie Einzellastfälle werden umfangreiche Verformungsplots erstellt. Alle Lastfälle werden dabei zur besseren Vergleichbarkeit einheitlich mit einem Faktor 100 überhöht dargestellt. Das ursprüngliche Gebirge, vor der Verformung, ist dabei in Form einer roten Linie ersichtlich.

---

##### 5.1.4.1 Verformungsplot - Innendruck

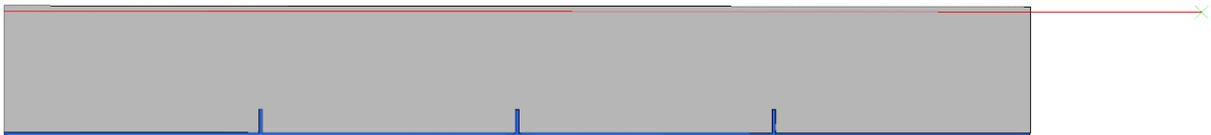


Abbildung 126 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$

---

##### 5.1.4.2 Verformungsplot - Deckeldruck



Abbildung 127 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Deckeldruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$

---

##### 5.1.4.3 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck



Abbildung 128 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$  und Deckeldruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$

---

#### 5.1.4.4 Verformungsplot – Innendruck, Detail Schubring 3

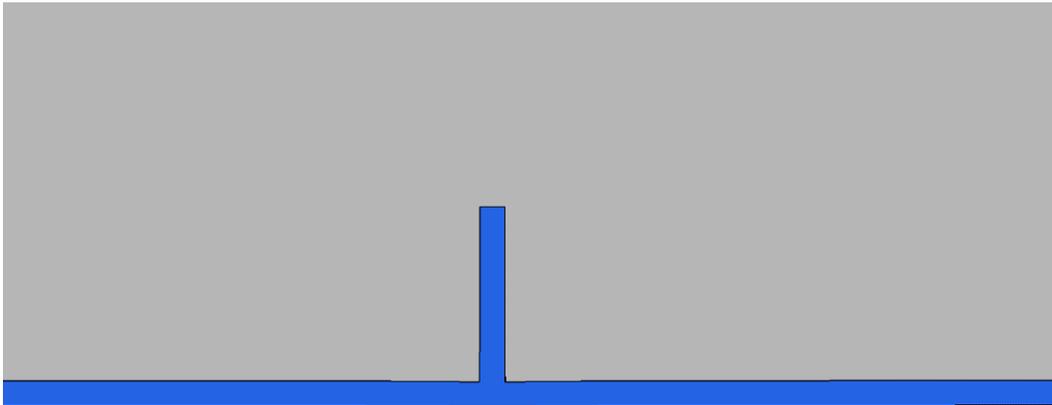


Abbildung 129 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 5.1.4.5 Verformungsplot – Deckeldruck, Detail Schubring 3

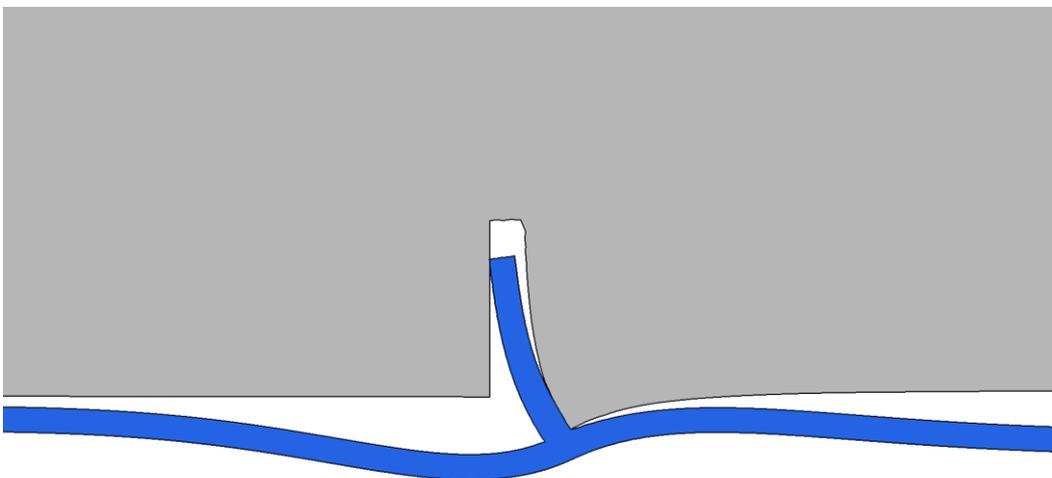


Abbildung 130 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 5.1.4.6 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck, Detail Schubring 3

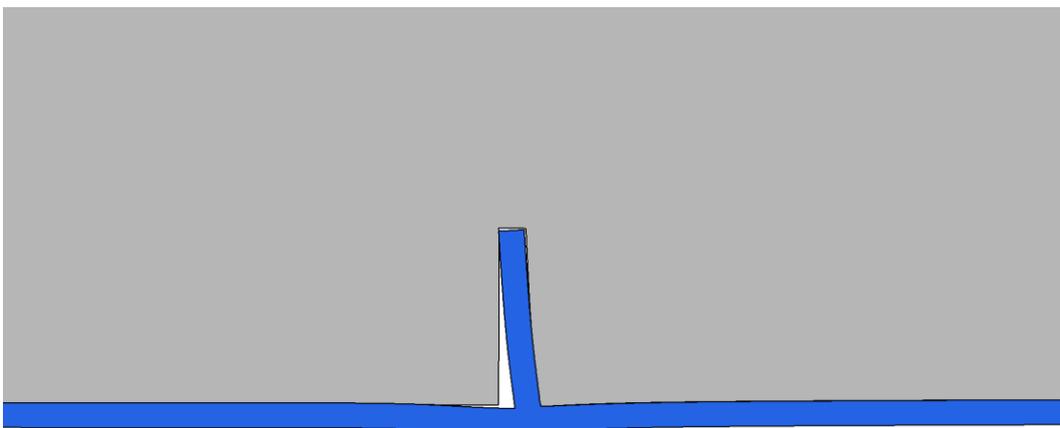


Abbildung 131 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup> und Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>

### 5.1.5 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

In diesem Kapitel werden die Schubringkräfte  $\Delta N_i$  in absoluten Werten in MN als Balkendiagramm präsentiert.

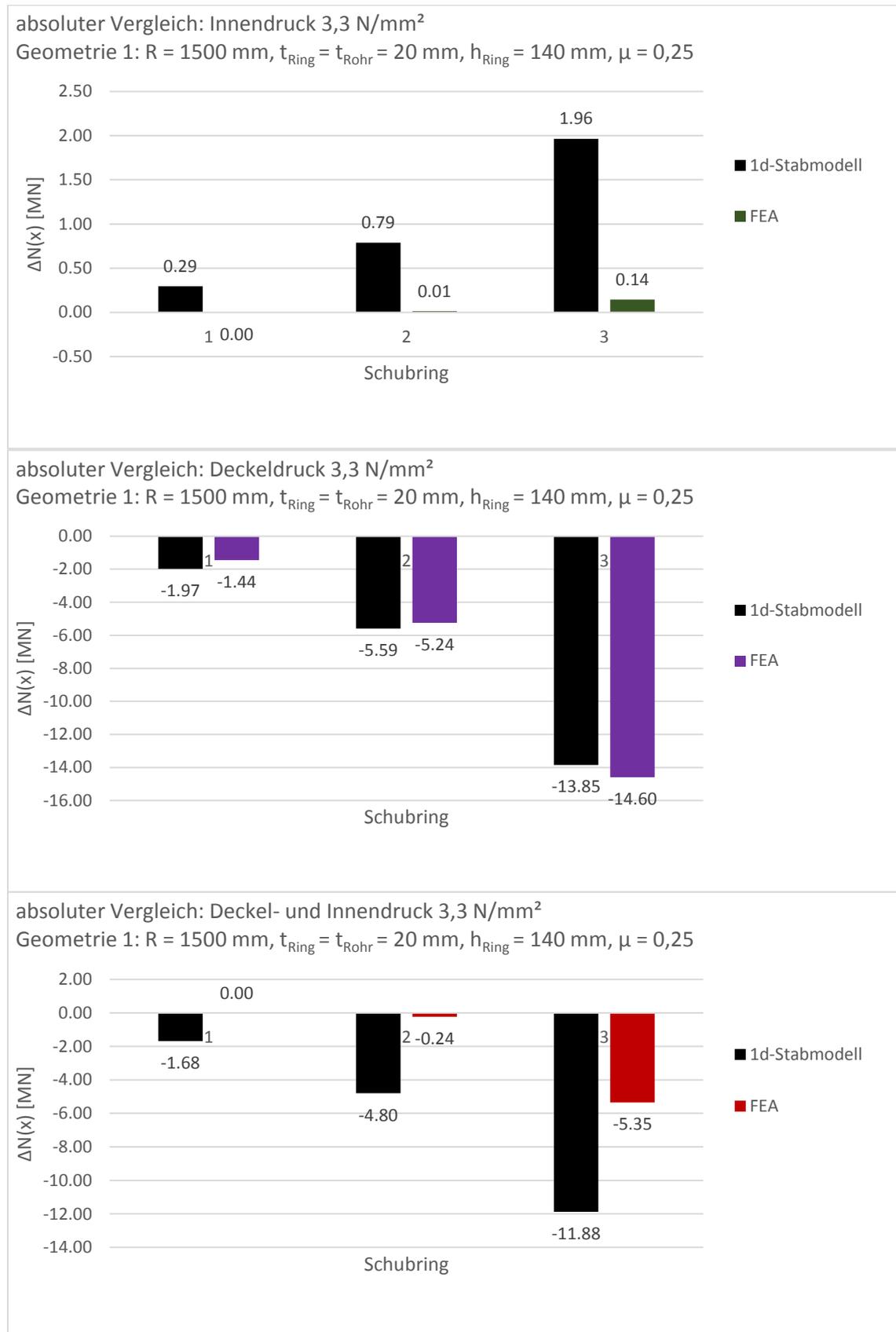


Abbildung 132 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , absoluter Vergleich, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

### 5.1.6 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

Im Vergleich zu Kapitel 2 wird die relative Aufteilung der Schubringkräfte  $\Delta N_i$  für jeden Lastfall separat dargestellt, da sich die Aufteilung auch im 1D-Stabmodell unterscheidet.

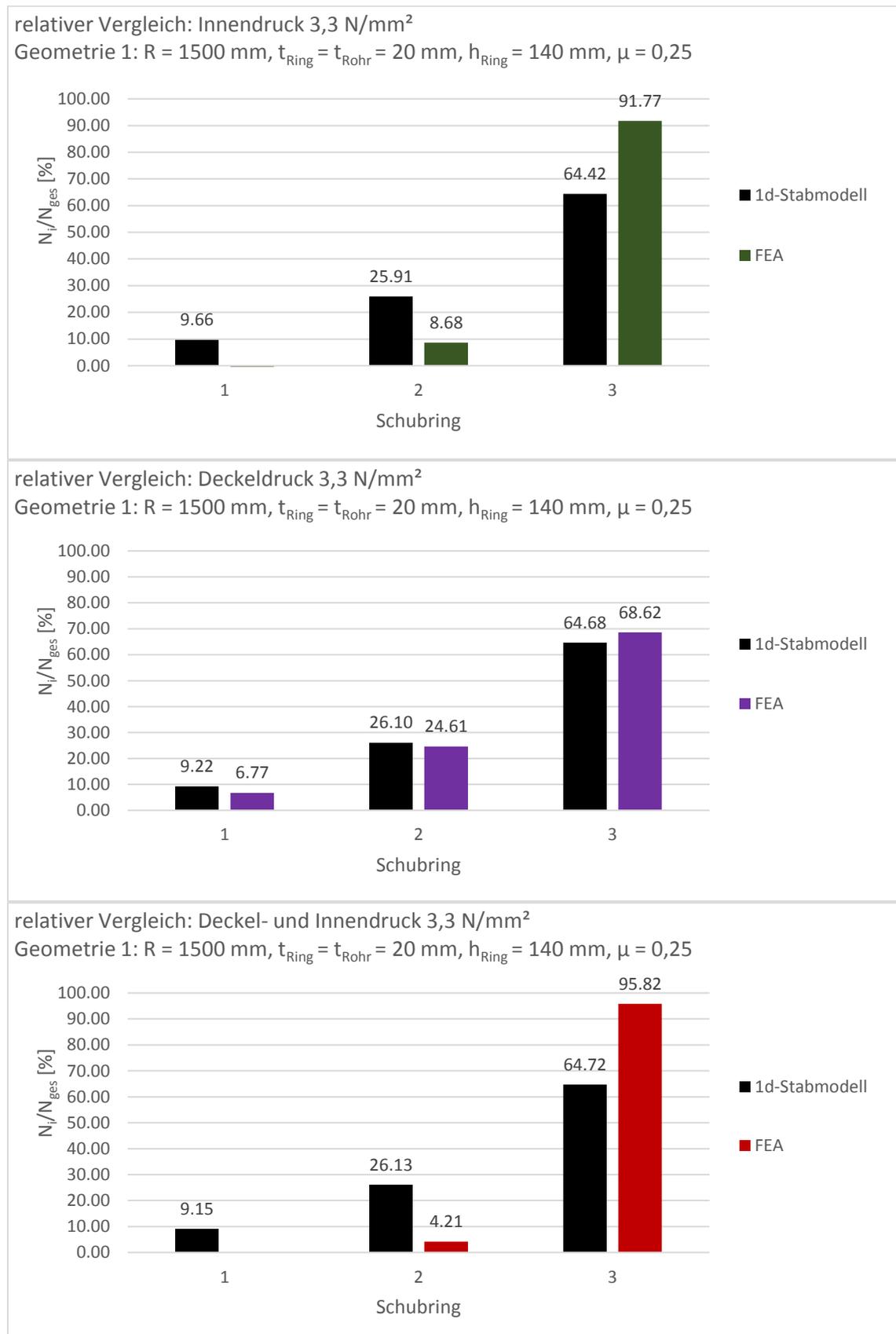


Abbildung 133 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ , relativer Vergleich, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 3,3 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

## 5.2 Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 2

Die Darstellung der ausgearbeiteten Ergebnisse wird einleitend im Kapitel 5 zusammengefasst. Dieselben Vergleiche wurden bereits in Kapitel 5.1 ausgearbeitet und sind dort anhand von Geometrie 1 erläutert. In diesem Kapitel erfolgt eine Aufarbeitung in der gleichen Art und Weise anhand von Geometrie 2.

### 5.2.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

Die Gegenüberstellung von FEA und 1D-Stabmodell erfolgt, gleich wie bereits in Kapitel 5.1.1 für Geometrie 1, in diesem Kapitel jedoch für Geometrie 2.

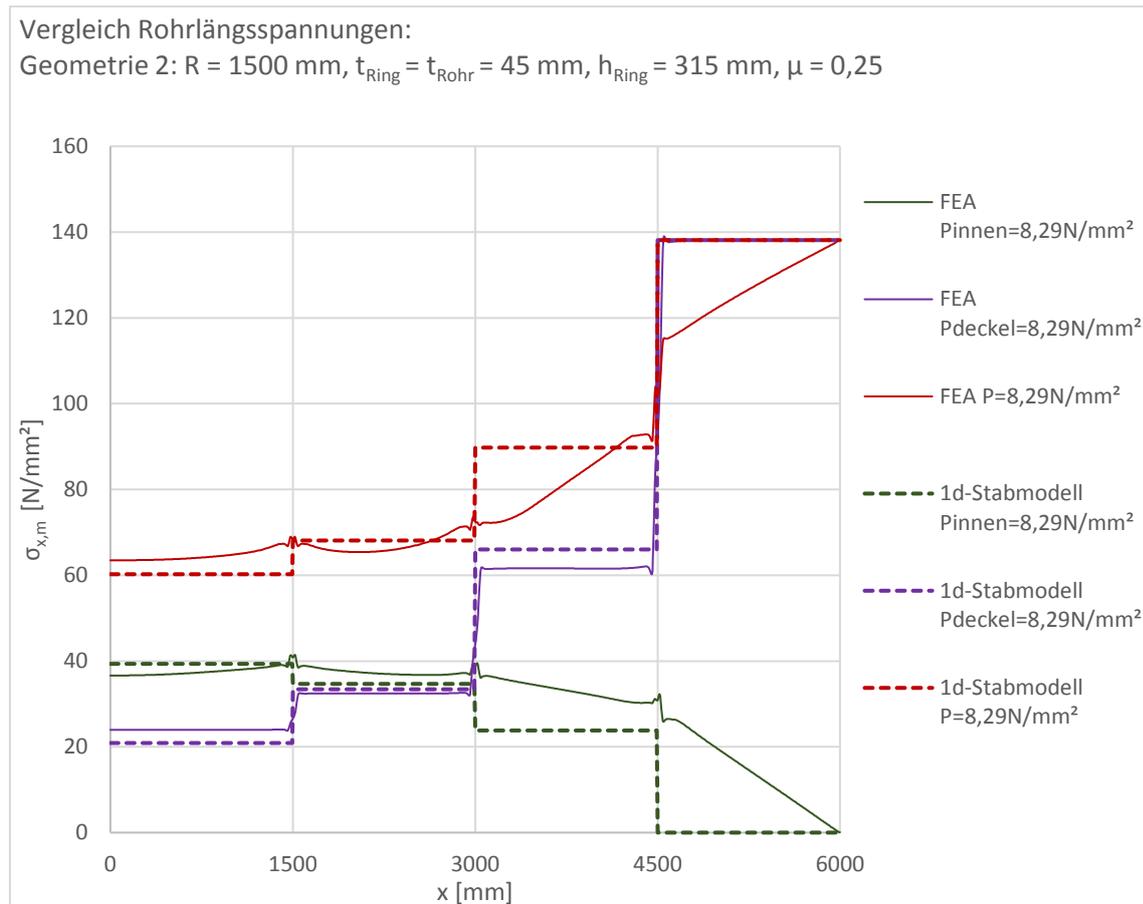
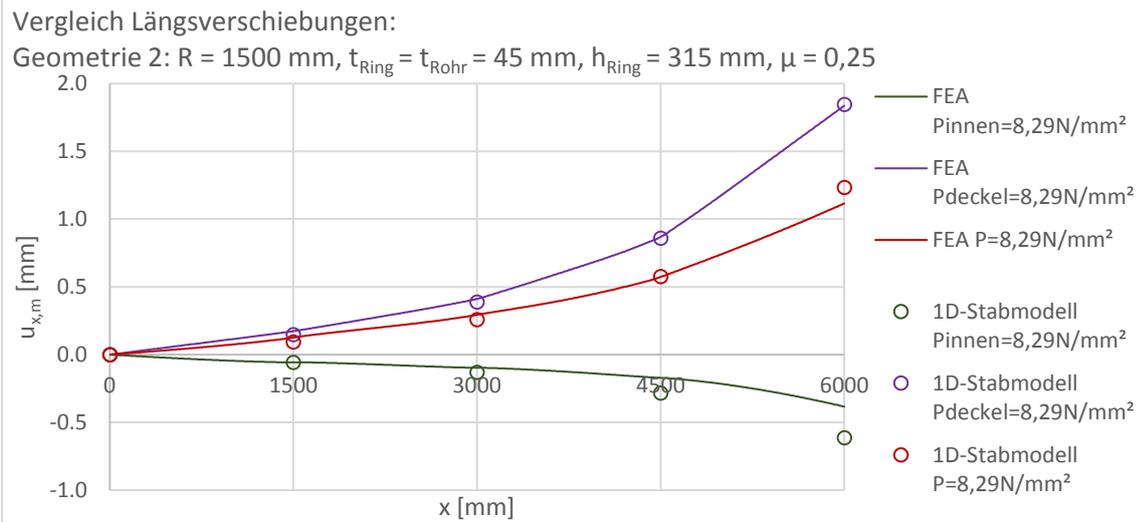


Abbildung 134 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ , Längsspannungen  $\sigma_{x,m}$ , Innendruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$ , Deckeldruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung



Die Wirkungsweise der Lastfallüberlagerungen ist bei Geometrie 2 gleich wie bei Geometrie 1, lediglich mit stärker entlastendem Einfluss des Innendrucks.

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	15.53	16.69	7.5%	10.17	8.86	-13%
<b>Stahlpanzerung 1</b>	0-1400	-1.03	0.00		-0.02	0.00	
<b>Schubring 1</b>	1400-1600	0.07	1.99	2756%	-3.56	-5.31	49%
<b>Stahlpanzerung 2</b>	1600-2900	0.73	0.00		-0.07	0.00	
<b>Schubring 2</b>	2900-3100	0.29	4.61	1463%	-12.33	-13.81	12%
<b>Stahlpanzerung 3</b>	3100-4400	2.63	0.00		-0.11	0.00	
<b>Schubring 3</b>	4400-4600	1.77	10.09	471%	-32.69	-30.60	-6.4%
<b>Stahlpanzerung 4</b>	4600-6000	10.59	0.00		0.36	0.00	
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>2.13</b>	<b>16.69</b>	<b>683%</b>	<b>-48.58</b>	<b>-49.72</b>	<b>2.4%</b>

Tabelle 23 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ , Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Innendruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$ , Deckeldruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
Auflager	0	26.92	25.55	-5.1%	25.70	-4.5%
Stahlpanzerung 1	0-1400	-1.61	0.00		-1.04	-35%
Schubring 1	1400-1600	-0.02	-3.32	21129%	-3.49	22210%
Stahlpanzerung 2	1600-2900	-1.66	0.00		0.67	-140%
Schubring 2	2900-3100	-0.43	-9.21	2054%	-12.03	2715%
Stahlpanzerung 3	3100-4400	-8.67	0.00		2.52	-129%
Schubring 3	4400-4600	-9.58	-20.51	114%	-30.93	223%
Stahlpanzerung 4	4600-6000	-9.28	0.00		10.96	-218%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-10.03</b>	<b>-33.04</b>	<b>229%</b>	<b>-46.45</b>	<b>363%</b>

Tabelle 24 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ , Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Gesamtdruck und Superposition der Einzellastfälle

### 5.2.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

Die Gegenüberstellung von FEA und 1D-Stabmodell erfolgt gleich wie bereits in Kapitel 5.1.2 für Geometrie 1, in diesem Kapitel jedoch für Geometrie 2.

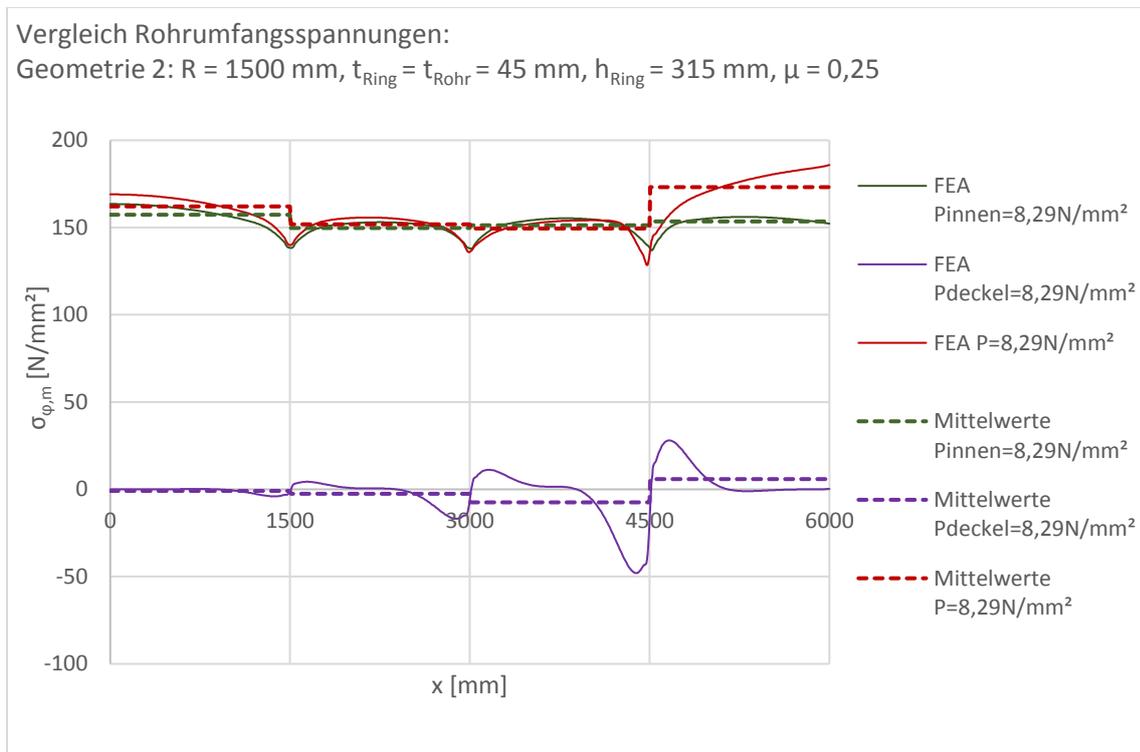
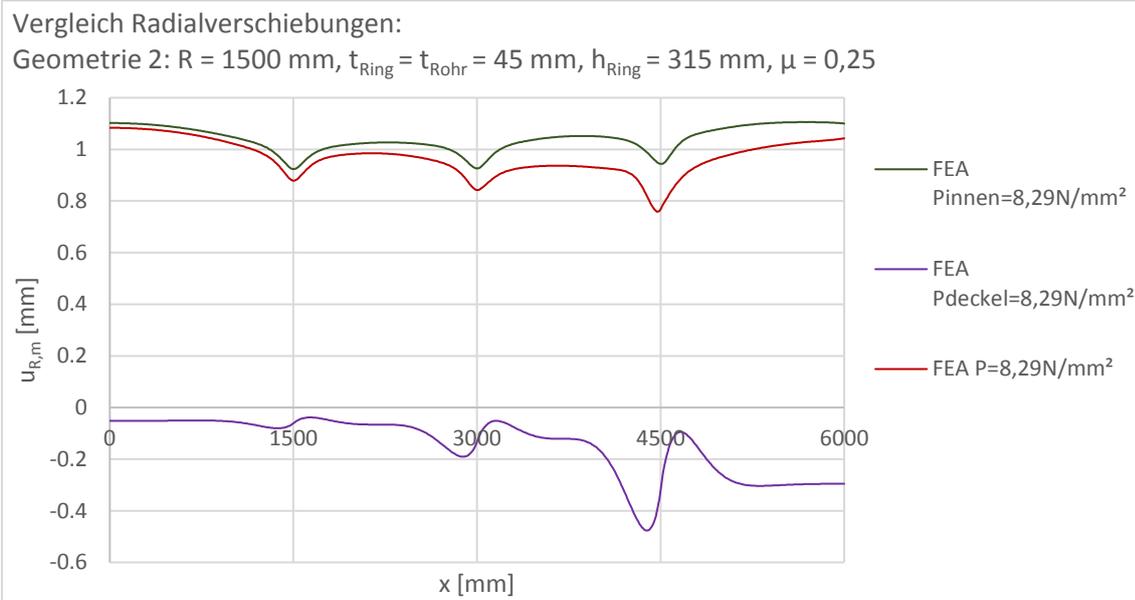
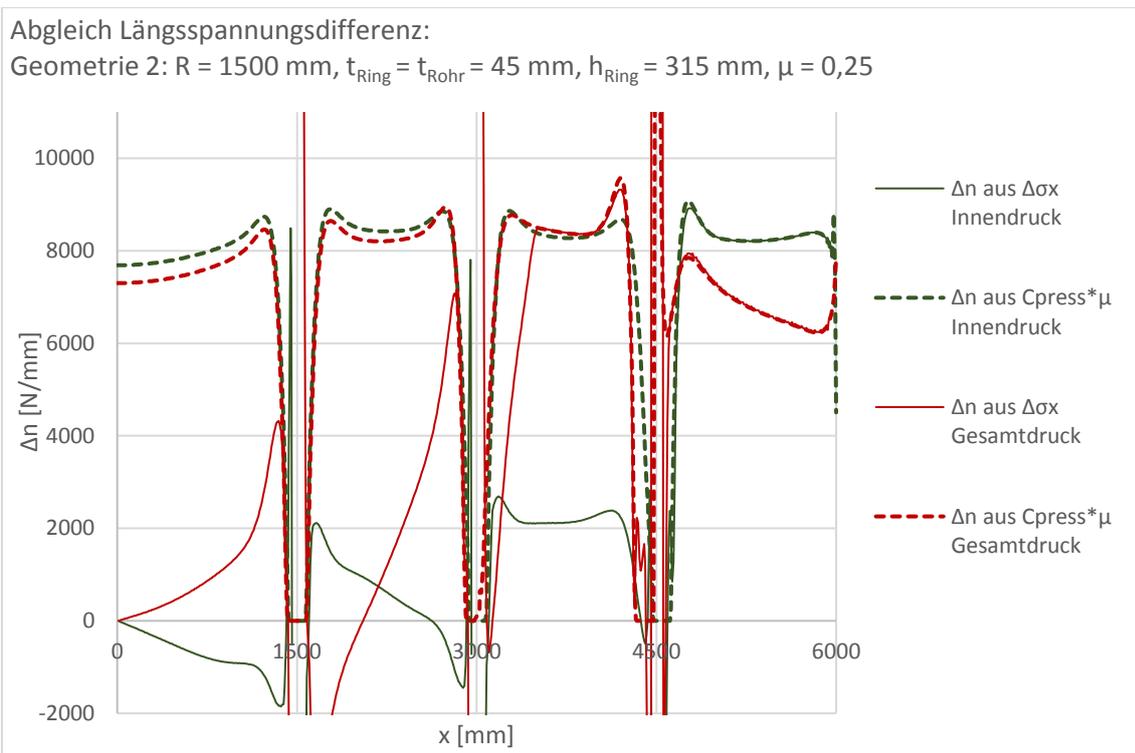


Abbildung 136 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ , Umfangsspannungen  $\sigma_{\phi,m}$ , Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung



### 5.2.3 Analyse der Reibungswirkung

Die Reibungswirkung ist in Kapitel 5.1.3 anhand von Geometrie 1 erläutert und erfolgt in diesem Kapitel gleich für Geometrie 2.



Die konservative Modellannahme, das Gebirge als längsverschiebliches Auflager zu modellieren (vgl. Abbildung 3), zeigt bei dickwandigerer Rohrgeometrie einen stärkeren Einfluss als bei dünnwandiger (EA-Stahlrohr wird größer und EA-Betonzylinder bleibt immer gleich).

In diesem Fall geht der Einfluss der Verformung auf Schubring 3 (bei  $x = 4500 \text{ mm}$ ) so weit, dass die durch die Kopplung ausgelöste Längszugkraft im Betonzylinder ein Vorzeichenwechsel für die Auflagerkraft in Schubring 1 (bei  $x = 1500 \text{ mm}$ ) stattfindet. Dieser Vorzeichenwechsel der Auflagersituation macht sich um Schubring 1 auch

bereits in der Kontaktfuge zwischen Stahlpanzerung und Betonmantel, als negativ dargestellte Reibungswirkung, bemerkbar (siehe Abbildung 138, durchschlagen der Nulllinie von „ $\Delta n$  aus  $\Delta \sigma_x$  Gesmatdruck“ bei  $\sim 2000$  mm in negative Reibungswirkung).

---

#### 5.2.4 Verformungsplots

Für alle Lastfallüberlagerungen und Einzellastfälle werden jeweils umfangreiche Verformungsplots erstellt. Alle Lastfälle werden dabei zur besseren Vergleichbarkeit einheitlich mit einem Faktor 100 überhöht dargestellt. Das ursprüngliche Gebirge, vor der Verformung, ist dabei in Form einer roten Linie ersichtlich.

---

##### 5.2.4.1 Verformungsplot - Innendruck

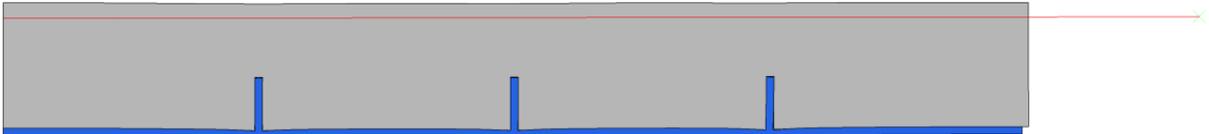


Abbildung 139 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$

---

##### 5.2.4.2 Verformungsplot - Deckeldruck



Abbildung 140 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Deckeldruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$

---

##### 5.2.4.3 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck

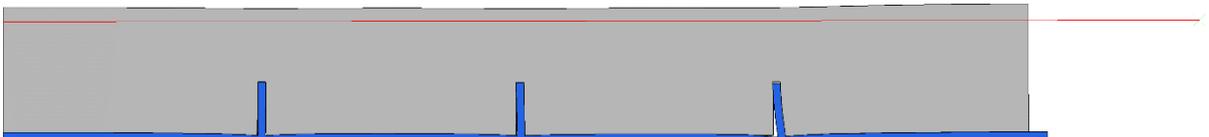


Abbildung 141 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$  und Deckeldruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$

---

#### 5.2.4.4 Verformungsplot – Innendruck, Detail Schubring 3

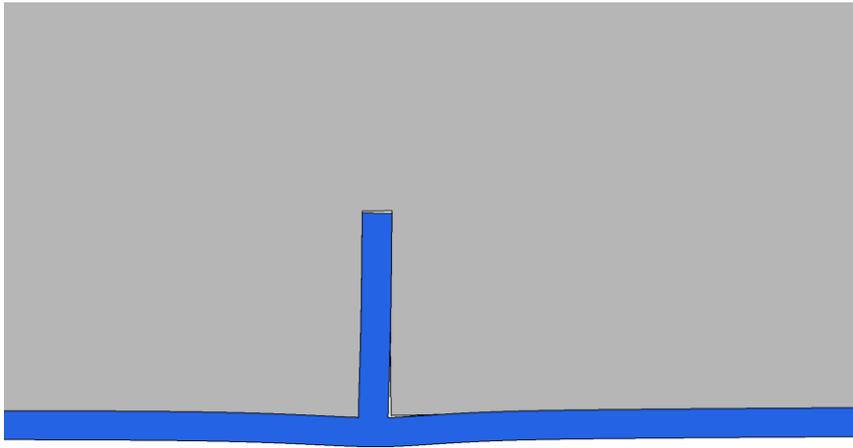


Abbildung 142 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 5.2.4.5 Verformungsplot – Deckeldruck, Detail Schubring 3

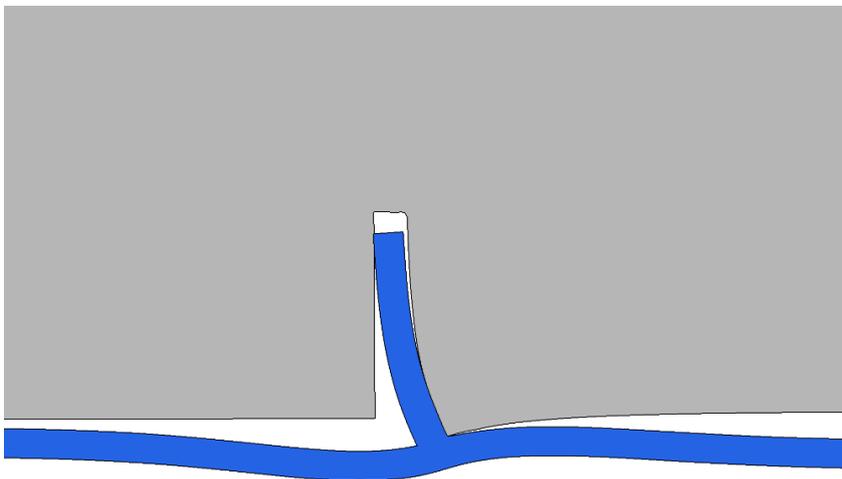


Abbildung 143 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 5.2.4.6 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck, Detail Schubring 3

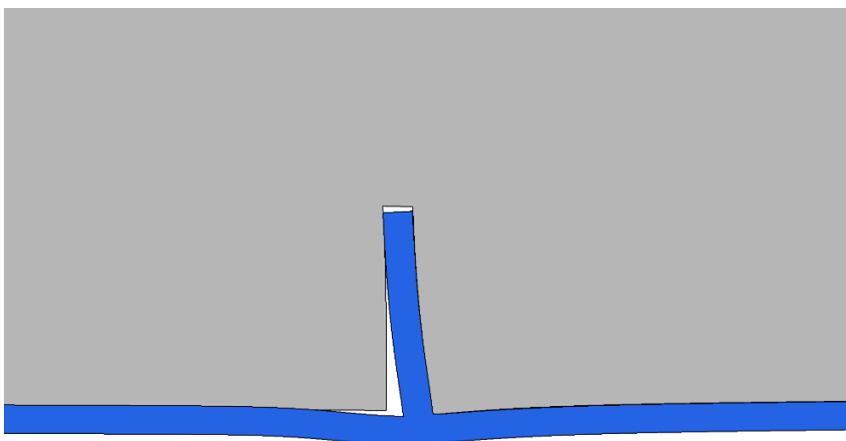


Abbildung 144 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>

### 5.2.5 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

In diesem Kapitel werden die Schubringkräfte  $\Delta N_i$  in absoluten Werten in MN als Balkendiagramm präsentiert.

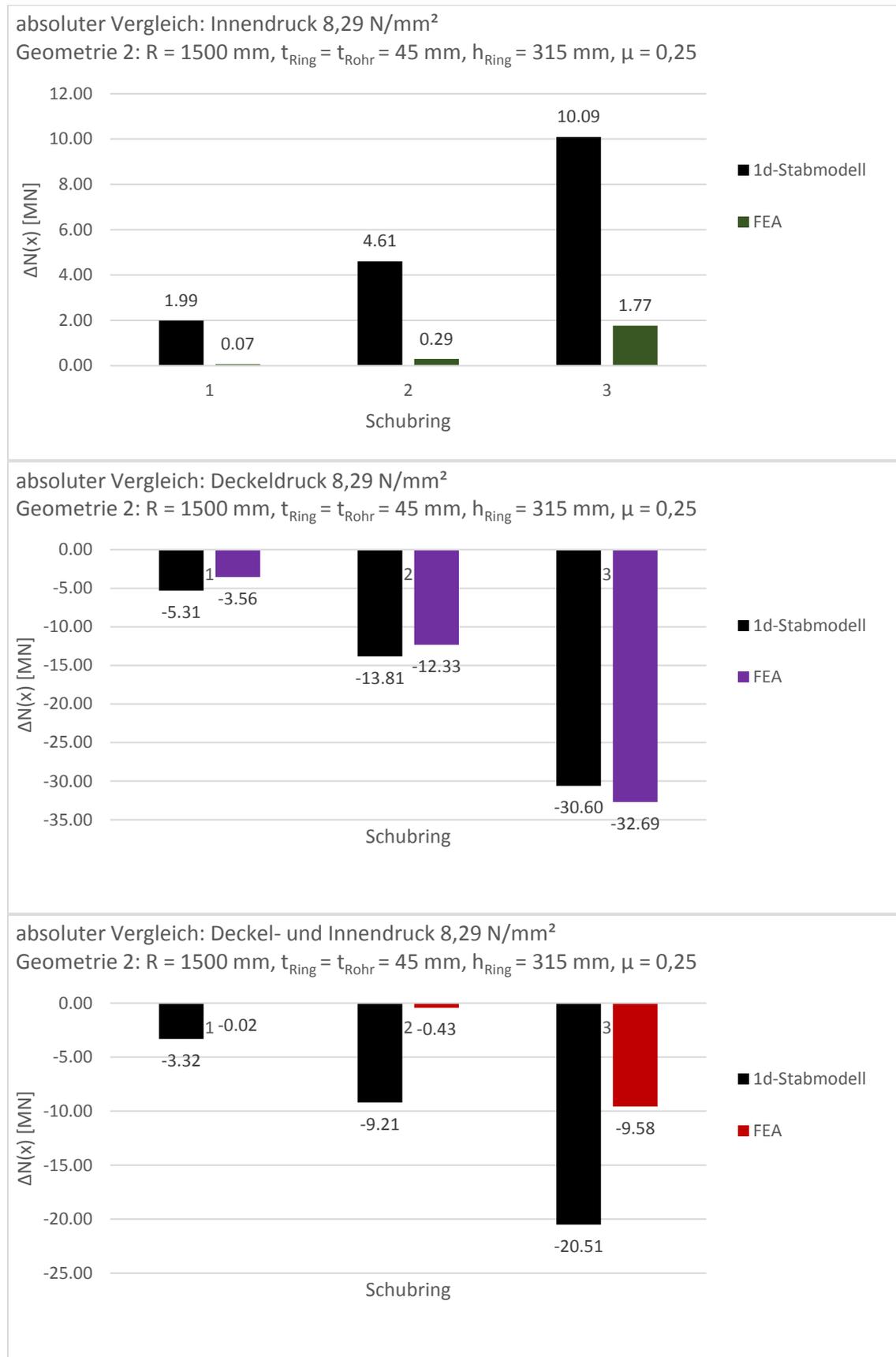


Abbildung 145 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ , absoluter Vergleich, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

### 5.2.6 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

Im Vergleich zu Kapitel 2 wird die relative Aufteilung der Schubringkräfte  $\Delta N_i$  für jeden Lastfall separat dargestellt, da sich die Aufteilung auch im 1D-Stabmodell unterscheidet.

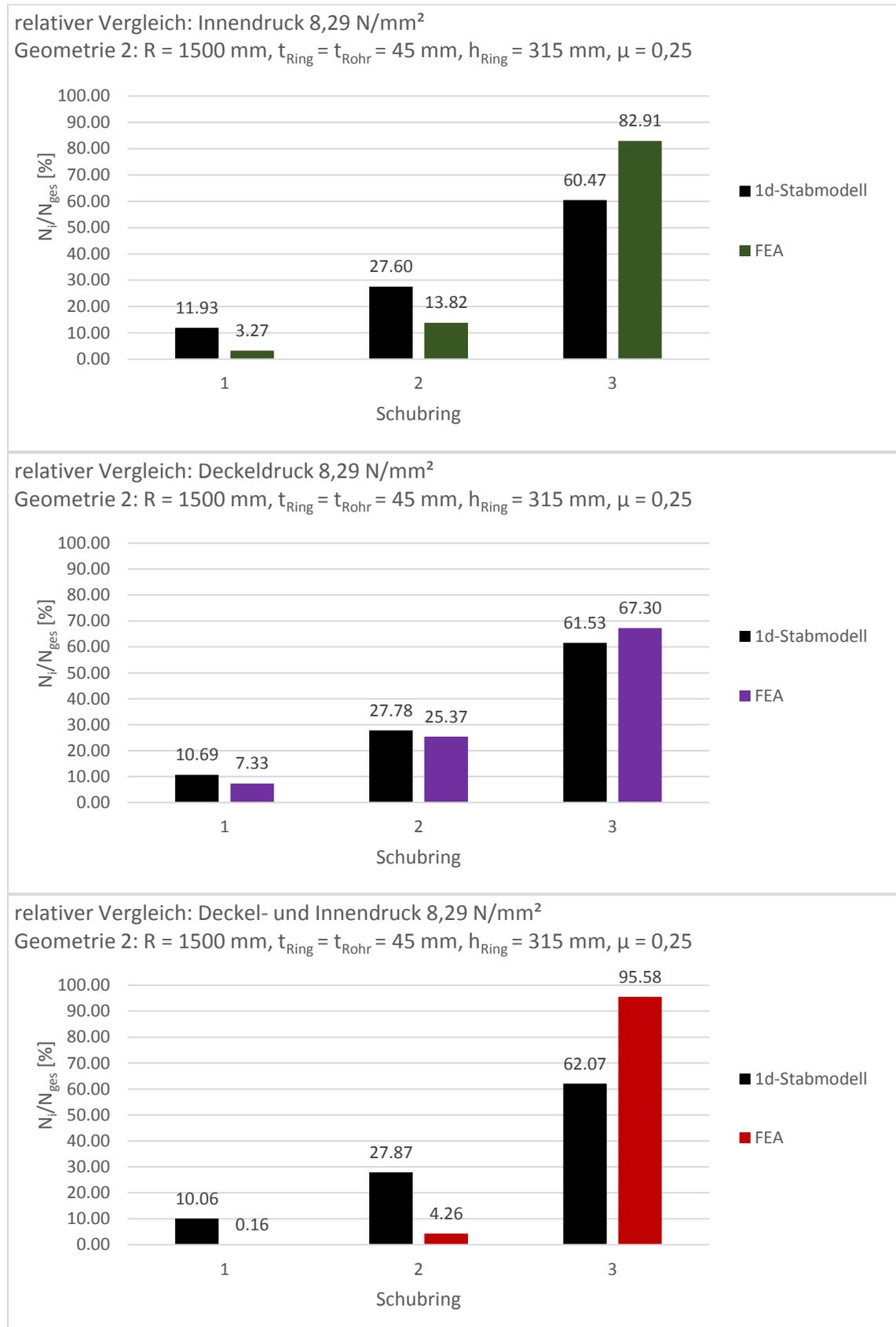


Abbildung 146 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ , relativer Vergleich, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

### 5.3 Zusammenwirkung von Deckeldruck und Innendruck - Geometrie 3

Die Darstellung der ausgearbeiteten Ergebnisse wird einleitend im Kapitel 5 zusammengefasst. Dieselben Vergleiche wurden bereits in Kapitel 5.1 ausgearbeitet und sind dort anhand von Geometrie 1 erläutert. In diesem Kapitel erfolgt eine Aufarbeitung in der gleichen Art und Weise anhand von Geometrie 3.

#### 5.3.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

Die Gegenüberstellung von FEA und 1D-Stabmodell erfolgt, gleich wie bereits in Kapitel 5.1.1 für Geometrie 1, in diesem Kapitel jedoch für Geometrie 3.

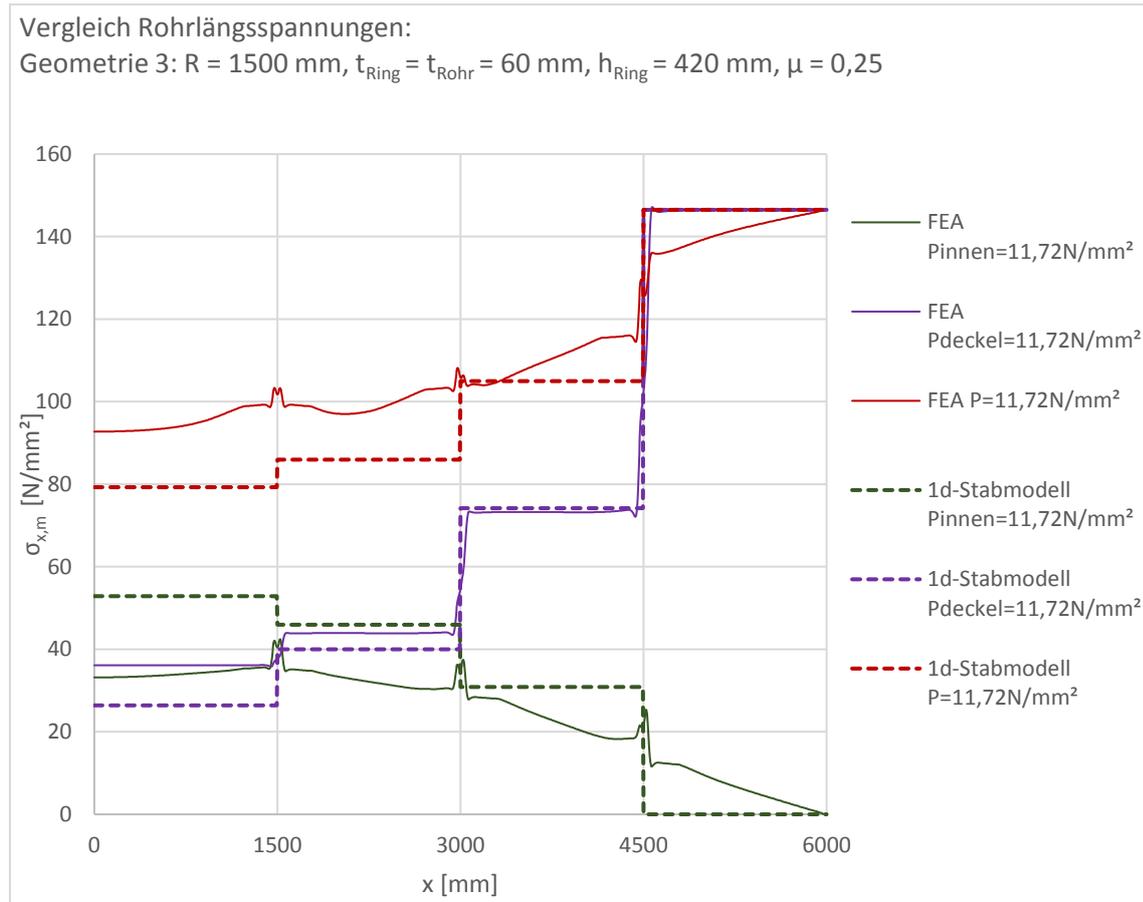


Abbildung 147 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , Längsspannungen  $\sigma_{x,m}$ , Innendruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$ , Deckeldruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung

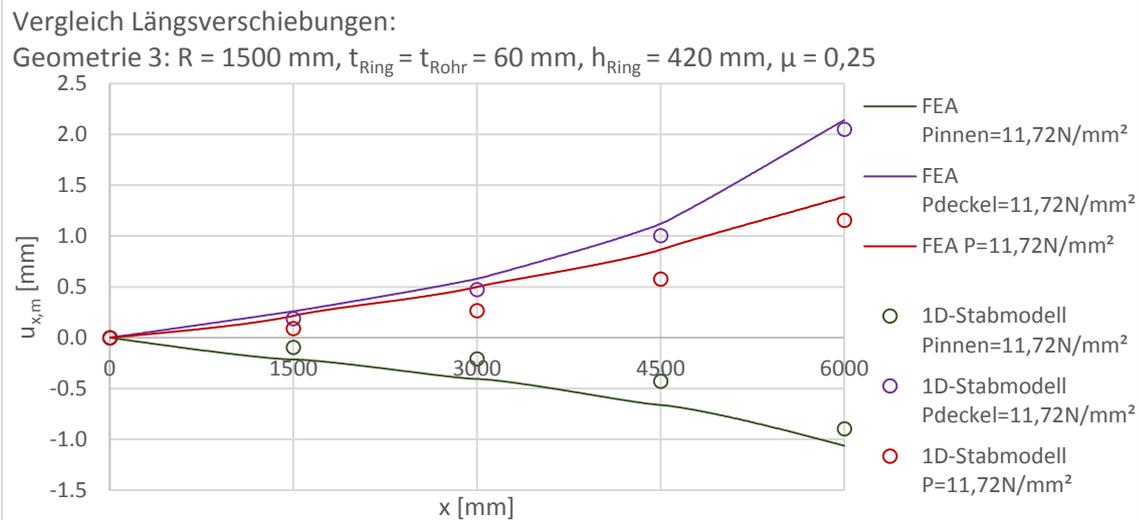


Abbildung 148 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , Längsverschiebungen  $u_{x,m}$ , Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

Wie bereits in Kapitel 5.2.1 anhand von Geometrie 2 festgestellt, wird der Einfluss des Innendrucks in Geometrie 3 noch stärker.

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck FEA	$\Delta N$ [MN] Deckeldruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	18.77	29.90	59%	20.43	14.93	-27%
<b>Stahlpanzerung 1</b>	0-1300	-1.26	0.00		-0.01	0.00	
<b>Schubring 1</b>	1300-1700	0.27	3.93	1341%	-4.37	-7.68	76%
<b>Stahlpanzerung 2</b>	1700-2800	2.59	0.00		-0.07	0.00	
<b>Schubring 2</b>	2800-3200	1.21	8.53	603%	-16.50	-19.32	17%
<b>Stahlpanzerung 3</b>	3200-4300	5.64	0.00		-0.21	0.00	
<b>Schubring 3</b>	4300-4700	3.36	17.44	419%	-41.09	-40.91	-0.5%
<b>Stahlpanzerung 4</b>	4700-6000	6.95	0.00		-0.17	0.00	
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>4.85</b>	<b>29.90</b>	<b>517%</b>	<b>-61.96</b>	<b>-67.91</b>	<b>9.6%</b>

Tabelle 25 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
Auflager	0	52.45	44.83	-15%	39.19	-25%
Stahlpanzerung 1	0-1300	-3.57	0.00		-1.28	-64%
Schubring 1	1300-1700	0.00	-3.76	>>	-4.10	-89557%
Stahlpanzerung 2	1700-2800	-2.32	0.00		2.52	-209%
Schubring 2	2800-3200	-0.48	-10.79	2153%	-15.28	3091%
Stahlpanzerung 3	3200-4300	-6.65	0.00		5.43	-182%
Schubring 3	4300-4700	-11.62	-23.46	102%	-37.73	225%
Stahlpanzerung 4	4700-6000	-5.77	0.00		6.78	-218%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-12.09</b>	<b>-38.02</b>	<b>214%</b>	<b>-57.11</b>	<b>372%</b>

Tabelle 26 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Gesamtdruck und Superposition der Einzellastfälle

### 5.3.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

Die Gegenüberstellung von FEA und 1D-Stabmodell erfolgt, gleich wie bereits in Kapitel 5.1.2 für Geometrie 1, in diesem Kapitel für Geometrie 3.

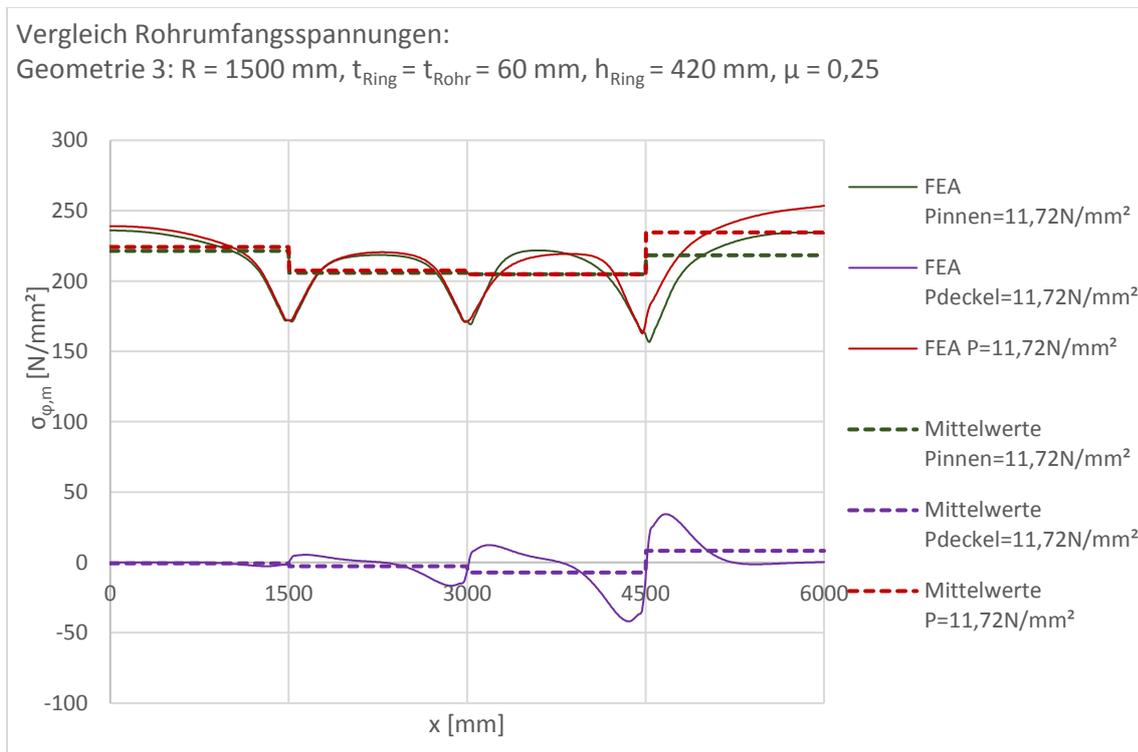


Abbildung 149 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , Umfangsspannungen  $\sigma_{\phi,m}$ , Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

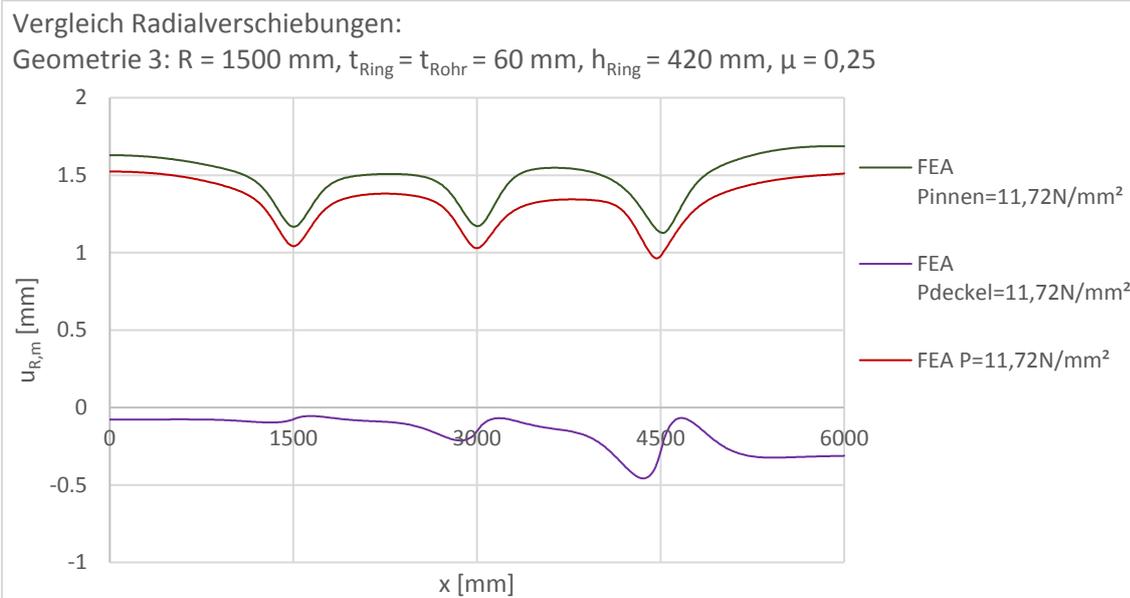


Abbildung 150 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , Radialverschiebungen  $u_{r,m}$ , Innendruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$ , Deckeldruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung

### 5.3.3 Analyse der Reibungswirkung

Die Reibungswirkung ist in Kapitel 5.1.3 anhand von Geometrie 1 erläutert und erfolgt in diesem Kapitel gleich für Geometrie 3.

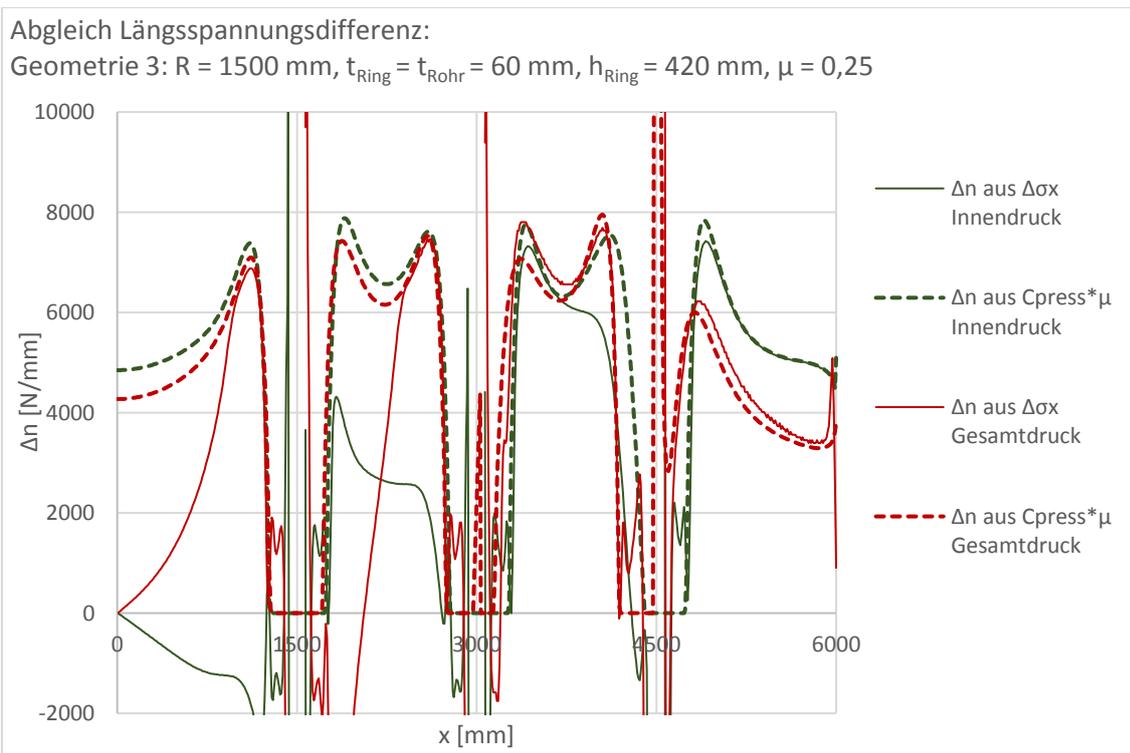


Abbildung 151 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , Reibungswirkung  $\Delta n$ , Innendruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$ , Gesamtdruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$

Wie bereits in Kapitel 5.2.3, aufgrund der Kopplung von Stahlrohr und Betonzylinder festgestellt, entstehen auch bei Geometrie 3 Vorzeichenänderungen um Schubring 1 (bei  $x = 1500 \text{ mm}$ ).

Die Darstellung der Reibungswirkung folgt aus den in Blechmitte vereinfacht abgelesenen Längsspannungen  $\sigma_{x,m}$  laut Abbildung 3 in Kapitel 1.3. Durch die Belastung in Längsrichtung entsteht dabei ein Stülpmoment um die Schubringe, welches nicht bereinigt wurde. Aus diesem Grund wird die Reibungswirkung im Einflussbereich der

Stülpmomente an diesen Stellen nicht aussagekräftig dargestellt (vgl. Abbildung 151 in den Bereichen um die Schubringe bei  $x = 1500$ ,  $x = 3000$  und  $x = 4500$  mm, jeweils  $\pm 300$  mm).

### 5.3.4 Verformungsplots

Für alle Lastfallüberlagerungen werden jeweils für alle untersuchten Lastfälle umfangreiche Verformungsplots erstellt. Alle Lastfälle werden dabei zur besseren Vergleichbarkeit einheitlich mit einem Faktor 100 überhöht dargestellt. Das ursprüngliche Gebirge, vor der Verformung, ist dabei in Form einer roten Linie ersichtlich.

#### 5.3.4.1 Verformungsplot - Innendruck



Abbildung 152 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$

#### 5.3.4.2 Verformungsplot - Deckeldruck

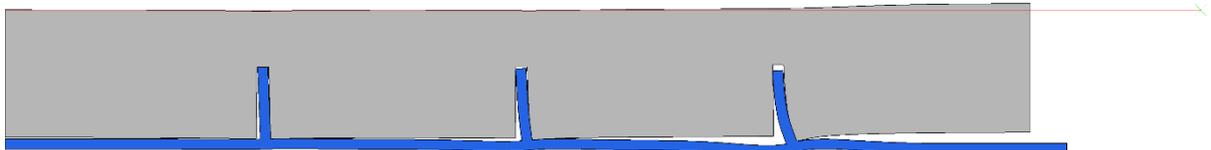


Abbildung 153 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Deckeldruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$

#### 5.3.4.3 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck



Abbildung 154 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$  und Deckeldruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$

---

#### 5.3.4.4 Verformungsplot – Innendruck, Detail Schubring 3

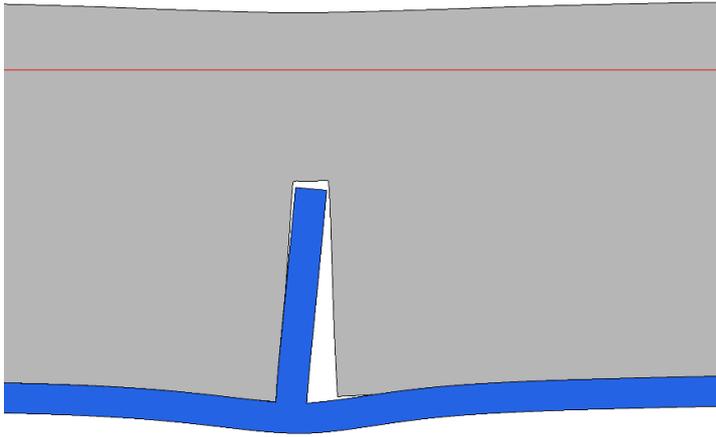


Abbildung 155 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 5.3.4.5 Verformungsplot – Deckeldruck, Detail Schubring 3

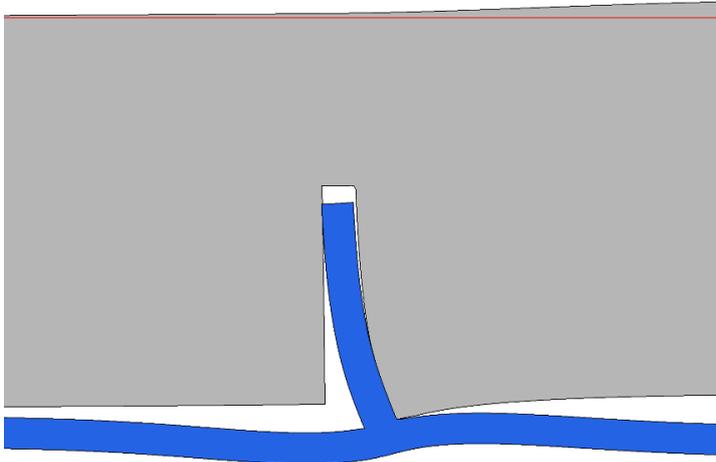


Abbildung 156 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>

---

#### 5.3.4.6 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck, Detail Schubring 3

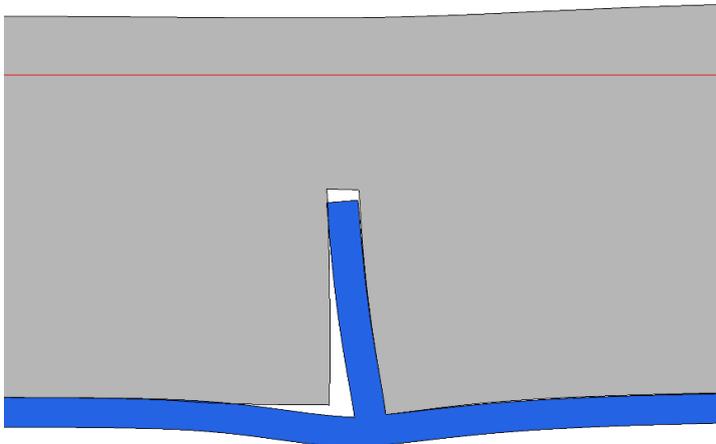


Abbildung 157 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>

### 5.3.5 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

In diesem Kapitel werden die Schubringkräfte  $\Delta N_i$  in absoluten Werten in MN als Balkendiagramm präsentiert.

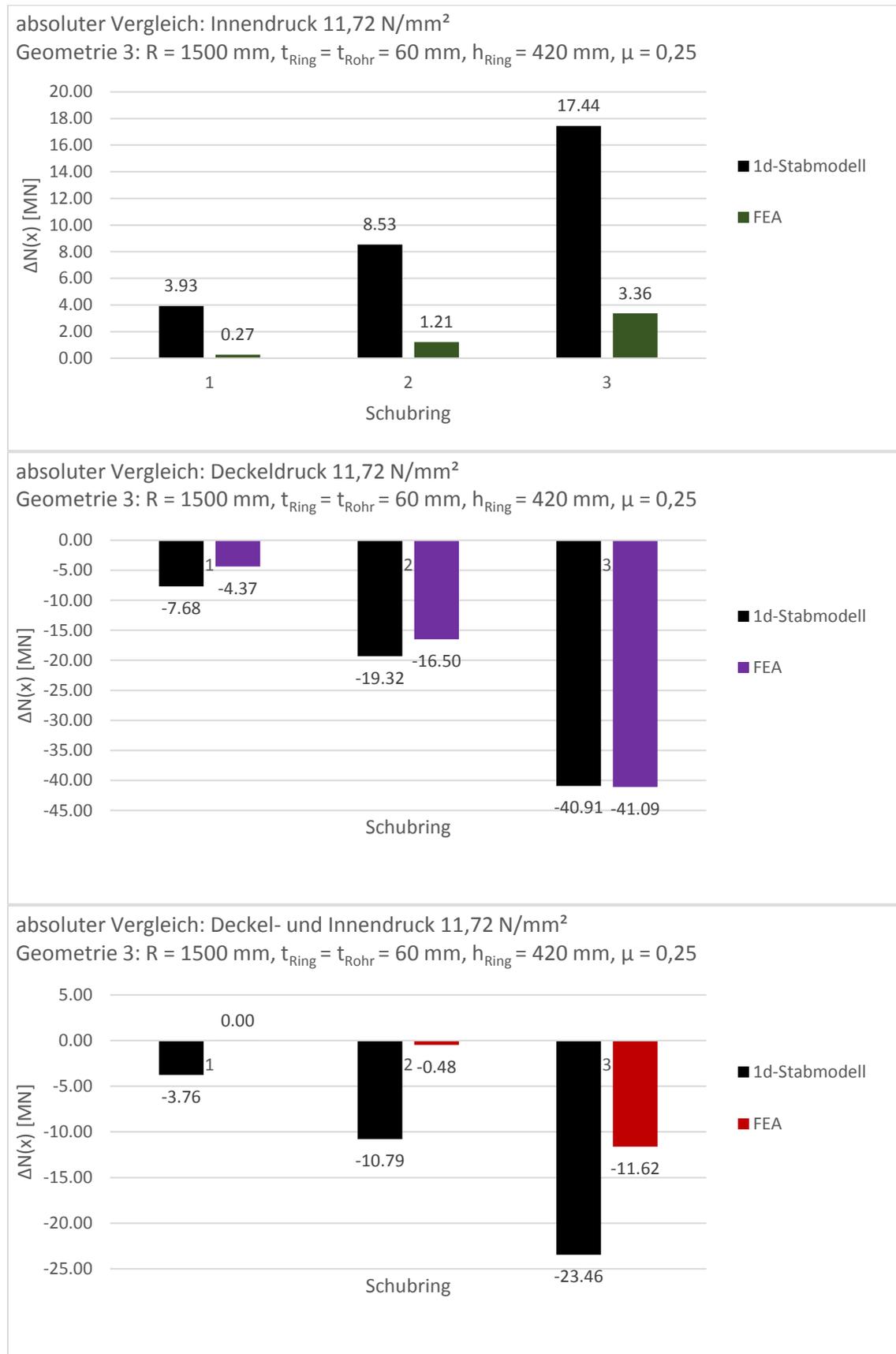


Abbildung 158 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , absoluter Vergleich, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

### 5.3.6 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

Im Vergleich zu Kapitel 2 wird die relative Aufteilung der Schubringkräfte  $\Delta N_i$  für jeden Lastfall separat dargestellt, da sich die Aufteilung auch im 1D-Stabmodell unterscheidet.

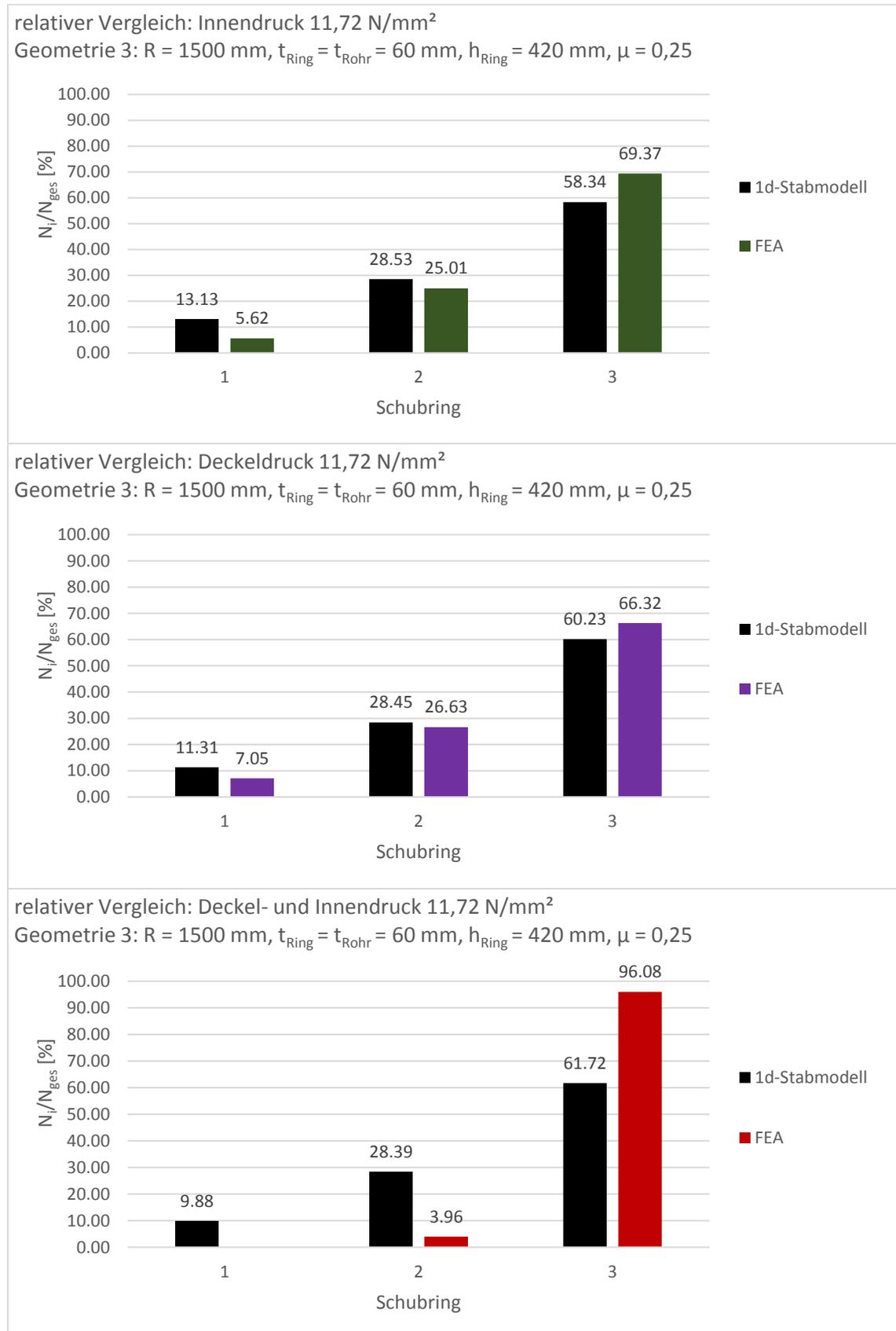


Abbildung 159 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ , relativer Vergleich, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Deckeldruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und gemeinsame Wirkung

## 6 Besonderheiten der verschiedenen Lastkombinationen.

Die erste Lastfallüberlagerung wird in dieser Arbeit in Kapitel 4, ohne Berücksichtigung von Reibung, ausgearbeitet. Dabei ist sowohl jeder alleinig wirkende Lastfall, als auch dessen Zusammenwirkung in der FEA und im 1D-Stabmodell in allen Abbildungen und Tabellen dargestellt. In Kapitel 5 erfolgt die gleiche Analyse der Zusammenwirkung, mit Berücksichtigung von Reibung. Alle Lastfallüberlagerungen werden an drei verschiedenen Geometrien laut Tabelle 1 durchgeführt.

In Anhang 1 bis 3 werden weitere Lastfallüberlagerungen untersucht. Jeder Anhang enthält zwei Kapitel, welche die Lastfallüberlagerungen gleich darstellt, wie bereits in Kapitel 4 ohne Reibung und Kapitel 5 mit Reibung.

In diesem Kapitel werden die Besonderheiten der vier verschiedenen Lastfallüberlagerungen lediglich kurz zusammengefasst und beurteilt.

### 6.1 Kapitel 4 und Kapitel 5: Vergleich von Innendruck und Deckeldruck

Aus dem Vergleich von Innendruck und Deckeldruck in Kapitel 4 geht hervor, dass die Schubringkräfte aus dem Innendruck in Längsrichtung immer entgegen jenen aus dem Deckeldruck wirken, wodurch die Schubringkräfte aus dem Deckeldruck reduziert werden. Die Berücksichtigung eines begleitenden Innendruck Lastfalls wirkt sich also immer entlastend auf die Schubringkräfte aus, auch wenn keine Reibung berücksichtigt wird.

Da der Lastfall Innendruck eine starke Druckkontaktspannung zwischen Stahlkörper und Betonmantel auslöst, kann in dieser Fuge eine starke Reibungswirkung aktiviert werden. In Kapitel 5 wird ersichtlich wie stark entlastend sich die Reibungswirkung auswirkt, so entsteht in Längsrichtung entlang Stahlpanzerung 4 bereits eine so große Reibungswirkung, dass an den Schubringen kaum noch eine praktisch relevante Last übrig bleibt. Die Reibungswirkung  $\Delta n$  ist trotz des unterschiedlichen Innendrucks (3,3, 8,29 und 11,72 N/mm<sup>2</sup>) bei allen Geometrien annähernd gleich  $\sim 6000-8000$  N/mm (vgl. Abbildung 125, Abbildung 138 und Abbildung 151). Dies ist durch die unterschiedlichen Gebirgssteifigkeiten  $V_f$  (7000, 4000 und 1000 N/mm<sup>2</sup>) begründet, da eine höhere Gebirgssteifigkeit, bedingt durch das dünnere Rohr und den daher erhöhten Anpressdruck, zu einer höheren Reibungswirkung führt.

### 6.2 Anhang 1: Vergleich von Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringerng

Die Lastfälle Innendruck und Deckeldruck werden in diesem Kapitel als Gesamtdruck geführt und mit einer zusätzlichen Temperaturverringerng kombiniert. Die Temperaturverringerng wirkt sich dabei, gleich wie der Innendruck Lastfall, in Längsrichtung ebenfalls entlastend für die Schubringe aus und wirkt dem Lastfall Deckeldruck weiter entgegen.

In radialer Richtung löst die Temperaturverringerng ein Ablösen des Stahlrohres aus dem Betonmantel aus. Durch den Lastfall Innendruck wird das Stahlrohr jedoch daran gehindert. Der Anpressdruck des Rohres auf den Betonmantel wird durch die Temperaturverringerng kaum reduziert und die Auswirkung auf die übertragbare Reibung ist dabei nur sehr klein (vgl. Abbildung 275, Abbildung 288 und Abbildung 301).

### 6.3 Anhang 2: Vergleich von Innendruck und Temperaturverringering

In Kapitel 2 dieser Arbeit kann eine ausgezeichnete Übereinstimmung der Modelle für den Lastfall Temperaturverringering festgestellt werden, während der Lastfall Innendruck bei Geometrie 2 und 3 stark abweicht. Bei der Überlagerung von Innendruck und Temperaturverringering in Anhang 2 tritt die starke Abweichung, welche beim Grundlastfall Innendruck festgestellt wurde, ebenso auf.

Obwohl beide Lastfälle, ohne Berücksichtigung von Reibung, Schubringkräfte in die gleiche Richtung erzeugen, werden bei allen Geometrien durch den Innendruck Lastfall, bei Berücksichtigung von Reibung, die Schubringkräfte derart reduziert, so dass sehr kleine Kräfte auftreten. Der Lastfall Innendruck erzeugt sozusagen durch seine aktivierte Reibung kaum Schubringkräfte und ermöglicht je nach Reibungskoeffizient ein zusätzliches Aufnehmen von Längskräften aus anderen Lastfällen.

### 6.4 Anhang 3: Vergleich von Außendruck und Temperaturerhöhung

In diesem Anhang wird ein Außendruck Lastfall untersucht, welcher ein leerstehendes Rohr mit einer Belastung durch Wasserdruck von außen, durch den Bergwasserdruck darstellt. Dies wird mit einer Temperaturerhöhung kombiniert und wirkt dadurch in die gleiche Längsrichtung.

Die Belastungssituation ändert sich in Anhang 3 dahingehend, dass im Vergleich zu Anhang 2, kein Kontakt mehr zwischen Stahlrohr und Betonmantel entsteht, wodurch sich keine Reibungswirkung aufbauen kann. Dies ist dadurch begründet, dass die radiale Verformung aus dem Außendruck (Verkleinerung des Rohrdurchmessers) immer größer ist als die der Temperatur. Aus diesem Grund kann bei der Überlagerung auch keine Reibung aktiviert werden.

Da die Reibung nicht aktiviert werden kann, stellt die Kombination von Temperaturerhöhung und Außendruck die ungünstigste Lastfallkombination von Zwangswirkungen für Schubringkräfte in Längsrichtung dar. Eine zusätzliche Erfassung des Deckeldrucks – bei leerem Rohr – ist nicht relevant.

Besonders interessant ist, dass die Temperaturerhöhung kombiniert mit einem Außendruck keine Zwangsspannungen in Umfangsrichtung mehr erzeugt und sich dadurch, im Gegensatz zur alleinigen Temperaturerhöhung, die Schubringkräfte perfekt mit den Ergebnissen des 1D-Stabmodells decken.

## 6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Lastfallüberlagerungen

In diesem Kapitel werden die Abweichungen vom 1D-Stabmodell zu den Ergebnissen der FEA für alle Lastfälle und Lastfallüberlagerungen für den höchstbelasteten Schubring (immer Schubring 3) in Prozent dargestellt (siehe Tabelle 27). Da im 1D-Stabmodell die Reibung nicht direkt berücksichtigt werden kann, wird dies nur für  $\mu=0$  gezeigt.

		1D-Stabmodell gegenüber FEA mit $\mu=0$			Vergleich mit $\mu=0,25$
Lastfall oder Lastfallüberlagerung	Geometrie	Unterschätzt [%] (< -15 %)	Treffsicher [%] ( $\pm 15$ %)	Überschätzt [%] (> 15 %)	
Einzellastfälle	Innendruck	1	-5.8		1263
		2	30		471
		3	111		419
	Deckeldruck	1	-6.3		-5,2
		2	-6.5		-6,4
		3	-0.1		-0,5
	Temperaturverringeringung	1	-11		-8,1
		2	0.58		3,1
		3	11		13
	Temperaturerhöhung	1	-38		-18
		2	-33		-14
		3	-29		-16
	Außendruck	1	-10		0,03
		2	-7		4,1
		3	-4.6		7,4
Lastfallüberlagerungen	Innendruck + Deckeldruck	1	-11		122
		2	4.5		114
		3	34		102
	Innendruck + Deckeldruck + Temperaturverringeringung	1	-5.9		220
		2	11		218
		3	45		189
	Innendruck + Temperaturverringeringung	1	-21		452
		2	21		231
		3	91		242
	Außendruck + Temperaturerhöhung	1	-7.1		-3,1
		2	-4.4		-1,3
		3	-2.5		1,1

Tabelle 27 Schubringkräfte am Schubring 3 – Prozentuelle Abweichung am 1D-Stabmodell gegenüber FEA;  $\mu=0$  und  $\mu=0,25$ ; Ergebnisse aller Einzellastfälle und Lastfallüberlagerungen

Für Druckstollenpanzerungen im Druckrohrleitungsbau von Wasserkraftanlagen gab es in der Praxis verschiedene Berechnungsmodelle für die Kraftübertragungsmechanismen von Schubringen. Ein neues, an Finite-Elemente-Berechnungen und Versuchen kalibriertes, Bemessungsmodell wurde im Forschungsprojekt Schubringe von Unterweger, Ecker [2] entwickelt.

Im Gesamtbericht zum Forschungsprojekt Schubringe von Unterweger, Ecker [2] konnte das komplexe mechanische Tragverhalten von Schubringen auf ein simples **1D-Stabmodell** in Rohrlängsrichtung reduziert werden. Dies ermöglicht eine einfache und schnelle Berechnung verschiedenster Belastungssituationen und deren Aufteilung auf mehrere Schubringe. **Gegenübergestellt** wird in dieser Arbeit das 1D-Stabmodell mit einer umfangreichen, realitätsnahen **Finite Elemente Analyse** für unterschiedliche Lastfälle und Überlagerungen.

Für den Vergleich der zwei Modelle wird dabei ein einseitig frei gelagertes oder mit Deckeldruck belastetes Rohrende simuliert und das Tragverhalten von drei hintereinander wirkenden Schubringen untersucht. Nach den drei Schubringen wurde in beiden Modellen ein festes Auflager definiert, welches stellvertretend für ein Fortlaufen des Druckrohres ins Gebirge steht. Verglichen werden dabei immer drei, in Umfangsrichtung gleich tragfähige, Geometrien mit unterschiedlichen Stahlrohrwanddicken, Schubringabmessungen und Gebirgssteifigkeiten.

Anhand der untersuchten Einzellastfälle Deckeldruck, Innendruck und Temperaturerhöhung oder -verringerung, kann festgestellt werden, dass Zwangskräfte bei mehreren Schubringen hintereinander, ausgelöst durch den Innendruck oder der Wärmeausdehnung des Rohrs, mit dem 1D-Stabmodell nicht mehr präzise dargestellt werden können. Der Einzellastfall Innendruck wird vom 1D-Stabmodell in einer dünnwandigen Rohrgeometrie richtig abgebildet und bei einer dickwandigen Rohrgeometrie überschätzt. Der Einzellastfall der Temperaturerhöhung wird vom Stabmodell immer stark unterschätzt. Der Lastfall Innendruck in Kombination mit einem maßgebendem Deckeldruck Lastfall wirkt immer entlastend auf die Schubringe. Man erhält jedoch mit dem 1D-Stabmodell bei dieser Überlagerung immer Ergebnisse auf der sicheren Seite mit einer maximalen Überschätzung der Schubringkräfte von 111 Prozent (Geometrie 3). Die Temperaturerhöhung tritt in der Praxis meist zusammen mit dem Lastfall Außendruck auf und da konnte festgestellt werden, dass diese Lastfallüberlagerung zutreffend mit dem 1D-Stabmodell abgebildet werden kann, im Gegensatz zum Einzellastfall der Temperaturerhöhung.

Auch durch umfangreiche Korrekturmaßnahmen an den Steifigkeitsverhältnissen im 1D-Stabmodell, können die Zwangskräfte in den Schubringen, welche aus dem Einzellastfall Temperaturerhöhung entstehen nicht ausreichend genau abgebildet werden. Die Unterschiede in den beiden Modellen sind also nicht auf einer falschen Annahme von Schubringsteifigkeiten begründet, sondern erfordern eine eigene Berücksichtigung der Zwangswirkungen in Form eines modifizierten Lastfalls.

Obwohl der entlastende Einfluss des Innendrucks vom 1D-Stabmodell für sich selbst überschätzt wird, wirkt sich die Überlagerung von Innendruck und Deckeldruck im Stahlrohr in der realitätsnahen FEA noch stärker positiv auf die Schubringe aus. Dadurch bleibt das Stabmodell im Vergleich zur FEA für eine Kombination aus Innendruck und Deckeldruck, mit oder ohne Temperaturverringerung, immer treffsicher oder im konservativen Bereich.

Bei allen Lastfällen mit Innendruck hat sich gezeigt, dass bei Berücksichtigung von Reibung, diese auch voll ausgenutzt wird und deren Effekt maßgebend vom Anpressdruck des Rohrs, ausgelöst durch Innendruck, abhängig ist. Bei Berücksichtigung der Reibung ( $\mu=0,25$ ) reduzieren sich die Schubringkräfte drastisch, wenn ein Innendruck vorhanden ist.

- [1] Dipl.-Ing. Alexander Farkas BSc.: *Realitätsnahe Schubringkräfte an Druckschichtpanzerungen infolge Innendruck und Temperatur*; Institut für Stahlbau, TU-Graz, August 2018
- [2] Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Unterweger, Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Ecker: *Tragverhalten von Verankerungsringen (Schubringen) infolge Rohrlängsbeanspruchungen*; Institut für Stahlbau, TU-Graz, Februar 2015
- [3] Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Unterweger, Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Ecker: *Bemessungsmodell für Schubringe von Druckrohrleitungen und Druckschächten mit Rechteckquerschnitt – Beanspruchungen, Steifigkeiten und Tragfähigkeiten infolge Rohrlängskräften  $N_{sr}$ , Version 2*; Institut für Stahlbau, TU-Graz, Februar 2015
- [4] *ABAQUS v.6.14-3 and ABAQUS Documentation*, USA, © Dassault Systèmes, 2014



# ANHANG 1

Die in diesem Anhang präsentierten Modelle – die FEA und das 1D-Stabmodell – werden dabei anhand folgender Lastfälle und deren Zusammenwirkung verglichen:

- Gesamtdruck  $p$  laut Tabelle 14 in Kapitel 4.1.1 der Masterarbeit
- Temperatur  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$

Die drei Geometrien, laut Tabelle 1 in Kapitel 1.3 der Masterarbeit, werden in diesem Anhang ohne Reibung  $\mu = 0$  in Kapitel 1 und mit Reibung  $\mu = 0,25$  in Kapitel 2 dargestellt. Die Vorgehensweise ist dabei gleich wie bei der Zusammenwirkung von Innendruck und Deckeldruck in der Masterarbeit in Kapitel 4 und Kapitel 5 und wird im Anhang nicht mehr erläutert.

## 1 Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringering ohne Reibung

### 1.1 Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringering - Geometrie 1

#### 1.1.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

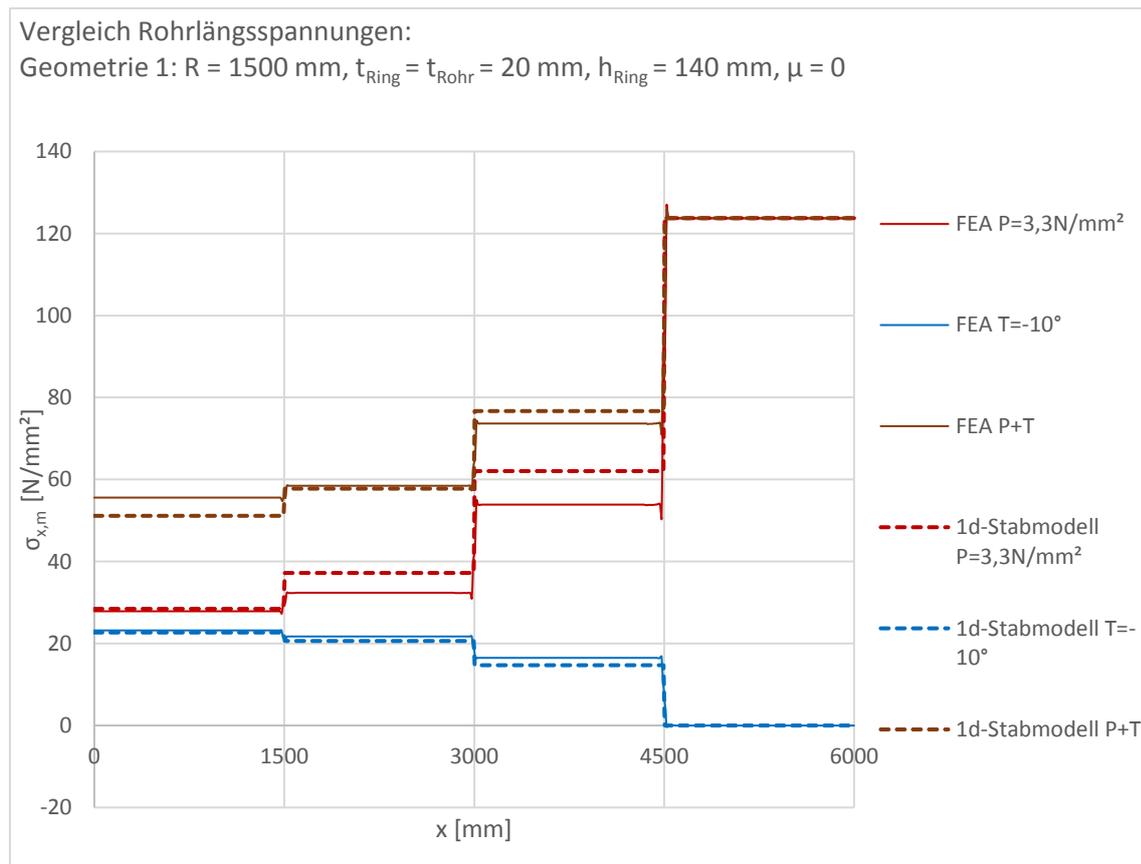


Abbildung 160 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Rohrlängsspannungen, Gesamtdruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Gesamtdruck und Abkühlung

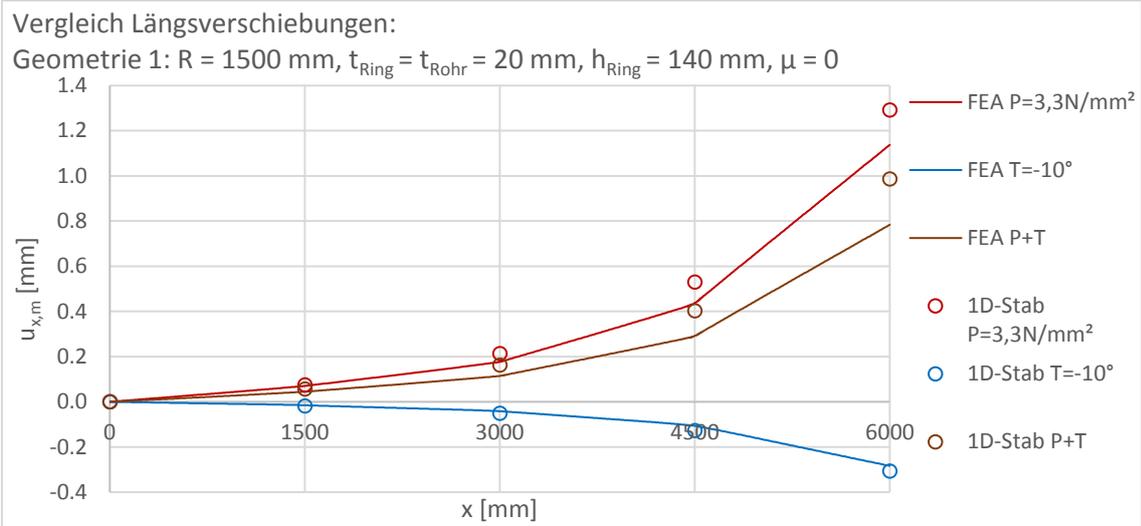


Abbildung 161 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Längsverschiebungen, Gesamtdruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtdruck FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtdruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	5.25	5.36	2.2%	4.37	4.28	-2.2%
<b>Schubring 1</b>	1445-1555	-0.85	-1.64	94%	0.28	0.39	42%
<b>Schubring 2</b>	2945-3055	-4.06	-4.68	15%	0.98	1.12	14%
<b>Schubring 3</b>	4445-4555	-13.14	-11.63	-11%	3.09	2.77	-11%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-18.05</b>	<b>-17.96</b>	<b>-0.49%</b>	<b>4.35</b>	<b>4.28</b>	<b>-1.7%</b>

Tabelle 28 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtdruck 3,3 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur -10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
<b>Auflager</b>	0	10.48	9.64	-8.0%	9.62	-8.2%
<b>Schubring 1</b>	1445-1555	-0.55	-1.25	127%	-0.57	3.7%
<b>Schubring 2</b>	2945-3055	-2.86	-3.57	25%	-3.08	7.6%
<b>Schubring 3</b>	4445-4555	-9.42	-8.87	-5.9%	-10.05	6.7%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-12.84</b>	<b>-13.69</b>	<b>6.6%</b>	<b>-13.70</b>	<b>6.7%</b>

Tabelle 29 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

Wie bereits in Kapitel 4 anhand des Innendrucks festgestellt, wirkt sich die Stabverkürzung im 1D-Stabmodell oder der Innendruck in der FEA, entlastend in Längsrichtung aus. Die Abkühlung des Stahlkörpers und deren ausgelöste Rohrverkürzung wirkt dem Deckeldruck hier ebenfalls entgegen.

1.1.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

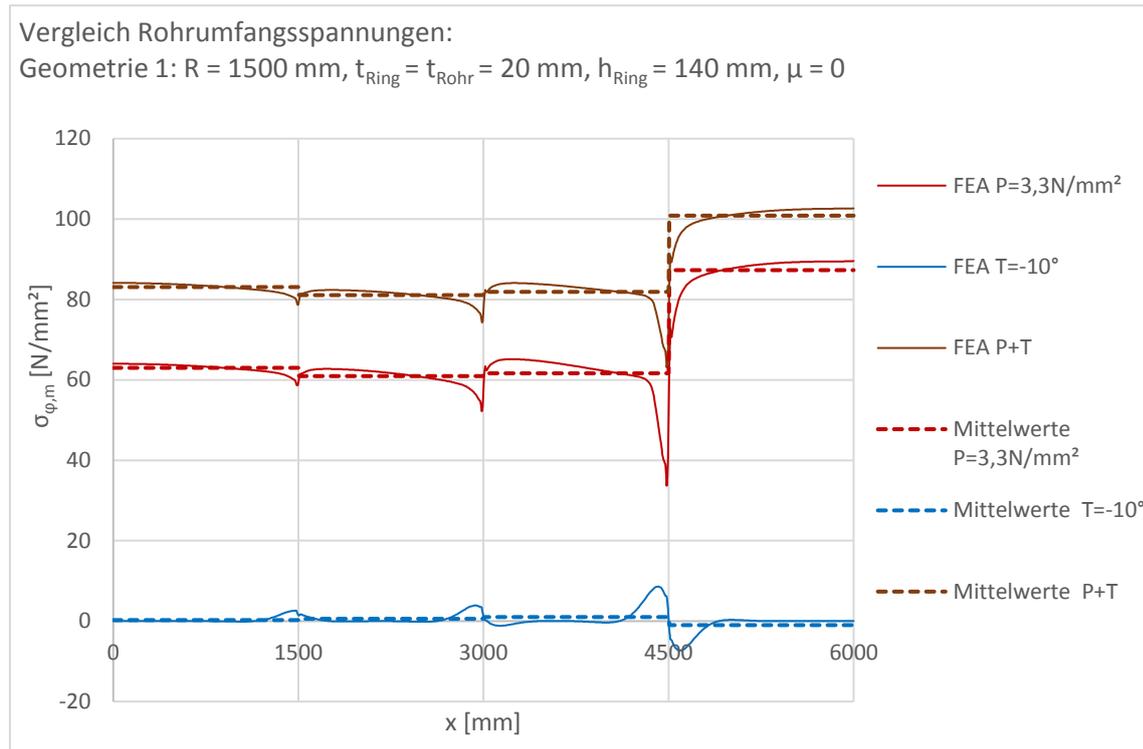


Abbildung 162 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Rohrumfangsspannungen, Gesamtdruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

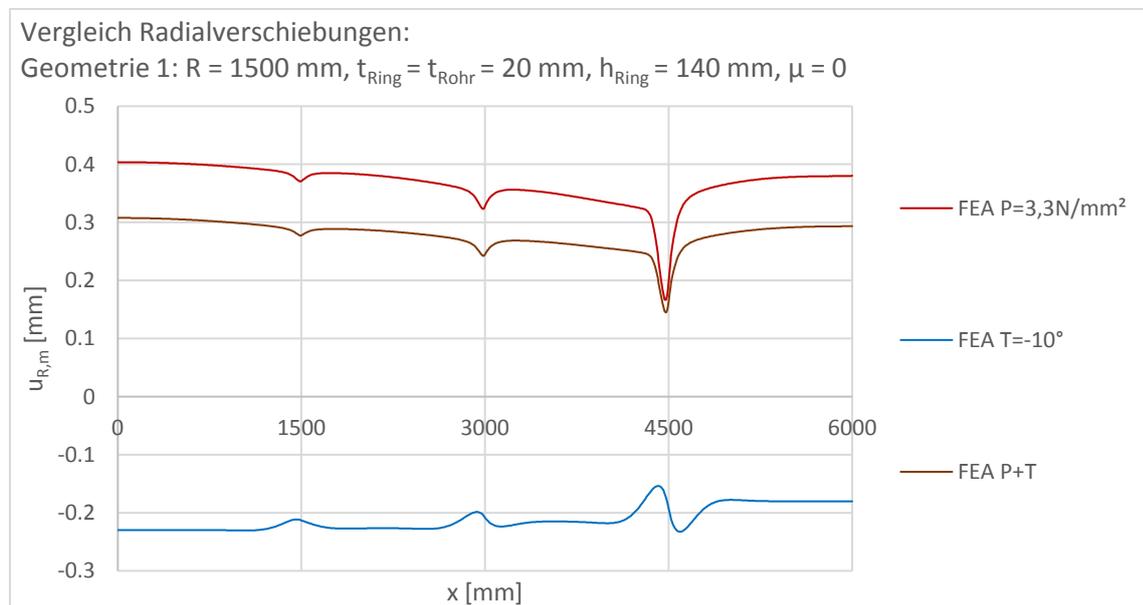


Abbildung 163 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Radialverschiebungen, Gesamtdruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

In Umfangsrichtung wird bemerkbar, wie sich die Temperaturverringering auf den Innendruck auswirkt. Durch das Ablösen der Stahlpanzerung vom Betonmantel um  $\sim 0,22 \text{ mm}$  (siehe Abbildung 163), muss diese Distanz erst vom Innendruck überbrückt werden, bevor der Betonmantel wieder aktiviert werden kann. Die Auswirkung ist eine höhere Umfangsspannung  $\sigma_{\varphi,m}$  in der Stahlpanzerung (vgl. Abbildung 162).

## 1.1.3 Verformungsplots

### 1.1.3.1 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck



Abbildung 164 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Deckel- und Innendruck

### 1.1.3.2 Verformungsplot - Temperatur



Abbildung 165 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur

### 1.1.3.3 Verformungsplot - Gesamtdruck und Temperatur



Abbildung 166 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Gesamtdruck und Temperatur

1.1.3.4 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck, Detail Schubring 3

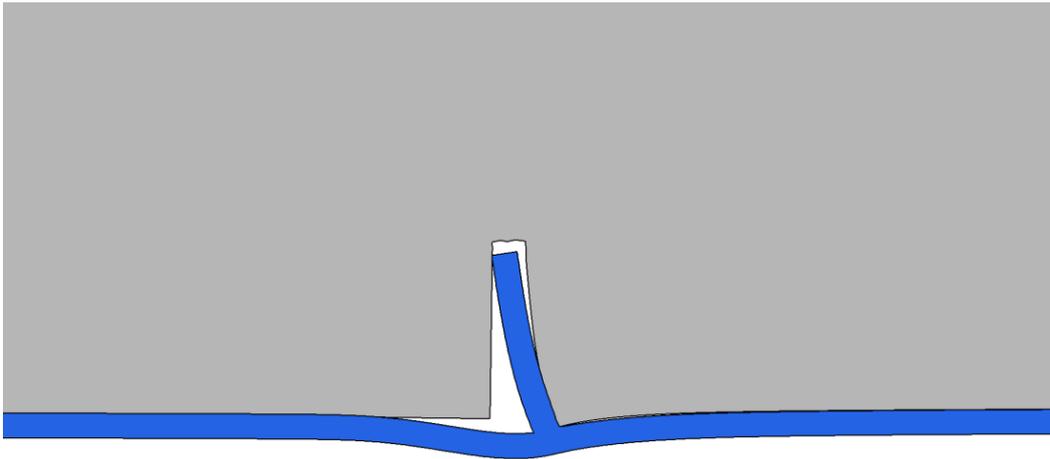


Abbildung 167 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Deckel- und Innendruck

1.1.3.5 Verformungsplot – Temperatur, Detail Schubring 3

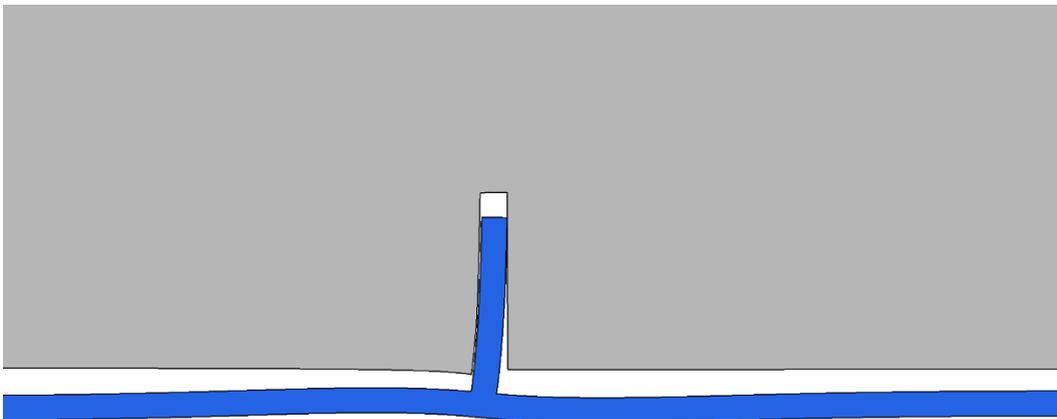


Abbildung 168 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

1.1.3.6 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck, Detail Schubring 3

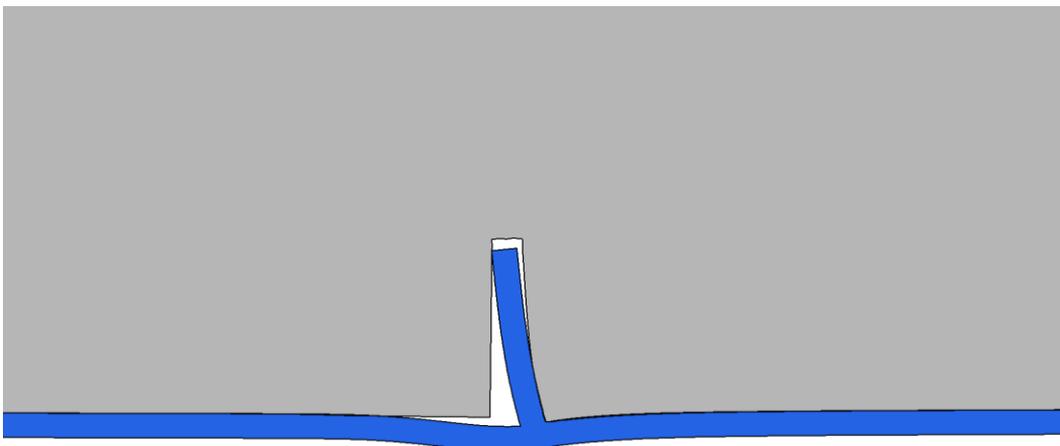


Abbildung 169 Geometrie, 1  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Überlagerung: Gesamtdruck und Temperatur

1.1.4 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

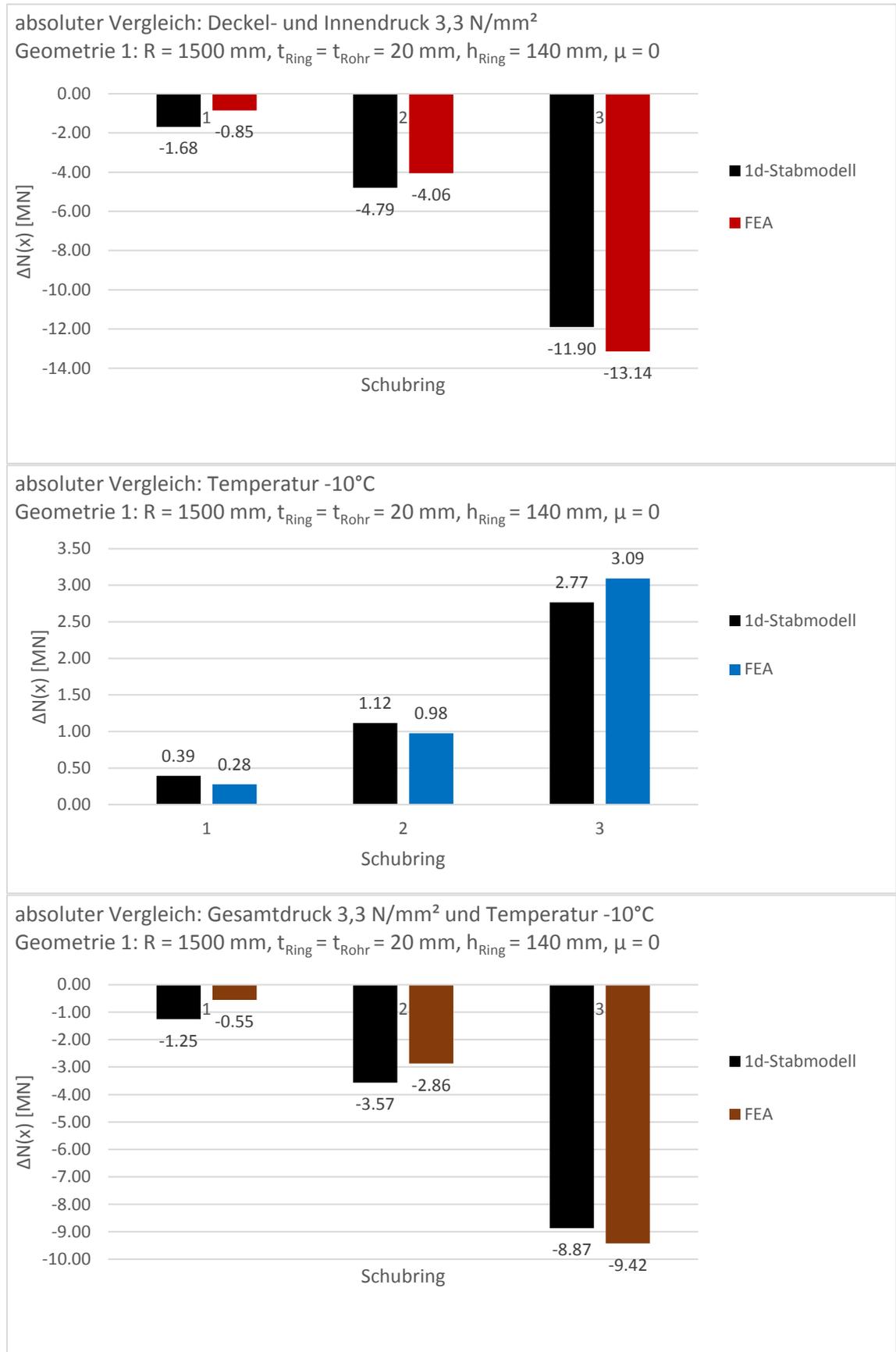


Abbildung 170 Geometrie 1, μ=0: absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Gesamtdruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

1.1.5 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

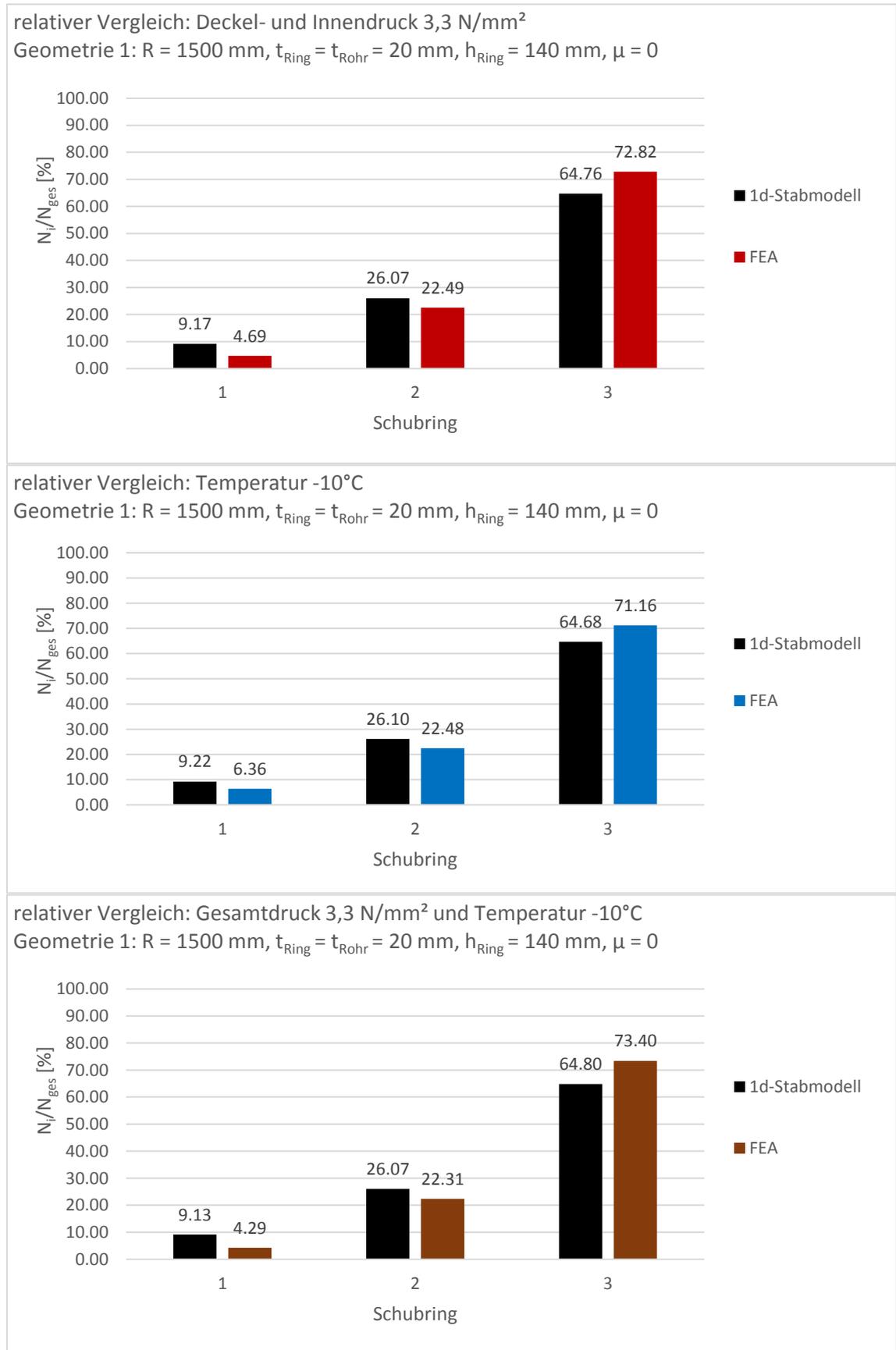


Abbildung 171 Geometrie 1, μ=0: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Gesamtdruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

1.2 Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringering - Geometrie 2

1.2.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

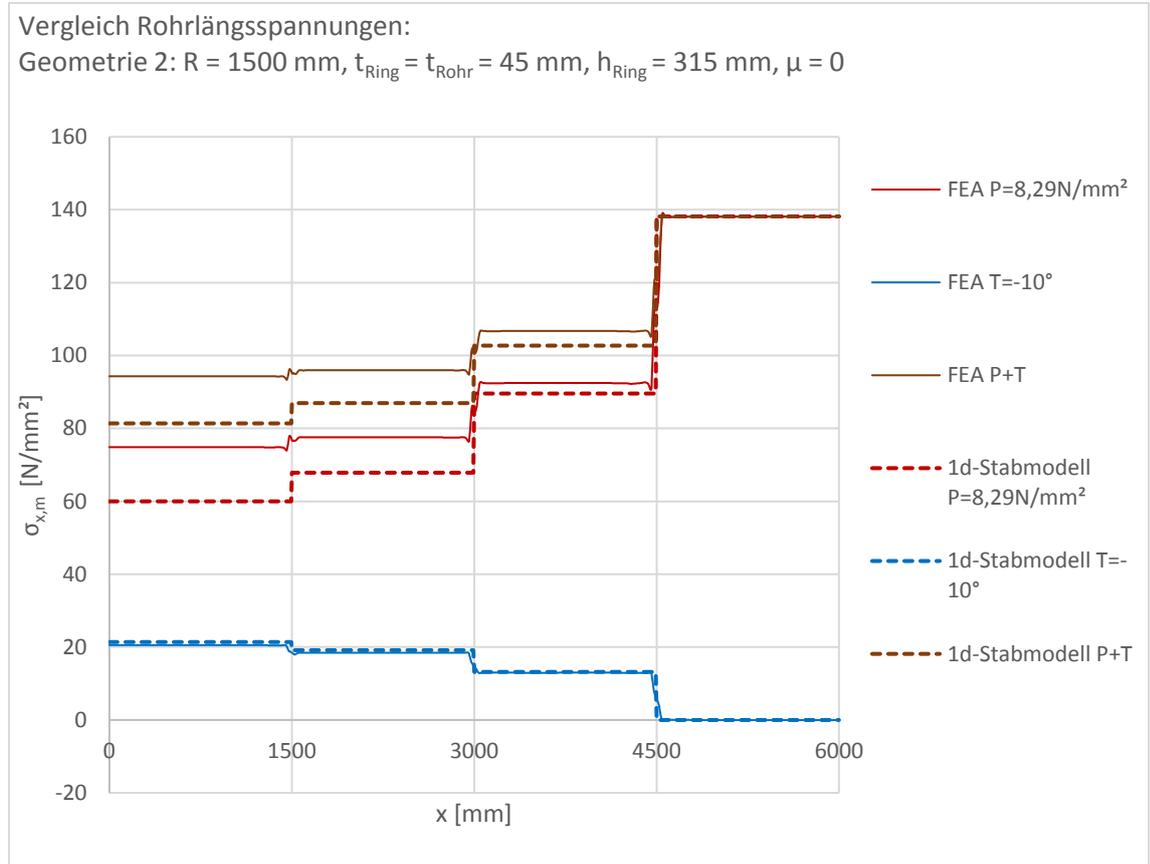


Abbildung 172 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Rohrlängsspannungen, Gesamtdruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

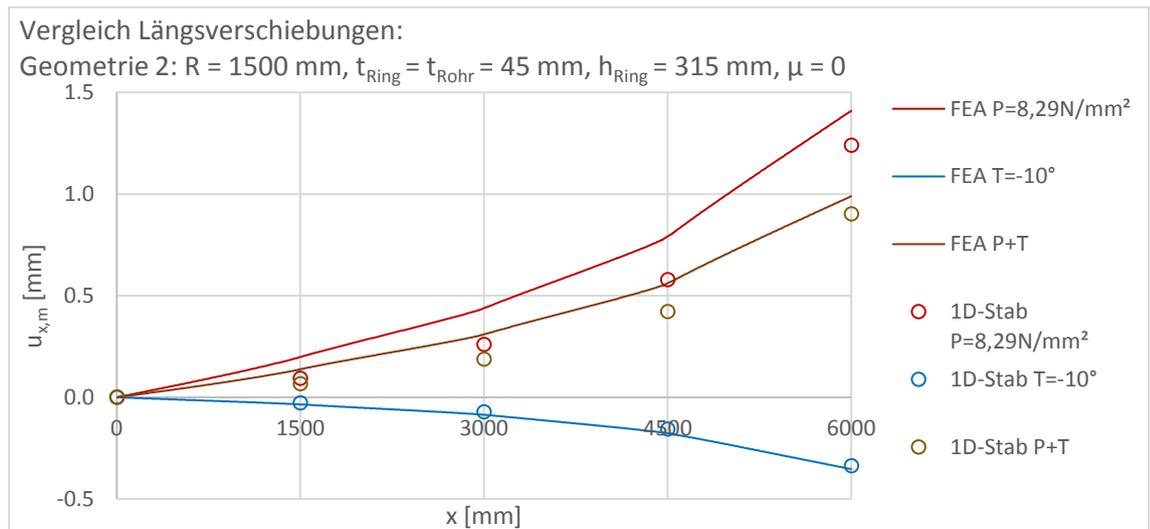


Abbildung 173 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Längsverschiebungen, Gesamtdruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Gesamtdruck und Abkühlung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtdruck FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtdruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
Auflager	0	31.75	25.44	-20%	8.70	9.07	4.3%
Schubring 1	1400-1600	-1.16	-3.33	186%	0.86	0.97	12%
Schubring 2	2900-3100	-6.40	-9.21	44%	2.31	2.52	8.9%
Schubring 3	4400-4600	-19.74	-20.62	4.5%	5.55	5.58	0.58%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-27.30</b>	<b>-33.16</b>	<b>21%</b>	<b>8.73</b>	<b>9.07</b>	<b>4.0%</b>

Tabelle 30 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtdruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur -10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
Auflager	0	40.01	34.51	-14%	40.44	1.1%
Schubring 1	1400-1600	-0.71	-2.36	230%	-0.30	-58%
Schubring 2	2900-3100	-4.63	-6.69	45%	-4.09	-12%
Schubring 3	4400-4600	-13.55	-15.04	11%	-14.19	4.7%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-18.89</b>	<b>-24.08</b>	<b>27%</b>	<b>-18.57</b>	<b>-1.7%</b>

Tabelle 31 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

Die gleichen Auswirkungen der Temperaturverringernng wie bei Geometrie 1 können auch für Geometrie 2 beobachtet werden.

1.2.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

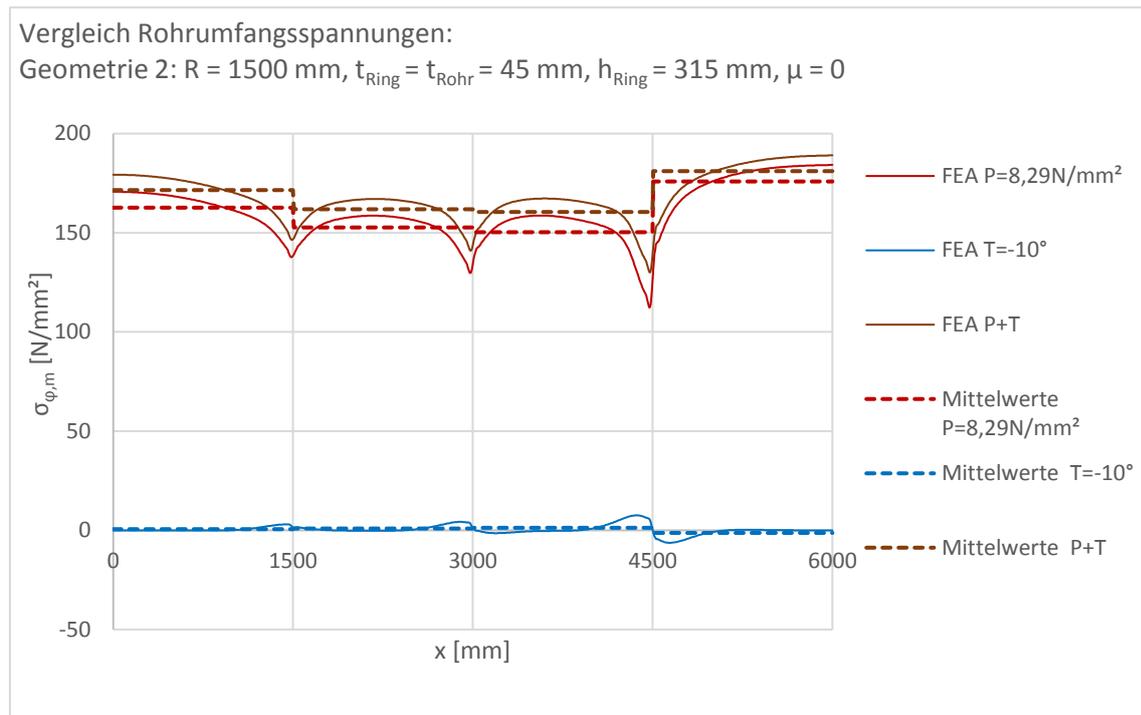


Abbildung 174 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Rohrumfangsspannungen, Gesamtdruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

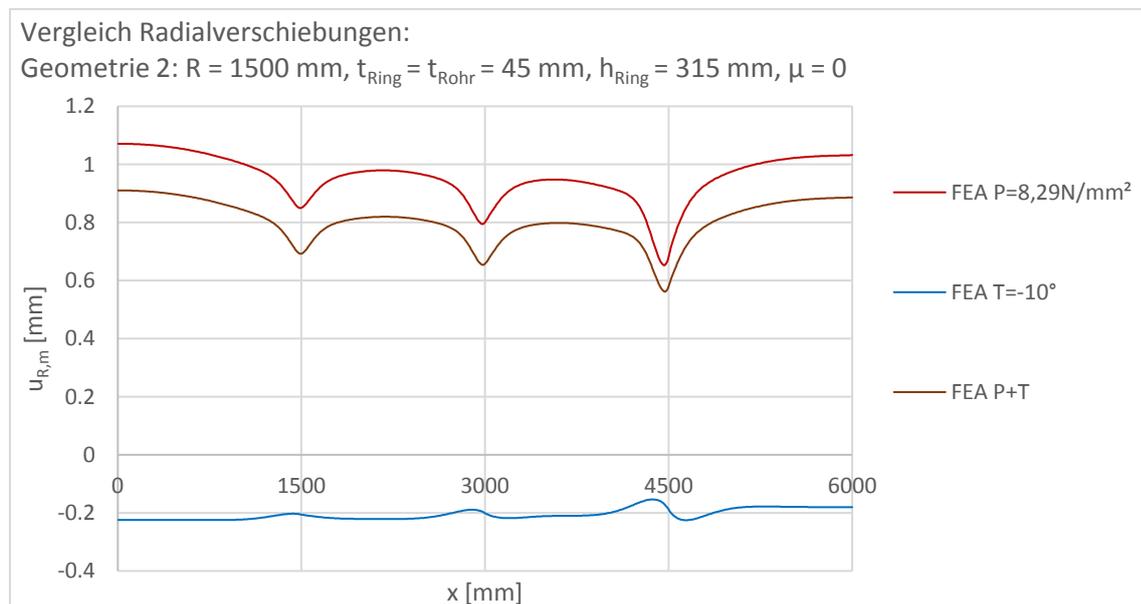


Abbildung 175 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Radialverschiebungen, Gesamtdruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

Die gleichen Auswirkungen der Temperaturverringernung wie bei Geometrie 1 können auch für Geometrie 2 beobachtet werden.

## 1.2.3 Verformungsplots

### 1.2.3.1 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck

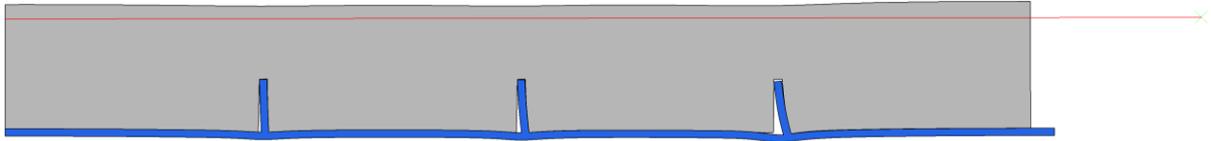


Abbildung 176 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Deckel- und Innendruck

### 1.2.3.2 Verformungsplot - Temperatur

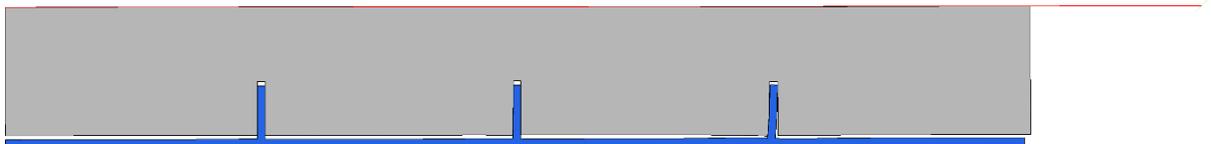


Abbildung 177 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur

### 1.2.3.3 Verformungsplot - Gesamtdruck und Temperatur

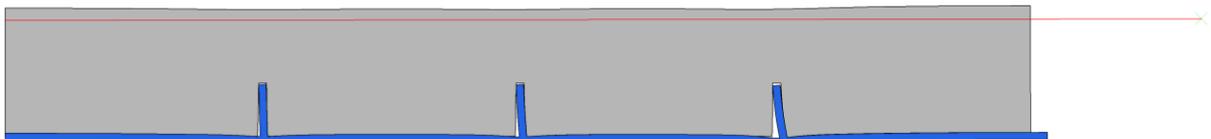


Abbildung 178 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Gesamtdruck und Temperatur

---

1.2.3.4 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck, Detail Schubring 3

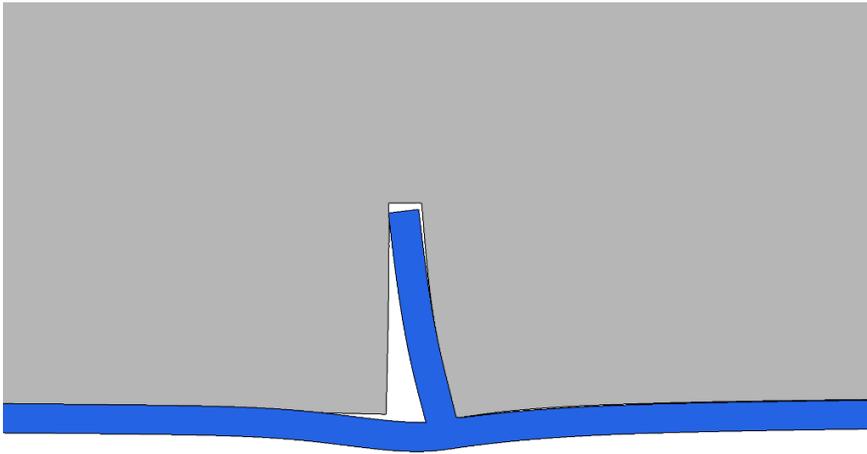


Abbildung 179 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Deckel- und Innendruck

---

1.2.3.5 Verformungsplot – Temperatur, Detail Schubring 3

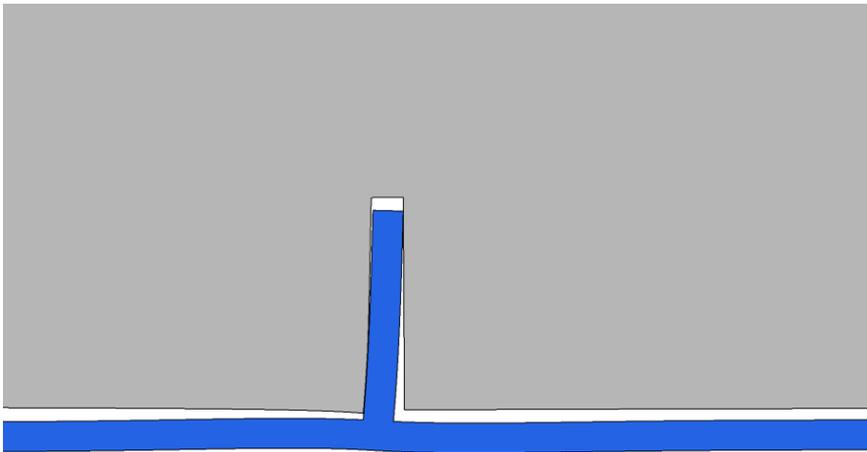


Abbildung 180 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

---

1.2.3.6 Verformungsplot - Gesamtdruck und Temperatur, Detail Schubring 3

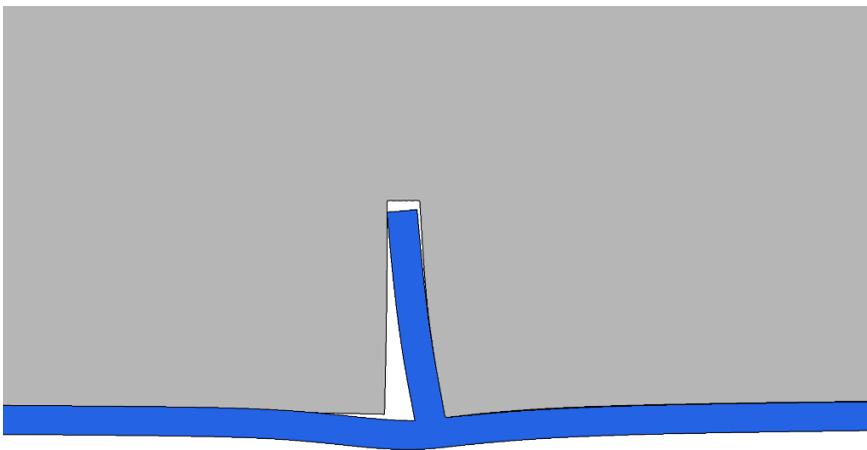


Abbildung 181 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Überlagerung: Gesamtdruck und Temperatur

1.2.4 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

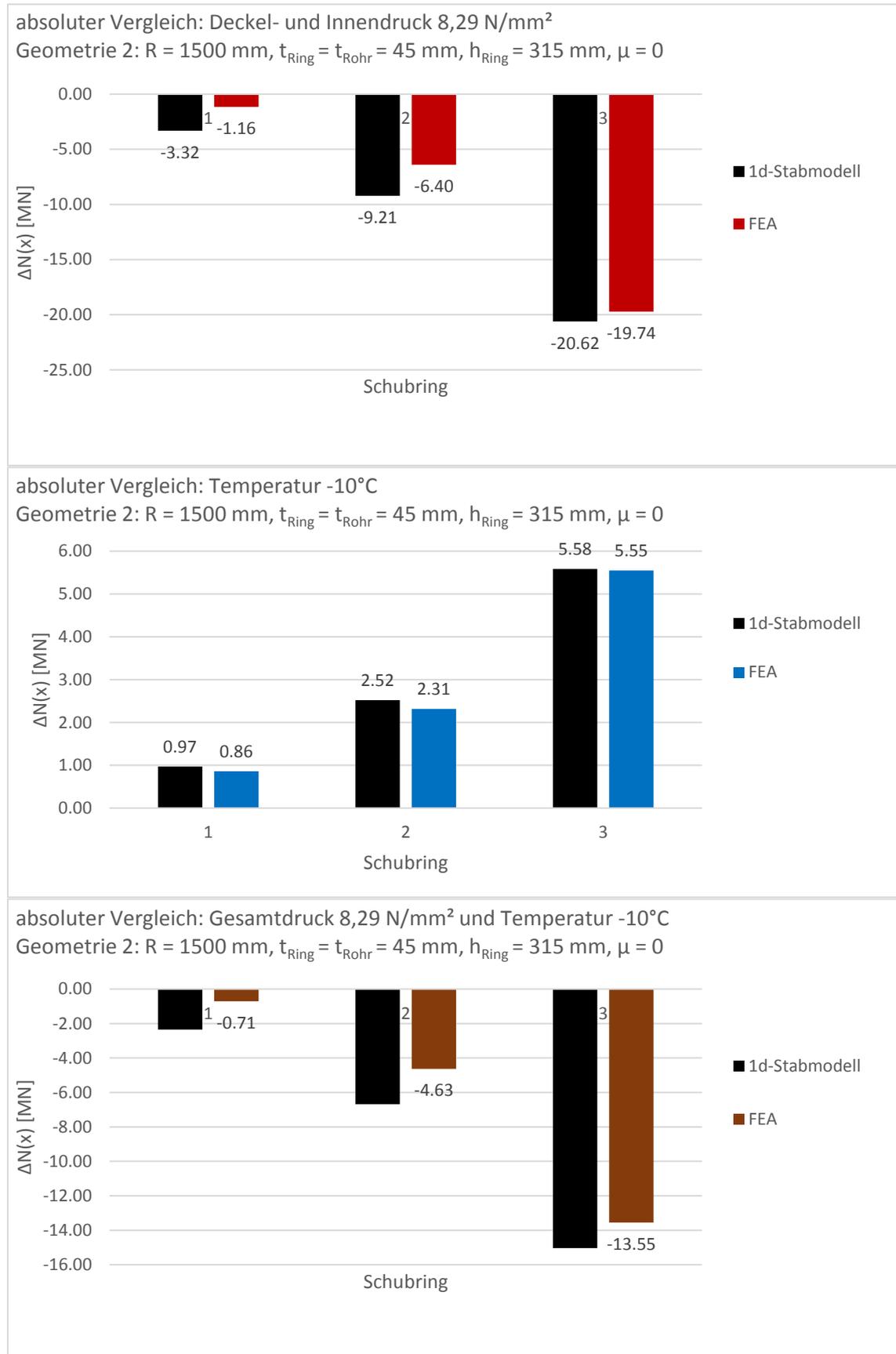


Abbildung 182 Geometrie 2, μ=0: absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Gesamtdruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

1.2.5 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

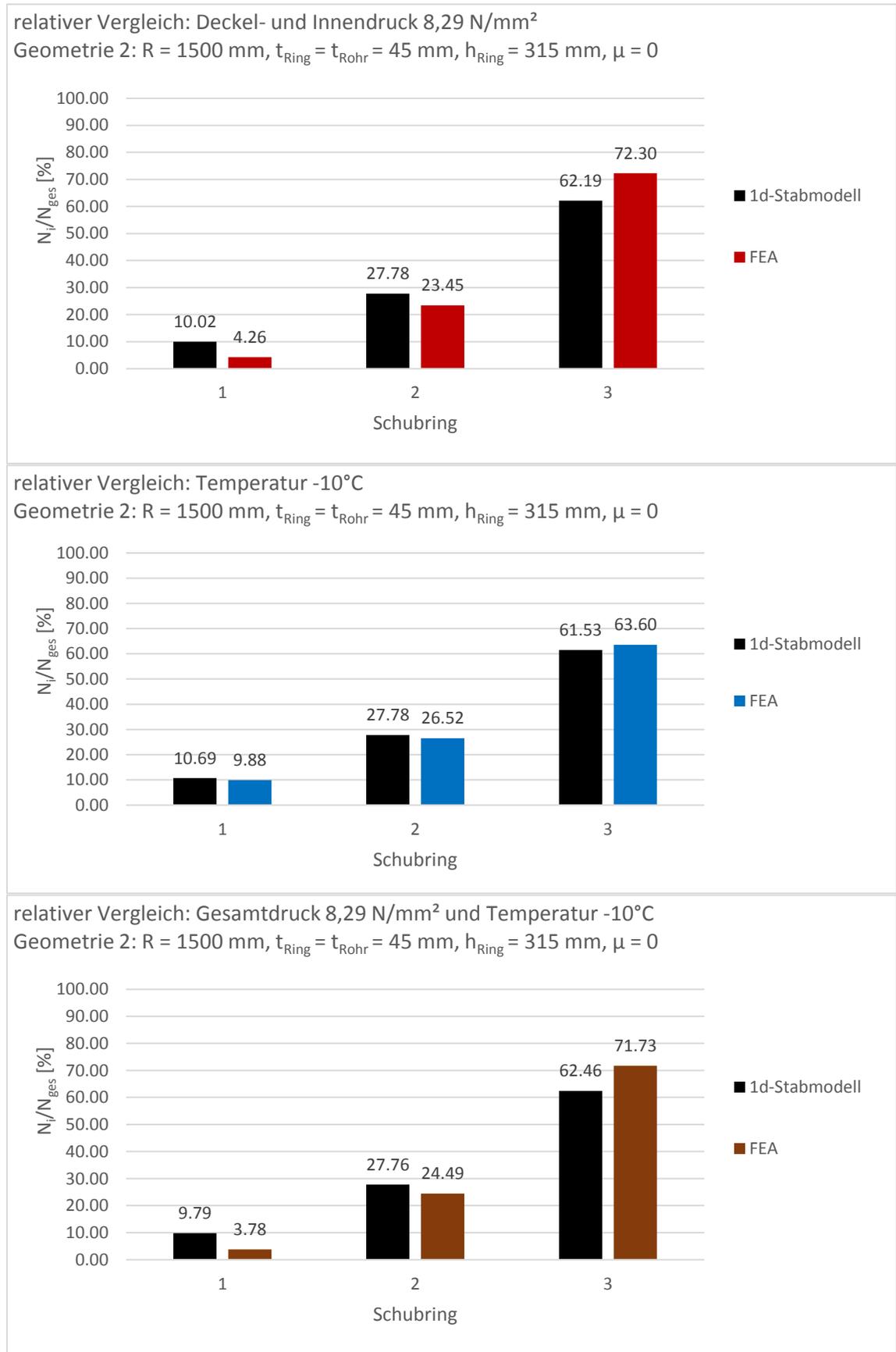


Abbildung 183 Geometrie 2, μ=0: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Gesamtdruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

1.3 Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringering - Geometrie 3

1.3.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

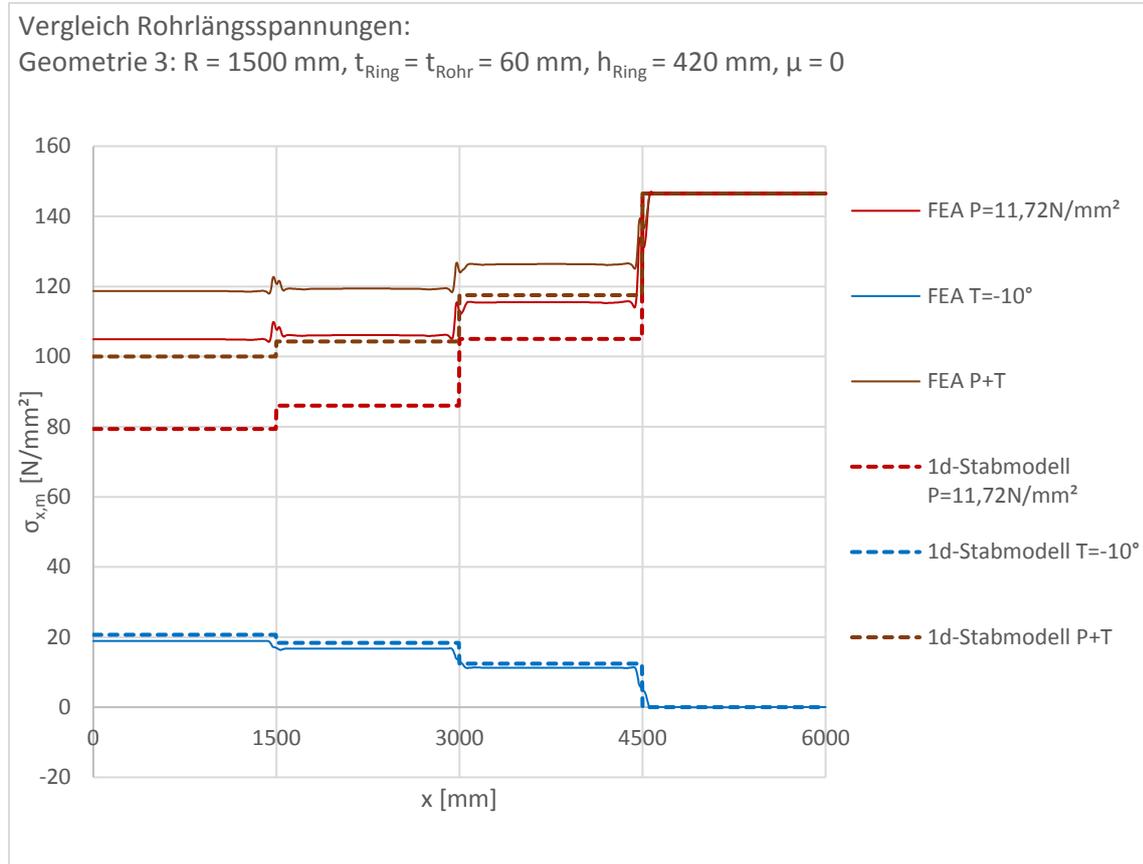


Abbildung 184 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Rohrlängsspannungen, Gesamtdruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

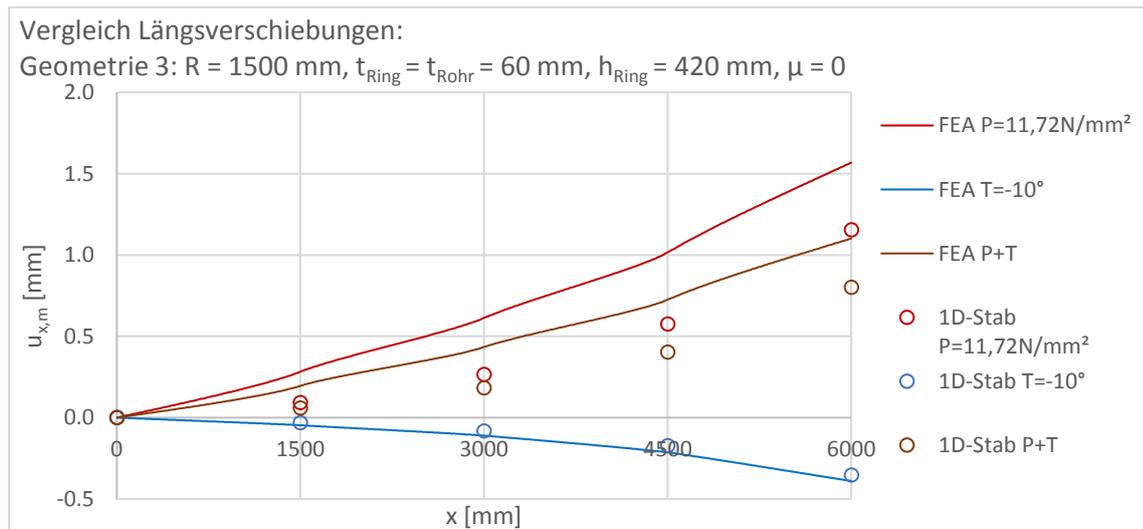


Abbildung 185 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Längsverschiebungen, Gesamtdruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Gesamtdruck und Abkühlung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtdruck FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtdruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	59.36	44.88	-24%	10.68	11.68	9.4%
<b>Schubring 1</b>	1300-1700	-0.64	-3.74	485%	1.22	1.32	8.2%
<b>Schubring 2</b>	2800-3200	-5.35	-10.79	102%	3.06	3.32	8.6%
<b>Schubring 3</b>	4300-4700	-17.46	-23.44	34%	6.32	7.04	11%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-23.45</b>	<b>-37.97</b>	<b>62%</b>	<b>10.60</b>	<b>11.68</b>	<b>10%</b>

Tabelle 32 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtdruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur -10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
<b>Auflager</b>	0	67.14	56.56	-16%	70.04	4.3%
<b>Schubring 1</b>	1300-1700	-0.37	-2.42	549%	0.58	-256%
<b>Schubring 2</b>	2800-3200	-3.92	-7.46	90%	-2.29	-41.7%
<b>Schubring 3</b>	4300-4700	-11.35	-16.41	45%	-11.14	-1.8%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-15.65</b>	<b>-26.29</b>	<b>68%</b>	<b>-12.85</b>	<b>-18%</b>

Tabelle 33 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

Die gleichen Auswirkungen der Temperaturverringernng wie bei Geometrie 1 können auch für Geometrie 3 beobachtet werden.

1.3.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

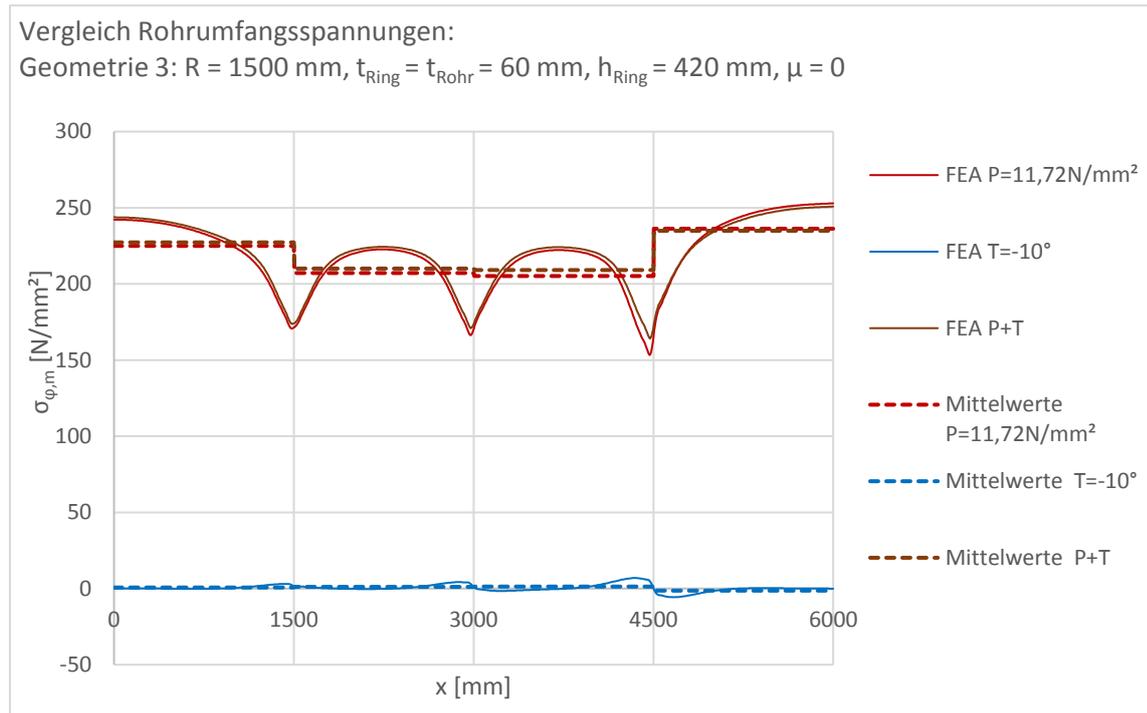


Abbildung 186 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Umfangsspannungsvergleich, Gesamtdruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

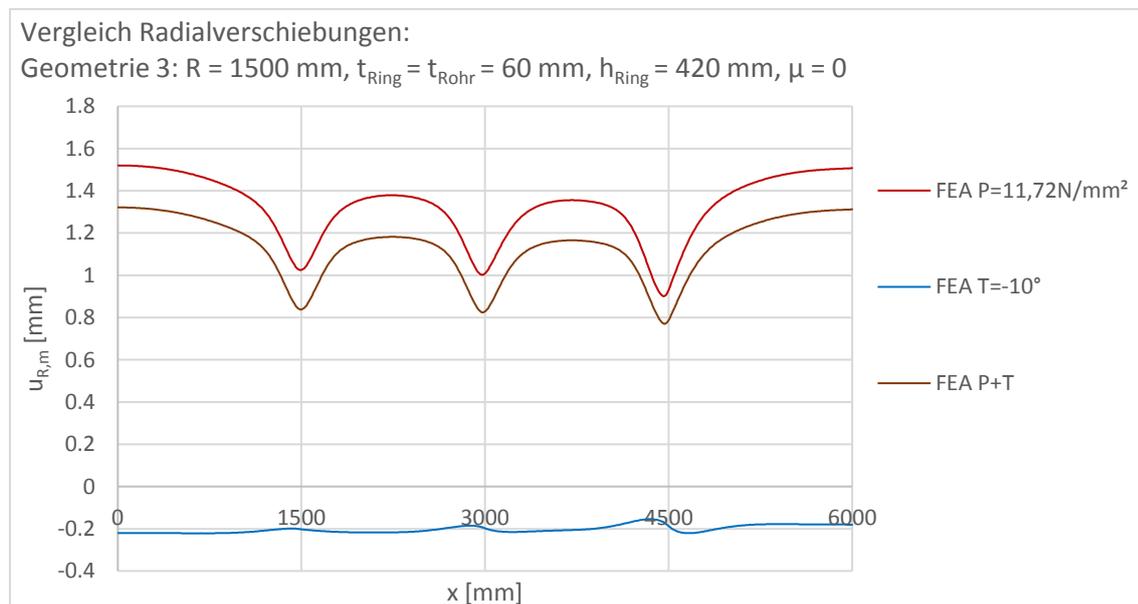


Abbildung 187 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Radialverschiebungen, Gesamtdruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

Die gleichen Auswirkungen der Temperaturverringernung wie bei Geometrie 1 können auch für Geometrie 3 beobachtet werden.

---

1.3.3 Verformungsplots

---

1.3.3.1 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck

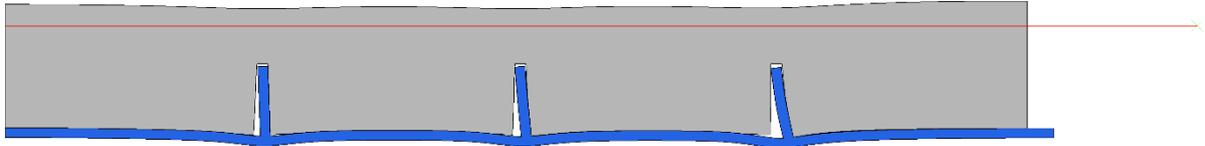


Abbildung 188 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Deckel- und Innendruck

---

1.3.3.2 Verformungsplot - Temperatur

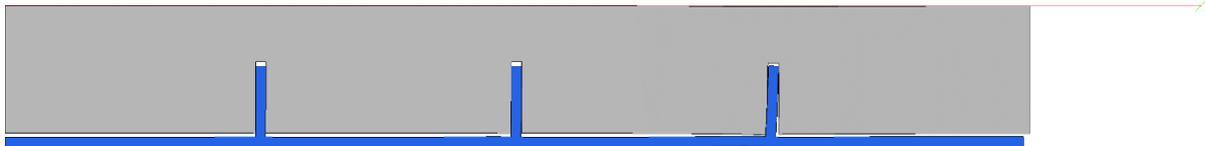


Abbildung 189 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur

---

1.3.3.3 Verformungsplot - Gesamtdruck und Temperatur

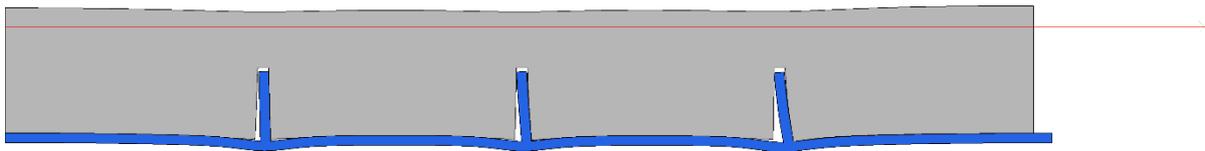


Abbildung 190 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Gesamtdruck und Temperatur

---

1.3.3.4 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck, Detail Schubring 3

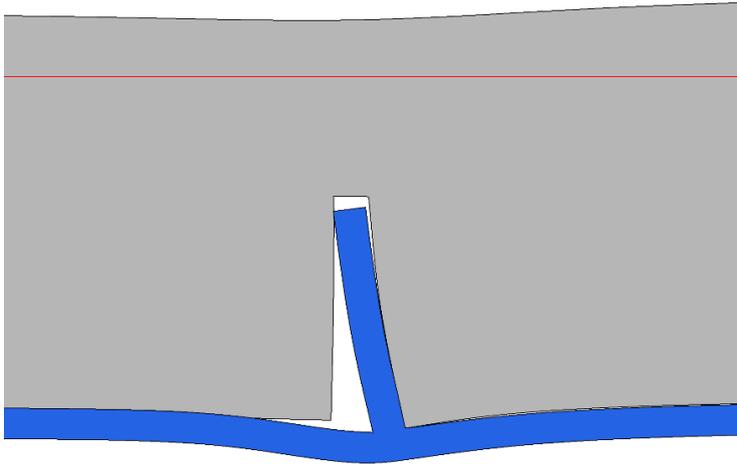


Abbildung 191 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Deckel- und Innendruck

---

1.3.3.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

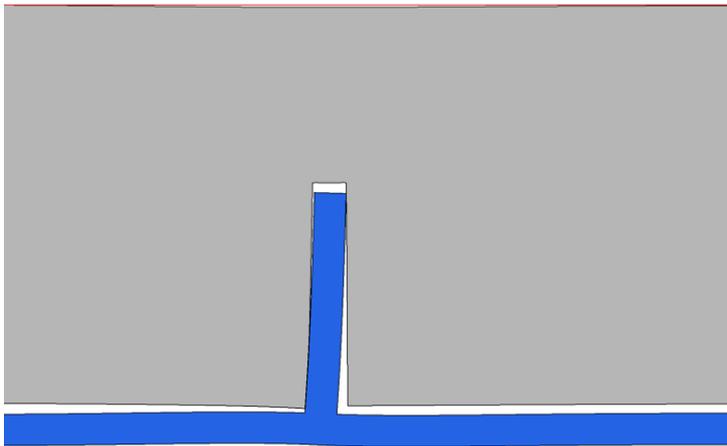


Abbildung 192 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

---

1.3.3.6 Verformungsplot - Gesamtdruck und Temperatur, Detail Schubring 3

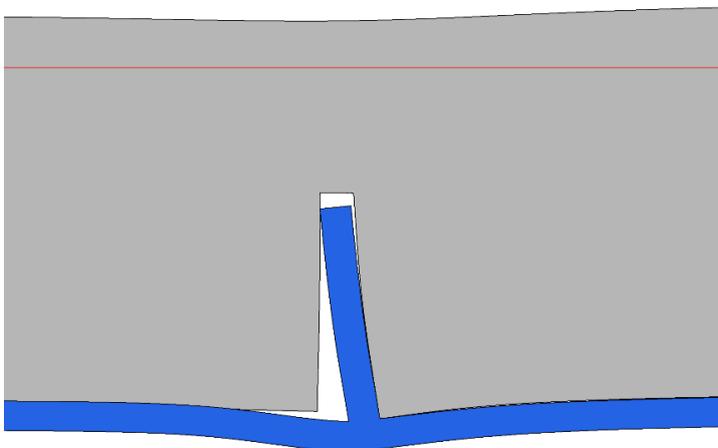


Abbildung 193 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Gesamtdruck und Temperatur

1.3.4 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

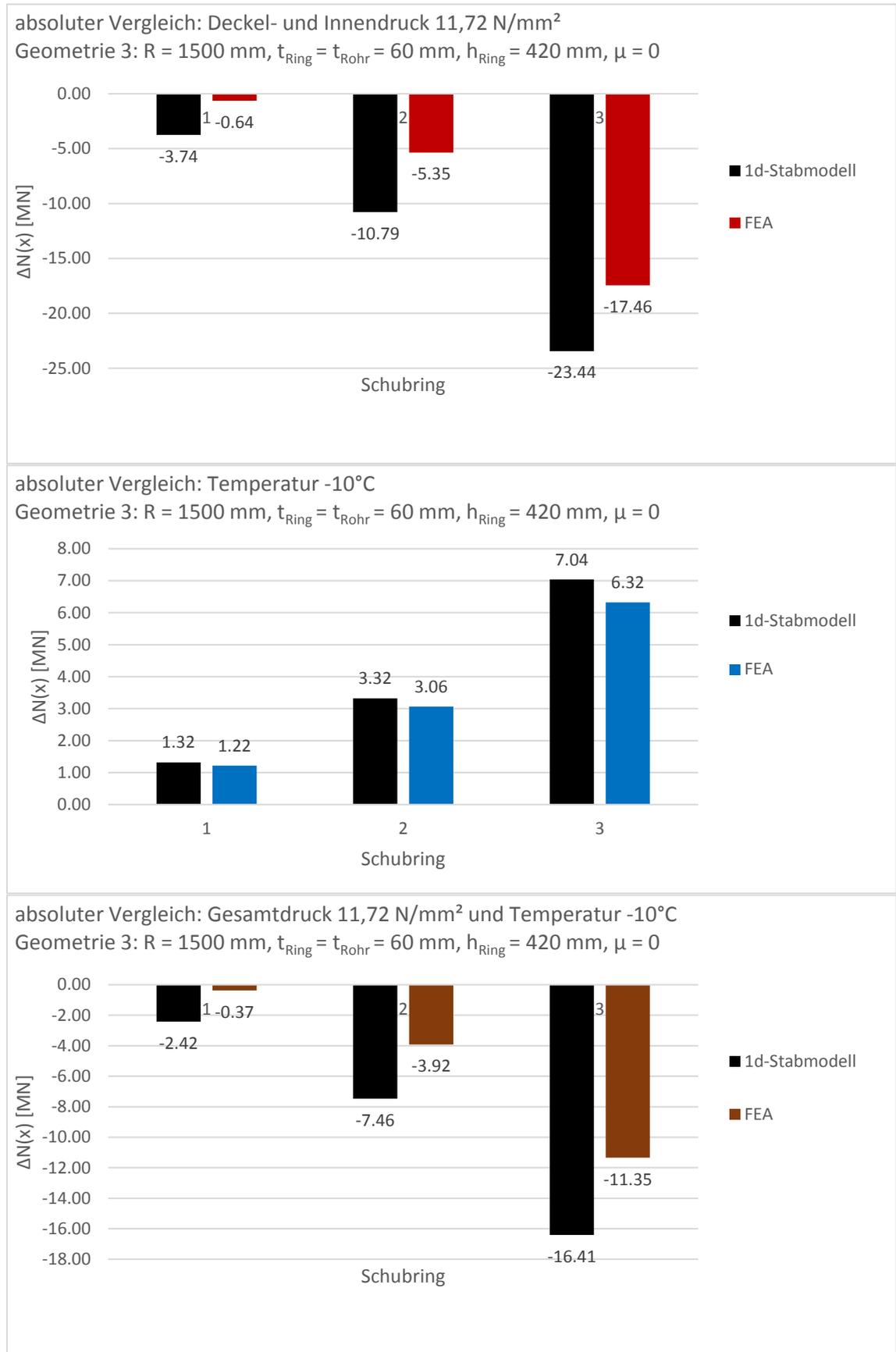


Abbildung 194 Geometrie 3, μ=0: absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Gesamtdruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

1.3.5 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

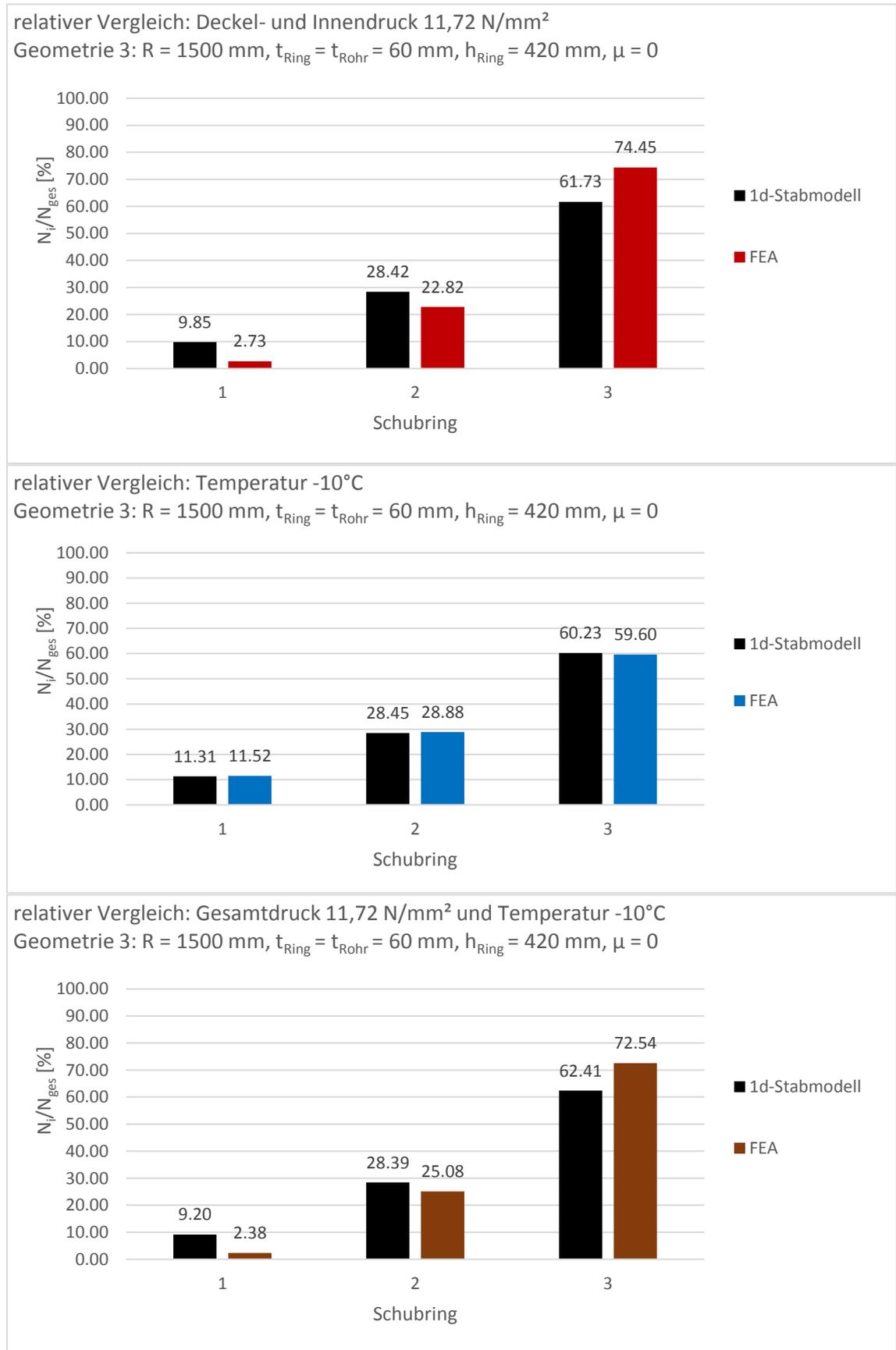


Abbildung 195 Geometrie 3, μ=0: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Gesamtdruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2 Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringering mit Reibung

2.1 Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringering - Geometrie 1

2.1.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

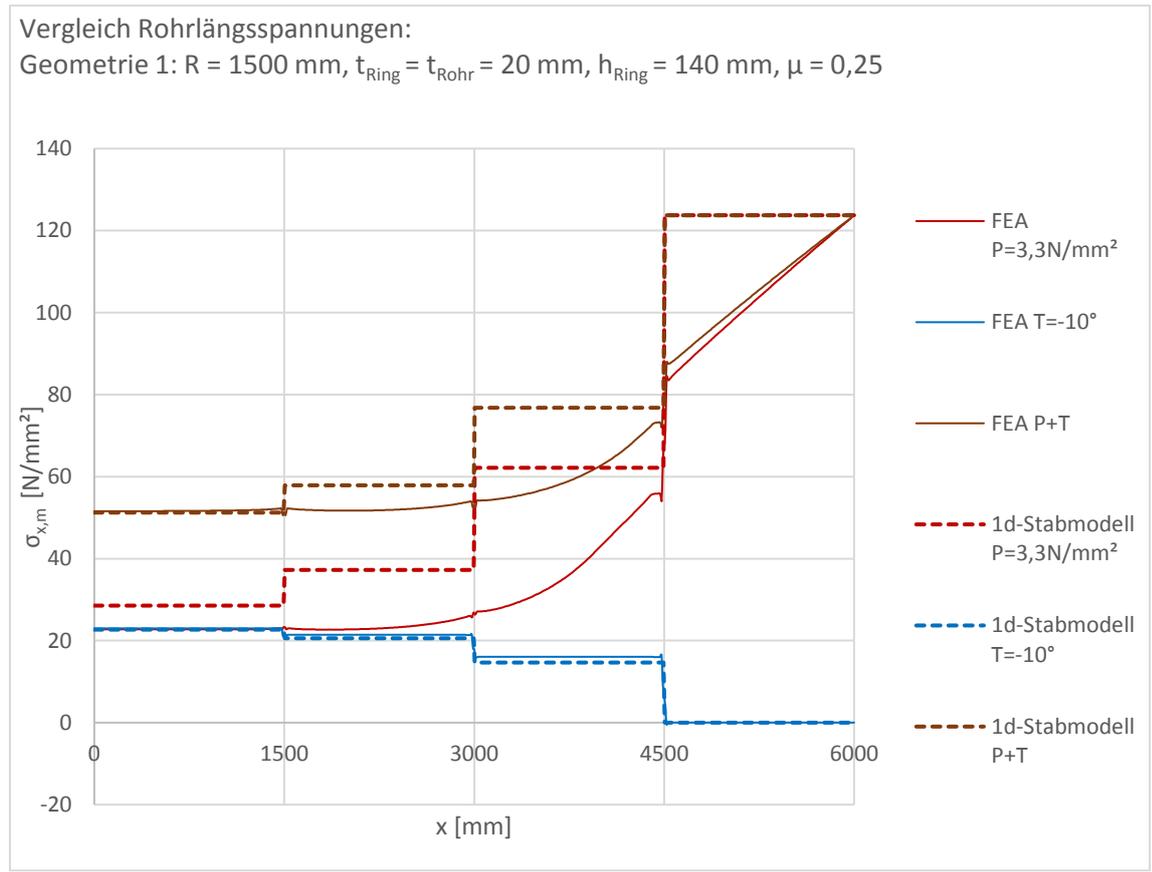


Abbildung 196 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Rohrlängsspannungen, Gesamtdruck 3,3  $\text{N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

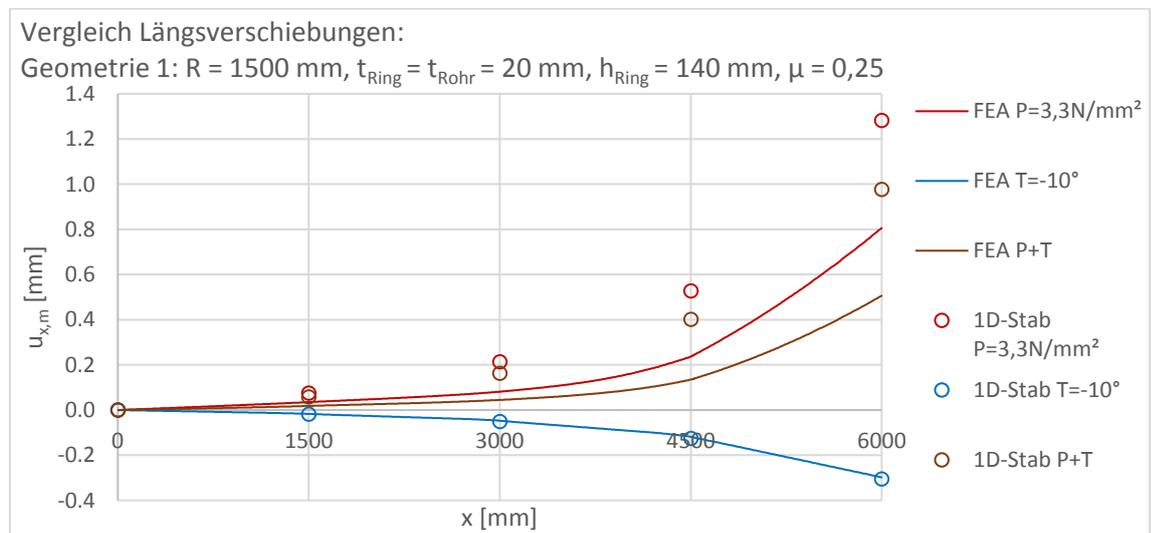


Abbildung 197 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Längsverschiebungen, Gesamtdruck 3,3  $\text{N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Gesamtdruck und Abkühlung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtdruck FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtdruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
Auflager	0	4.29	5.38	25%	4.33	4.28	-1.3%
Stahlpanzerung 1	0-1440	-0.04	0.00		0.00	0.00	
Schubring 1	1445-1555	0.00	-1.64	>>	0.29	0.39	35%
Stahlpanzerung 2	1560-2950	-0.56	0.00		0.01	0.00	
Schubring 2	2945-3055	-0.24	-4.69	1893%	1.00	1.12	11%
Stahlpanzerung 3	3060-4440	-5.41	0.00		0.01	0.00	
Schubring 3	4445-4555	-5.35	-11.61	117%	3.01	2.77	-8.1%
Stahlpanzerung 4	4560-6000	-7.41	0.00		0.01	0.00	
<b>∑ Schubringe</b>		<b>-5.58</b>	<b>-17.95</b>	<b>221%</b>	<b>4.31</b>	<b>4.28</b>	<b>-0.68%</b>

Tabelle 34 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtdruck 3,3 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur -10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
Auflager	0	9.72	9.66	-0.69%	8.62	-11%
Stahlpanzerung 1	0-1440	-0.11	0.00		-0.04	-65%
Schubring 1	1445-1555	0.00	-1.25	>>	0.29	>>
Stahlpanzerung 2	1560-2950	-0.32	0.00		-0.56	74%
Schubring 2	2945-3055	-0.07	-3.57	4881%	0.77	-1172%
Stahlpanzerung 3	3060-4440	-3.57	0.00		-5.40	51%
Schubring 3	4445-4555	-2.76	-8.85	220%	-2.34	-15%
Stahlpanzerung 4	4560-6000	-6.74	0.00		-7.40	9.8%
<b>∑ Schubringe</b>		<b>-2.83</b>	<b>-13.67</b>	<b>382%</b>	<b>-1.28</b>	<b>-55%</b>

Tabelle 35 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

Obwohl sich der Rohrquerschnitt durch die Temperaturverringerng aus dem Betonmantel löst, kann die ausgelöste Reibungswirkung des Innendrucks nicht verhindert werden.

2.1.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

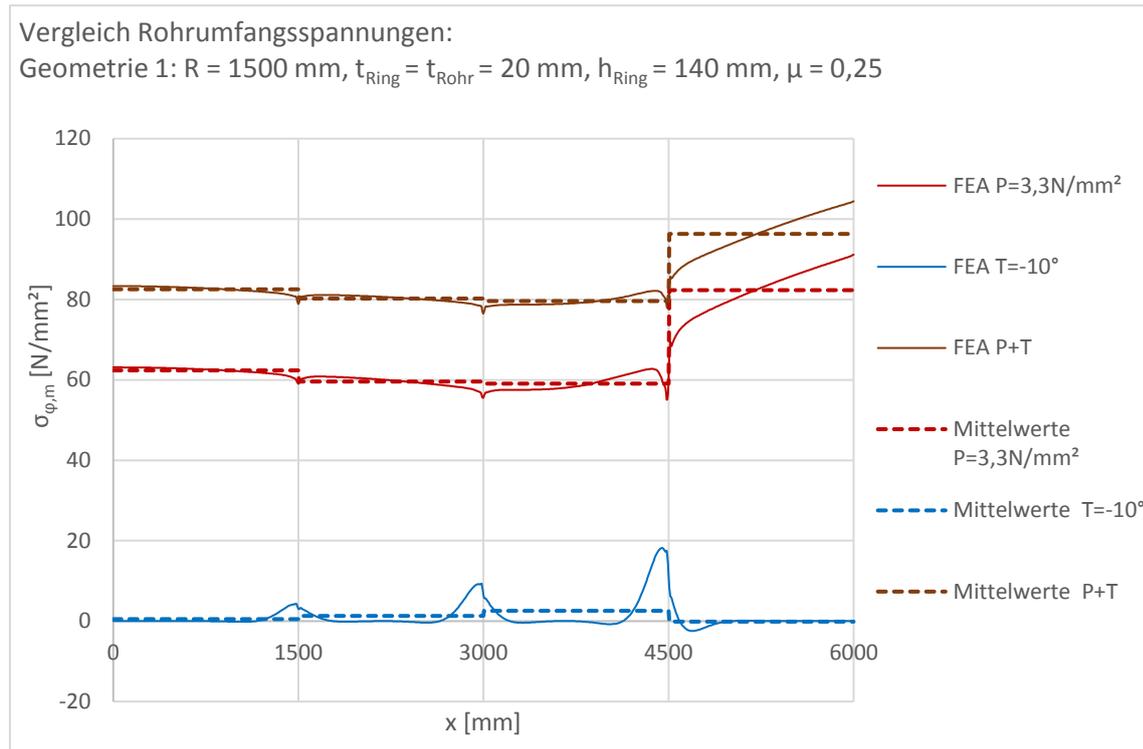


Abbildung 198 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Rohrumfangsspannungen, Gesamtdruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

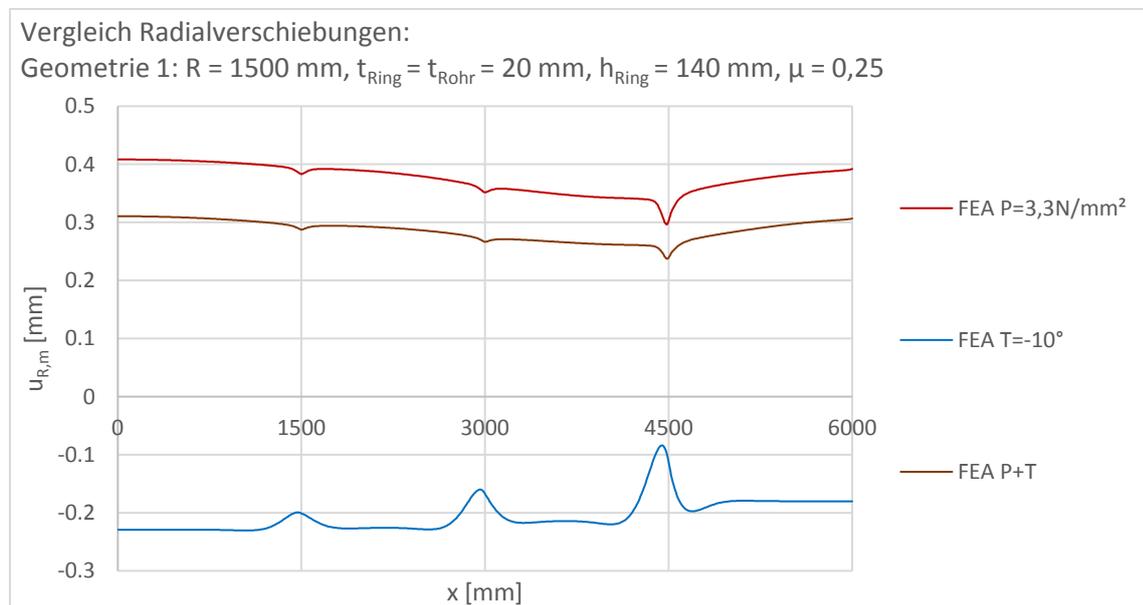


Abbildung 199 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Radialverschiebungen, Gesamtdruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

In Umfangsrichtung zeigt sich durch den Einfluss der Reibung keine Veränderung.

2.1.3 Analyse der Reibungswirkung

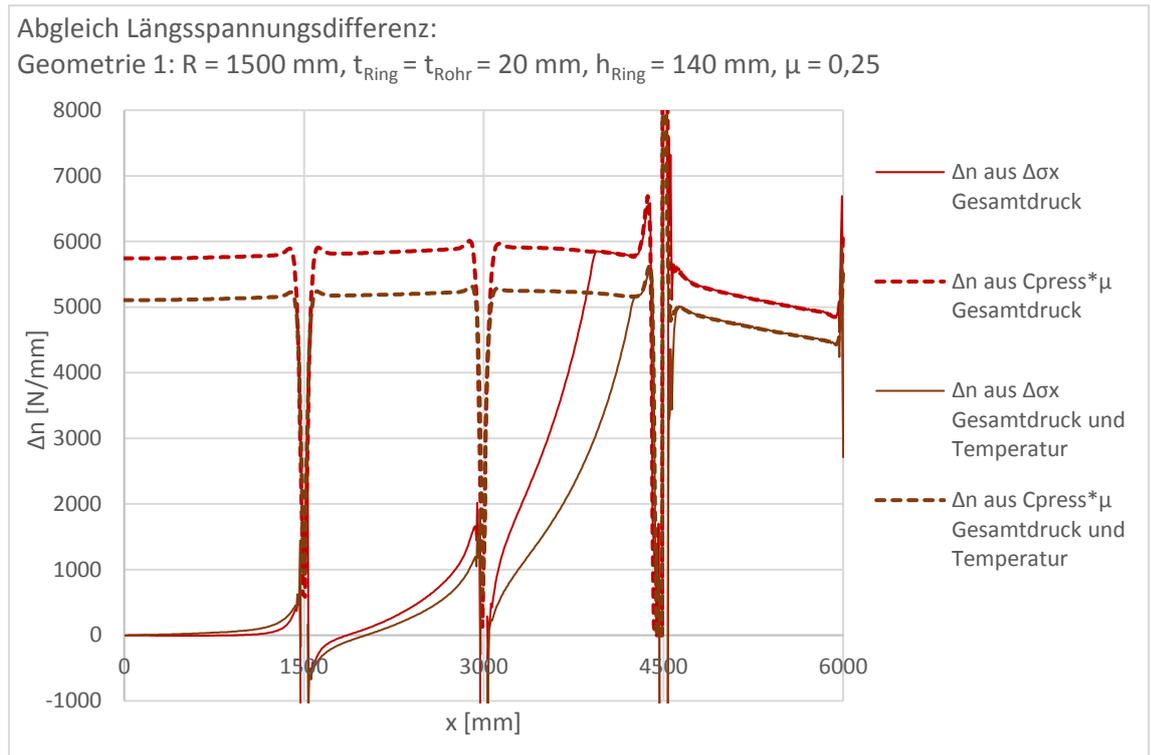


Abbildung 200 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Reibungswirkung, Gesamtdruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung

Obwohl die Temperaturverringerng den Anpressdruck verringert, so ist anhand der Auslastung der Reibung ersichtlich, dass sich die Stabverkürzung und damit einhergehende geringere Längskraft, stärker auswirkt (vgl. 100% Auslastung bis  $x \approx 4000 \text{ mm}$  bei Gesamtdruck und 100% Auslastung bis  $x \approx 4500 \text{ mm}$  bei einer Einwirkung von zusätzlich  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$ ).

2.1.4 Verformungsplots

2.1.4.1 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck

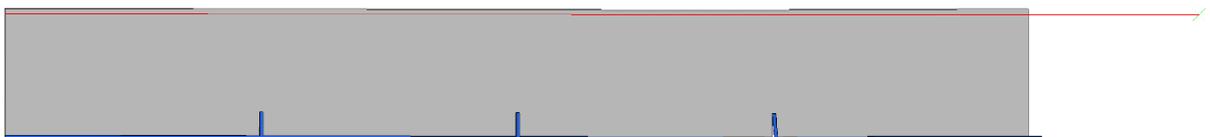


Abbildung 201 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Deckel- und Innendruck

2.1.4.2 Verformungsplot - Temperatur



Abbildung 202 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur

2.1.4.3 Verformungsplot - Gesamtdruck und Temperatur



Abbildung 203 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Gesamtdruck und Temperatur

---

2.1.4.4 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck, Detail Schubring 3

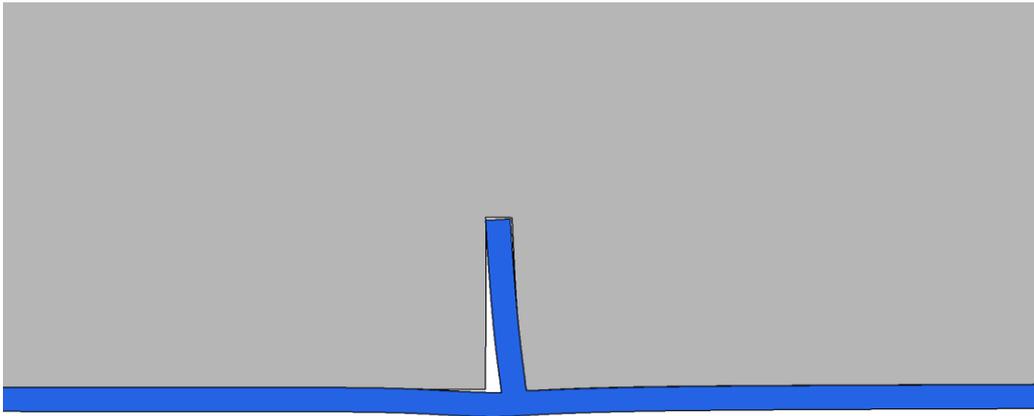


Abbildung 204 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Deckel- und Innendruck

---

2.1.4.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

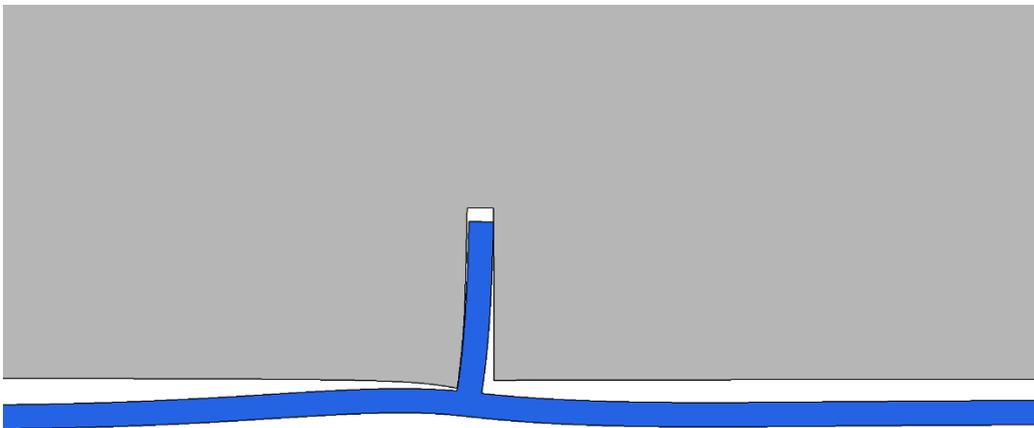


Abbildung 205 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

---

2.1.4.6 Verformungsplot - Gesamtdruck und Temperatur, Detail Schubring 3

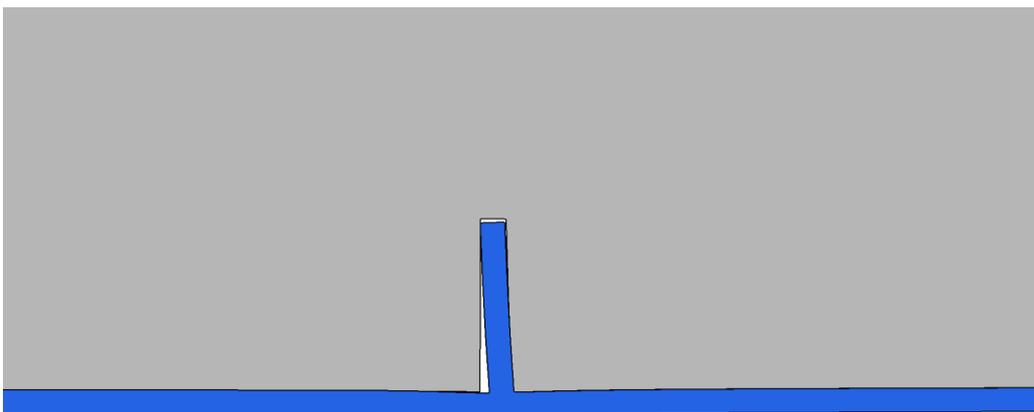


Abbildung 206 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Gesamtdruck und Temperatur

2.1.5 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

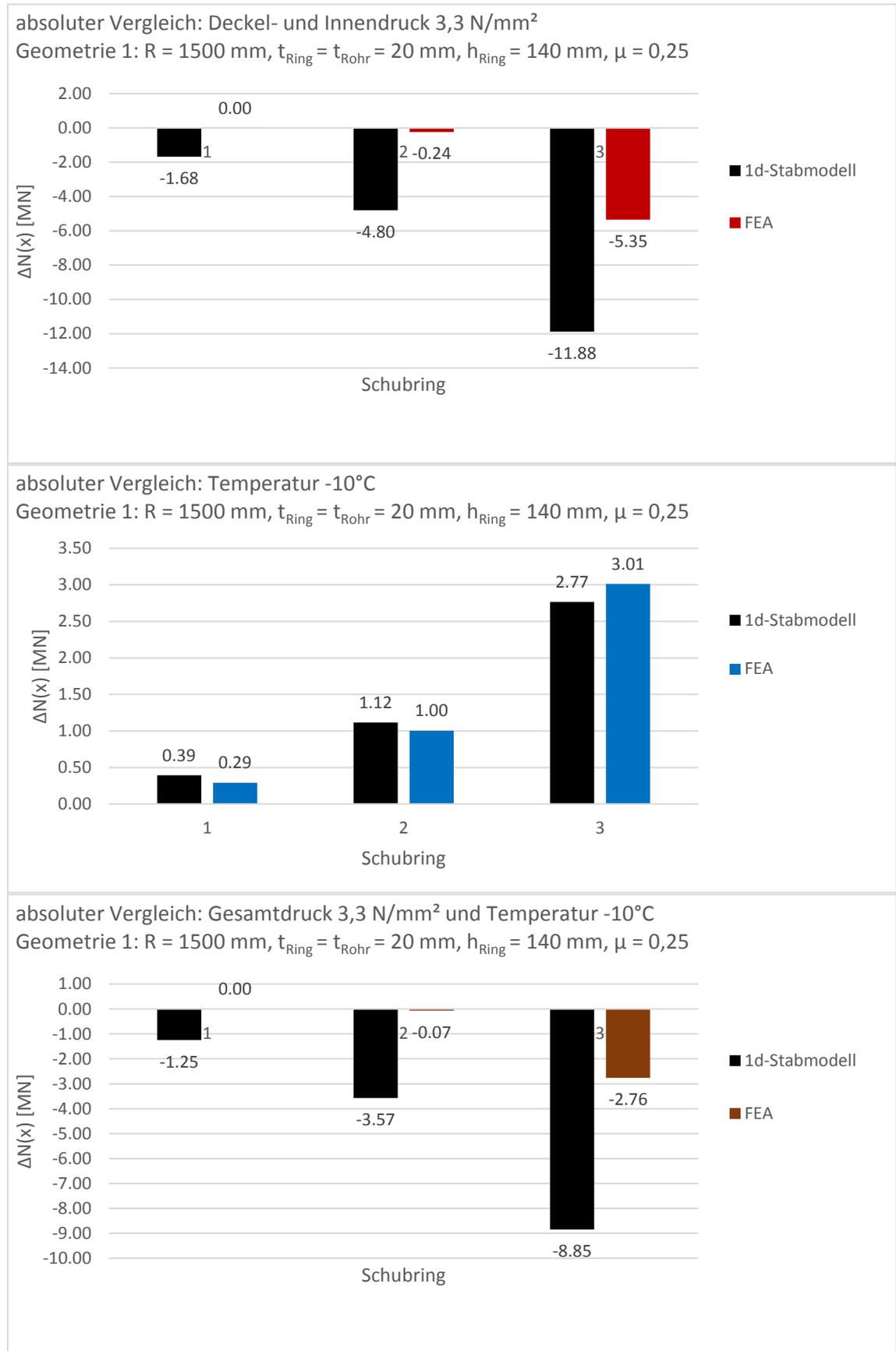


Abbildung 207 Geometrie 1, μ=0,25: absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Gesamtdruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2.1.6 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

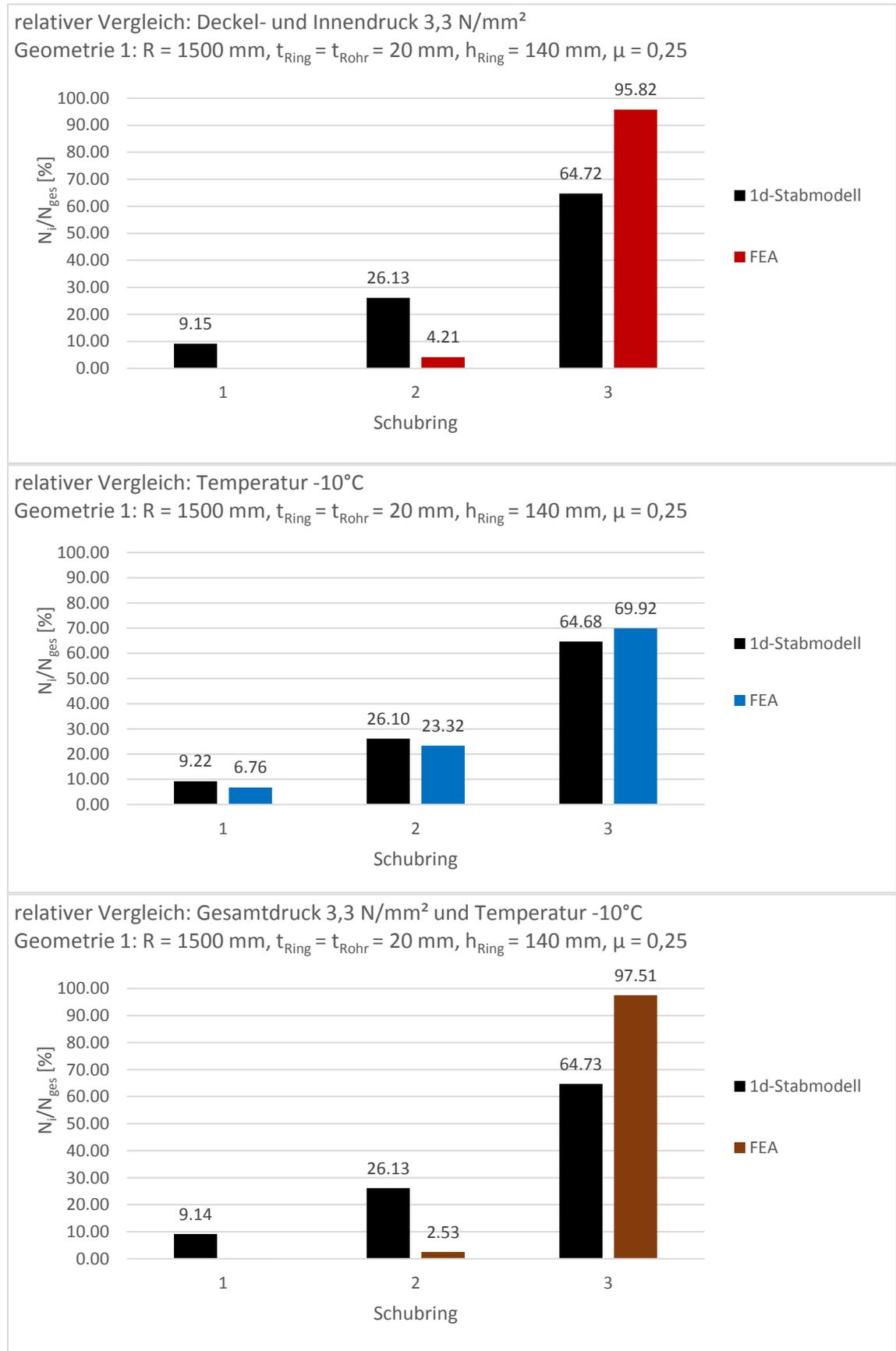


Abbildung 208 Geometrie 1, μ=0,25: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Gesamtdruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2.2 Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringering - Geometrie 2

2.2.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

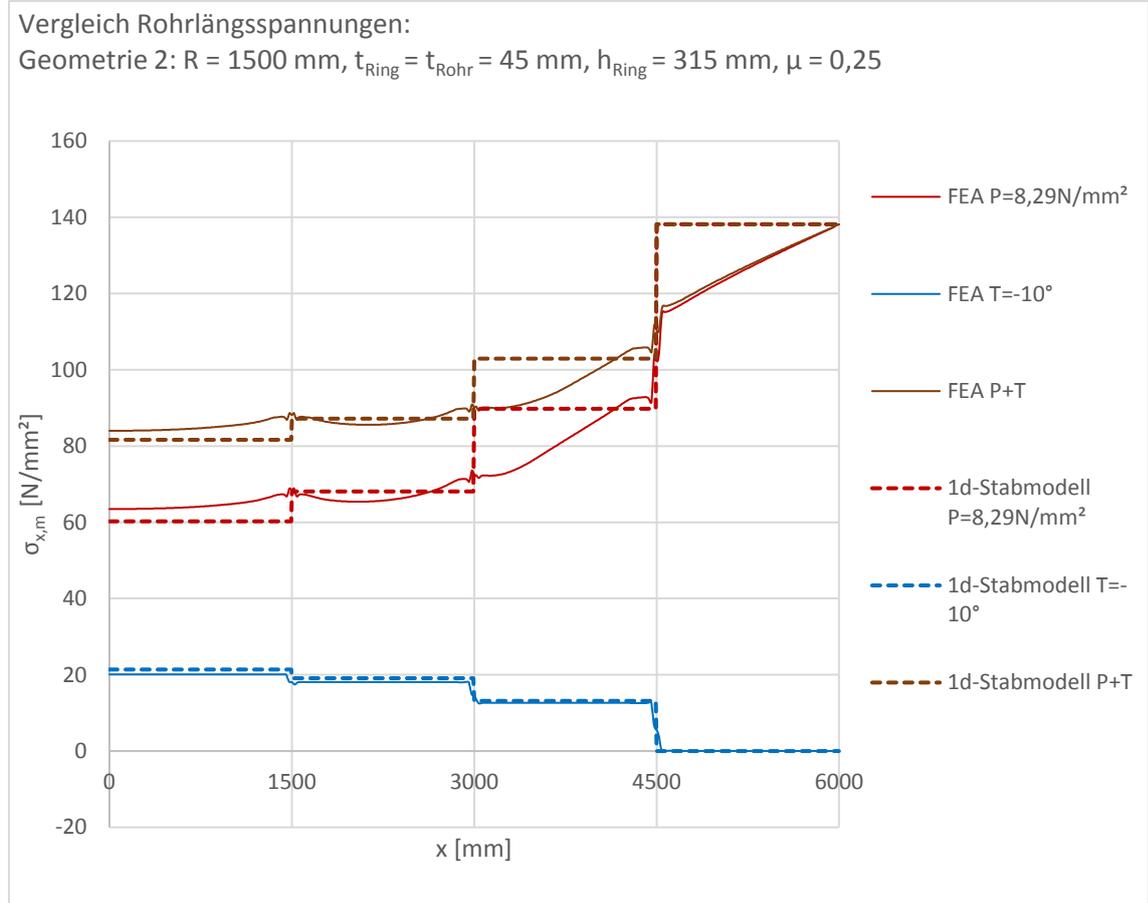


Abbildung 209 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Rohrlängsspannungen, Gesamtdruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

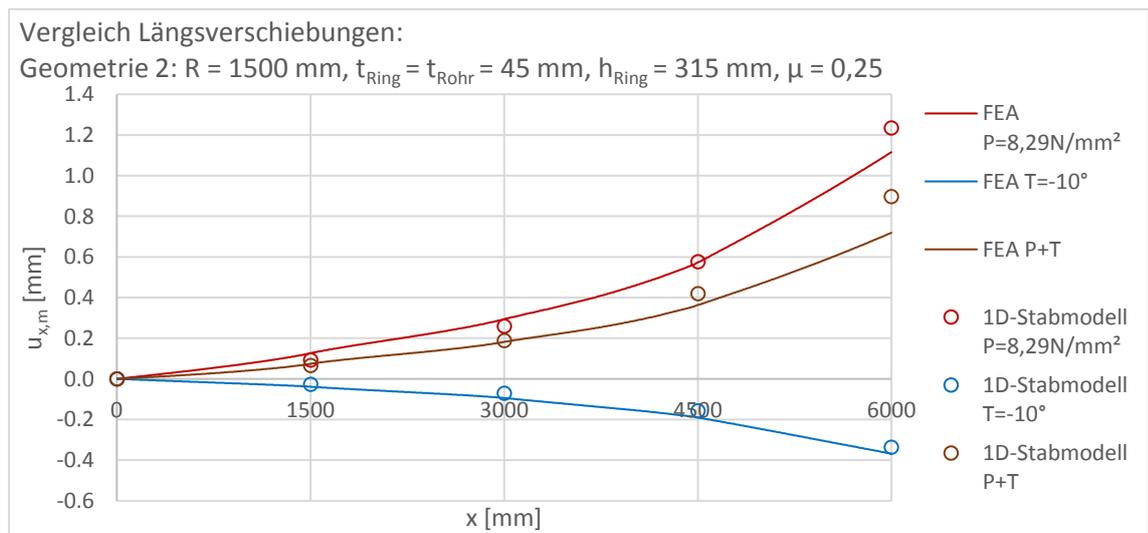


Abbildung 210 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Längsverschiebungen, Gesamtdruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Gesamtdruck und Abkühlung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtdruck FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtdruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
Auflager	0	26.92	25.56	-5.1%	8.53	9.07	6.3%
Stahlpanzerung 1	0-1400	-1.61	0.00		0.01	0.00	
Schubring 1	1400-1600	-0.02	-3.32	21115%	0.85	0.97	14%
Stahlpanzerung 2	1600-2900	-1.66	0.00		0.02	0.00	
Schubring 2	2900-3100	-0.43	-9.21	2056%	2.30	2.52	9.4%
Stahlpanzerung 3	3100-4400	-8.67	0.00		0.02	0.00	
Schubring 3	4400-4600	-9.58	-20.51	114%	5.41	5.58	3.1%
Stahlpanzerung 4	4600-6000	-9.28	0.00		-0.08	0.00	
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-10.03</b>	<b>-33.04</b>	<b>230%</b>	<b>8.57</b>	<b>9.07</b>	<b>5.9%</b>

Tabelle 36 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtdruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur -10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
Auflager	0	35.63	34.63	-2.8%	35.45	-0.48%
Stahlpanzerung 1	0-1400	-1.53	0.00		-1.61	5.2%
Schubring 1	1400-1600	-0.03	-2.35	7310%	0.83	-2725%
Stahlpanzerung 2	1600-2900	-0.88	0.00		-1.65	87%
Schubring 2	2900-3100	-0.15	-6.69	4487%	1.88	-1387%
Stahlpanzerung 3	3100-4400	-6.64	0.00		-8.65	30%
Schubring 3	4400-4600	-4.69	-14.93	218%	-4.17	-11%
Stahlpanzerung 4	4600-6000	-8.66	0.00		-9.36	8.1%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-4.87</b>	<b>-23.97</b>	<b>392%</b>	<b>-1.46</b>	<b>-70%</b>

Tabelle 37 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

Die gleichen Auswirkungen der Temperaturverringerung wie bei Geometrie 1 können auch für Geometrie 2 beobachtet werden.

2.2.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

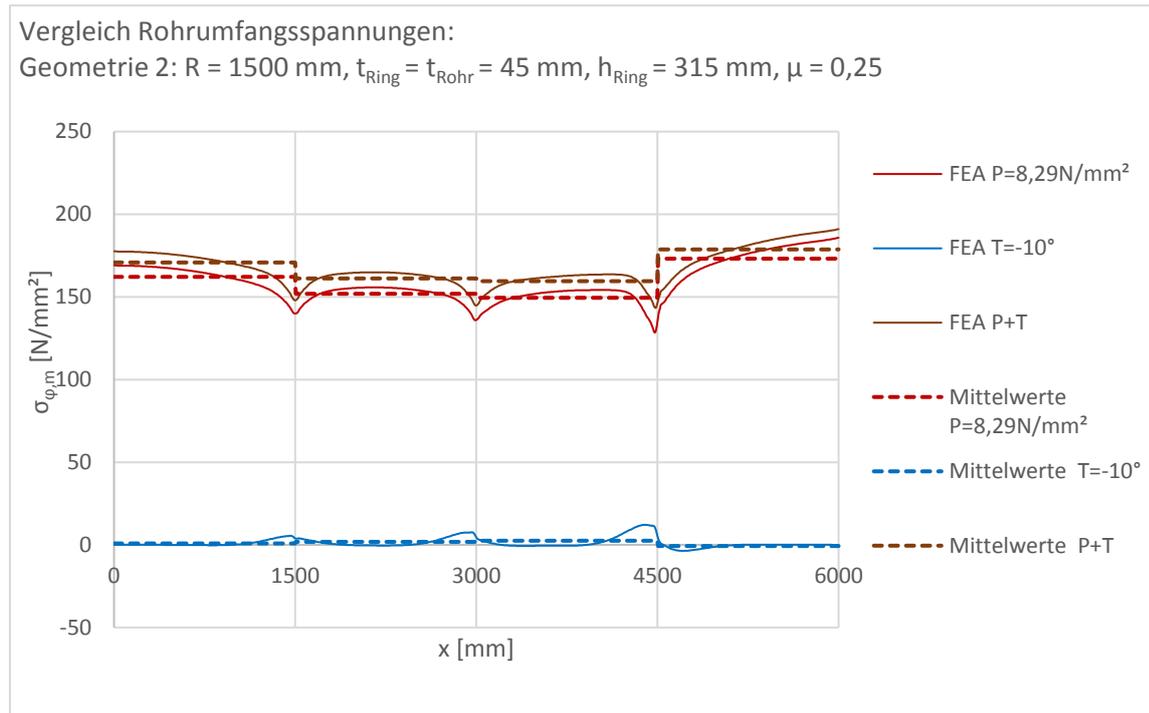


Abbildung 211 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Rohrumfangsspannungen, Gesamtdruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

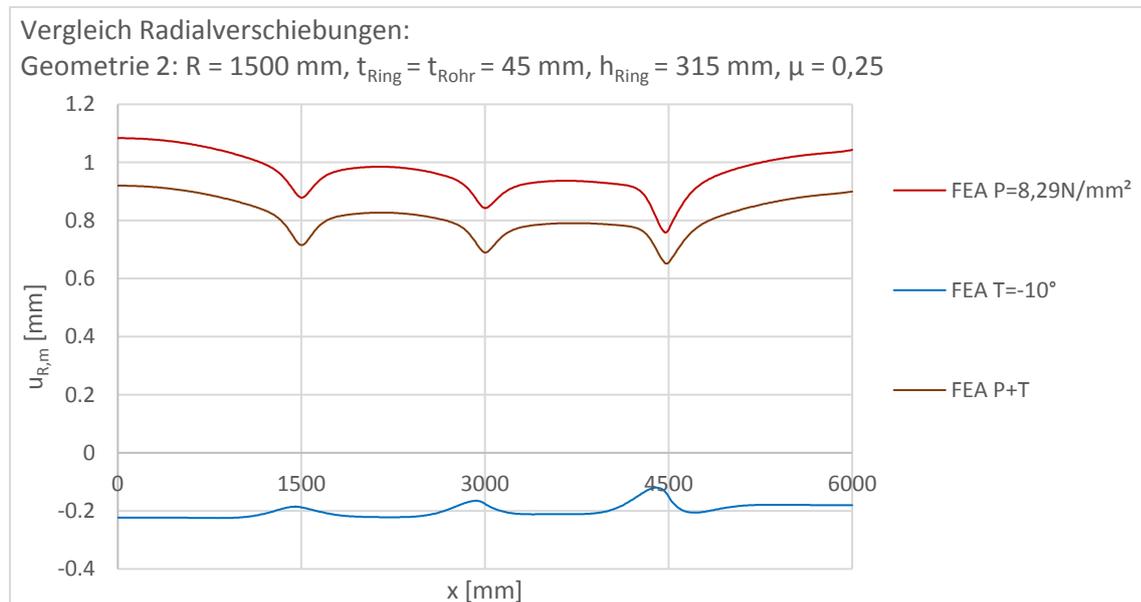


Abbildung 212 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Radialverschiebungen, Gesamtdruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

2.2.3 Analyse der Reibungswirkung

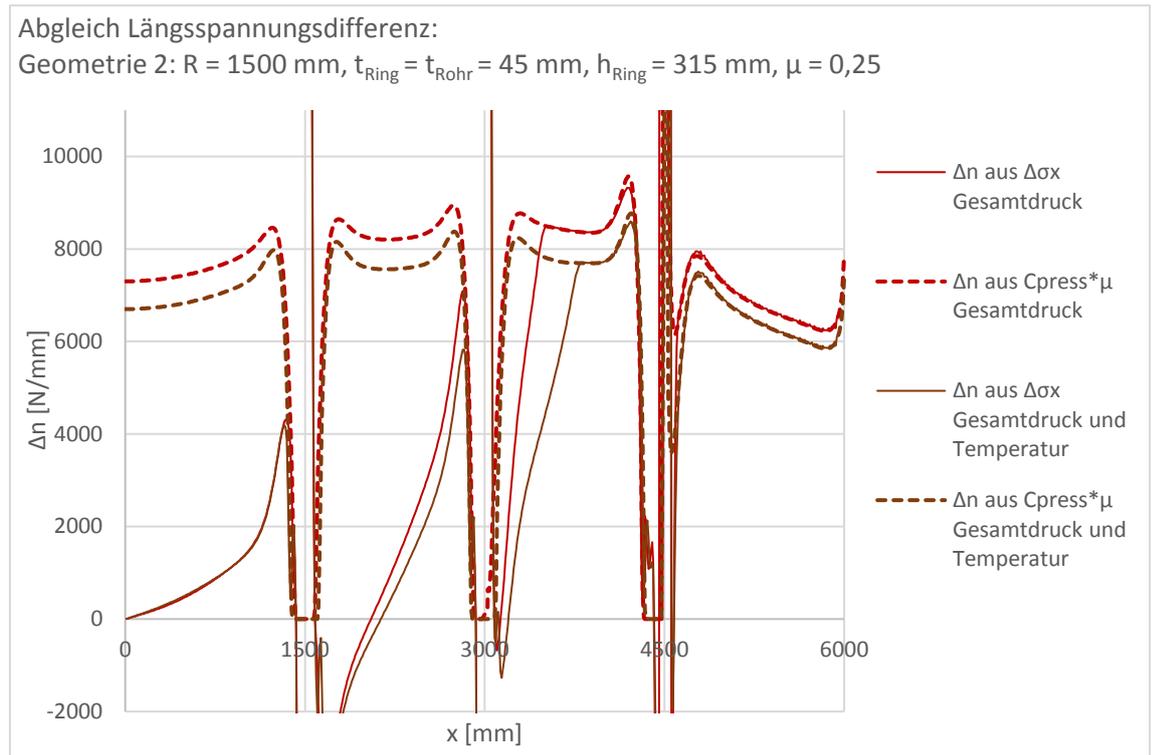


Abbildung 213 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Reibungswirkung, Gesamtdruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung

Die gleichen Auswirkungen der Temperaturverringering wie bei Geometrie 1 können auch für Geometrie 2 beobachtet werden.

2.2.4 Verformungsplots

2.2.4.1 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck

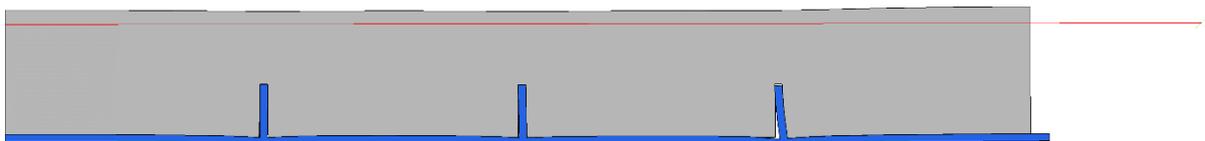


Abbildung 214 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht: Deckel- und Innendruck

2.2.4.2 Verformungsplot - Temperatur

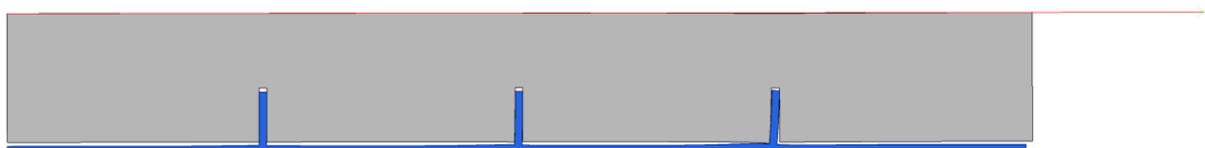


Abbildung 215 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht: Temperatur

2.2.4.3 Verformungsplot - Gesamtdruck und Temperatur



Abbildung 216 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht: Gesamtdruck und Temperatur

---

2.2.4.4 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck, Detail Schubring 3

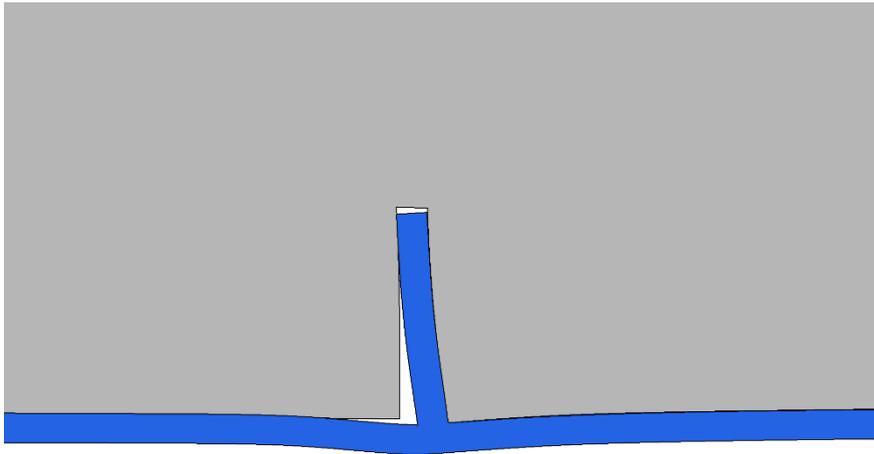


Abbildung 217 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Deckel- und Innendruck

---

2.2.4.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

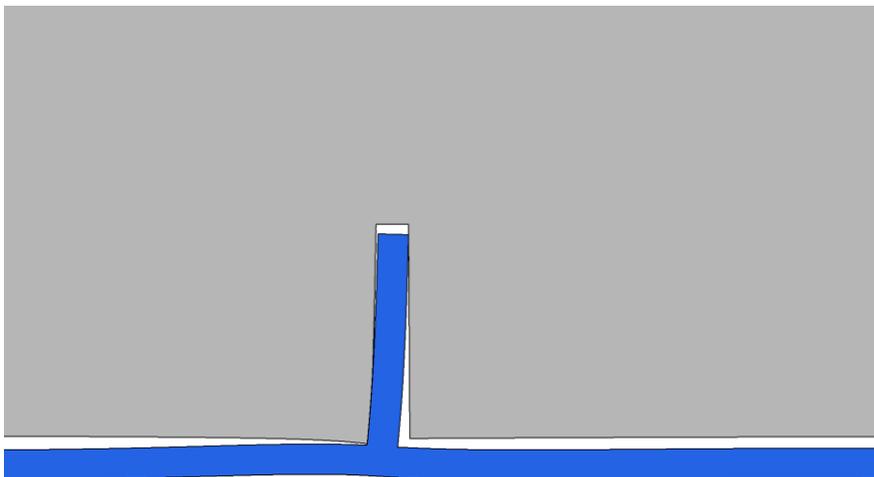


Abbildung 218 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

---

2.2.4.6 Verformungsplot - Gesamtdruck und Temperatur, Detail Schubring 3

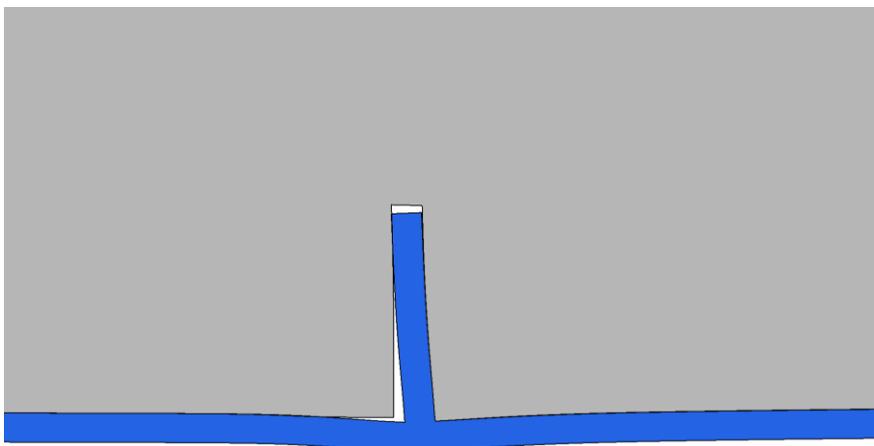


Abbildung 219 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Gesamtdruck und Temperatur

2.2.5 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

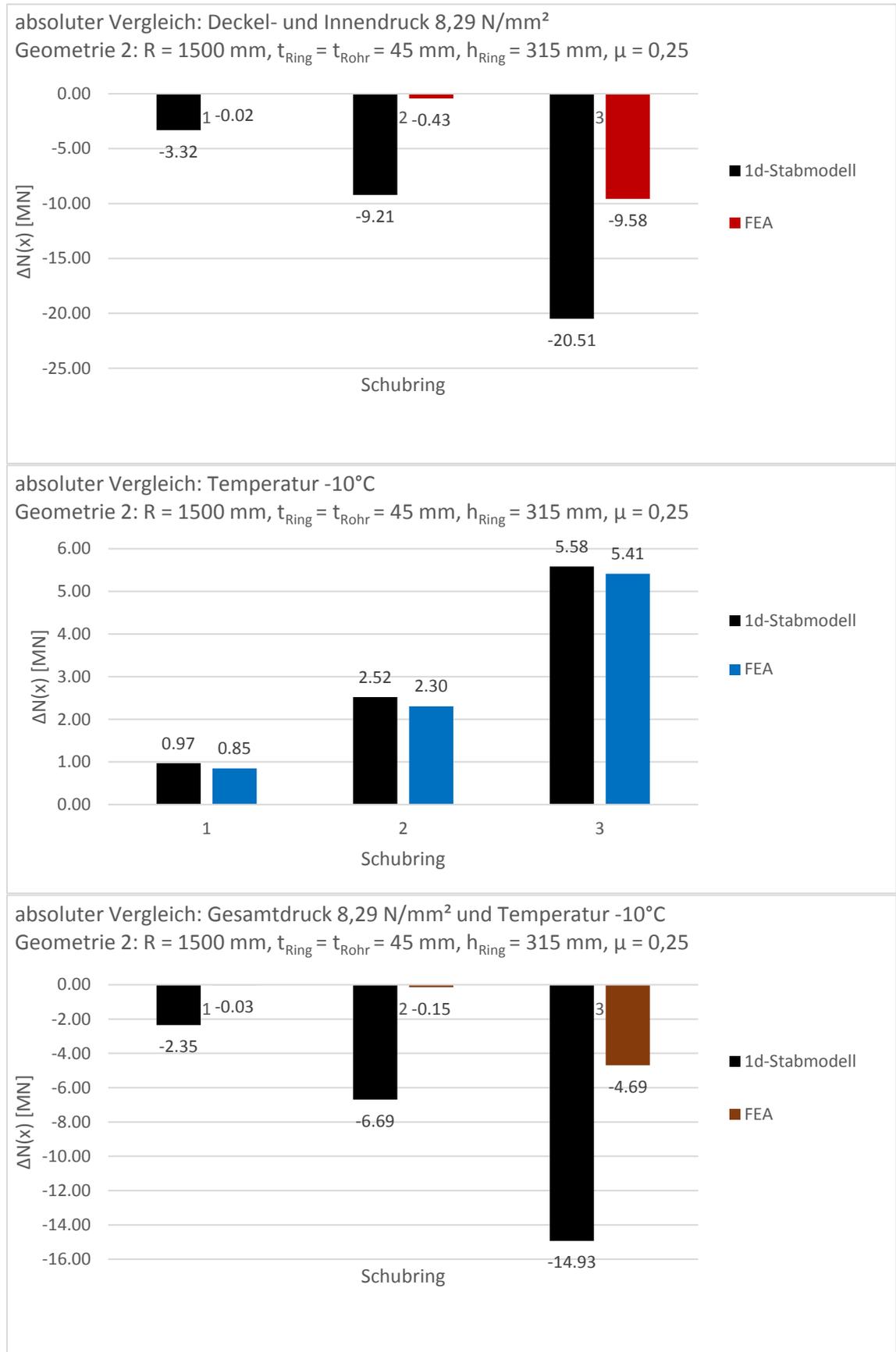


Abbildung 220 Geometrie 2, μ=0,25: absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Gesamtdruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2.2.6 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

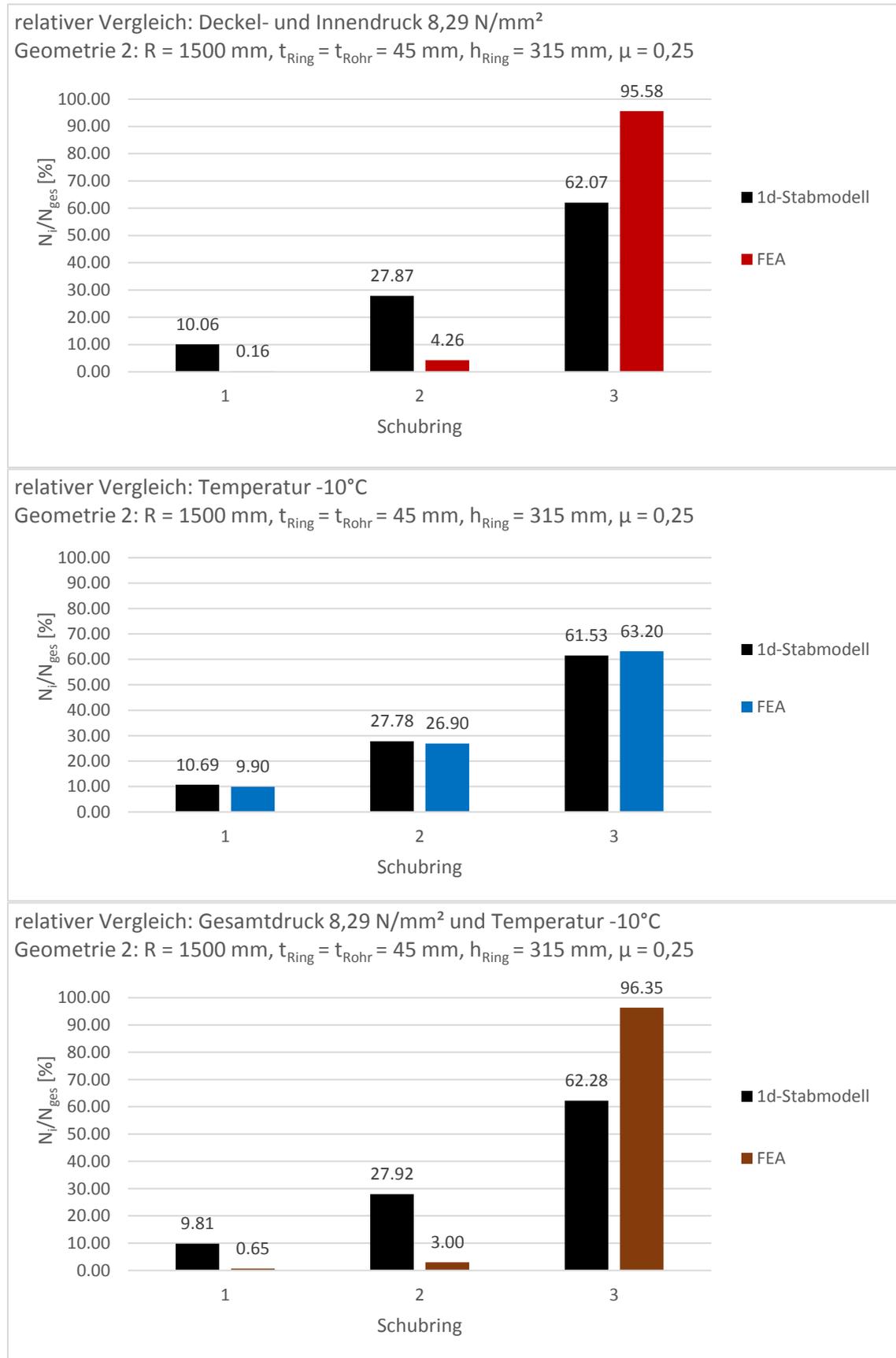


Abbildung 221 Geometrie 2, μ=0,25: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Gesamtdruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2.3 Lastfallüberlagerung Innendruck, Deckeldruck und Temperaturverringering - Geometrie 3

2.3.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

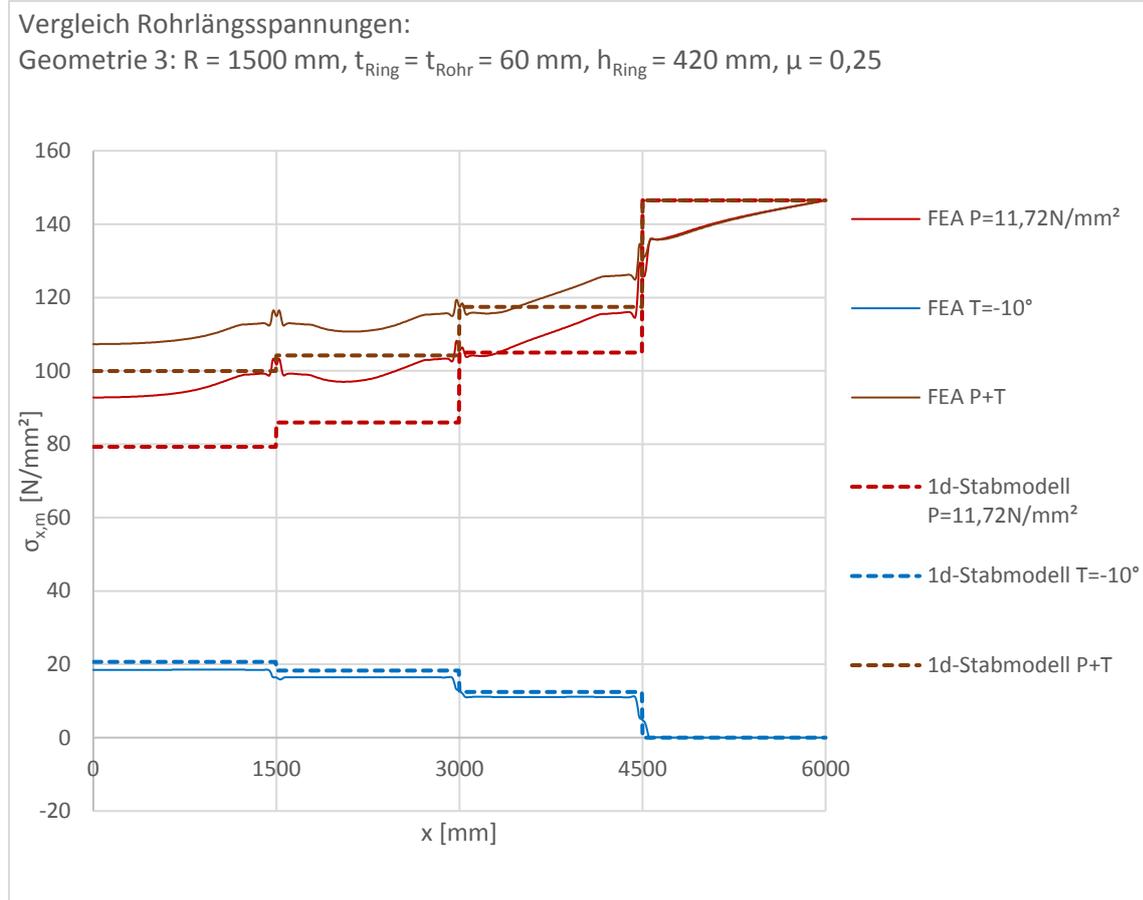


Abbildung 222 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Rohrlängsspannungen, Gesamtdruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

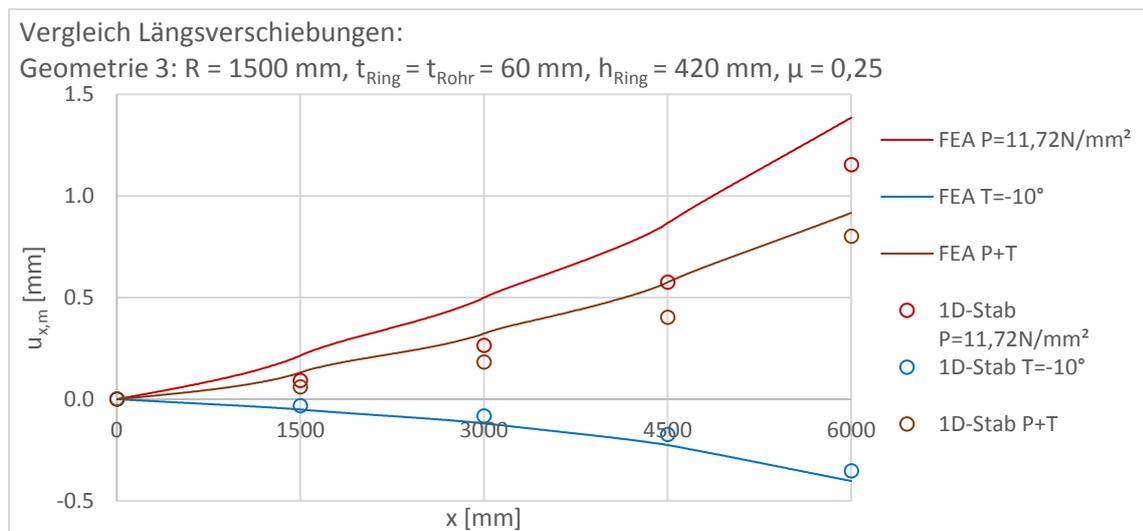


Abbildung 223 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Längsverschiebungen, Gesamtdruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Gesamtdruck und Abkühlung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtdruck FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtdruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
Auflager	0	52.45	44.84	-15%	10.47	11.68	12%
Stahlpanzerung 1	0-1300	-3.57	0.00		0.00	0.00	
Schubring 1	1300-1700	0.00	-3.75	>>	1.15	1.32	15%
Stahlpanzerung 2	1700-2800	-2.32	0.00		0.02	0.00	
Schubring 2	2800-3200	-0.48	-10.79	2152%	3.01	3.32	10%
Stahlpanzerung 3	3200-4300	-6.65	0.00		0.04	0.00	
Schubring 3	4300-4700	-11.62	-23.47	102%	6.22	7.04	13%
Stahlpanzerung 4	4700-6000	-5.77	0.00		0.03	0.00	-100%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-12.09</b>	<b>-38.00</b>	<b>214%</b>	<b>10.38</b>	<b>11.68</b>	<b>13%</b>

Tabelle 38 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtdruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur -10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
Auflager	0	60.67	56.52	-6.8%	62.92	3.7%
Stahlpanzerung 1	0-1300	-3.10	0.00		-3.57	15%
Schubring 1	1300-1700	0.01	-2.43	>>	1.15	>>
Stahlpanzerung 2	1700-2800	-1.54	0.00		-2.30	50%
Schubring 2	2800-3200	-0.11	-7.46	6668%	2.53	-2398%
Stahlpanzerung 3	3200-4300	-5.81	0.00		-6.61	14%
Schubring 3	4300-4700	-5.69	-16.43	189%	-5.40	-5.2%
Stahlpanzerung 4	4700-6000	-5.92	0.00		-5.74	-3.1%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-5.80</b>	<b>-26.32</b>	<b>354%</b>	<b>-1.71</b>	<b>-70%</b>

Tabelle 39 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

Die gleichen Auswirkungen der Temperaturverringernung wie bei Geometrie 1 können auch für Geometrie 3 beobachtet werden.

2.3.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

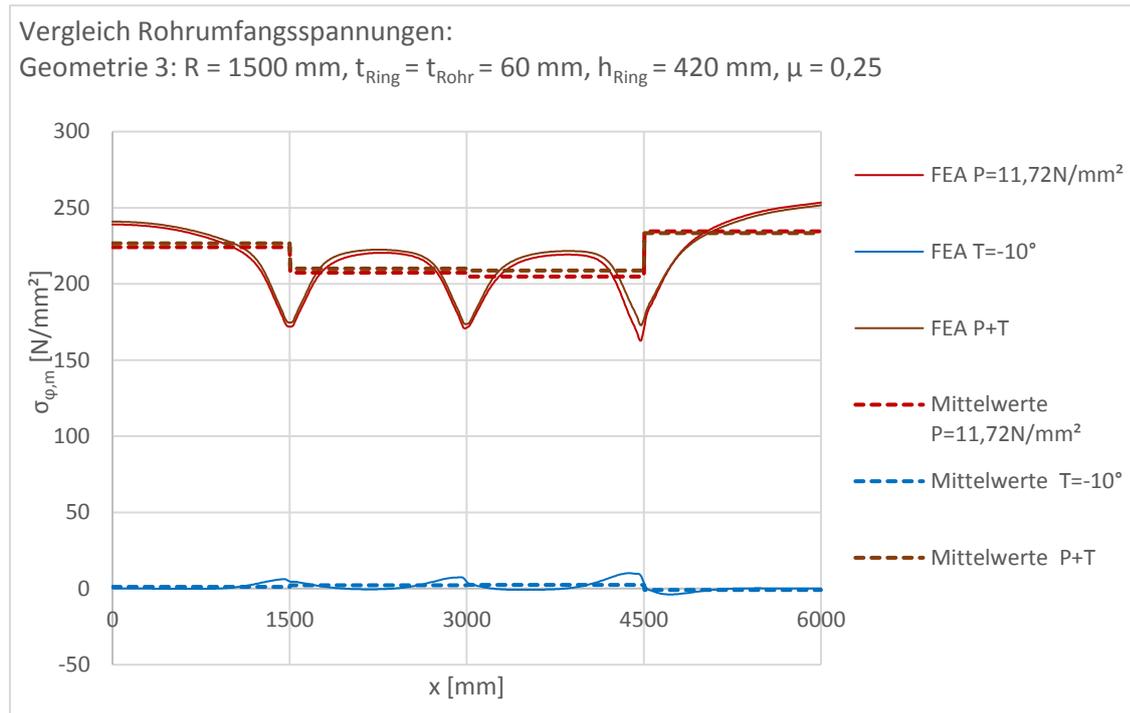


Abbildung 224 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Rohrumfangsspannungen, Gesamtdruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

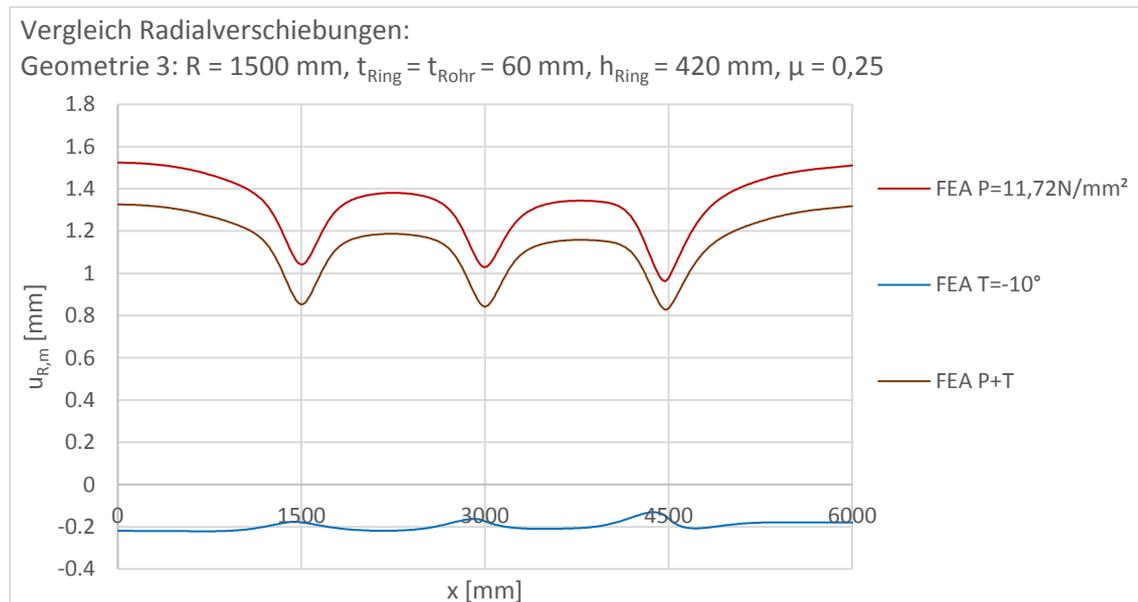


Abbildung 225 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Radialverschiebungen, Gesamtdruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

Die gleichen Auswirkungen der Temperaturverringernung wie bei Geometrie 1 können auch für Geometrie 3 beobachtet werden.

2.3.3 Analyse der Reibungswirkung

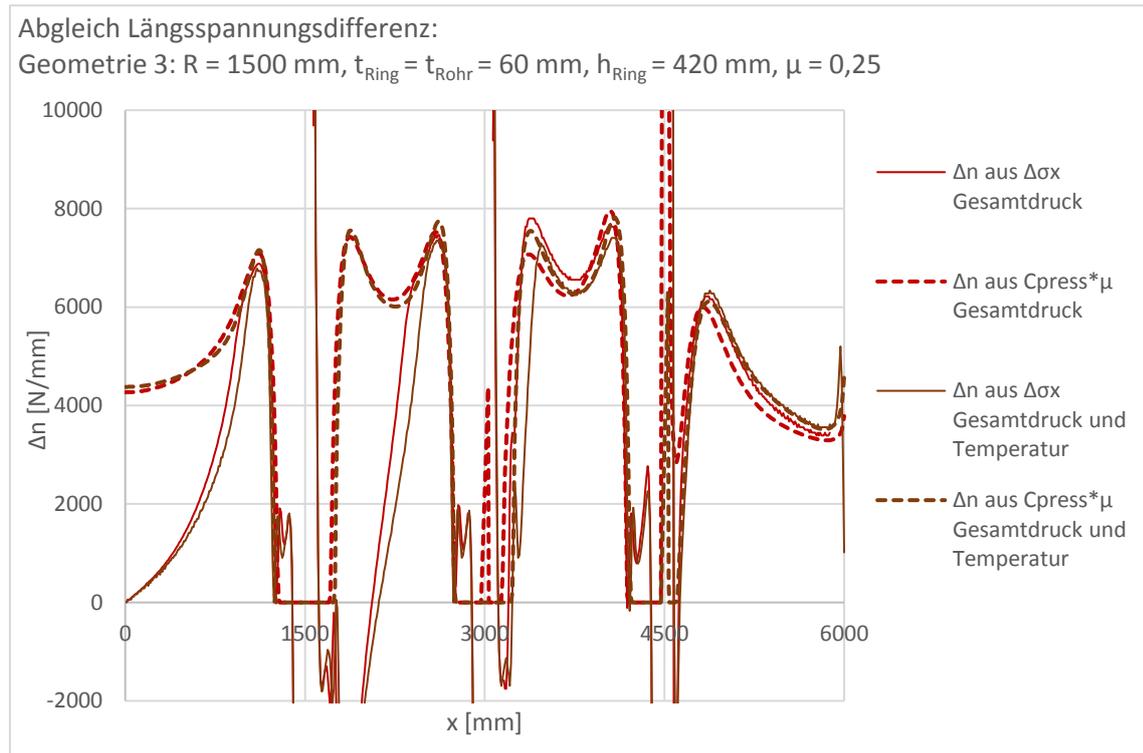


Abbildung 226 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Reibungswirkung, Gesamtdruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung

Die gleichen Auswirkungen der Temperaturverringering wie bei Geometrie 1 können auch für Geometrie 3 beobachtet werden.

2.3.4 Verformungsplots

2.3.4.1 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck

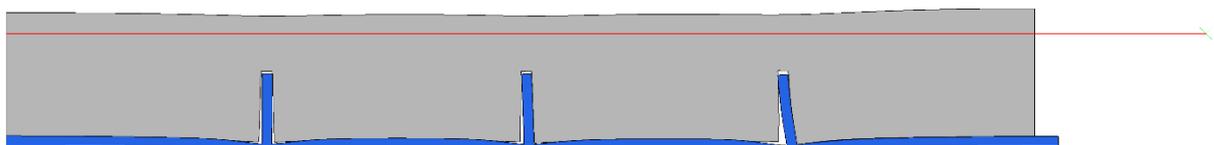


Abbildung 227 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht: Deckel- und Innendruck

2.3.4.2 Verformungsplot - Temperatur

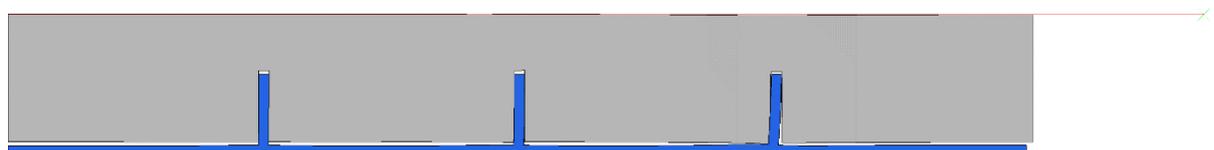


Abbildung 228 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht: Temperatur

2.3.4.3 Verformungsplot - Gesamtdruck und Temperatur

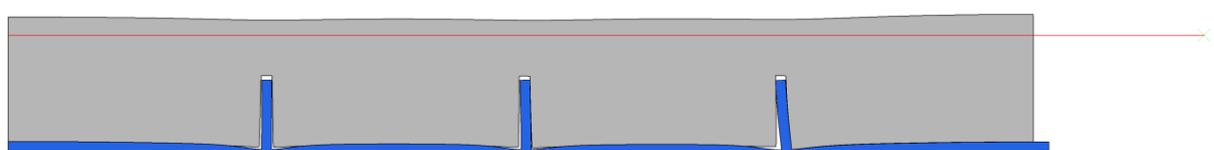


Abbildung 229 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht: Gesamtdruck und Temperatur

---

2.3.4.4 Verformungsplot - Deckel- und Innendruck, Detail Schubring 3

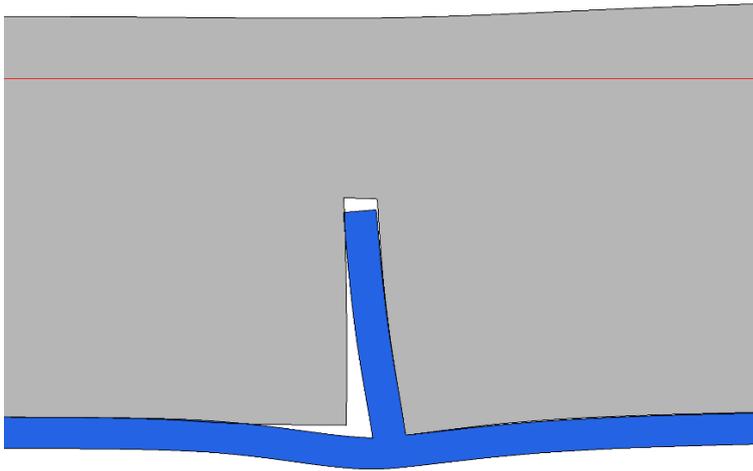


Abbildung 230 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Deckel- und Innendruck

---

2.3.4.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

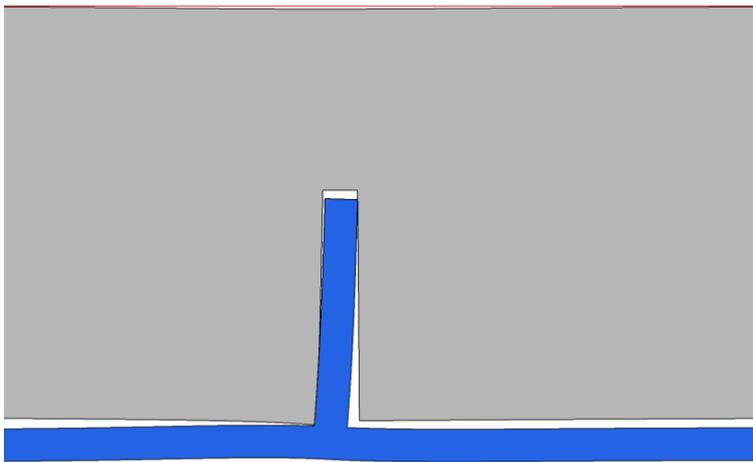


Abbildung 231 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

---

2.3.4.6 Verformungsplot - Gesamtdruck und Temperatur, Detail Schubring 3

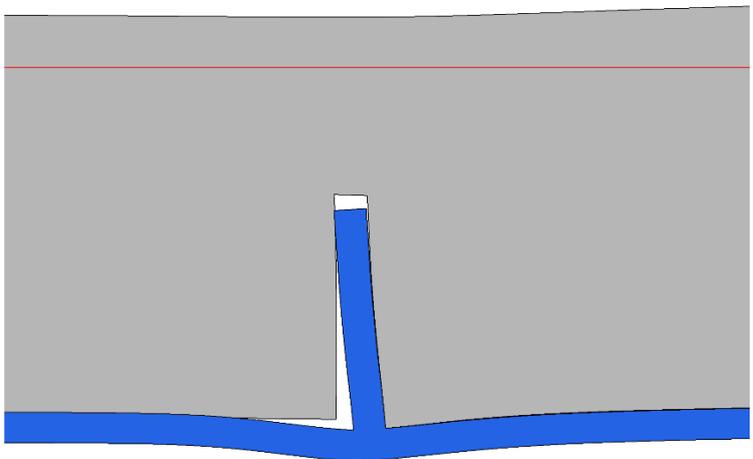


Abbildung 232 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Gesamtdruck und Temperatur

2.3.5 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

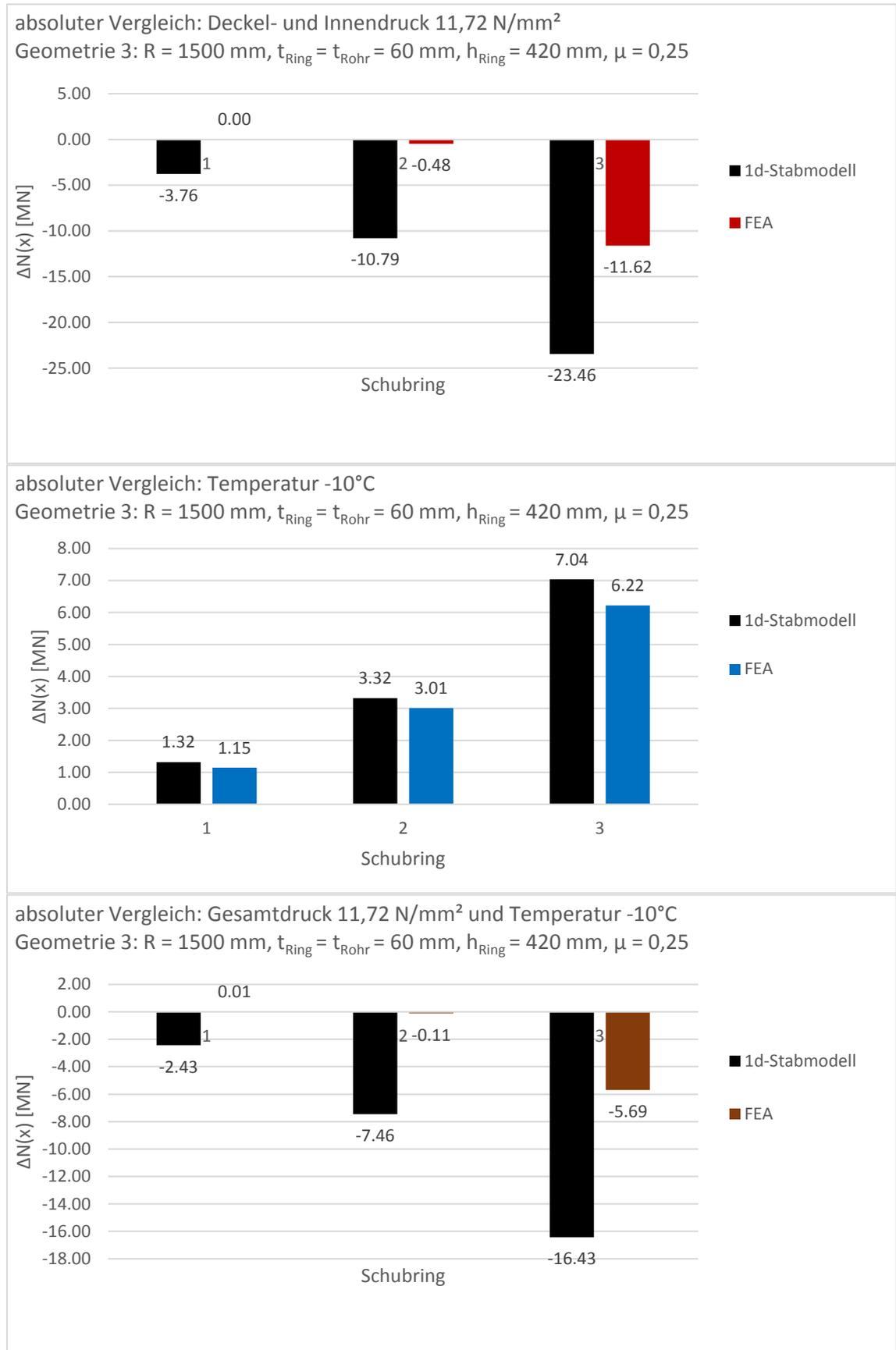


Abbildung 233 Geometrie 3, μ=0,25: absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Gesamtdruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2.3.6 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

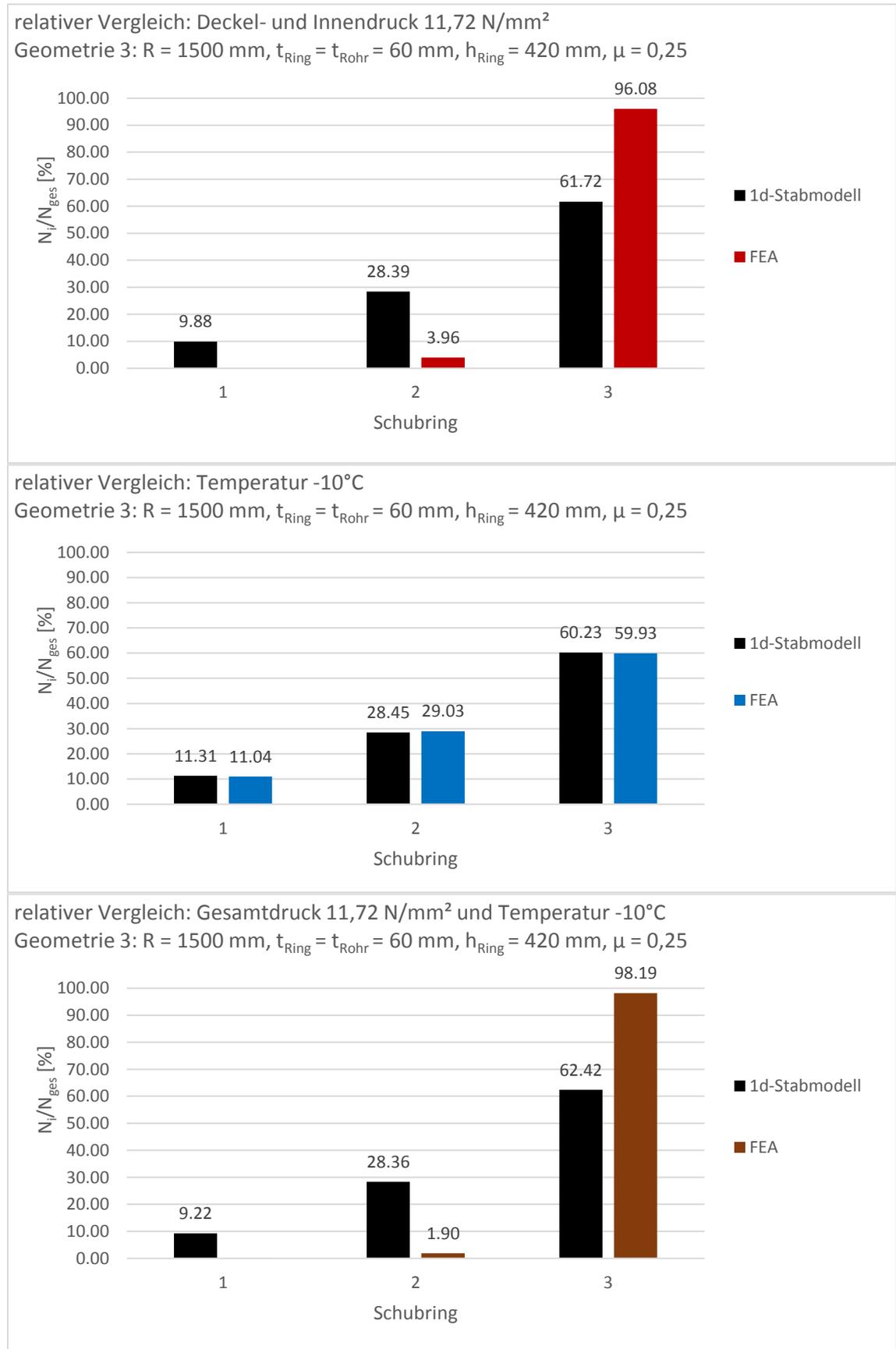


Abbildung 234 Geometrie 3, μ=0: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Gesamtdruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung



# ANHANG 2

Die in diesem Anhang präsentierten Modelle – die FEA und das 1D-Stabmodell – werden dabei anhand folgender Lastfälle und deren Zusammenwirkung verglichen:

- Innendruck  $p_{\text{innen}}$  laut Tabelle 14 in Kapitel 4.1.1 der Masterarbeit
- Temperatur  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$

Die drei Geometrien, laut Tabelle 1 in Kapitel 1.3 der Masterarbeit, werden in diesem Anhang ohne Reibung  $\mu = 0$  in Kapitel 1 und mit Reibung  $\mu = 0,25$  in Kapitel 2 dargestellt. Die Vorgehensweise ist dabei gleich wie bei der Zusammenwirkung von Innendruck und Deckeldruck in der Masterarbeit in Kapitel 4 und Kapitel 5 und wird im Anhang nicht mehr erläutert.

## 1 Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringering ohne Reibung

### 1.1 Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringering - Geometrie 1

#### 1.1.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

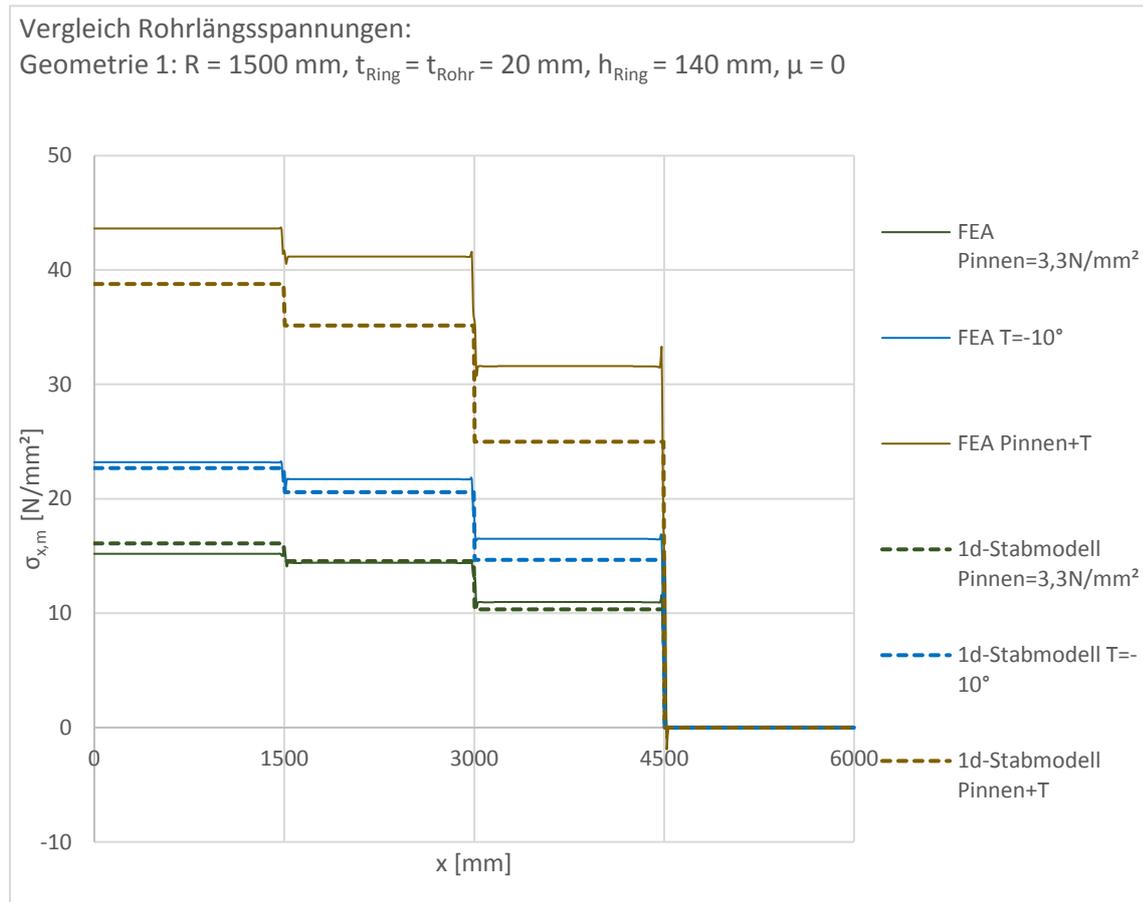


Abbildung 235 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Rohrlängsspannungen, Innendruck  $3,3 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Innendruck und Abkühlung

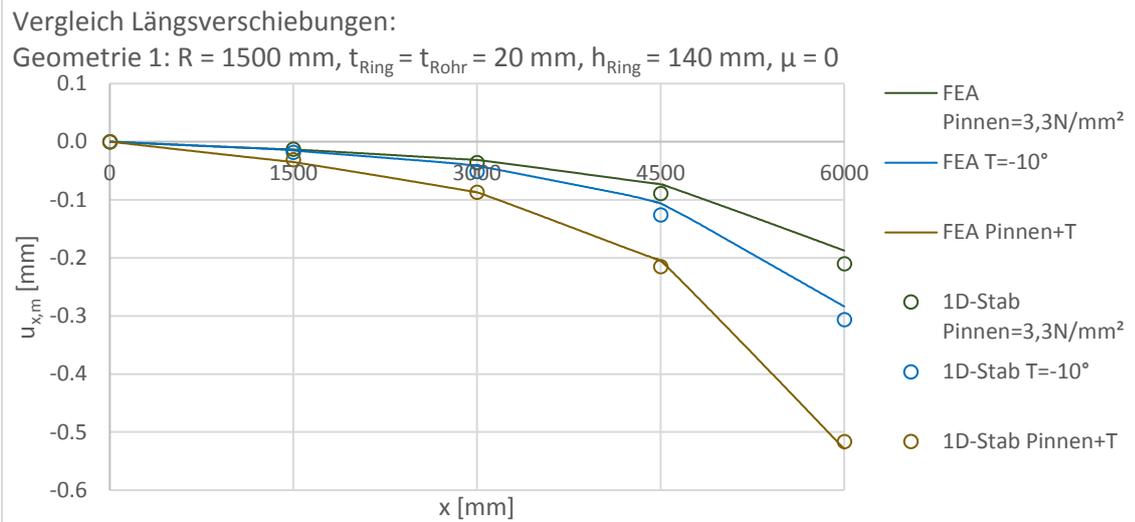


Abbildung 236 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Längsverschiebungen, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	2.87	3.03	5.9%	4.37	4.28	-2.2%
<b>Schubring 1</b>	1445-1555	0.15	0.29	93%	0.28	0.39	43%
<b>Schubring 2</b>	2945-3055	0.65	0.80	23%	0.98	1.12	14%
<b>Schubring 3</b>	4445-4555	2.06	1.95	-5.7%	3.09	2.77	-11%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>2.86</b>	<b>3.03</b>	<b>6.0%</b>	<b>4.35</b>	<b>4.28</b>	<b>-1.7%</b>

Tabelle 40 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur -10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
<b>Auflager</b>	0	8.22	7.31	-11%	7.24	-12%
<b>Schubring 1</b>	1445-1555	0.46	0.69	48%	0.43	-7.5%
<b>Schubring 2</b>	2945-3055	1.80	1.91	6.1%	1.62	-9.9%
<b>Schubring 3</b>	4445-4555	5.95	4.71	-21%	5.16	-13%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>8.21</b>	<b>7.31</b>	<b>-11%</b>	<b>7.21</b>	<b>-12%</b>

Tabelle 41 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

1.1.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

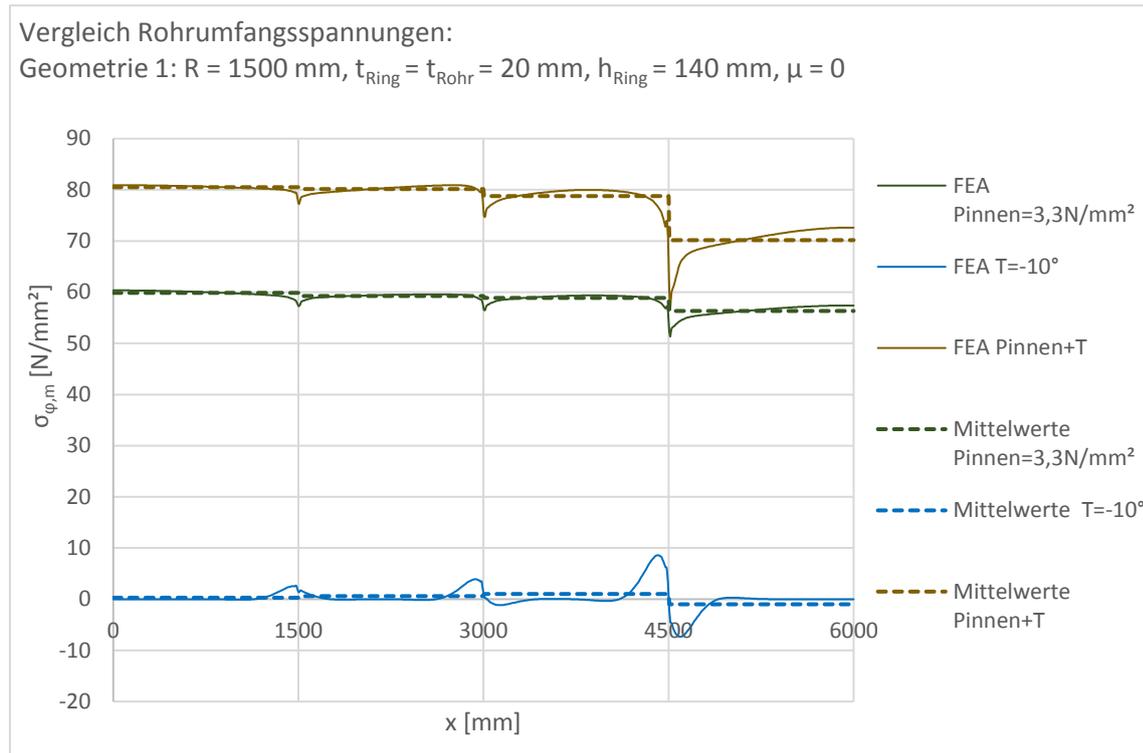


Abbildung 237 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Rohrumfangsspannungen, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

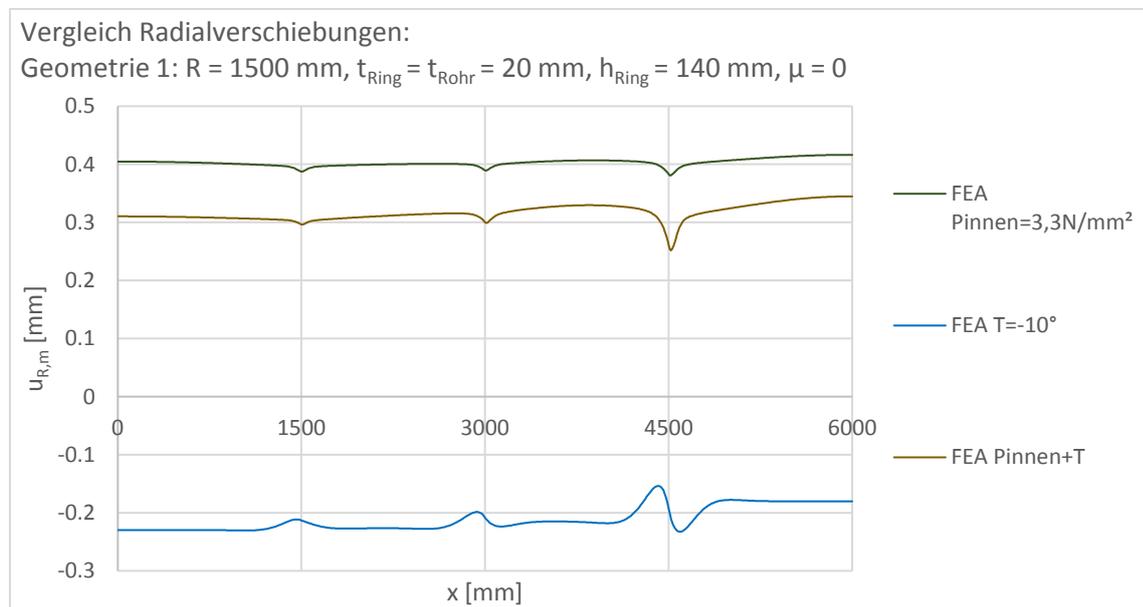


Abbildung 238 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Radialverschiebungen, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

## 1.1.3 Verformungsplots

### 1.1.3.1 Verformungsplot - Innendruck

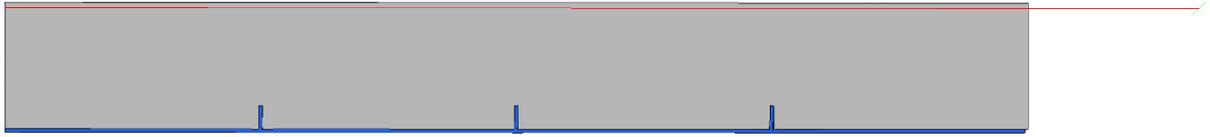


Abbildung 239 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck

### 1.1.3.2 Verformungsplot - Temperatur



Abbildung 240 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur

### 1.1.3.3 Verformungsplot - Innendruck und Temperatur

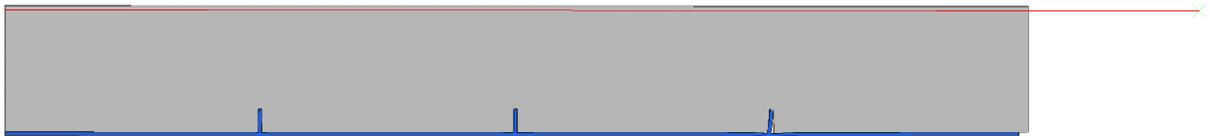


Abbildung 241 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck und Temperatur

---

1.1.3.4 Verformungsplot - Innendruck, Detail Schubring 3

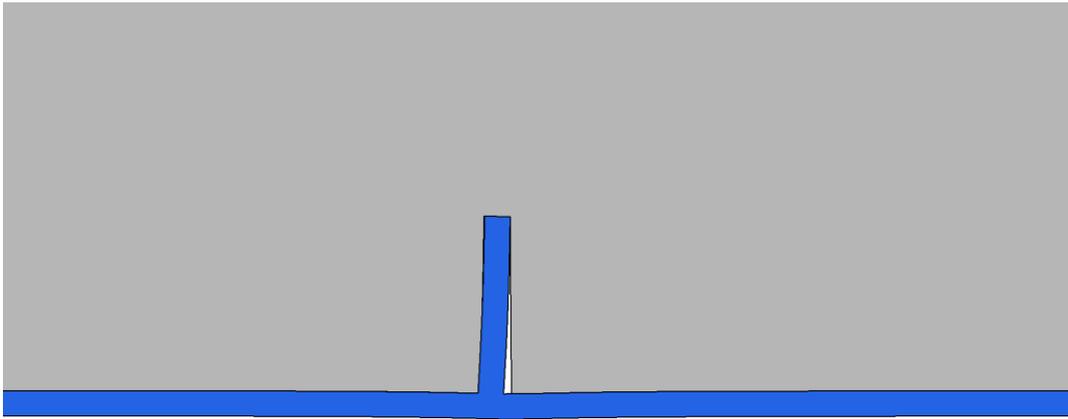


Abbildung 242 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Innendruck

---

1.1.3.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

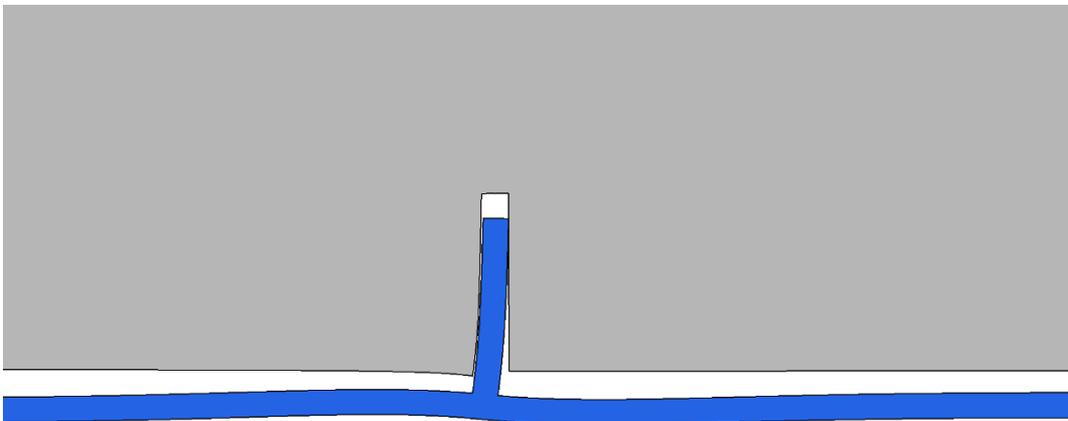


Abbildung 243 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

---

1.1.3.6 Verformungsplot - Innendruck und Temperatur, Detail Schubring 3

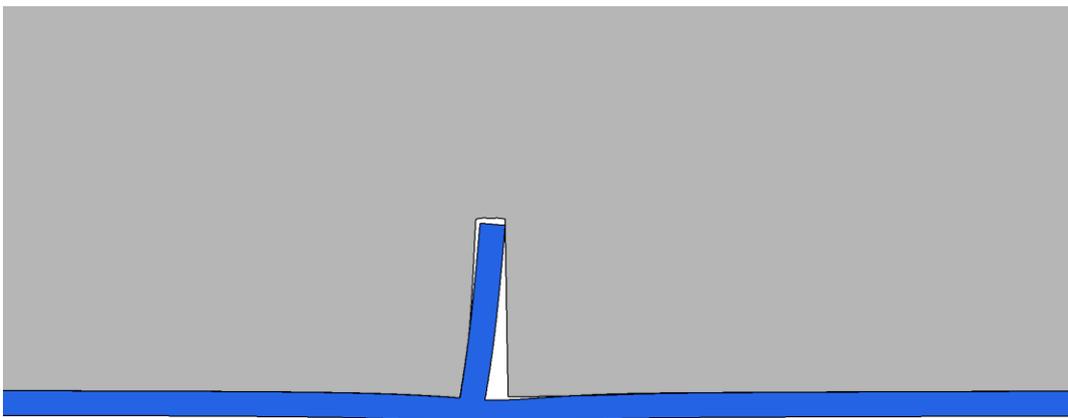


Abbildung 244 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Überlagerung: Innendruck und Temperatur

1.1.4 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

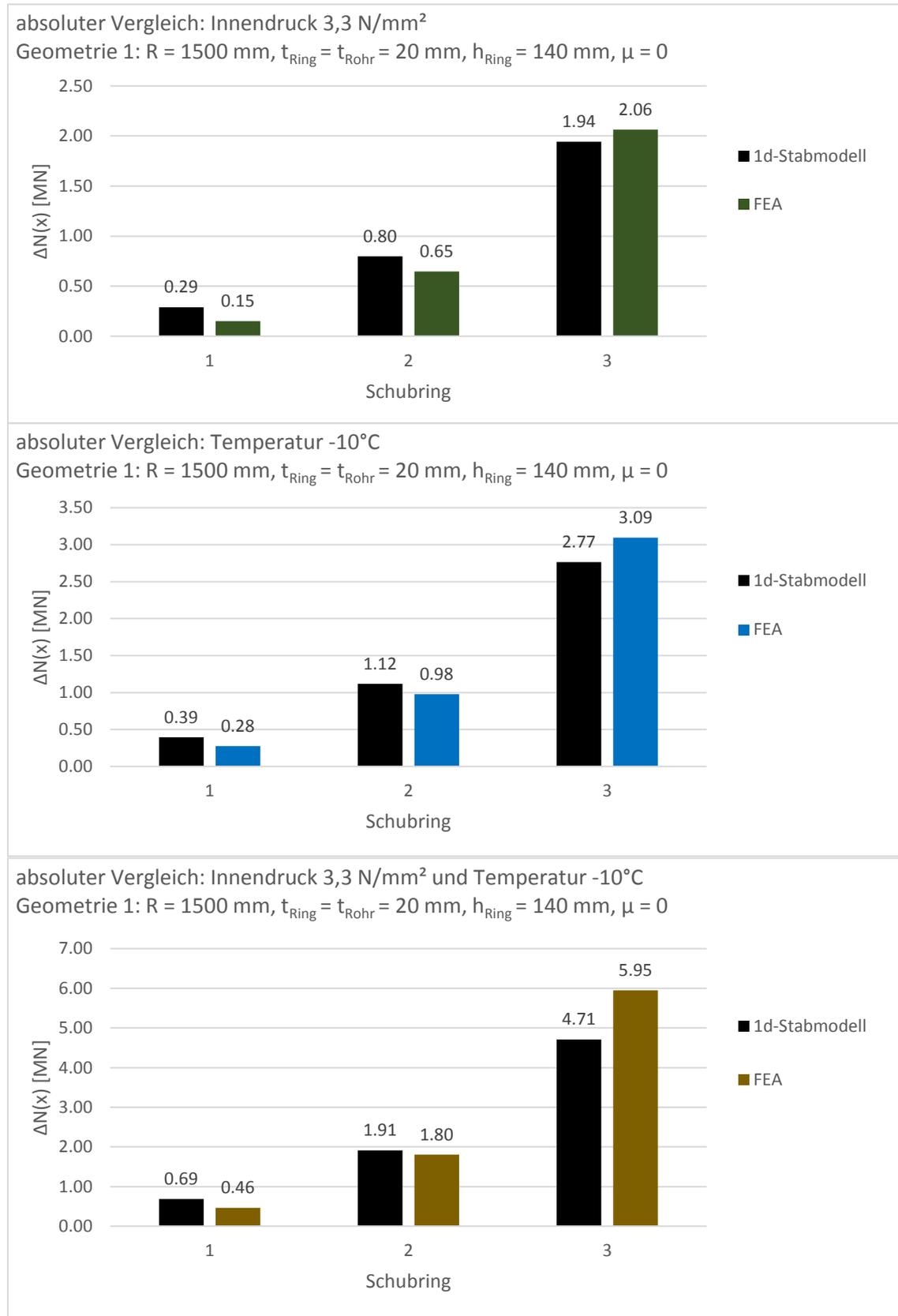


Abbildung 245 Geometrie 1, μ=0: absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

1.1.5 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

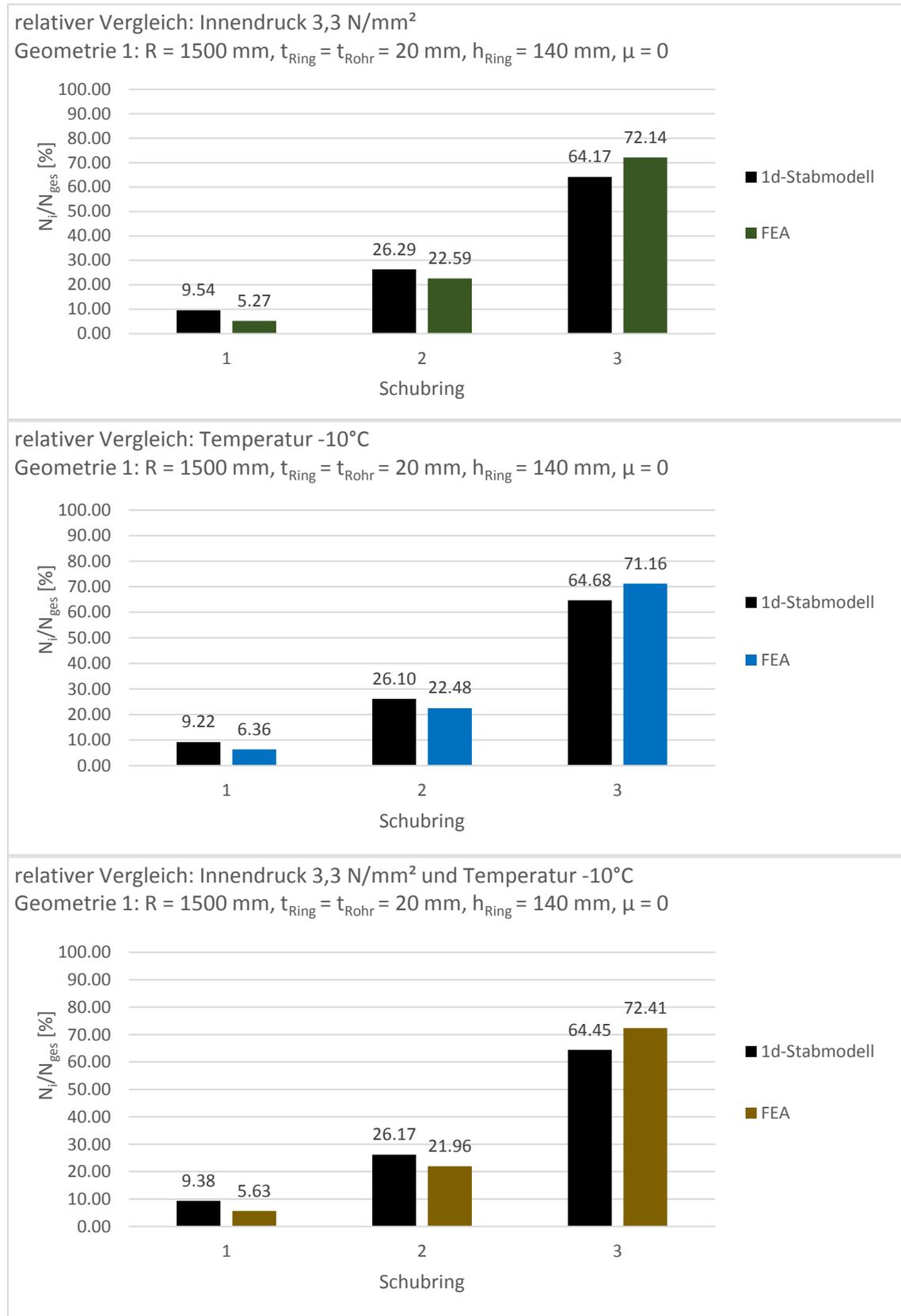


Abbildung 246 Geometrie 1, μ=0: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

1.2 Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringderung - Geometrie 2

1.2.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

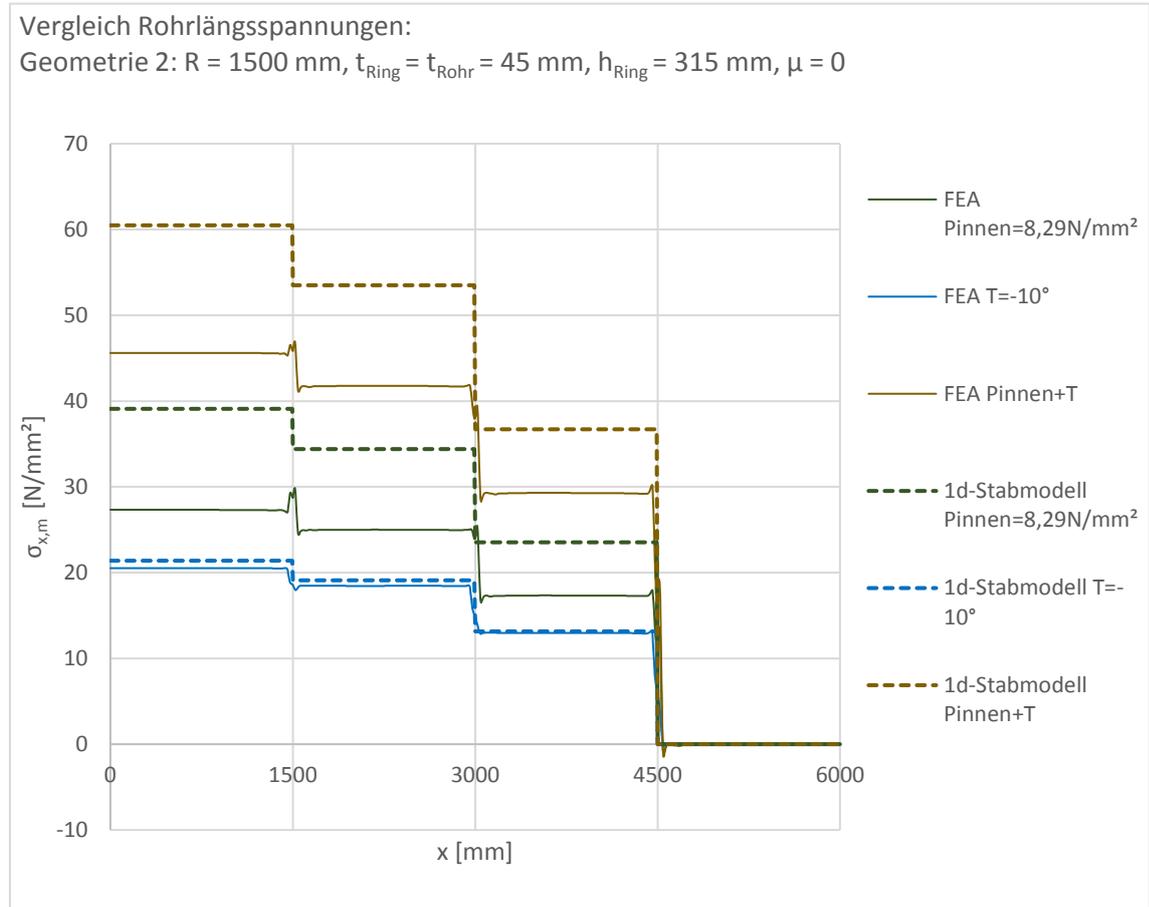


Abbildung 247 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Rohrlängsspannungen, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

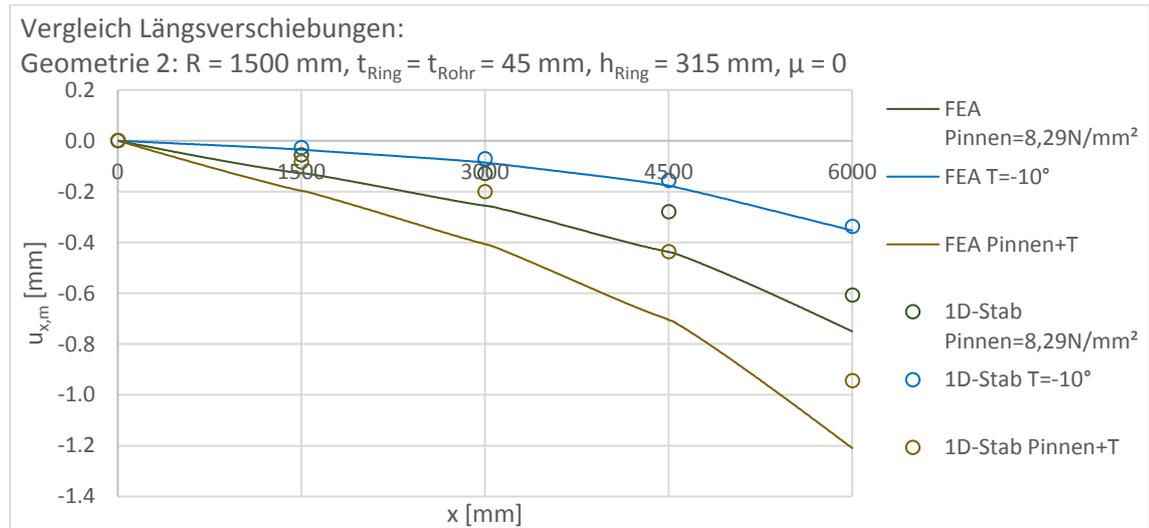


Abbildung 248 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Längsverschiebungen, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Innendruck und Abkühlung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	11.58	16.58	43%	8.70	9.07	4.3%
<b>Schubring 1</b>	1400-1600	0.99	1.99	100%	0.86	0.97	12%
<b>Schubring 2</b>	2900-3100	3.32	4.61	39%	2.31	2.52	8.9%
<b>Schubring 3</b>	4400-4600	7.70	9.98	30%	5.55	5.58	0.58%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>12.01</b>	<b>16.58</b>	<b>38%</b>	<b>8.73</b>	<b>9.07</b>	<b>4.0%</b>

Tabelle 42 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur -10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
<b>Auflager</b>	0	19.35	25.65	33%	20.28	4.8%
<b>Schubring 1</b>	1400-1600	1.60	2.96	85%	1.85	16%
<b>Schubring 2</b>	2900-3100	5.36	7.13	33%	5.64	5.1%
<b>Schubring 3</b>	4400-4600	12.86	15.56	21%	13.25	3.0%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>19.82</b>	<b>25.65</b>	<b>29%</b>	<b>20.74</b>	<b>4.6%</b>

Tabelle 43 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

1.2.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

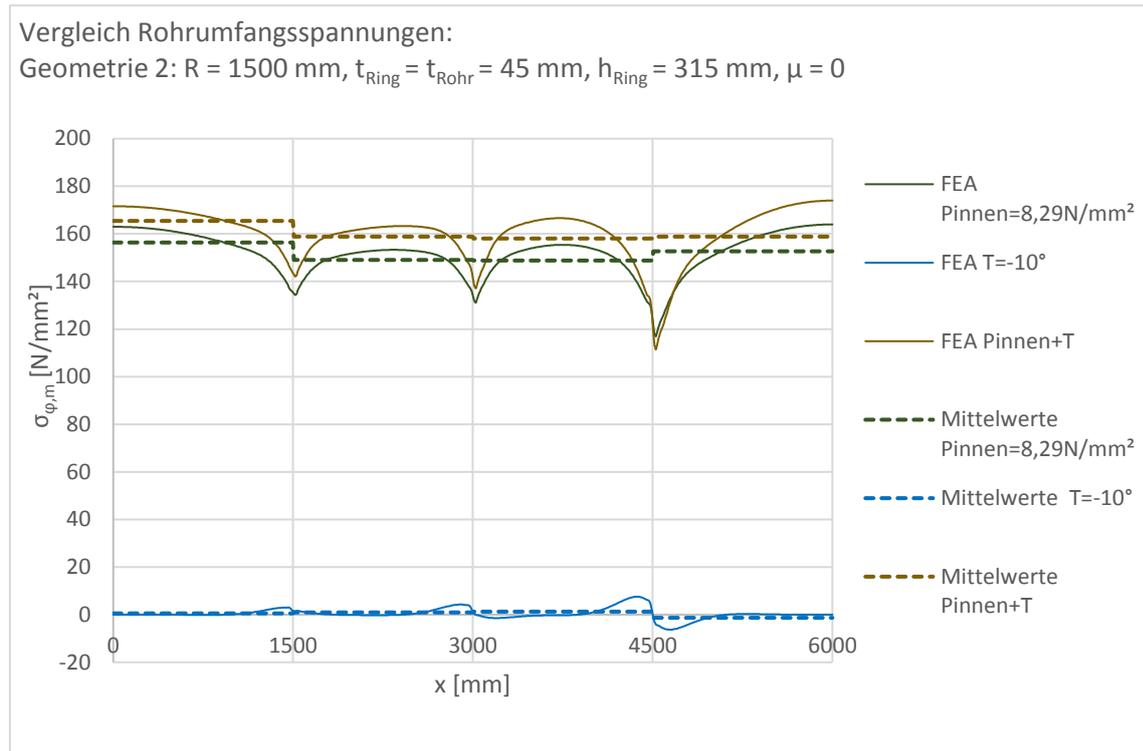


Abbildung 249 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Rohrumfangsspannungen, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

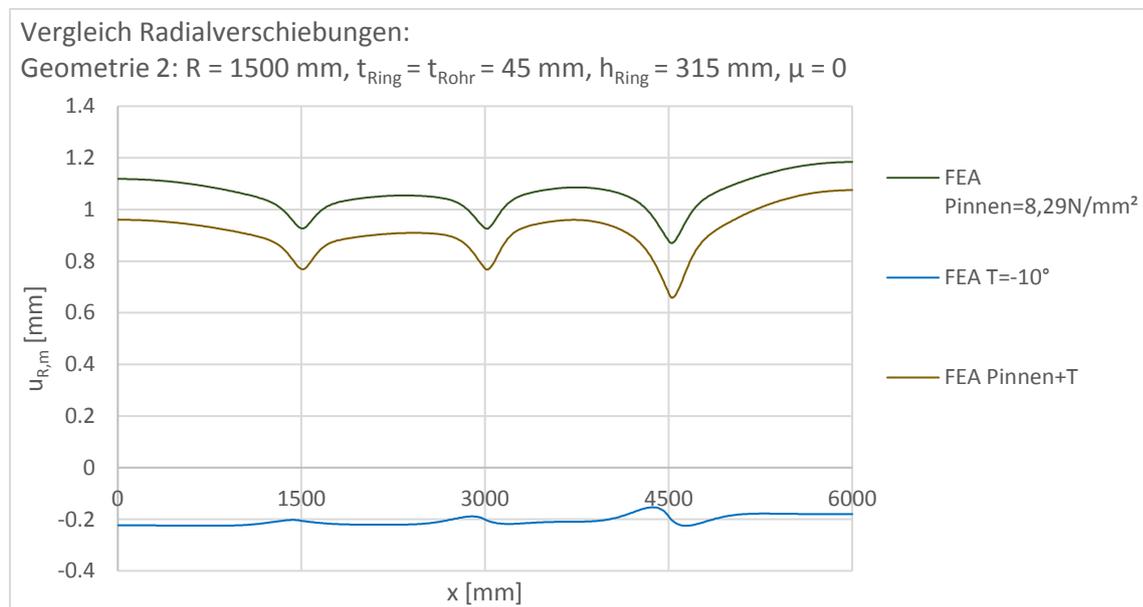


Abbildung 250 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Radialverschiebungen, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

## 1.2.3 Verformungsplots

### 1.2.3.1 Verformungsplot - Innendruck



Abbildung 251 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck

### 1.2.3.2 Verformungsplot - Temperatur

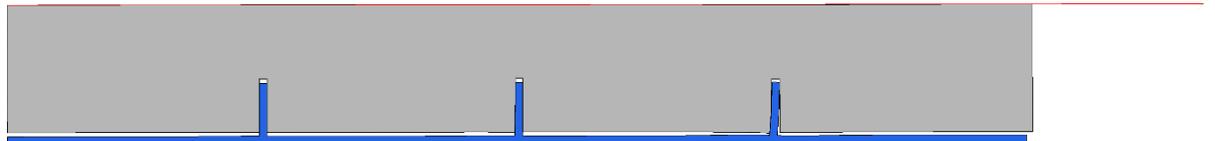


Abbildung 252 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur

### 1.2.3.3 Verformungsplot - Innendruck und Temperatur

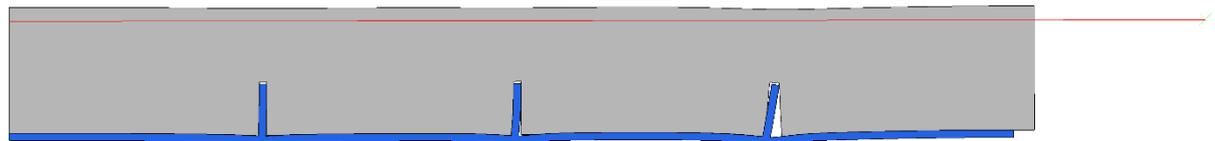


Abbildung 253 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck und Temperatur

---

1.2.3.4 Verformungsplot - Innendruck, Detail Schubring 3

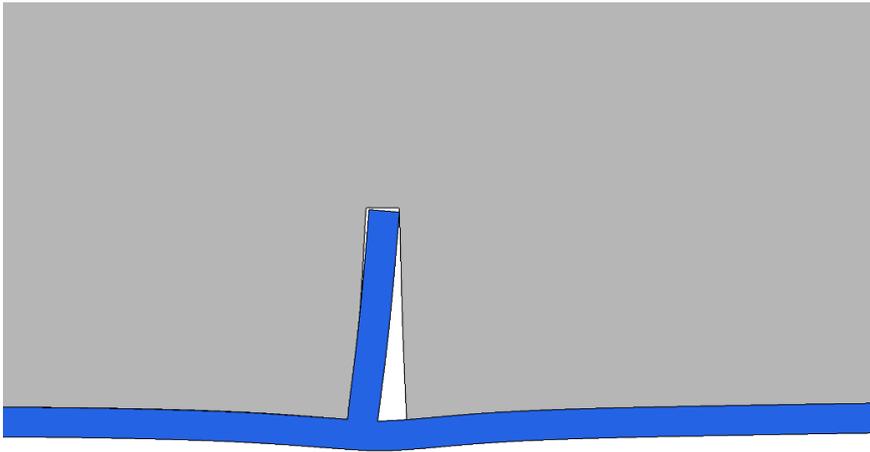


Abbildung 254 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Innendruck

---

1.2.3.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

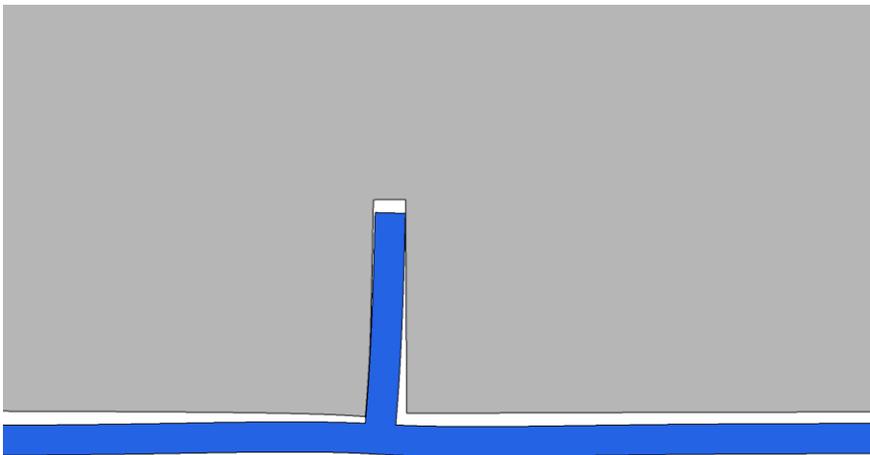


Abbildung 255 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

---

1.2.3.6 Verformungsplot - Innendruck und Temperatur, Detail Schubring 3

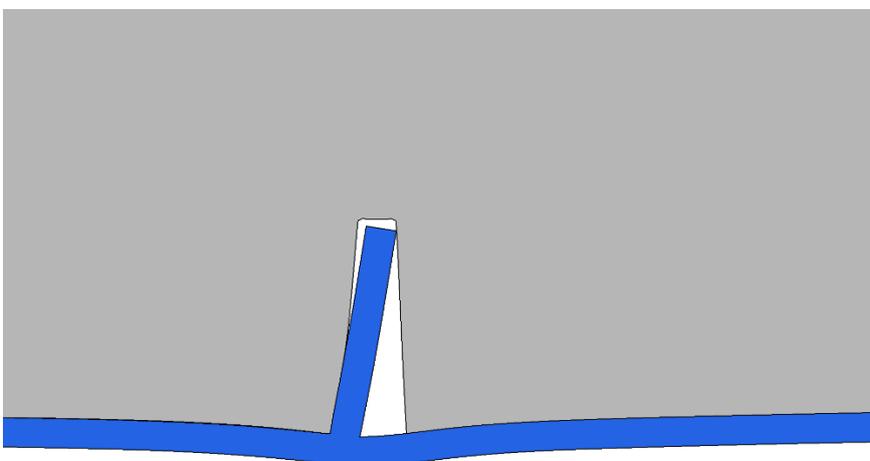


Abbildung 256 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Überlagerung: Innendruck und Temperatur

1.2.4 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

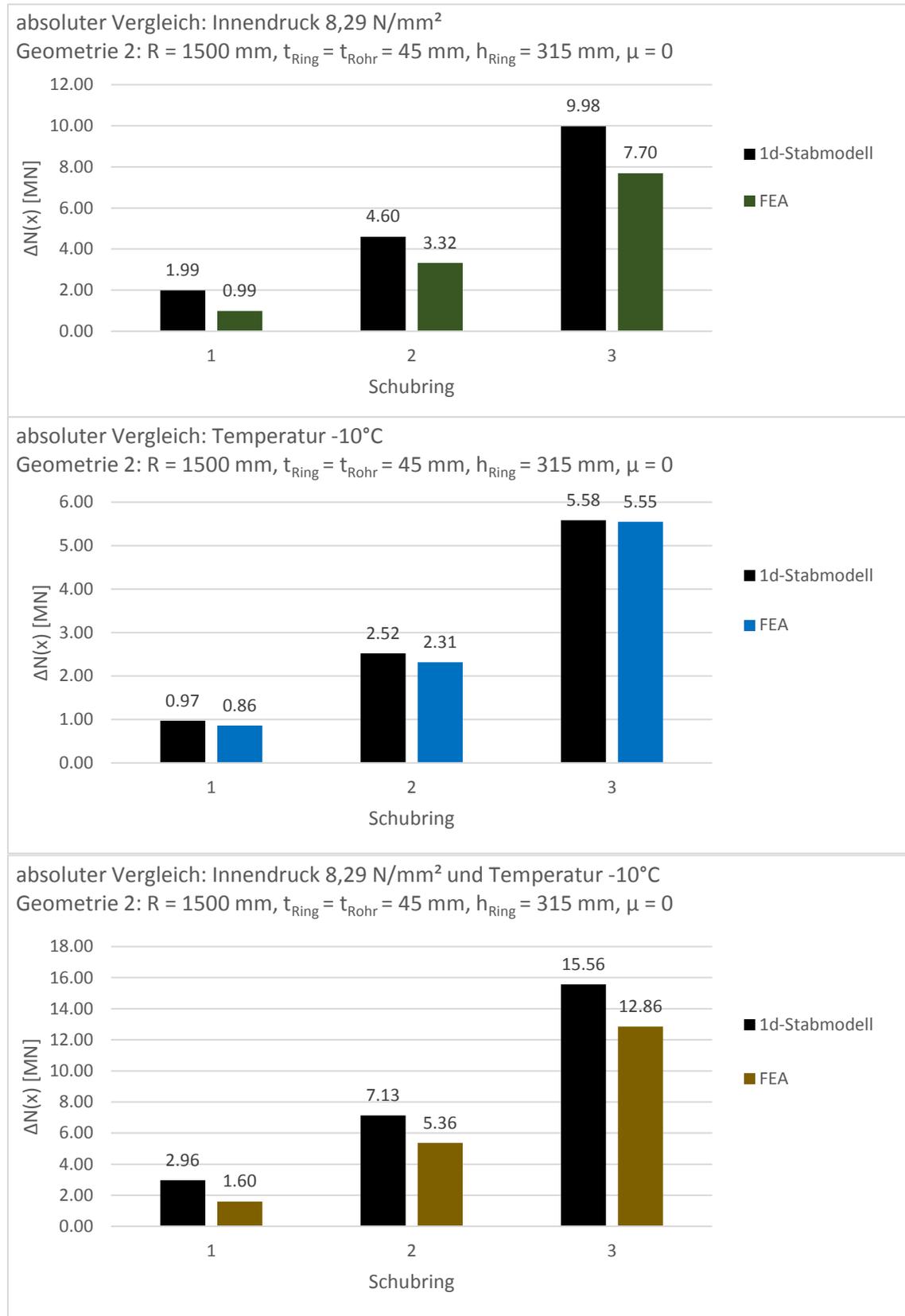


Abbildung 257 Geometrie 2, μ=0: absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

1.2.5 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

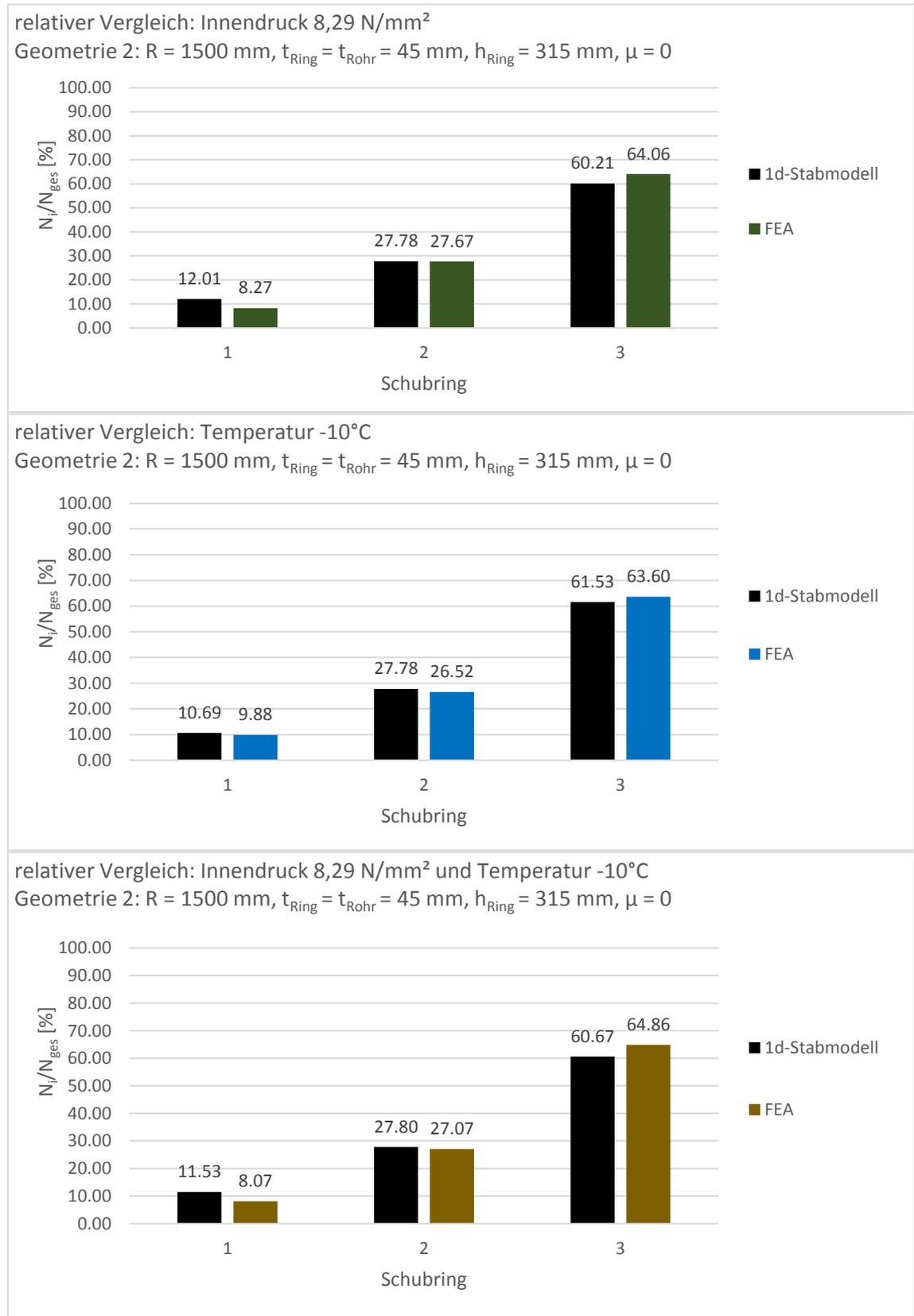


Abbildung 258 Geometrie 2,  $\mu=0$ : relativer Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

1.3 Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringering - Geometrie 3

1.3.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

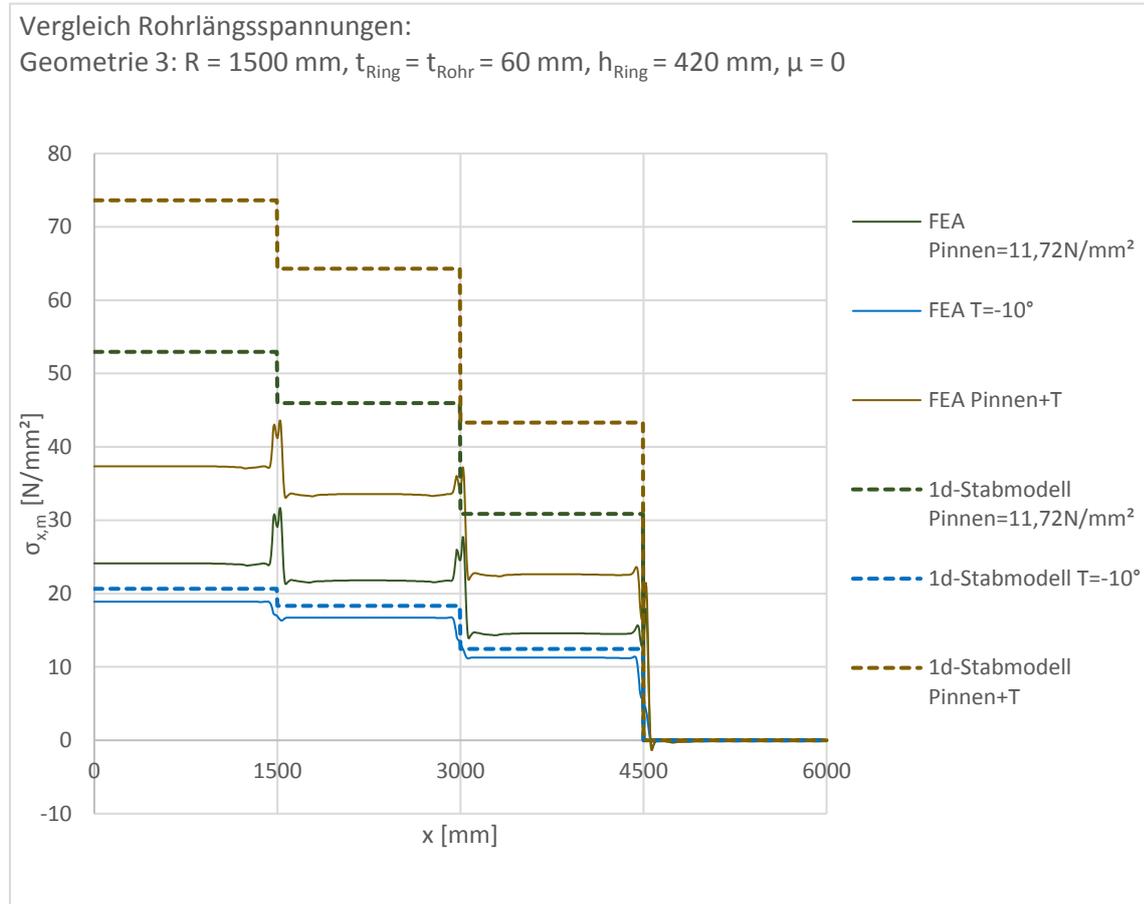


Abbildung 259 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Rohrlängsspannungen, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

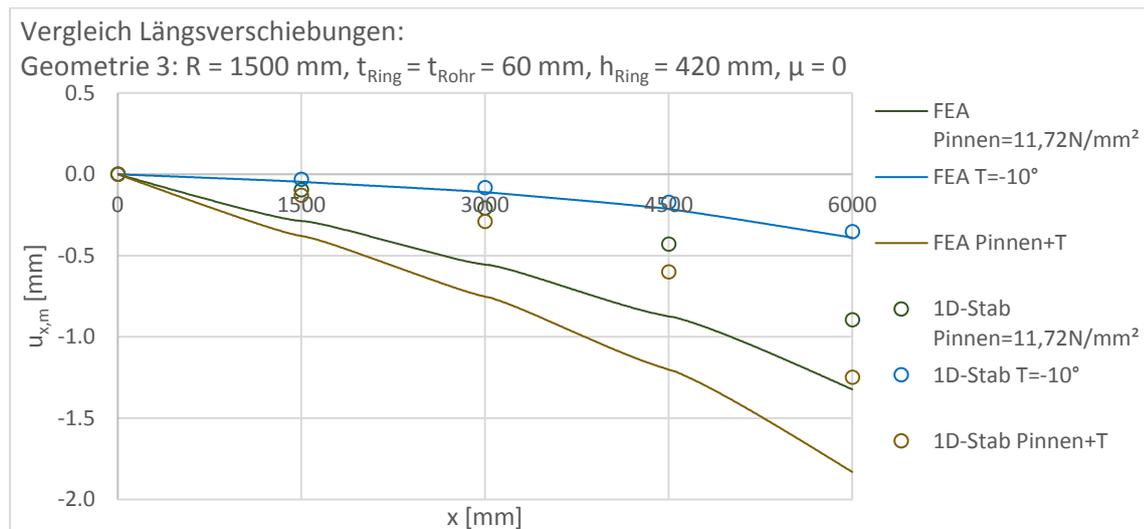


Abbildung 260 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Längsverschiebungen, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Innendruck und Abkühlung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	13.64	29.94	119%	10.68	11.68	9.4%
<b>Schubring 1</b>	1300-1700	1.30	3.94	204%	1.22	1.32	8.2%
<b>Schubring 2</b>	2800-3200	4.02	8.54	112%	3.06	3.32	8.6%
<b>Schubring 3</b>	4300-4700	8.29	17.46	111%	6.32	7.04	11%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>13.61</b>	<b>29.94</b>	<b>120%</b>	<b>10.60</b>	<b>11.68</b>	<b>10%</b>

Tabelle 44 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur -10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
<b>Auflager</b>	0	21.13	41.63	97%	24.33	15%
<b>Schubring 1</b>	1300-1700	2.13	5.27	148%	2.52	19%
<b>Schubring 2</b>	2800-3200	6.13	11.86	94%	7.08	16%
<b>Schubring 3</b>	4300-4700	12.83	24.50	91%	14.61	14%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>21.09</b>	<b>41.63</b>	<b>97%</b>	<b>24.22</b>	<b>15%</b>

Tabelle 45 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

1.3.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

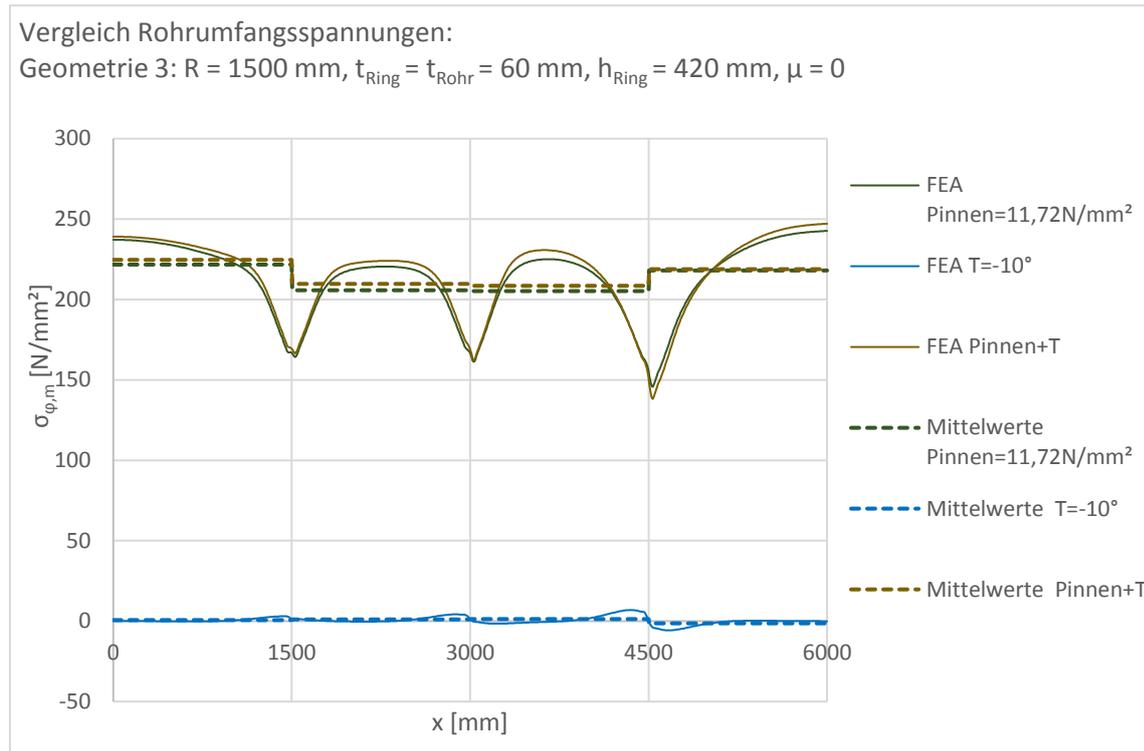


Abbildung 261 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Umfangsspannungsvergleich, Innendruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

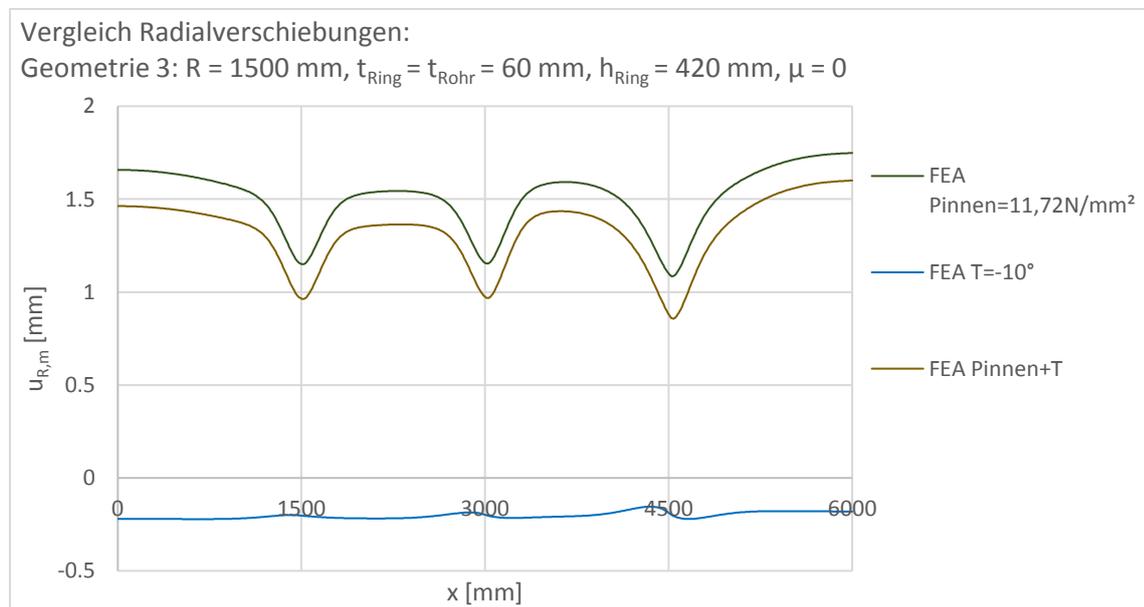


Abbildung 262 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Radialverschiebungen, Innendruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

---

### 1.3.3 Verformungsplots

---

#### 1.3.3.1 Verformungsplot - Innendruck

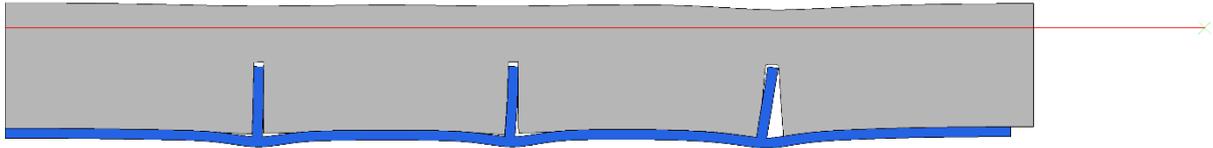


Abbildung 263 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck

---

#### 1.3.3.2 Verformungsplot - Temperatur

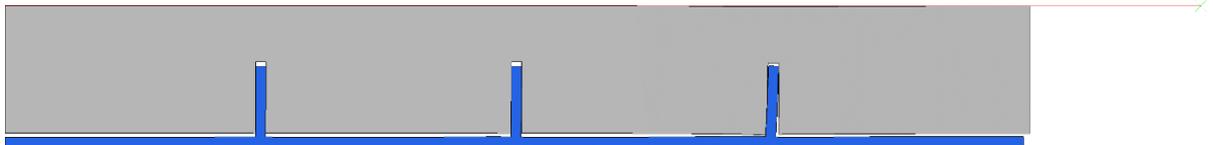


Abbildung 264 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur

---

#### 1.3.3.3 Verformungsplot - Innendruck und Temperatur



Abbildung 265 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck und Temperatur

---

1.3.3.4 Verformungsplot - Innendruck, Detail Schubring 3

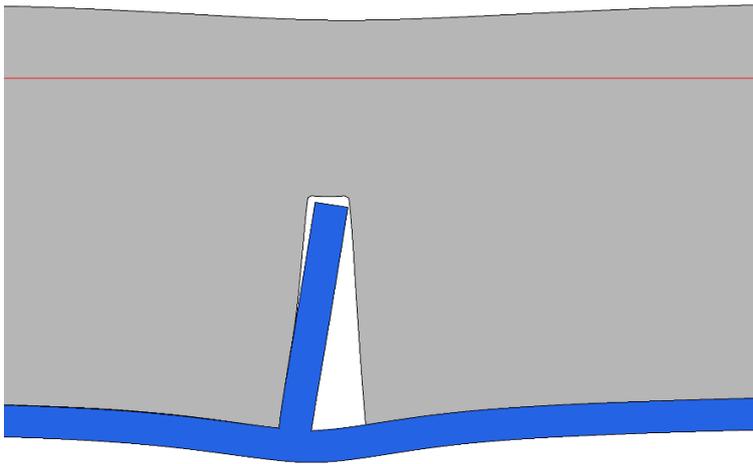


Abbildung 266 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Innendruck

---

1.3.3.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

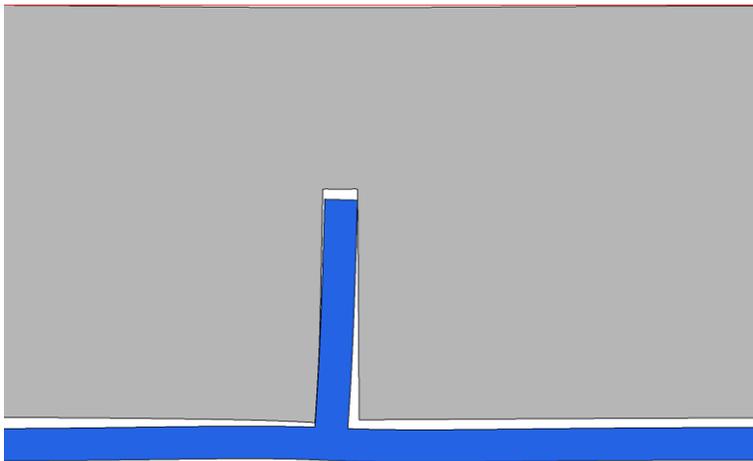


Abbildung 267 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

---

1.3.3.6 Verformungsplot - Innendruck und Temperatur, Detail Schubring 3

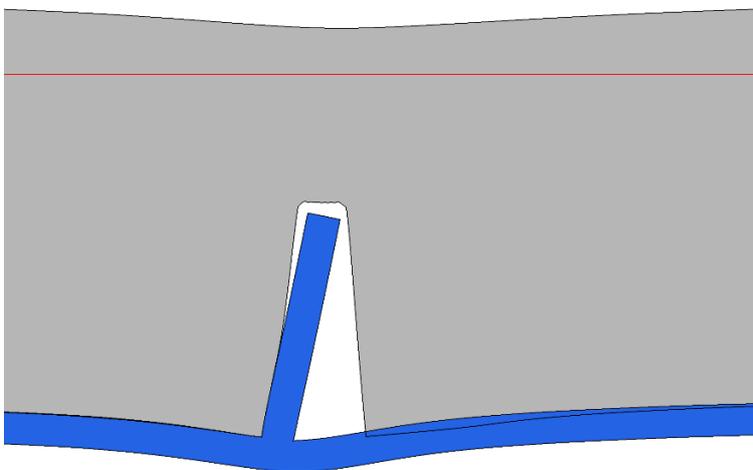


Abbildung 268 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Innendruck und Temperatur

1.3.4 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

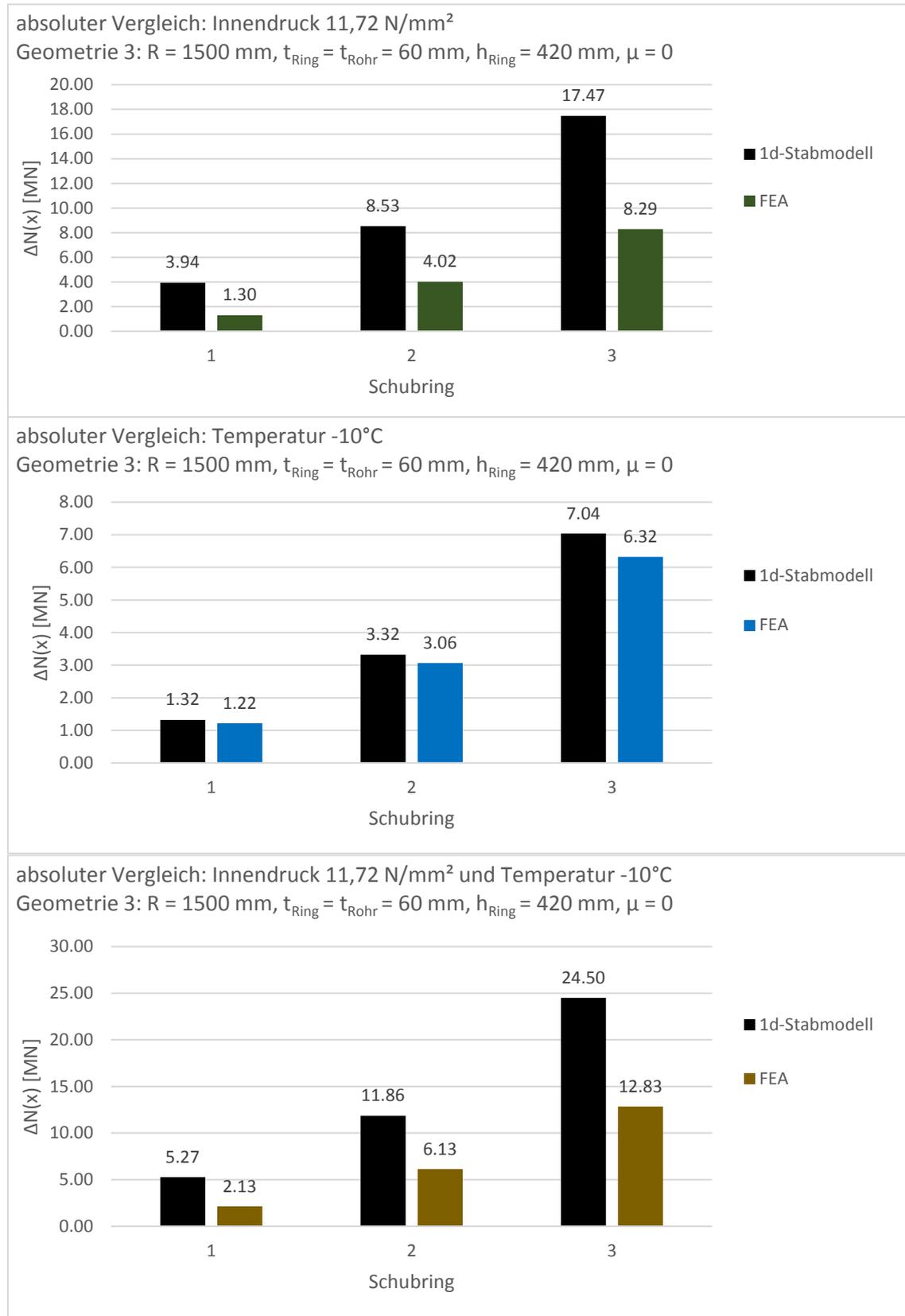


Abbildung 269 Geometrie 3,  $\mu=0$ : absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

1.3.5 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

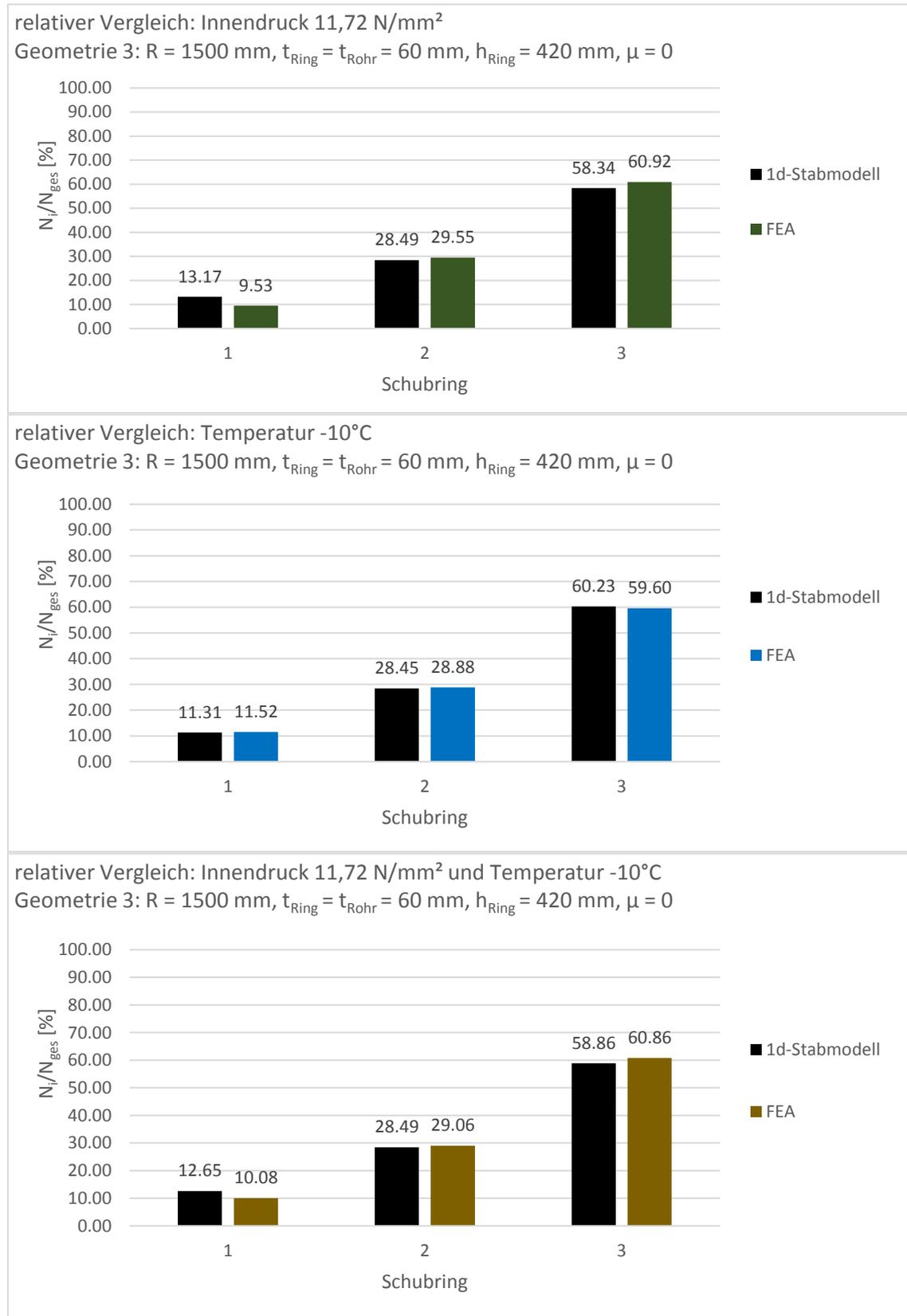


Abbildung 270 Geometrie 3, μ=0: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2 Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringerng mit Reibung

2.1 Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringerng - Geometrie 1

2.1.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

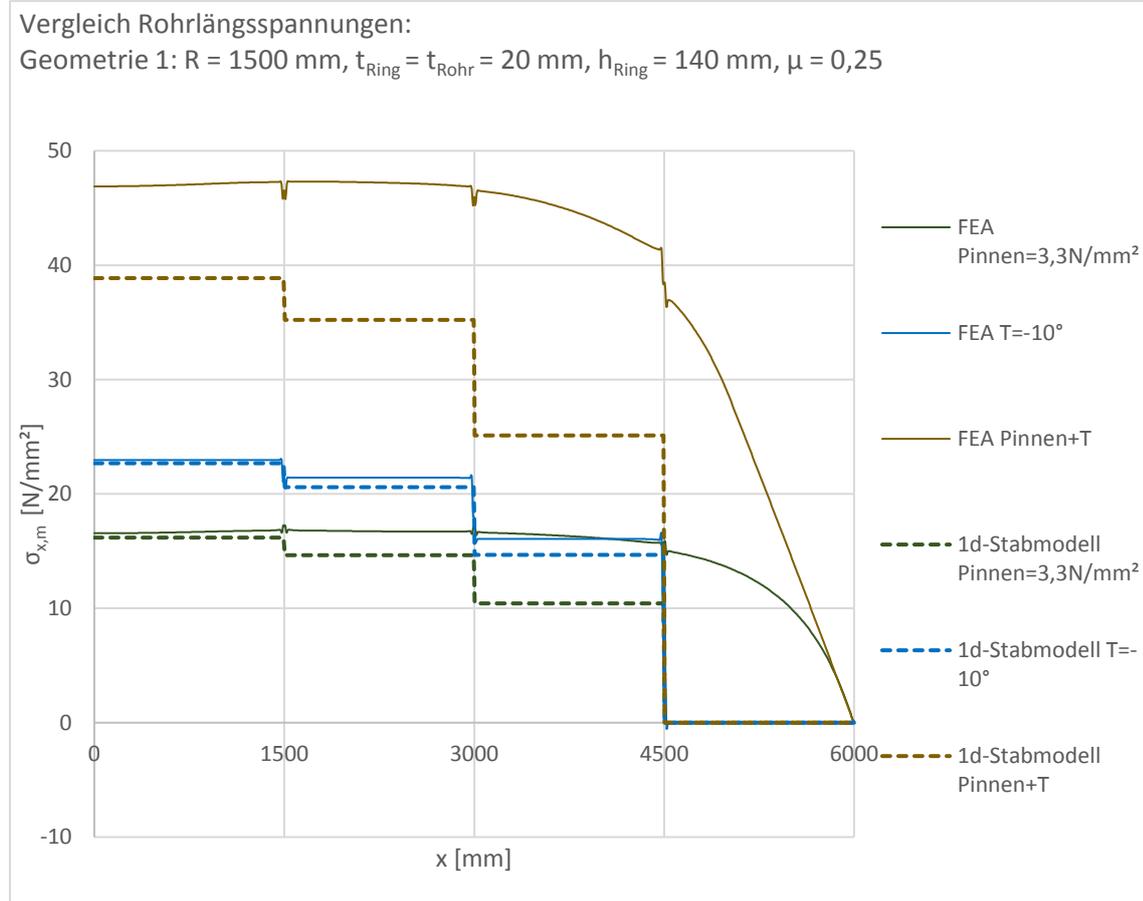


Abbildung 271 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Rohrlängsspannungen, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

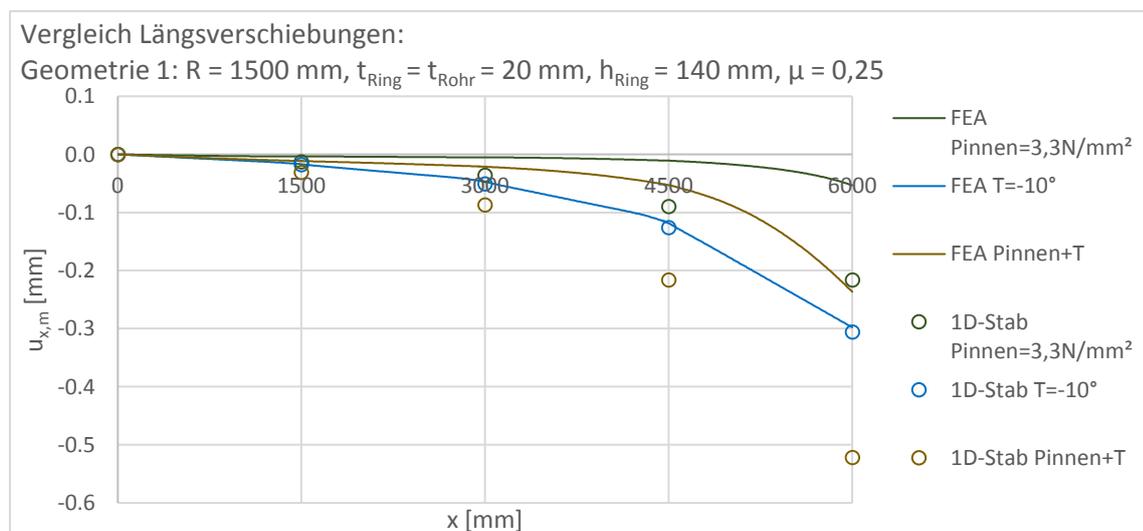


Abbildung 272 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Längsverschiebungen, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Innendruck und Abkühlung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
Auflager	0	3.12	3.05	-2.3%	4.33	4.28	-1.3%
Stahlpanzerung 1	0-1440	-0.05	0.00		0.00	0.00	
Schubring 1	1445-1555	0.00	0.29	>>	0.29	0.39	35%
Stahlpanzerung 2	1560-2950	0.02	0.00		0.01	0.00	
Schubring 2	2945-3055	0.01	0.79	5713%	1.00	1.12	11%
Stahlpanzerung 3	3060-4440	0.17	0.00		0.01	0.00	
Schubring 3	4445-4555	0.14	1.97	1264%	3.01	2.77	-8.1%
Stahlpanzerung 4	4560-6000	2.80	0.00		0.01	0.00	
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>0.16</b>	<b>3.05</b>	<b>1842%</b>	<b>4.31</b>	<b>4.28</b>	<b>-0.68%</b>

Tabelle 46 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur  $-10^\circ$

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
Auflager	0	8.84	7.33	-17%	7.45	-16%
Stahlpanzerung 1	0-1440	-0.07	0.00		-0.05	-29%
Schubring 1	1445-1555	0.00	0.69	>>	0.29	>>
Stahlpanzerung 2	1560-2950	0.08	0.00		0.03	-67%
Schubring 2	2945-3055	0.08	1.91	2363%	1.02	1213%
Stahlpanzerung 3	3060-4440	0.95	0.00		0.19	-80%
Schubring 3	4445-4555	0.86	4.73	452%	3.15	268%
Stahlpanzerung 4	4560-6000	6.92	0.00		2.81	-59%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>0.93</b>	<b>7.33</b>	<b>688%</b>	<b>4.46</b>	<b>380%</b>

Tabelle 47 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

2.1.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

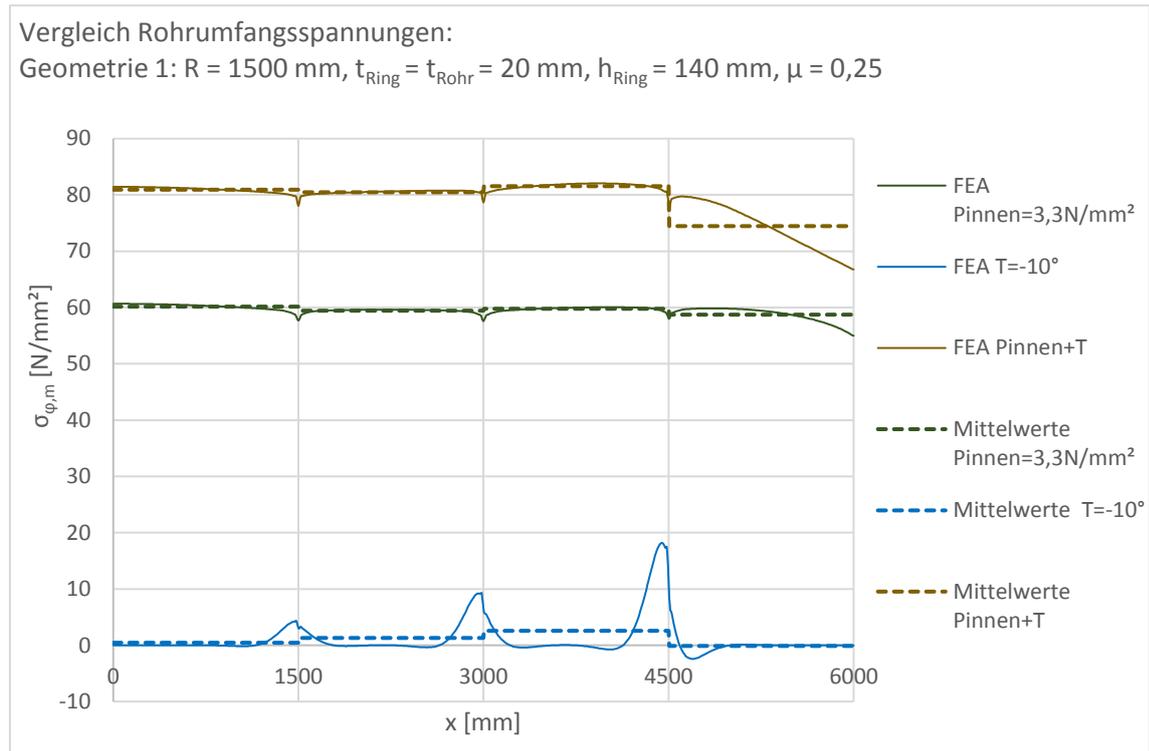


Abbildung 273 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Rohrumfangsspannungen, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

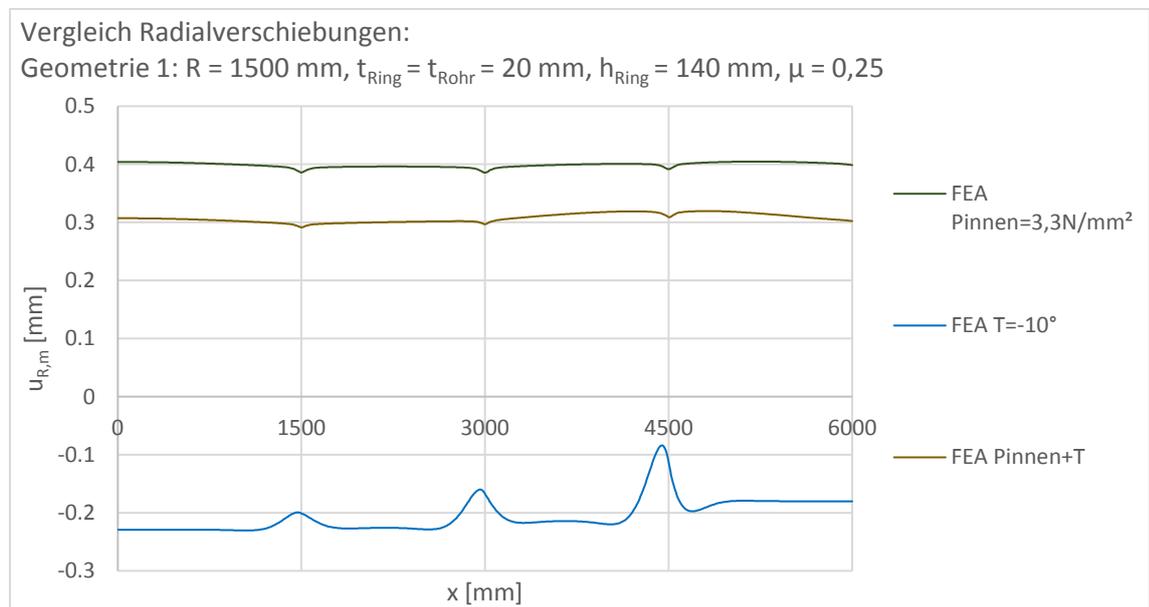
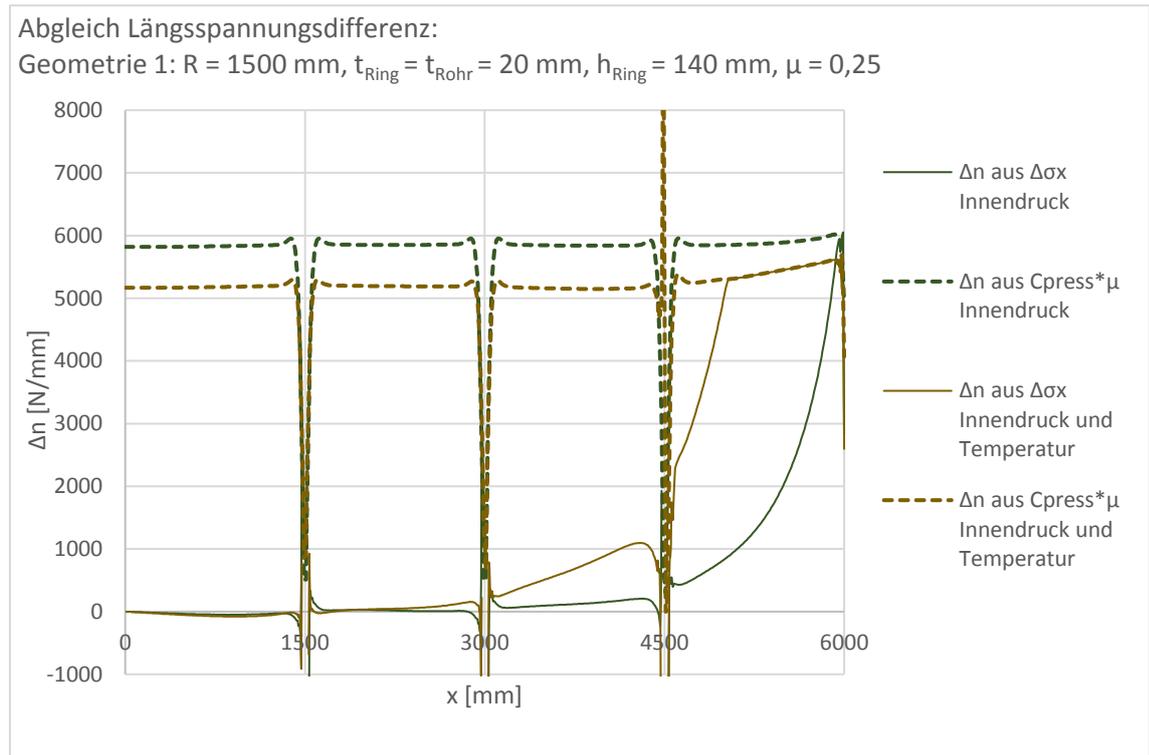


Abbildung 274 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Radialverschiebungen, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2.1.3 Analyse der Reibungswirkung



2.1.4 Verformungsplots

2.1.4.1 Verformungsplot - Innendruck

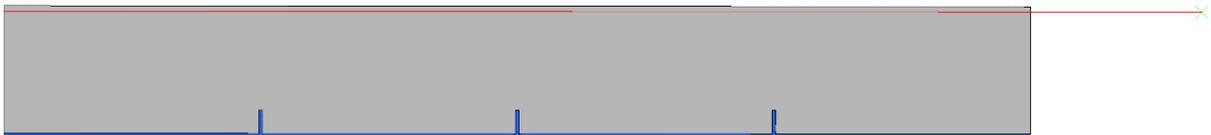


Abbildung 276 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck

2.1.4.2 Verformungsplot - Temperatur

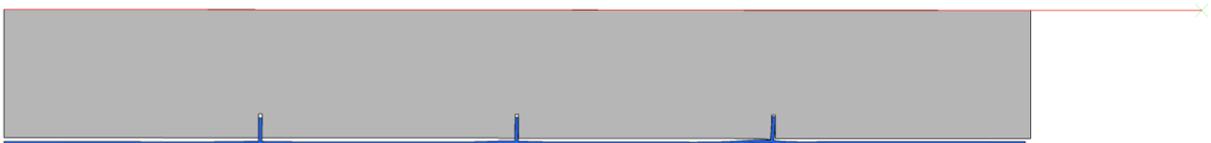


Abbildung 277 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur

2.1.4.3 Verformungsplot - Innendruck und Temperatur



Abbildung 278 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Innendruck und Temperatur

---

2.1.4.4 Verformungsplot - Innendruck, Detail Schubring 3

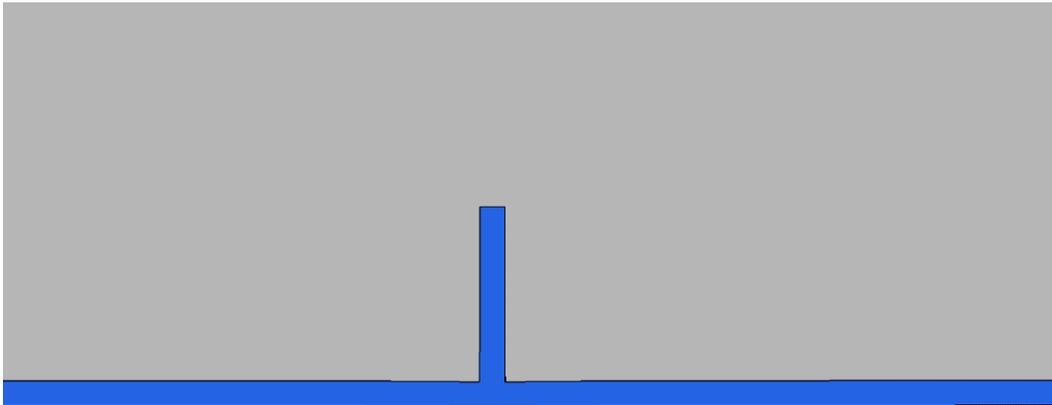


Abbildung 279 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Innendruck

---

2.1.4.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

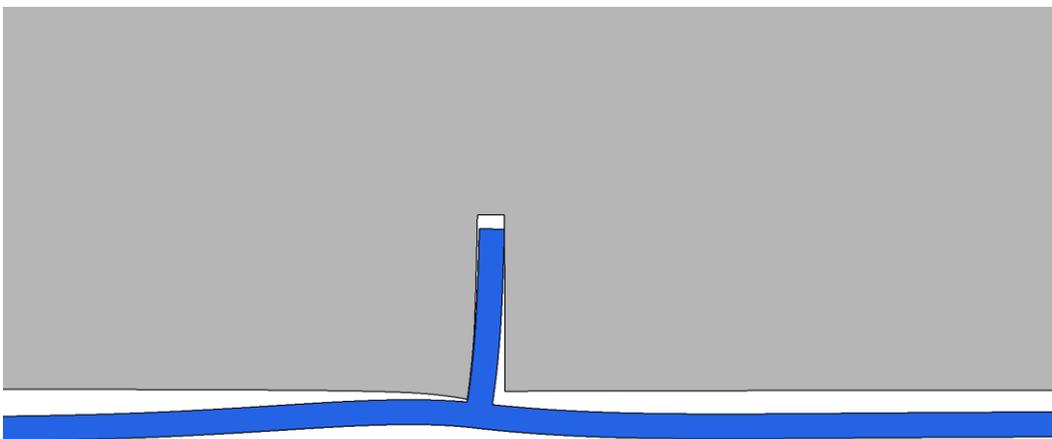


Abbildung 280 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

---

2.1.4.6 Verformungsplot - Innendruck und Temperatur, Detail Schubring 3

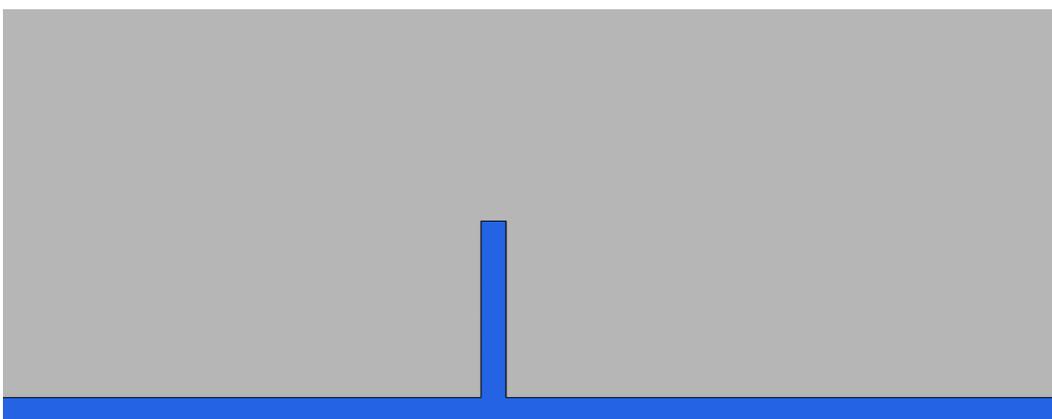


Abbildung 281 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Innendruck und Temperatur

2.1.5 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

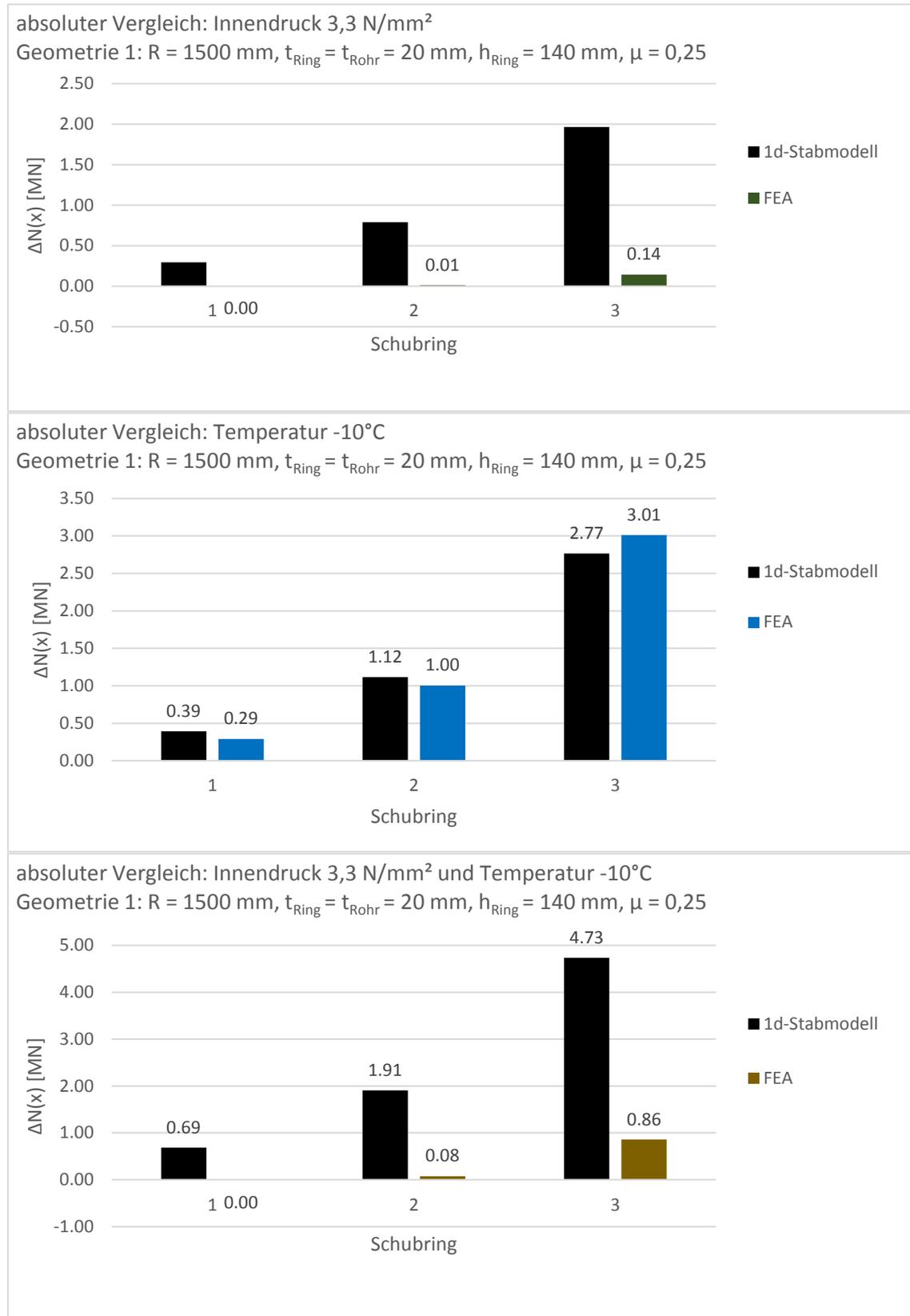


Abbildung 282 Geometrie 1, μ=0,25: absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2.1.6 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

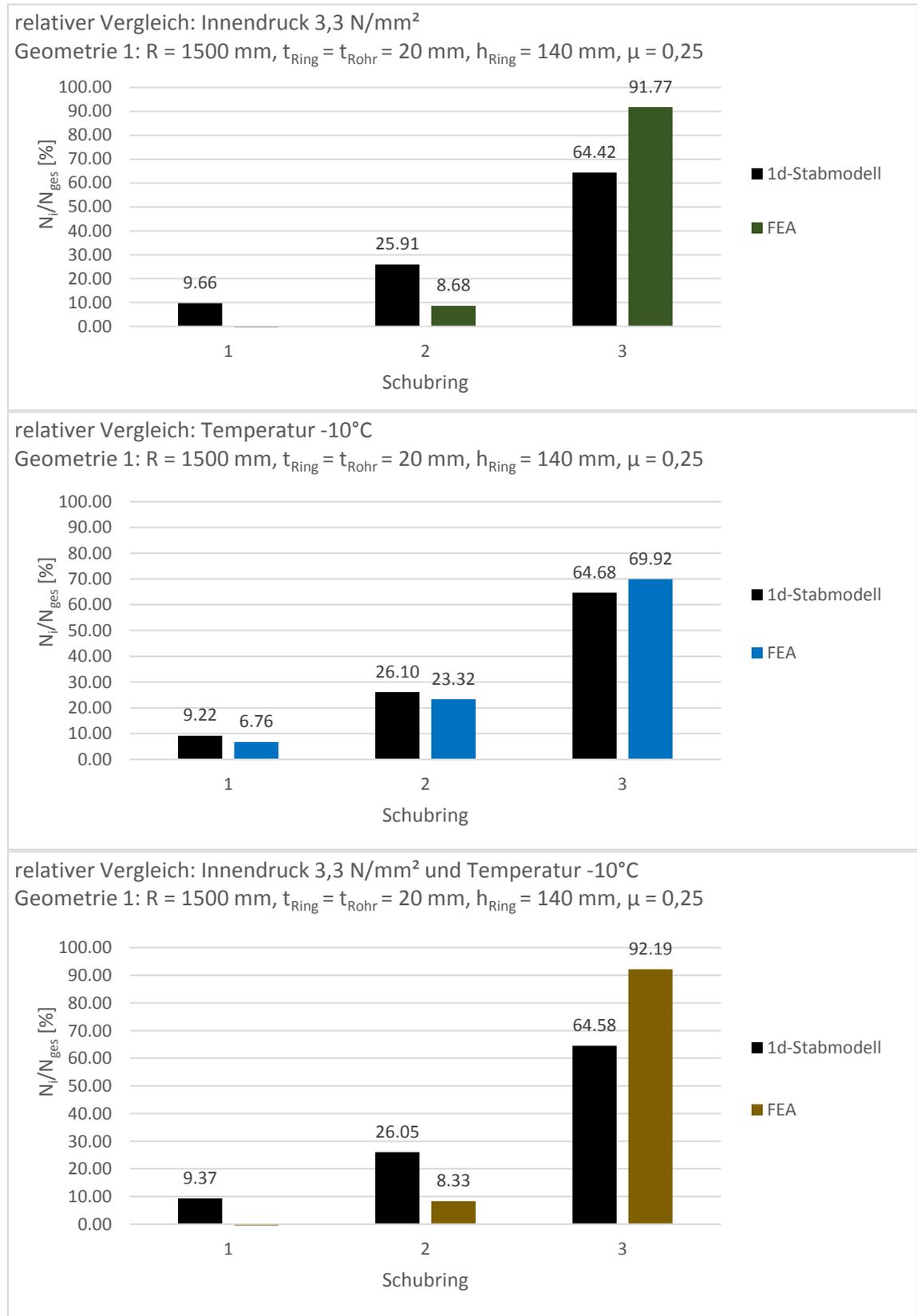


Abbildung 283 Geometrie 1, μ=0,25: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck 3,3 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2.2 Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringering - Geometrie 2

2.2.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

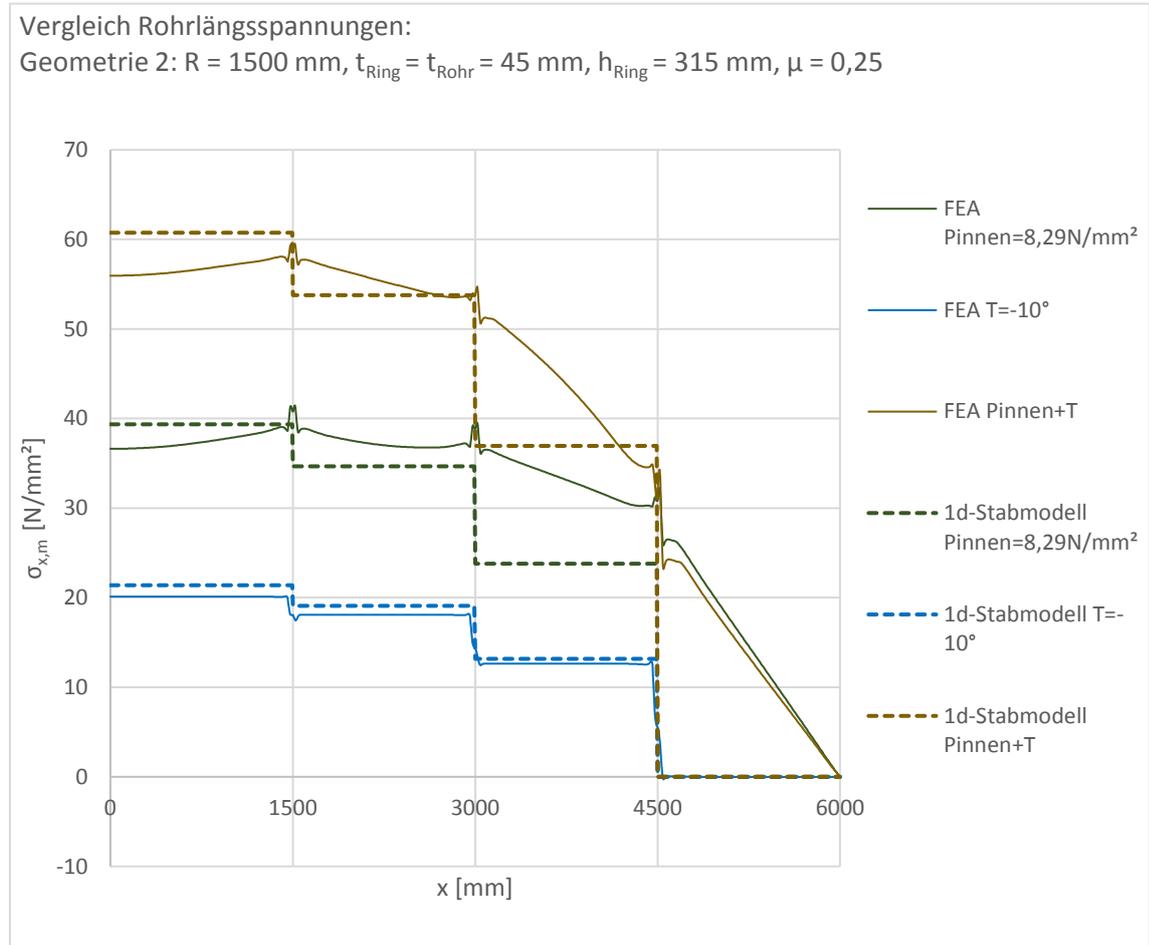


Abbildung 284 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Rohrlängsspannungen, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

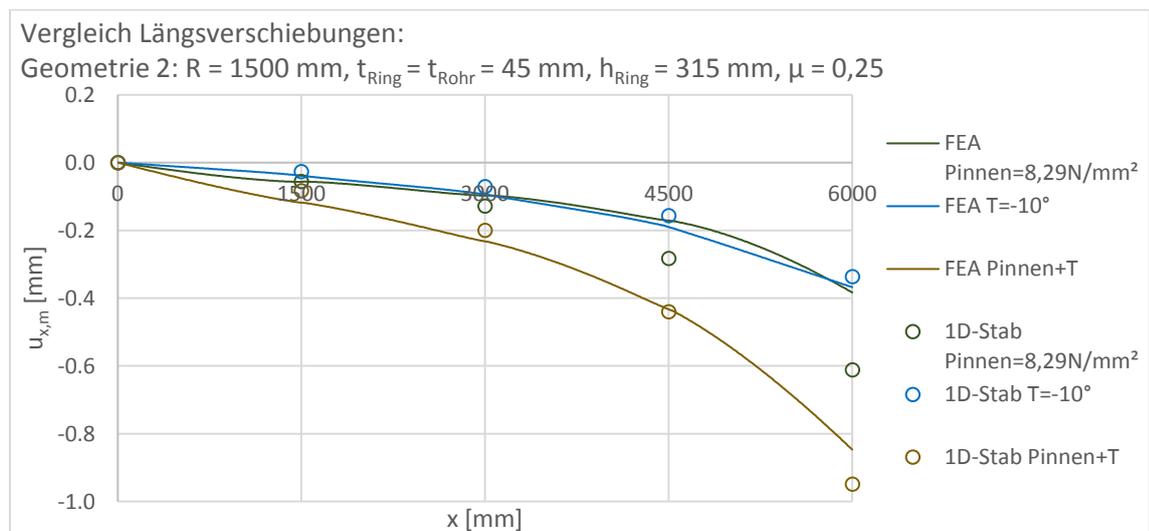


Abbildung 285 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Längsverschiebungen, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Innendruck und Abkühlung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	15.53	16.69	7.5%	8.53	9.07	6.3%
<b>Stahlpanzerung 1</b>	0-1400	-1.03	0.00		0.01	0.00	
<b>Schubring 1</b>	1400-1600	0.07	1.99	2761%	0.85	0.97	14%
<b>Stahlpanzerung 2</b>	1600-2900	0.73	0.00		0.02	0.00	
<b>Schubring 2</b>	2900-3100	0.29	4.60	1462%	2.30	2.52	9.4%
<b>Stahlpanzerung 3</b>	3100-4400	2.63	0.00		0.02	0.00	
<b>Schubring 3</b>	4400-4600	1.77	10.09	471	5.41	5.58	3.1%
<b>Stahlpanzerung 4</b>	4600-6000	10.59	0.00		-0.08	0.00	
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>2.13</b>	<b>16.69</b>	<b>683%</b>	<b>8.57</b>	<b>9.07</b>	<b>5.9%</b>

Tabelle 48 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur -10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
<b>Auflager</b>	0	23.73	25.76	8.6%	24.06	1.4%
<b>Stahlpanzerung 1</b>	0-1400	-0.90	0.00		-1.02	12%
<b>Schubring 1</b>	1400-1600	0.15	2.96	1836%	0.92	500%
<b>Stahlpanzerung 2</b>	1600-2900	1.76	0.00		0.75	-57%
<b>Schubring 2</b>	2900-3100	1.02	7.12	600%	2.60	155%
<b>Stahlpanzerung 3</b>	3100-4400	6.97	0.00		2.65	-62%
<b>Schubring 3</b>	4400-4600	4.74	15.68	231%	7.18	52%
<b>Stahlpanzerung 4</b>	4600-6000	9.56	0.00		10.51	9.9%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>5.91</b>	<b>25.76</b>	<b>336%</b>	<b>10.70</b>	<b>81%</b>

Tabelle 49 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

2.2.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

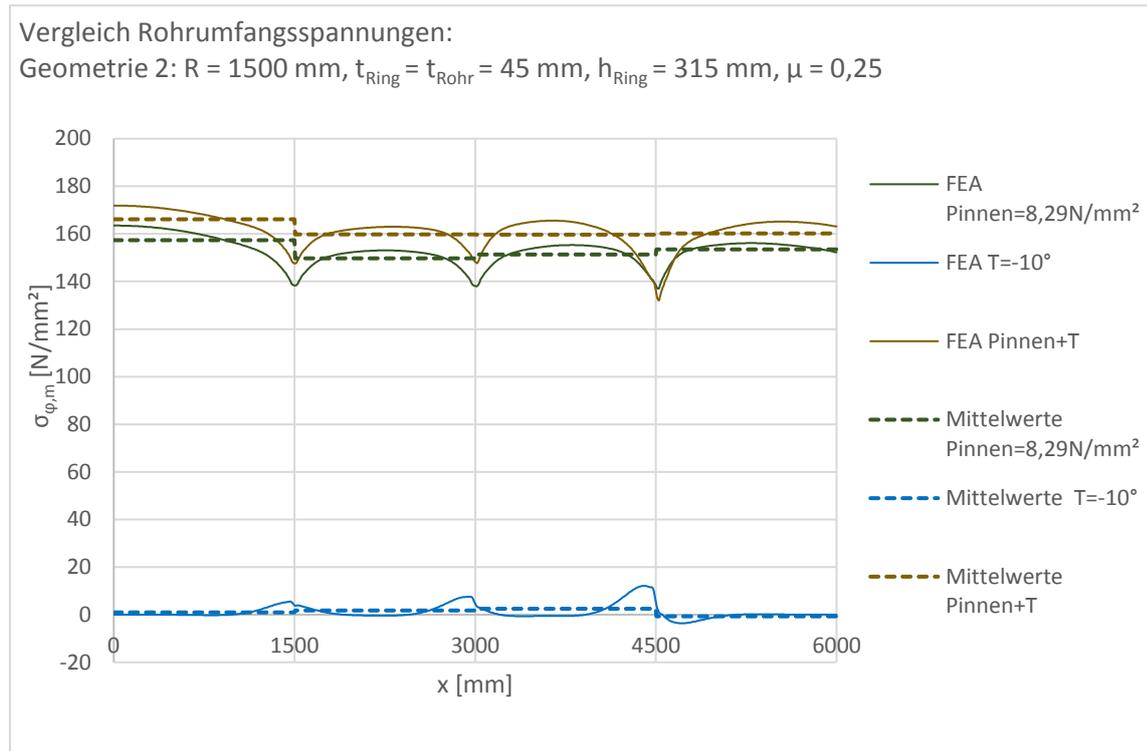


Abbildung 286 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Rohrumfangsspannungen, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

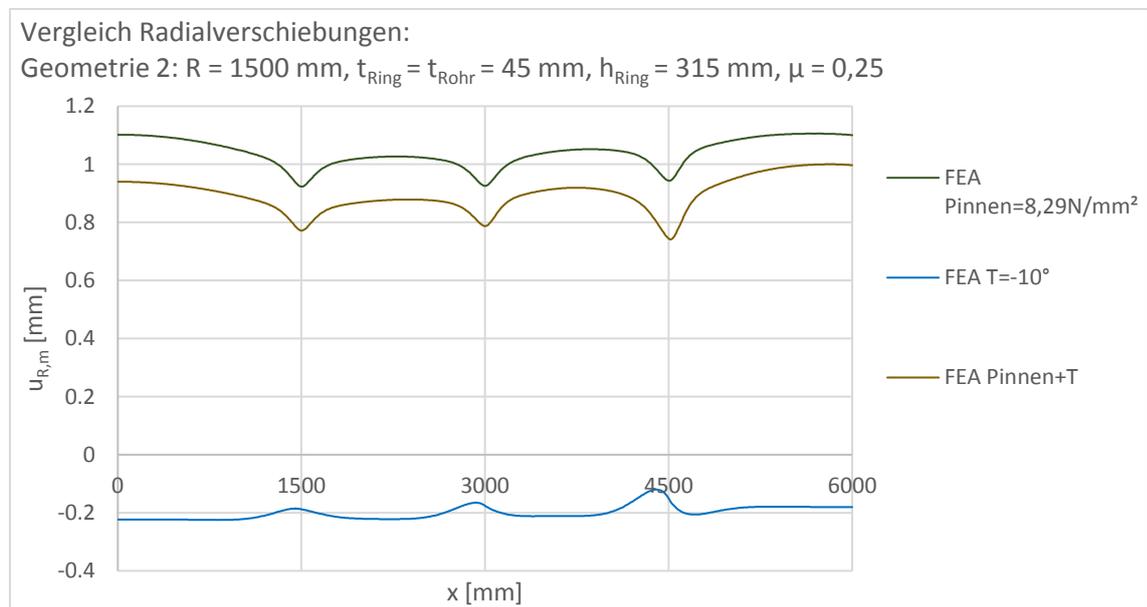


Abbildung 287 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Radialverschiebungen, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2.2.3 Analyse Reibungswirkung

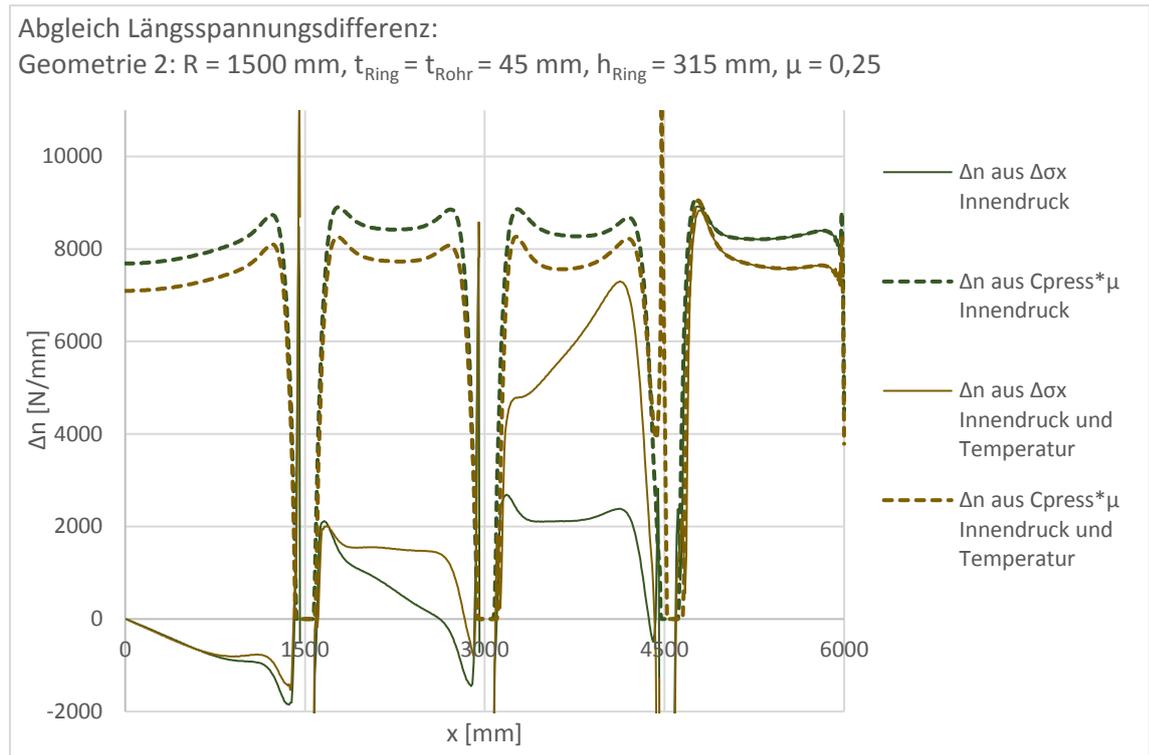


Abbildung 288 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Reibungswirkung, Innendruck  $8,29 \text{ N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung

2.2.4 Verformungsplots

2.2.4.1 Verformungsplot - Innendruck

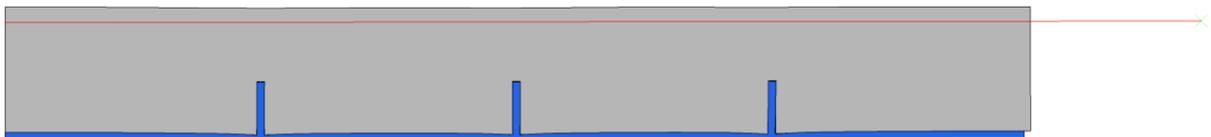


Abbildung 289 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht: Innendruck

2.2.4.2 Verformungsplot - Temperatur

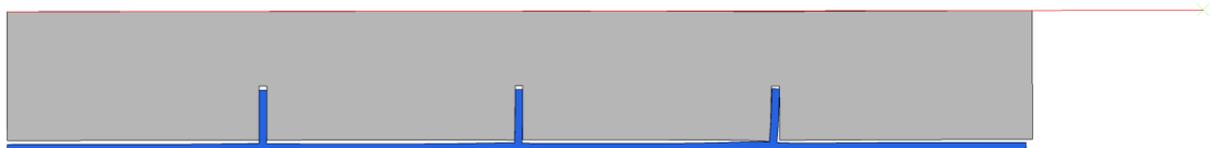


Abbildung 290 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht: Temperatur

2.2.4.3 Verformungsplot - Innendruck und Temperatur

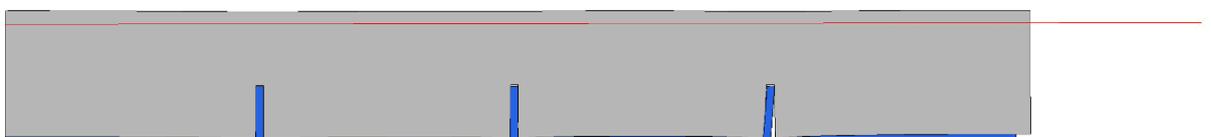


Abbildung 291 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht: Innendruck und Temperatur

---

2.2.4.4 Verformungsplot - Innendruck, Detail Schubring 3

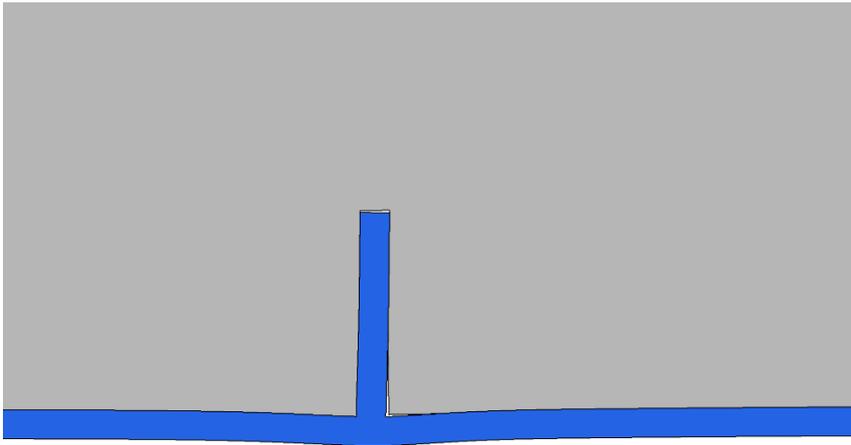


Abbildung 292 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Innendruck

---

2.2.4.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

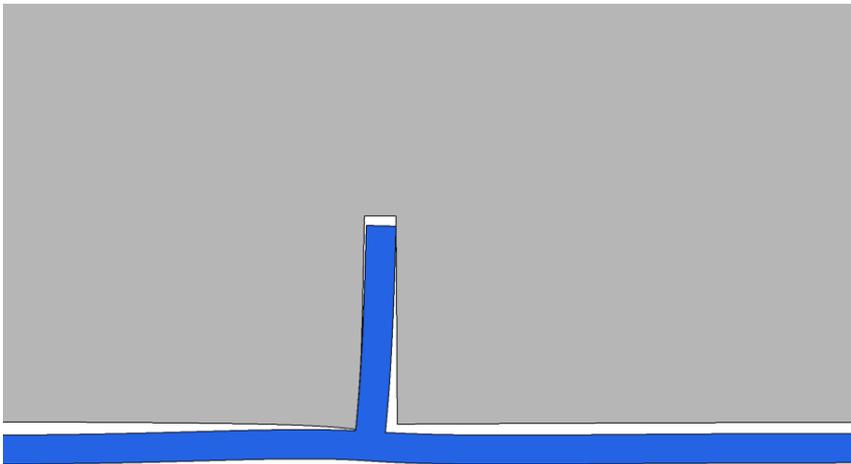


Abbildung 293 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

---

2.2.4.6 Verformungsplot - Innendruck und Temperatur, Detail Schubring 3

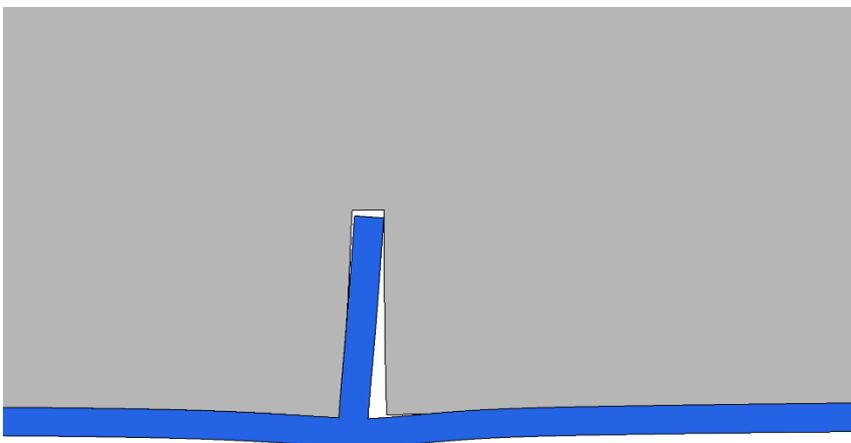


Abbildung 294 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Innendruck und Temperatur

2.2.5 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

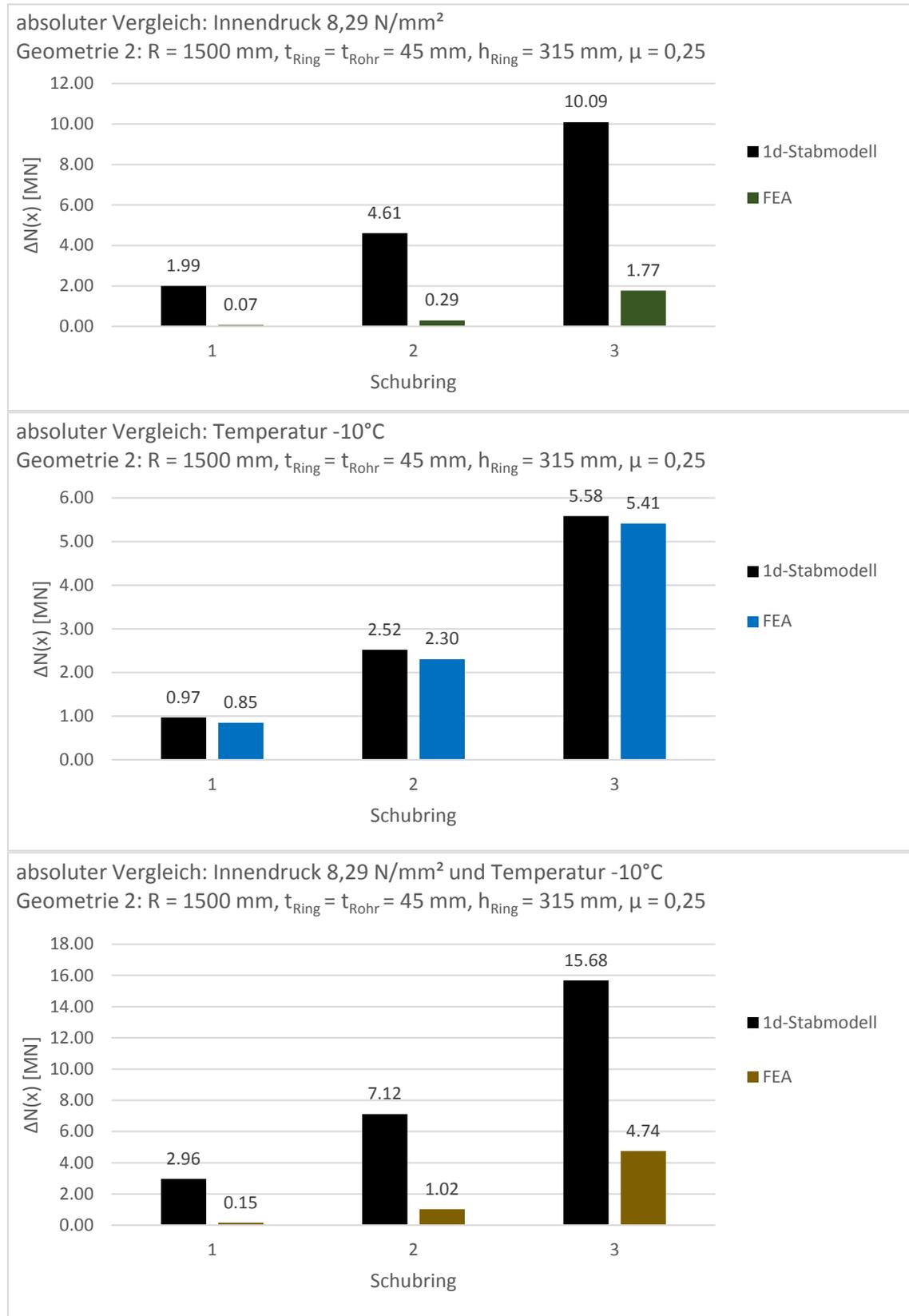


Abbildung 295 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2.2.6 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

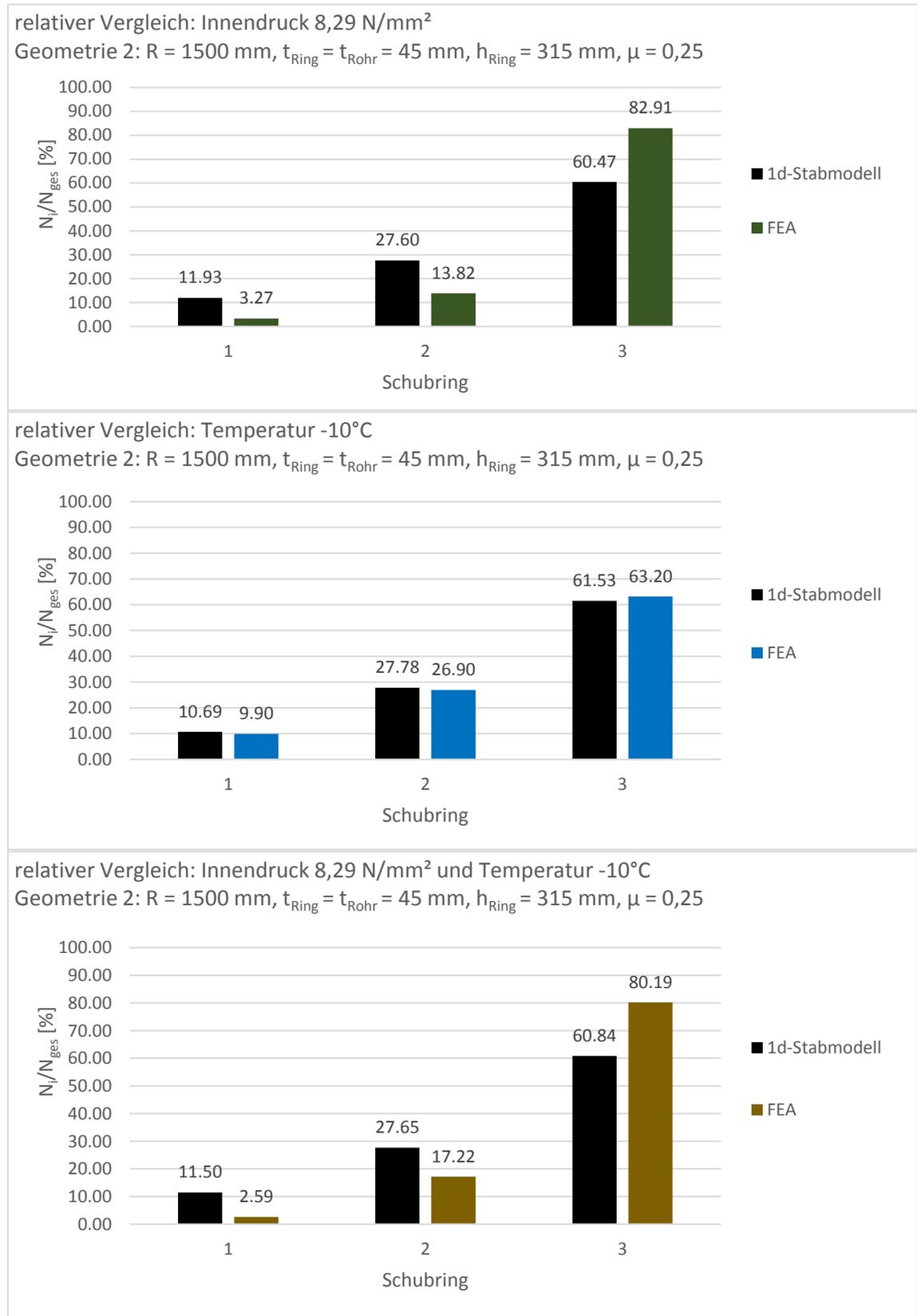


Abbildung 296 Geometrie 2, μ=0,25: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck 8,29 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2.3 Lastfallüberlagerung Innendruck und Temperaturverringering - Geometrie 3

2.3.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

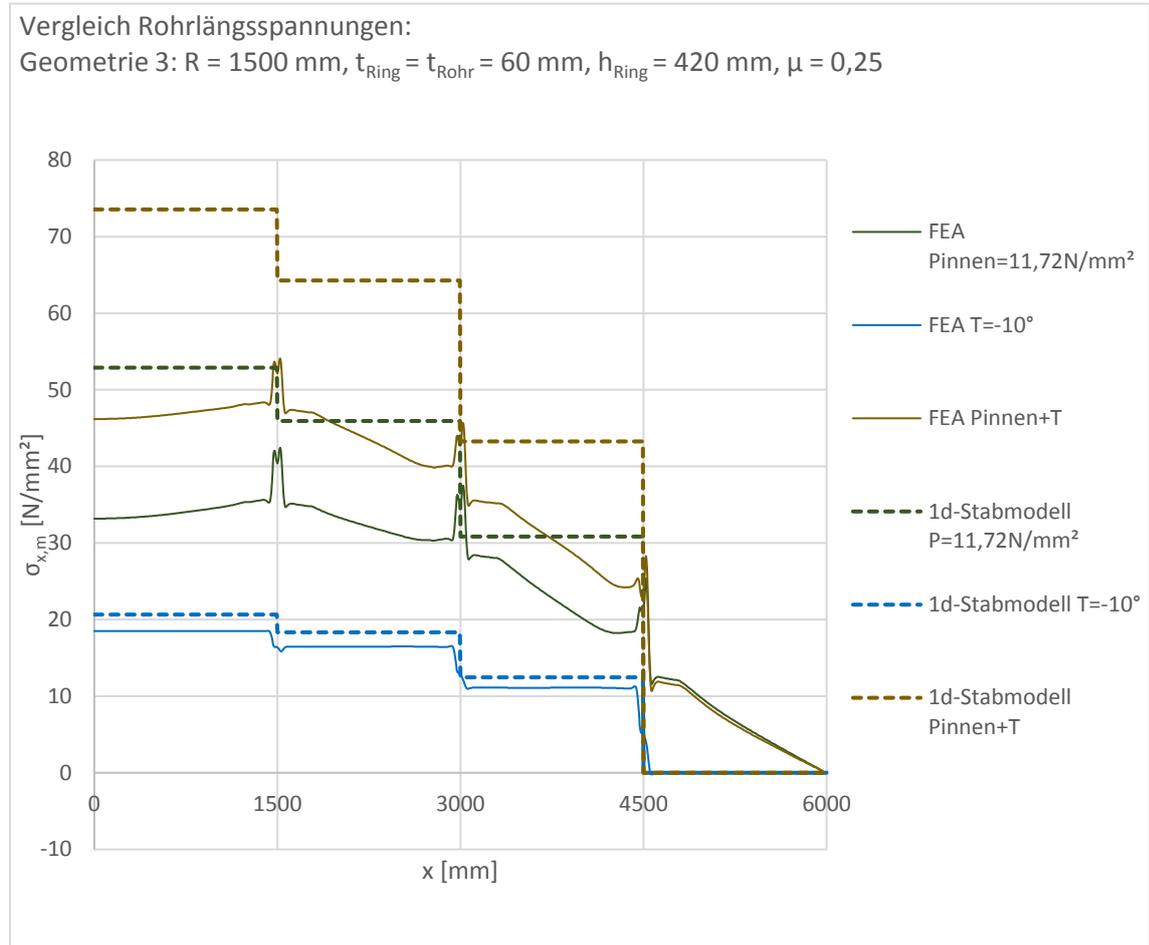


Abbildung 297 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Rohrlängsspannungen, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

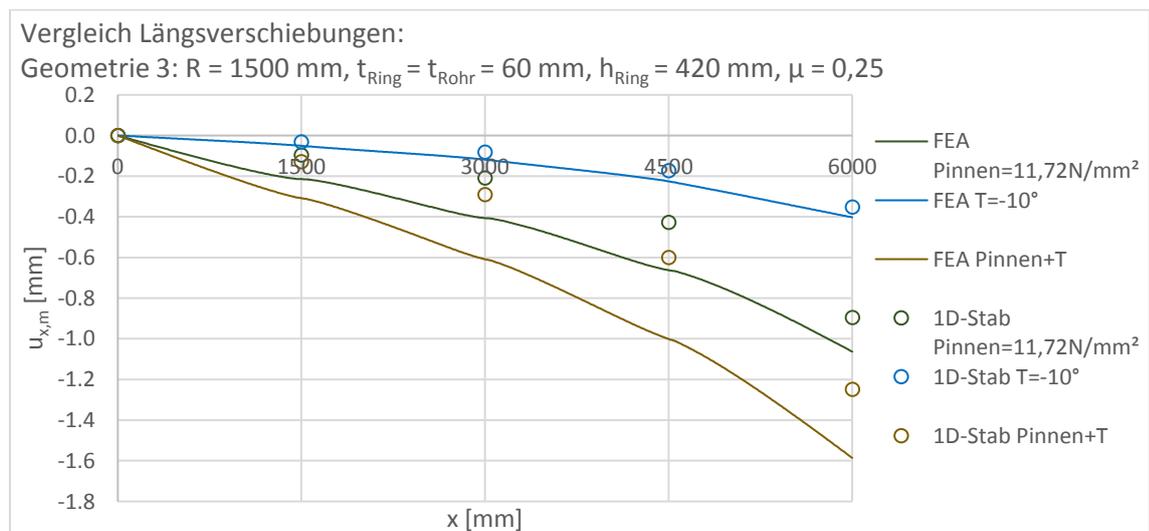


Abbildung 298 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Längsverschiebungen, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Innendruck und Abkühlung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Innendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Innendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	18.77	29.91	59%	10.47	11.68	12%
<b>Stahlpanzerung 1</b>	0-1300	-1.26	0.00		0.00	0.00	
<b>Schubring 1</b>	1300-1700	0.27	3.94	1344%	1.15	1.32	15%
<b>Stahlpanzerung 2</b>	1700-2800	2.59	0.00		0.02	0.00	
<b>Schubring 2</b>	2800-3200	1.21	8.54	604%	3.01	3.32	10%
<b>Stahlpanzerung 3</b>	3200-4300	5.64	0.00		0.04	0.00	
<b>Schubring 3</b>	4300-4700	3.36	17.44	418%	6.22	7.04	13%
<b>Stahlpanzerung 4</b>	4700-6000	6.95	0.00		0.03	0.00	
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>4.85</b>	<b>29.91</b>	<b>517%</b>	<b>10.38</b>	<b>11.68</b>	<b>13%</b>

Tabelle 50 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur -10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
<b>Auflager</b>	0	26.12	41.59	59%	29.23	12%
<b>Stahlpanzerung 1</b>	0-1300	-1.12	0.00		-1.26	12%
<b>Schubring 1</b>	1300-1700	0.55	5.26	853%	1.42	157%
<b>Stahlpanzerung 2</b>	1700-2800	4.14	0.00		2.61	-37%
<b>Schubring 2</b>	2800-3200	2.57	11.86	361%	4.23	64%
<b>Stahlpanzerung 3</b>	3200-4300	6.24	0.00		5.68	-9.0%
<b>Schubring 3</b>	4300-4700	7.16	24.48	242%	9.58	34%
<b>Stahlpanzerung 4</b>	4700-6000	6.58	0.00		6.98	6.0%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>10.28</b>	<b>41.59</b>	<b>305%</b>	<b>15.23</b>	<b>48%</b>

Tabelle 51 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

2.3.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

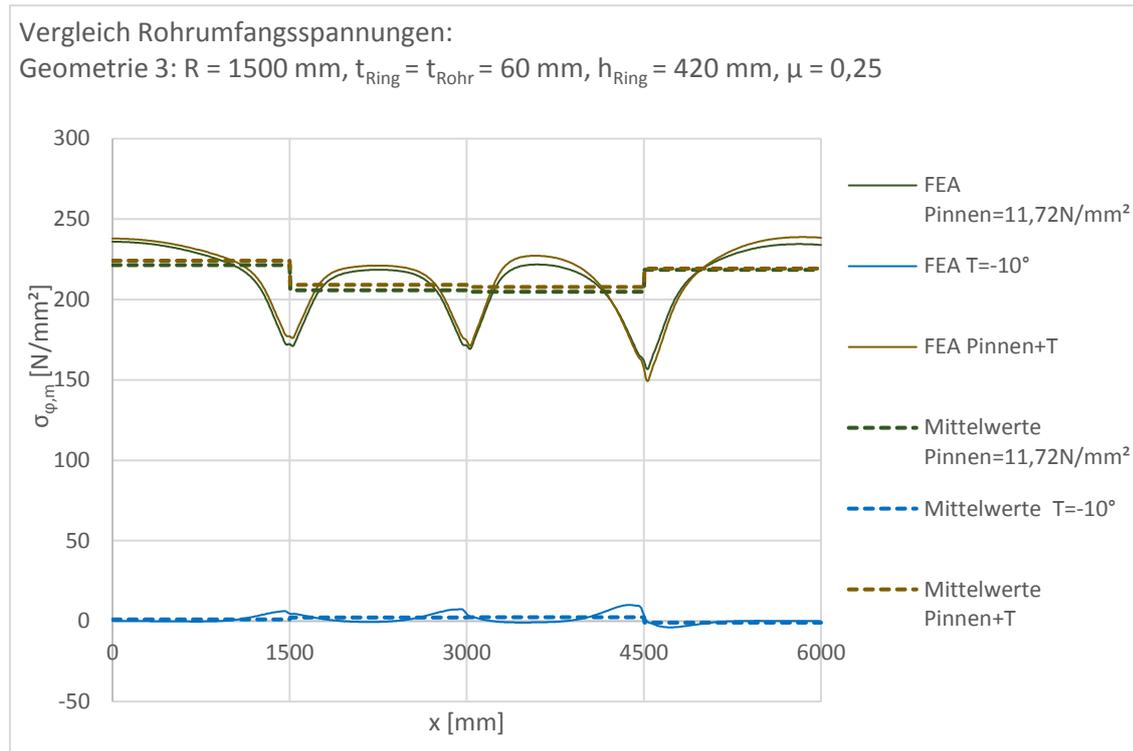


Abbildung 299 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Rohrumfangsspannungen, Innendruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

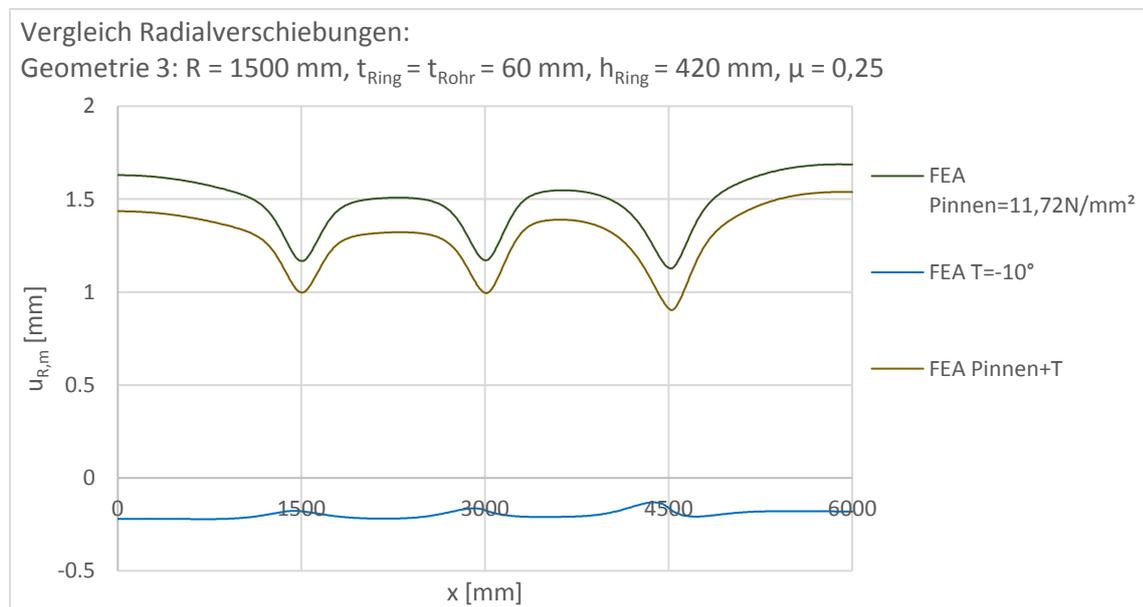


Abbildung 300 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Radialverschiebungen, Innendruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $-10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

2.3.3 Analyse der Reibungswirkung

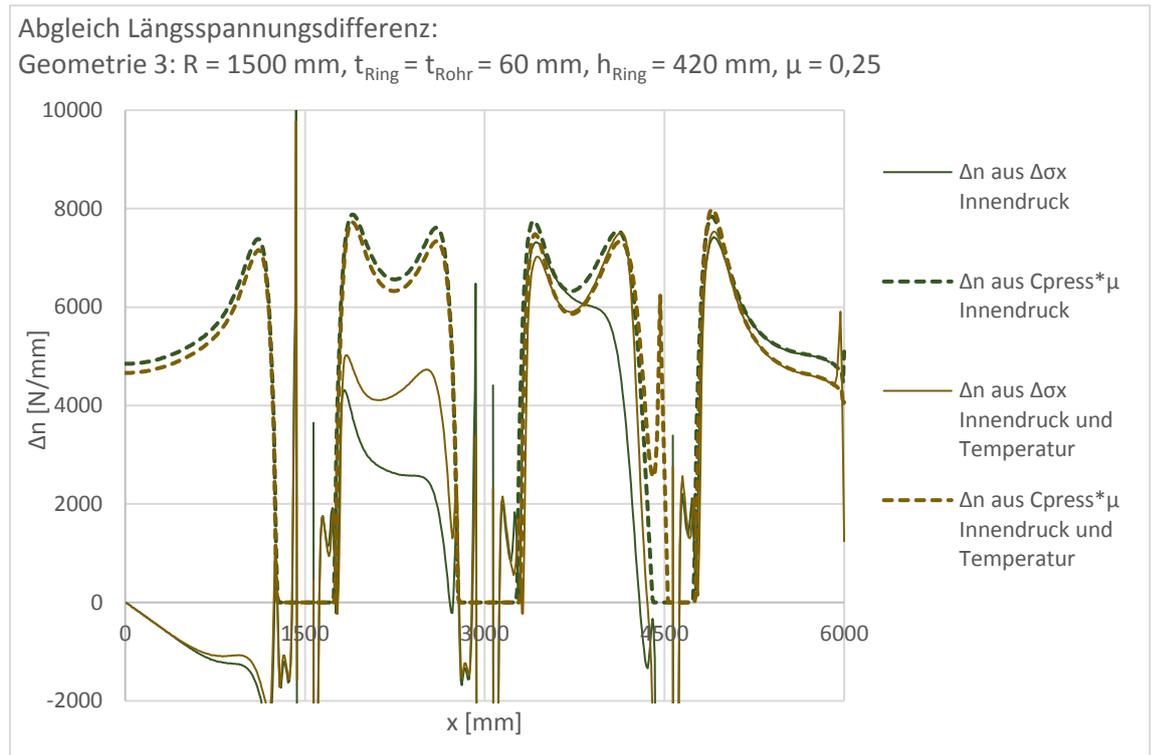


Abbildung 301 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Reibungswirkung, Innendruck  $11,72 \text{ N/mm}^2$  und gemeinsame Wirkung

2.3.4 Verformungsplots

2.3.4.1 Verformungsplot - Innendruck



Abbildung 302 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht: Innendruck

2.3.4.2 Verformungsplot - Temperatur



Abbildung 303 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht: Temperatur

2.3.4.3 Verformungsplot - Innendruck und Temperatur

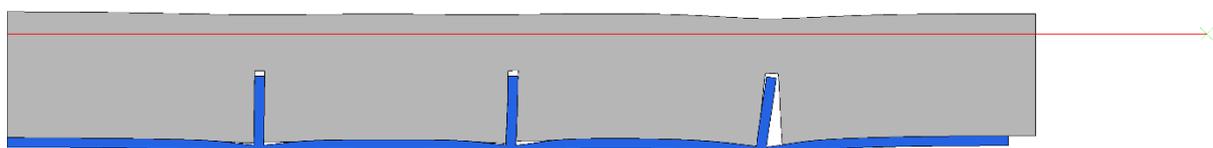


Abbildung 304 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht: Innendruck und Temperatur

---

2.3.4.4 Verformungsplot - Innendruck, Detail Schubring 3

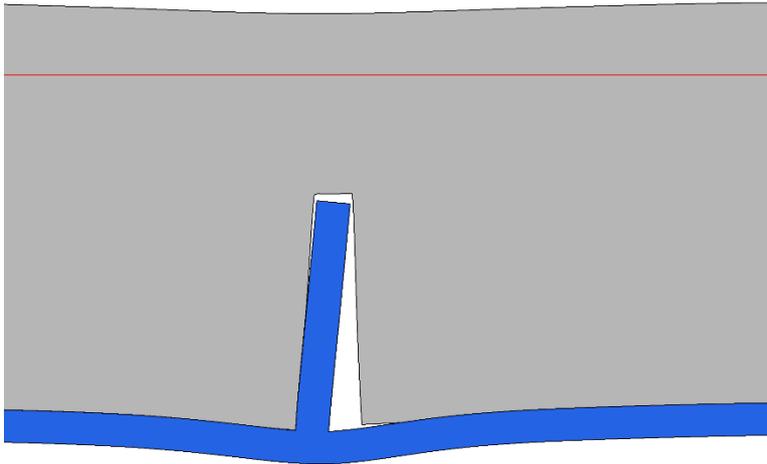


Abbildung 305 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Innendruck

---

2.3.4.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

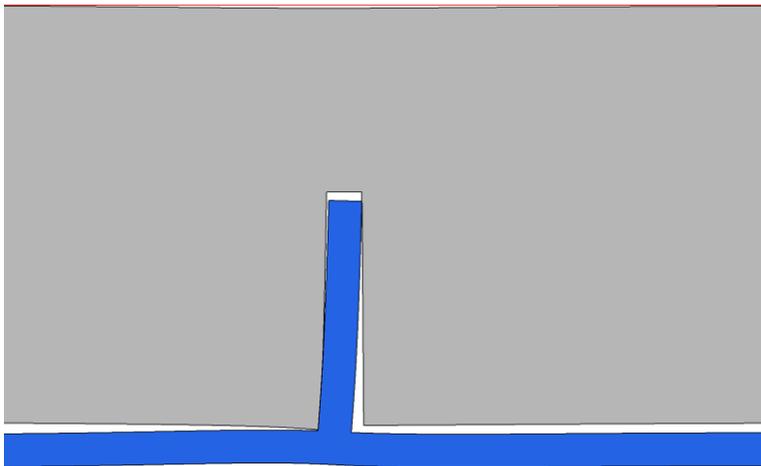


Abbildung 306 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

---

2.3.4.6 Verformungsplot - Innendruck und Temperatur, Detail Schubring 3

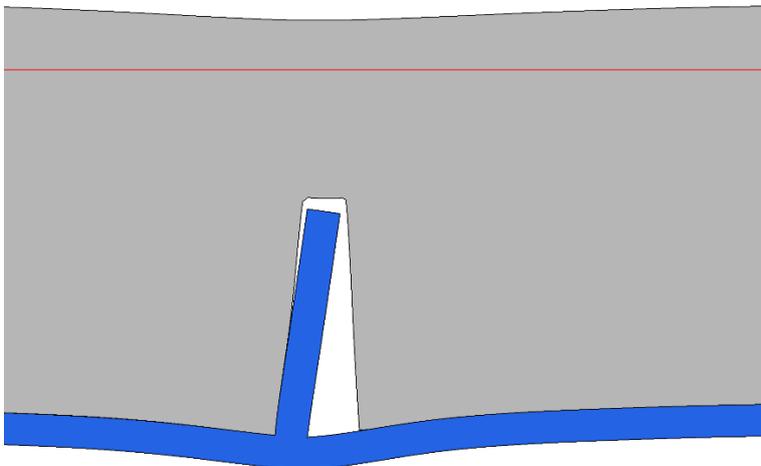


Abbildung 307 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Innendruck und Temperatur

2.3.5 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

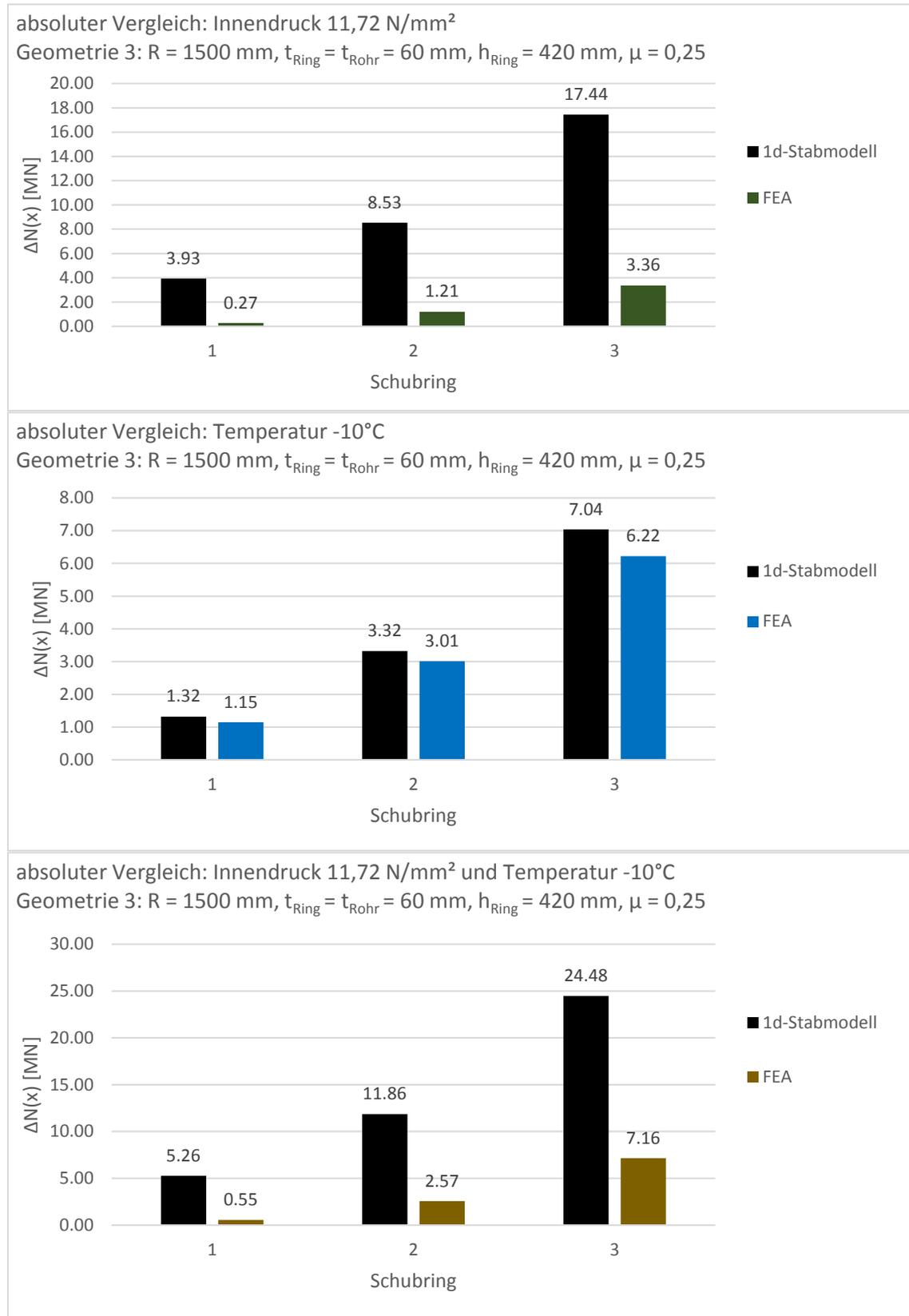


Abbildung 308 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung

2.3.6 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

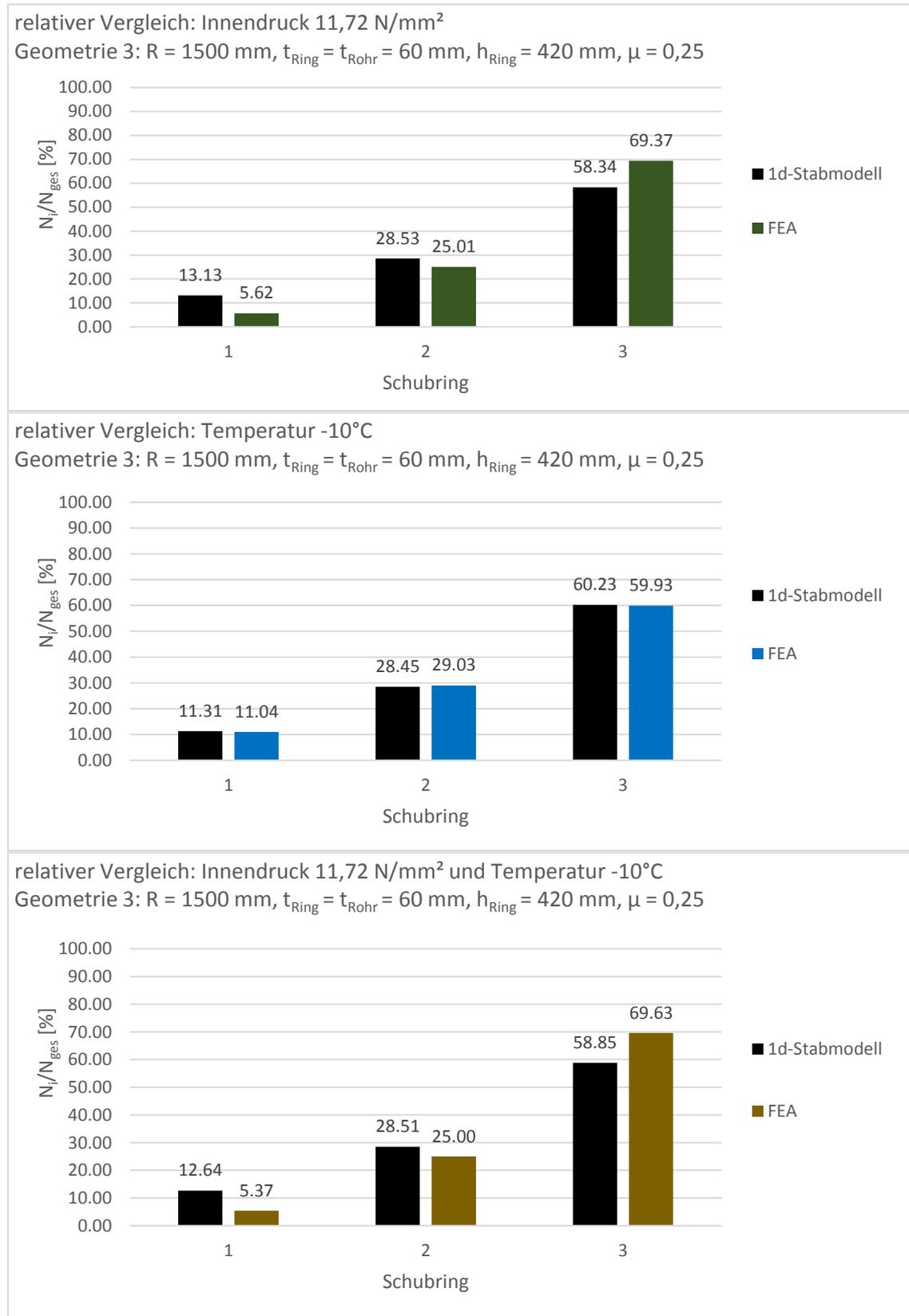


Abbildung 309 Geometrie 3, μ=0,25: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Innendruck 11,72 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur -10° und gemeinsame Wirkung



## ANHANG 3

Die in diesem Anhang präsentierten Modelle – die FEA und das 1D-Stabmodell – werden dabei anhand folgender Lastfälle und deren Zusammenwirkung verglichen:

- Außendruck  $p_{\text{außen}} = \frac{p}{2}$  laut Tabelle 14 in Kapitel 4.1.1 der Masterarbeit
- Temperatur  $\Delta T = +10^\circ\text{C}$

Die drei Geometrien, laut Tabelle 1 in Kapitel 1.3 der Masterarbeit, werden in diesem Anhang ohne Reibung  $\mu = 0$  in Kapitel 1 und mit Reibung  $\mu = 0,25$  in Kapitel 2 dargestellt. Die Vorgehensweise ist dabei gleich wie bei der Zusammenwirkung von Innendruck und Deckeldruck in der Masterarbeit in Kapitel 4 und Kapitel 5 und wird im Anhang nicht mehr erläutert.

## 1 Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung ohne Reibung

### 1.1 Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung - Geometrie 1

#### 1.1.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

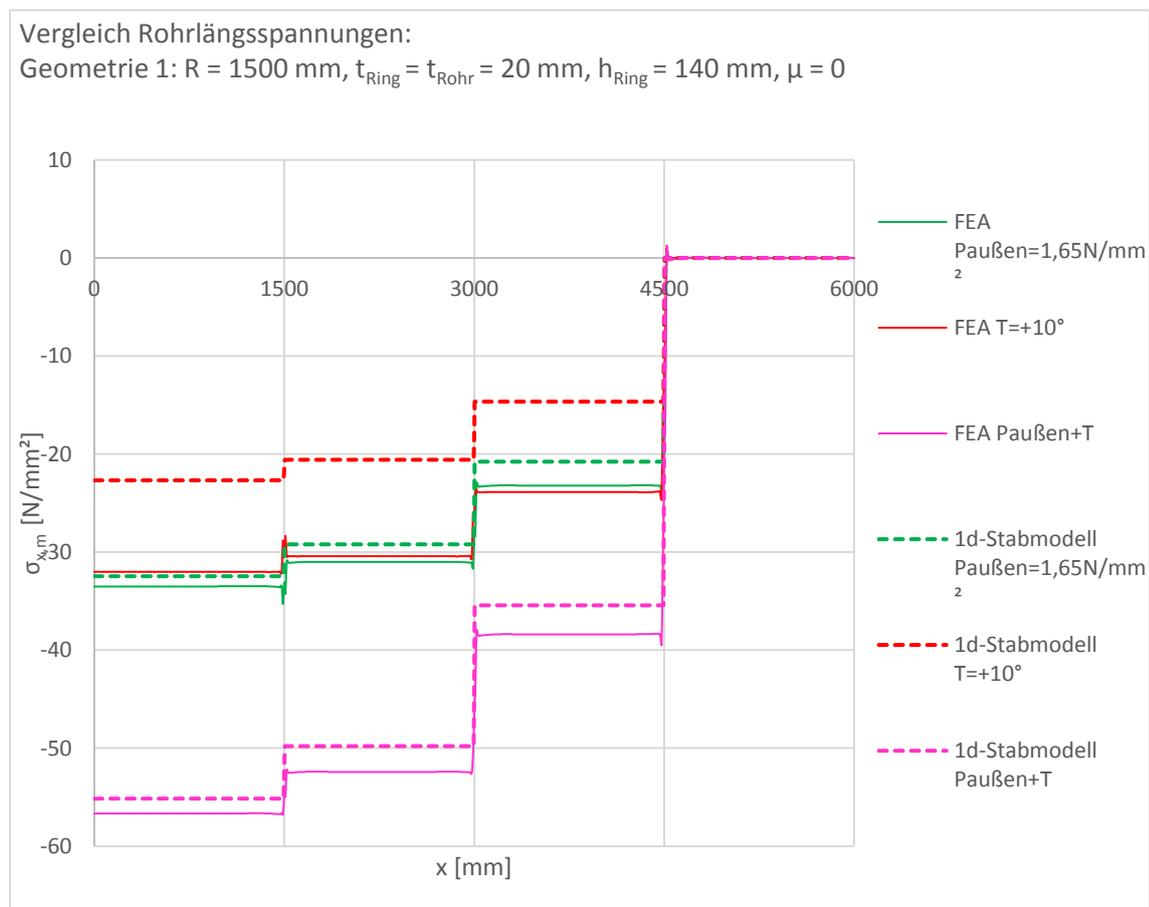


Abbildung 310 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Rohrlängsspannungen, Außendruck  $1,65 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $+10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Außendruck und Erwärmung

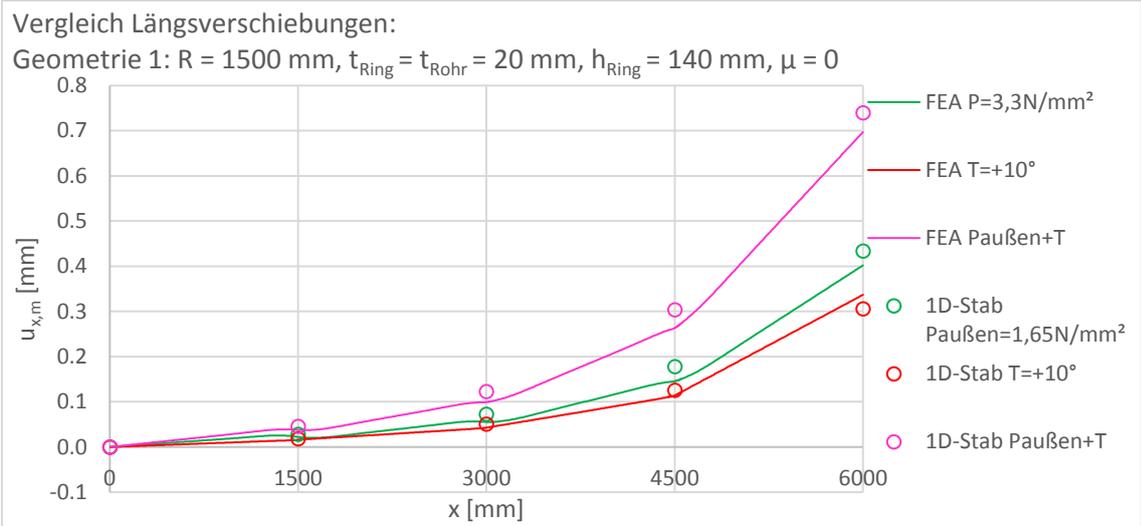


Abbildung 311 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Längsverschiebungen, Außendruck  $1,65 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $+10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Außendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Außendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	-6.31	-6.12	-3.1%	-6.04	-4.28	-29%
<b>Schubring 1</b>	1445-1555	-0.46	-0.61	32%	-0.30	-0.39	31%
<b>Schubring 2</b>	2945-3055	-1.46	-1.59	8.9%	-1.23	-1.12	-9.0%
<b>Schubring 3</b>	4445-4555	-4.35	-3.92	-10%	-4.49	-2.77	-38%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-6.28</b>	<b>-6.12</b>	<b>-2.5%</b>	<b>-6.02</b>	<b>-4.28</b>	<b>-29%</b>

Tabelle 52 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte, Außendruck  $1,65 \text{ N/mm}^2$  und Temperatur  $+10^\circ$

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
<b>Auflager</b>	0	-10.68	-10.39	-2.7%	-12.35	16%
<b>Schubring 1</b>	1445-1555	-0.79	-1.01	27%	-0.77	-3.7%
<b>Schubring 2</b>	2945-3055	-2.63	-2.71	2.9%	-2.69	2.2%
<b>Schubring 3</b>	4445-4555	-7.19	-6.68	-7.1%	-8.84	23%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-10.62</b>	<b>-10.39</b>	<b>-2.1%</b>	<b>-12.29</b>	<b>16%</b>

Tabelle 53 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

1.1.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

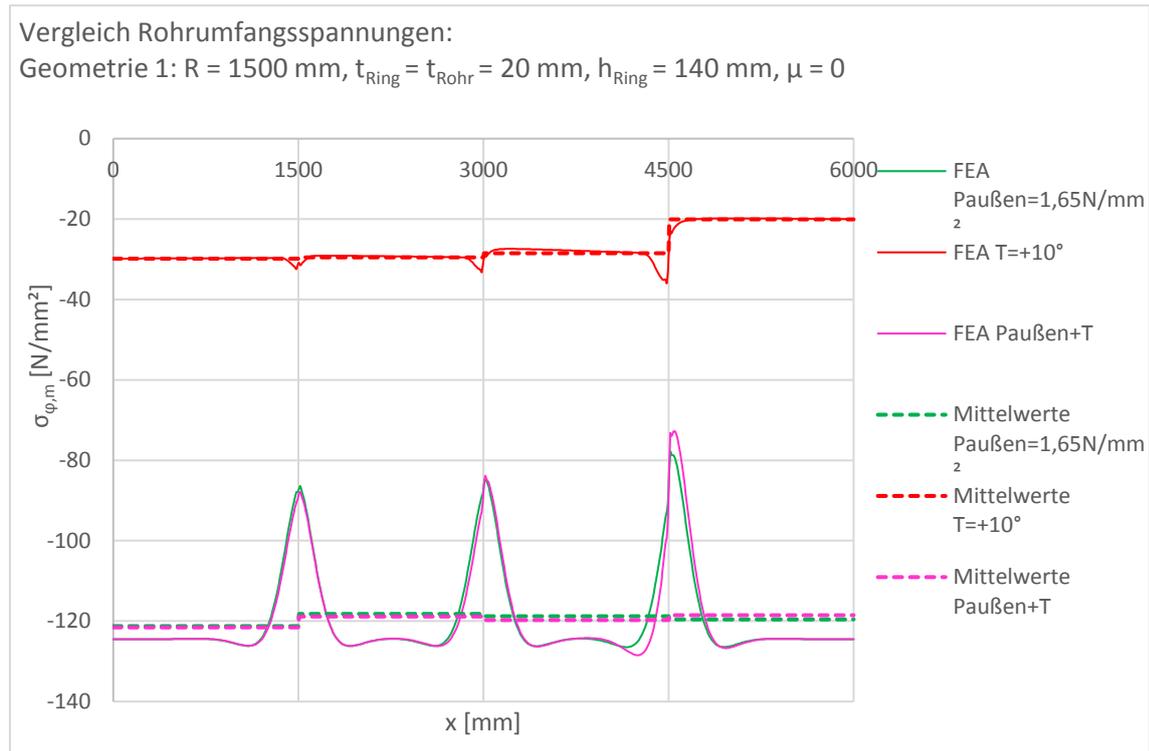


Abbildung 312 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Rohrumfangsspannungen, Außendruck 1,65 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

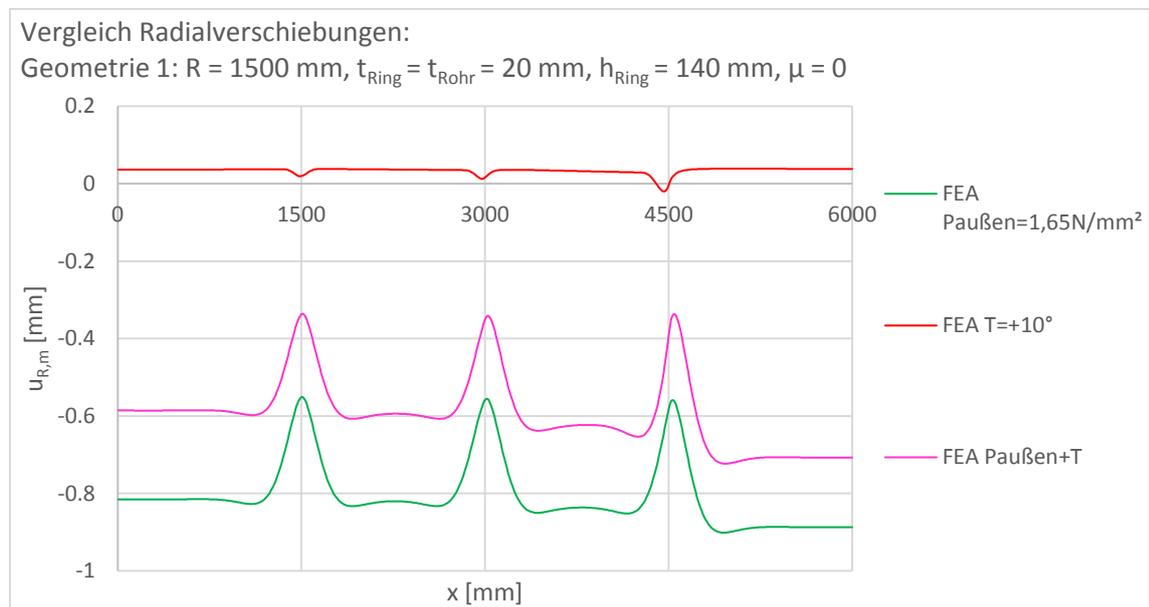


Abbildung 313 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Radialverschiebungen, Außendruck 1,65 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

## 1.1.3 Verformungsplots

### 1.1.3.1 Verformungsplot - Außendruck

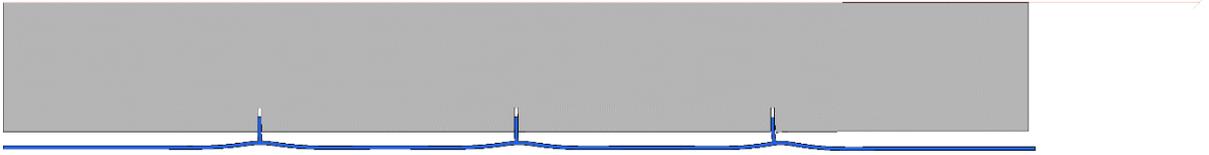


Abbildung 314 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Außendruck

### 1.1.3.2 Verformungsplot - Temperatur

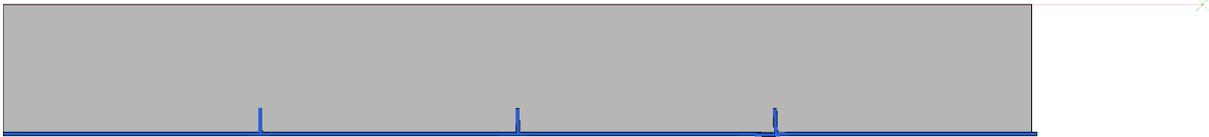


Abbildung 315 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur

### 1.1.3.3 Verformungsplot - Außendruck und Temperatur



Abbildung 316 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Außendruck und Temperatur

1.1.3.4 Verformungsplot - Außendruck, Detail Schubring 3

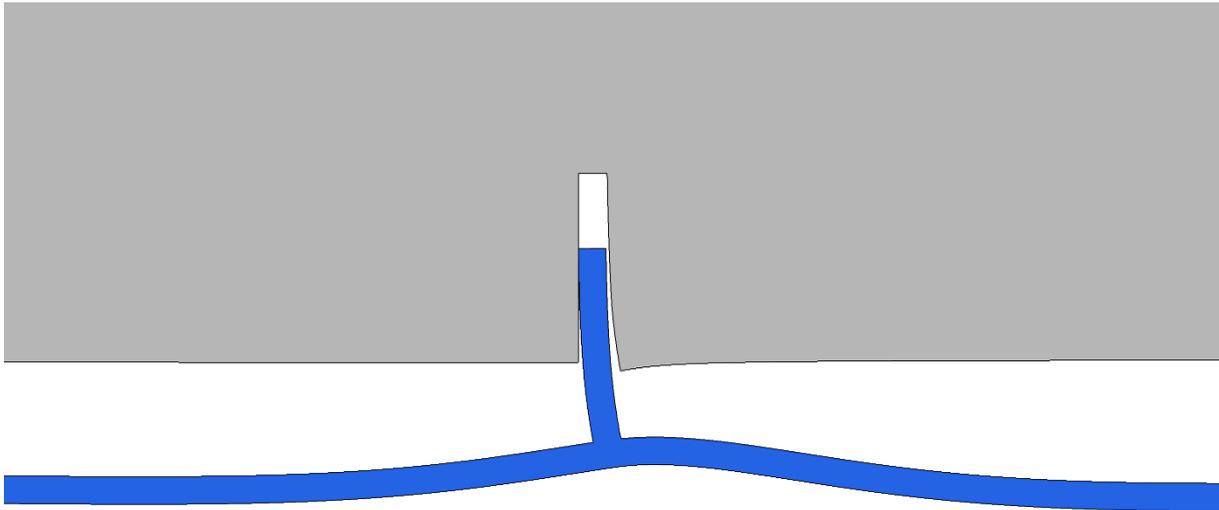


Abbildung 317 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Deckel- und Innendruck

1.1.3.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

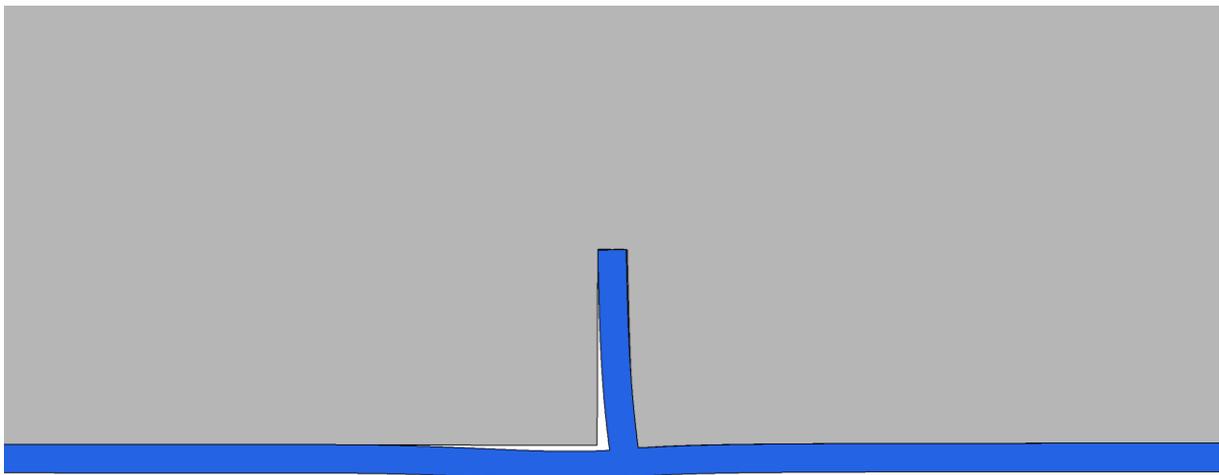


Abbildung 318 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

1.1.3.6 Verformungsplot - Außendruck und Temperatur, Detail Schubring 3

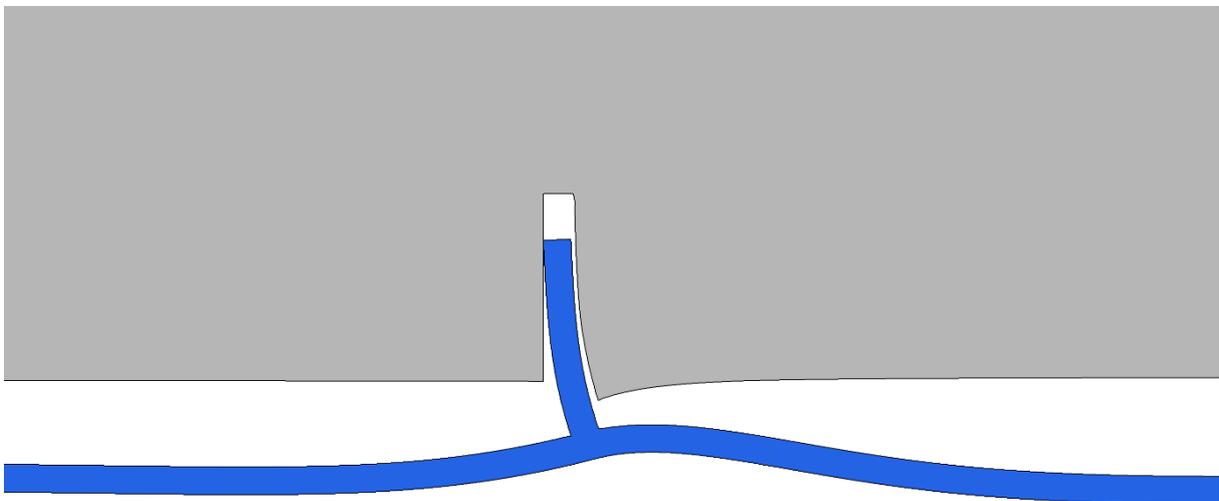


Abbildung 319 Geometrie 1,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Überlagerung: Gesamtdruck und Temperatur

1.1.4 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

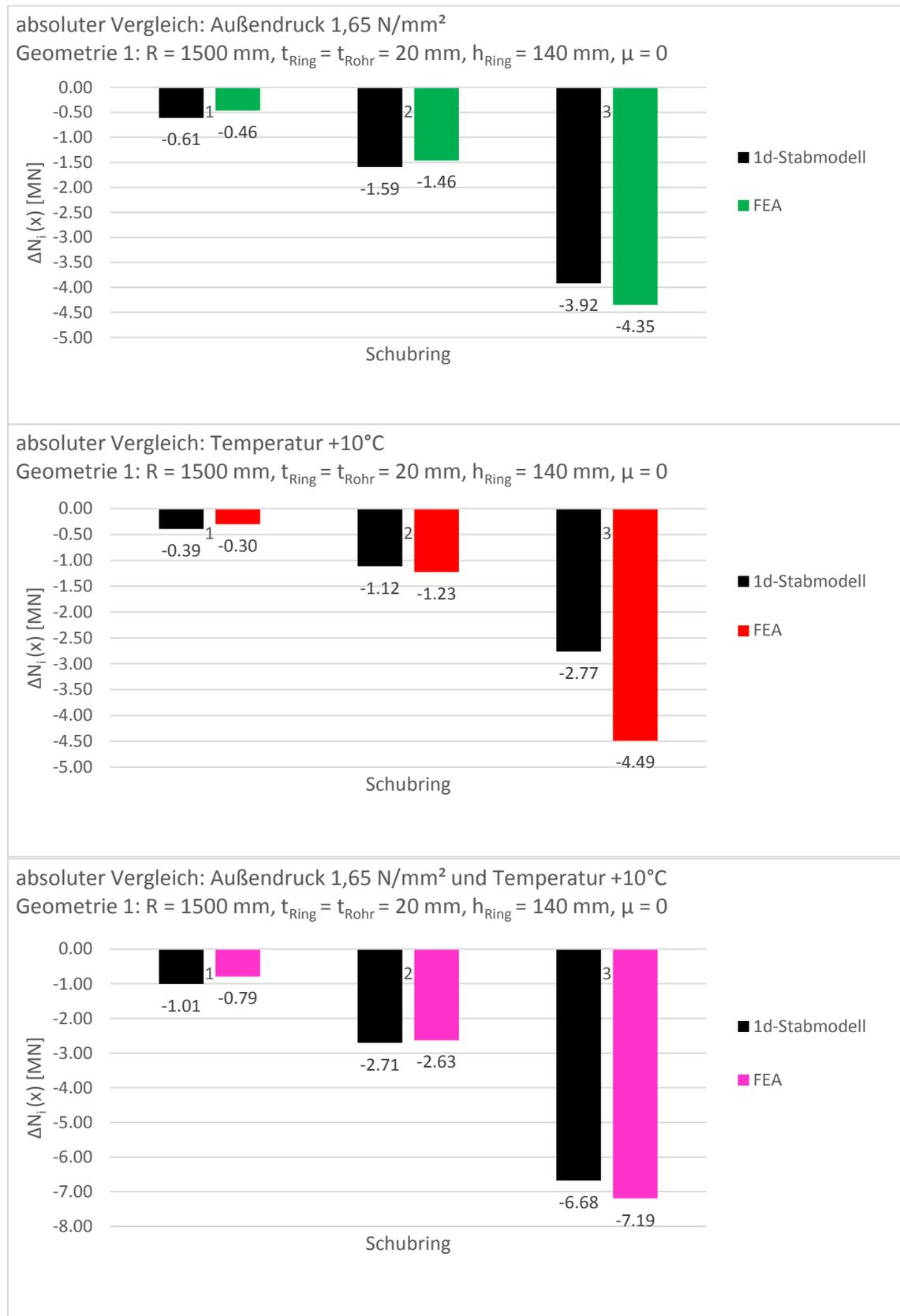


Abbildung 320 Geometrie 1, μ=0: absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Außendruck 1,65 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

1.1.5 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

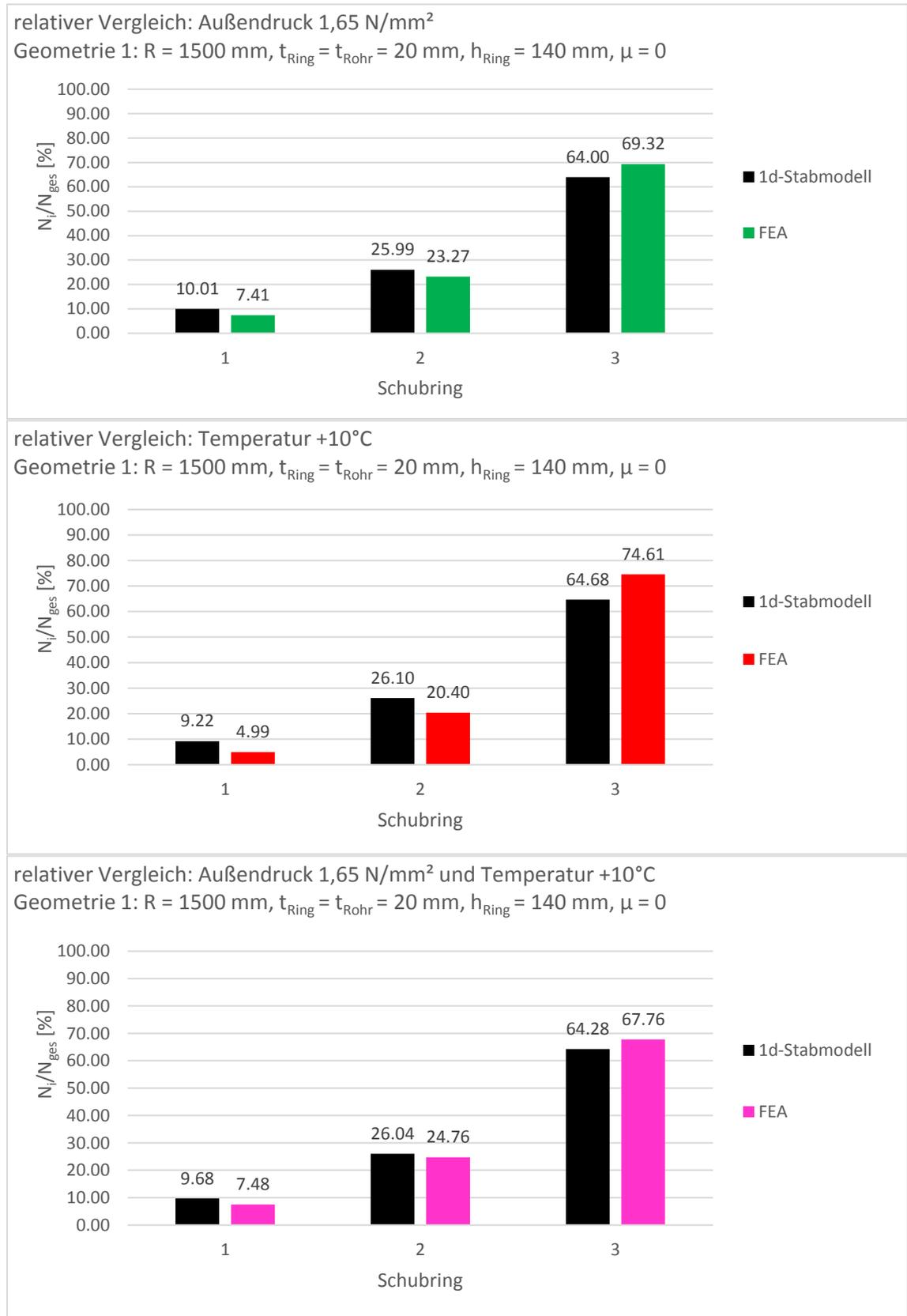


Abbildung 321 Geometrie 1, μ=0: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Außendruck 1,65 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

1.2 Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung - Geometrie 2

1.2.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

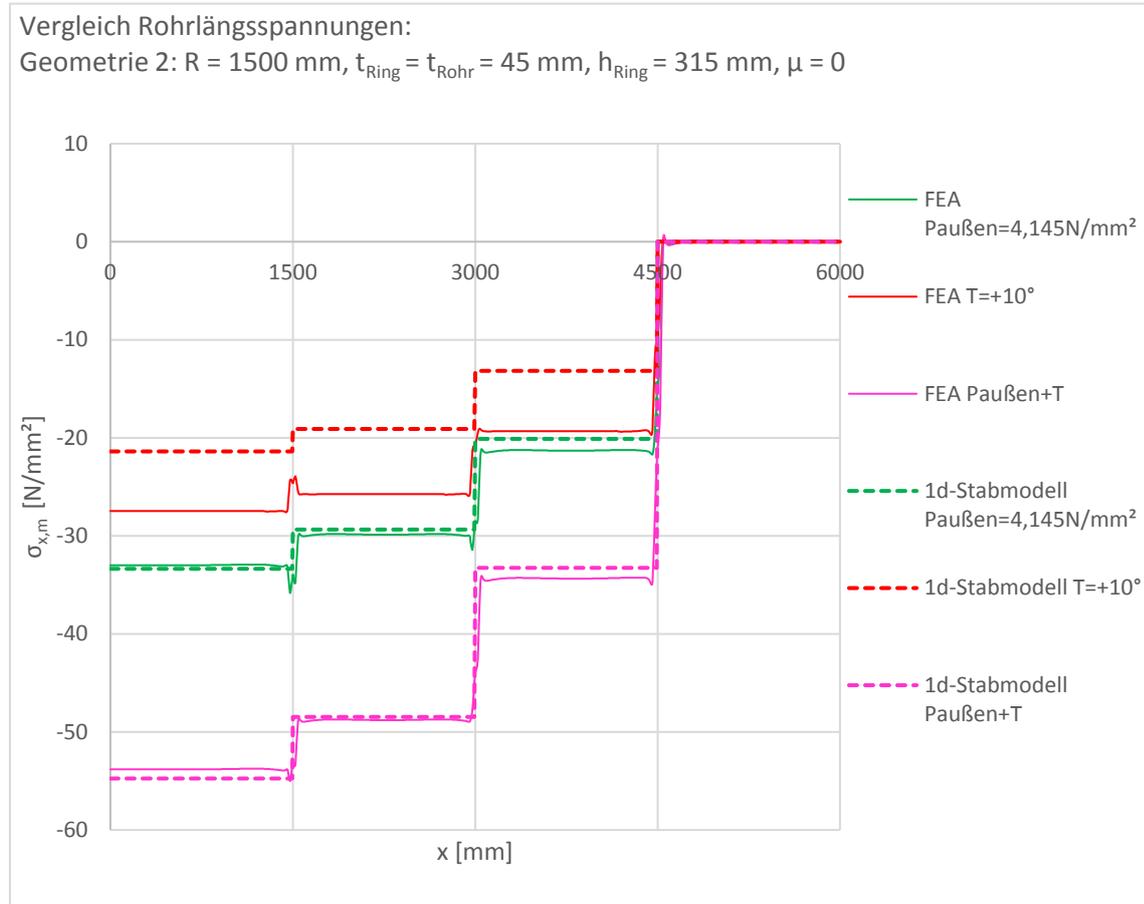


Abbildung 322 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Rohrlängsspannungen, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

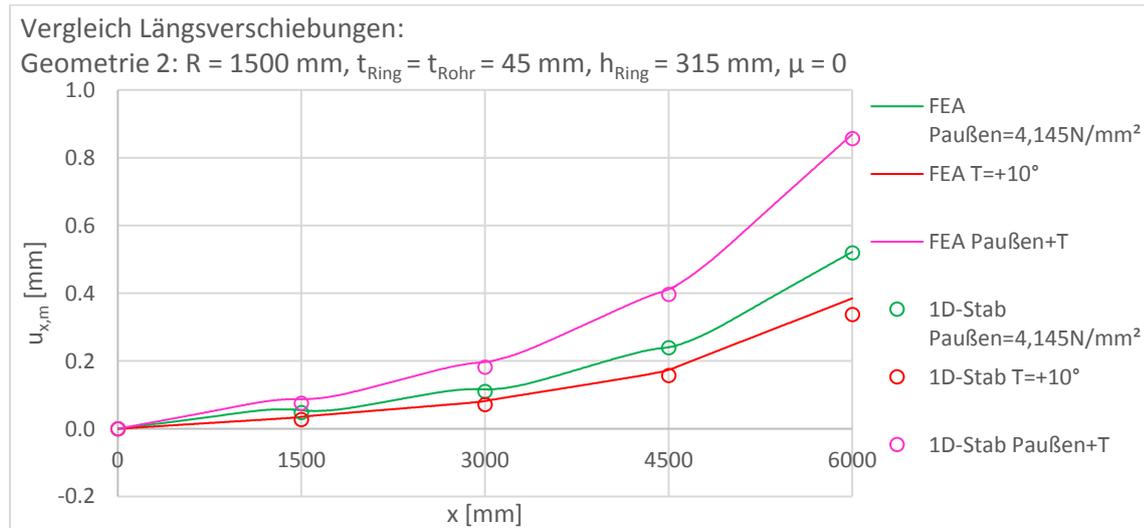


Abbildung 323 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Längsverschiebungen, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Außendruck und Erwärmung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Außendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Außendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	-14.00	-14.15	1.1%	-11.65	-9.07	-22%
<b>Schubring 1</b>	1400-1600	-1.30	-1.70	31%	-0.73	-0.97	33%
<b>Schubring 2</b>	2900-3100	-3.63	-3.92	7.9%	-2.72	-2.52	-7.3%
<b>Schubring 3</b>	4400-4600	-9.17	-8.53	-7.0%	-8.28	-5.58	-33%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-14.10</b>	<b>-14.15</b>	<b>0.34%</b>	<b>-11.72</b>	<b>-9.07</b>	<b>-23%</b>

Tabelle 54 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur +10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
<b>Auflager</b>	0	-22.83	-23.22	1.7%	-25.65	12%
<b>Schubring 1</b>	1400-1600	-2.10	-2.67	27%	-2.03	-3.5%
<b>Schubring 2</b>	2900-3100	-6.11	-6.44	5.4%	-6.35	4.0%
<b>Schubring 3</b>	4400-4600	-14.77	-14.11	-4.4%	-17.45	18%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-22.98</b>	<b>-23.22</b>	<b>1.1%</b>	<b>-25.83</b>	<b>12%</b>

Tabelle 55 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

1.2.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

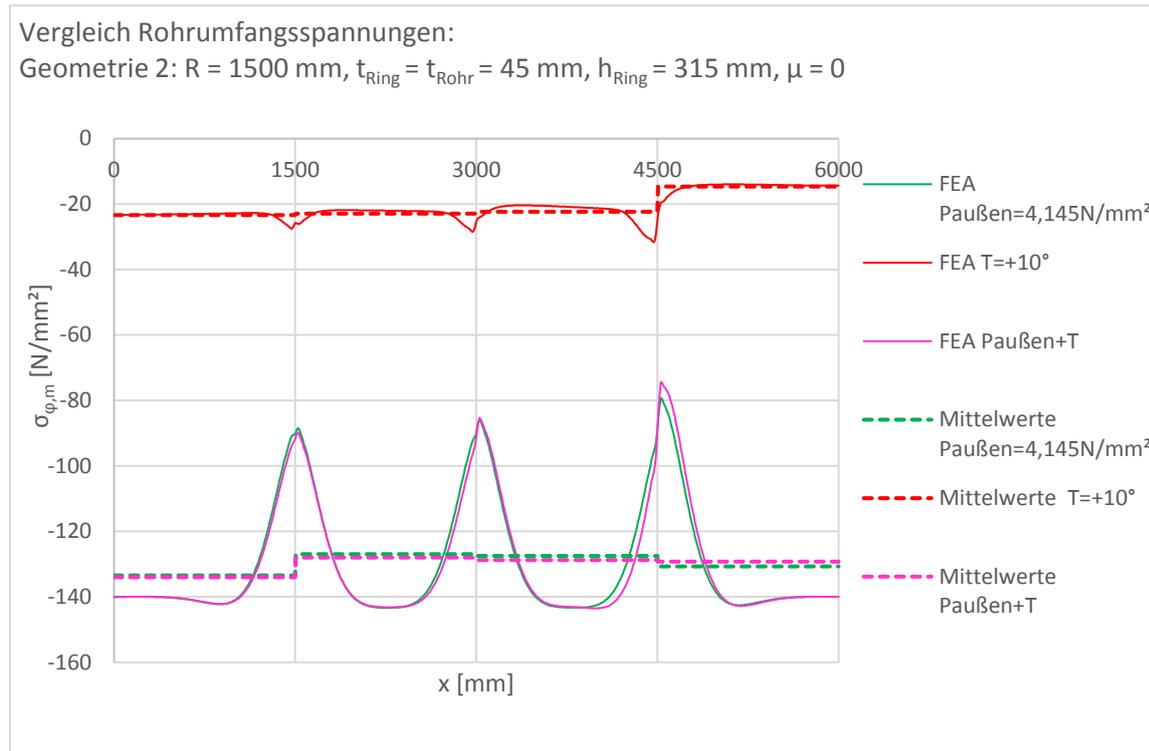


Abbildung 324 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Rohrumfangsspannungen, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

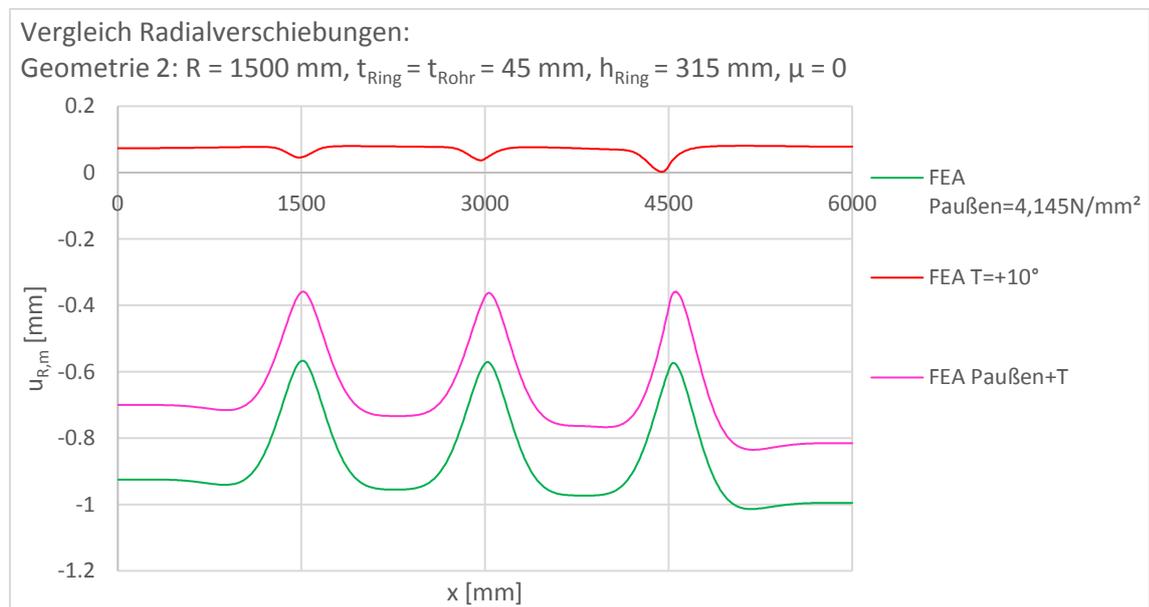


Abbildung 325 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Radialverschiebungen, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

## 1.2.3 Verformungsplots

### 1.2.3.1 Verformungsplot - Außendruck

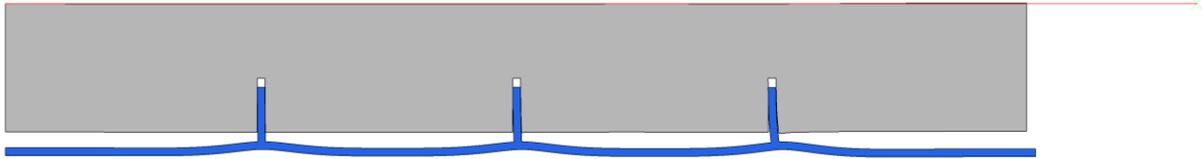


Abbildung 326 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Außendruck

### 1.2.3.2 Verformungsplot - Temperatur

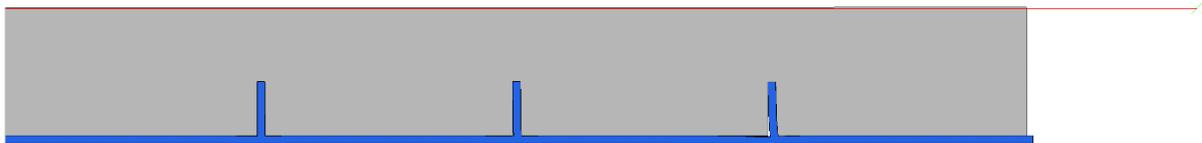


Abbildung 327 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur

### 1.2.3.3 Verformungsplot - Außendruck und Temperatur



Abbildung 328 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Außendruck und Temperatur

---

1.2.3.4 Verformungsplot - Außendruck, Detail Schubring 3

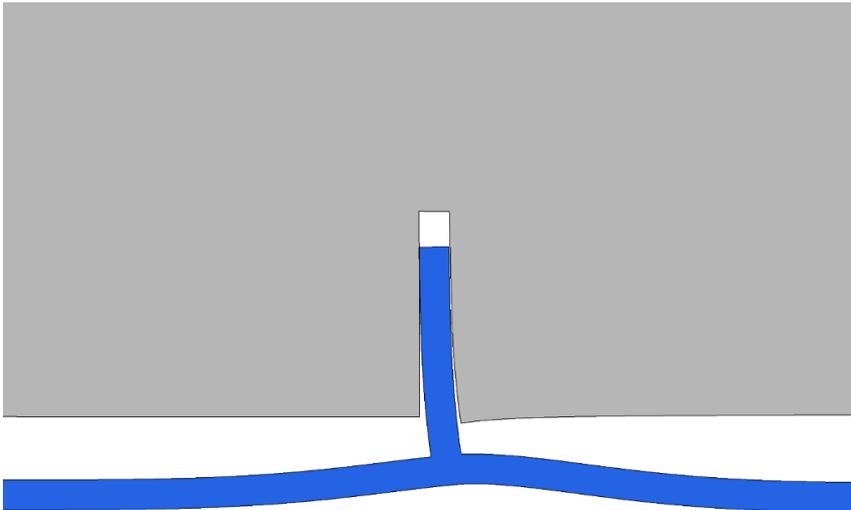


Abbildung 329 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Außendruck

---

1.2.3.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

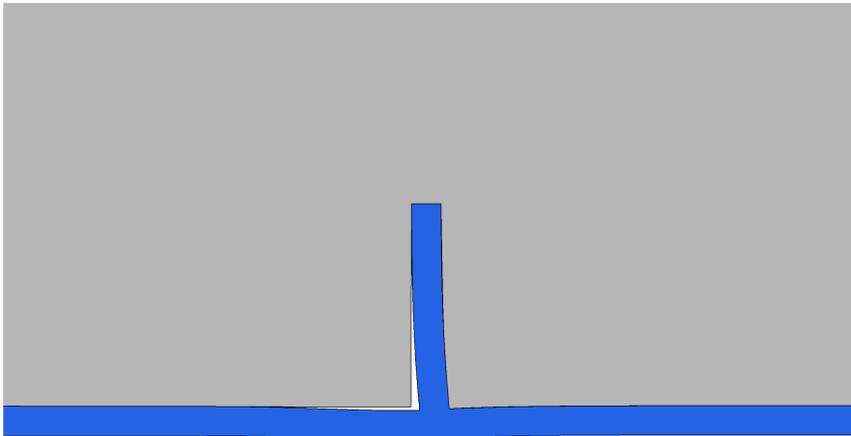


Abbildung 330 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

---

1.2.3.6 Verformungsplot - Gesamtdruck und Temperatur, Detail Schubring 3

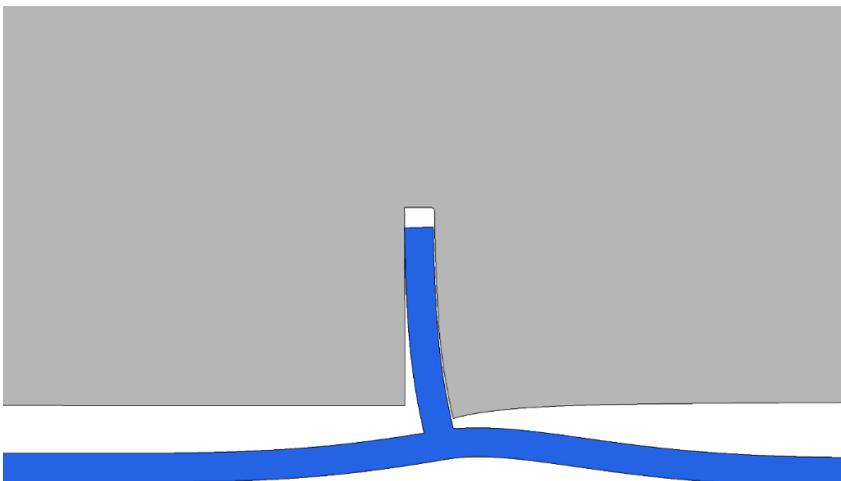


Abbildung 331 Geometrie 2,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Überlagerung: Außendruck und Temperatur

1.2.4 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

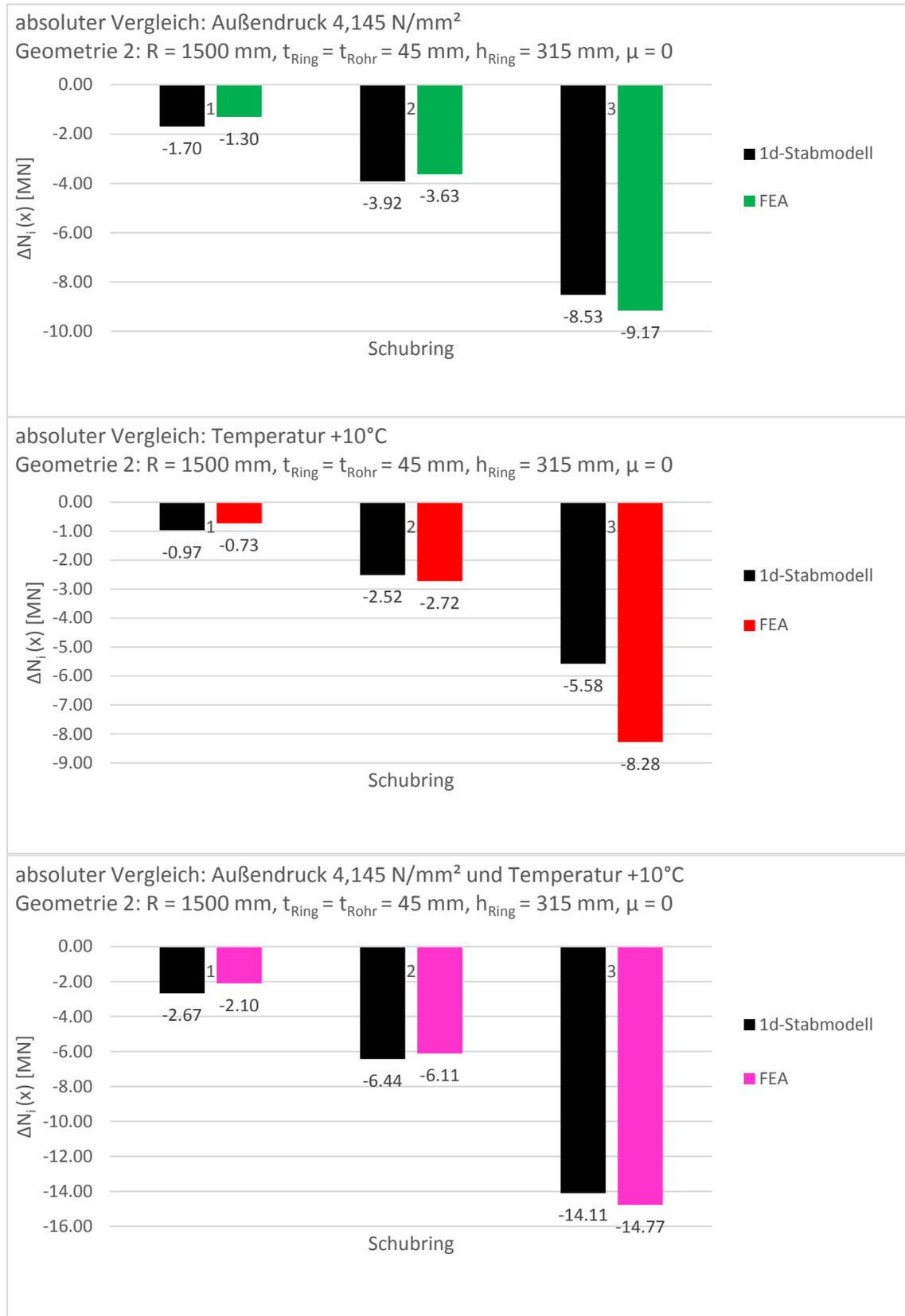


Abbildung 332 Geometrie 2,  $\mu=0$ : absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

1.2.5 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

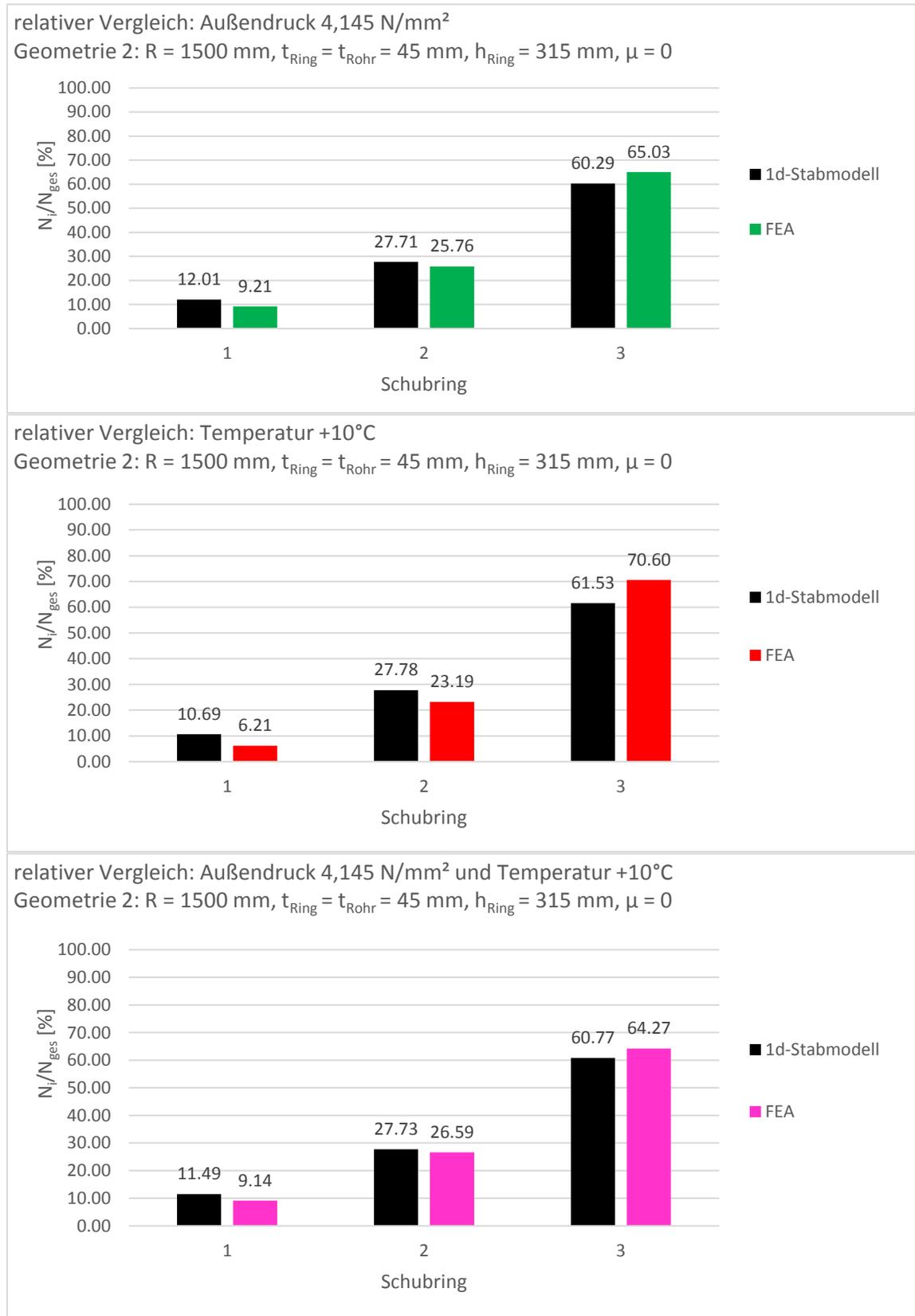


Abbildung 333 Geometrie 2,  $\mu=0$ : relativer Vergleich der Schubringkräfte, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

1.3 Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung - Geometrie 3

1.3.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

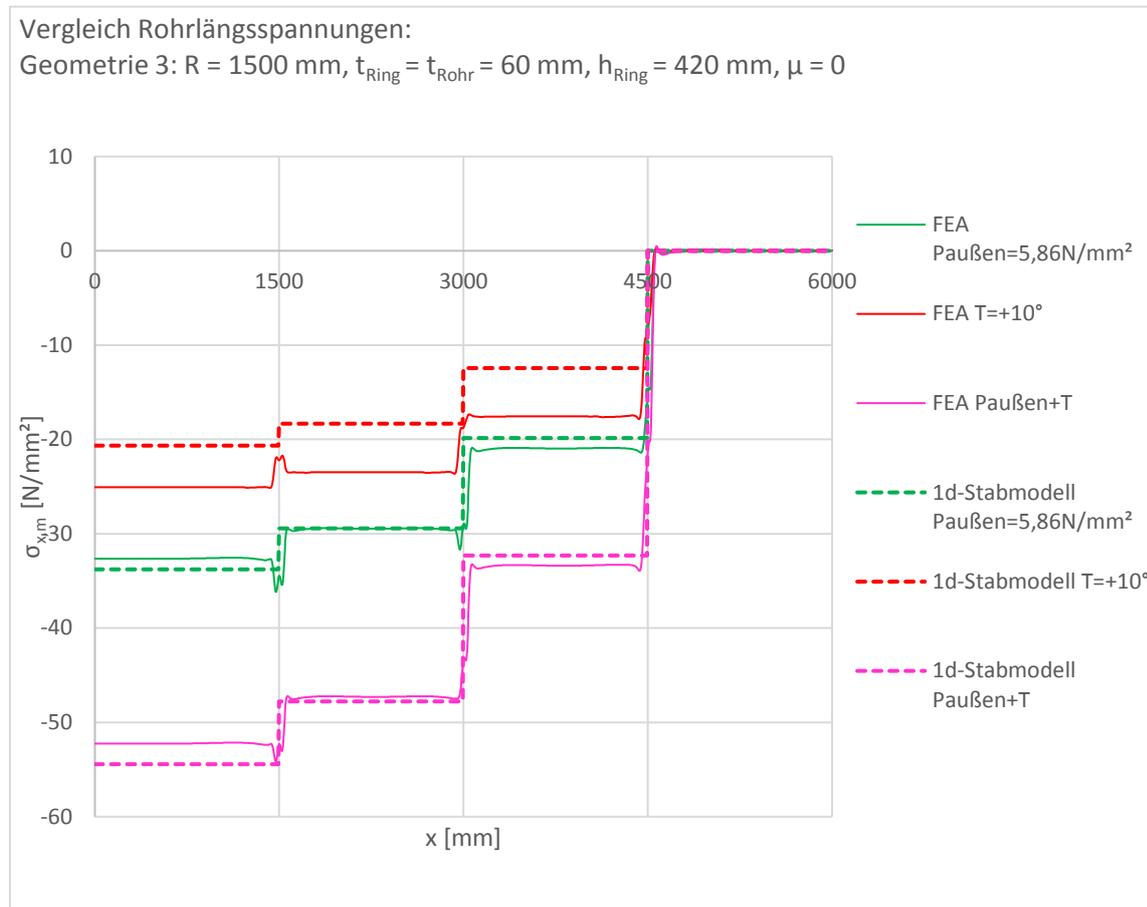


Abbildung 334 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Rohrlängsspannungen, Außendruck 5,86 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

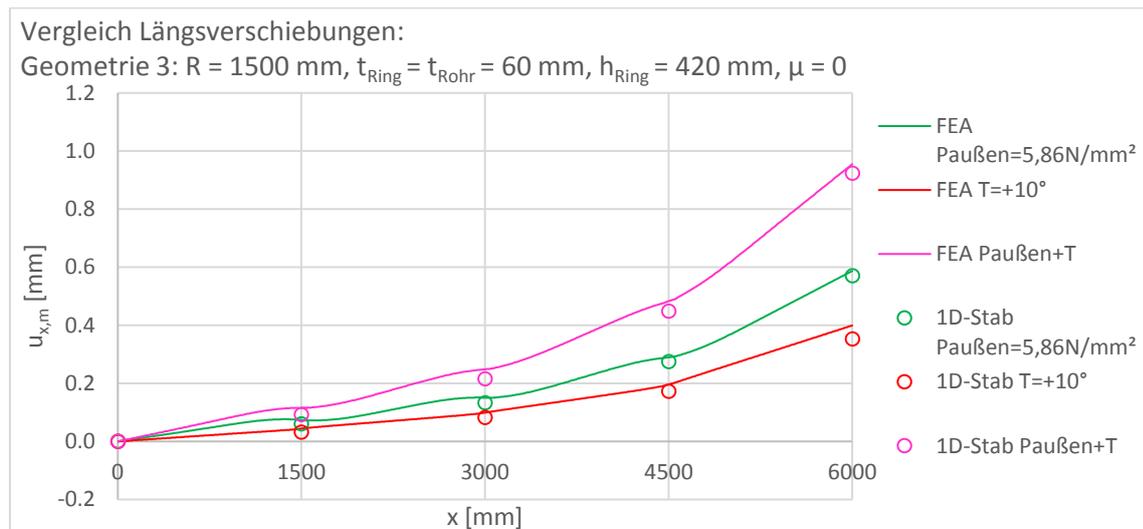


Abbildung 335 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Längsverschiebungen, Außendruck 5,86 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Außendruck und Erwärmung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Außendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Außendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
<b>Auflager</b>	0	-18.47	-19.10	3.4%	-14.17	-11.68	-18%
<b>Schubring 1</b>	1300-1700	-1.76	-2.45	39%	-0.89	-1.32	49%
<b>Schubring 2</b>	2800-3200	-4.77	-5.42	14%	-3.35	-3.32	-0.75%
<b>Schubring 3</b>	4300-4700	-11.78	-11.23	-4.6%	-9.91	-7.04	-29%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-18.31</b>	<b>-19.10</b>	<b>4.4%</b>	<b>-14.14</b>	<b>-11.68</b>	<b>-17%</b>

Tabelle 56 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte, Außendruck 5,86 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur +10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
<b>Auflager</b>	0	-29.55	-30.78	4.2%	-32.64	10%
<b>Schubring 1</b>	1300-1700	-2.76	-3.77	37%	-2.64	-4.1%
<b>Schubring 2</b>	2800-3200	-7.80	-8.75	12%	-8.12	4.1%
<b>Schubring 3</b>	4300-4700	-18.73	-18.27	-2.5%	-21.68	16%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-29.28</b>	<b>-30.78</b>	<b>5.1%</b>	<b>-32.45</b>	<b>11%</b>

Tabelle 57 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

1.3.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

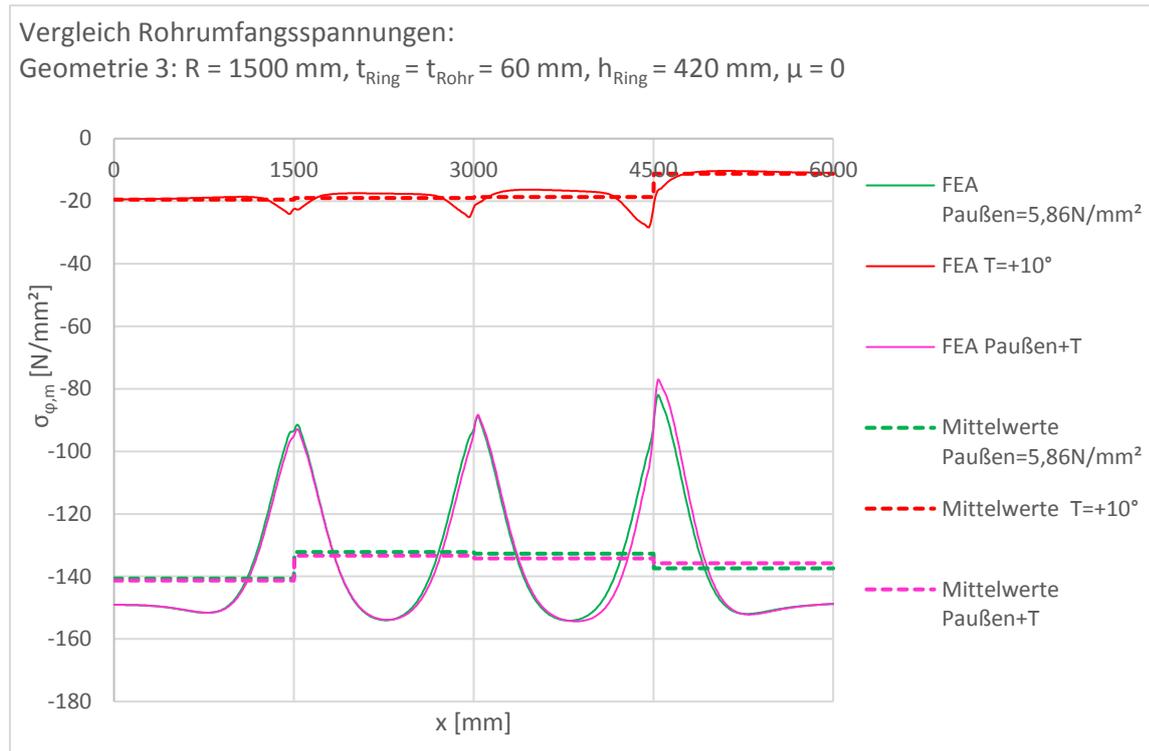


Abbildung 336 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Umfangsspannungsvergleich, Außendruck 5,86 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

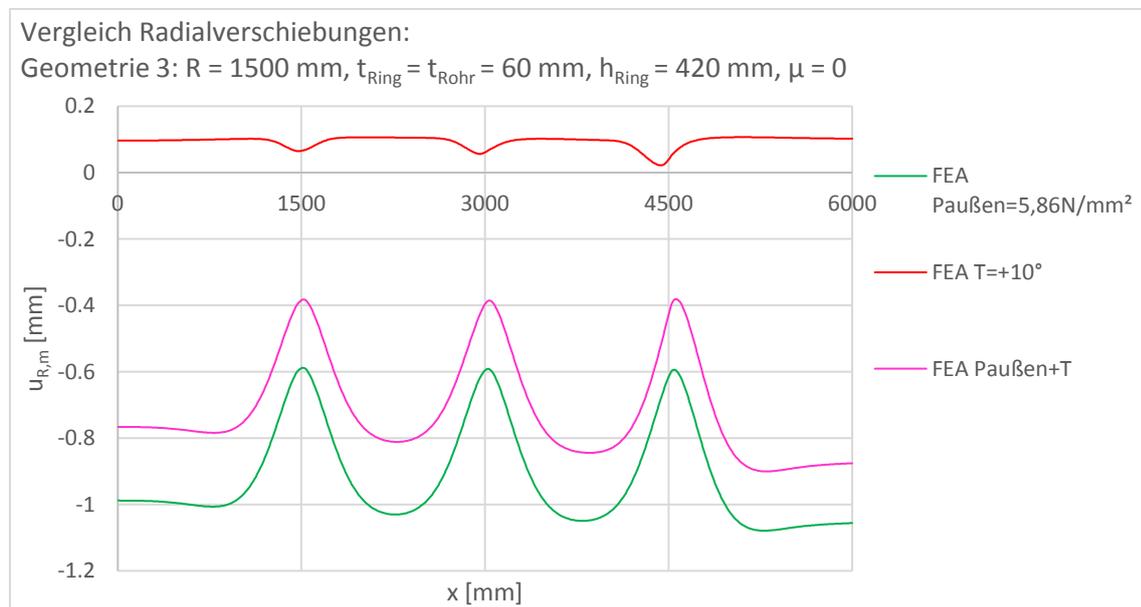


Abbildung 337 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Radialverschiebungen, Außendruck 5,86 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

## 1.3.3 Verformungsplots

### 1.3.3.1 Verformungsplot - Außendruck

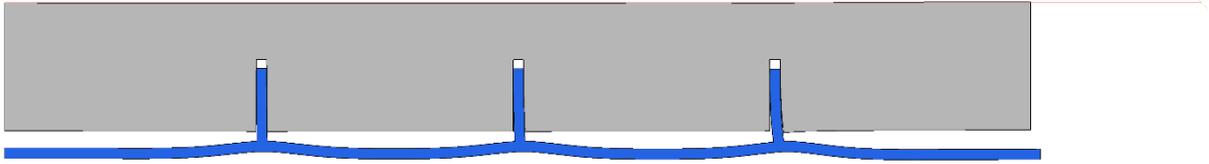


Abbildung 338 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Außendruck

### 1.3.3.2 Verformungsplot - Temperatur

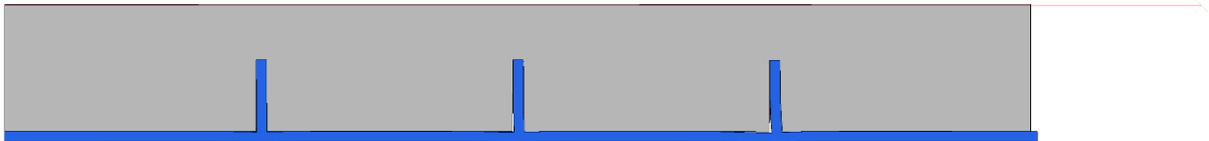


Abbildung 339 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur

### 1.3.3.3 Verformungsplot - Außendruck und Temperatur

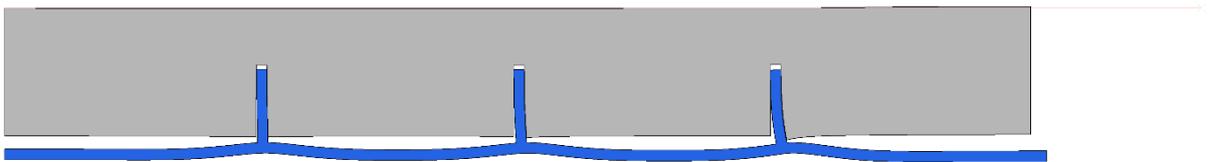


Abbildung 340 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Außendruck und Temperatur

---

1.3.3.4 Verformungsplot - Außendruck, Detail Schubring 3

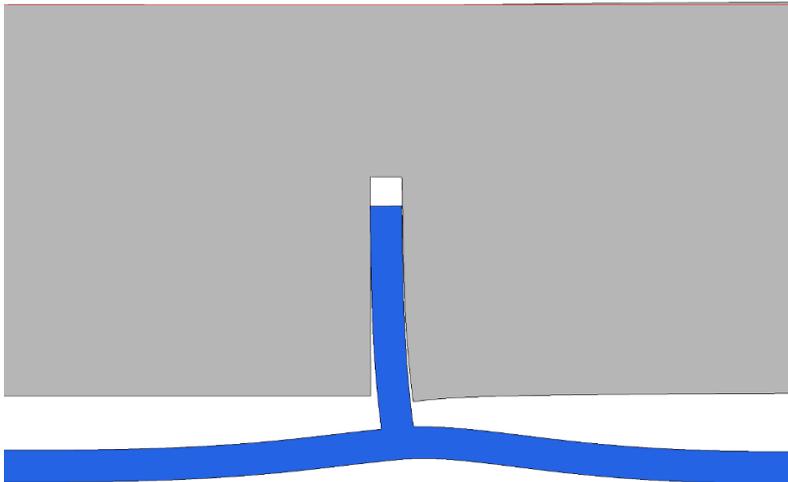


Abbildung 341 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Außendruck

---

1.3.3.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

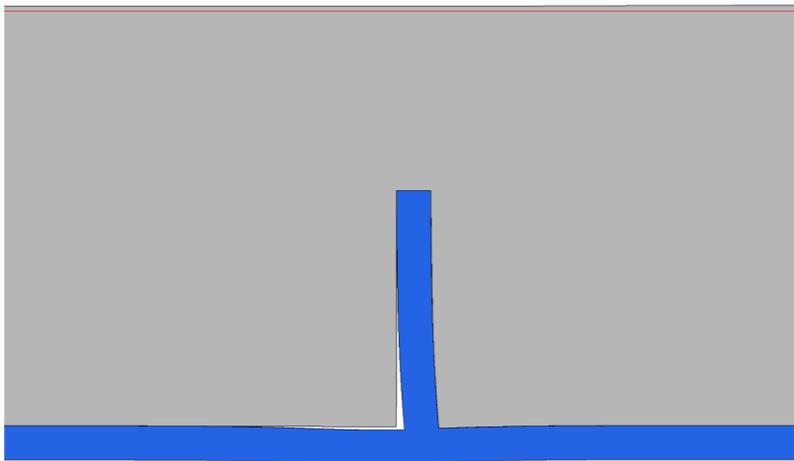


Abbildung 342 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

---

1.3.3.6 Verformungsplot - Außendruck und Temperatur, Detail Schubring 3

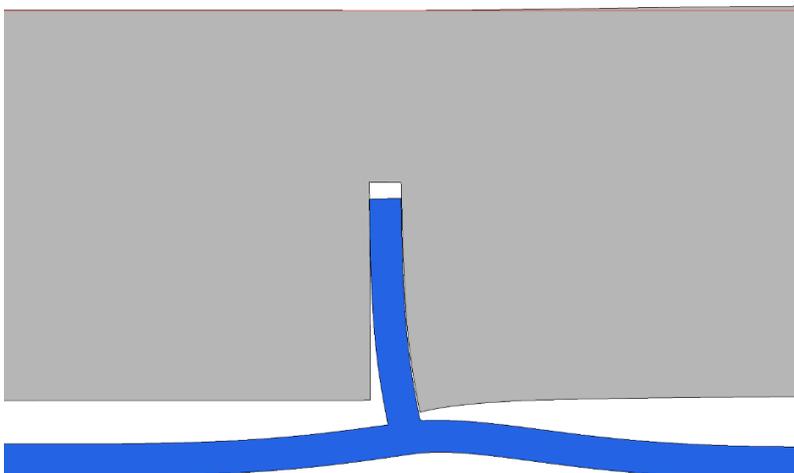


Abbildung 343 Geometrie 3,  $\mu=0$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Außendruck und Temperatur

1.3.4 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

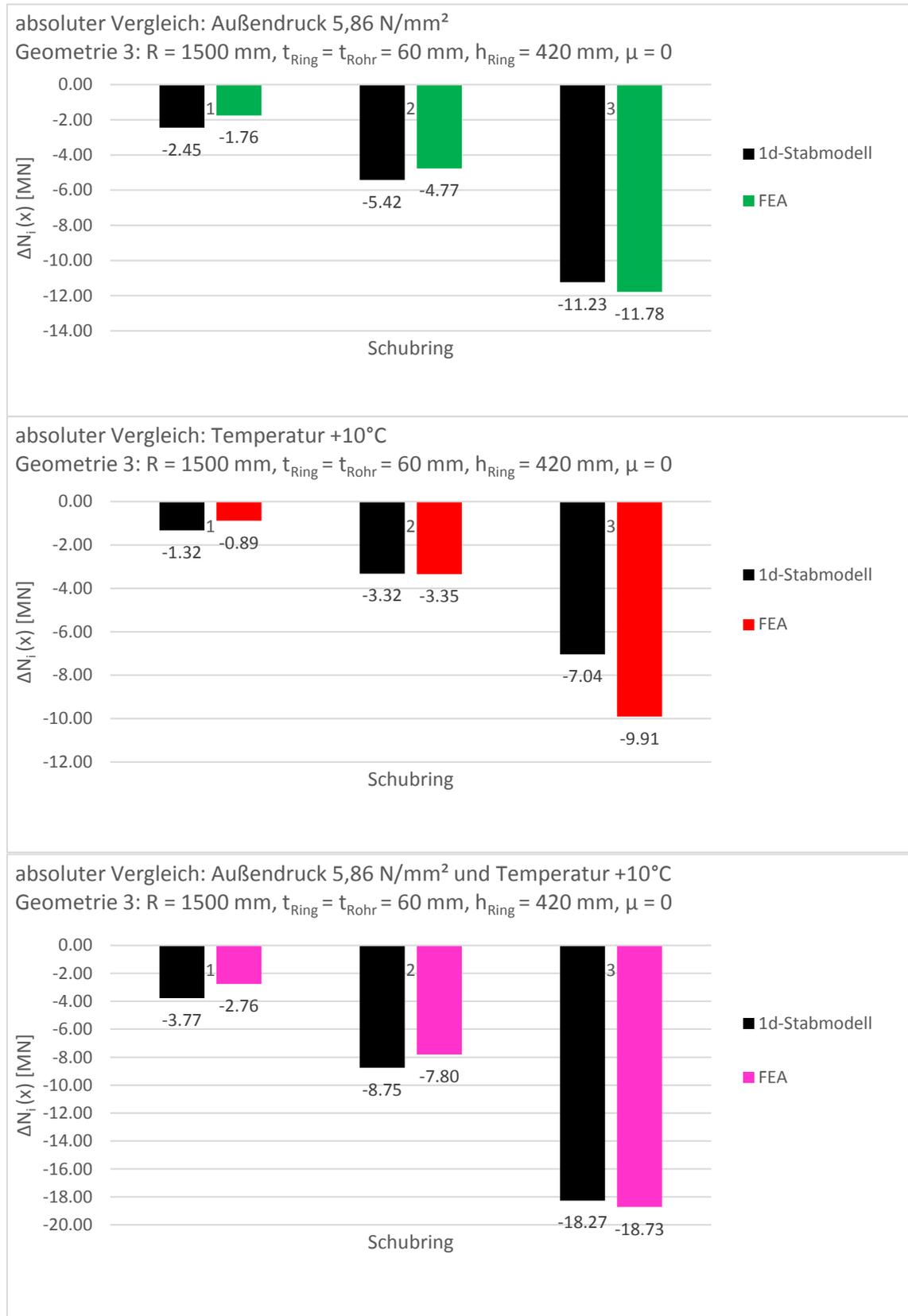


Abbildung 344 Geometrie 3,  $\mu=0$ : absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Außendruck 5,86 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

1.3.5 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

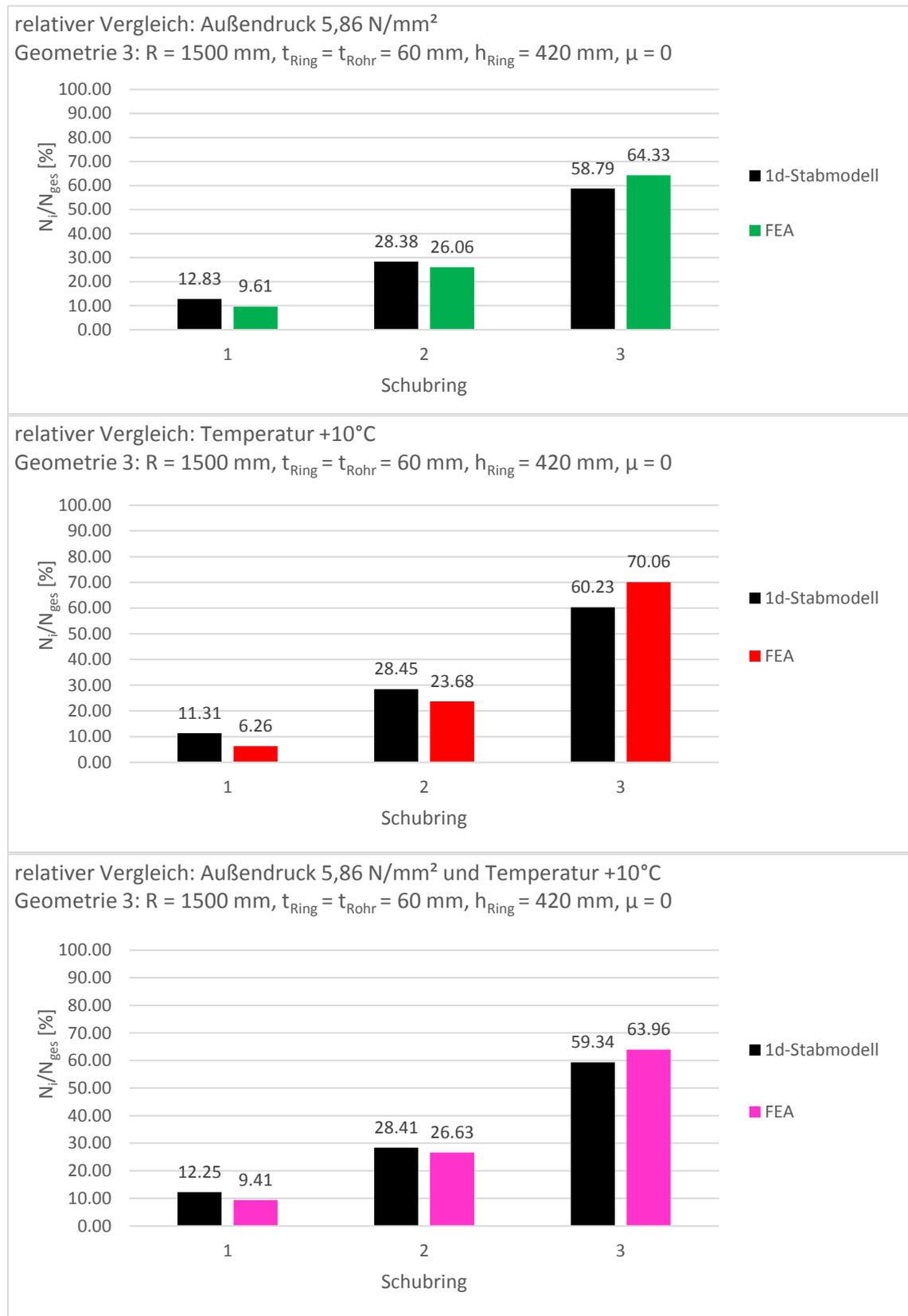


Abbildung 345 Geometrie 3,  $\mu=0$ : relativer Vergleich der Schubringkräfte, Außendruck 5,86 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

2 Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung mit Reibung

2.1 Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung - Geometrie 1

2.1.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

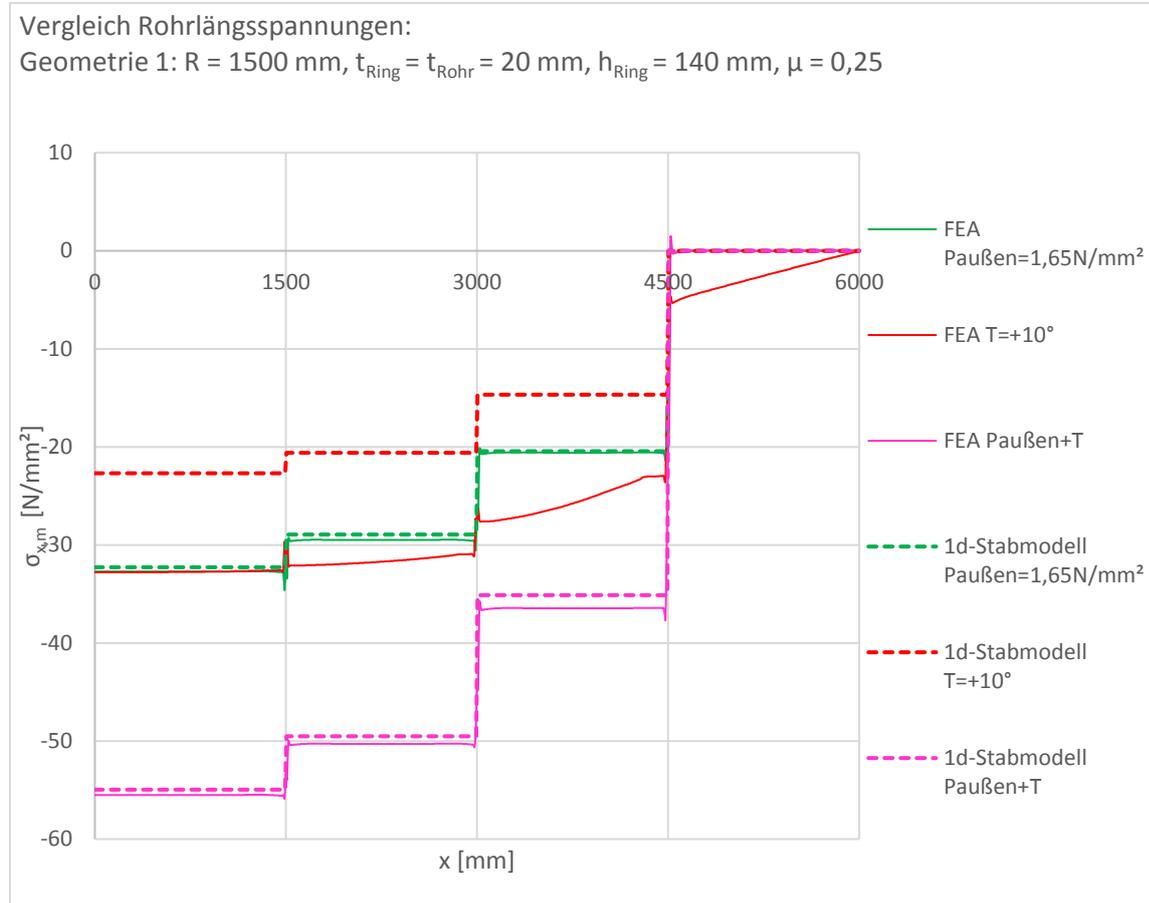


Abbildung 346 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Rohrlängsspannungen, Außendruck  $1,65 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $+10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

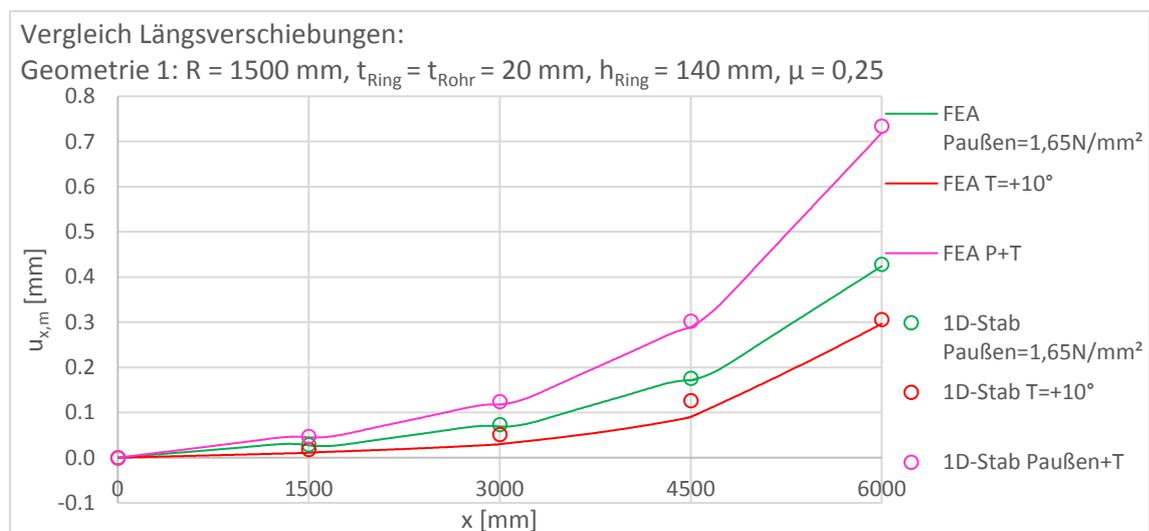


Abbildung 347 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Längsverschiebungen, Außendruck  $1,65 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $+10^\circ$  und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Außendruck und Erwärmung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Außendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Außendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
Auflager	0	-6.16	-6.08	-1.3%	-6.18	-4.28	-31%
Stahlpanzerung 1	0-1440	0.01			-0.04		
Schubring 1	1445-1555	-0.60	-0.63	4.9%	-0.10	-0.39	312%
Stahlpanzerung 2	1560-2950	0.00			-0.22		
Schubring 2	2945-3055	-1.67	-1.60	-4.1%	-0.63	-1.12	78%
Stahlpanzerung 3	3060-4440	-0.02			-0.87		
Schubring 3	4445-4555	-3.85	-3.85	0.03%	-3.35	-2.77	-18%
Stahlpanzerung 4	4560-6000	-0.03			-0.97		
<b>∑ Schubringe</b>		<b>-6.12</b>	<b>-6.08</b>	<b>-0.63%</b>	<b>-4.08</b>	<b>-4.28</b>	<b>4.9%</b>

Tabelle 58 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte, Außendruck 1,65 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur +10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
Auflager	0	-10.46	-10.36	-0.99%	-12.34	18%
Stahlpanzerung 1	0-1440	0.01			-0.02	-312%
Schubring 1	1445-1555	-0.98	-1.02	4.9%	-0.70	-29%
Stahlpanzerung 2	1560-2950	-0.01			-0.22	3875%
Schubring 2	2945-3055	-2.59	-2.72	4.9%	-2.30	-11%
Stahlpanzerung 3	3060-4440	-0.03			-0.89	2928%
Schubring 3	4445-4555	-6.83	-6.62	-3.1%	-7.20	5.5%
Stahlpanzerung 4	4560-6000	-0.04			-1.00	2494%
<b>∑ Schubringe</b>		<b>-10.39</b>	<b>-10.36</b>	<b>-0.33%</b>	<b>-10.20</b>	<b>-1.89%</b>

Tabelle 59 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

2.1.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

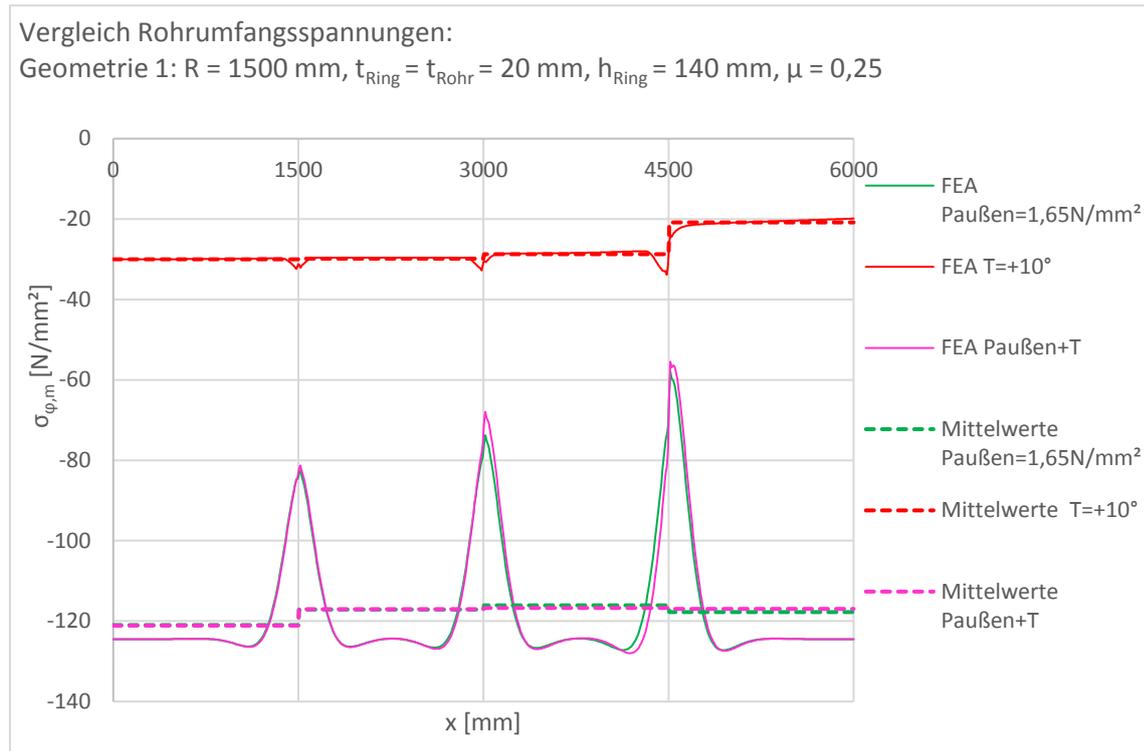


Abbildung 348 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Rohrumfangsspannungen, Außendruck 1,65 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

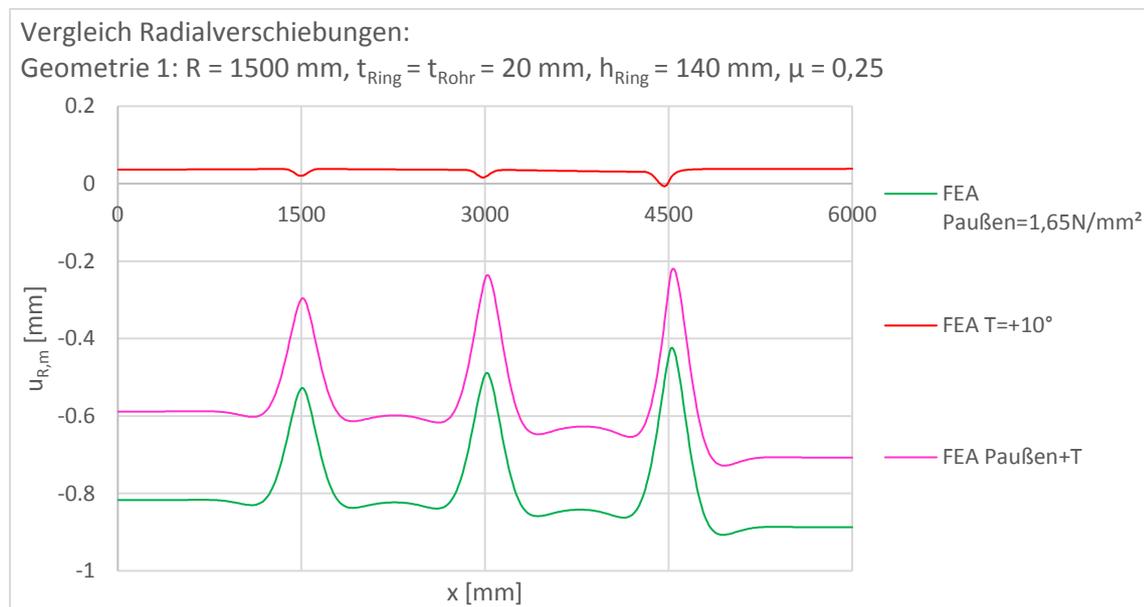


Abbildung 349 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Radialverschiebungen, Außendruck 1,65 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

2.1.3 Analyse der Reibungswirkung

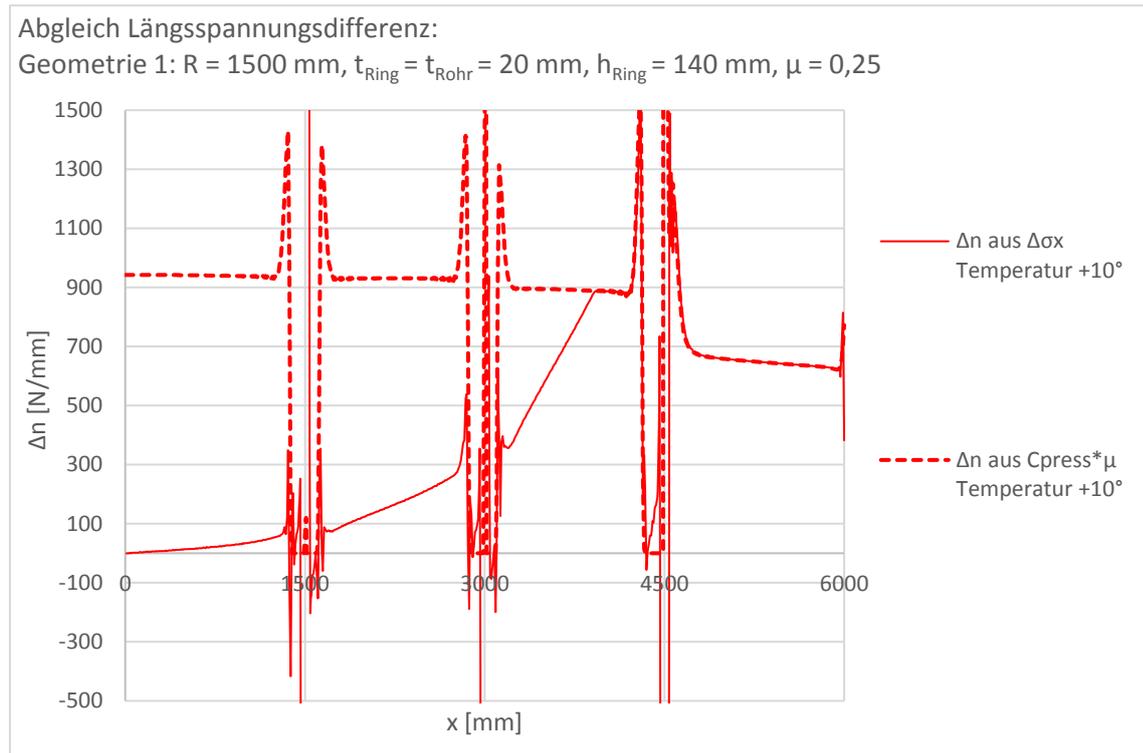


Abbildung 350 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Reibungswirkung, Temperatur  $+10^\circ$

Da der Außendruck und die Überlagerung von Außendruck und Temperaturerhöhung dazu führen, dass sich das Stahlrohr vom Betonmantel ablöst (vgl. Abbildung 349), wird in diesem Kapitel nur die Reibungswirkung für den Einzellastfall der Temperaturerhöhung dargestellt.

2.1.4 Verformungsplots

2.1.4.1 Verformungsplot - Außendruck



Abbildung 351 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Außendruck

2.1.4.2 Verformungsplot - Temperatur



Abbildung 352 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur

2.1.4.3 Verformungsplot - Außendruck und Temperatur

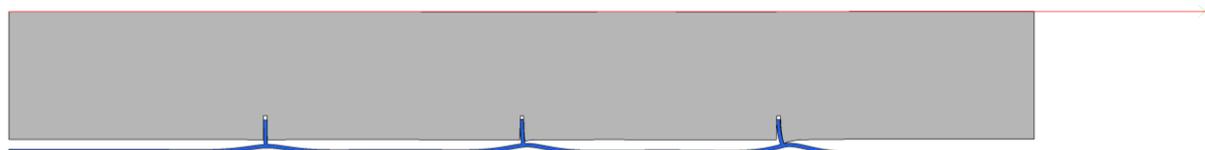


Abbildung 353 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Außendruck und Temperatur

2.1.4.4 Verformungsplot - Außendruck, Detail Schubring 3

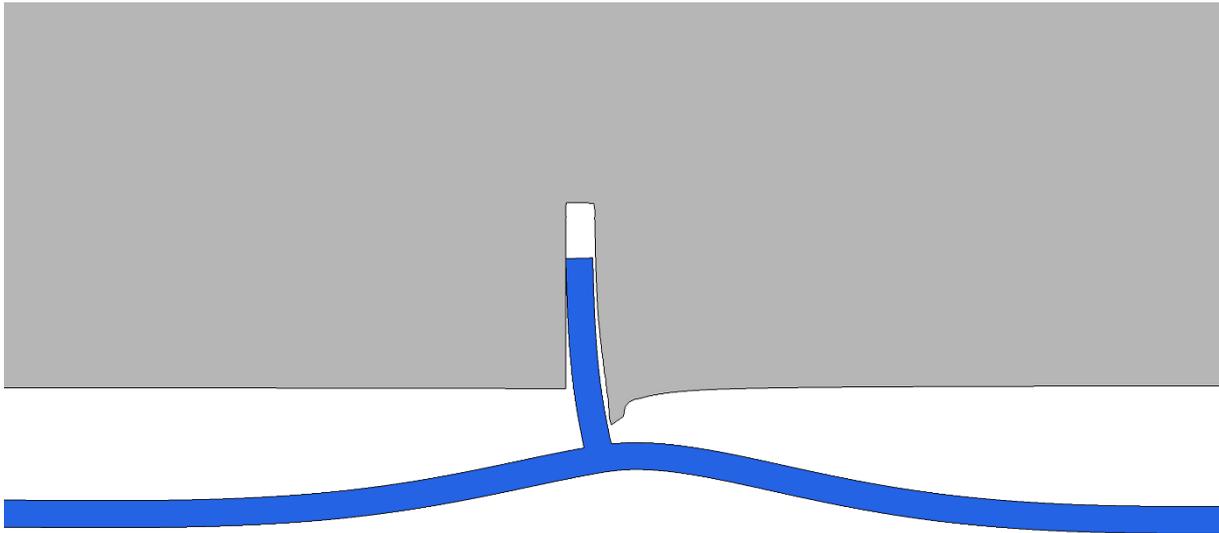


Abbildung 354 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Außendruck

2.1.4.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

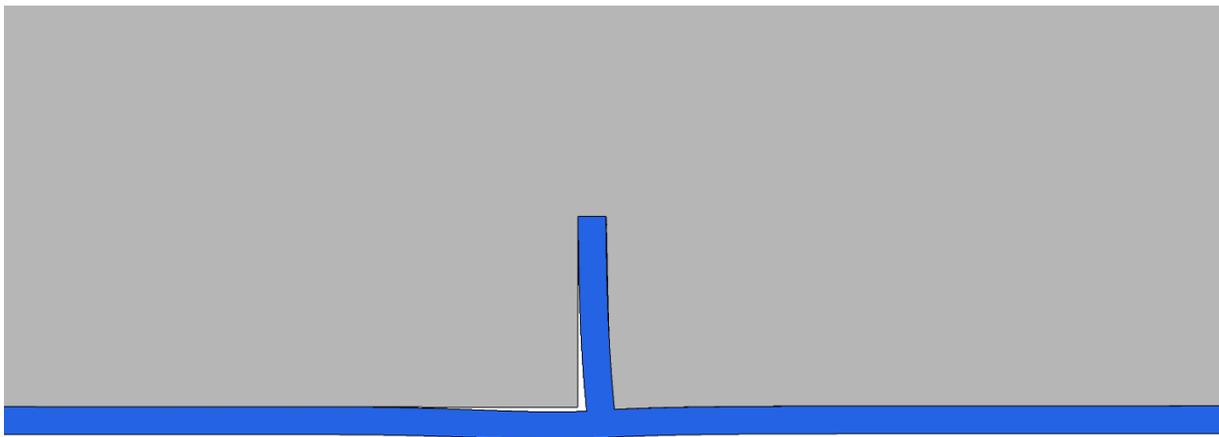


Abbildung 355 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Temperatur

2.1.4.6 Verformungsplot - Außendruck und Temperatur, Detail Schubring 3

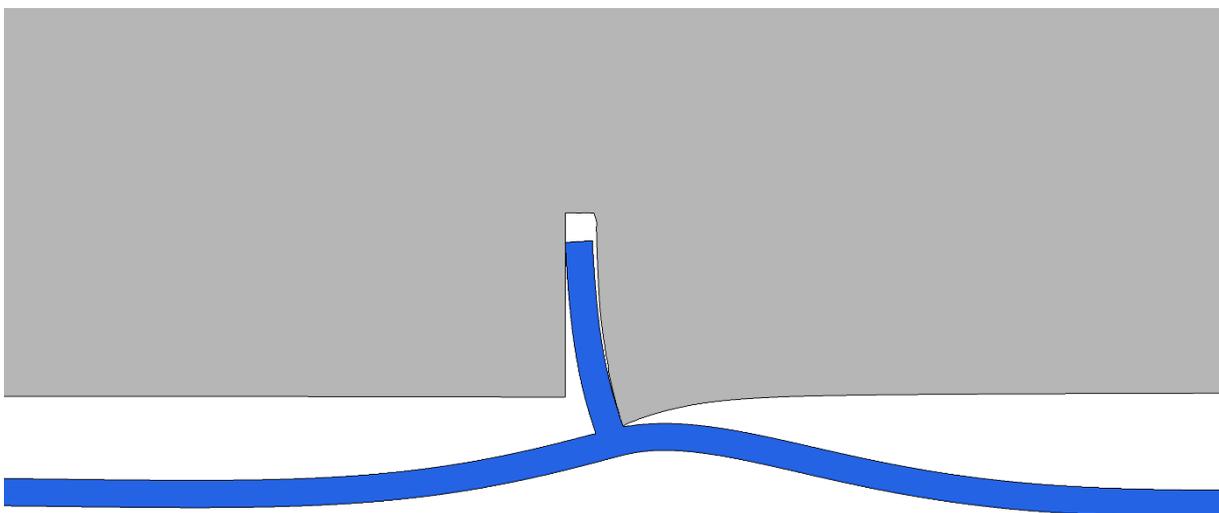


Abbildung 356 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht; Detail Schubring 3: Außendruck und Temperatur

2.1.5 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

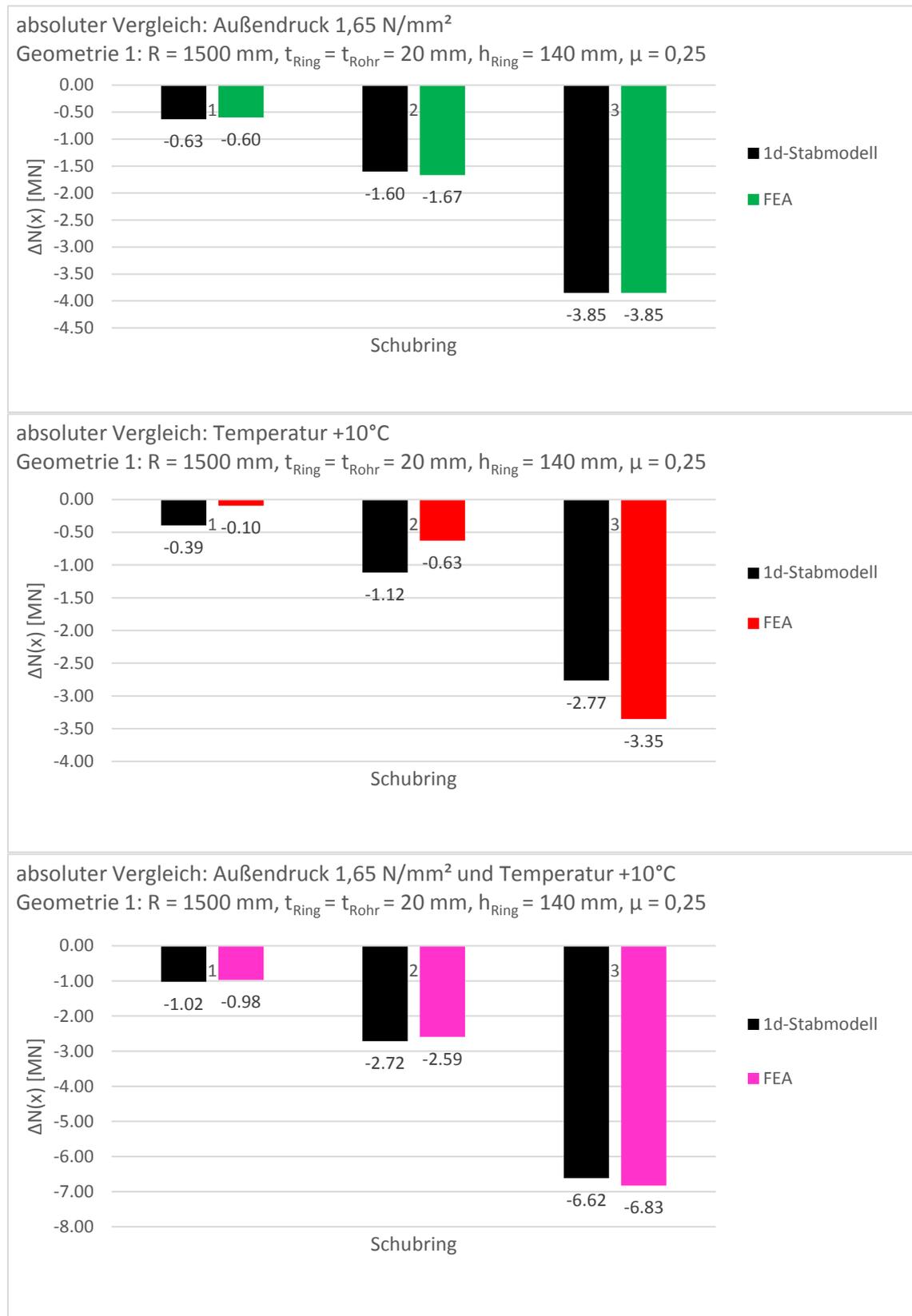


Abbildung 357 Geometrie 1,  $\mu=0,25$ : absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Außendruck 1,65 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

2.1.6 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

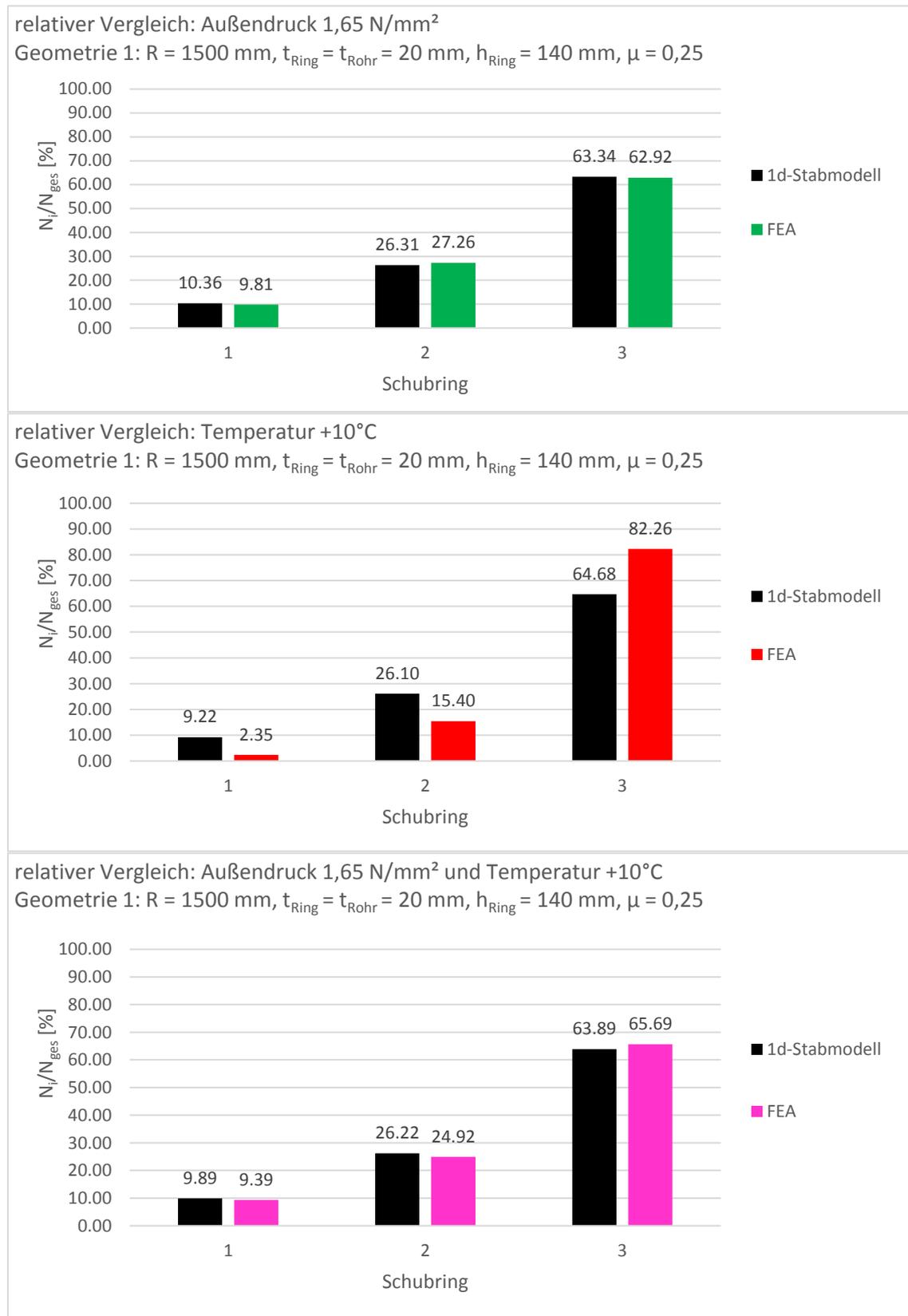


Abbildung 358 Geometrie 1, μ=0,25: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Außendruck 1,65 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

2.2 Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung - Geometrie 2

2.2.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

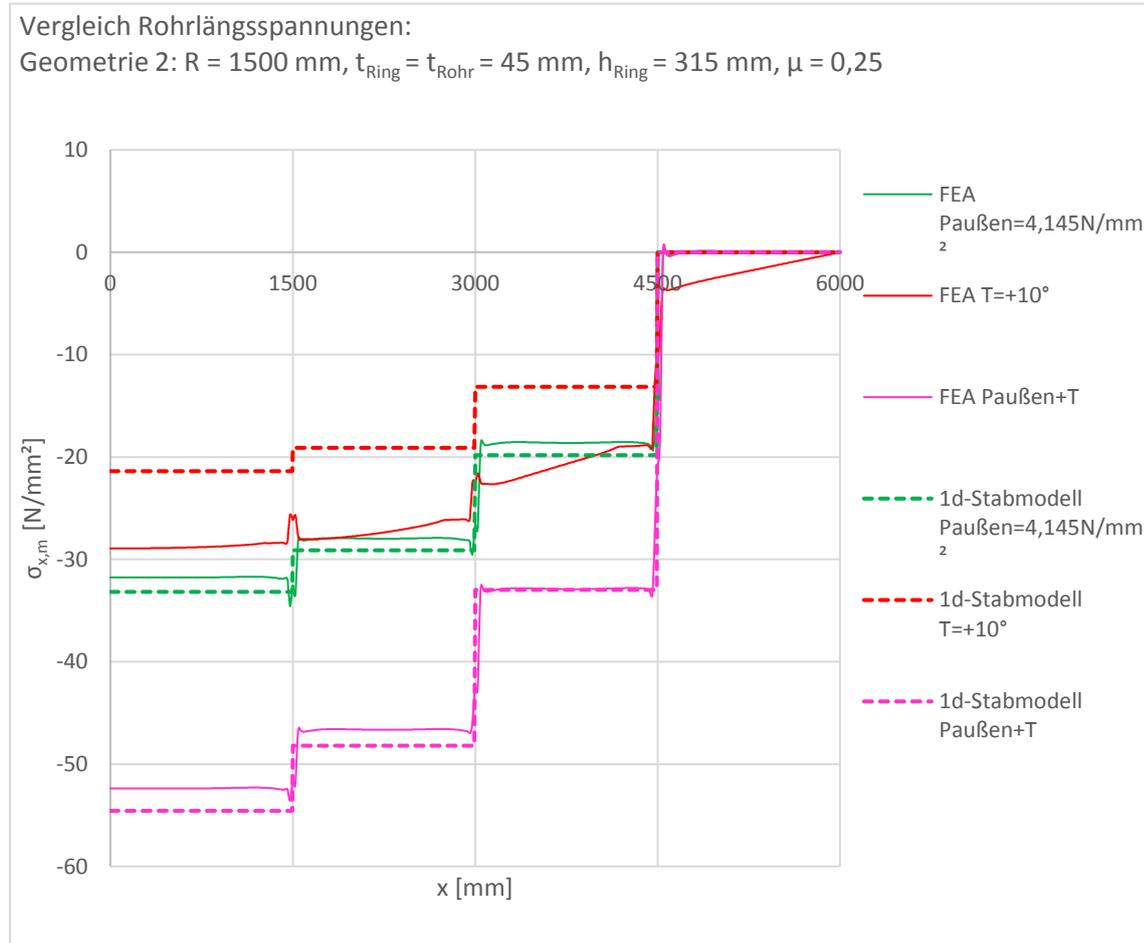


Abbildung 359 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Rohrlängsspannungen, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

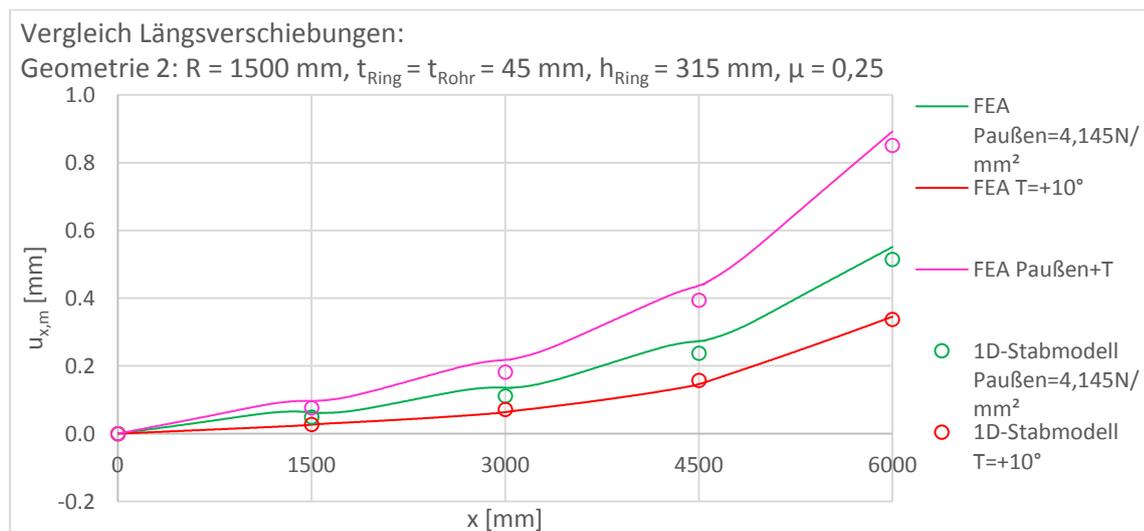


Abbildung 360 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Längsverschiebungen, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Außendruck und Erwärmung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Außendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Außendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
Auflager	0	-13.48	-14.07	4.4%	-12.27	-9.07	-26%
Stahlpanzerung 1	0-1400	0.05			-0.24		
Schubring 1	1400-1600	-1.58	-1.73	9.4%	-0.15	-0.97	545%
Stahlpanzerung 2	1600-2900	-0.05			-0.81		
Schubring 2	2900-3100	-3.97	-3.93	-1.0%	-1.47	-2.52	72%
Stahlpanzerung 3	3100-4400	-0.03			-1.59		
Schubring 3	4400-4600	-8.08	-8.41	4.1%	-6.50	-5.58	-14%
Stahlpanzerung 4	4600-6000	0.19			-1.45		
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-13.63</b>	<b>-14.07</b>	<b>3.2%</b>	<b>-8.12</b>	<b>-9.07</b>	<b>12%</b>

Tabelle 60 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur +10°

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
Auflager	0	-22.22	-23.14	4.2%	-25.75	16%
Stahlpanzerung 1	0-1400	0.04			-0.19	-595%
Schubring 1	1400-1600	-2.39	-2.70	13%	-1.73	-28%
Stahlpanzerung 2	1600-2900	-0.07			-0.86	1180%
Schubring 2	2900-3100	-5.83	-6.45	11%	-5.44	-6.7%
Stahlpanzerung 3	3100-4400	-0.05			-1.62	3056%
Schubring 3	4400-4600	-14.18	-14.00	-1.3%	-14.58	2.9%
Stahlpanzerung 4	4600-6000	0.26			-1.26	-589%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-22.39</b>	<b>-23.14</b>	<b>3.4%</b>	<b>-21.75</b>	<b>-2.9%</b>

Tabelle 61 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

2.2.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

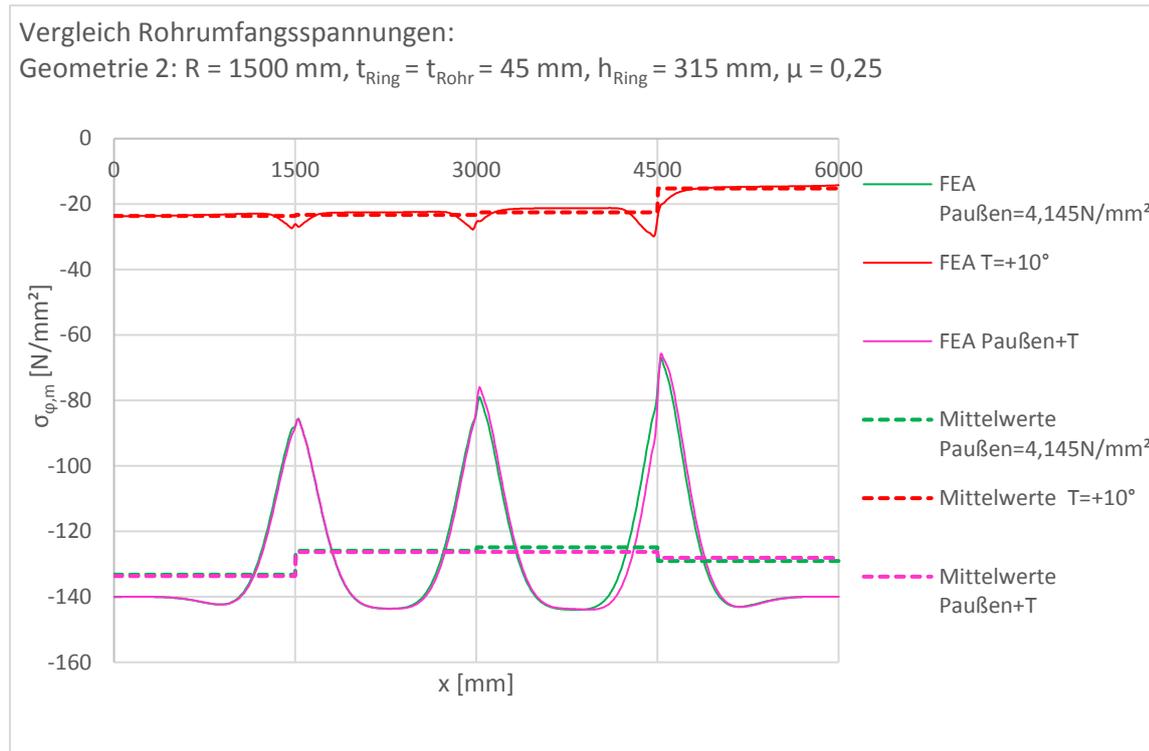


Abbildung 361 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Rohrumfangsspannungen, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

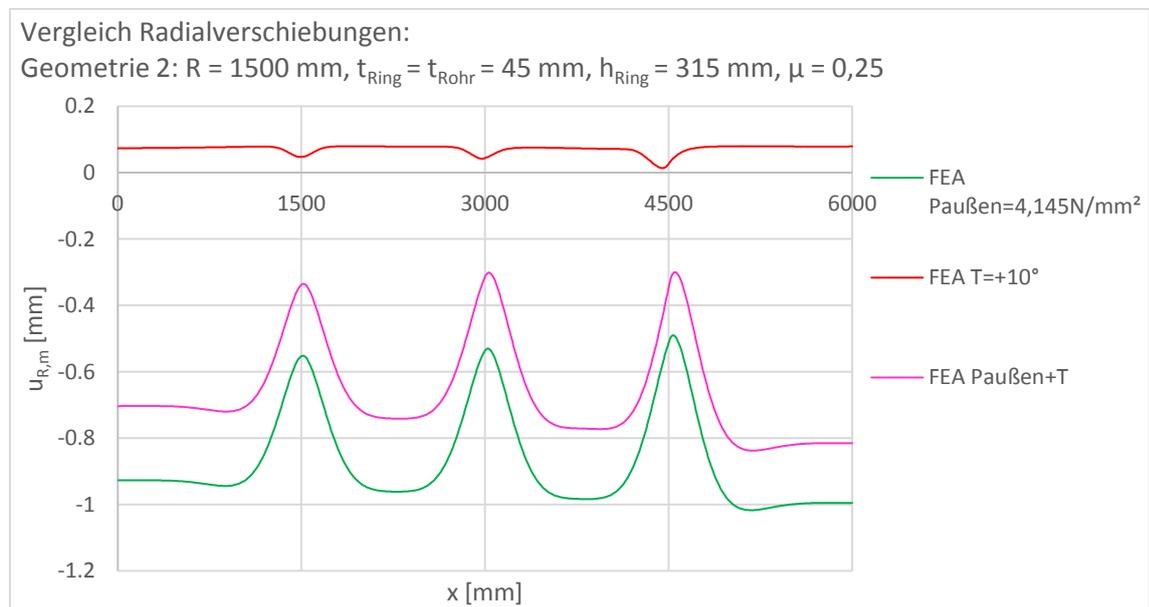


Abbildung 362 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Radialverschiebungen, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung

2.2.3 Analyse der Reibungswirkung

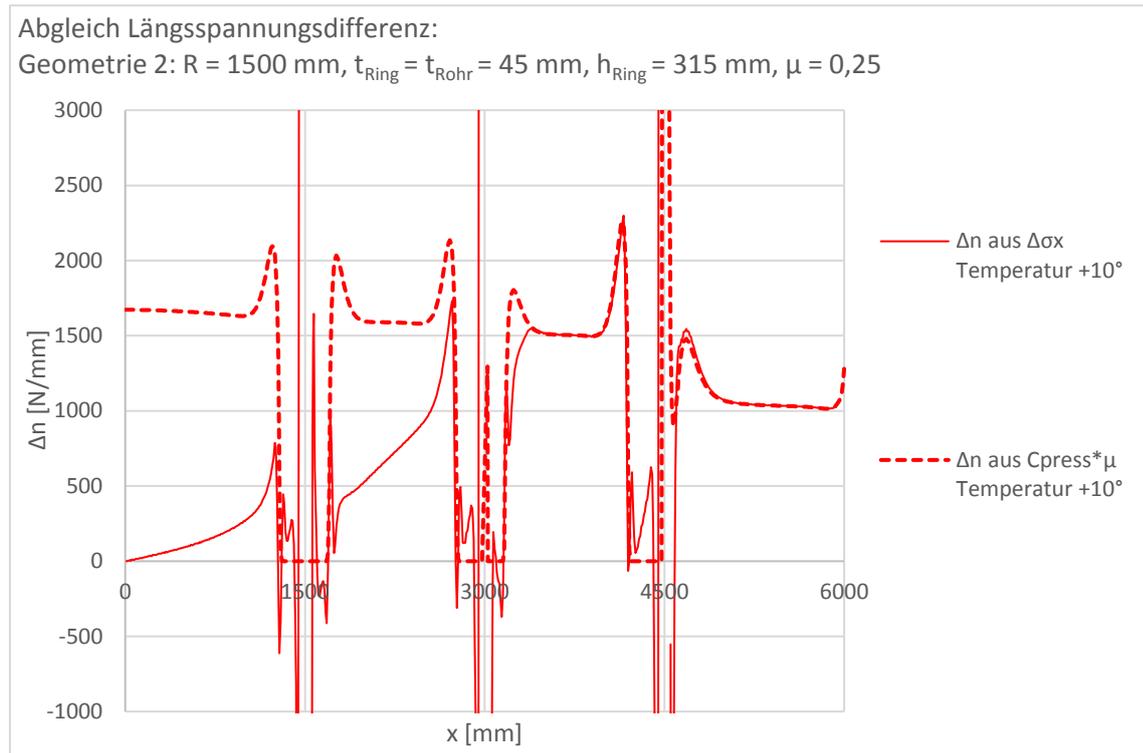


Abbildung 363 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Reibungswirkung, Temperatur  $+10^\circ\text{C}$

Da der Außendruck und die Überlagerung von Außendruck und Temperaturerhöhung dazu führen, dass sich das Stahlrohr vom Betonmantel ablöst (vgl. Abbildung 349), wird in diesem Kapitel nur die Reibungswirkung für den Einzellastfall der Temperaturerhöhung dargestellt.

2.2.4 Verformungsplots

2.2.4.1 Verformungsplot - Außendruck



Abbildung 364 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Außendruck  $4,145 \text{ N/mm}^2$

2.2.4.2 Verformungsplot - Temperatur



Abbildung 365 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur  $+10^\circ\text{C}$

2.2.4.3 Verformungsplot - Außendruck und Temperatur

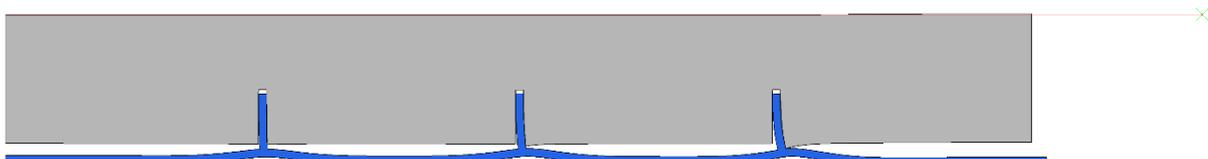


Abbildung 366 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Außendruck  $4,145 \text{ N/mm}^2$  und Temperatur  $+10^\circ\text{C}$

---

2.2.4.4 Verformungsplot - Außendruck, Detail Schubring 3

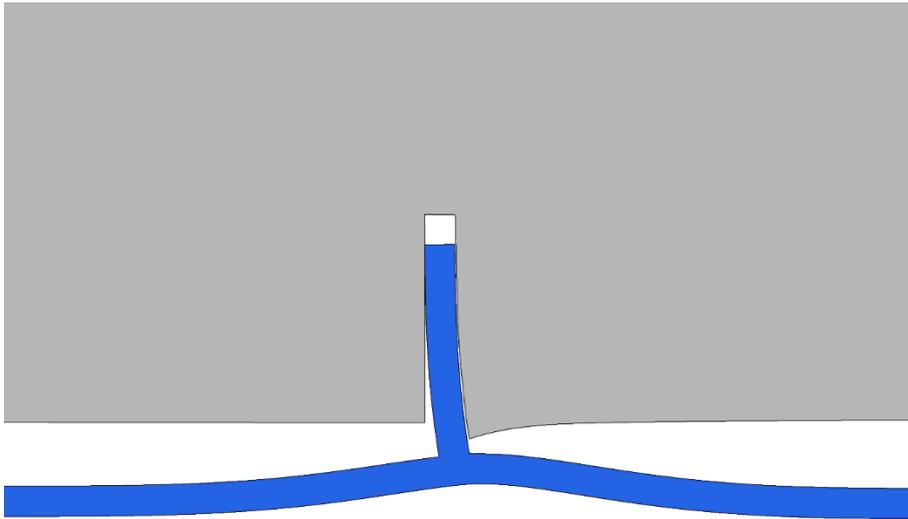


Abbildung 367 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup>

---

2.2.4.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

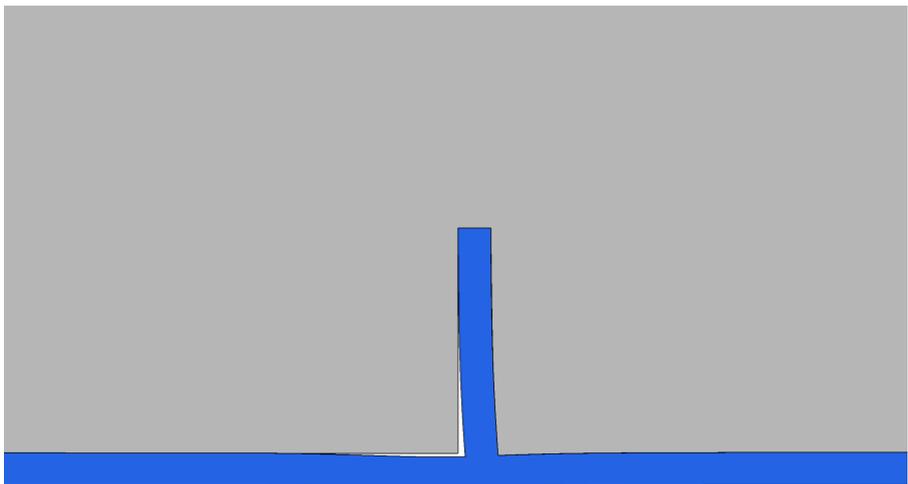


Abbildung 368 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Temperatur +10°C

---

2.2.4.6 Verformungsplot - Außendruck und Temperatur, Detail Schubring 3

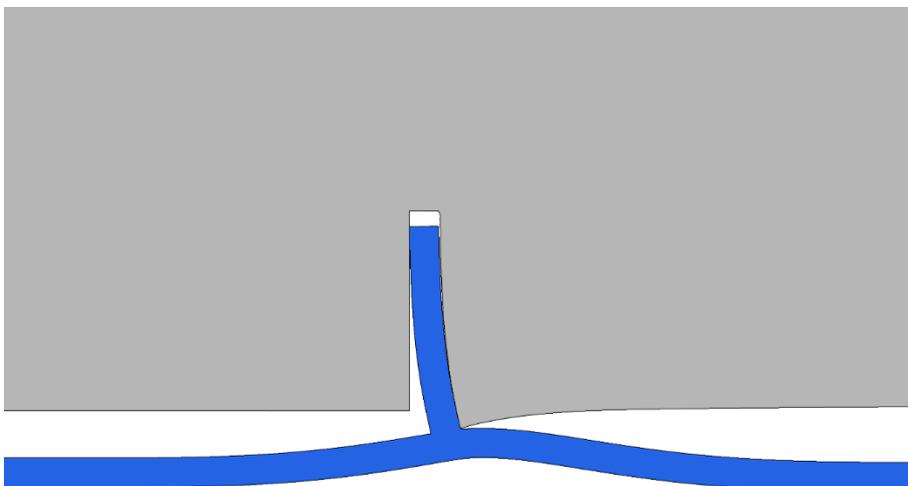


Abbildung 369 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur +10°C

2.2.5 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

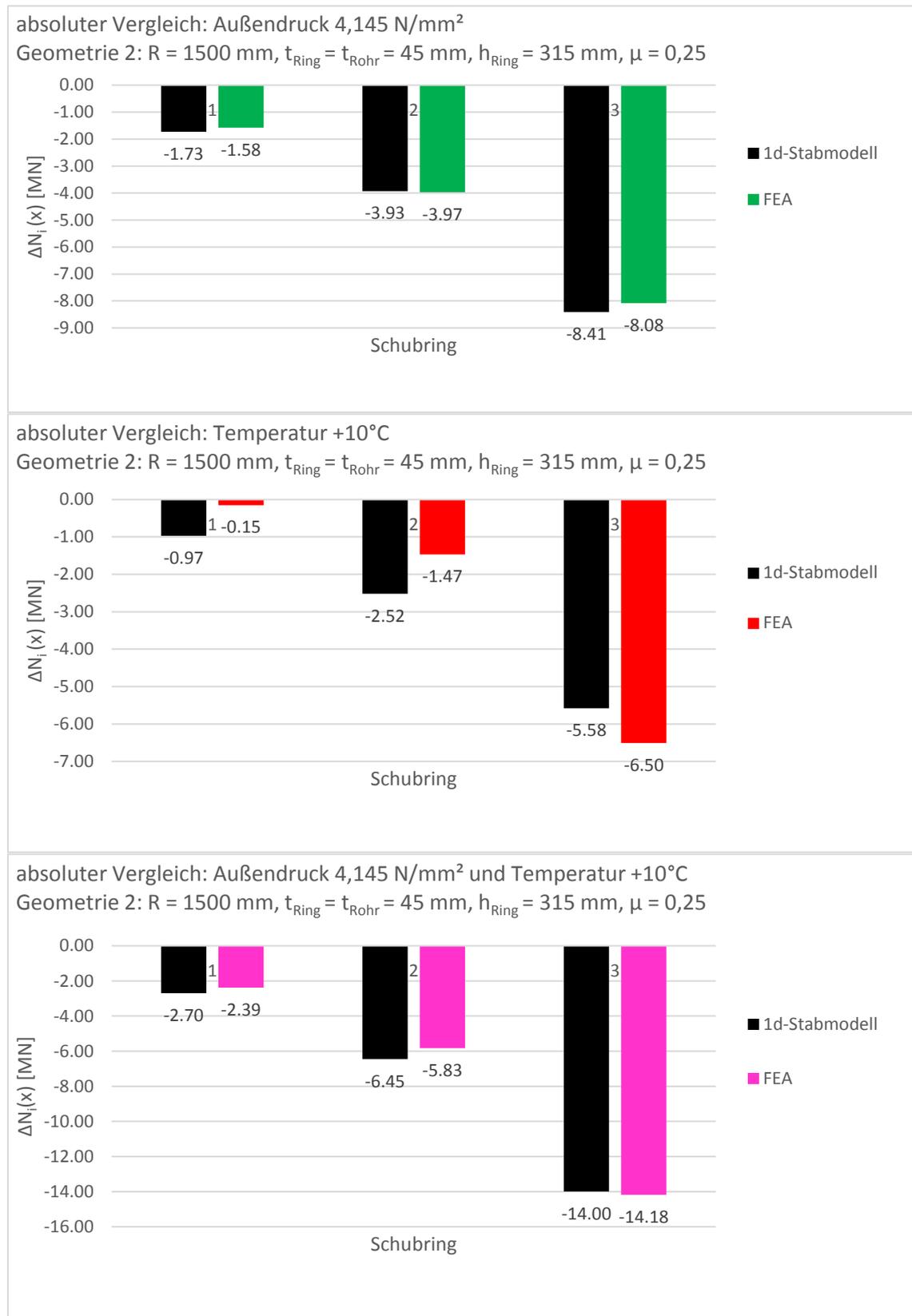


Abbildung 370 Geometrie 2,  $\mu=0,25$ : absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10°C und gemeinsame Wirkung

2.2.6 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

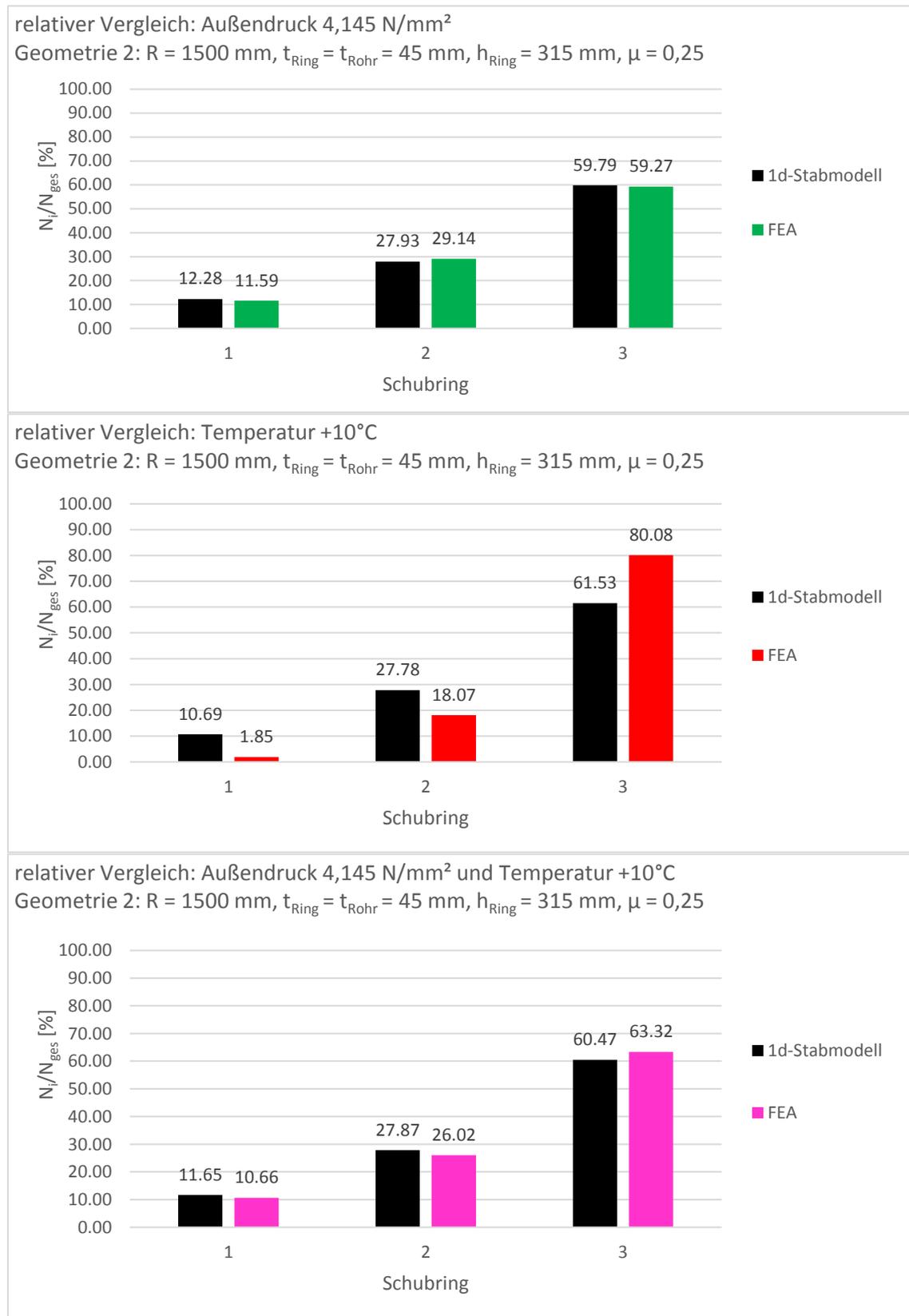


Abbildung 371 Geometrie 2, μ=0,25: relativer Vergleich der Schubringkräfte, Außendruck 4,145 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10°C und gemeinsame Wirkung

2.3 Lastfallüberlagerung Außendruck und Temperaturerhöhung - Geometrie 3

2.3.1 Ergebnisvergleich in Längsrichtung

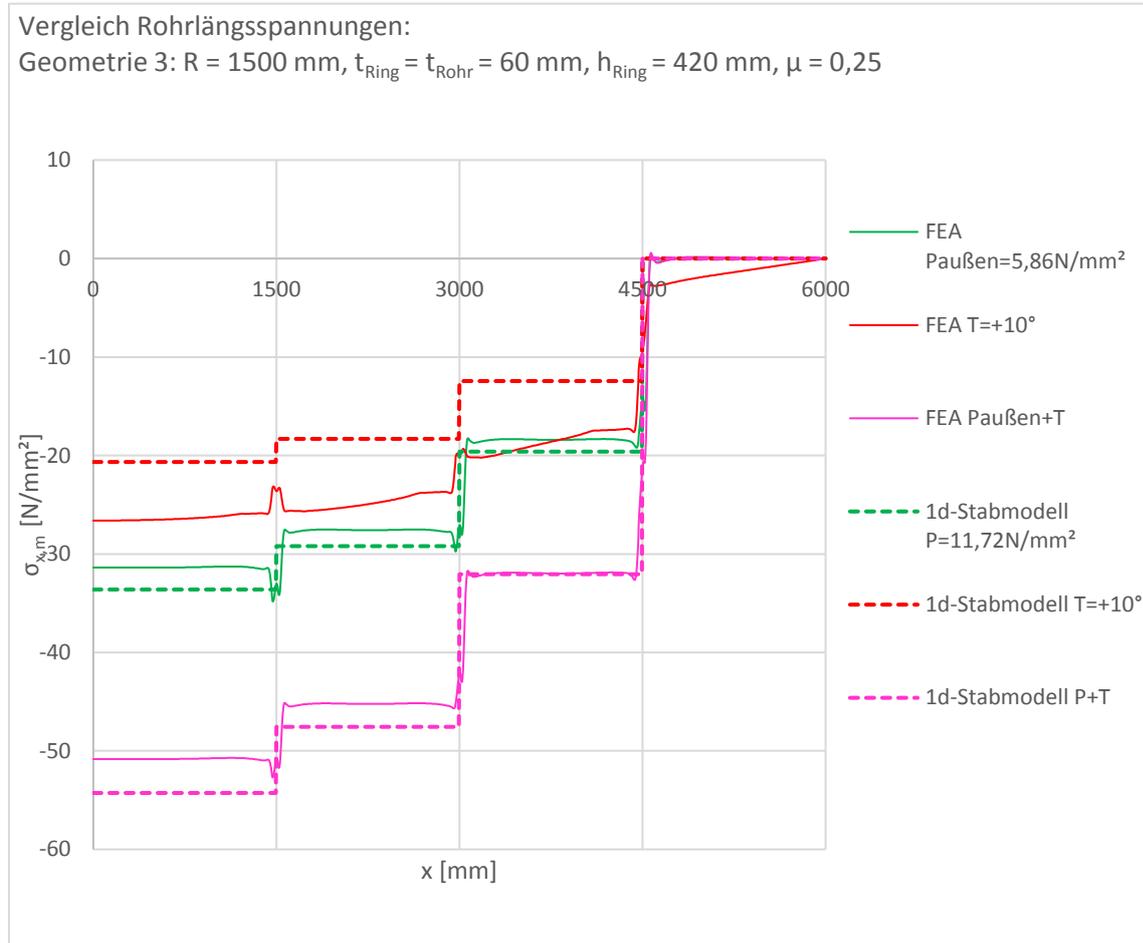


Abbildung 372 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Längsspannungen  $\sigma_{x,m}$ , Außendruck  $5,86 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $+10^\circ\text{C}$  und gemeinsame Wirkung

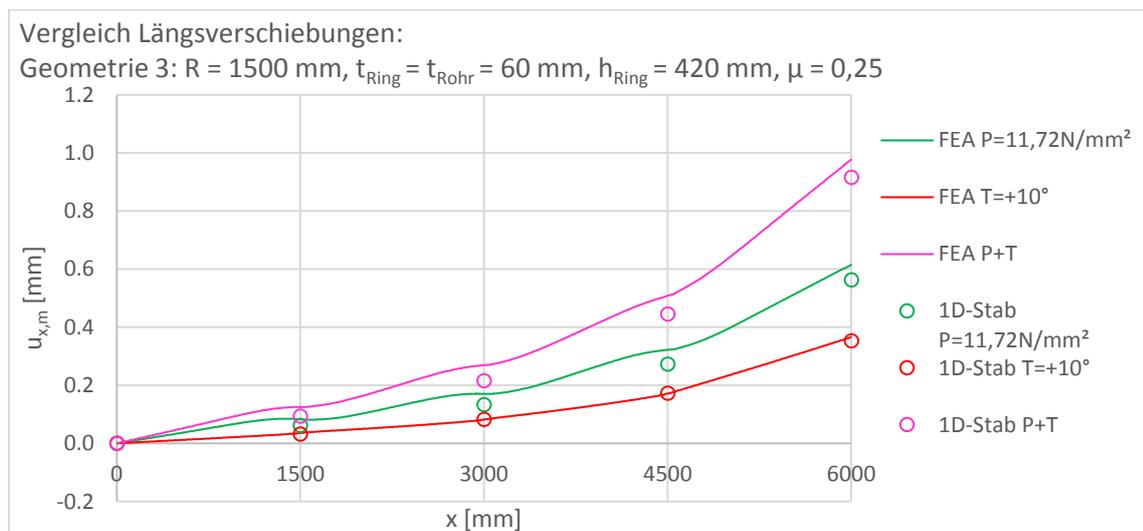


Abbildung 373 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Längsverschiebungen  $u_{x,m}$ , Außendruck  $5,86 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $+10^\circ\text{C}$  und gemeinsame Wirkung

## Überlagerung von Außendruck und Erwärmung

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Außendruck FEA	$\Delta N$ [MN] Außendruck 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur FEA	$\Delta N$ [MN] Temperatur 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA
Auflager	0	-17.75	-19.01	7.1%	-15.05	-11.68	-22%
Stahlpanzerung 1	0-1300	-0.01			-0.40		
Schubring 1	1300-1700	-2.10	-2.48	18%	-0.14	-1.32	823%
Stahlpanzerung 2	1700-2800	-0.04			-1.08		
Schubring 2	2800-3200	-5.14	-5.43	5.8%	-2.00	-3.32	66%
Stahlpanzerung 3	3200-4300	-0.08			-1.59		
Schubring 3	4300-4700	-10.33	-11.09	7.4%	-8.37	-7.04	-16%
Stahlpanzerung 4	4700-6000	-0.07			-1.46		
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-17.56</b>	<b>-19.01</b>	<b>8.2%</b>	<b>-10.52</b>	<b>-11.68</b>	<b>11%</b>

Tabelle 62 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Außendruck 5,86 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10°C

	x [mm]	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung FEA	$\Delta N$ [MN] Gesamtwirkung 1D-Stab	Abweichung des 1D-Stabs von der FEA	$\Delta N$ [MN] Superposition FEA	Abweichung der Superposition FEA von der Gesamtwirkung FEA
Auflager	0	-28.74	-30.69	6.8%	-32.80	14%
Stahlpanzerung 1	0-1300	-0.01			-0.40	3110%
Schubring 1	1300-1700	-3.10	-3.80	23%	-2.24	-28%
Stahlpanzerung 2	1700-2800	-0.05			-1.12	2029%
Schubring 2	2800-3200	-7.42	-8.75	18%	-7.14	-3.8%
Stahlpanzerung 3	3200-4300	-0.12			-1.67	1256%
Schubring 3	4300-4700	-17.93	-18.13	1.1%	-18.69	4.3%
Stahlpanzerung 4	4700-6000	-0.10			-1.52	1426%
<b><math>\Sigma</math> Schubringe</b>		<b>-28.45</b>	<b>-30.69</b>	<b>7.9%</b>	<b>-28.08</b>	<b>-1.3%</b>

Tabelle 63 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Auswertung der Längskräfte  $\Delta N$ , Gesamtwirkung und Superposition der Einzellastfälle

2.3.2 Ergebnisvergleich in Umfangsrichtung

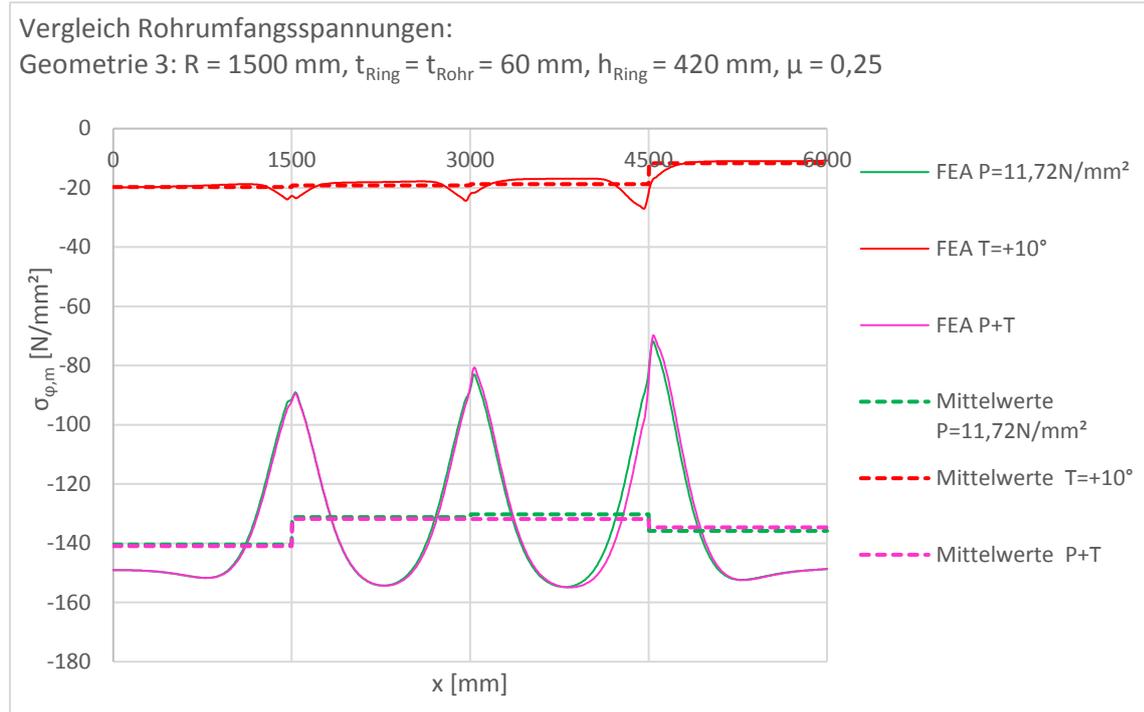


Abbildung 374 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Umfangsspannungen  $\sigma_{\phi,m}$ , Außendruck  $5,86 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $+10^\circ\text{C}$  und gemeinsame Wirkung

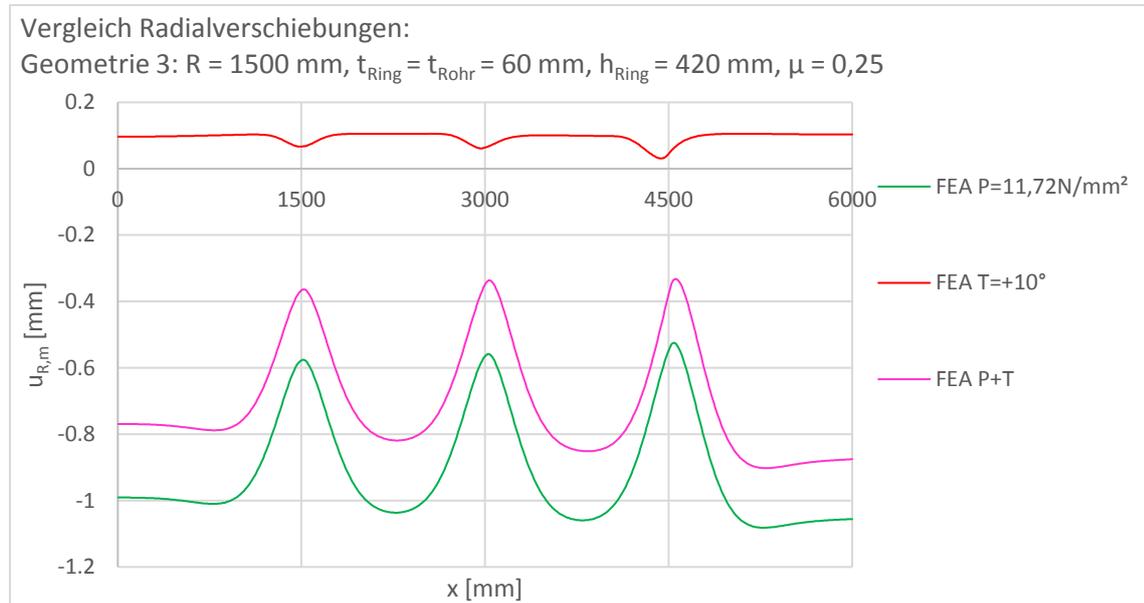


Abbildung 375 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Radialverschiebungen  $u_{r,m}$ , Außendruck  $5,86 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $+10^\circ\text{C}$  und gemeinsame Wirkung

2.3.3 Analyse der Reibungswirkung

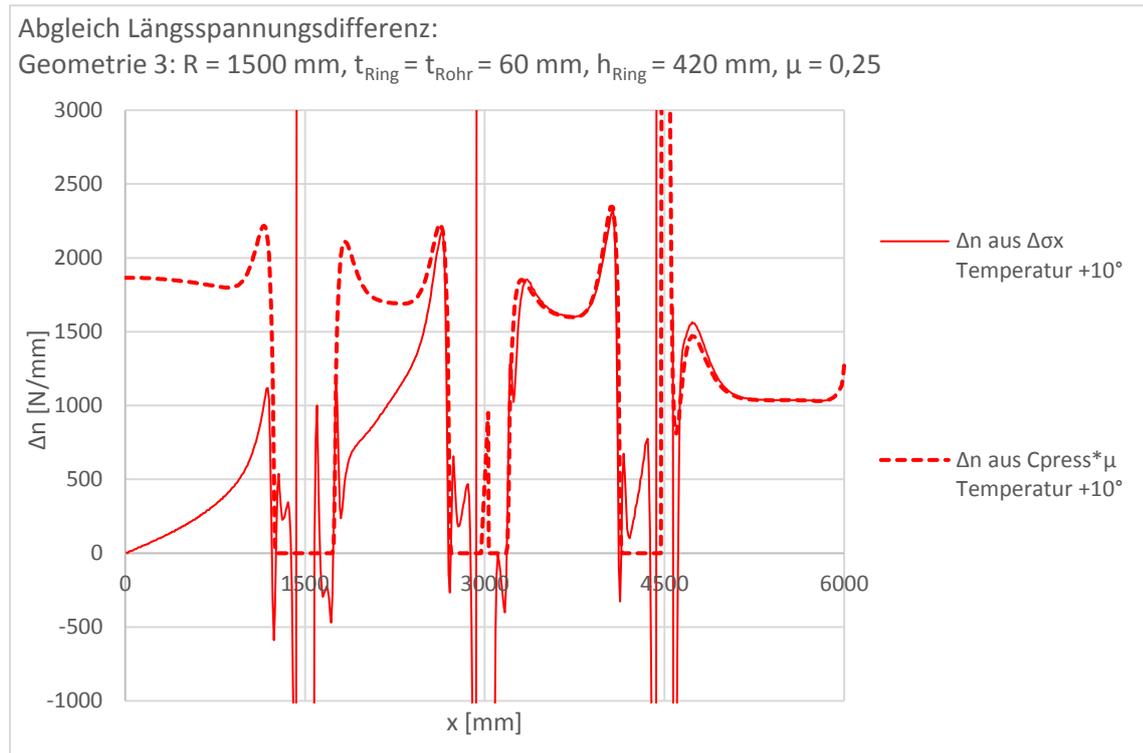


Abbildung 376 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Reibungswirkung  $\Delta n$ , Temperatur  $+10^\circ\text{C}$

Da der Außendruck und die Überlagerung von Außendruck und Temperaturerhöhung dazu führen, dass sich das Stahlrohr vom Betonmantel ablöst (vgl. Abbildung 349), wird in diesem Kapitel nur die Reibungswirkung für den Einzellastfall der Temperaturerhöhung dargestellt.

2.3.4 Verformungsplots

2.3.4.1 Verformungsplot - Außendruck



Abbildung 377 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Außendruck  $5,86 \text{ N/mm}^2$

2.3.4.2 Verformungsplot - Temperatur

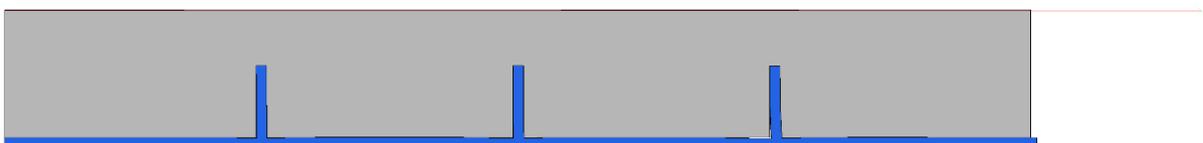


Abbildung 378 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Temperatur  $+10^\circ\text{C}$

2.3.4.3 Verformungsplot - Außendruck und Temperatur



Abbildung 379 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Außendruck  $5,86 \text{ N/mm}^2$ , Temperatur  $+10^\circ\text{C}$

## 2.3.4.4 Verformungsplot - Außendruck, Detail Schubring 3

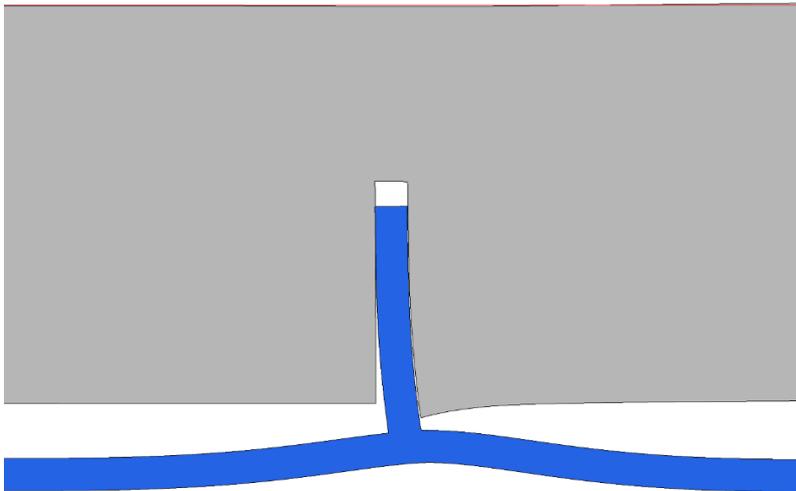


Abbildung 380 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Außendruck 5,86 N/mm<sup>2</sup>

## 2.3.4.5 Verformungsplot - Temperatur, Detail Schubring 3

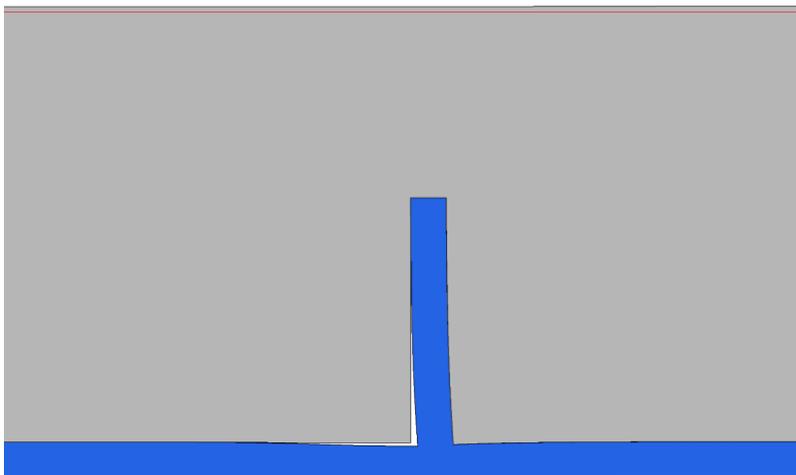


Abbildung 381 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Temperatur +10°C

## 2.3.4.6 Verformungsplot - Außendruck und Temperatur, Detail Schubring 3

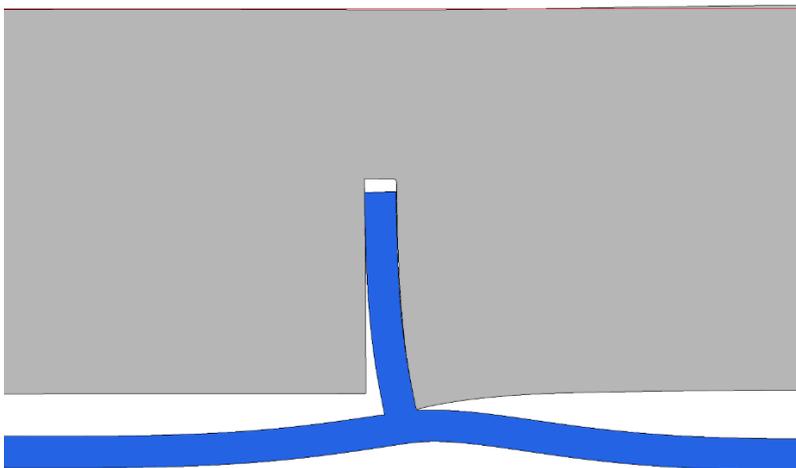


Abbildung 382 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : Verformungsplot 100-fach überhöht, Detail Schubring 3, Außendruck 5,86 N/mm<sup>2</sup> und Temperatur +10°C

2.3.5 Absoluter Vergleich der Schubringkräfte

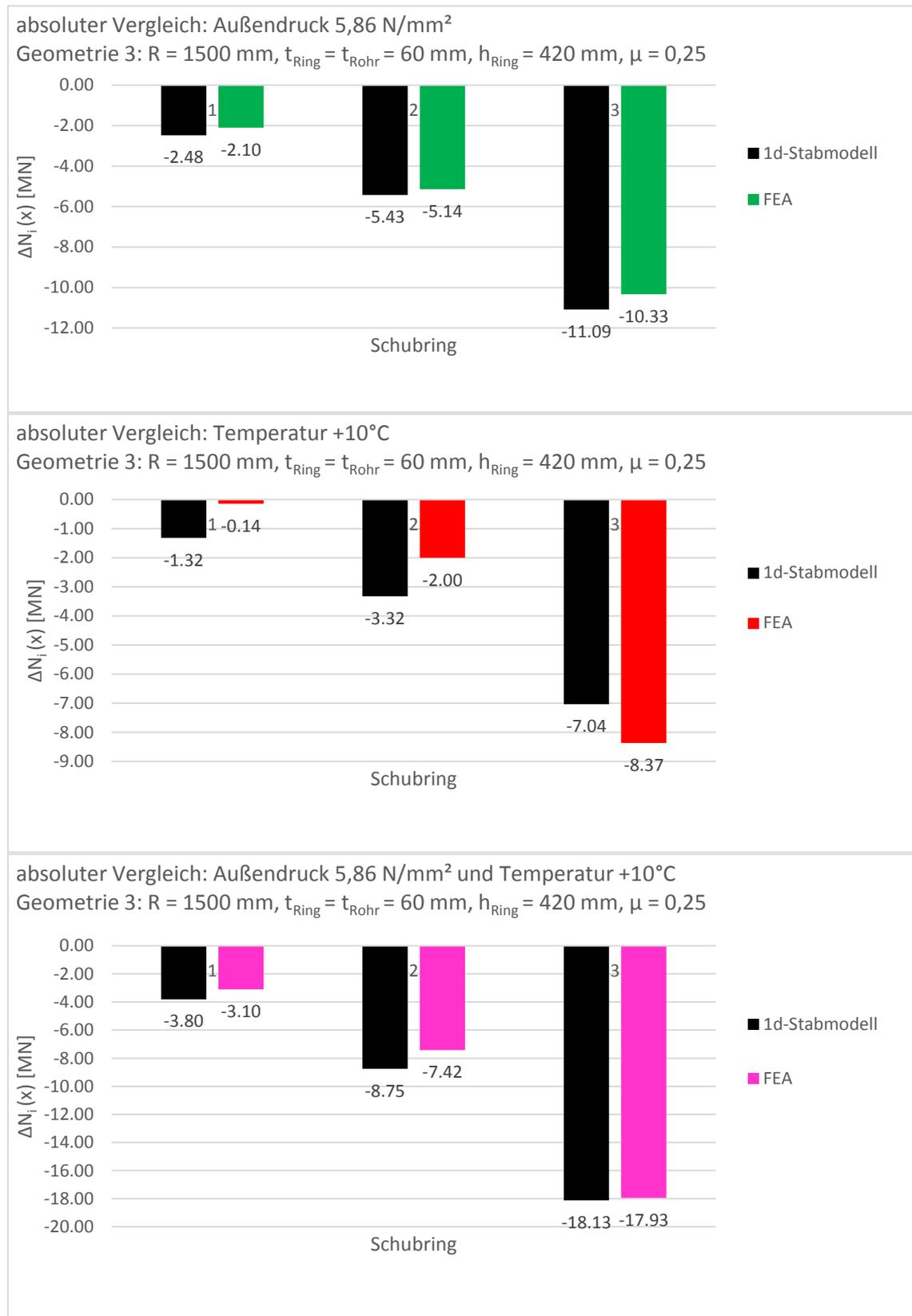


Abbildung 383 Geometrie 3, μ=0,25: absoluter Vergleich der Schubringkräfte, Außendruck 5,86 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10°C und gemeinsame Wirkung

2.3.6 Relativer Vergleich der Schubringkräfte

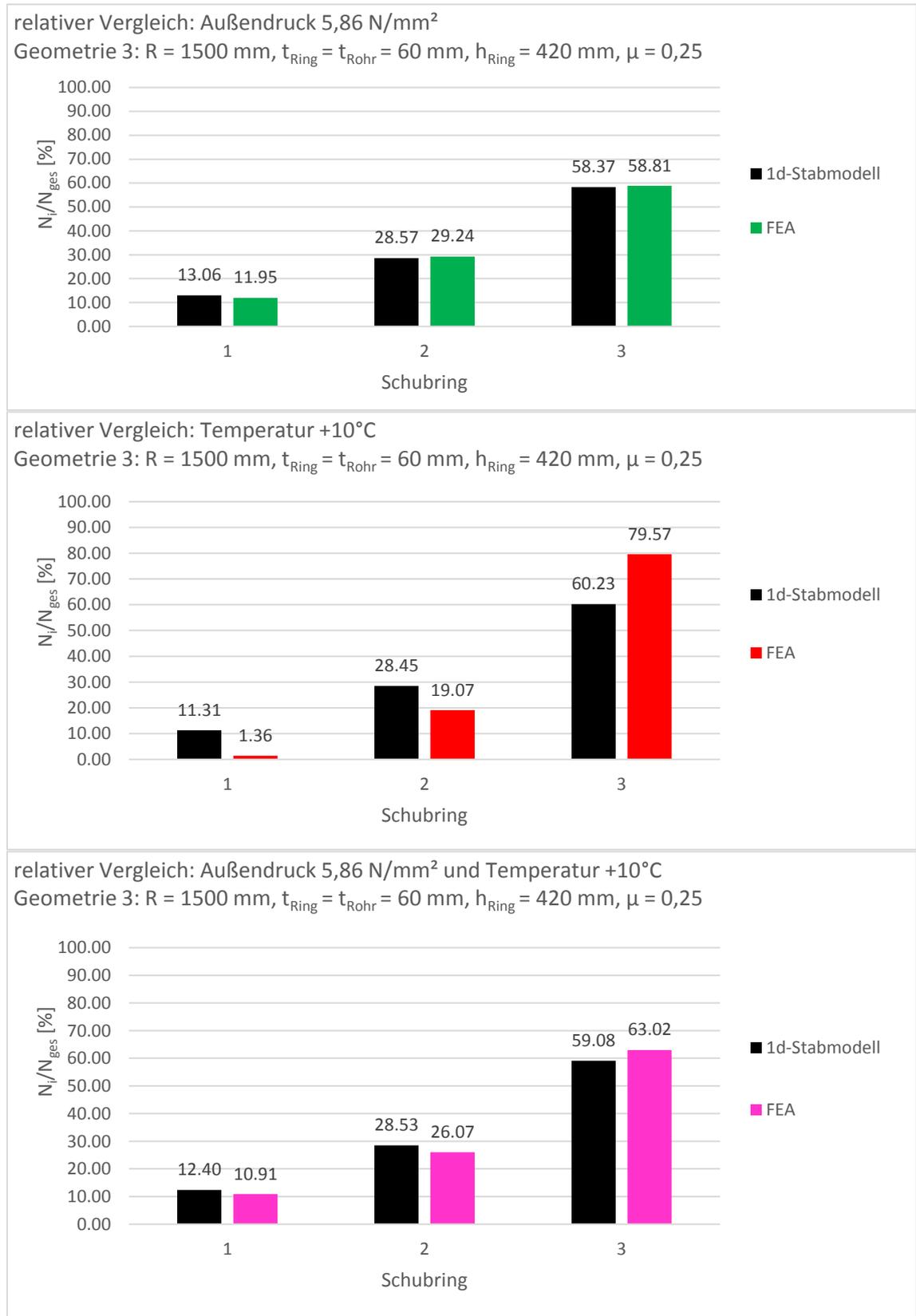


Abbildung 384 Geometrie 3,  $\mu=0,25$ : relativer Vergleich der Schubringkräfte, Außendruck 5,86 N/mm<sup>2</sup>, Temperatur +10° und gemeinsame Wirkung