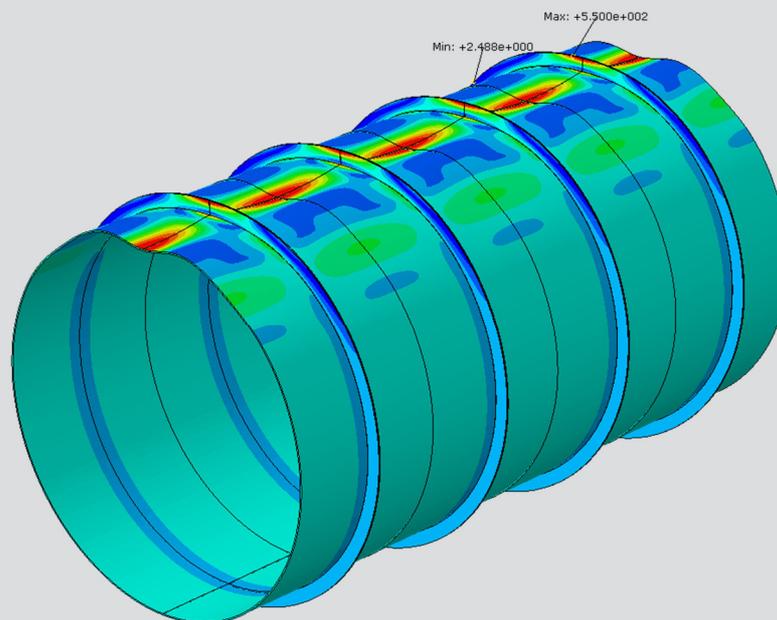


Beulen von ringversteiften Druckschichtpanzerungen unter Außendruck



D-5-67/2018

BSc. Peter Brantweiner
Institut für Stahlbau
Technische Universität Graz



TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

2050 Institut für Stahlbau

Institutsvorstand Univ. Prof. Dipl. –Ing. Dr.techn. Harald Unterweger

**Beulen von ringversteiften
Druckschachtpanzerungen unter Außendruck**

MASTERARBEIT

eingereicht von

Peter Brantweiner, BSc.

Matrikelnummer: 01130836

Studienkennzahl: F 066 465

Betreuer:

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

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Ecker

Graz, August 2018

Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, _____

Peter Brantweiner, BSc.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, _____

Peter Brantweiner, BSc.

Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei Professor Dr. Harald Unterweger für die Betreuung der Masterarbeit und die umfangreichen Inputs während der Erstellung bedanken. Dann möchte ich mich auch ganz besonders bei Dr. Alexander Ecker bedanken, der während der Erstellung der Masterarbeit stets Zeit für mich gefunden hat und meine Fragen mit höchster Kompetenz beantwortet hat.

Besonderer Dank gilt auch meiner Freundin Marlene, die mich während des Studiums stets unterstützt und mir des Öfteren viele alltägliche Aufgaben abgenommen hat, sodass ich mich voll und ganz auf mein Studium konzentrieren konnte, wenn dies notwendig war.

Meinen Eltern Elisabeth und Edgar Brantweiner möchte ich für die Unterstützung während des Studiums meinen Dank aussprechen und dafür, dass sie mich zum Studium ermutigt und mir bereits in jungen Jahren den notwendigen Fleiß und Ehrgeiz mit auf den Weg gegeben haben.

Außerdem ist auch meinem Bruder Jürgen und meiner Schwester Stefanie mein Dank auszusprechen, da sie mir während des Studiums bei vielen alltäglichen Dingen behilflich gewesen sind und mir dadurch häufig die notwendige Zeit verschafft haben, um für Prüfungen zu lernen.

Auch bei meinen Großeltern möchte ich mich für die Unterstützung während des Studiums bedanken.

Ganz besonderer Dank gilt auch meinen Freunden und Studienkollegen Christoph Derler und Elia Schuh, die seit der Zeit in der HTL meine Wegbegleiter sind und die Studienzeit durch die vielen gemeinsamen Erlebnisse und die gegenseitige Unterstützung beim Lernen unvergessen machen.

Kurzfassung

Bei der Auslegung von Druckschachtpanzerungen ist mitunter der Nachweis auf Außendruck aufgrund des Gebirgswasserdrucks der entleerten Panzerung maßgebend. Um die Tragfähigkeit gegenüber Außendruck zu erhöhen, werden häufig Ringsteifen auf die Panzerung geschweißt.

Bei der Bemessung von ringversteiften Druckschachtpanzerungen auf Außendruck müssen nach dem Stand der Technik grundsätzlich zwei getrennte Nachweise geführt werden. Der erste Nachweis liefert den kritischen Außendruck für den Versteifungsring mit Berücksichtigung der vollen Mitwirkung des Rohres zwischen den Ringen. Der zweite Nachweis liefert den kritischen Außendruck für das Beulen des zwischen den Ringen liegenden Rohres. Der kritische Außendruck für die ringversteifte Panzerung ergibt sich dann als der kleinere dieser beiden Werte.

Anhand von realitätsnahen Finite-Elemente-Berechnungen konnte im Rahmen dieser Masterarbeit gezeigt werden, dass der aus den beiden Nachweisen ermittelte kritische Außendruck häufig nicht zutreffend ist.

Aus diesem Grund wurde ein neues Nachweisverfahren entwickelt, welches die beiden Nachweise implizit berücksichtigt. Bei diesem Verfahren wird der kritische Außendruck für den Versteifungsring $p_{a, \text{Ring}}$ unter alleiniger Berücksichtigung der mitwirkenden Breite des Rohres ermittelt und ist dadurch deutlich einfacher bestimmbar. Der kritische Außendruck für das zwischen den Ringen liegende Rohr p_{ZW} erfolgt anhand des aktuellen Nachweisverfahrens im Eurocode für Schalenbeulen.

Das Verhältnis der Tragfähigkeiten von p_{ZW} zu $p_{a, \text{Ring}}$ liefert einen Bemessungsfaktor, der neben dem Ringabstand und der mitwirkenden Breite des Rohres in die Bemessungsformel des neuen Bemessungsverfahrens mit eingeht. Dieser Bemessungsfaktor kann mit den in dieser Masterarbeit für unterschiedliche Fließgrenzen und Rohranlageverhältnissen entwickelten Diagrammen, oder mit Hilfe von bereit gestellten Formeln, bestimmt werden.

Es hat sich gezeigt, dass es mit diesem neuen Nachweisverfahren möglich ist, die Treffsicherheit zur Bestimmung des kritischen Außendrucks für ringversteifte Panzerungen mit baupraktisch üblichen Ringabständen deutlich zu verbessern.

Abstract

In the design of steel-linings of pressure tunnels occasionally the design verification on external pressure due to the mountain water pressure on the deflated pipe is decisive. In order to increase the bearing capacity against external pressure, circular ring stiffeners are often welded to the steel-lining.

When dimensioning steel-linings of pressure-tunnels with circular ring-stiffeners, two separate design verifications have to be made according to the state of the art in practice. The first design verification provides the critical external pressure for the circular ring-stiffener taking into account the participation of the pipe between the rings on the load transfer. The second design verification provides the critical external pressure for the buckling of the steel-lining (shell buckling) between two rings. The critical external pressure for the steel-lining with the circular ring-stiffening is the lower pressure of these two verifications.

By verifying the results of the dimensioning process with realistic finite element calculations, in the context of this master thesis, it could be shown that the critical external pressure determined from the two verifications is often not accurate.

For this reason, a new design method was developed, which implicitly considers the two design verifications. In this method, the critical external pressure for the ring $p_{a, Ring}$ is determined by taking into account only the cooperating width of the steel-lining and is therefore much easier to calculate. The critical external pressure for the pipe between two rings p_{zW} is based on the current method in Eurocode for shell buckling.

The ratio of the capacities p_{zW} to $p_{a, Ring}$ provides a factor that is an input variable for the formula of the new design method, next to the parameters of ring distance and the cooperating width of the steel-lining. This design factor can be determined by using the diagrams or the formulas developed in this master thesis, for different yield points and steel-lining geometries.

It was possible to show that the new design method provides a significantly more accurate critical external pressure for steel-linings with usual ring distances.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Überblick über die Bemessungspraxis von Druckschachtpanzerungen	1
2	Bemessungsverfahren für ringversteifte Druckschachtpanzerungen	3
2.1	Nachweis N1 - Beulnachweis des Ringes unter Berücksichtigung des mitwirkenden Rohres.....	3
2.1.1	Vorgehensweise nach Amstutz für das Ringbeulen.....	4
2.1.2	Vorgehensweise nach Feder für das Ringbeulen	8
2.1.3	Berechnungsverfahren nach Amstutz - aufbereitet von Taras/Greiner [5].....	9
2.1.4	Vorgehensweise nach Jacobsen für das Ringbeulen	16
2.1.5	Unrundheit u des Rohrs beziehungsweise der Rohrschale.....	21
2.2	Nachweis N2 – Beulnachweis des Rohres zwischen zwei Ringsteifen	22
2.2.1	Beulnachweis nach Eurocode 1993-1-6 [8] – „Zylinderschalen unter Außendruck“	23
3	Untersuchte Anwendungsfälle.....	25
4	Kritischer Außendruck der Ringsteife für die Anwendungsfälle (Nachweis N1)	28
4.1	Einleitung.....	28
4.2	Kritischer Außendruck der Ringsteife nach Amstutz/Feder	30
4.3	Kritischer Außendruck der Ringsteife nach Jacobsen	33
4.4	Spannungsanteile in der Ringsteife nach Amstutz/Feder und Jacobsen	35
4.4.1	Ergebnisse für Anwendungsfall 1.....	36
4.4.2	Ergebnisse für Anwendungsfall 2.....	39
4.4.3	Ergebnisse für Anwendungsfall 3.....	42
4.4.4	Ergebnisse für Anwendungsfall 4.....	43
4.4.5	Ergebnisse für Anwendungsfall 5.....	44
4.4.6	Ergebnisse für Anwendungsfall 6.....	45
4.5	Kritische Außendrucke der Anwendungsfälle ohne Ringsteifen.....	46
4.5.1	Kritische Außendrucke – Rohr alleine – nach Amstutz	46
4.5.2	Kritische Außendrucke – Rohr alleine – nach Jacobsen.....	46
5	Kritischer Außendruck der Anwendungsfälle für das Rohr zwischen den Ringen (Nachweis N2)	49
5.1	Beulnachweis des Rohres zwischen den Ringen nach Eurocode 1993-1-6.....	49
6	Realitätsnahe Ermittlung der Tragfähigkeit für die Anwendungsfälle an einem 3D-Modell	52
6.1	FEM-Netzanalyse für Fall 3b.....	54

6.2	Ergebnisse der FEM-Analyse	59
7	Gegenüberstellung der Ergebnisse	121
7.1	Anwendungsfall 1	122
7.2	Anwendungsfall 2	124
7.3	Anwendungsfall 3	126
7.4	Anwendungsfall 4	127
7.5	Anwendungsfall 5	128
7.6	Anwendungsfall 6	129
8	Neues Bemessungsverfahren für den kritischen Außendruck.....	130
8.1	Allgemein	130
8.2	Neues Bemessungsverfahren – Berechnung nach Amstutz/Feder.....	134
8.2.1	Entwicklung der Kurven für f_{Bem}	134
8.2.2	Kritische Außendrucke mit dem neuen Bemessungsverfahren.....	141
8.2.3	Analyse der Ergebnisse.....	150
8.3	Neues Bemessungsverfahren – Berechnung nach Jacobsen	155
8.3.1	Entwicklung der Kurven für f_{Bem}	155
8.3.2	Kritische Außendrucke mit dem neuen Bemessungsverfahren.....	161
8.3.3	Analyse der Ergebnisse.....	169
8.4	Anmerkungen zur Anwendbarkeit des neuen Bemessungsverfahrens	173
8.4.1	Fälle mit schlechter Anwendbarkeit des Bemessungsverfahrens	173
8.4.2	Fälle mit guter Anwendbarkeit des neuen Bemessungsverfahrens	181
9	$p_{a,\text{Ring}}$ der mitwirkenden Breite b_m	187
10	Zusammenfassung.....	192
11	Abbildungsverzeichnis.....	197
12	Tabellenverzeichnis.....	208
13	Literaturverzeichnis.....	210

1 Einleitung und Überblick über die Bemessungspraxis von Druckschachtpanzerungen

Für Druckschächte von Hochdruck-Wasserkraftanlagen sind aufgrund der hohen Betriebsdrücke zusätzlich zur Betonauskleidung Stahlpanzerungen notwendig, um die Tragsicherheit und Dichtheit des Druckschachts zu gewährleisten.

Für die Bemessung und die Nachweisführung von Druckschachtpanzerungen sind zwei Bemessungssituationen maßgebend. Zum einen ist eine ausreichende Bemessung der Panzerung auf den vorherrschenden Innendruck im Traglast- und Betriebszustand erforderlich und zum anderen muss der Revisionsfall betrachtet werden, bei dem die entleerte Panzerung aufgrund des im Gebirge vorhandenen Sickerwassers, auf Außendruck belastet wird.

Üblicherweise erfolgt zunächst eine Bemessung aufgrund des Innendrucks, unter Berücksichtigung der Mitwirkung des umgebenden Gebirges beziehungsweise der Betonummantelung. Aus diesem Zustand ergibt sich meist eine vergleichsweise dünne Wandstärke der Druckschachtpanzerung. Die Wandstärke aus dieser Bemessungssituation ist als minimale Rohrwandstärke anzusehen, da für eine dünne Wandstärke die Beulgefährdung größer und für die Bemessung auf Außendruck die Tragfähigkeit geringer ist.

Im zweiten Schritt erfolgt die Bemessung der Panzerung auf die Außendruckbelastung. Aufgrund der Druckspannungen in der Panzerung aus dem Außendruck kann es zum Einbeulen, das heißt zu einem Stabilitätsproblem des Stahlrohres kommen. Daher resultieren für die Bemessungssituation im Revisionsfall unter Umständen größere Wandstärken als aus dem Innendruck.

In Abhängigkeit der Größe des Außendrucks kann die Panzerung bei geringen Drücken ohne Ringsteifen und bei höheren Drücken entsprechend mit Ringsteifen ausgeführt werden. Durch die Anordnung von Ringsteifen ist es auch bei hohen Außendrücken möglich, die Rohrwanddicke des Stahlrohres gering zu halten.

Für die Bemessung, beziehungsweise den Beulnachweis von ringversteiften Stahlrohren unter Außendruck, sind grundsätzlich zwei unabhängige Nachweise (N1 und N2) zu führen. Der Nachweis N1 ist der Beulnachweis des Ringes unter Berücksichtigung der vollen Mitwirkung des Rohres. Nachweis N2 ist der Beulnachweis des Rohres zwischen zwei Ringsteifen.

Für den Nachweis N1 stehen verschiedene Bemessungsverfahren zur Verfügung. Am häufigsten werden die Bemessungsverfahren von Jacobsen [7] und von Amstutz/Feder [2], [3], [4] verwendet. Bei diesen Verfahren erfolgt der Beulnachweis an einem ebenen 2D-System, unter Berücksichtigung der Stützwirkung des Gebirges und des umgebenden Betonmantels. Eine genauere Beschreibung der beiden Verfahren erfolgt in Kapitel 2.1.

Für den Nachweis N2 haben vorhergehende Untersuchungen [1] gezeigt, dass es sinnvoll ist, das in Eurocode 1993-1-6 [8] („Festigkeit und Stabilität von Schalen“) gezeigte Verfahren für Zylinderschalen unter Außendruck zu verwenden. Dieses Verfahren wird in Kapitel 2.2 näher beschrieben. Anzumerken ist, dass bei den beiden Nachweisen N1 und N2 keine Rohrlängsspannungen berücksichtigt werden.

Mit den genannten Verfahren wurde im Rahmen der Masterarbeit der kritische Außendruck für ausgewählte baupraktische Fälle von Druckschachtpanzerungen (diese sind in Kapitel 3 angeführt), unter Variation der Fließgrenze ($f_y = 355 \text{ N/mm}^2$, $f_y = 550 \text{ N/mm}^2$, $f_y = 690 \text{ N/mm}^2$, $f_y = 890 \text{ N/mm}^2$) ermittelt. Die Auswertungen und Ergebnisse sind in Kapitel 4 für den Nachweis N1 und in Kapitel 5 für den Nachweis N2 angeführt.

Des Weiteren wurden für diese Fälle die Beuldrücke an einem realitätsnahen, dreidimensionalen Finite-Elemente-Modell ermittelt. Die Berechnung erfolgte mit dem Programmpaket Abaqus und wurde als GMNIA-Berechnung, das heißt als geometrisch und materiell nicht lineare Berechnung mit Imperfektionen durchgeführt. Als Imperfektion wurde dem Modell eine Unrundheit (siehe Kapitel 2.1.5) vorgegeben. Die Ergebnisse der GMNIA-Berechnung sind in Kapitel 6.2 dargestellt.

Bei der Auswertung und Gegenüberstellung der Ergebnisse hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse der analytischen Berechnung der jeweiligen Verfahren (Amstutz/Feder, Jacobsen, EC 2), trotz des großen Rechenaufwands, im Vergleich zur realitätsnahen FE-Analyse, keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern. Die Beultragfähigkeit wird in den Nachweisen N1 und N2 zum Teil deutlich über- beziehungsweise unterschätzt. Diese Beobachtung deckt sich auch mit vorhergehenden Untersuchungen zum Thema Druckschachtpanzerungen am Stahlbauinstitut der TU Graz (Forschungsbericht „Beulen von stählernen Druckschachtpanzerungen unter Außendruck“ [1]). Die Gegenüberstellung der Ergebnisse ist in Kapitel 7 zu finden.

Auf Basis der Ergebnisse aus der analytischen Berechnung und der FE-Analyse soll daher in dieser Arbeit ein neues Nachweisformat für Druckschachtpanzerungen, welches in der Forschungsarbeit „Beulen von stählernen Druckschachtpanzerungen unter Außendruck“ vorgeschlagen wird und beide Nachweise N1 und N2 implizit berücksichtigt, weiterentwickelt werden, um die Treffsicherheit des zulässigen kritischen Außendrucks zu erhöhen. Das Nachweisformat wird in Kapitel 8 beschrieben und die dazugehörigen Auswertungen sind im Kapitel 8.2 und 8.3 dargestellt. In Kapitel 8.4 wird auf die Anwendbarkeit des neuen Bemessungsverfahrens eingegangen.

Die Auswirkungen von unterschiedlichen mit dem Versteifungsring mittragenden Breiten des Stahlrohres auf das Bemessungsverfahren werden in Kapitel 9 dargestellt. Diese wurden untersucht, da die mittragende Breite sowohl im neuen als auch im aktuellen Bemessungsverfahren eine wesentliche Größe ist und deren Bestimmung anhand einer Formel erfolgt, die die Komplexität der Ermittlung der mittragenden Breite sehr stark vereinfacht.

Abschließend erfolgt in Kapitel 10 eine Zusammenfassung der Masterarbeit und ein Fazit der Ergebnisse.

2 Bemessungsverfahren für ringversteifte Druckschachtpanzerungen

2.1 Nachweis N1 - Beulnachweis des Ringes unter Berücksichtigung des mitwirkenden Rohres

Die beiden gängigsten Theorien zur Ermittlung des kritischen Beuldrucks von ringversteiften Stahlrohren stammen von Ernst Amstutz (1950) [2], [3], [4] und S. Jacobsen(1972) [7], wobei Jacobsen seine Theorie auf jener von Amstutz aufbaut und kleinere Korrekturen vornimmt.

Beide Theorien legen die Annahme zugrunde, dass sich entlang der Umfangsrichtung eine Beulfigur mit nur einer Beule einstellt, was dem in der Praxis ungünstigsten möglichen Fall entspricht.

Die Theorie von Amstutz wurde außerdem von Taras/Greiner [5] erweitert, um das Durchschlagen von unter Außendruck stehenden Stahlrohren untersuchen zu können. Dies geschieht unter Berücksichtigung der Annahmen nach Feder [6]. Georg Feder trifft für ringversteifte Stahlrohre Annahmen für die Steifigkeiten des Versteifungsringes samt mitwirkender Breite des Stahlrohrs, das Stahlrohr selbst und außerdem für die Schnittkraftaufteilung auf den Versteifungsring und das Stahlrohr.

Nachfolgend werden die genannten Theorien beschrieben.

Sämtliche analytische Auswertungen in dieser Masterarbeit erfolgen anhand dieser beiden Theorien.

2.1.1 Vorgehensweise nach Amstutz für das Ringbeulen

Ernst Amstutz hat im Jahr 1950 [2] eine Veröffentlichung zum Thema der Einbeulgefahr von Druckschichtpanzerungen publiziert. In dieser Veröffentlichung stellt Amstutz ein Verfahren zur Ermittlung des kritischen Außendrucks für starr gebettete Stahlrohre vor und legt diesem folgende Annahmen zugrunde:

- Das Fels- beziehungsweise Betonbett des Panzerrohres kann als unnachgiebig betrachtet werden.
- Der Gebirgsdruck des umgebenden Gebirges kann unberücksichtigt bleiben, da sich vor dem Einbau des Rohres bereits ein Gleichgewichtszustand im Gebirge eingestellt hat.
- Es stellt sich eine Klaffung zwischen dem Rohr und dem Betonbett ein, die durch den Druck des Porenwassers im Gebirge größer wird.
- Das frei verformbare Rohr geht bei einer Steigerung der Außendruckbelastung aufgrund des Erreichens der Stabilitätsgrenze in eine elliptische Form über, sodass sich die nach außen gewölbten Teile des Stahlrohres an die Schachtwand anlegen und dadurch eine weitere Laststeigerung erfolgen kann.

Dieses Verfahren wurde zunächst an einem 2D-Modell eines glatten Rohres („Ringabschnitt des Rohres“) anhand des Zusammenhangs zwischen der Radialausbiegung, dem Moment und der Radialbelastung durch eine Differentialgleichung beschrieben und anhand dieser hergeleitet und später erweitert beziehungsweise modifiziert [3], [4].

Wie bereits einleitend angemerkt, legt Amstutz seinen Überlegungen eine Beulfigur des Stahlrohres mit nur einer Beule entlang der Umfangsrichtung zugrunde (siehe Abbildung 1). Anhand dieser Beulfigur ermittelt Amstutz jenen Außendruck, bei dem in einer Randfaser die Fließgrenze erreicht wird und legt diesen als kritischen Außendruck fest.

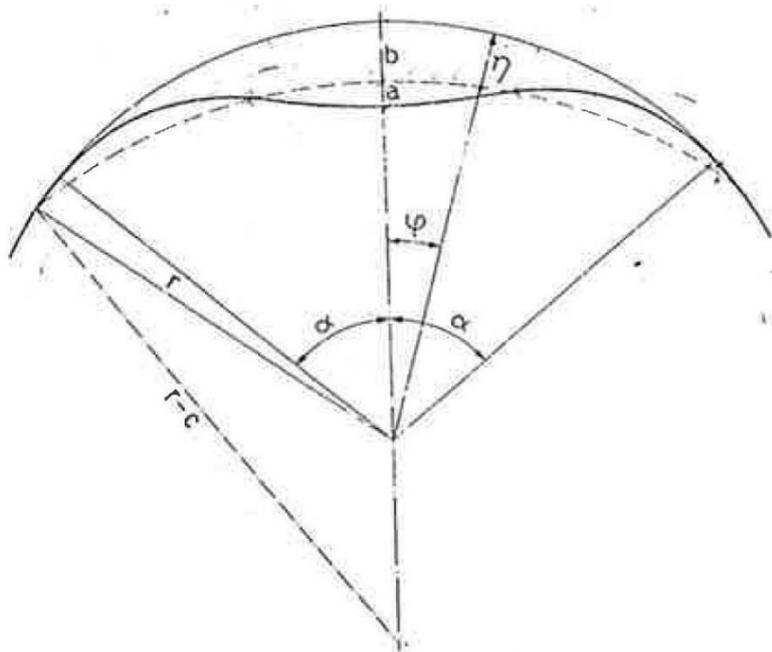


Abbildung 1: Geometrische Zusammenhänge für den Ansatz der Beulfigur von Amstutz [4] S. 542

Die Bestimmung des kritischen Außendrucks für ummantelte Stahlrohre ist durch die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Dehnungen in Umfangsrichtung entsprechend komplex. In seiner Herleitung trifft Amstutz einige Annahmen für Vereinfachungen, womit der kritische Außendruck mit zwei Bestimmungsgleichungen ermittelt werden kann. Nachfolgend sind die beiden **Bestimmungsgleichungen für das glatte Rohr ohne Ringsteifen** angeführt.

$$12 * \left(\frac{R}{t}\right)^2 * \frac{\sigma_N - \sigma_V}{f_y^* - \sigma_N} * \left(\frac{\sigma_N}{E^*}\right)^{1,5} = 1 - 0,45 * \frac{R}{t} * \frac{f_y^* - \sigma_N}{E^*} \quad \text{Gl. 1}$$

$$p_{krit} = \frac{\sigma_N}{\frac{R}{t} * \left(1 + 0,35 * \frac{R}{t} * \frac{f_y^* - \sigma_N}{E^*}\right)} \quad \text{Gl. 2}$$

Dabei bedeuten:

σ_N ... *Normalspannung aus der Normalkraft N*

σ_V ... *Vorspannung aus der Vorspannkraft V*

Beziehungswise bei Vorliegen eines Spaltes j:

$$\sigma_V = -\frac{j}{R} * E^* \quad \text{Gl. 3}$$

Im zweiten Fall ist σ_V jene Spannung die erforderlich ist, um eine Klaffung j zwischen dem Rohr und der Ummantelung zum Verschwinden zu bringen.

R ... *mittlerer Radius des Rohres*

t ... *Wanddicke des Stahlrohrs*

Aufgrund der behinderten Querkontraktion verwendet Amstutz für den E-Modul und die Fließspannung erhöhte Werte:

$$E^* = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad \text{Gl. 4}$$

$$f_y^* = m * f_y \quad \dots \text{ mit } m = \frac{1}{\sqrt{1 - \nu + \nu^2}} \quad \text{Gl. 5}$$

E^* ... *erhöhter E – Modul*

f_y^* ... *erhöhte Fließspannung*

ν ... *Querkontraktionszahl (für Stahl: $\nu = 0,3$)*

Amstutz führt weiters einen Wert μ ein, mit dem die Fließspannung weiter erhöht werden darf. In seiner Veröffentlichung aus dem Jahr 1969 merkt er dazu an: „[...] μ ist ein Koeffizient für die Stützwirkung, der angibt, wievielfach größer die Fließgrenze auf Biegung gegenüber der Fließgrenze auf Zug ist.“ [4] S. 544

In [1] hat sich gezeigt, dass dieser Faktor μ nicht zutreffend ist und nicht angewendet werden sollte.

$$\mu = 1,5 - 0,5 * \left(\frac{1}{1 + \frac{E^*}{f_y^*} * 0,002} \right)^2 \quad \text{Gl. 6}$$

Daraus ergibt sich die erhöhte Fließgrenze f_y^{**} zu:

$$f_y^{**} = m * \mu * f_y \quad \text{Gl. 7}$$

Zur Vollständigkeit sind auch die allgemeinen Formeln, mit denen auch der kritische Außendruck für **ringversteifte Rohre** ermittelt werden kann, nachfolgend angeführt.

$$\frac{\sigma_N - \sigma_V}{f_y - \sigma_N} * \left(\frac{R}{i} * \sqrt{\frac{\sigma_N}{E}} \right)^3 = 1,73 * \frac{R}{i} * \left(1 - 0,0225 * \frac{R}{e} * \frac{f_y - \sigma_N}{E} \right) \quad \text{Gl. 8}$$

$$p_{kr} = \frac{F * \sigma_N}{R * \left(1 + 0,175 * \frac{R}{e} * \frac{f_y - \sigma_N}{E} \right)} \quad \text{Gl. 9}$$

Dabei sind:

R ... mittlerer Radius des Rohres

$$i \text{ ... Trägheitsradius} \quad i = \sqrt{\frac{I}{F}} \quad \text{Gl. 10}$$

F ... Querschnittsfläche

I ... Flächenträgheitsmoment des Ringes inkl. mitwirkendes Rohr

e ... Abstand der äußersten Faser des Querschnitts zur Schwerachse

σ_N ... Normalspannung aus der Normalkraft N

σ_V ... Vorspannung aus der Vorspannkraft V

bzw. jene Spannung, die erforderlich ist, um eine Klaffung j zum Verschwinden zu bringen

f_y ... Fließgrenze

E ... E – Modul

Für ringversteifte Rohre merkt Amstutz [4] bereits in seiner Veröffentlichung 1969 an, dass zwei Untersuchungen anzustellen sind. Zum einen ist eine Untersuchung für das Einbeulen des Gesamtquerschnitts durchzuführen. Dabei sind für die Querschnittswerte I , i und e der Querschnitt der Steife, samt einer mitwirkenden Breite des Stahlrohrs heranzuziehen und für die Fläche F der Gesamtquerschnitt des Stahlrohrs von Ringsteife zu Ringsteife. Für die mitwirkende Breite gibt Amstutz einen Wert der dreißigfachen Blechstärke an. In der zweiten Untersuchung wird das Einbeulen des Stahlrohrs zwischen den Ringen untersucht. Es kann dabei davon ausgegangen werden, dass das Rohr als freies Rohr ohne Stützung der Betonauskleidung betrachtet werden kann. Für diesen Nachweis verweist Amstutz in seiner Veröffentlichung von 1969 [4] auf andere Theorien.

2.1.2 Vorgehensweise nach Feder für das Ringbeulen

Wie bereits in der Einleitung zu diesem Kapitel beschrieben, trifft Georg Feder [6] für ringversteifte Stahlrohre Annahmen für die Steifigkeiten des Versteifungsringes samt mitwirkender Breite des Stahlrohrs, das Stahlrohr selbst und außerdem für die Schnittkraftaufteilung auf den Versteifungsring und das Stahlrohr. Diese Annahmen sind an dieser Stelle dargestellt.

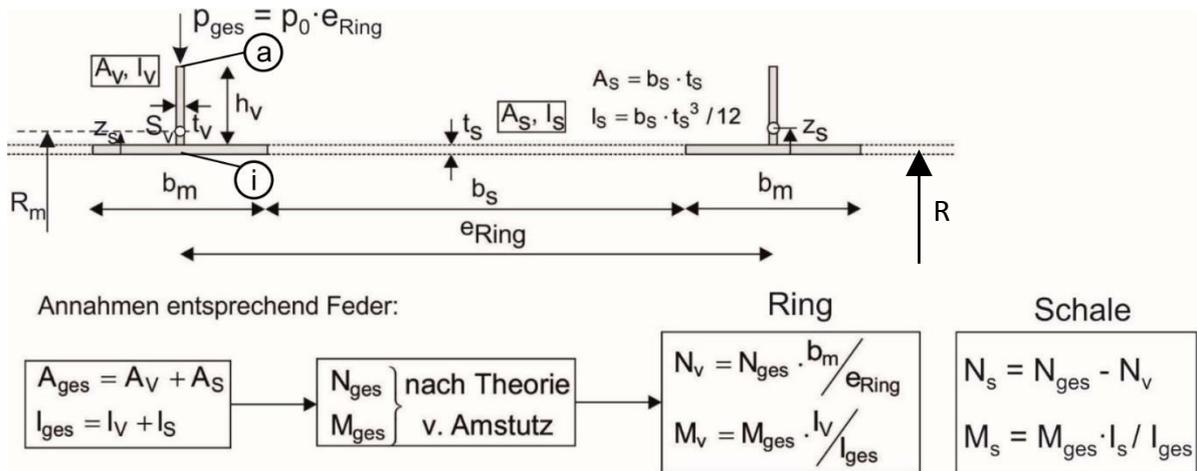


Abbildung 2: Ansatz von Feder [6] zur Bestimmung der Steifigkeiten und Aufteilung der Schnittkräfte [1] S. 73

Auch für die mitwirkende Breite des Stahlrohrs, im Verbund mit der Ringsteife wirkend, gibt Feder [6] einen Ansatz an. Er merkt dazu jedoch an, dass dieser Ansatz im Grunde nur für die Ermittlung der Spannungen aus der Normalkraft gültig ist und es richtiger wäre, für die Bestimmung der Trägheitsmomente der Versteifungsringe einen anderen Ansatz zu wählen. Die Formel für die mitwirkende Breite lautet:

$$b_m = t_v + 1,56 * \sqrt{R * t_s} \quad \text{Gl. 11}$$

Mit

t_v ... Dicke der Ringsteife

t_s ... Rohrwanddicke

R ... mittlerer Radius des Rohrs

2.1.3 Berechnungsverfahren nach Amstutz - aufbereitet von Taras/Greiner [5]

In Fällen in denen sehr schlanke Rohre in Kombination mit einer hohen Fließgrenze verwendet werden, kann es dazu kommen, dass die Fließspannung unter Außendruck nie erreicht wird und stattdessen ein Durchschlagen der Rohrwandung auftritt. Der Ansatz von Amstutz, dass der kritische Außendruck jener ist, bei dem die Fließspannung in einer Faser des Querschnitts erreicht wird, ist daher bei solchen Fällen nicht zutreffend und überschätzt den kritischen Außendruck.

Aufgrund dessen wurde von Taras/Greiner [5], ausgehend von der Theorie von Amstutz, das Durchschlagproblem formuliert, ohne die Bedingung der Fließspannung zu berücksichtigen. Im Wesentlichen erfolgt die Herleitung anhand der Differentialgleichung des Kreisringes unter Außendruck unter den folgenden geometrischen Randbedingungen:

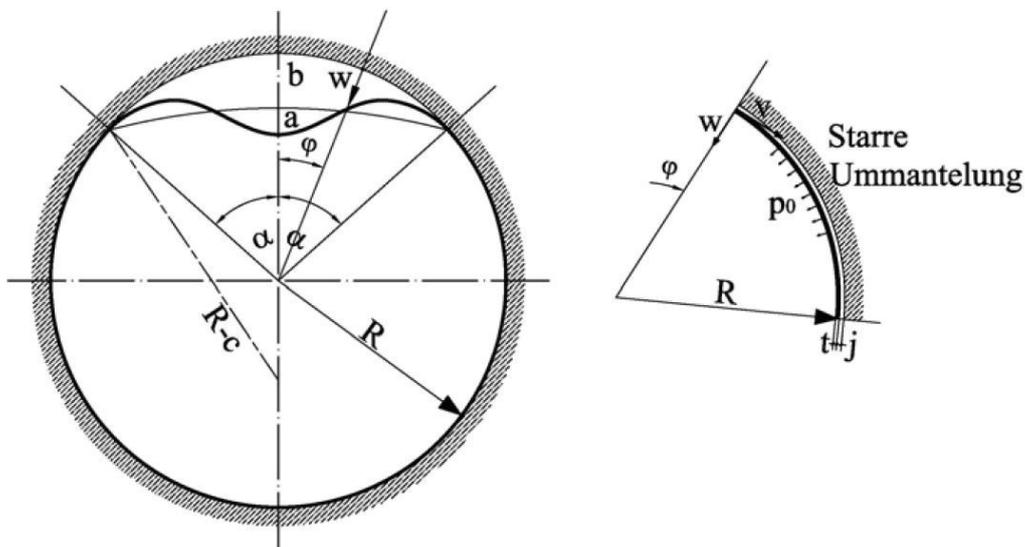


Abbildung 3: Darstellung der Ansätze nach Taras/Greiner [5] S.3

Für $\varphi = \alpha$ gilt:

$$w = 0$$

$$w' = 0$$

$$M = 0$$

α ... halber Öffnungswinkel der Beule

φ ... Laufvariable

Die zweite Randbedingung ist die Verträglichkeitsbedingung der Umfangsverformungen. Diese besagt, dass die Gesamtlänge der gebeulten Figur exakt dem Umfang des unter Außendruck stehenden, nicht ausgebeulten Rohrs entspricht. [5]

Die genaue Herleitung ist in [5] zu finden.

Mit diesen Ansätzen ist es möglich, jedem Verformungszustand des ausgebeulten Systems einen Außendruck zuzuordnen. Der Außendruck beim Durchschlagen ergibt sich dann als das Maximum der einzelnen Verformungszustände.

In Abbildung 4 ist beispielhaft für den Anwendungsfall 1 (Anwendungsfälle siehe Kapitel 3) für jeden betrachteten Verformungszustand des glatten Rohres der Außendruck p gegenüber der, aufgrund der behinderten Querkontraktion um den Faktor m (siehe Gl. 26) reduzierten, Umfangsnormalspannung in der Rohrwandung σ_v aufgetragen (blaue Linie). Die Durchschlaglast als Maximum der einzelnen Verformungszustände ist rot markiert.

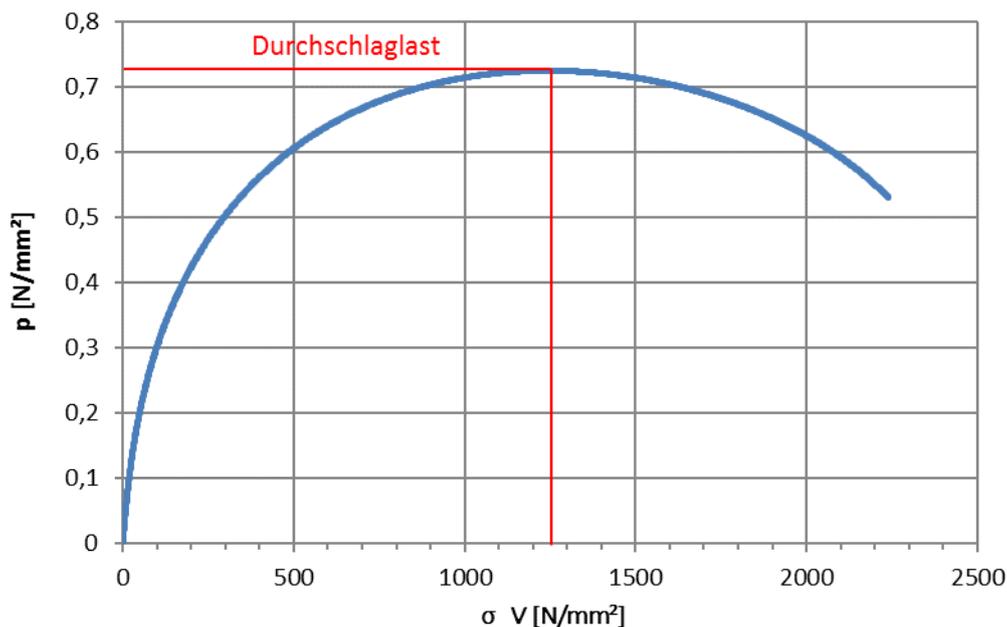


Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung der Durchschlaglast

Der für das System maßgebende kritische Außendruck kann dann entweder aus der Bedingung des Erreichens der Fließspannung in Umfangsrichtung, oder als Außendruck beim Durchschlagen festgelegt werden.

Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass das Problem des Durchschlagens praktisch nur bei Rohren ohne Ringsteifen vorkommen kann.

- Vorgehensweise für das unversteifte Rohr

Nachfolgend sind die Bestimmungsgleichungen für dieses Verfahren angeführt.

$$b = \frac{-a * \lambda * \sin(\lambda * \alpha)}{\sin(\alpha)} \quad \text{Gl. 12}$$

$$c = a * (\lambda^2 - 1) * \cos(\lambda * \alpha) \quad \text{Gl. 13}$$

$$\lambda * \tan(\alpha) = \tan(\lambda * \alpha) \quad \text{Gl. 14}$$

Dabei sind:

a, b, c ... Maße zur Beschreibung der Beulfigur (vgl. Abbildung 3)

α ... Öffnungswinkel der Beule (vgl. Abbildung 3) im Bogenmaß

$$\lambda = \sqrt{1 + \frac{p_0 * R^3}{E * J}} \quad \text{Gl. 15}$$

λ ... Lastfaktor

$$E^* * J = \frac{E * t^3}{12} \quad \text{Gl. 16}$$

Für den E-Modul kann, zufolge behinderter Querkontraktion ($\nu = 0.3$), ein erhöhter Wert E^* für unversteifte Stahlrohre angesetzt werden:

$$E^* = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad \text{Gl. 17}$$

Die vierte Bestimmungsgleichung lautet:

$$\frac{\pi * R}{E^* * t} * \left[p_0 * R - a * (\lambda^2 - 1) * \cos(\lambda * \alpha) * \left(p_0 + \frac{E^* * J}{R^3} \right) \right] + j * \pi = a * A - a^2 * (B + C) \quad \text{Gl. 18}$$

Dabei ist:

$$A = \left(\lambda - \frac{1}{\lambda} \right) * [\lambda * \alpha * \cos(\lambda * \alpha) - \sin(\lambda * \alpha)] \quad \text{Gl. 19}$$

$$B = \frac{1}{4 * R} * \left[\alpha + \lambda^2 * \alpha * \frac{\sin(\lambda * \alpha)^2}{\sin(\alpha)^2} + \lambda^2 * \frac{\sin(\lambda * \alpha)^2}{\tan(\alpha)} + 2 * (\lambda^2 - 1) * \alpha * \cos(\lambda * \alpha)^2 - 4 * \sin(\lambda * \alpha) * \cos(\lambda * \alpha) * \left(\lambda^3 - \lambda + \frac{3}{4} * \lambda \right) \right] \quad \text{Gl. 20}$$

$$C = \frac{1}{4 * R} * \left[\lambda^2 * \alpha - \lambda * \sin(\lambda * \alpha) * \cos(\lambda * \alpha) + \lambda^2 * \alpha * \frac{\sin(\lambda * \alpha)^2}{\sin(\alpha)^2} - \lambda^2 * \frac{\sin(\lambda * \alpha)^2}{\tan(\alpha)} \right] \quad \text{Gl. 21}$$

R ... mittlerer Radius des Stahlrohrs (wenn Rohr unversteift)

$R = R_m$... Radius im Schwerpunkt des Ringes (wenn Rohr versteift)

t ... Blechstärke des Stahlrohrs

p_0 ... Außendruck

j ... Initialspalt zwischen Rohr und Ummantelung

Mit den angeführten Gleichungen (Gl. 12) bis (Gl. 21) können für vorgegebene, schrittweise gesteigerte Werte von a die unbekanntenen Werte α, λ, p_0, b und c bestimmt werden. Unter a

ist ein Teil der Beulauslenkung im Scheitel zu verstehen (vgl. Abbildung 3). Anschließend können die maximalen Umfangsnormalspannungen an der Stelle $\varphi = 0$ (Mitte der Beule, vgl. Abbildung 3) mit folgenden Formeln bestimmt werden:

$$\sigma_N = \frac{N}{t} = \frac{p_0}{t} * [R - a * (1 + (\lambda^2 - 1) * \cos(\lambda * \alpha))] \quad \text{Gl. 22}$$

$$\sigma_M = -\frac{M}{J} * \frac{t}{2} = \frac{a * E * t}{2 * R^2} * (\lambda^2 - 1) * (1 - \cos(\lambda * \alpha)) \quad \text{Gl. 23}$$

$$\sigma_{max,\varphi=0} = \sigma_N + \sigma_M \leq f_y^* \quad \text{oder} \quad p_{0(a_i)} < p_{0(a_{i-1})} \quad \text{Gl. 24}$$

Ist die Bedingung nach Gl. 24 erfüllt, kann der zu diesem Inkrement a gehörende Außendruck als kritischer Außendruck $p_{0,krit}$ angesehen werden.

Für die Fließspannung kann ein erhöhter Wert f_y^* aufgrund der behinderten Querkontraktion angesetzt werden.

$$f_y^* = m * f_y = 1,125 * f_y \quad \text{Gl. 25}$$

$$\text{mit } m = \frac{1}{\sqrt{1 - \nu + \nu^2}}; \nu = 0,3 \quad \text{Gl. 26}$$

- Vorgehensweise für ringversteifte Rohre

Der kritische Außendruck für ringversteifte Rohre kann mit den Ansätzen nach Feder [6] (siehe 2.1.2, Abbildung 2) für die Querschnittswerte beziehungsweise die Schnittkraftaufteilung ermittelt werden (nachfolgende Bezeichnungen siehe Abbildung 2).

$$A_S = b_S * t_S \quad \text{Gl. 27}$$

$$I_S = \frac{b_S * t_S^3}{12} \quad \text{Gl. 28}$$

$$A_V = h_V * t_V + t_S * b_m \quad (b_m \text{ nach Gl. 11}) \quad \text{Gl. 29}$$

$$I_V = \frac{b_m * t_S^3}{12} + \frac{t_V * h_V^3}{12} + t_V * h_V * \left(\frac{t_S}{2} + \frac{h_V}{2}\right)^2 - A_V * \left(z_S - \frac{t_S}{2}\right)^2 \quad \text{Gl. 30}$$

$$\text{mit } z_S = \frac{h_V * t_V * \left(\frac{t_S}{2} + \frac{h_V}{2}\right) + \frac{t_S}{2}}{A_V} \quad \text{Gl. 31}$$

$$A_{ges} = e_{Ring} * t_S + h_V * t_V \quad \text{Gl. 32}$$

$$I_{ges} = I_S + I_V \quad \text{Gl. 33}$$

$$W_{v,a} = \frac{I_V}{t_S + h_V - z_S} \quad \text{Gl. 34}$$

$$W_{v,i} = \frac{I_V}{z_S} \quad \text{Gl. 35}$$

Mit den Steifigkeiten EA_{ges} und EI_{ges} kann das Berechnungsverfahren nach Taras/Greiner angewendet werden. Eine Erhöhung des E-Moduls wird für ringversteifte Rohre nicht berücksichtigt. Die Steifigkeitswerte gehen dabei in Gl. 18 ein. Hierbei ist Et gegen EA_{ges} und EI gegen EI_{ges} zu ersetzen. Aus der Berechnung ergibt sich als Linienlast der Außendruck p_{ges} , der noch durch den Ringabstand zu teilen ist, um auf den Außendruck p_0 bzw. $p_{0,krit}$ zu kommen.

Die Normalkraft N_{ges} und das Moment M_{ges} können mit den nachstehenden Gleichungen ermittelt werden:

für $\varphi \leq \alpha$:

$$N_{ges} = p_{ges} \cdot (R_m - a \cdot \cos(\lambda \cdot \varphi) - c) \quad \text{Gl. 36}$$

$$M_{ges} = \frac{-EI_{ges}}{R^2} \cdot (a \cdot (1 - \lambda^2) \cdot \cos(\lambda \cdot \varphi) + c) \quad \text{Gl. 37}$$

für $\varphi > \alpha$:

$$N_{ges} = p_{ges} \cdot (R_m - a \cdot \cos(\lambda \cdot \varphi) - c) \quad \text{Gl. 38}$$

$$M_{ges} = 0 \quad \text{Gl. 39}$$

Das maximal positive (im Scheitel; $\varphi = 0$) und das maximal negative Biegemoment ergibt sich daher zu:

$$M_{ges,max} = \frac{EI_{ges}}{R_m^2} \cdot a \cdot (\lambda^2 - 1) \cdot (1 - \cos(\lambda \cdot \alpha)) \quad \text{Gl. 40}$$

$$\text{zugeh. } N_{ges} = p_{ges} \cdot (R_m - a \cdot [1 + (\lambda^2 - 1) \cdot \cos(\lambda \cdot \alpha)]) \quad \text{Gl. 41}$$

$$M_{ges,min} = \frac{EI_{ges}}{R_m^2} \cdot a \cdot (\lambda^2 - 1) \cdot (1 + \cos(\lambda \cdot \alpha)) \quad \text{Gl. 42}$$

$$\text{zugeh. } N_{ges} = p_{ges} \cdot (R_m - a \cdot [-1 + (\lambda^2 - 1) \cdot \cos(\lambda \cdot \alpha)]) \quad \text{Gl. 43}$$

Aus den vorangestellten Gleichungen Gl. 40 bis Gl. 43 können nun die Spannungen im Versteifungsring und der Schale ermittelt werden. Der kritische Außendruck $p_{0,krit}$ ergibt sich dann als jener Außendruck, bei dem die Fließgrenze in einer der vier Randfasern in der Schale (innen beziehungsweise außen) beziehungsweise im Versteifungsring (innen beziehungsweise außen) überschritten ist. Ein Durchschlagproblem liegt bei ringversteiften Druckschachtpanzerungen nicht vor.

1.) Maximale Druckspannungen im Scheitelpunkt ($\varphi = 0$, außen, Punkt 1, vgl. Abbildung 5):

a.) Im Ring

$$\sigma_{v,a} = \frac{N_{ges} \cdot \frac{b_m}{e_{Ring}}}{A_v} + \frac{M_{ges,max} \cdot \frac{I_v}{I_{ges}}}{W_{v,a}} \leq f_y \quad \text{Gl. 44}$$

b.) In der Schale

$$\sigma_{s,a} = \frac{N_{ges} \cdot \left(1 - \frac{b_m}{e_{Ring}}\right)}{A_s} + \frac{M_{ges,max} \cdot \frac{I_s}{I_{ges}}}{(e_{Ring} - b_m) \cdot \frac{t_s^2}{6}} \leq f_y \quad \text{Gl. 45}$$

2.) Maximale Druckspannung am Punkt mit größtem negativen Moment (innen, Punkt 2, vgl. Abbildung 5):

a.) Im Ring

$$\sigma_{v,i} = \frac{N_{ges} \cdot \frac{b_m}{e_{Ring}}}{A_v} + \frac{M_{ges,min} \cdot \frac{I_v}{I_{ges}}}{W_{v,i}} \leq f_y \quad \text{Gl. 46}$$

b.) In der Schale

$$\sigma_{s,i} = \frac{N_{ges} \cdot \left(1 - \frac{b_m}{e_{Ring}}\right)}{A_s} + \frac{M_{ges,min} \cdot \frac{I_s}{I_{ges}}}{(e_{Ring} - b_m) \cdot \frac{t_s^2}{6}} \leq f_y \quad \text{Gl. 47}$$

Eine erhöhte Fließgrenze wird für ringversteifte Rohre nicht angesetzt.

Für die Bemessung wird immer die maximale Druckspannung im Scheitelpunkt maßgebend bei $\varphi = 0$ (siehe und Abbildung 5).

In Abbildung 5 sind beispielhaft für den Anwendungsfall 1 ($R_0 = 2507,5$ mm; $t = 15$ mm; $h_v = 150$ mm; $t_v = 15$ mm; $f_y = 355$ N/mm², siehe Abschnitt 3) mit Ringabstand $e = 1750$ mm und ohne vorgegebene Unrundheit die Spannungsverläufe des Versteifungsrings in Umfangsrichtung an der Außenseite (rote Linie) und an der Innenseite (orange Linie) dargestellt.

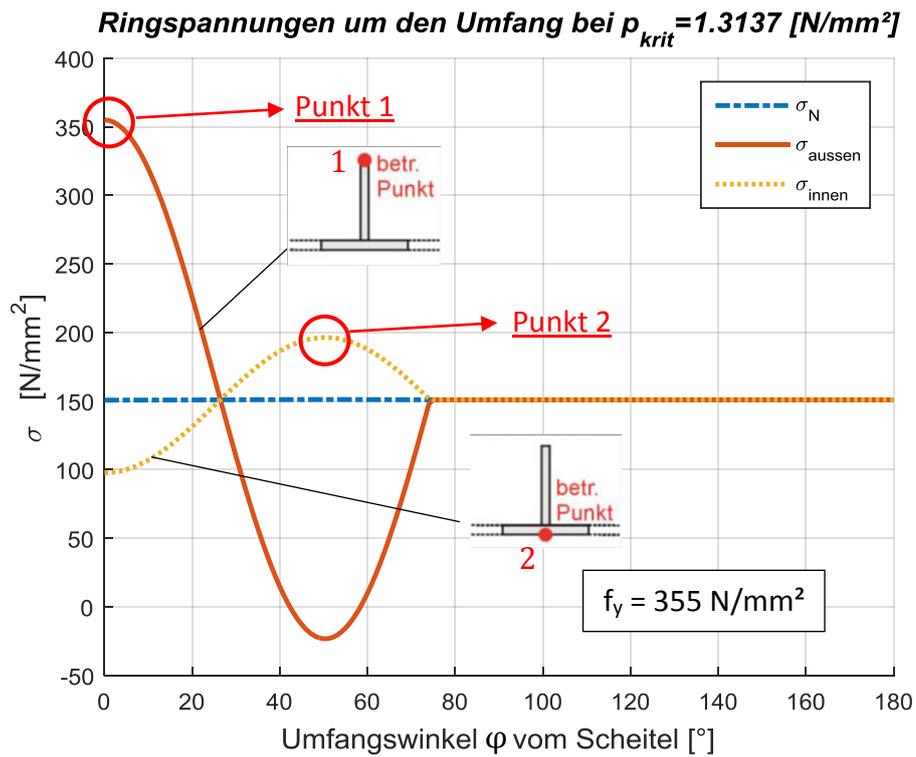


Abbildung 5: Darstellung der Ringspannungen um den Umfang nach dem Bemessungsmodell von Amstutz/Feder für den Anwendungsfall 1 ($R_0 = 2507,5 \text{ mm}$; $t = 15 \text{ mm}$; $h_v = 150 \text{ mm}$; $t_v = 15 \text{ mm}$; $e = 1750$; $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$) [1] S. 82

2.1.4 Vorgehensweise nach Jacobsen für das Ringbeulen

S. Jacobsen beschreibt in seiner Veröffentlichung aus dem Jahr 1972 [7] die zu diesem Zeitpunkt gängigsten Theorien zum Einbeulen von Druckschachtpanzerungen. Er unterscheidet dabei grundsätzlich die asymmetrische Theorie, wie jene von Amstutz, und die rotationssymmetrische, wie jene von Sulzer. Die rotationssymmetrische Theorie setzt voraus, dass das Stahlrohr mit der Umhüllung konzentrisch bleibt und sich dadurch mindestens zwei gegenüberliegende Beulen einstellen. Bei der asymmetrischen Theorie wird angenommen, dass der Umfang des Rohrs aufgrund des Außendrucks kleiner wird und es zur Bildung eines Spalts zwischen dem Rohr und der Umhüllung kommt. Infolgedessen kann sich das Rohr an einer Seite an die Wandung anlegen und es kann an der anderen Seite, wo nun der Spalt doppelt so groß ist, zum Einbeulen des Rohrs unter dem kritischen Außendruck kommen.

Die rotationssymmetrische Theorie liefert bessere Ergebnisse im Sinne von höheren zulässigen Außendrücken und ist auch einfacher anwendbar als die asymmetrische. Jacobsen ist jedoch der Meinung, dass diese Theorie im Sinne einer sichereren Bemessung im Kraftwerksbau keine Anwendung finden und die Bemessung von Druckschachtpanzerungen nach asymmetrischen Theorien erfolgen sollte. Daraus resultiert eine größere Blechdicke für die Stahlrohre und daher ein höherer Stahlbedarf. Jedoch stehen dem erhöhten Stahlbedarf weniger arbeits- und kostenintensive Reparaturen in Schadensfällen und die geringere Notwendigkeit von aufwendigen Injektionsarbeiten zur Verringerung der Spaltmaße gegenüber.

Auf diesen Annahmen aufbauend leitet Jacobsen die Bestimmungsgleichungen für die Ermittlung des kritischen Außendrucks p_{krit} anhand einer Beulfigur mit einer Beule her. Gegenüber Amstutz verwendet Jacobsen für seine Beulfigur andere geometrische Zusammenhänge, die in Abbildung 6 dargestellt sind. Nachfolgend sind die Bestimmungsgleichungen für das glatte und das ringversteifte Rohr dargestellt.

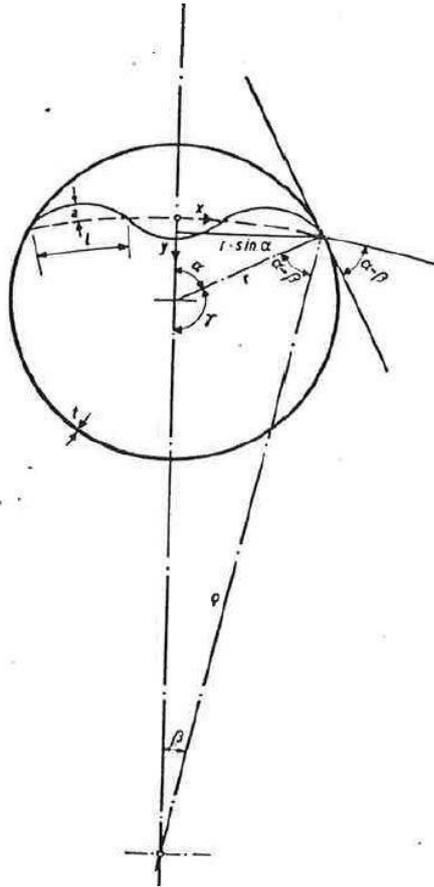


Abbildung 6: Geometrische Zusammenhänge für den Ansatz der Beulfigur von Jacobsen [7] S. 374

- **Bestimmungsgleichungen für das glatte Rohr**

$$\frac{R}{t} = \sqrt{\frac{\left(\frac{9}{4} \cdot \frac{\pi^2}{\beta^2} - 1\right) \cdot \left[\pi - \alpha + \beta \cdot \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}\right)^2\right]}{12 \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}\right)^3 \cdot \left[\alpha - \pi \cdot \frac{j}{R} - \beta \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \cdot \left(1 + \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{4}\right)\right]}} \quad \text{Gl. 48}$$

$$\frac{p_{krit}}{E^*} = \frac{\frac{9}{4} \cdot \left(\frac{\pi}{\beta}\right)^2 - 1}{12 \cdot \left(\frac{R}{t}\right)^3 \cdot \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}\right)^3} \quad \text{Gl. 49}$$

$$\frac{f_y^*}{E^*} = \frac{1}{2} \cdot \frac{t}{R} \cdot \left(1 - \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}\right) + \frac{p_{krit}}{E^*} \cdot \frac{R}{t} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \cdot \left(1 + 4 \cdot \frac{\beta}{\pi} \cdot \frac{R}{t} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \cdot \tan(\alpha - \beta)\right) \quad \text{Gl. 50}$$

Dabei sind:

R ... mittlerer Radius des Rohres

t ... Wanddicke des Stahlrohrs

α, β ... Maße zur Beschreibung der Beulfigur (vgl. Abbildung 6)

j ... Initialspalt zwischen Rohr und Ummantelung

p_{krit} ... kritischer Außendruck (bezogen auf Ringabstand e); Einheit $\left[\frac{N}{mm} \right]$

$$E^* = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad \text{Gl. 51}$$

$$f_y^* = \frac{1}{\sqrt{1 - \nu + \nu^2}} * f_y = 1.125 * f_y \quad \text{... mit } \nu = 0,3 \quad \text{Gl. 52}$$

Mit diesen drei Bestimmungsgleichungen ist es nun möglich, auf iterativem Weg die drei Unbekannten p_{krit} , α und β zu bestimmen. Dazu wurde im Rahmen dieser Masterarbeit das Softwarepaket Mathematica verwendet.

Jacobsen hat 1972 nicht nur die Herleitung des kritischen Außendrucks veröffentlicht, sondern auch Auswertungen in Form von Diagrammen, mit denen es für bestimmte D/t -Verhältnisse und der Fließspannung des Rohrs einfach möglich ist, den kritischen Außendruck zu bestimmen (D = Rohrdurchmesser; $D = 2 * R$).

- **Bestimmungsgleichungen für das ringversteifte Rohr**

Des Weiteren beschreibt Jacobsen in seiner Veröffentlichung die Bestimmungsgleichungen für ringversteifte Rohre. Diese sind nachfolgend wie veröffentlicht angeführt.

$$\frac{R}{\sqrt{12 * \frac{I}{F}}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{9}{4} * \frac{\pi^2}{\beta^2} - 1\right) * \left[\pi - \alpha + \beta * \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\right)^2\right]}{12 \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\right)^3 * \left[\alpha - \pi * \frac{j}{R} - \beta * \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} * \left(1 + \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{4}\right)\right]}} \quad \text{Gl. 53}$$

$$\frac{p_{krit}}{E * F} * \sqrt{12 * \frac{I}{F}} = \frac{\frac{9}{4} * \left(\frac{\pi}{\beta}\right)^2 - 1}{\frac{R^3}{\frac{I}{F} * \sqrt{12 * \frac{I}{F}}} * \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\right)^3} \quad \text{Gl. 54}$$

$$\frac{f_y}{E} = \frac{h}{\sqrt{12 * \frac{I}{F}}} * \frac{\sqrt{12 * \frac{I}{F}}}{R} * \left(1 - \frac{\sin\beta}{\sin\alpha}\right) + \frac{p_{krit}}{E * F} * \sqrt{12 * \frac{I}{F}} * \frac{R}{\sqrt{12 * \frac{I}{F}}} * \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} * \left(1 + 8 * \frac{\beta}{\pi} * \frac{h}{\sqrt{12 * \frac{I}{F}}} * \frac{R}{\sqrt{12 * \frac{I}{F}}} * \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} * \tan(\alpha - \beta)\right) \quad \text{Gl. 55}$$

Dabei sind:

R ... Radius im Schwerpunkt des Versteifungsringes mit mitwirkender Breite des Rohres (vgl. Abbildung 7); dies entspricht R_m in Abbildung 2

I ... Trägheitsmoment des Versteifungsringes inkl. mitwirkender Breite b_m der Schale; dies entspricht I_V nach Gl. 30

*mit $b_m = 1,56 * \sqrt{R * t}$ Gl. 56*

F ... Querschnittsfläche der Schale zwischen den Ringen und des Versteifungsringes; dies entspricht der Fläche A_{ges} nach Gl. 32

h ... Abstand der äußersten Faser von der Nulllinie (vgl. Abbildung 7)

α, β ... Maße zur Beschreibung der Beulfigur (vgl. Abbildung 6)

j ... Initialspalt zwischen Rohr und Ummantelung

p_{krit} ... kritischer Außendruck

E ... E – Modul

f_y ... Fließgrenze

Anmerkung: Bei ringversteiften Rohren wird für den E-Modul und die Fließgrenze f_y kein erhöhter Wert (E^* bzw. f_y^*) aufgrund von v verwendet.

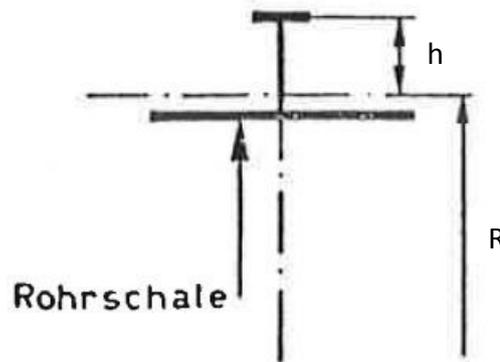


Abbildung 7: Definition von h und R [7], S. 377

Zu den Gleichungen Gl. 54 und Gl. 55 sei gesagt, dass diese vereinfacht werden können und diese Darstellung wahrscheinlich bewusst gewählt wurde, um die Wichtigkeit des Parameters $\sqrt{12 * \frac{I}{F}}$ hervorzuheben.

Die vereinfachten Gleichungen lauten:

(Anmerkung: Gl. 57 ist ident zu Gl. 53)

$$\frac{R}{\sqrt{12 * \frac{I}{F}}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{9}{4} * \frac{\pi^2}{\beta^2} - 1\right) * \left[\pi - \alpha + \beta * \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\right)^2\right]}{12 \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\right)^3 * \left[\alpha - \pi * \frac{j}{R} - \beta * \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} * \left(1 + \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{4}\right)\right]}} \quad \text{Gl. 57}$$

$$\frac{p_{krit}}{E * F} = \frac{\frac{9}{4} * \left(\frac{\pi}{\beta}\right)^2 - 1}{\frac{R^3}{I} * \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\right)^3} \quad \text{Gl. 58}$$

$$\frac{f_y}{E} = \frac{h}{R} * \left(1 - \frac{\sin\beta}{\sin\alpha}\right) + \frac{p_{krit}}{E * F} * R * \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} * \left(1 + 8 * \frac{\beta}{\pi} * \frac{h * R}{12 * \frac{I}{F}} * \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} * \tan(\alpha - \beta)\right) \quad \text{Gl. 59}$$

Zu den Gleichungen Gl. 53 bis Gl. 55 beziehungsweise Gl. 57 bis Gl. 59 ist anzumerken, dass der resultierende kritische Außendruck p_{krit} sich auf den Ringabstand bezieht und daher noch durch diesen dividiert werden muss, um den Wert des Außendruckes $p_{0,krit}$ pro Fläche zu erhalten.

2.1.5 Unrundheit u des Rohrs beziehungsweise der Rohrschale

Mit den Formeln von Amstutz (Taras/Greiner) [2], [3], [4], [5], [6] und Jacobsen [7] kann eine Unrundheit des Stahlrohrs nicht direkt berücksichtigt werden. Dies ist jedoch erforderlich, da es das perfekt runde Rohr praktisch nicht gibt und eine Unrundheit eine lokale Abflachung darstellt, die den kritischen Beuldruck herabsetzt. Üblicherweise wird die Unrundheit mit dem Verhältnis u/t angegeben. Für die Berücksichtigung der Unrundheit wird angenommen, dass der Maximalwert der Unrundheit mit der maximalen Beulverformung zusammenfällt. In den Formeln von Amstutz und Jacobsen kann die Unrundheit über einen erhöhten mittleren Radius R^* des Rohres beziehungsweise der Rohrschale bei ringversteiften Rohren berücksichtigt werden.

Der erhöhte Radius R^* kann mit folgender Formel bestimmt werden:

$$R^* = \frac{(R \cdot \sin 25^\circ)^2 + [R \cdot (1 - \cos 25^\circ)]^2 + u^2 - 2 \cdot R \cdot u \cdot (1 - \cos 25^\circ)}{2 \cdot [R \cdot (1 - \cos 25^\circ) - u]} \quad \text{Gl. 60}$$

Zur Messung der Unrundheit werden sogenannte Montelschablonen (50° Schablonen, vgl. Abbildung 8) verwendet.

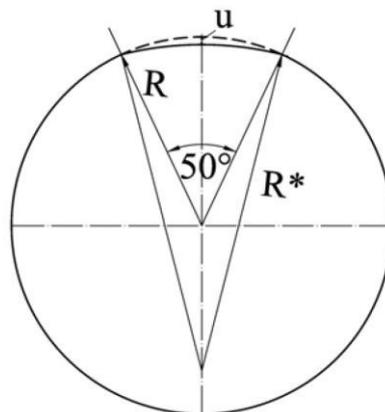


Abbildung 8: Geometrische Beziehungen der Unrundheit u (gemessen an einer Montelschablone) [1] S.43

2.2 Nachweis N2 – Beulnachweis des Rohres zwischen zwei Ringsteifen

Wie bereits in der Einleitung angemerkt, haben vorhergehende Untersuchungen [1] gezeigt, dass es für den Nachweis N2 sinnvoll ist, das in Eurocode 1993-1-6 [8] („Festigkeit und Stabilität von Schalen“) für Zylinderschalen unter Außendruck gezeigte Verfahren zu verwenden. Dabei wird in Abhängigkeit der Geometrie des Systems (kurzer, mittellanger oder langer Zylinder) zunächst die ideale Umfangsbeulspannung $\sigma_{0,RCR}$ ermittelt und mit dieser ein bezogener Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_\theta$ und in weiterer Folge der elasto-plastische Beul-Abminderungsfaktor χ ermittelt, mit welchem durch Multiplikation mit der Streckgrenze der Beulwiderstand bestimmt werden kann. Als Ausführungsklasse ist bei Druckschichtpanzerungen von Klasse A auszugehen.

Das Ablaufschema für das Verfahren ist in Abbildung 9 dargestellt. Als erster Schritt wird der dimensionslose Längenparameter ω über die geometrischen Größen der Zylinderschale ermittelt. Danach wird der Faktor C_θ bestimmt, der von den Randbedingungen der Zylinderschale abhängig ist. Für die Schale zwischen zwei Ringen einer Druckschichtpanzerung können die Randbedingungen als radial unverschieblich und eingespannt (Randbedingung BC1) angenommen werden, da die Ringe einbetoniert sind. C_θ ergibt sich daher zumindest mit 1,5. Mit ω und C_θ wird festgelegt, ob die Umfangsbeulspannung $\sigma_{\theta,RCR}$ nach der Formel für einen kurzen, mittellangen oder langen Zylinder berechnet wird. In praktischen Anwendungsfällen von Druckschichtpanzerungen kommen nur kurze und mittellange Zylinder vor.

Anschließend wird mit $\sigma_{\theta,RCR}$ und f_{yk} der bezogene Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_\theta$ ermittelt. Mit dem vollplastischen Grenzschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{\theta 0} = 0,4$, dem plastischen Bereichsfaktor $\beta = 0,6$, dem Beulkurvenexponent $\eta = 1,0$, dem elastischen Imperfektions-Abminderungsfaktor α_θ und dem teilplastischen Grenzschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$, kann der Beul-Abminderungsfaktor χ_θ und in weiterer Folge die charakteristische Beulspannung $\sigma_{\theta,Rk} = \chi_\theta * f_{yk}$ bestimmt werden (siehe Abbildung 9, Schritt 2). α_θ wurde gemäß Ausführungsklasse A mit 0,75 angesetzt.

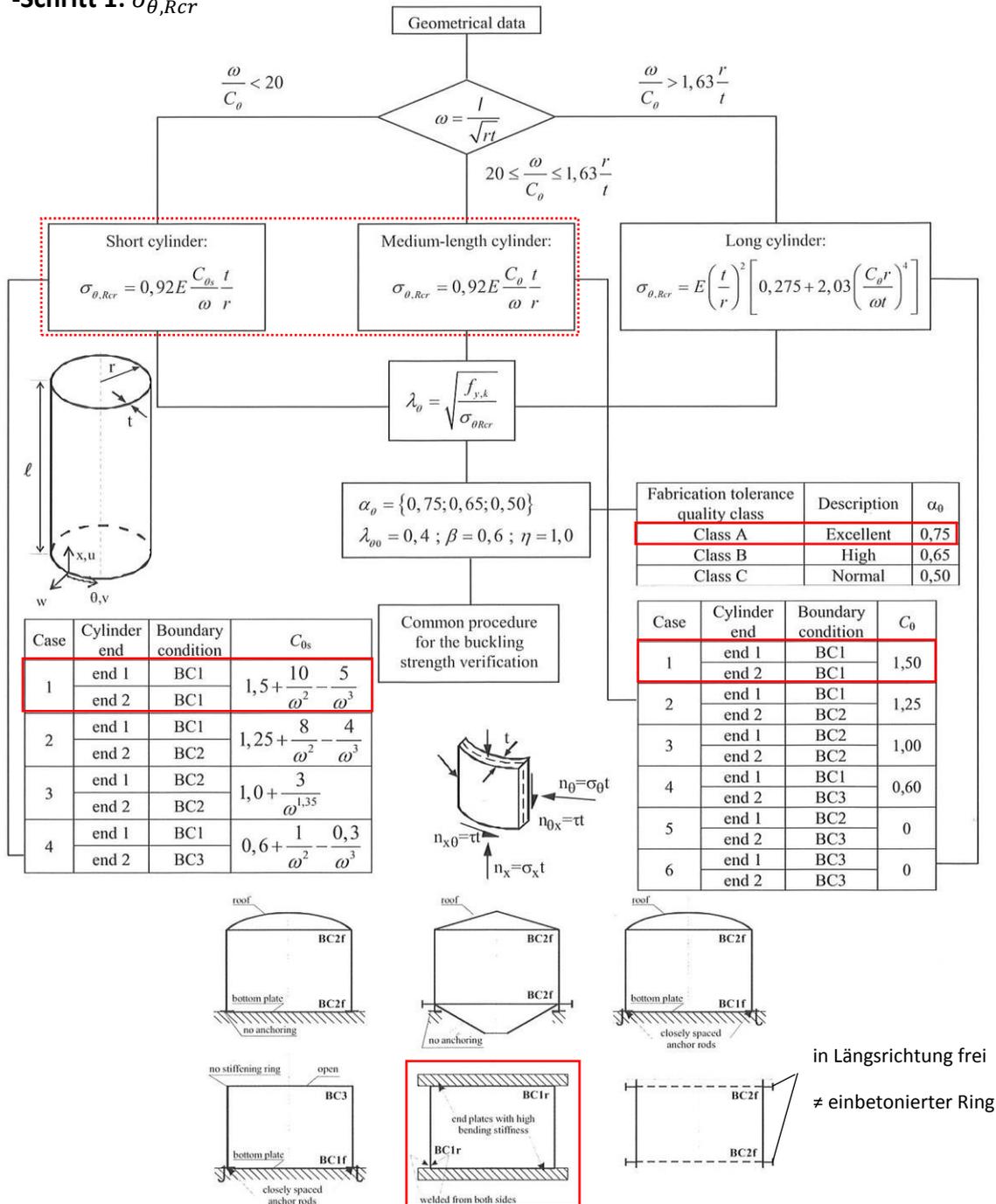
Der Beuldruck p_{cr} ergibt sich aus der Beulspannung $\sigma_{\theta,Rk}$ unter Anwendung der Kesselformel (siehe Schritt 3 in Abbildung 9).

Zu Abbildung 10 sei angemerkt, dass in diesem Ablaufschema die allgemeine Vorgehensweise für den Beulnachweis bei Vorliegen von mehr als einer der drei beulrelevanten Membranspannungskomponenten (Meridianbeulspannung σ_x , Umfangsbeulspannung σ_θ , Schubbeulspannung $\tau_{x\theta}$) dargestellt ist. Im Zuge dieser Masterarbeit wurde für die betrachteten Anwendungsfälle jeweils der Beulwiderstand gegen die Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung σ_θ ermittelt (Vorgehensweise nach Abbildung 9), da in [1] gezeigt wurde, dass die Längsspannungen bei $\sigma_x = 0,3 * \sigma_\theta$ vernachlässigt werden können.

2.2.1 Beulnachweis nach Eurocode 1993-1-6 [8] – „Zylinderschalen unter Außendruck“

PROCEDURE FOR THE DESIGN CHECK OF CYLINDRICAL SHELLS SUBJECT TO CIRCUMFERENTIAL COMPRESSION

-Schritt 1: $\sigma_{\theta,Rcr}$



-Schritt 2: Ermittlung χ nach Abbildung 10 mit $\lambda_{\theta} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\theta,Rcr}}}$

$$\sigma_{\theta,Rd} = \chi \cdot f_{yd}$$

-Schritt 3: $p_{0,cr} = \sigma_{\theta,Rd} \cdot \frac{t_s}{R}$

Abbildung 9: Vorgehensweise nach EN 1993-1-6 [8] – Zylinderschalen unter Außendruck und Hervorhebung der Anwendungsfälle für ringversteifte Druckschichtpanzerungen [1] S. 108

BUCKLING STRENGTH VERIFICATION

-Eingangsgrößen: $\lambda = \lambda_\theta$ infolge $\sigma_{\theta,Rcr}$

bzw. $\lambda = \lambda_x$ infolge $\sigma_{x,Rcr}$

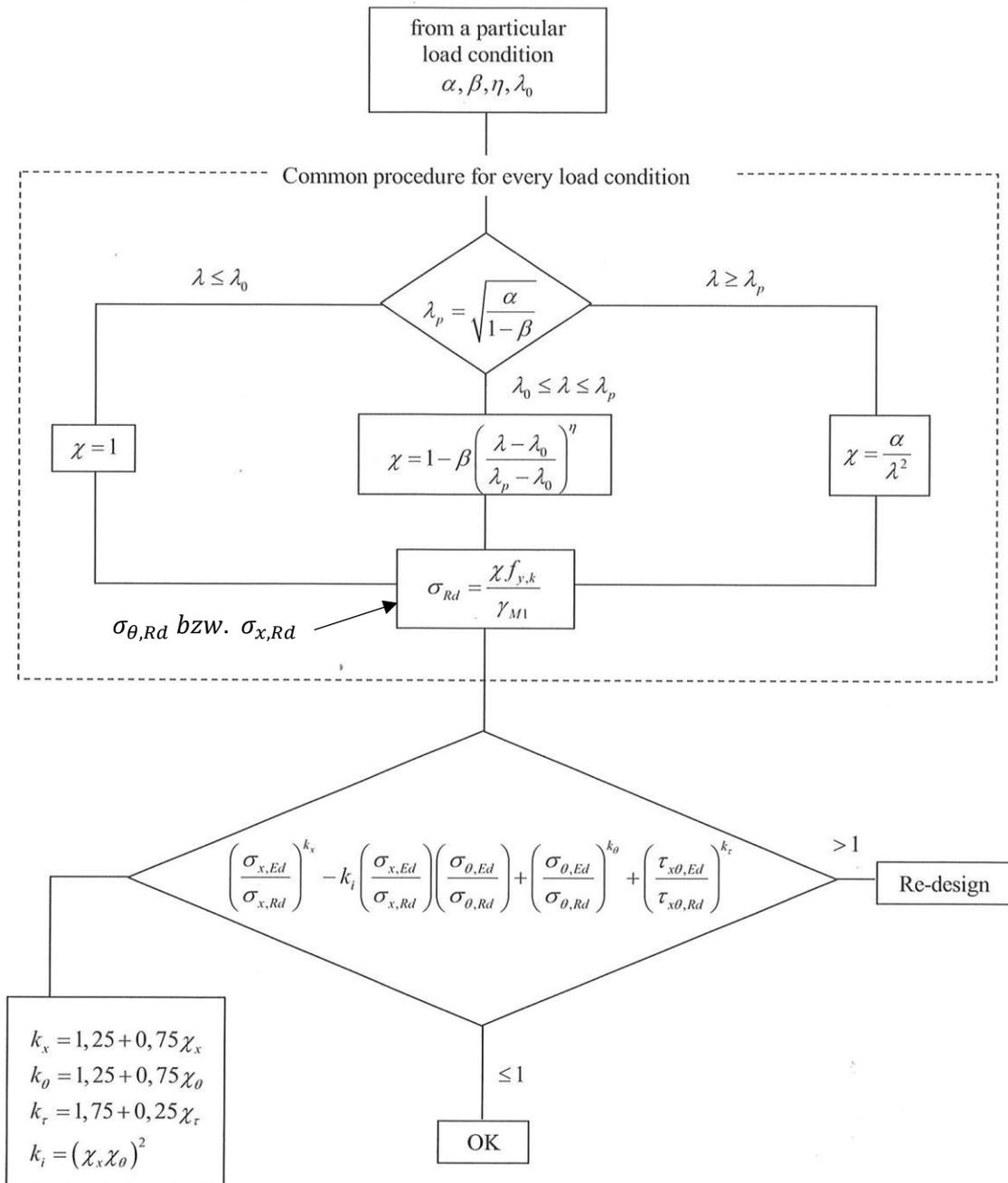


Abbildung 10: Vorgehensweise nach EN 1993-1-6 [8] – Zylinderschalen unter Längsdruck und Umfangsdruck; Ermittlung der Beultragfähigkeiten und Nachweis der gemeinsamen Wirkung [1] S. 146

3 Untersuchte Anwendungsfälle

Im Rahmen der Forschungsarbeit „*Beulen von stählernen Druckschachtpanzerungen unter Außendruck*“ [1] am Institut für Stahlbau an der TU Graz wurden sechs Ausführungsbeispiele von ringversteiften Druckschachtpanzerungen untersucht (grau gekennzeichnet in Tabelle 1). Für diese Ausführungsbeispiele wurde zum Teil der Ringabstand variiert, um zusätzliche Erkenntnisse zu gewinnen, sodass insgesamt 15 Fälle untersucht wurden. Diese wurden auch für die Ausarbeitung dieser Masterarbeit herangezogen und um weitere Untersuchungen, mittels der Variation der Fließgrenze, ergänzt. Nachfolgend sind die geometrischen Parameter dieser Fälle angeführt.

Dabei sind:

h_V ... *Höhe der Ringsteife*

t_V ... *Dicke der Ringsteife*

d_a ... *äußerer Durchmesser des Rohrs*

R ... *mittlerer Radius des Rohrs*

t_S ... *Dicke der Schale (Rohr)*

u ... *Stich der Unrundheit*

R^* ... *mittlerer Ersatzradius des unrunder Rohrs, nach Gl. 60*

e_{Ring} ... *Ringabstand*

Die Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen die in Tabelle 1 grau hinterlegten Anwendungsfälle als 3D-Rendering.

Untersuchte Anwendungsfälle

Bez.	h_v	t_v	d_a	R	t_s	R/t_s	u	R^*	e_{Ring}
-	mm	mm	mm	mm	mm	-	mm	mm	mm
F1a	150	15	5030	2507.5	15	167	4.5	2551.9	875
F1b	150	15	5030	2507.5	15	167	4.5	2551.9	1750 (lt. Ausführung)
F1c	150	15	5030	2507.5	15	167	4.5	2551.9	3500
F1d	150	15	5030	2507.5	15	167	4.5	2551.9	7000
F2a	150	22	2444	1211	22	55	6.6	1279.0	750 (lt. Ausführung)
F2b	150	22	2444	1211	22	55	6.6	1279.0	1500
F2c	150	22	2444	1211	22	55	6.6	1279.0	2270
F2d	150	22	2444	1211	22	55	6.6	1279.0	4800
F3a	200	25	2500	1219	62	20	18.6	1435.7	1500 (lt. Ausführung)
F3b	200	25	2500	1219	62	20	18.6	1435.7	4500
F4	209	16	3338	1659.5	19	87	5.7	1716.8	1167 (lt. Ausführung)
F5a	200	25	5540	2760	20	138	6	2819.5	1000 (lt. Ausführung)
F5b	200	25	5540	2760	20	138	6	2819.5	2500
F6a	350	25	9070	4517.5	35	129	10.5	4621.8	2000 (lt. Ausführung)
F6b	350	25	9070	4517.5	35	129	10.5	4621.8	4500

Tabelle 1: Geometrische Parameter der untersuchten Anwendungsfälle

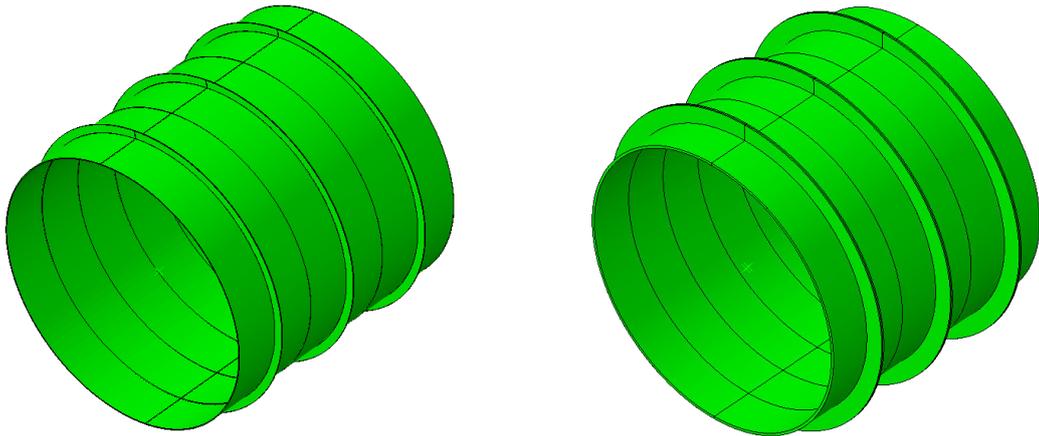


Abbildung 11: Anwendungsfall 1b (Ringabstand $e = 1750\text{mm}$) links; Anwendungsfall 2a (Ringabstand $e = 750\text{mm}$) rechts

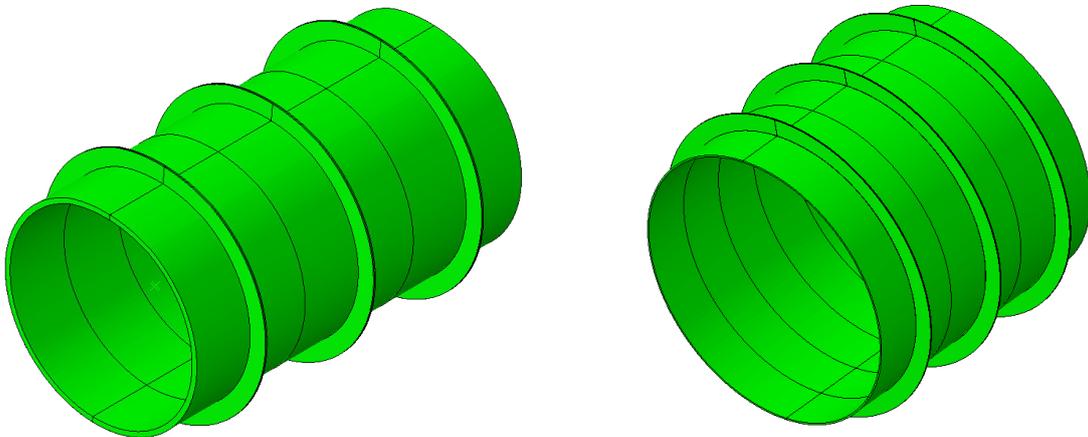


Abbildung 12: Anwendungsfall 3a (Ringabstand $e = 1500\text{mm}$) links; Anwendungsfall 4 (Ringabstand $e = 1167\text{mm}$) rechts

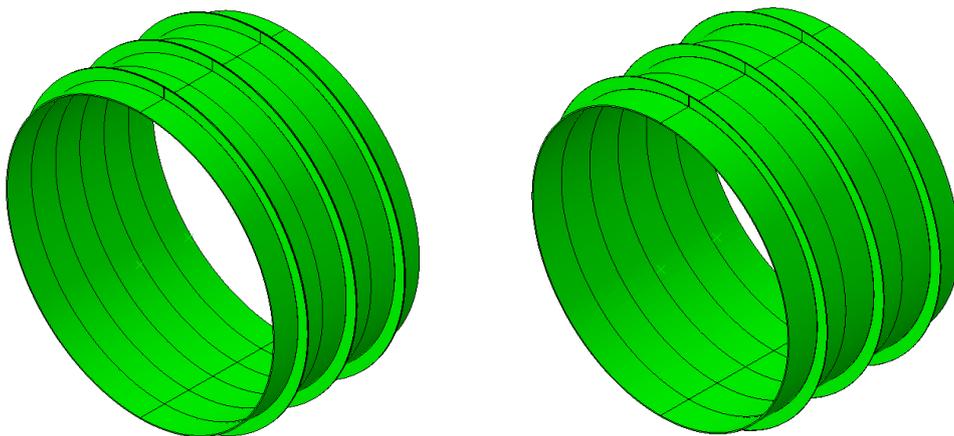


Abbildung 13: Anwendungsfall 5a (Ringabstand $e = 1000\text{mm}$) links; Anwendungsfall 6a (Ringabstand $e = 2000\text{mm}$) rechts

4 Kritischer Außendruck der Ringsteife für die Anwendungsfälle (Nachweis N1)

4.1 Einleitung

Mit den in Kapitel 2 beschriebenen Berechnungsverfahren wurden die kritischen Außendrucke für die zuvor genannten Anwendungsfälle für die Ringsteife bei einer gegebenen Unrundheit von $u/t_s = 0,3$ ermittelt (Nachweis N1). Die Ergebnisse für das von Taras/Greiner modifizierte Verfahren nach Amstutz/Feder [5] sind in Kapitel 4.2 und nach Jacobsen [7] in Kapitel 4.3 in tabellarischer Form dargestellt.

Bei manchen Anwendungsfällen ergibt sich für die ringversteifte Panzerung ein höherer kritischer Außendruck als sich für die Schale alleine unter Anwendung der Kesselformel (Gl. 61) für den Radius ohne Unrundheit ergeben würde. Daher ist in den beiden nachfolgenden Kapiteln zusätzlich zu der Tabelle mit den analytischen Ergebnissen eine weitere Tabelle angeführt, in der ersichtlich ist, für welche Fälle die Kesselformel für die Schale schlagend wird. Dies ist vor allem bei Fällen mit engem Ringabstand, einer niedrigen Fließgrenze und hohen Steifen in Kombination mit einer schlanken Schale der Fall.

$$p_{0,max} = \frac{f_y * t}{R} \quad \text{Gl. 61}$$

mit f_y ... *Fließgrenze*
 t ... *Wanddicke des Rohres*
 R ... *mittlerer Radius des Rohres*

Aufgrund der hohen Steifigkeit solcher Systeme, wird bei einer entsprechenden Außendruckbelastung bereits die Fließgrenze erreicht, noch bevor eine nennenswerte Auslenkung, das heißt eine Verformung des Systems, stattgefunden hat, aus der ein höherer Biegespannungsanteil resultieren würde. Dies bedeutet bei überwiegendem Normalspannungsanteil für den Ring, dass bei der Theorie von Amstutz/Feder [6] aufgrund der Schnittkraftaufteilung der Normalkraft (b_m/e für den Ring und $(1-b_m)/e$ für die Schale, vgl. Abbildung 2) die Normalspannung in der Schale entsprechend größer ist und daher dort maßgebend wird. Jacobsen [7] teilt die Normalkraft gleichmäßig auf den Ring und die Schale auf und es ergibt sich dadurch, dass der kritische Außendruck für den Ring meist unter jenem nach der Theorie von Amstutz/Feder liegt. Dass die Kesselformel für die Schale maßgebend wird, ist dadurch bei Jacobsen weniger oft der Fall. Die Kesselformel für die Schale kann jedoch trotzdem maßgebend werden, da bei Fällen mit überwiegendem Normalspannungsanteil aus Normalkraft die Spannung σ_N immer noch aufgrund der vergleichsweise höheren Querschnittsfläche kleiner ist, als jene aus der Kesselformel.

Aus den vorliegenden Ergebnissen der Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife aus der Außendruckbelastung können die im vorigen Absatz dargelegten Ausführungen gut nachvollzogen werden. Die jeweiligen Spannungsanteile sind in Kapitel 4.4 angeführt.

Zur Vollständigkeit sei angemerkt, dass die maximalen Spannungen an der äußeren und inneren Faser der Schale mit den in Kapitel 2 angegebenen Formeln ermittelt werden können und die Kesselformel nur eine gut passende Annäherung an die Spannungen in der Schale ist,

durch die eine schnellere und einfachere Gegenüberstellung und Analyse der Ergebnisse für die Ringsteife möglich ist.

In Kapitel 4.5 sind die kritischen Außendrucke nach Amstutz und Jacobsen für die Anwendungsfälle ohne Ringsteifen angeführt. Diese liegen zum Teil über der Beultragfähigkeit für Zylinderschalen unter Außendruck nach Eurocode 1993-1-6 („Festigkeit und Stabilität von Schalen“), was für den neuen Bemessungsvorschlag von Relevanz ist, wie an späterer Stelle gezeigt wird.

4.2 Kritischer Außendruck der Ringsteife nach Amstutz/Feder

In diesem Abschnitt sind in Tabelle 2 die kritischen Außendrucke $p_{0,krit}$ nach der Theorie von Amstutz/Feder mit dem modifizierten Ansatz von Taras/Greiner [5] (siehe Abschnitt 2.1.3) für die sechs Anwendungsfälle, jeweils mit den unterschiedlichen Fließgrenzen, angegeben. Die kritischen Außendrucke wurden mit dem vom Institut für Stahlbau der TU Graz entwickelten MATLAB-Programmcode für den Ansatz nach Taras/Greiner ermittelt. Fälle bei denen die Kesselformel (Gl. 61) maßgebend wird, sind in Tabelle 2 gelb markiert (wenn $p_{0,krit} > p_{0,max}$). Tabelle 3 zeigt dieselben Ergebnisse, wobei hier für jene Fälle bei denen die Kesselformel maßgebend wird, der zum Erreichen der Fließspannung in der Schale nötige maximale Außendruck in der Tabelle eingetragen ist (gelb markiert).

In Abbildung 14 ist für den Anwendungsfall 1a, mit einem Ringabstand von $e = 875$, mm der Außendruck p gegen die Spannung der Ringsteife an der Außenkante im Scheitelpunkt der Beule $\sigma_{Ring,max}$ (Punkt 1, für $\varphi = 0$, vgl. Abbildung 5), nach dem Verfahren von Taras/Greiner [5] für jedes Verformungssinkrement a aufgetragen (blaue Linie).

Der kritische Außendruck kann anhand der ermittelten Kurve für beliebige Stahlgüten ermittelt werden. Die Ermittlung des kritischen Außendruckes $p_{0,krit}$ für die Stahlgüten S355, S550, S690 und S890 ist beispielhaft in Abbildung 14 dargestellt.

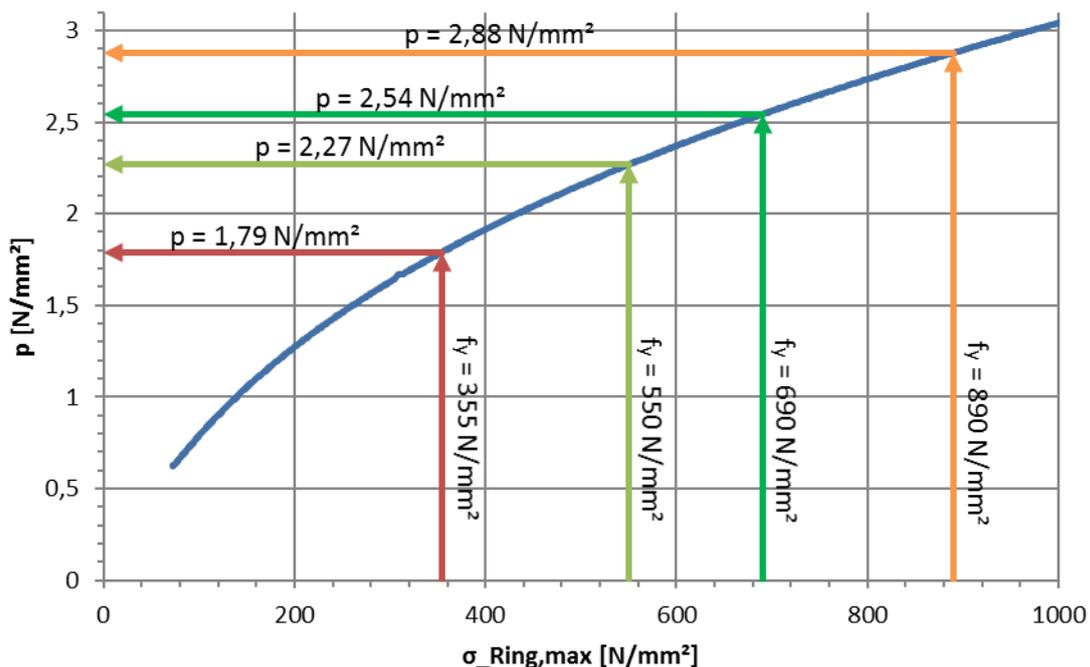


Abbildung 14: Ermittlung des kritischen Außendruckes $p_{0,krit}$ für den Anwendungsfall 1a mit $e = 875$ mm nach der Theorie von Amstutz/Feder mit dem modifizierten Ansatz von Taras/Greiner [5]

Kritischer Außendruck der Ringsteife für die Anwendungsfälle (Nachweis N1)

Fall 1 a-d	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
875	1,79	2,27	2,54	2,88
1750	1,27	1,57	1,74	1,95
3500	0,89	1,08	1,19	1,33
7000	0,62	0,75	0,83	0,92
Fall 2 a-d	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
750	8,85	11,56	13,21	15,21
1500	6,69	8,47	9,51	10,77
2270	5,56	6,94	7,73	8,70
4800	3,95	4,83	5,34	5,98
Fall 3 a, b	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
1500	16,95	21,66	24,54	28,04
4500	12,38	15,46	17,26	19,45
Fall 4	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
1167	5,10	6,54	7,39	8,41
Fall 5 a, b	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
1000	2,91	3,75	4,24	4,84
2500	1,89	2,34	2,59	2,91
Fall 6 a, b	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
2000	2,34	2,96	3,32	3,77
4500	1,58	1,95	2,17	2,43

Tabelle 2: Kritische Außendrucke $p_{0,krit}$ für die Ringsteife der Anwendungsfälle nach Amstutz/Feder (gelb = Werte $p_{0,krit}$ wenn $p_{0,krit} > p_{0,max}$)

Fall 1 a-d	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
875	1,79	2,27	2,54	2,88
1750	1,27	1,57	1,74	1,95
3500	0,89	1,08	1,19	1,33
7000	0,62	0,75	0,83	0,92
Fall 2 a-d	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
750	6,45	9,99	12,54	15,21
1500	6,45	8,47	9,51	10,77
2270	5,56	6,94	7,73	8,70
4800	3,95	4,83	5,34	5,98
Fall 3 a, b	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
1500	16,95	21,66	24,54	28,04
4500	12,38	15,46	17,26	19,45
Fall 4	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
1167	4,06	6,30	7,39	8,41
Fall 5 a, b	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
1000	2,57	3,75	4,24	4,84
2500	1,89	2,34	2,59	2,91
Fall 6 a, b	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
2000	2,34	2,96	3,32	3,77
4500	1,58	1,95	2,17	2,43

Tabelle 3: Kritische Außendrucke $p_{0,krit}$ für die Ringsteife der Anwendungsfälle nach Amstutz/Feder mit Begrenzung des Außendrucks durch die Anwendung der Kesselformel in der Schale (gelb = Werte $p_{0,max}$ wenn $p_{0,krit} > p_{0,max}$)

Für den Anwendungsfall 2a mit Ringabstand $e=750$ mm (S355, S550 und S690) und Fall 2b mit $e=1500$ mm (S355), Anwendungsfall 4 mit Ringabstand $e=1167$ mm (S355 und S550) und Anwendungsfall 5a mit Ringabstand $e=1000$ mm (S355), zeigt sich, dass jeweils der Außendruck $p_{0,max}$ durch die Anwendung der Kesselformel in der Schale begrenzt ist. Dies sind Fälle mit engen Ringabständen und hohen Ringsteifen in Kombination mit schlanken Schalen (siehe Kapitel 3 - Untersuchte Anwendungsfälle).

4.3 Kritischer Außendruck der Ringsteife nach Jacobsen

Wie im vorigen Abschnitt sind auch hier in der ersten Tabelle (Tabelle 4) zunächst die kritischen Außendrucke $p_{0,krit}$ für die Anwendungsfälle für verschiedene Fließgrenzen nach der Theorie von Jacobsen [7] angegeben. Die Außendrucke wurden mit einem Mathematica-Programmcode iterativ ermittelt. Die Fälle bei denen die Kesselformel für die Schale maßgebend wird, sind in Tabelle 4 wieder gelb markiert. Es fällt auf, dass die Kesselformel für weniger Fälle als nach der Theorie von Amstutz/Feder maßgebend wird. Die Gründe dafür sind im einleitenden Abschnitt des Kapitels 4 angeführt. Tabelle 5 beinhaltet dieselben Ergebnisse und zeigt die kritischen Außendrucke beziehungsweise den zum Erreichen der Fließspannung in der Schale nötigen Außendruck für jene Fälle bei denen die Kesselformel maßgebend wird (gelb markiert).

Fall 1 a-d	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
875	1,70	2,22	2,51	2,88
1750	1,23	1,55	1,73	1,96
3500	0,86	1,07	1,18	1,33
7000	0,60	0,72	0,80	0,89
Fall 2 a-d	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
750	7,37	10,31	12,09	14,31
1500	5,80	7,73	8,86	10,25
2270	4,93	6,40	7,26	8,31
4800	3,53	4,43	4,95	5,59
Fall 3 a, b	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
1500	14,81	19,62	22,45	25,90
4500	9,31	11,66	13,02	14,68
Fall 4	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
1167	4,29	5,87	6,81	7,97
Fall 5 a, b	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
1000	2,62	3,52	4,06	4,71
2500	1,75	2,24	2,52	2,87
Fall 6 a, b	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
2000	2,22	2,89	3,29	3,77
4500	1,53	1,92	2,15	2,43

Tabelle 4: Kritische Außendrucke $p_{0,krit}$ der Anwendungsfälle nach Jacobsen (gelb = Werte $p_{0,krit}$ wenn $p_{0,krit} > p_{0,max}$)

Kritischer Außendruck der Ringsteife für die Anwendungsfälle (Nachweis N1)

Fall 1 a-d	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
875	1,70	2,22	2,51	2,88
1750	1,23	1,55	1,73	1,96
3500	0,86	1,07	1,18	1,33
7000	0,60	0,72	0,80	0,89
Fall 2 a-d	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
750	6,45	9,99	12,09	14,31
1500	5,80	7,73	8,86	10,25
2270	4,93	6,40	7,26	8,31
4800	3,53	4,43	4,95	5,59
Fall 3 a, b	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
1500	14,81	19,62	22,45	25,90
4500	9,31	11,66	13,02	14,68
Fall 4	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
1167	4,06	5,87	6,81	7,97
Fall 5 a, b	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
1000	2,57	3,52	4,06	4,71
2500	1,75	2,24	2,52	2,87
Fall 6 a, b	krit. Außendrucke $p_{0,krit}$ in [N/mm ²]			
e [mm]	S355	S550	S690	S890
2000	2,22	2,89	3,29	3,77
4500	1,53	1,92	2,15	2,43

Tabelle 5: Kritische Außendrucke $p_{0,krit}$ der Anwendungsfälle nach Jacobsen mit Begrenzung des Außendruckes durch die Anwendung der Kesselformel in der Schale (gelb = Werte $p_{0,max}$ wenn $p_{0,krit} > p_{0,max}$)

Die Kesselformel wird hier für die Anwendungsfälle 2a mit Ringabstand $e=750\text{mm}$ (S355 und S550), Fall 4 mit Ringabstand $e=1167\text{mm}$ (S355) und Fall 5a mit Ringabstand 1000mm (S355) maßgebend.

4.4 Spannungsanteile in der Ringsteife nach Amstutz/Feder und Jacobsen

In diesem Abschnitt sind die Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife an der Stelle 1 für $\varphi=0^\circ$ für die Anwendungsfälle mit den Fließgrenzen S355, S550, S690 und S890 nach Amstutz/Feder [5] und Jacobsen [7] dargestellt.

Für die Ermittlung der Spannungsanteile nach Amstutz/Feder können die bekannten Formeln (Gl. 44 bis Gl. 47) aus Abschnitt 2.1.3 verwendet werden.

Jacobsen [7] gibt in seiner Veröffentlichung aus dem Jahr 1972 in der Gleichung für die Spannungen des unversteiften Rohres die Spannungsanteile für die Umfangsspannung (Anteil 1), die Spannung infolge Krümmungsänderung von $1/r$ nach $1/\rho$ (Strecken des Bogens - Anteil 2) und die Biegespannung infolge exzentrischer Normalkraft (Anteil 3) an (vgl. Gl. 62).

Die Gleichung lautet:

$$\sigma_{1,ges} = \overbrace{\frac{p * \rho}{t}}^{\text{Anteil 1}} + \overbrace{\frac{t}{2} * E * \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}\right)}^{\text{Anteil 2}} + \overbrace{6 * p * \rho * a * \frac{1}{t^2}}^{\text{Anteil 3}} \quad \text{Gl. 62}$$

p ... Außendruck

r ... Radius der umhüllenden Betonröhre

ρ ... Radius der abgelösten, beulenden Abschnitte des Rohrumfangs

t ... Rohrwanddicke des Stahlrohrs

E ... E – Modul

a ... Höhe der Sinunshalbwelle

$$a = \frac{2}{3} * \frac{\beta}{\pi} * r * \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} * \tan(\alpha - \beta) \quad \text{Gl. 63}$$

$$\rho = \frac{r * \sin(\alpha)}{\sin(\beta)} \quad \text{Gl. 64}$$

Für die graphische Darstellung der Bezeichnungen siehe Abbildung 6.

Zur Gegenüberstellung der Spannungsanteile zu den Ergebnissen nach Amstutz/Feder [5], werden in weiterer Folge die letzten beiden Summanden (Anteil 2 und Anteil 3) zu den Biegespannungsanteilen zusammengefasst.

Um die Spannungsanteile für eine ringversteifte Panzerung zu erhalten, sind in Gl. 62 einige Anpassungen vorzunehmen. Anstatt r ist der Radius R_m zu verwenden. Im ersten Summanden ist t durch die Fläche A_{ges} zu ersetzen (Anmerkung: da hier $p = p_0 * e$), im zweiten ist für $t/2$ der Abstand der äußeren Randfaser zum Schwerpunkt h (vgl. Abbildung 7) einzusetzen und im dritten muss das Widerstandsmoment $t^2/6$ durch I/h (I ist das Trägheitsmoment der Ringsteife samt der mitwirkenden Breite der Schale) ersetzt werden.

4.4.1 Ergebnisse für Anwendungsfall 1

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 15 bis Abbildung 18) sind für den Anwendungsfall 1a bis 1d die Normal- und Biegespannungsanteile nach Amstutz/Feder und Jacobsen für unterschiedliche Ringabstände e und unterschiedliche Stahlgüten in Punkt 1 im Scheitel ($\varphi=0^\circ$) dargestellt. Der Normalspannungsanteil wird dabei mit $S_{N,Ring}$ (blau) bezeichnet und der Biegespannungsanteil mit $S_{M,max,Ring}$ (orange). Bei Betrachtung der Ergebnisse erkennt man, dass die Verformbarkeit der ringversteiften Panzerung einen wesentlichen Einfluss auf den Biegespannungsanteil hat. So ist der Biegespannungsanteil umso größer, je größer der Ringabstand und je höher die Stahlgüte ist. Diese Tendenz ist ganz allgemein für alle Anwendungsfälle gegeben.

Beim Anwendungsfall 1 ist die Höhe der Ringsteife mit $h_v = 150$ mm im Verhältnis zum Durchmesser $d_a = 5030$ mm eher klein. Dadurch ergibt sich eine größere Biegeschlankheit und somit eine höhere Verformbarkeit der ringversteiften Panzerung. Aus diesem Grund sind die Biegespannungsanteile in der Ringsteife bei beiden Verfahren (Amstutz/Feder, Jacobsen) auch bei niederen Fließgrenzen deutlich erkennbar und die Begrenzung des Außendruckes durch die Anwendung der Kesselformel für die Schale wird in keinem Fall maßgebend.

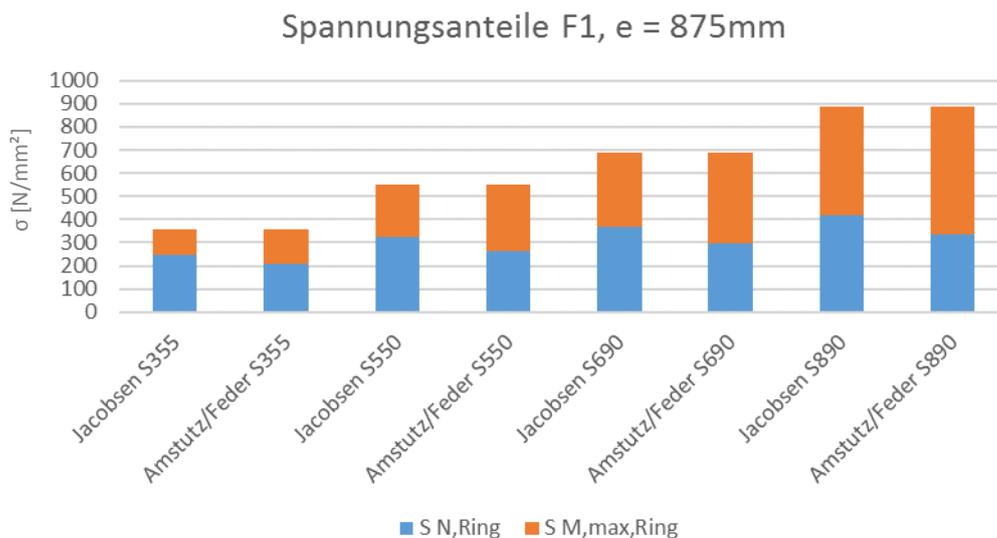


Abbildung 15: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 1a mit Ringabstand $e = 875$ mm

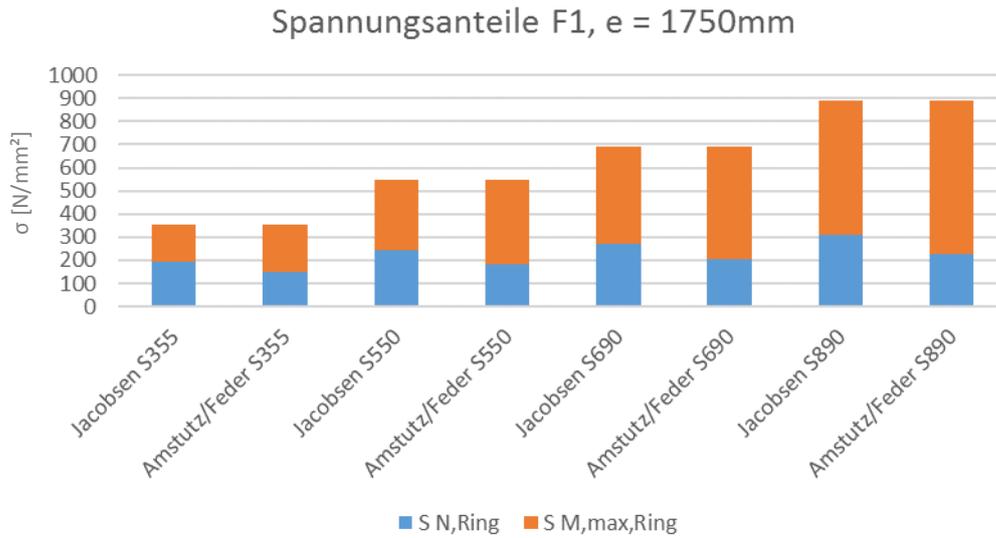


Abbildung 16: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 1b mit Ringabstand e = 1750mm

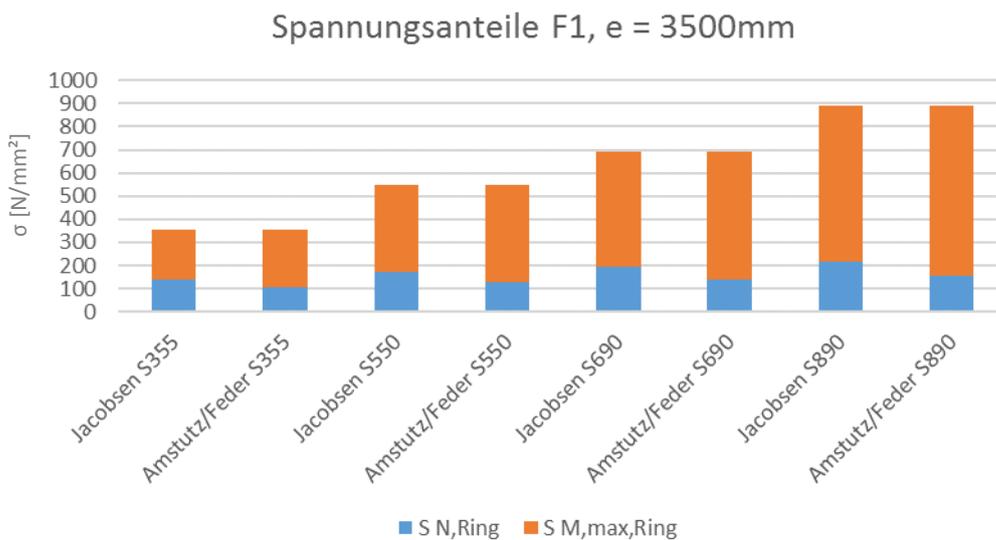


Abbildung 17: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 1c mit Ringabstand e = 3500mm

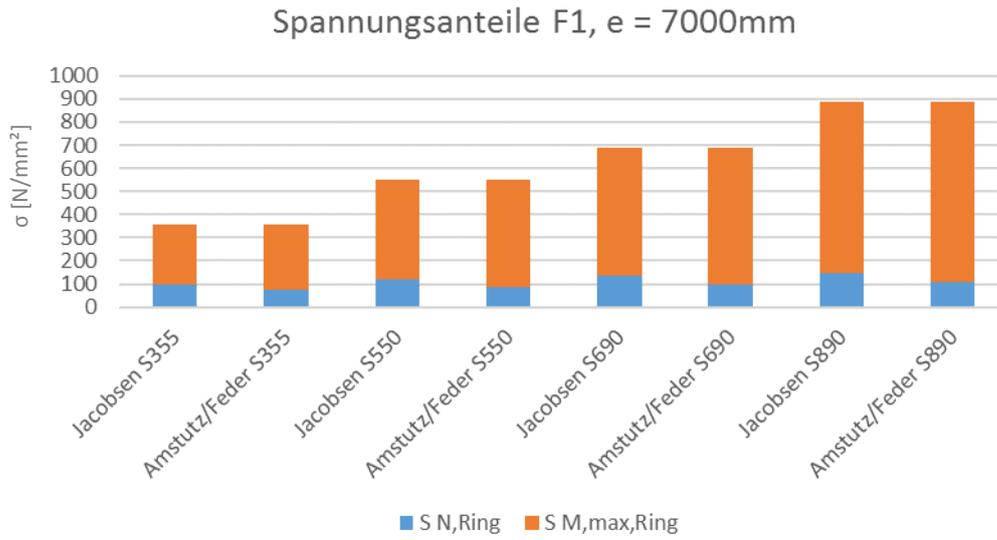


Abbildung 18: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 1d mit Ringabstand e = 7000mm

4.4.2 Ergebnisse für Anwendungsfall 2

In Abbildung 19 bis Abbildung 22 sind die mit den beiden angewendeten Verfahren (Amstutz/Feder, Jacobsen) ermittelten Normal- und Biegespannungsanteile für den Anwendungsfall 2a bis d bei unterschiedlichen Ringabständen e und Stahlgüten in Punkt 1 im Scheitel dargestellt.

Die Biegeschlankeheit des Anwendungsfalles 2 ist im Vergleich zum Anwendungsfall 1 durch den kleineren Durchmesser der Panzerung und die dickere Steife bei gleicher Steifenhöhe deutlich kleiner. Dadurch ergibt sich eine geringere Verformbarkeit und ein niedrigerer Biegespannungsanteil, vor allem für die Fälle mit engem Ringabstand und niedriger Fließgrenze. Aus diesem Grund ist für die Fälle mit der Stahlgüte S355 und S550 und dem Ringabstand von 750 mm der kritische Außendruck durch den aus der Kesselformel für die Schale resultierenden Außendruck für beide Verfahren (Amstutz/Feder und Jacobsen) begrenzt. Nach Amstutz/Feder wird des Weiteren die Kesselformel für die Stahlgüte S690 bei demselben Ringabstand und für die Stahlgüte S355 bei Ringabstand 1500 mm (Fall 2b) maßgebend.

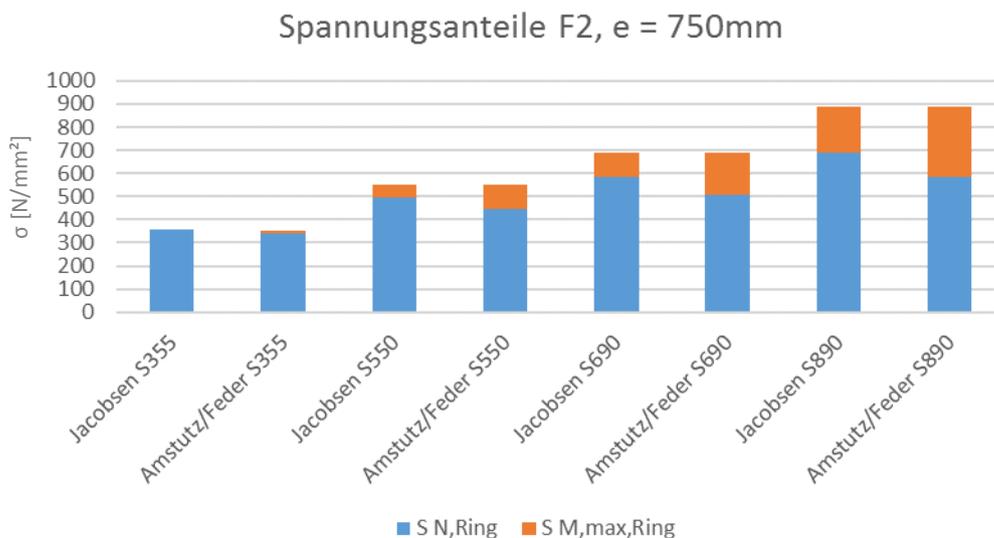


Abbildung 19: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 2a mit Ringabstand $e = 750\text{mm}$

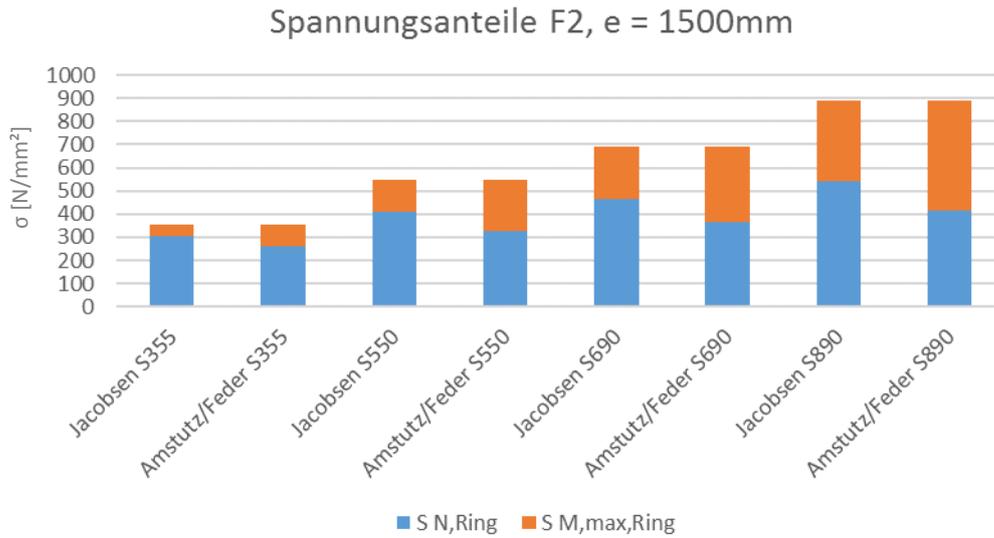


Abbildung 20: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 2b mit Ringabstand e = 1500mm

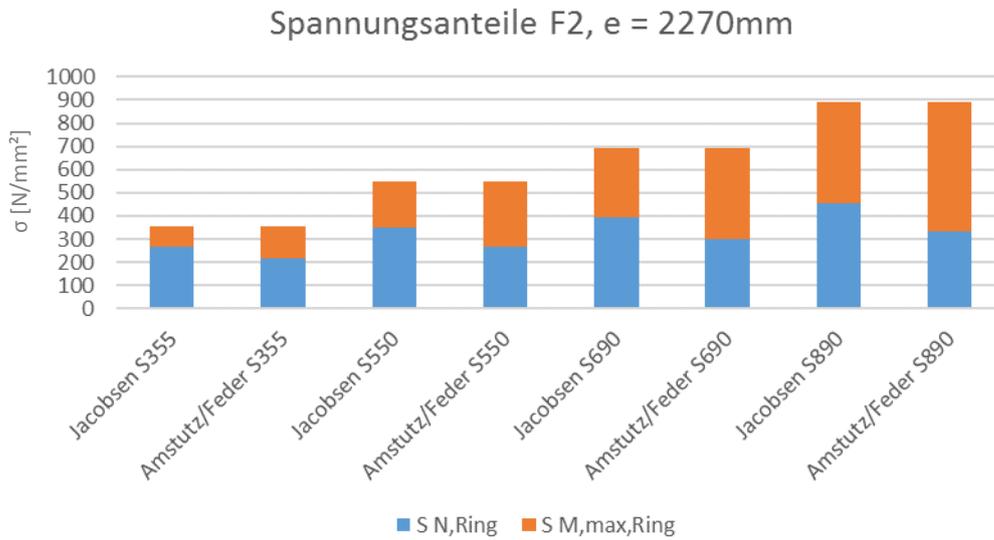


Abbildung 21: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 2c mit Ringabstand e = 2270mm

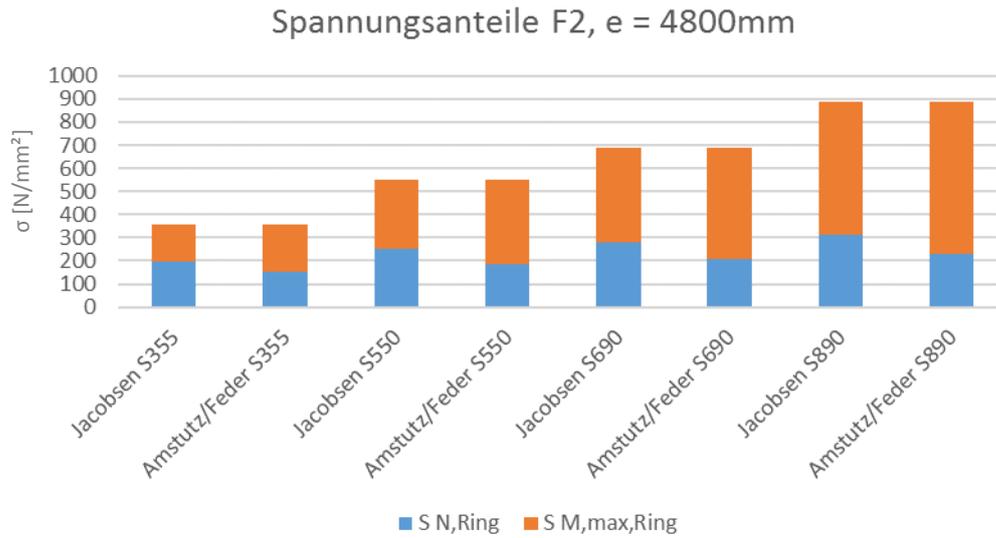


Abbildung 22: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 2d mit Ringabstand e = 4800mm

4.4.3 Ergebnisse für Anwendungsfall 3

Die Normal- und Biegespannungsanteile nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 3a und b sind für die beiden betrachteten Ringabstände in Abbildung 23 und Abbildung 24 in Punkt 1 im Scheitel dargestellt.

Der Anwendungsfall 3 hat im Vergleich zum Durchmesser $d_a = 2500$ mm der Panzerung mit $h_v=200$ mm eine hohe Ringsteife, wodurch sich ein kleinerer Biegespannungsanteil ergibt, was wiederum auf eine Begrenzung des kritischen Außendrucks durch den Außendruck aus der Kesselformel für die Panzerung schließen lassen würde. Jedoch wird dieser Außendruck in diesem Fall nie maßgebend, da die Panzerung mit 62 mm äußerst massiv ausgeführt wurde.

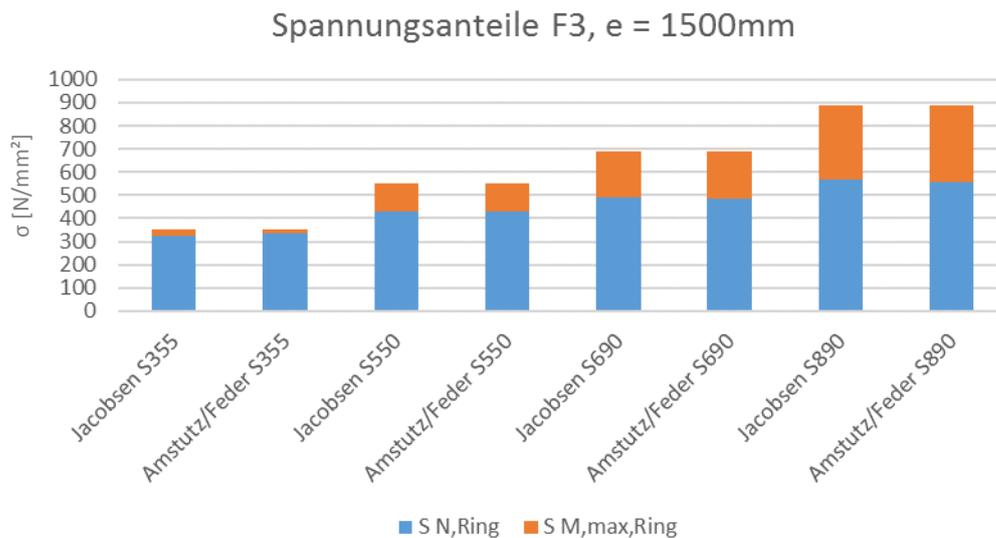


Abbildung 23: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 3a mit Ringabstand e = 1500mm

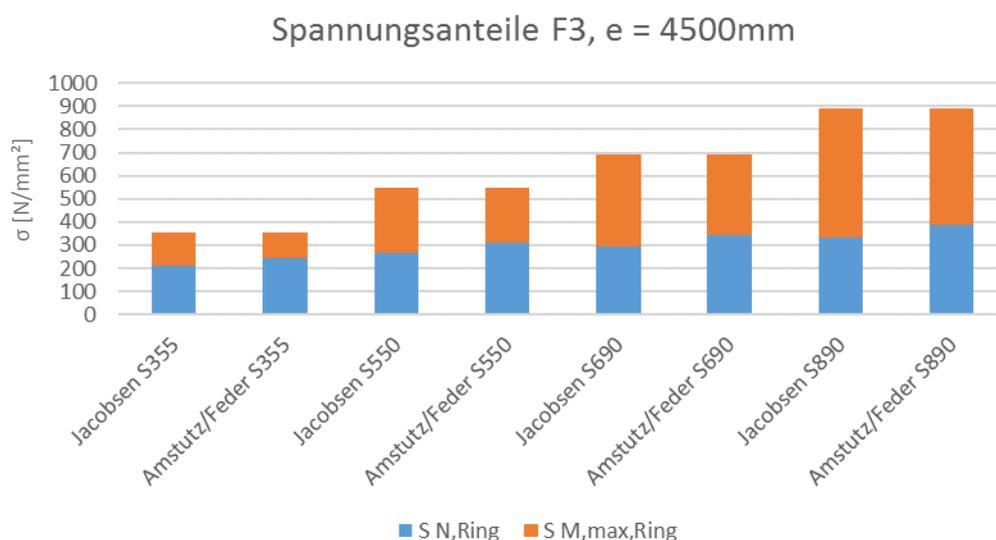


Abbildung 24: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 3b mit Ringabstand e = 4500mm

4.4.4 Ergebnisse für Anwendungsfall 4

In Abbildung 25 sind die Normal- und Biegespannungsanteile für den Anwendungsfall 4 in Punkt 1 im Scheitel dargestellt.

Die Biegespannungsanteile im Anwendungsfall 4 sind für die Stahlgüte S355 äußerst gering und auch für die Stahlgüte S550 nicht besonders ausgeprägt. Daher ist der kritische Außendruck $p_{0,max}$ aus der Kesselformel für die Schale, für die Stahlgüte S355 für beide Verfahren und für S550 bei Amstutz/Feder maßgebend.

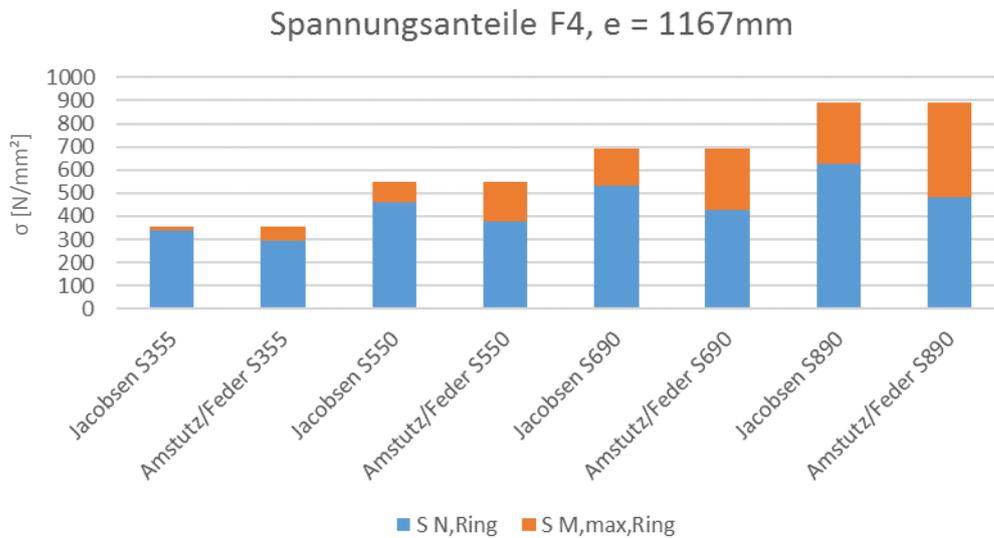


Abbildung 25: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife nach in Punkt 1 im Scheitel Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 4 mit Ringabstand e = 1167mm

4.4.5 Ergebnisse für Anwendungsfall 5

Abbildung 26 und Abbildung 27 zeigen die Normal- und Biegespannungsanteile für die beiden betrachteten Ringabstände des Anwendungsfalls 5a und b in Punkt 1 im Scheitel.

Der Anwendungsfall 5 hat eine kleine Steifenhöhe im Vergleich zum Durchmesser der Panzerung, woraus sich wieder etwas höhere Biegespannungsanteile ergeben.

Die Kesselformel für die Schale wird jedoch für den Fall 5a mit Ringabstand $e = 1000$ mm und einer Stahlgüte S355 trotzdem, aufgrund der sehr schlanken Schale, maßgebend.

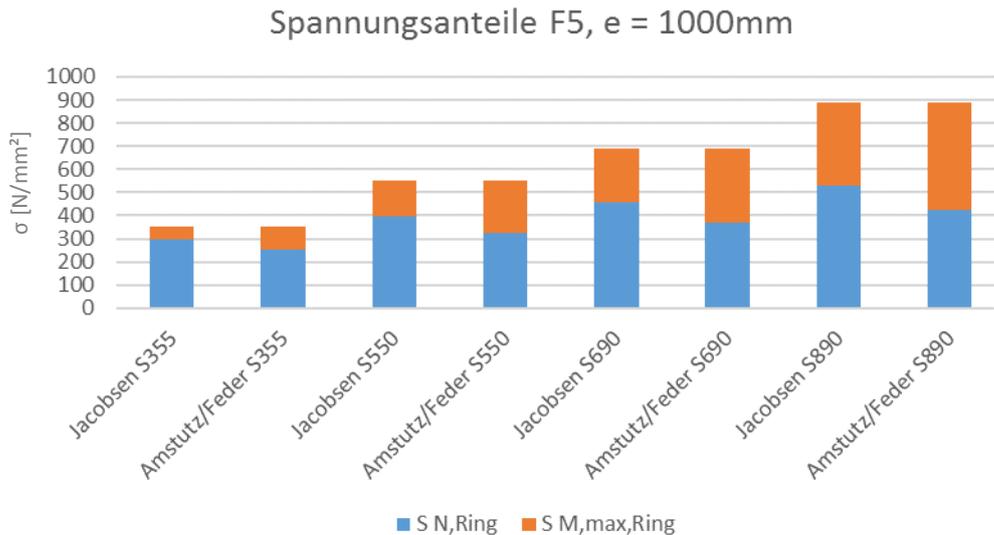


Abbildung 26: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 5a mit Ringabstand $e = 1000$ mm

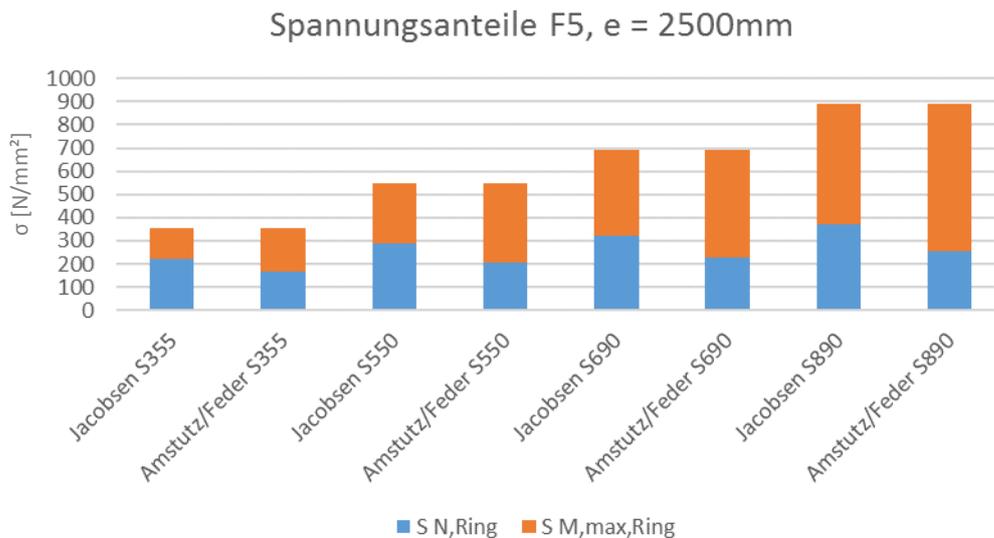


Abbildung 27: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 5b mit Ringabstand $e = 2500$ mm

4.4.6 Ergebnisse für Anwendungsfall 6

In Abbildung 28 und Abbildung 29 werden die Normal- und Biegespannungsanteile der beiden betrachteten Ringabstände des Anwendungsfalls 6a und b in Punkt 1 im Scheitel dargestellt.

Die Biegespannungsanteile im Anwendungsfall 6 sind, aufgrund der hohen Biegeschlankheit, vergleichsweise hoch. Die Kesselformel wird hier nie maßgebend.

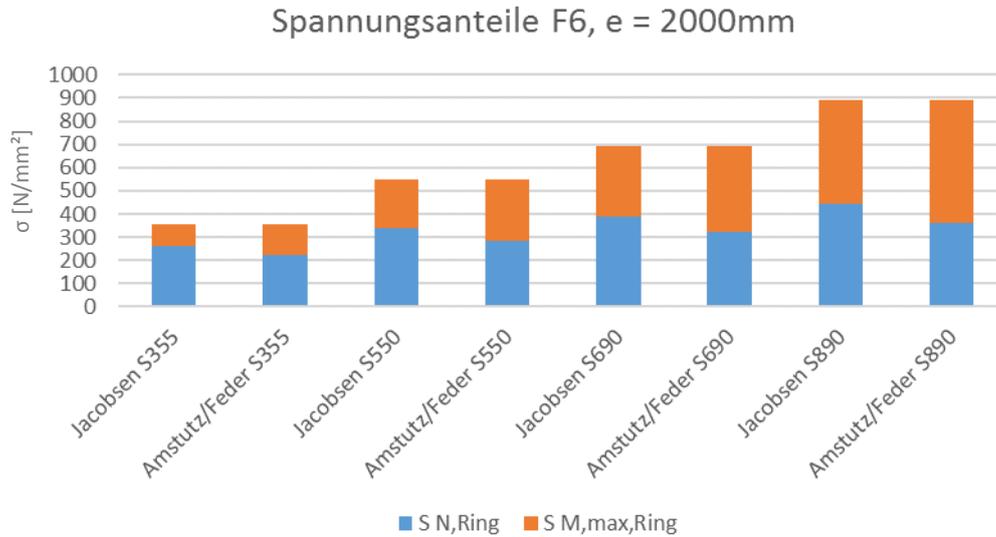


Abbildung 28: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 6a mit Ringabstand e = 2000mm

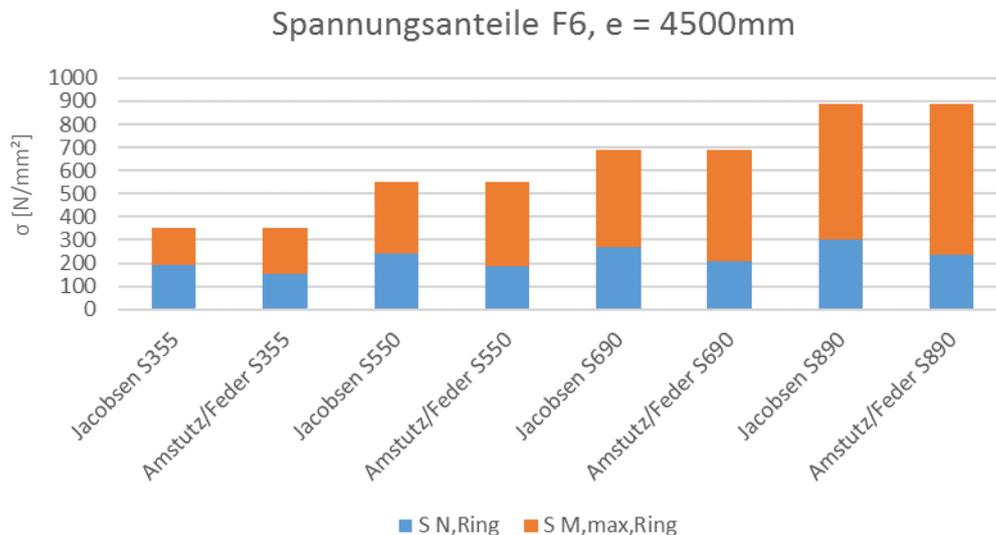


Abbildung 29: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 6b mit Ringabstand e = 4500mm

4.5 Kritische Außendrucke der Anwendungsfälle ohne Ringsteifen

In diesem Abschnitt sind die kritischen Außendrucke $p_{0,krit}$ der Anwendungsfälle ohne Ringsteifen nach Amstutz [2], [3], [4], [5] und Jacobsen [7] angegeben. Die Unrundheit der Panzerung wurde bei der Ermittlung der kritischen Außendrucke berücksichtigt (Radius R^* nach Gl. 60 bzw. Abbildung 8). Die Verfahren sind in den Abschnitten 2.1.3 und 2.1.4 erläutert.

Bei einer Gegenüberstellung der beiden Verfahren in Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 zeigt sich, dass der kritischen Außendruck $p_{0,krit}$ nach Jacobsen zumeist über jenem von Amstutz liegt und der Unterschied mit größerer Fließgrenze kleiner wird. Dieser Effekt ist umso größer, je größer das R/t -Verhältnis ist. Aus diesem Grund ist beim 1. Anwendungsfall, mit einem R/t -Verhältnis von 167, für die Stahlgüte S890 der kritische Außendruck nach Amstutz sogar ein wenig größer als nach Jacobsen. Die Gegenüberstellungen sind in Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 32 ergänzend bildlich dargestellt. Beide Verfahren liefern sehr ähnliche Beuldrücke $p_{0,krit}$ mit einem maximalen Unterschied von 4,1% für den Anwendungsfall 2 bei einer Stahlgüte von S690.

4.5.1 Kritische Außendrucke – Rohr alleine – nach Amstutz

Stahlgüte	krit. Außendrucke in [N/mm ²]			
	S355	S550	S690	S890
Fall 1	0,54	0,62	0,66	0,70
Fall 2	3,40	4,25	4,71	5,27
Fall 3	13,62	18,48	21,39	24,81
Fall 4	1,63	1,98	2,16	2,37
Fall 5	0,75	0,89	0,95	1,02
Fall 6	0,84	1,00	1,08	1,16

Tabelle 6: Kritische Außendrucke der Anwendungsfälle ohne Ringsteifen nach Amstutz/Feder

4.5.2 Kritische Außendrucke – Rohr alleine – nach Jacobsen

Stahlgüte	krit. Außendrucke in [N/mm ²]			
	S355	S550	S690	S890
Fall 1	0,56	0,64	0,67	0,70
Fall 2	3,52	4,41	4,91	5,48
Fall 3	14,04	19,09	22,09	25,76
Fall 4	1,69	2,05	2,24	2,45
Fall 5	0,78	0,91	0,97	1,03
Fall 6	0,88	1,03	1,10	1,17

Tabelle 7: Kritische Außendrucke der Anwendungsfälle ohne Ringsteifen nach Jacobsen

Kritischer Außendruck der Ringsteife für die Anwendungsfälle (Nachweis N1)

Stahlgüte	S355	S550	S690	S890
Fall 1	3,43%	2,16%	1,19%	-0,73%
Fall 2	3,68%	3,91%	4,07%	3,91%
Fall 3	3,09%	3,32%	3,26%	3,83%
Fall 4	4,00%	3,80%	3,56%	3,07%
Fall 5	3,65%	2,99%	2,22%	0,87%
Fall 6	3,82%	3,08%	2,51%	1,33%

Tabelle 8: Prozentuelle Unterschiede der ermittelten Beuldrücke für das glatte Rohr der Anwendungsfälle nach Jacobsen im Vergleich zum Beuldruck nach Amstutz (Ergebnisse Amstutz = 100%)

Kritischer Außendruck der Ringsteife für die Anwendungsfälle (Nachweis N1)

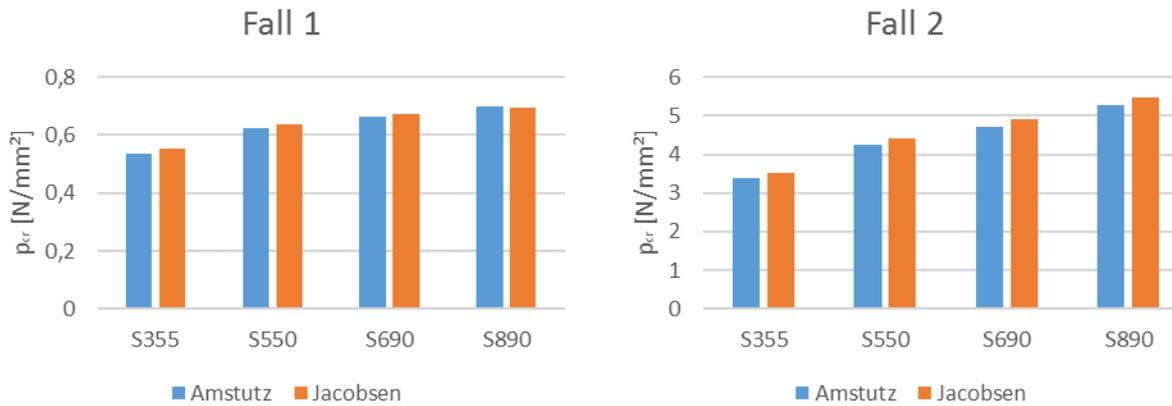


Abbildung 30: Gegenüberstellung der kritischen Außendrucke nach Amstutz und Jacobsen für den 1. und 2. Anwendungsfall ohne Ringsteife

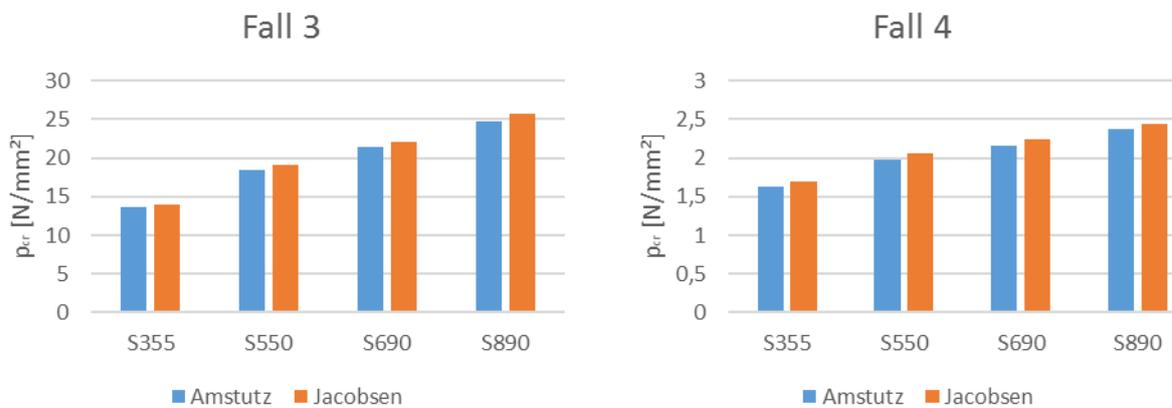


Abbildung 31: Gegenüberstellung der kritischen Außendrucke nach Amstutz und Jacobsen für den 3. und 4. Anwendungsfall ohne Ringsteife

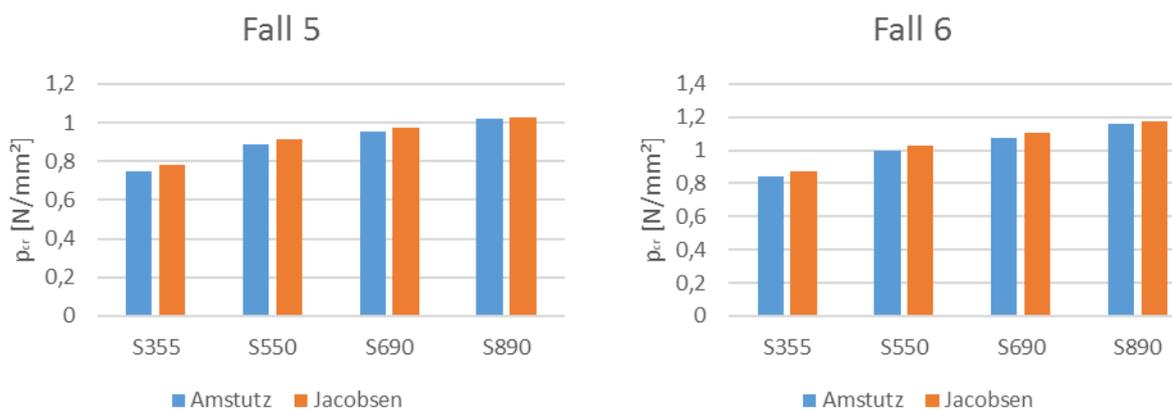


Abbildung 32: Gegenüberstellung der kritischen Außendrucke nach Amstutz und Jacobsen für den 5. und 6. Anwendungsfall ohne Ringsteife

5 Kritischer Außendruck der Anwendungsfälle für das Rohr zwischen den Ringen (Nachweis N2)

5.1 Beulnachweis des Rohres zwischen den Ringen nach Eurocode 1993-1-6

Für alle Anwendungsfälle wurde mit dem in Kapitel 2.2.1 gezeigten Verfahren für Zylinderschalen unter Außendruck nach Eurocode 1993-1-6 [8] der Beulwiderstand ermittelt und mit diesem der Außendruck $p_{0,cr}$ beim Einbeulen der Schale beziehungsweise der Panzerung bestimmt. Die ideale Umfangsbeulspannung kann dabei fast ausschließlich mit der Formel für „kurze“ Zylinder bestimmt werden. Nur für die Anwendungsfälle 1d und 2d mit den größten Ringabständen ist jeweils die Formel für den mittellangen Zylinder gültig.

Die Ergebnisse für die kritischen Außendrucke $p_{0,cr}$ beim Einbeulen sind in Tabelle 9 dargestellt.

Die Ermittlung des Außendrucks beim Einbeulen des Rohres zwischen den Ringen ist für den Fall 1a bei einem Ringabstand von $e = 875$ mm und einer Stahlgüte von S355 nachfolgend angeführt:

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{r * t}} \quad \text{Gl. 65}$$

$$l = 875 \text{ mm (Ringabstand)}$$

$$r = 2507,5 \text{ mm (mittlerer Radius des Rohres)}$$

$$t = 15 \text{ mm (Wanddicke des Rohres)}$$

$$\omega = \frac{875}{\sqrt{2507,5 * 15}} = 4,512$$

$$\frac{\omega}{C_{\theta}} = \frac{4,512}{1,5} = 3,01 < 20 \rightarrow \text{kurzer Zylinder}$$

mit $C_{\theta} = 1,5$ für die Randbedingung BC1 an beiden Enden

$$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92 * E * \frac{C_{0s}}{\omega} * \frac{t}{r} \quad \text{Gl. 66}$$

... Kritische Umfangsbeulspannung für kurze Zylinder

$$C_{0s} = 1,5 + \frac{10}{\omega^2} - \frac{5}{\omega^3} \quad \text{Gl. 67}$$

... Faktor zur Berücksichtigung der Randbedingungen bei kurzen Zylindern

$$C_{0s} = 1,5 + \frac{10}{4,512^2} - \frac{5}{4,512^3} = 1,937$$

$$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92 * 210\,000 * \frac{1,937}{4,512} * \frac{15}{2507,5} = 496,16 \frac{N}{mm^2}$$

$$\lambda_{\theta} = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta,Rcr}}} = \sqrt{\frac{355}{496,16}} = 0,846 \quad \text{Gl. 68}$$

$$\alpha_{\theta} = 0,75; \beta = 0,6; \eta = 1,0; \bar{\lambda}_{\theta 0} = 0,4$$

... Beschreibung der Werte siehe Abschnitt 2.2

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,75}{1-0,6}} = 1,369 \quad \text{Gl. 69}$$

$$\bar{\lambda}_{\theta 0} = 0,4 < \lambda_{\theta} = 0,846 < \lambda_p = 1,369$$

$$\rightarrow \chi = 1 - \beta * \left(\frac{\lambda_{\theta} - \bar{\lambda}_{\theta 0}}{\lambda_p - \bar{\lambda}_{\theta 0}} \right)^{\eta} \quad \text{Gl. 70}$$

$$\chi = 1 - 0,6 * \left(\frac{0,846 - 0,4}{1,369 - 0,4} \right)^1 = 0,724$$

$$\sigma_{\theta,Rd} = \chi * \frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}} = 0,724 * \frac{355}{1,0} = 257 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Gl. 71}$$

$$p_{0,cr} = \sigma_{\theta,Rd} * \frac{t}{R} = 257 * \frac{15}{2507,5} = 1,54 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Gl. 72}$$

Kritischer Außendruck der Anwendungsfälle für das Rohr zwischen den Ringen (Nachweis N2)

	e [mm]	Außendrucke beim Einbeulen der Schale in [N/mm ²]			
		S355	S550	S690	S890
Fall 1a	875	1,54	1,96	2,14	2,23
Fall 1b	1750	0,93	0,93	0,93	0,93
Fall 1c	3500	0,44	0,44	0,44	0,44
Fall 1d	7000	0,22	0,22	0,22	0,22
Fall 2a	750	6,08	8,68	10,32	12,38
Fall 2b	1500	5,01	6,62	7,42	8,14
Fall 2c	2270	4,24	5,13	5,33	5,33
Fall 2d	4800	2,46	2,46	2,46	2,46
Fall 3a	1500	18,06	27,78	33,78	41,81
Fall 3b	4500	15,59	21,53	24,99	28,95
Fall 4	1167	3,10	4,05	4,51	4,88
Fall 5a	1000	2,04	2,71	3,06	3,39
Fall 5b	2500	1,13	1,13	1,13	1,13
Fall 6a	2000	2,07	2,68	2,97	3,18
Fall 6b	4500	1,21	1,21	1,21	1,21

Tabelle 9: Außendrucke $p_{0,cr}$ beim Einbeulen der Zylinderschale (Panzerung zwischen den Ringen)

Die Nachweise N1 und N2 werden anschließend mit der realitätsnahen numerischen Berechnung verglichen.

6 Realitätsnahe Ermittlung der Tragfähigkeit für die Anwendungsfälle an einem 3D-Modell

In diesem Abschnitt sind die realitätsnahen numerischen Berechnungen zur Ermittlung der kritischen Außendrucke der Anwendungsfälle an einem 3D-Modell angeführt.

Dazu wurde für die Anwendungsfälle, unter Variation der Fließgrenze und den entsprechenden Ringabständen, eine geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA) durchgeführt. Als Imperfektion wurde den Anwendungsfällen eine Unrundheit von $u/t_s = 0,3$ mit einem Öffnungswinkel von 50° vorgegeben, wobei u den Stich der Unrundheit bezeichnet. Zur Modellierung der Unrundheit in ABAQUS wurde der Ersatzradius R^* nach Gl. 60 und die Abrückung des Mittelpunktes von R^* , gegenüber dem Mittelpunkt der Schale, bestimmt. Beispielhaft ist in Abbildung 33 der Querschnitt der Schale für den Anwendungsfall 3 mit der Unrundheit im Scheitel und den jeweiligen Parametern (Innenradius R und Innenersatzradius R^* für die Unrundheit der Schale, Abrückung) dargestellt. Der Ring weist dabei die selbe Unrundheit wie die Schale auf.

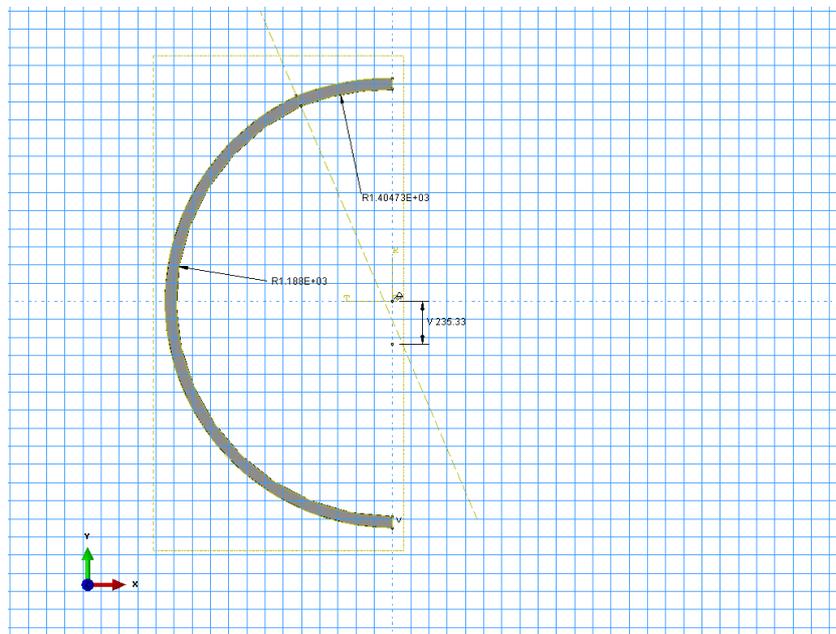


Abbildung 33: Darstellung der unrunder Schale im ABAQUS-Modell des Anwendungsfalls 3

Zur Modellierung der ringversteiften Panzerungen in ABAQUS konnten verschiedene Symmetrierandbedingungen ausgenutzt werden, um die Anzahl der Freiheitsgrade im Modell zu reduzieren. Die Betonummantelung, beziehungsweise das umgebende Gebirge der Panzerung, wurde als vollkommen starr modelliert, wodurch nur radiale Verformungen nach innen hin zur Rohrachse möglich sind. Außerdem wurde in den Modellen ein vollständiger Reibschluss zwischen der Panzerung und der Ummantelung vorgesehen, wodurch sich aufgrund des Außendrucks und der Querkontraktion eine zusätzliche Längsdruckspannungskomponente ergibt, da die Längsdehnung behindert ist.

Der kritische Außendruck wurde dann mit der sogenannten Riks-Methode ermittelt, bei der die aufgebrachte Lastgröße als zusätzliche Unbekannte verwendet wird. Es werden dabei Lasten und Verschiebungen gleichzeitig ermittelt. Dies geschieht unter Variation der

„Bogenlänge“ entlang des statischen Gleichgewichtsweges in der Lastverformungskurve. Daher ist mit der Riks-Methode auch ein Zurückfahren der Last nach Erreichen der kritischen Last möglich (Abbildung von Zuständen nach Überschreiten des Traglastmaximums).

Generell ist zur Berechnung des kritischen Außendruckes $p_{0,FEA}$ mit der Riks-Methode zu sagen, dass diese, in Bezug auf eine Reduktion der Last nach Erreichen der kritischen Last, mit linearen finiten Elementen deutlich stabiler läuft als mit quadratischen und dass dieser Effekt mit einfacheren Netzen noch verstärkt wird. Dies ist in der FEM-Netzanalyse (Kapitel 6.1) in den ermittelten Lastverformungskurven für die unterschiedlichen Netze sehr gut ersichtlich (Abbildung 36 bis Abbildung 41). Für feinere Netze beziehungsweise für alle Netze mit quadratischen Elementen, wird die Berechnung nach Erreichen der kritischen Last intern abgebrochen, das heißt es werden keine weiteren Inkremente der Lastverformungskurve ermittelt.

Für die Modellierung der Anwendungsfälle wurden aufgrund dieser vorgeschalteten Netzanalyse für Fall 3b lineare Elemente verwendet, wobei entweder vier oder sechs Elemente über die Schalendicke verwendet wurden und eine Anpassung der Elemente in Längs- und Umfangsrichtung erfolgte.

6.1 FEM-Netzanalyse für Fall 3b

Um die numerische Berechnung zu beschleunigen und trotzdem zutreffende Ergebnisse zu bekommen, wurde zunächst für einen Anwendungsfall (F3b; $e=4500$) eine FEM-Netzanalyse erstellt, bei der die Auswirkungen der Netzfeinheit und der Elementtypen (linear, quadratisch) auf die Rechenzeit und den kritischen Außendruck betrachtet wurden.

Dabei wurden zunächst lineare Elemente (C3D8R) verwendet, wobei die Netzgenerierung einmal mit sechs und einmal mit vier Elementen über die Dicke der Schale erfolgte. Für beide Netze wurde außerdem eine weitere Anpassung der Elemente in Längs- und Umfangsrichtung der Schale vorgenommen, indem die Abmessungen der Elemente in diesen beiden Richtungen bei größerem Abstand von der erwarteten maximalen Beule im Scheitelbereich vergrößert wurden.

Des Weiteren erfolgte eine Netzgenerierung des Modells mit quadratischen Elementen (C3D20R). Dabei wurde für die Berechnung einmal ein Netz mit einem Element über die Schalendicke und einmal ein Netz mit zwei Elementen verwendet. Für das Netz mit zwei Elementen über die Schalendicke, erfolgte anschließend wieder eine Anpassung der Elemente in Längs- und Umfangsrichtung. Hinsichtlich der Elementbezeichnung in ABAQUS [10] gilt:

Elementbezeichnung [10]	
C	Continuum
3D	3D-Element
8 oder 20	8 bzw. 20 Knoten
R	Reduced Integration

Es hat sich gezeigt, dass die kritischen Außendrucke $p_{0,FEM}$ für die unterschiedlichen Netze beziehungsweise Elemente in einem ähnlichen Bereich liegen. Lediglich für das Netz mit einem quadratischen finiten Element über die Dicke wurde ein weit geringerer kritischer Außendruck ermittelt und das Netz mit sechs linearen Elementen über die Schalendicke lieferte kein aussagekräftiges Ergebnis, da die Berechnung wahrscheinlich aufgrund des sehr feinen Netzes vorzeitig abgebrochen wurde.

In Abbildung 34 ist der kritische Außendruck $p_{0,FEM}$ und die Rechenzeit für jedes Netz und in Abbildung 35 der relative Außendruck (Bezug der Ergebnisse auf Referenzfall mit quadratischen Elementen C3D20R und 2 Elementen in Dickenrichtung) und die Rechenzeit dargestellt.

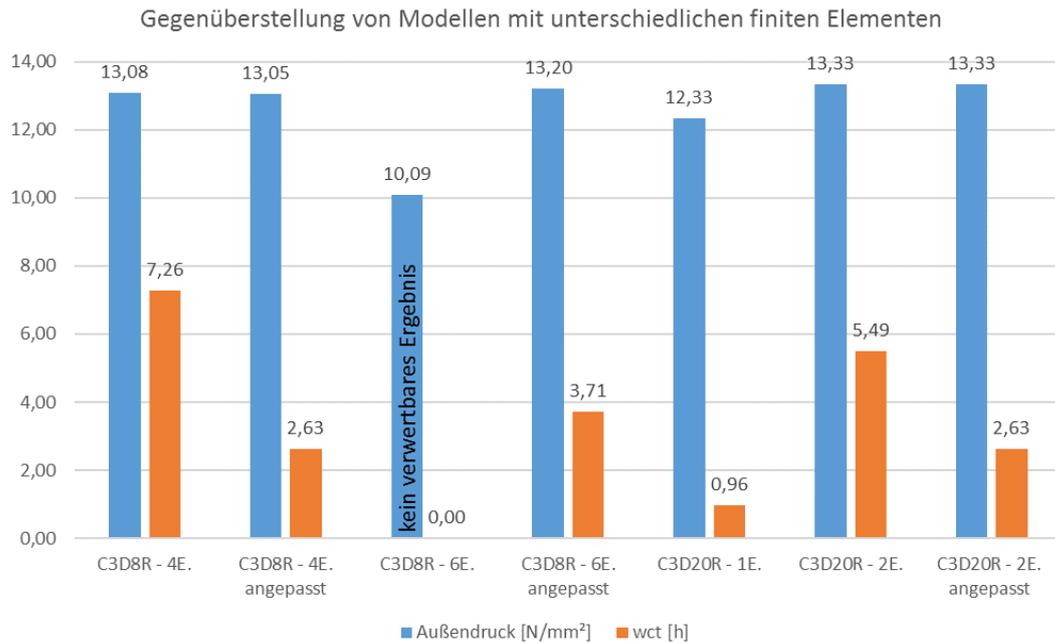


Abbildung 34: Gegenüberstellung der kritischen Außendrucke $p_{0,FEA}$ des Anwendungsfalls 3b ($e = 4500$) mit unterschiedlichen finiten Elementen und Netzen und der zur Ermittlung nötigen Rechenzeit (wct) in Stunden

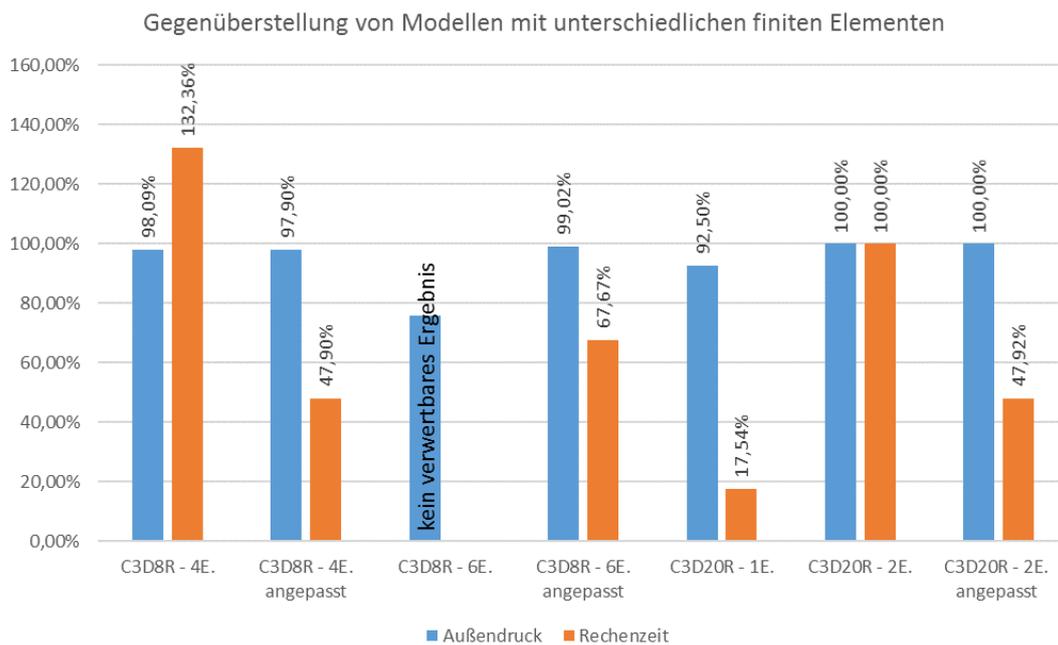


Abbildung 35: Gegenüberstellung der relativen kritischen Außendrucke und Rechenzeiten des Anwendungsfalls 3b ($e = 4500$) mit unterschiedlichen finiten Elementen und Netzen

Abbildung 36 bis Abbildung 41 zeigen für die einzelnen Berechnungsmodelle die Lastverformungskurven für 2 Punkte im Scheitel, einerseits am Ring und andererseits am Rohr mittig zwischen den Ringen.

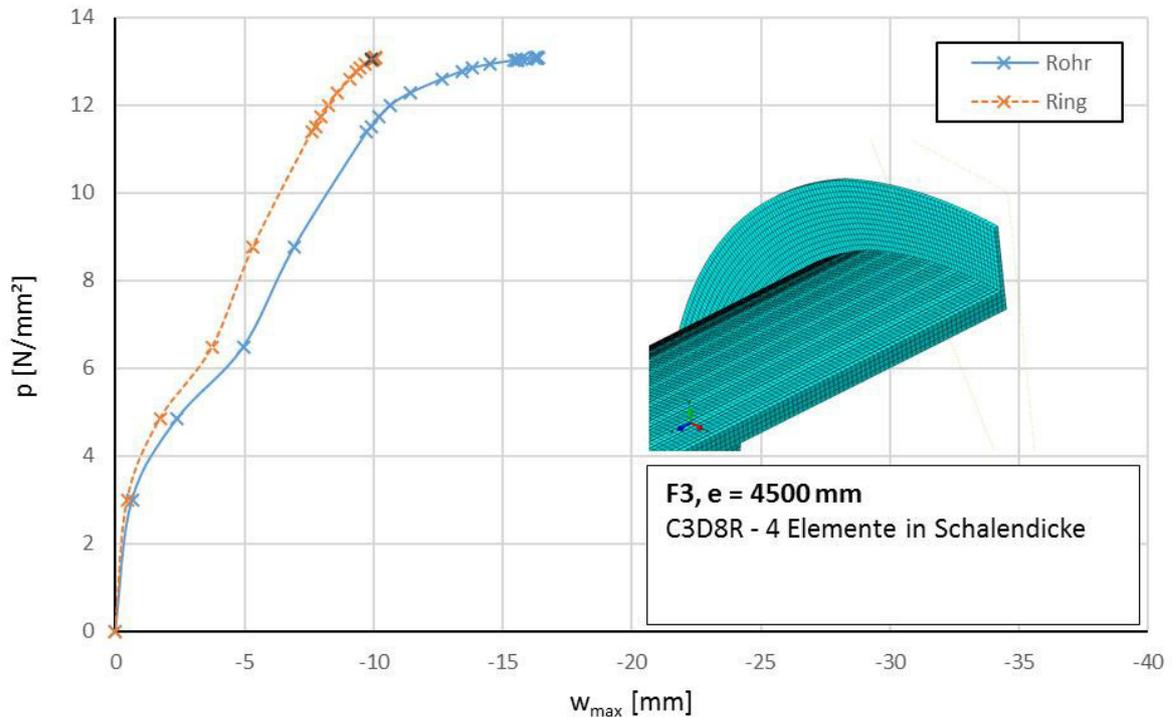


Abbildung 36: Lastverformungskurve im Scheitel des Anwendungsfalls 3b – Vernetzung des Modells mit vier Elementen über die Schalendicke (lineare Elemente)

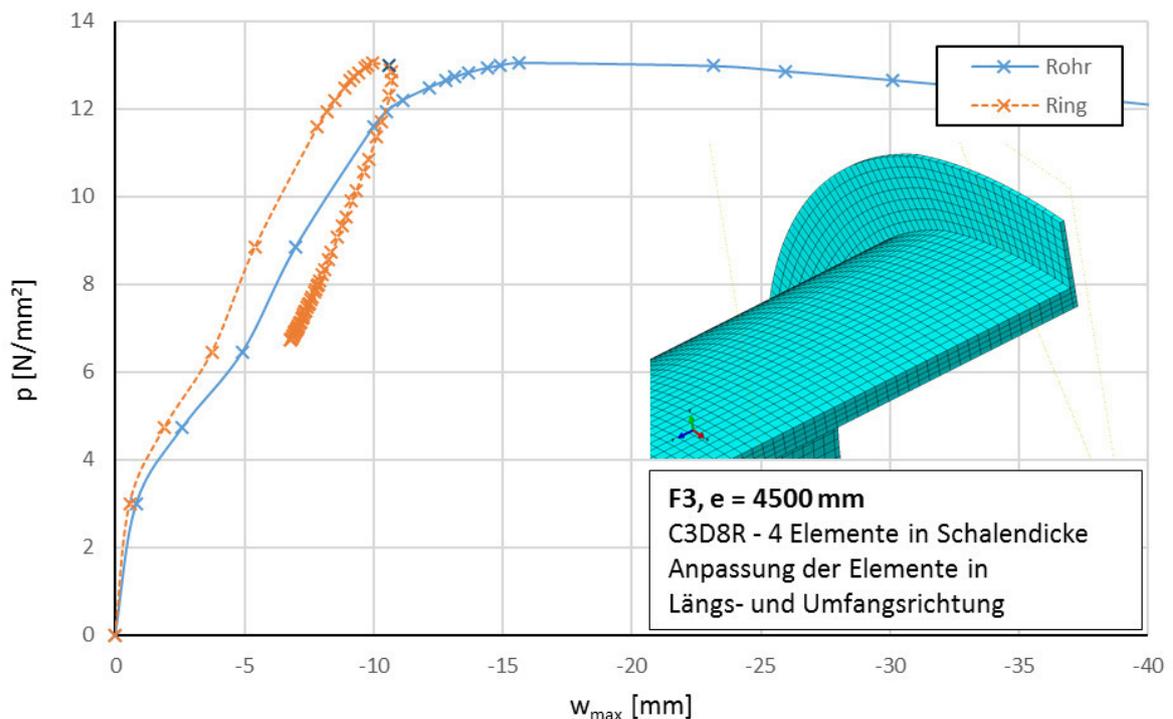


Abbildung 37: Lastverformungskurve im Scheitel des Anwendungsfalls 3b – Vernetzung des Modells mit vier Elementen über die Schalendicke und Anpassung der Elemente in Längs- und Umfangsrichtung (lineare Elemente)

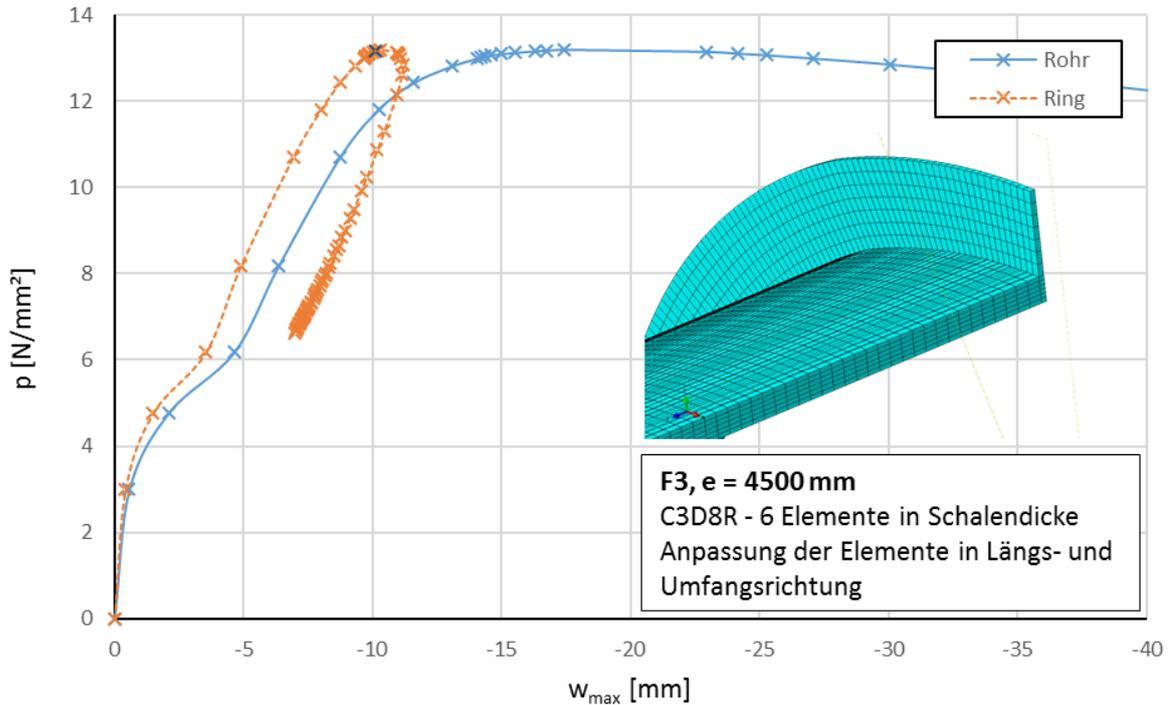


Abbildung 38: Lastverformungskurve im Scheitel des Anwendungsfalls 3b – Vernetzung des Modells mit sechs Elementen über die Schalendicke und Anpassung der Elemente in Längs- und Umfangsrichtung (lineare Elemente)

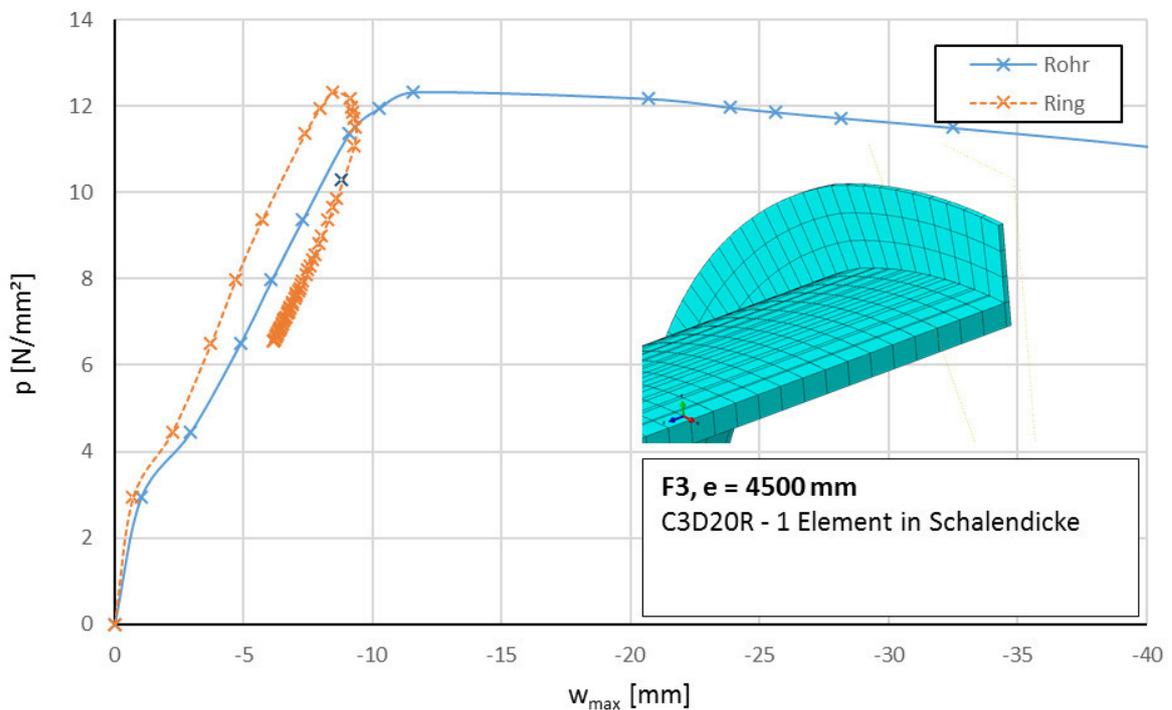


Abbildung 39: Lastverformungskurve im Scheitel des Anwendungsfalls 3b – Vernetzung des Modells mit einem Element über die Schalendicke (quadratische Elemente)

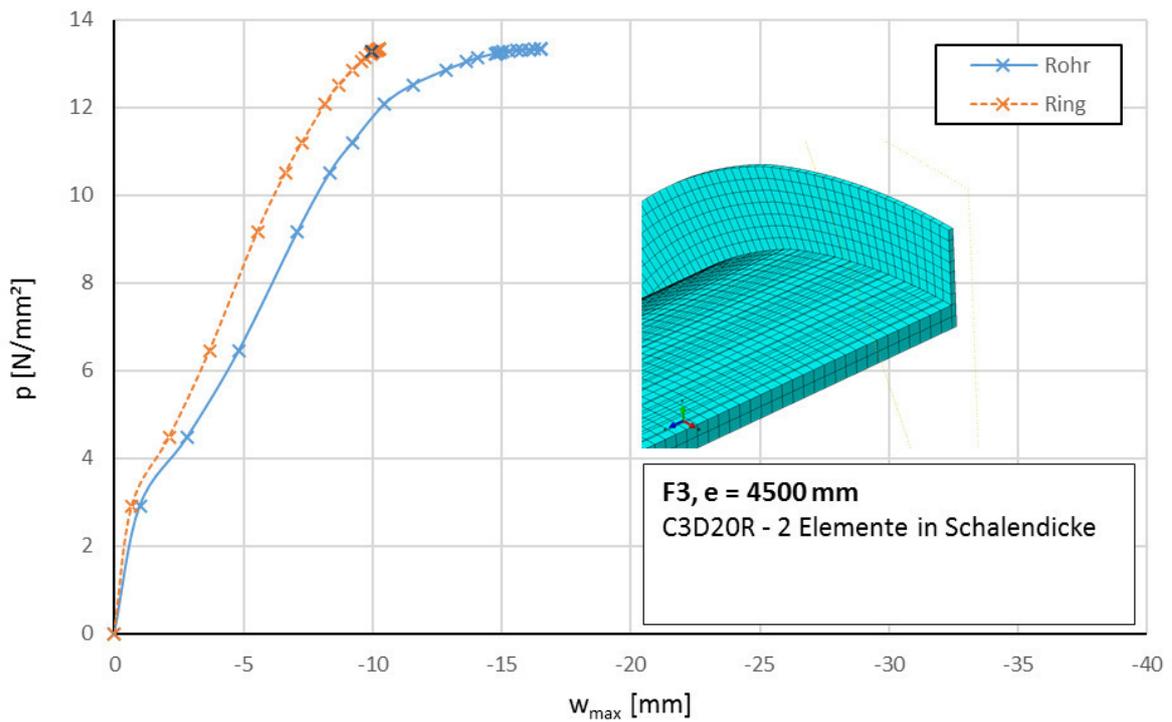


Abbildung 40: Lastverformungskurve im Scheitel des Anwendungsfalls 3b – Vernetzung des Modells mit zwei Elementen über die Schalendicke (quadratische Elemente)

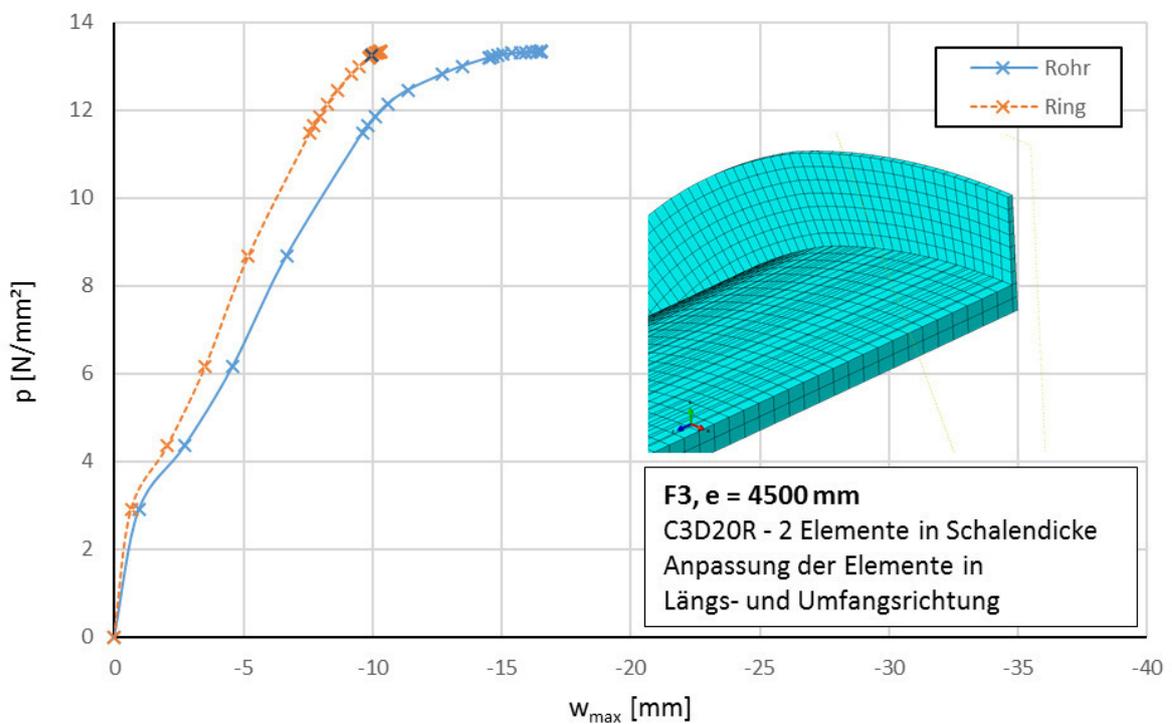


Abbildung 41: Lastverformungskurve im Scheitel des Anwendungsfalls 3b – Vernetzung des Modells mit zwei Elementen über die Schalendicke und Anpassung der Elemente in Längs- und Umfangsrichtung (quadratische Elemente)

6.2 Ergebnisse der FEM-Analyse

In Tabelle 10 sind die mit der realitätsnahen numerischen Berechnung ermittelten kritischen Außendrucke $p_{0,FEA}$ angeführt.

Des Weiteren sind nachfolgend in Abbildung 43 bis Abbildung 162 für jeden Anwendungsfall die mit ABAQUS ermittelten Lastverformungskurven der maximalen Verformung des Ringes und des Rohres in der Regel jeweils im Scheitelpunkt ($\varphi=0^\circ$; Lage am Rohr mittig zwischen den Ringen) und die verformte Figur mit den von Mises-Vergleichsspannungen im Traglastzustand dargestellt. Die Berechnungen wurden für jeden Anwendungsfall jeweils für die Stahlgüte S355, S550, S690 und S890 durchgeführt. In den Lastverformungskurven sind außerdem ergänzend der kritische Außendruck für die Ringsteife nach Amstutz/Feder [5] und Jacobsen [7], der kritische Außendruck nach Amstutz [5] und Jacobsen [7] für das glatte Rohr und der kritische Außendruck für das Zwischenringbeulen nach Eurocode 1993-1-6 [8] eingetragen.

	e [mm]	kritische Außendrucke (GMNIA) [N/mm ²]			
		S355	S550	S690	S890
Fall 1a	875	1,70	2,13	2,43	2,63
Fall 1b	1750	1,06	1,07	1,07	1,07
Fall 1c	3500	0,61	0,66	0,66	0,77
Fall 1d	7000	0,54	0,58	0,59	0,59
Fall 2a	750	6,66	9,32	10,73	12,54
Fall 2b	1500	4,84	6,13	6,79	7,36
Fall 2c	2270	4,13	5,20	5,71	6,19
Fall 2d	4800	3,61	4,58	5,07	5,58
Fall 3a	1500	15,52	22,27	26,53	31,99
Fall 3b	4500	13,20	18,43	22,31	26,75
Fall 4	1167	3,79	4,72	5,00	5,07
Fall 5a	1000	2,55	3,48	3,77	4,39
Fall 5b	2500	1,31	1,36	1,36	1,36
Fall 6a	2000	2,11	2,64	2,91	3,55
Fall 6b	4500	1,23	1,35	1,37	1,37

Tabelle 10: Realitätsnahe, kritische Außendrucke $p_{0,FEA}$ der ringversteiften Panzerung (GMNIA)

In Abbildung 43 sind beispielhaft für den Anwendungsfall 1c mit $e = 3500$ mm und S550 die Punkte der maximalen Verformungen im Ring und in der Schale bei p_{FEA} dargestellt. In diesem Anwendungsfall bildet sich eine Beule aus und die maximalen Verformungen der Schale und des Ringes liegen entsprechend im Scheitelpunkt der Beule. Für Fälle bei denen sich zwei Beulen ausgebildet haben, wurden die maximalen Verformungen in gleicher Weise in den Scheitelpunkten dieser Beulen ermittelt.

Generell ist zu den Berechnungen zu sagen, dass sich in Fällen mit engem Ringabstand eher zwei Beulen beidseits des Scheitels ausbilden und dass diese Tendenz mit zunehmender Fließgrenze zunimmt. So bilden sich zwei Beulen für den Anwendungsfall 1a mit $e = 875$ mm bei S550 (Abbildung 45), S690 und S890, den Anwendungsfall 1b mit $e = 1750$ mm bei S355, S550, S690 und S890, den Anwendungsfall 5a mit $e = 1000$ mm bei S355 (Abbildung 131Abbildung

81), S550, S690 und S890 und den Anwendungsfall 6a mit $e = 2000$ mm bei S890 aus. In allen übrigen Fällen stellt sich nur eine Beule im Scheitel ein.

Für Fälle mit großen Ringabständen ist anzumerken, dass der kritische Außendruck durch Verwendung von Stählen höherer Güte häufig aufgrund Vorliegen eines Stabilitätsproblems nicht mehr gesteigert werden kann. So kann der kritische Außendruck für den Anwendungsfall 1b mit $e = 1750$ mm und den Fall 1d mit $e = 7000$ mm, den Anwendungsfall 4 mit $e = 1167$ mm, den Anwendungsfall 5b mit $e = 2500$ mm und den Anwendungsfall 6b mit $e = 4500$ mm bei hohen Stahlgüten kaum oder gar nicht mehr gesteigert werden.

Der Anwendungsfall 1c mit $e = 3500$ mm bei S690 (Abbildung 63 und Abbildung 64) und bei S890 (Abbildung 65 und Abbildung 66) und der Anwendungsfall 5b mit $e = 2500$ mm bei S550 (Abbildung 141 und Abbildung 142) weisen in ihrem Tragverhalten Besonderheiten auf. Für diese Fälle kann der kritische Außendruck nach Erreichen des ersten Lastmaximums und anschließendem Abfall des Außendrucks erneut gesteigert werden. Dies ist in den Lastverformungskurven der jeweiligen Fälle gut ersichtlich. Der Grund dafür ist, dass zunächst die Tragfähigkeit des Rohres zwischen den Ringen erreicht wird und nach Lastumlagerung zu den Ringen hin der Außendruck noch soweit gesteigert werden kann, bis der kritische Außendruck für den Versteifungsring erreicht ist. Für den Anwendungsfall 5b mit $e = 2500$ mm für S690 und S890 ist dieses Tragverhalten aufgrund der höheren Fließspannung gleichermaßen gegeben, kann aber in den Lastverformungskurven nicht dargestellt werden, da die Berechnung nach Erreichen des ersten Lastmaximums abgebrochen wurde.

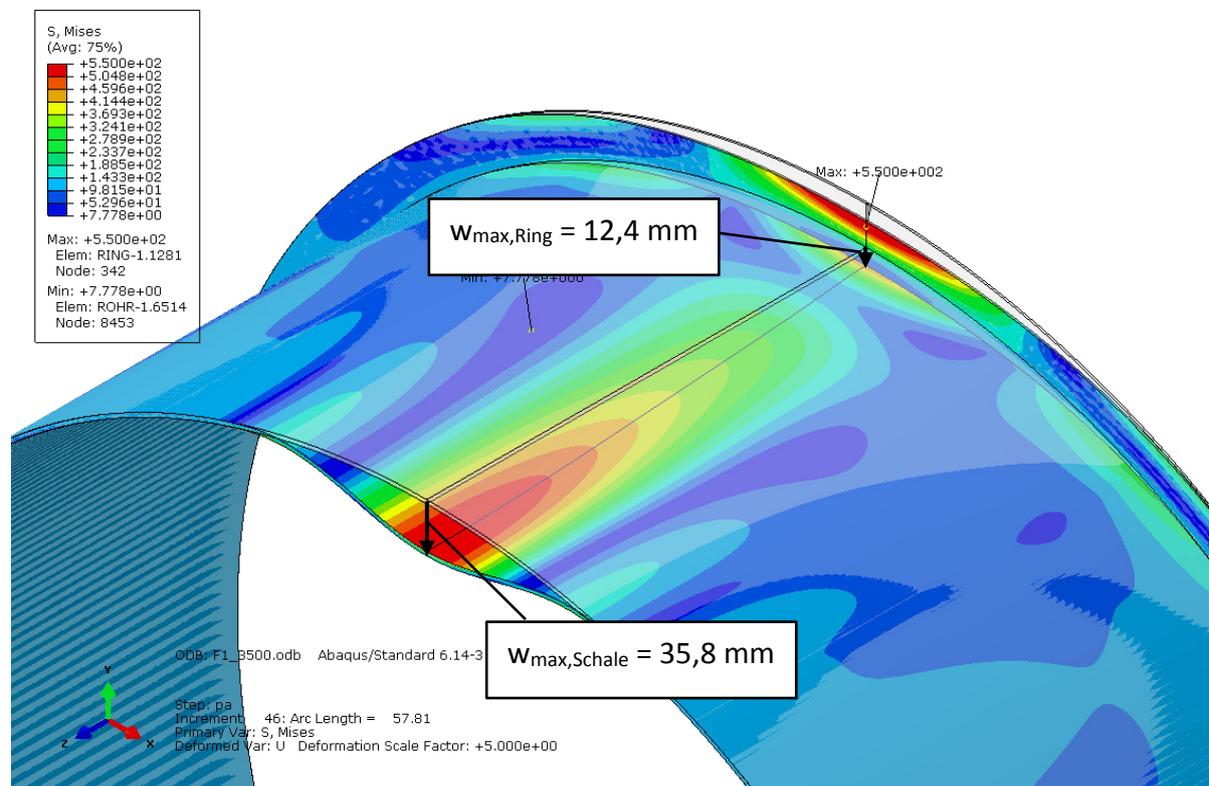


Abbildung 42: Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung und der Verformungen (5-fach überhöht) in der Schale ($w_{\text{Schale}} = 35,8$ mm) und im Ring ($w_{\text{Ring}} = 12,4$ mm) bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1c mit $e = 3500$, S550

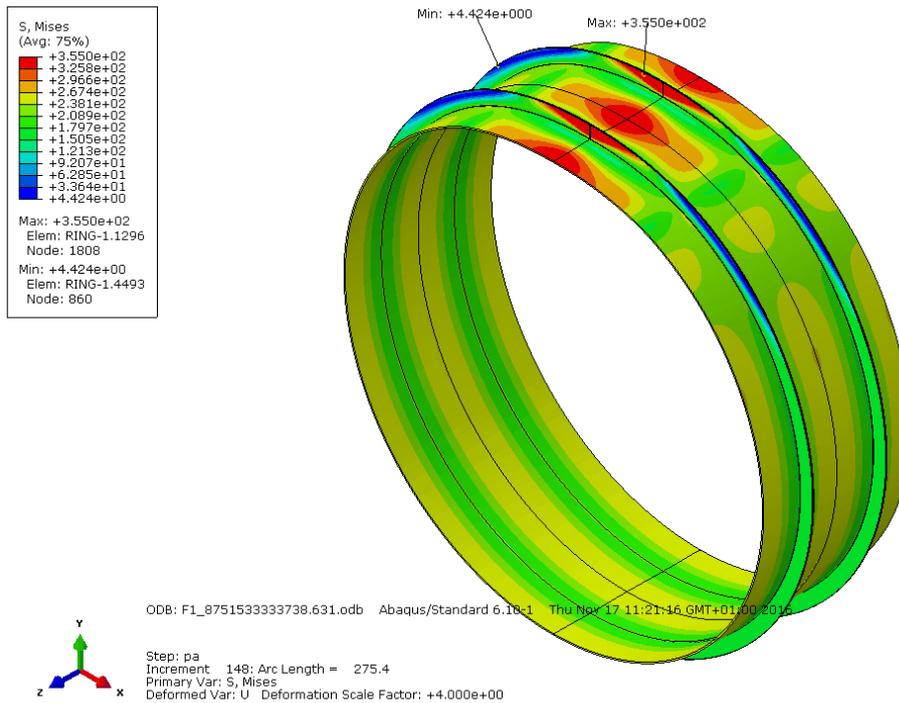


Abbildung 43: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1a mit $e = 875$, S355

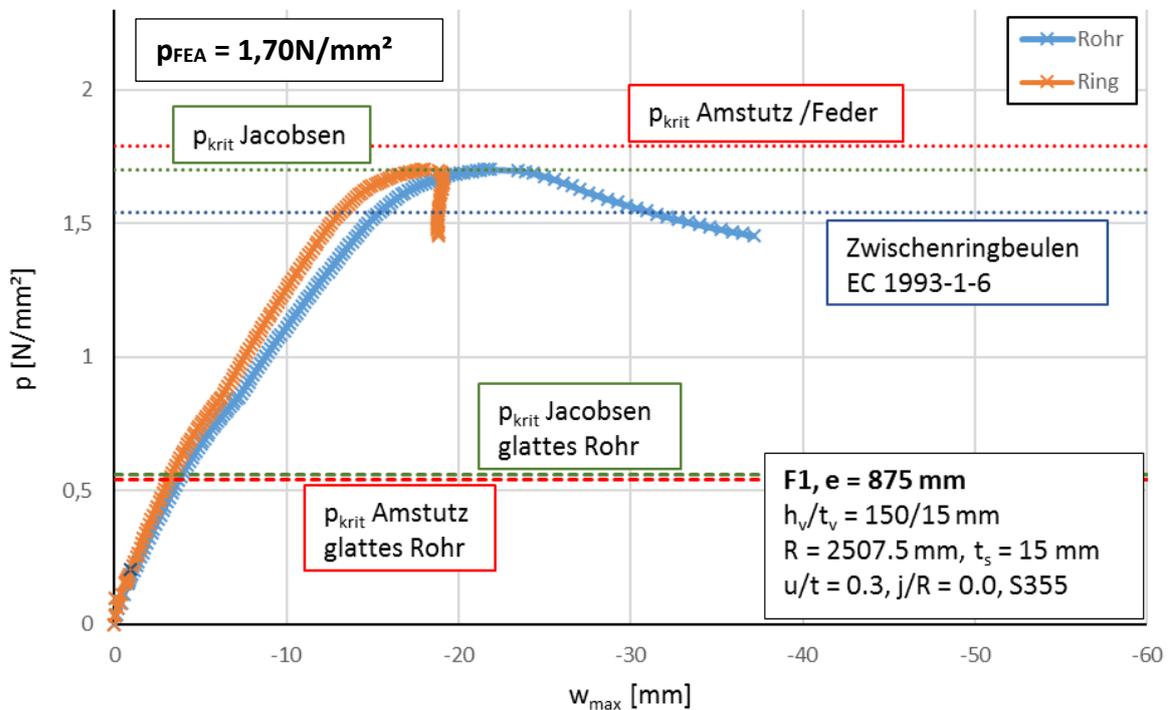


Abbildung 44: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1a, $e = 875$, S355

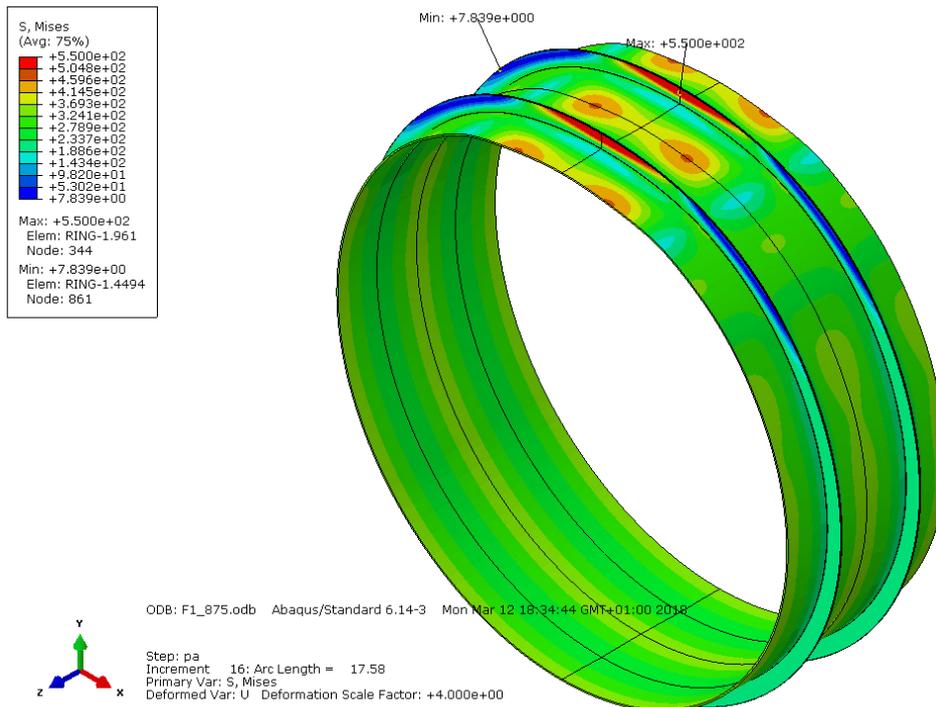


Abbildung 45: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1a mit $e = 875$, S550

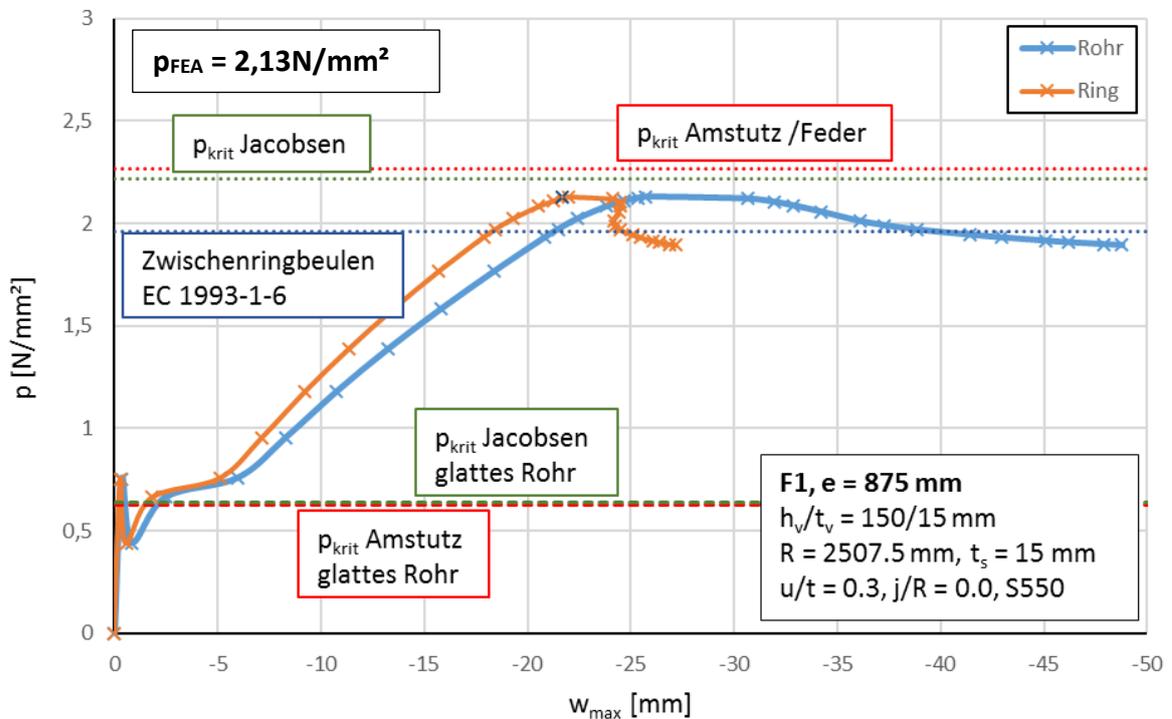


Abbildung 46: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1a, $e = 875$, S550

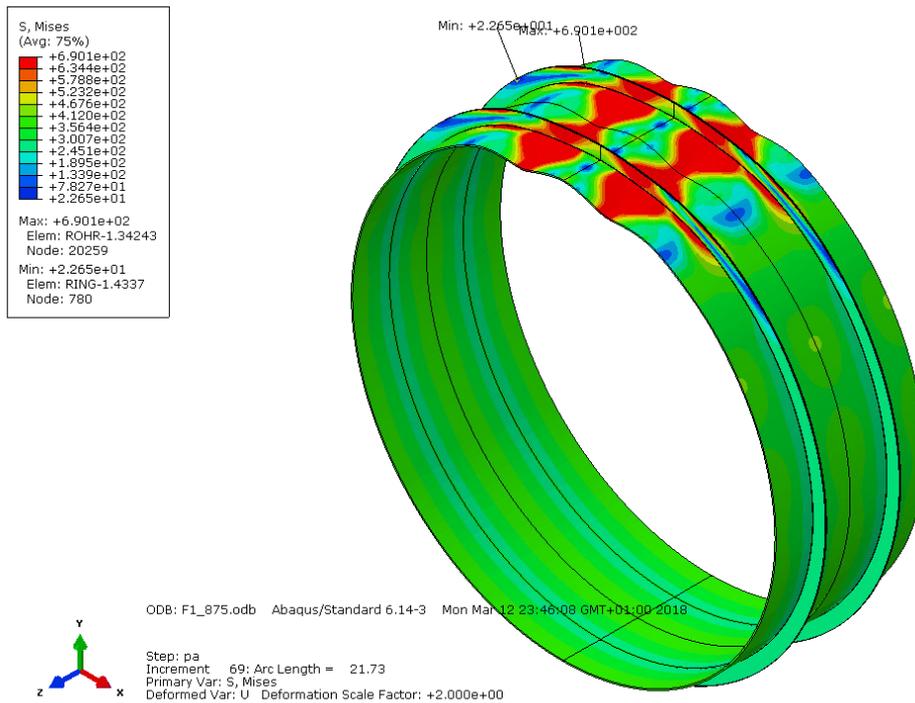


Abbildung 47: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1a mit $e = 875, S690$

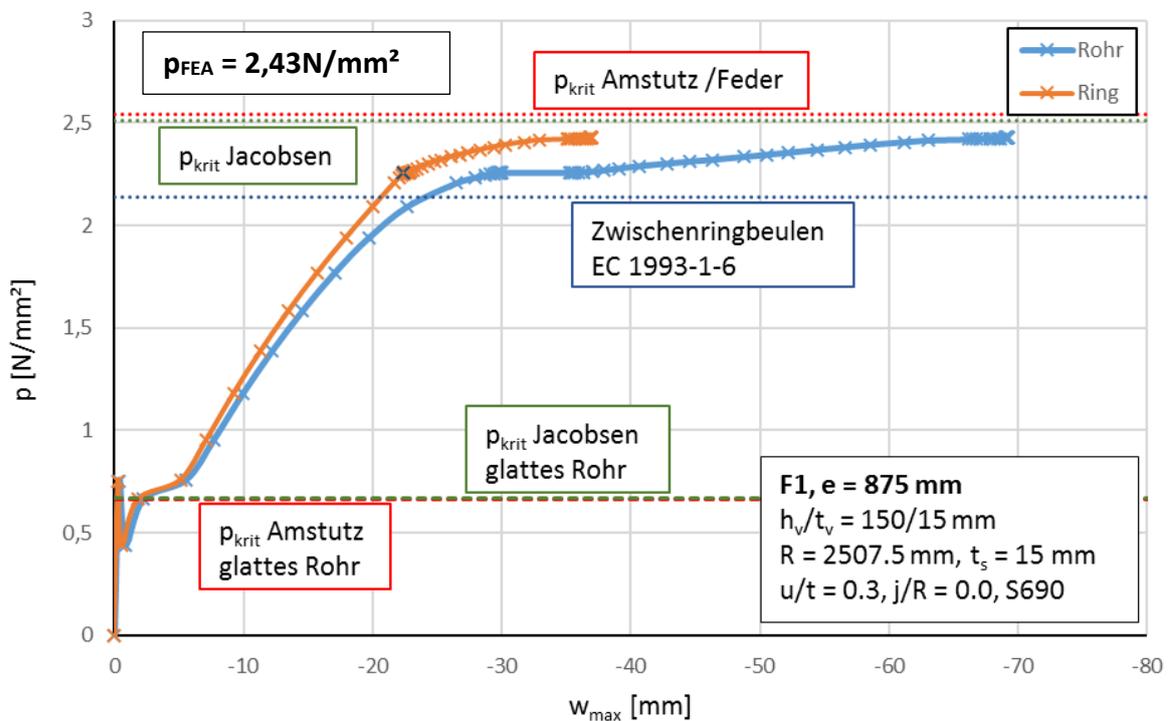


Abbildung 48: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1a, $e = 875, S690$

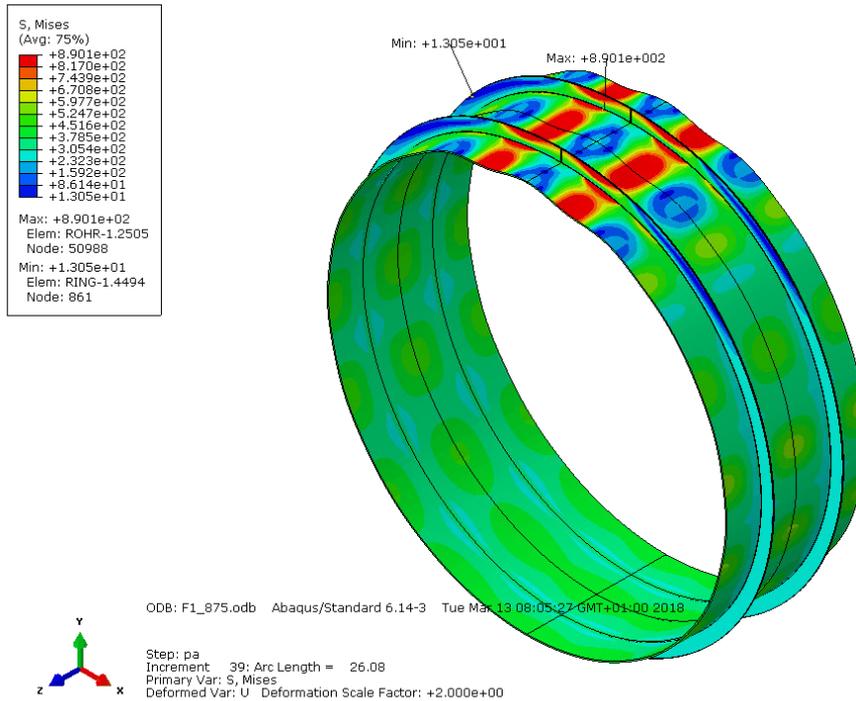


Abbildung 49: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1a mit $e = 875$, S890

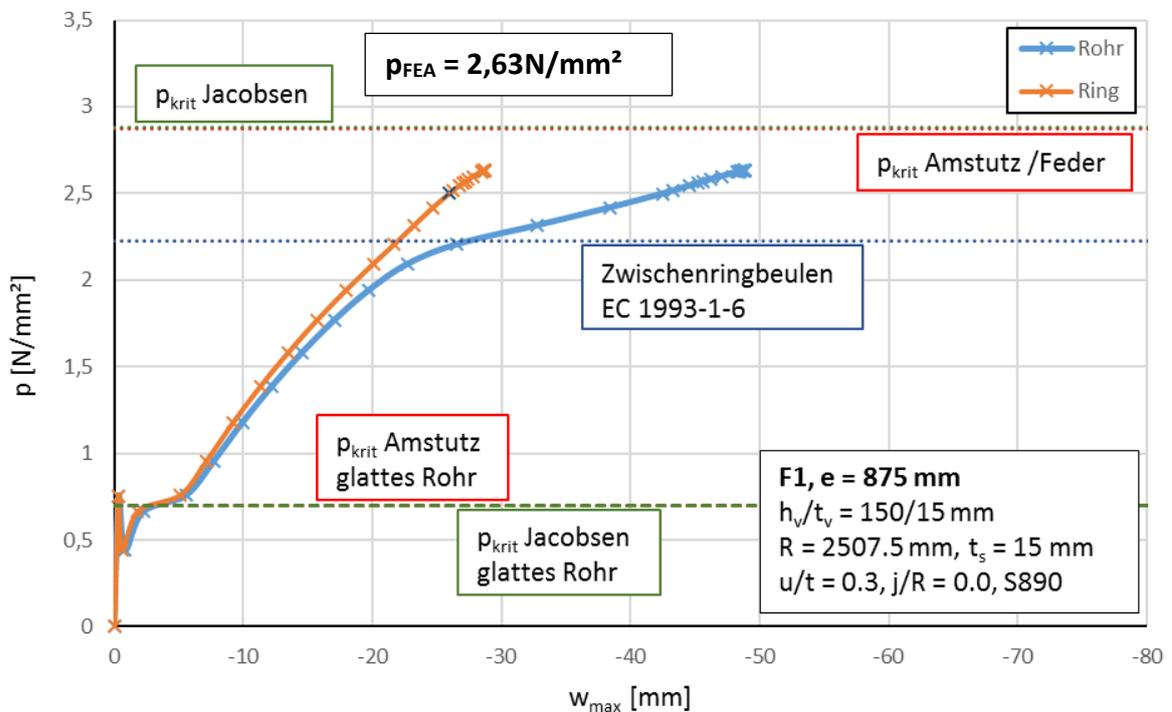


Abbildung 50: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1a, $e = 875$, S890

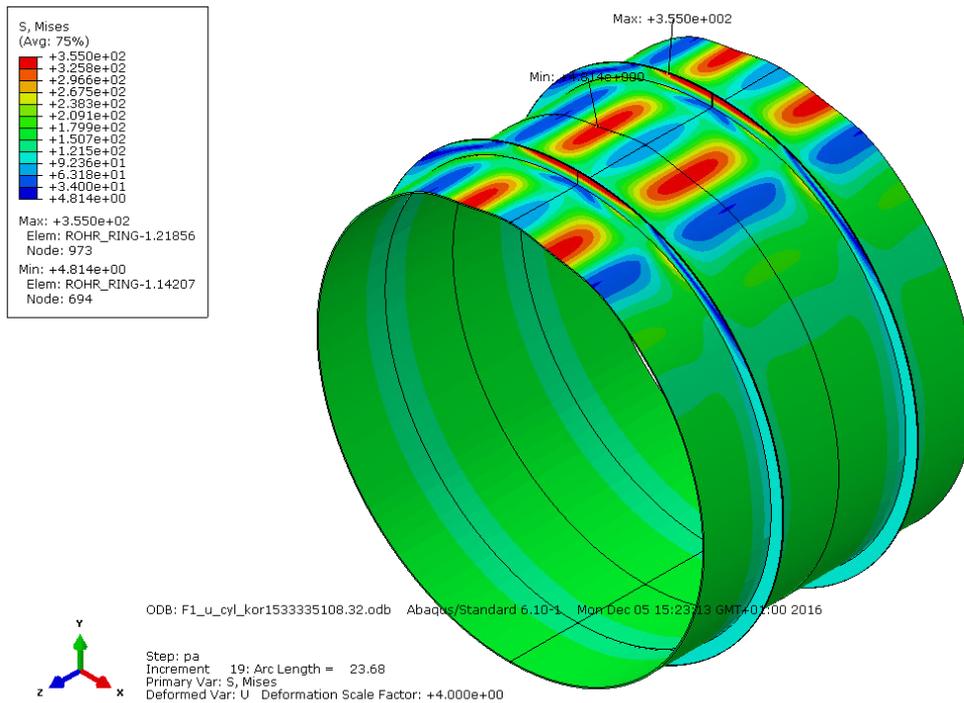


Abbildung 51: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1b mit $e = 1750$, S355

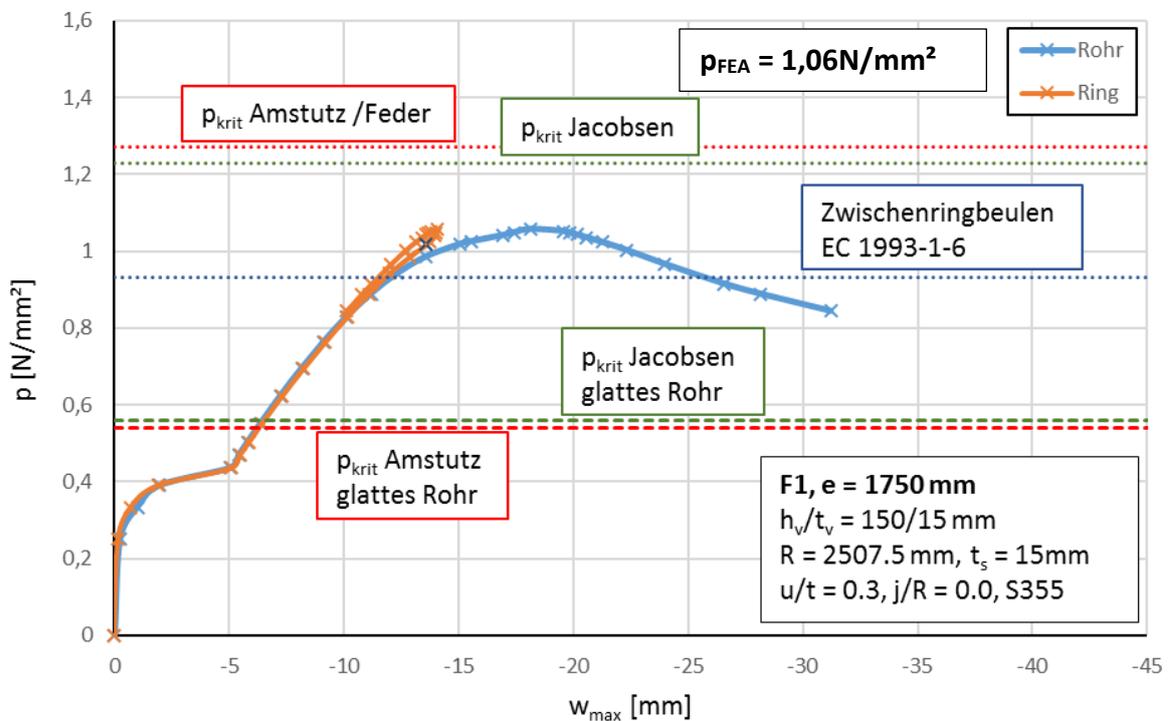


Abbildung 52: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1b, $e = 1750$, S355

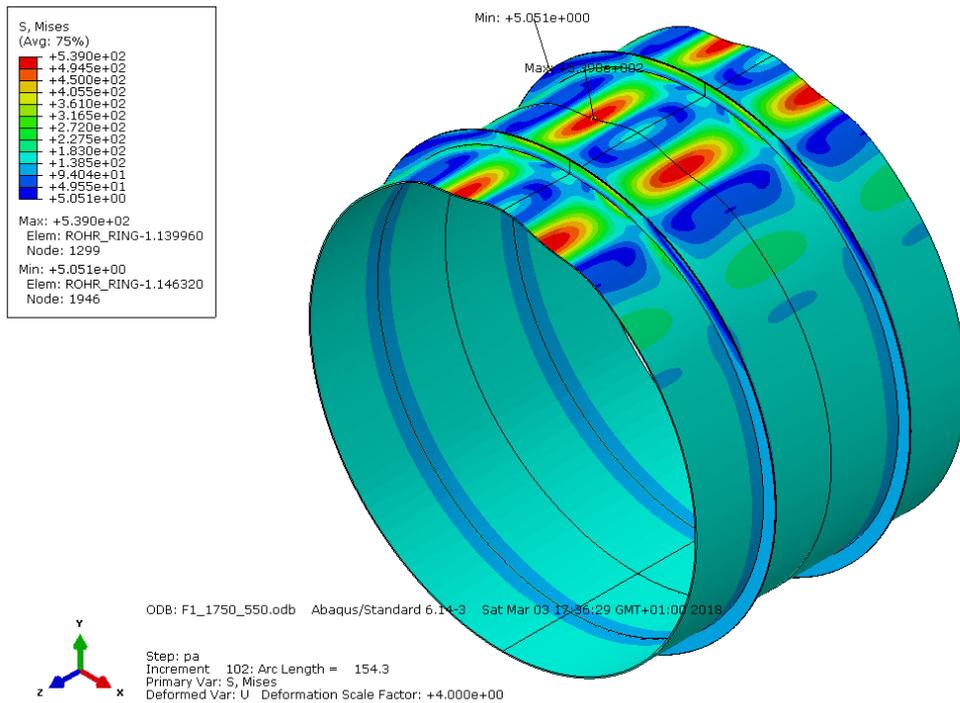


Abbildung 53: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1b mit $e = 1750$, S550

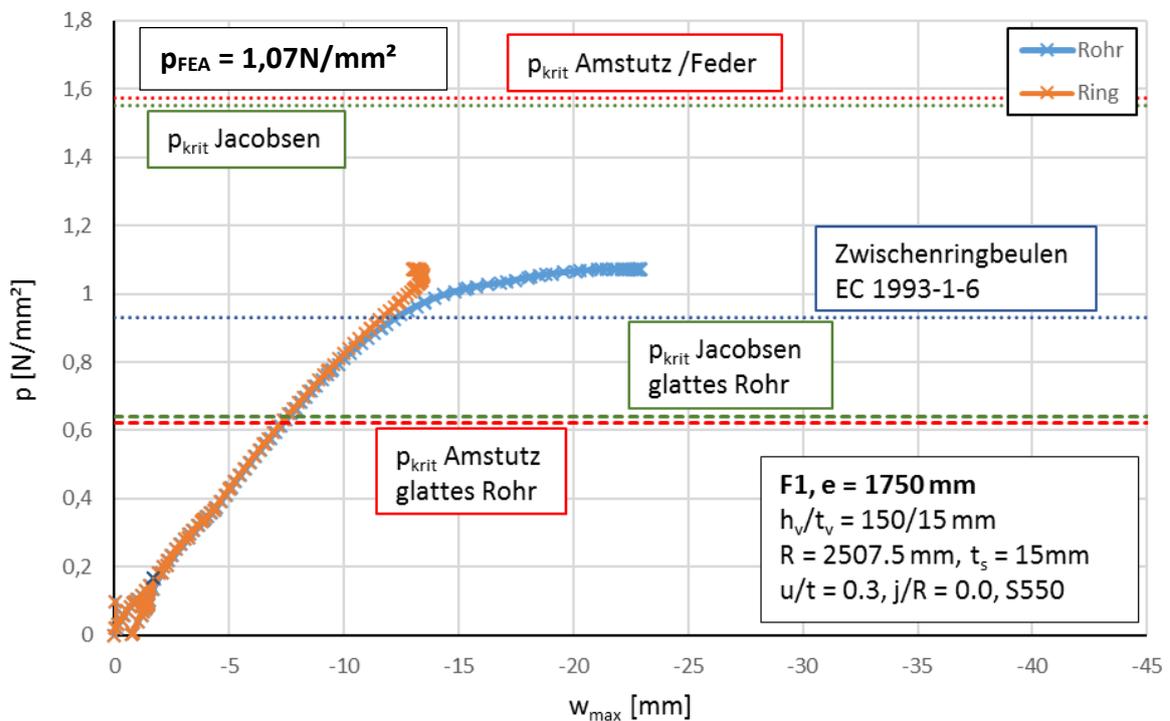


Abbildung 54: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1b, $e = 1750$, S550

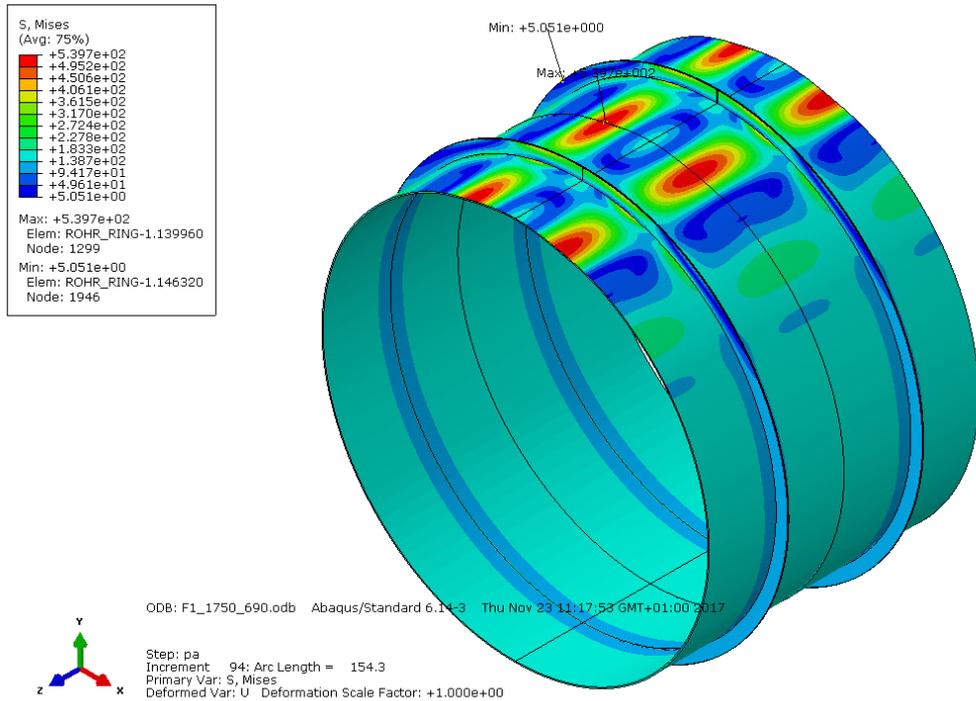


Abbildung 55: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1b mit $e = 1750$, S690

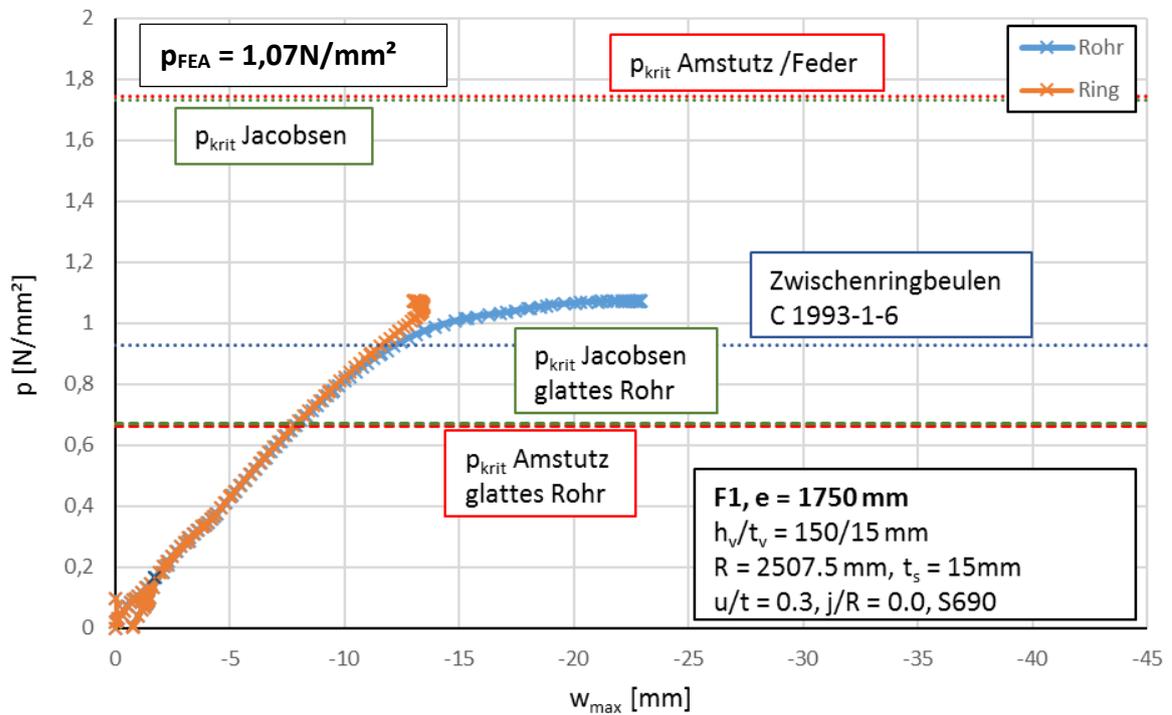


Abbildung 56: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1b, $e = 1750$, S690

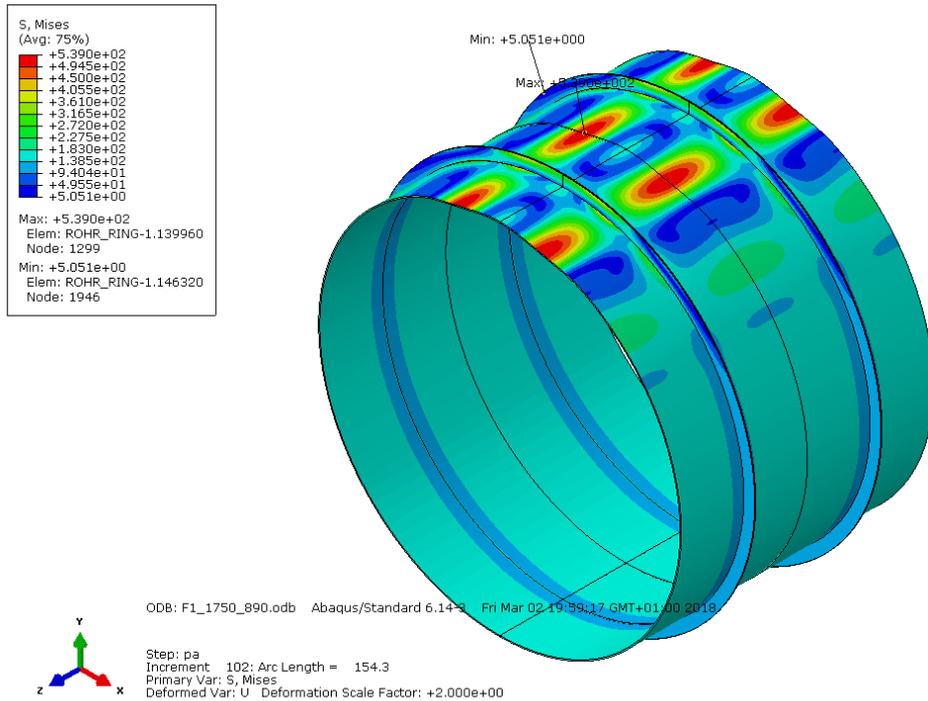


Abbildung 57: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1b mit $e = 1750$, S890

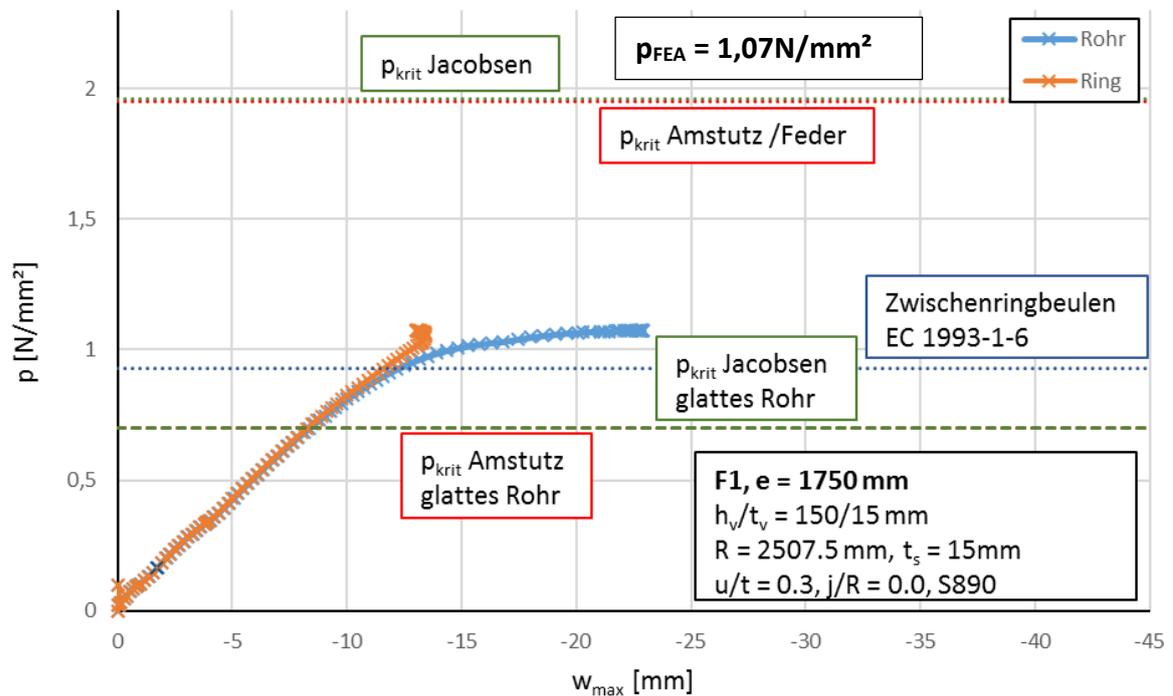


Abbildung 58: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1b, $e = 1750$, S890

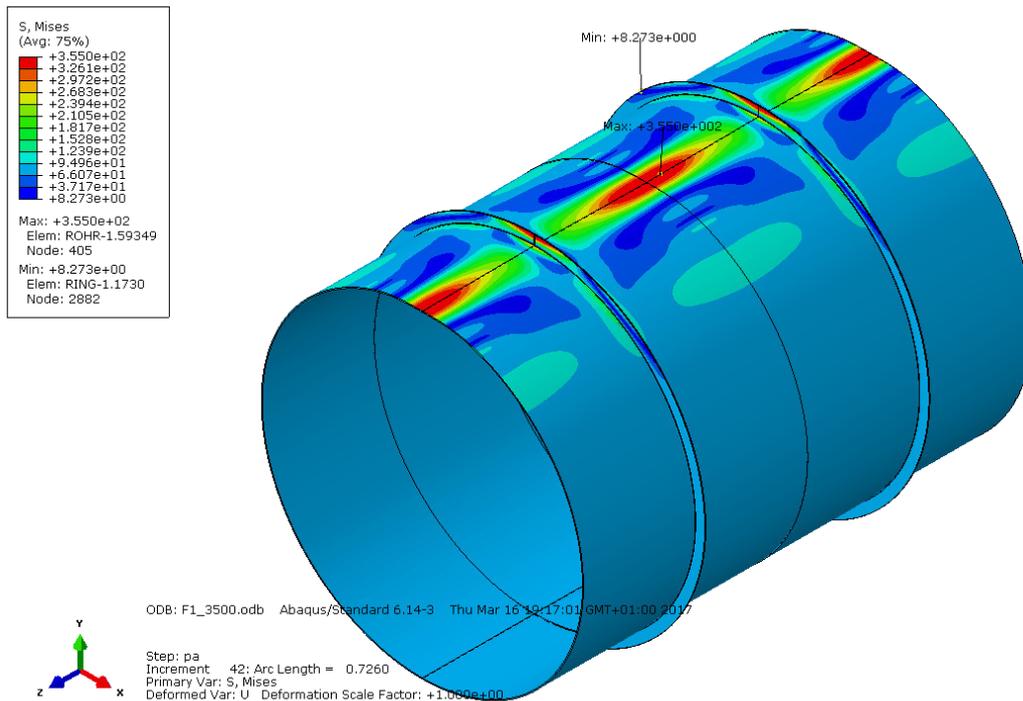


Abbildung 59: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1c mit $e = 3500$, S355

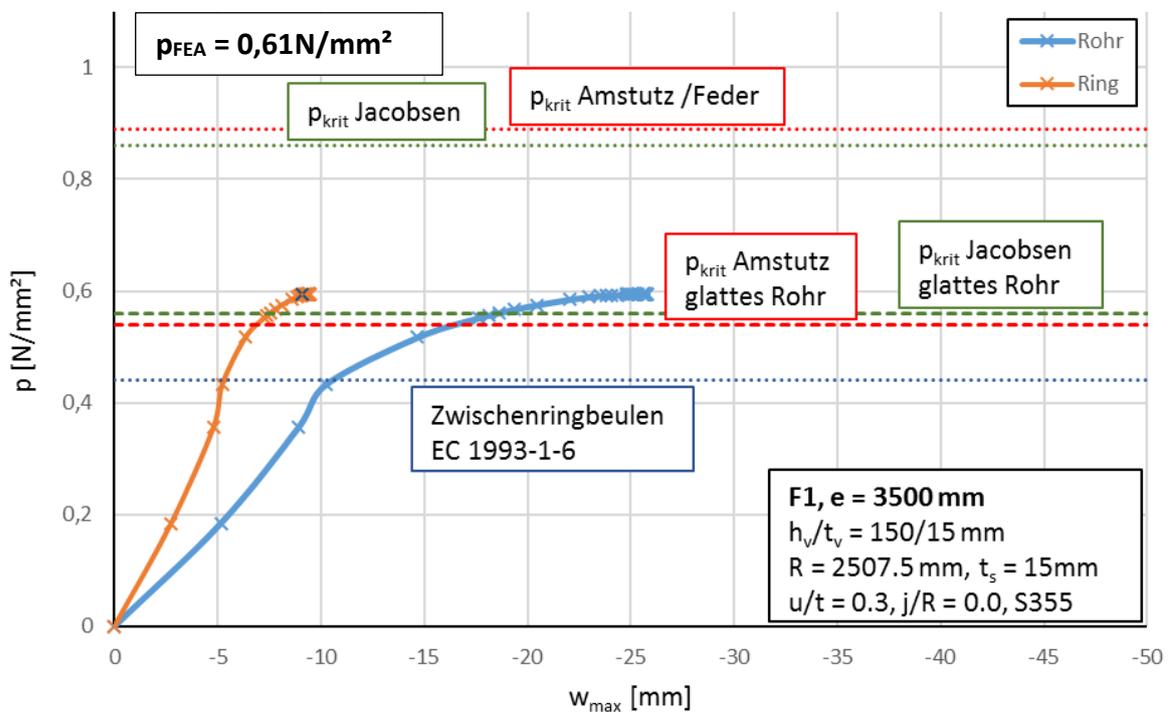


Abbildung 60: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1c, $e = 3500$, S355

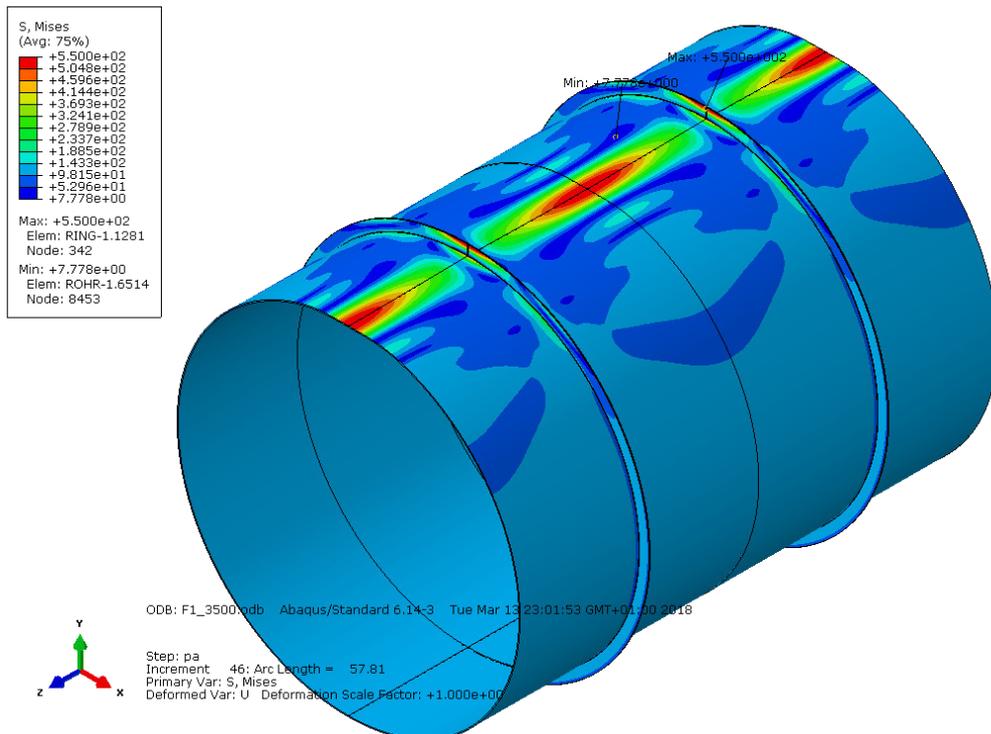


Abbildung 61: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1c mit $e = 3500$, S550

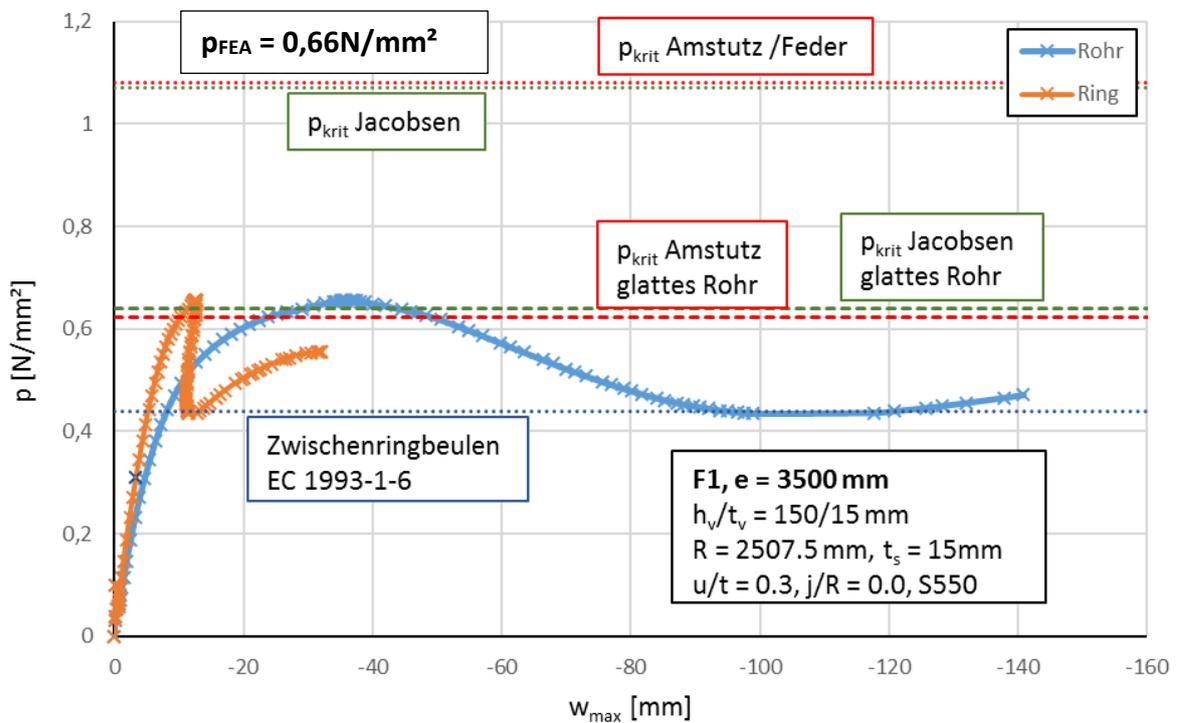


Abbildung 62: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1c, $e = 3500$, S550

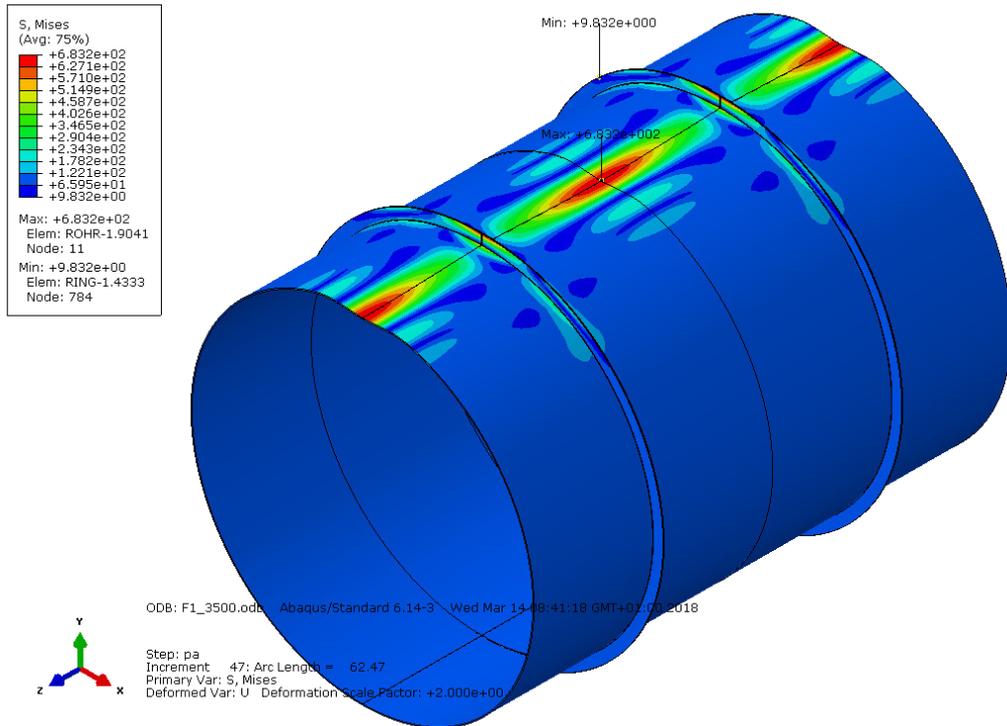


Abbildung 63: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1c mit $e = 3500, S690$

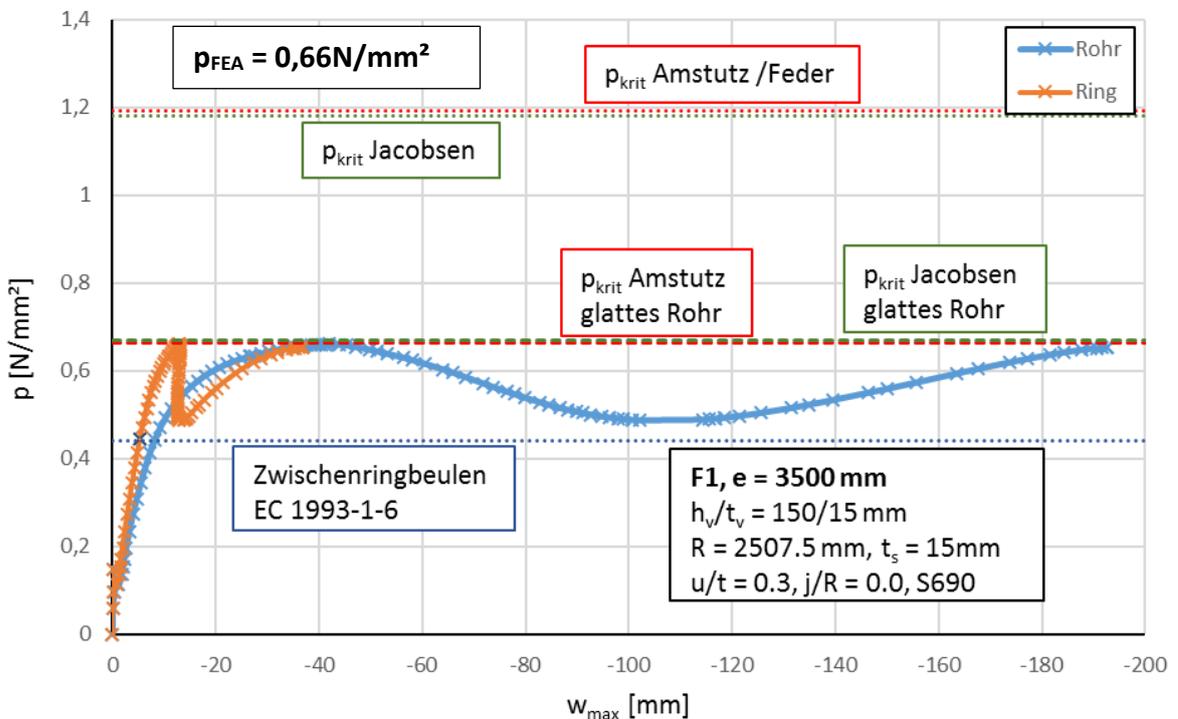


Abbildung 64: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1c, $e = 3500, S690$

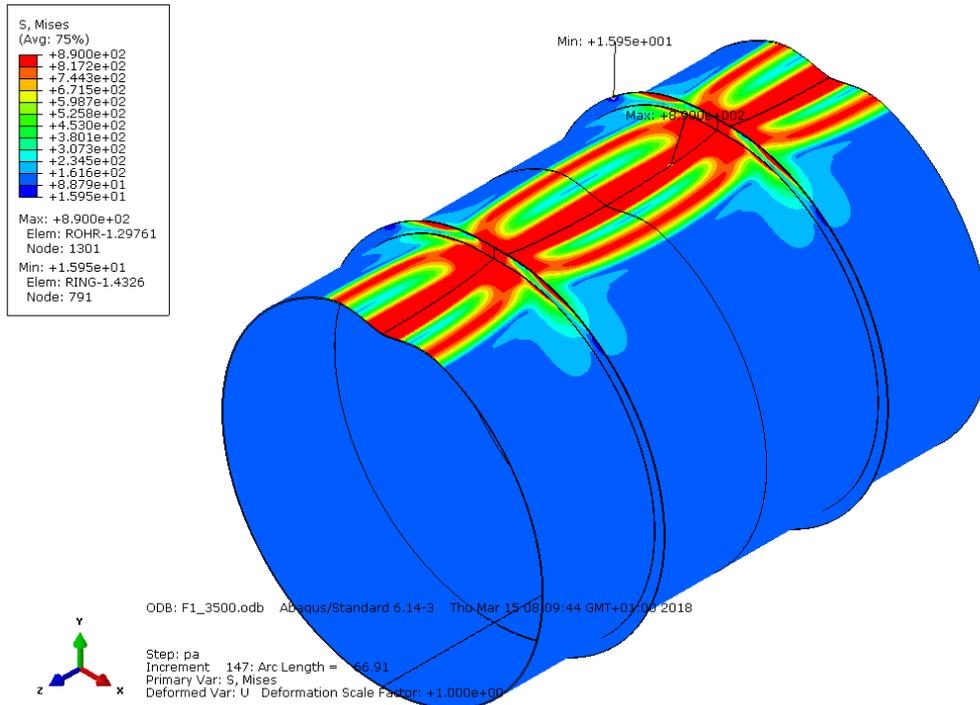


Abbildung 65: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1c mit $e = 3500$, S890

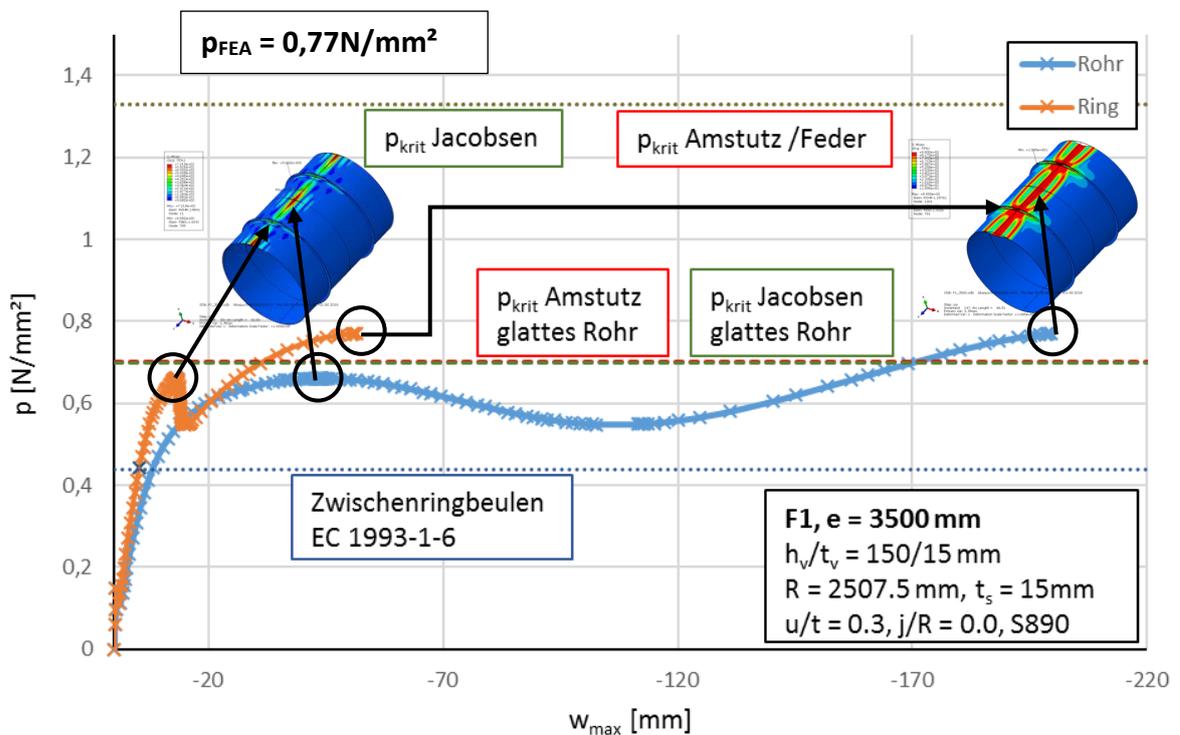


Abbildung 66: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1c, $e = 3500$, S890

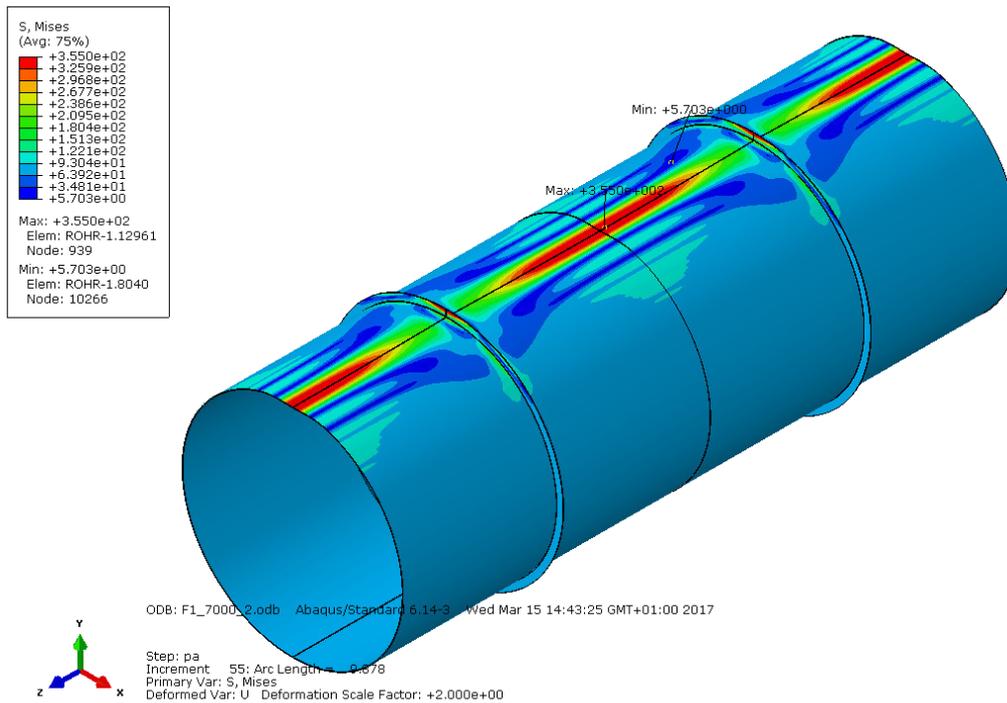


Abbildung 67: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1d mit $e = 7000$, S355

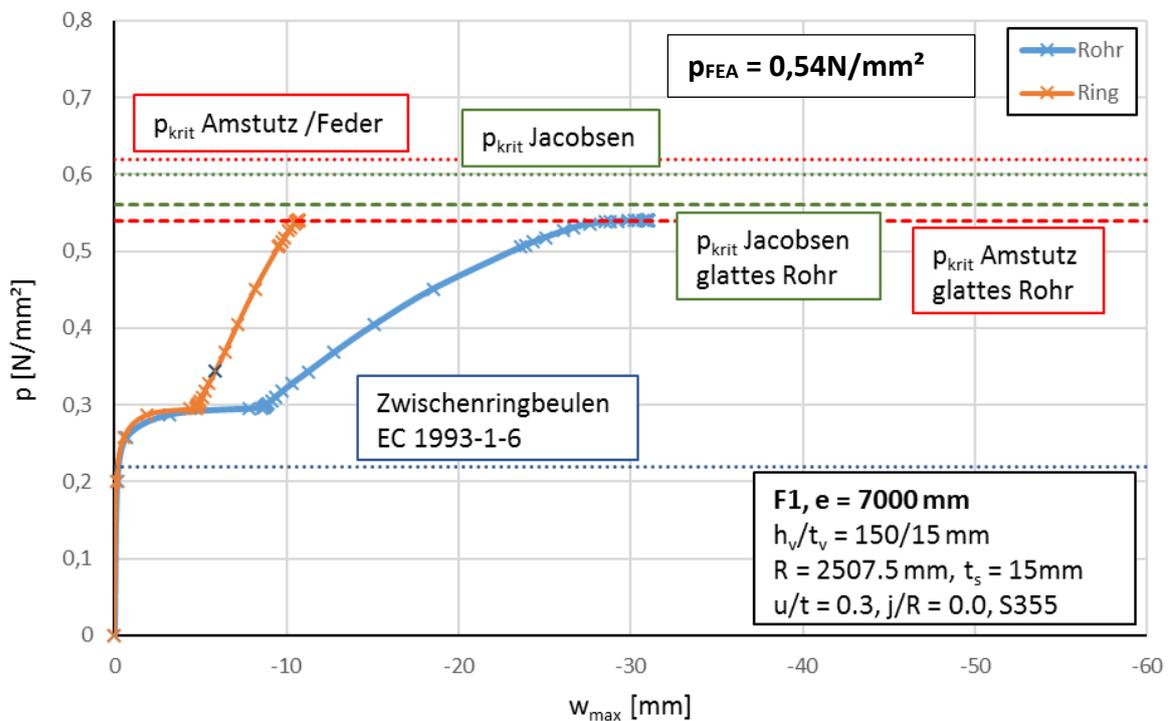


Abbildung 68: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1d, $e = 7000$, S355

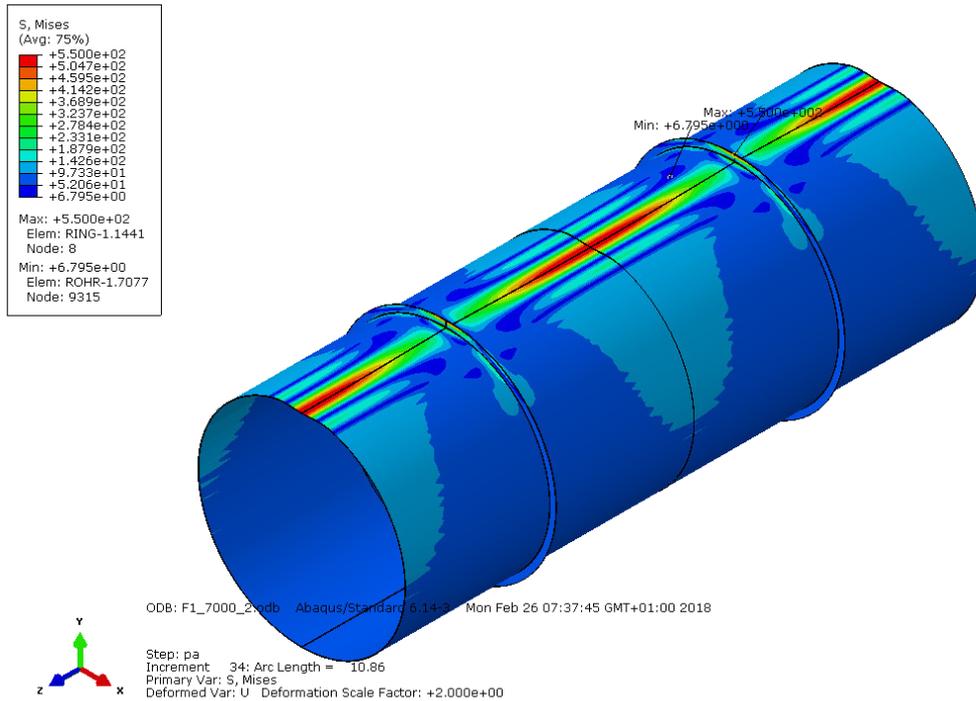


Abbildung 69: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1d mit $e = 7000$, S550

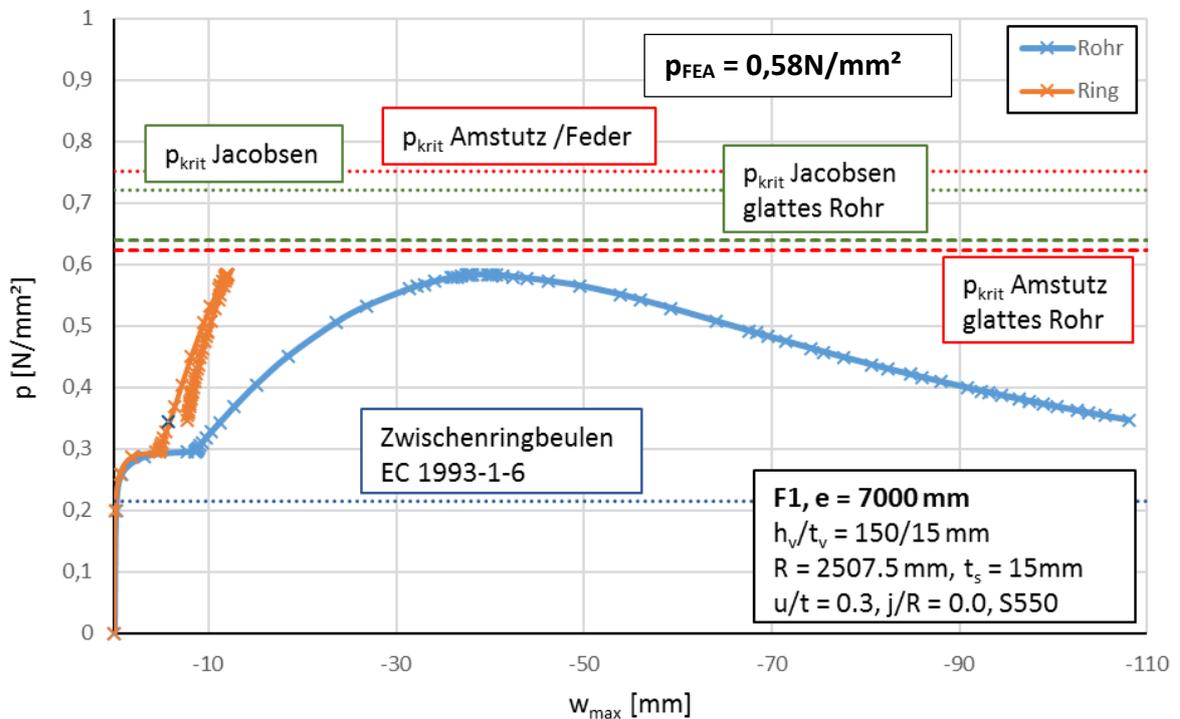


Abbildung 70: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1d, $e = 7000$, S550

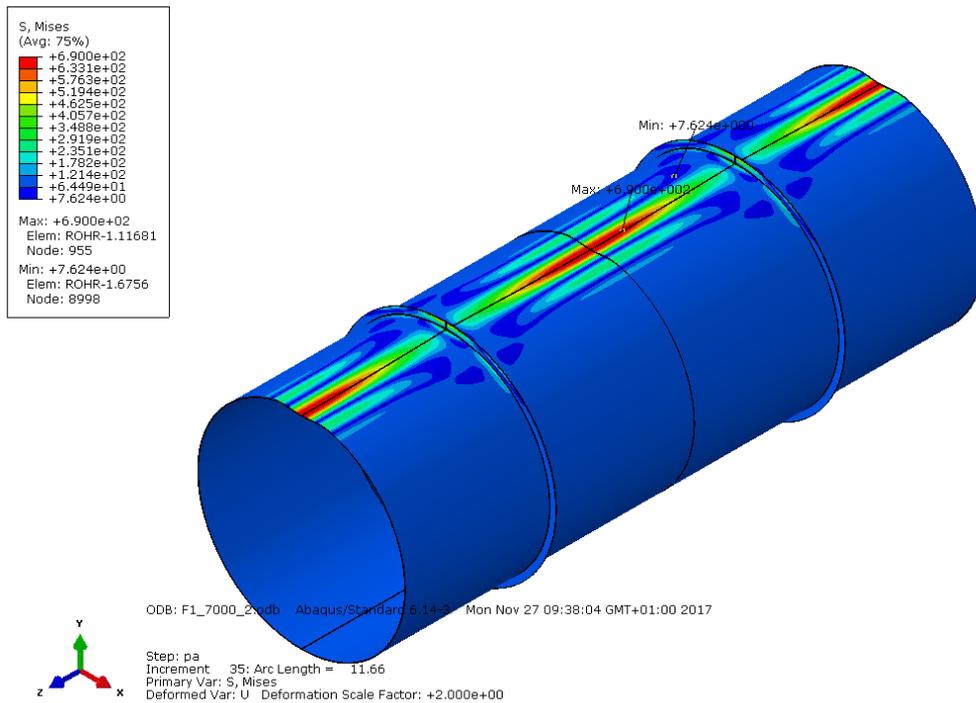


Abbildung 71: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1d mit $e = 7000$, S690

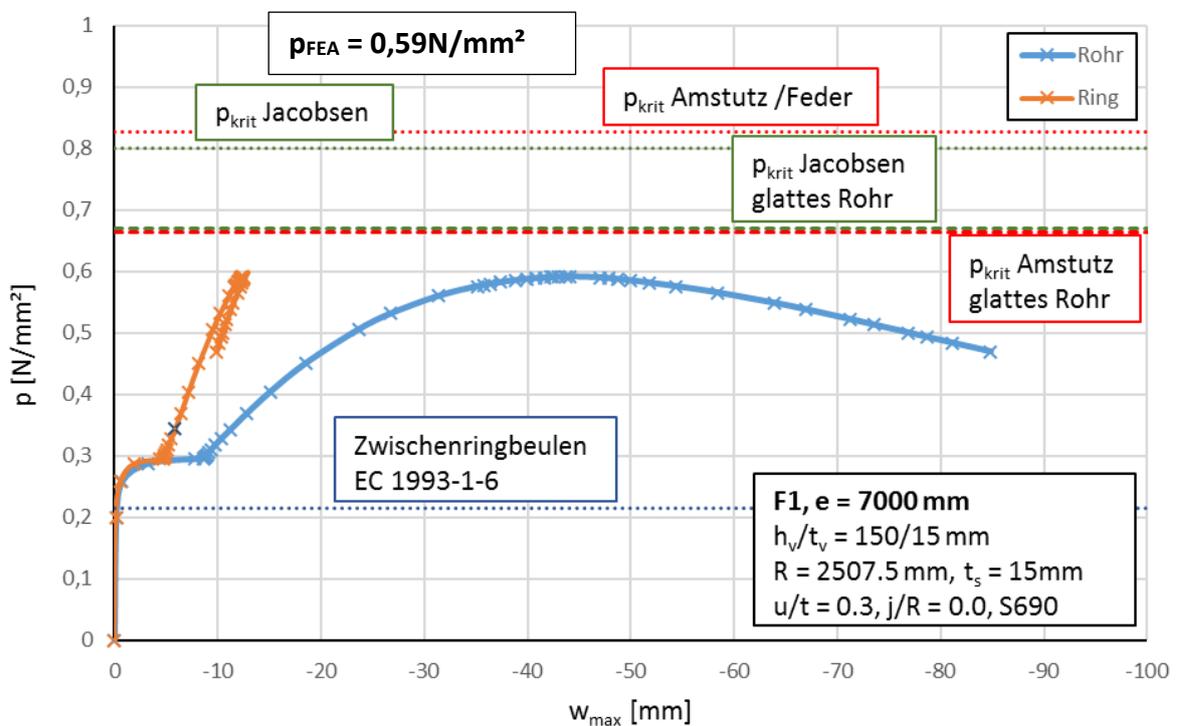


Abbildung 72: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1d, $e = 7000$, S690

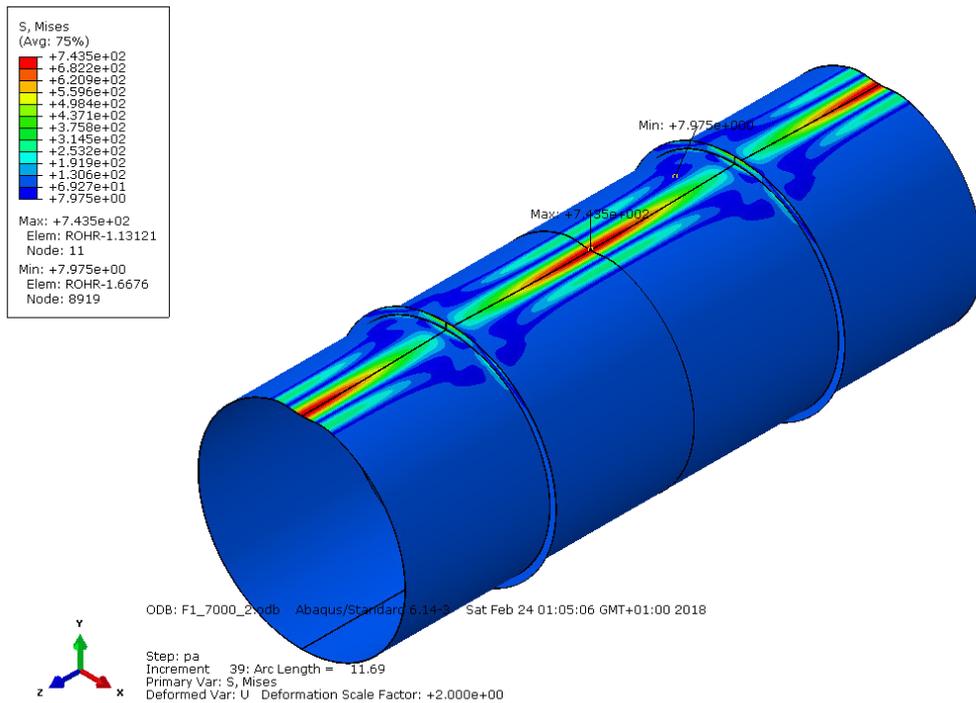


Abbildung 73: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1d mit $e = 7000$, S890

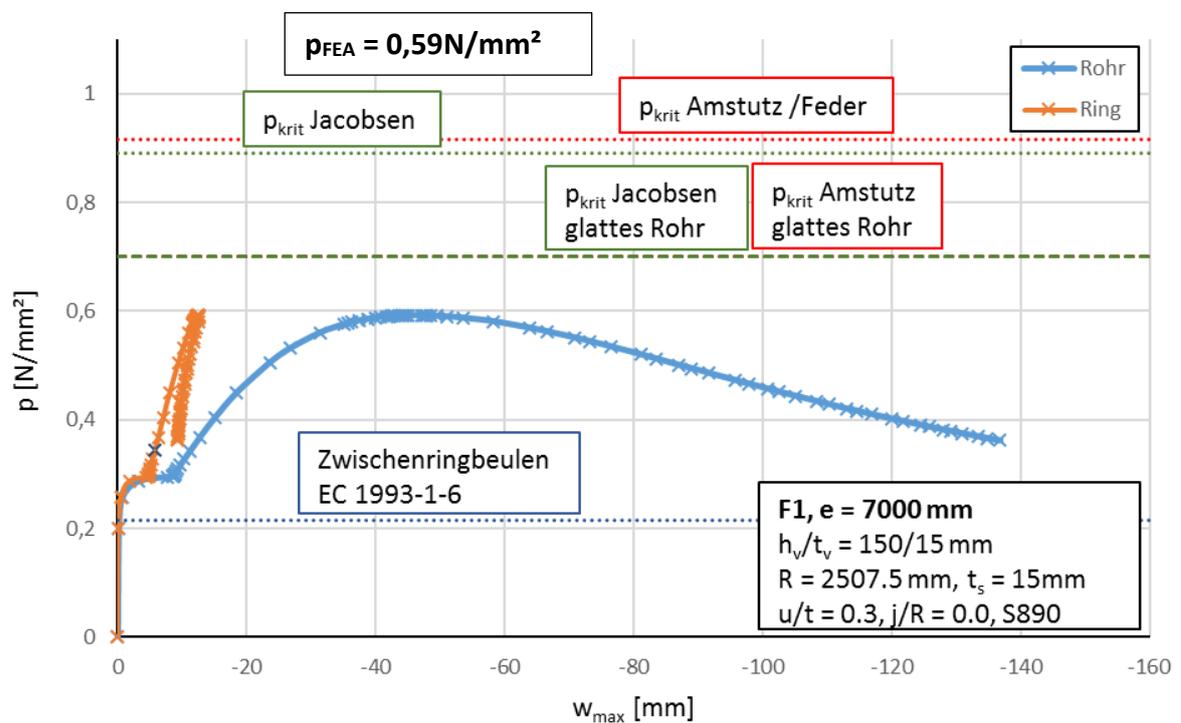


Abbildung 74: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1d, $e = 7000$, S890

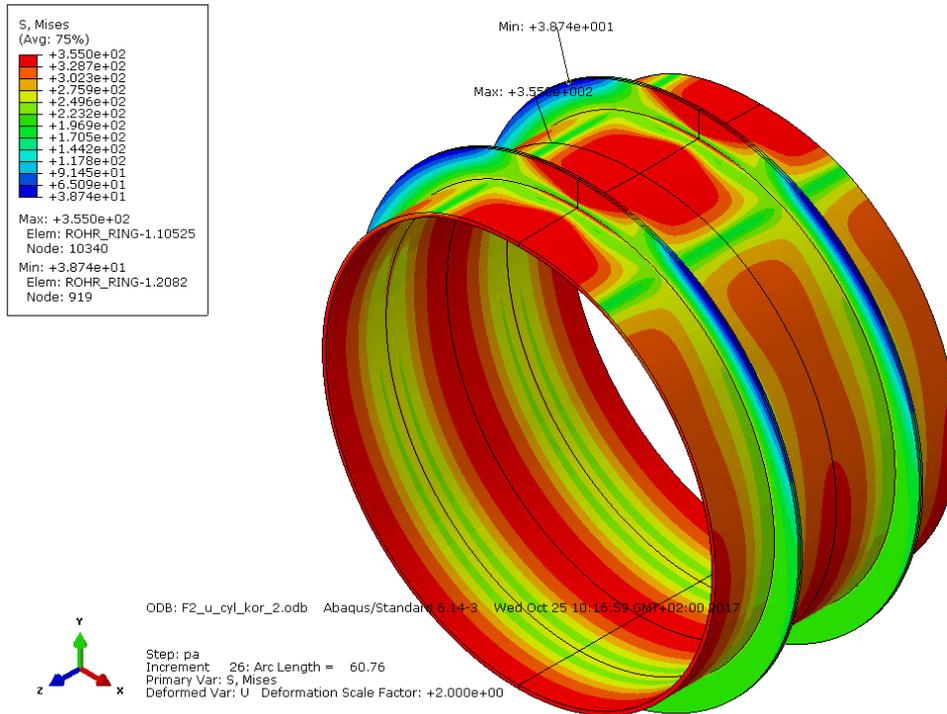


Abbildung 75: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2a mit $e = 750$, S355

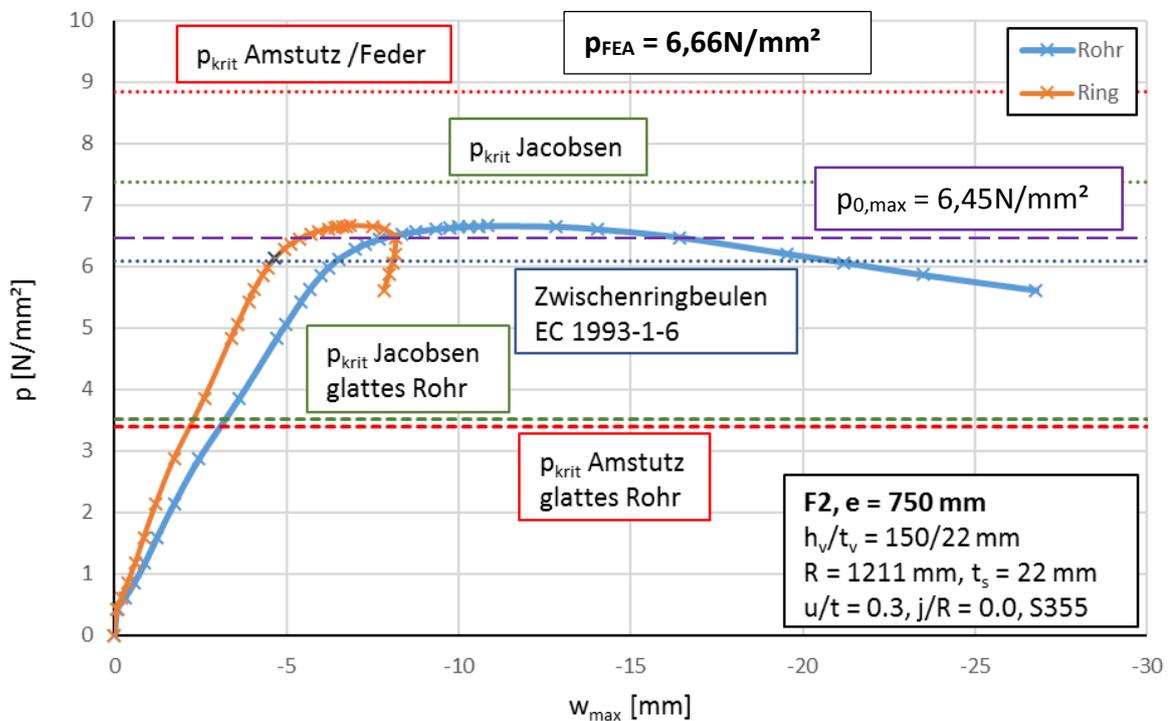


Abbildung 76: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2a, $e = 750$, S355

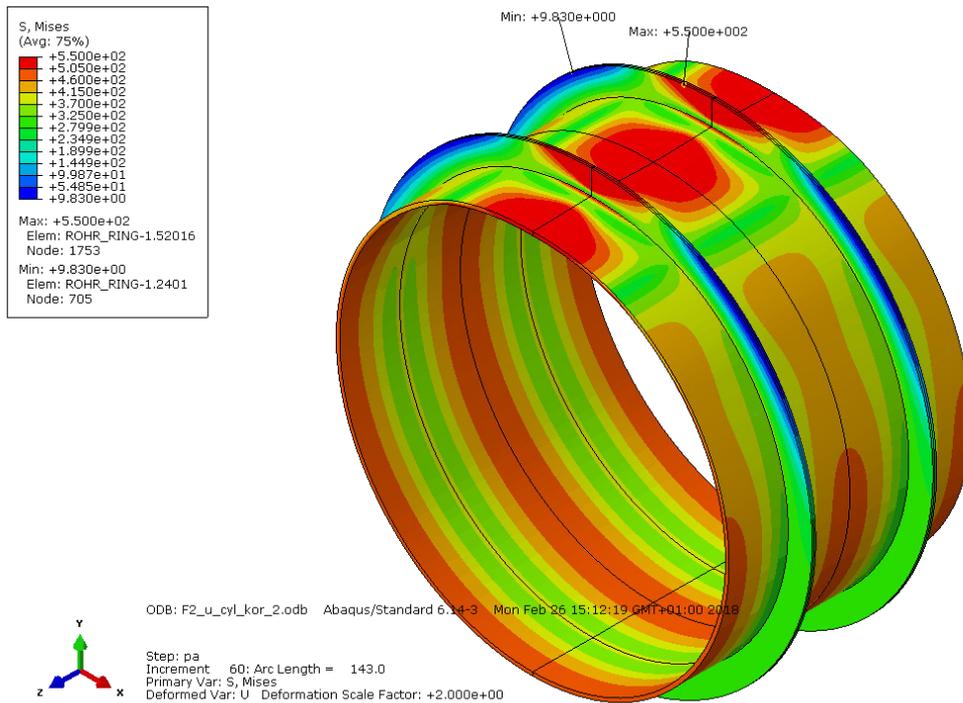


Abbildung 77: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2a mit $e = 750$, S550

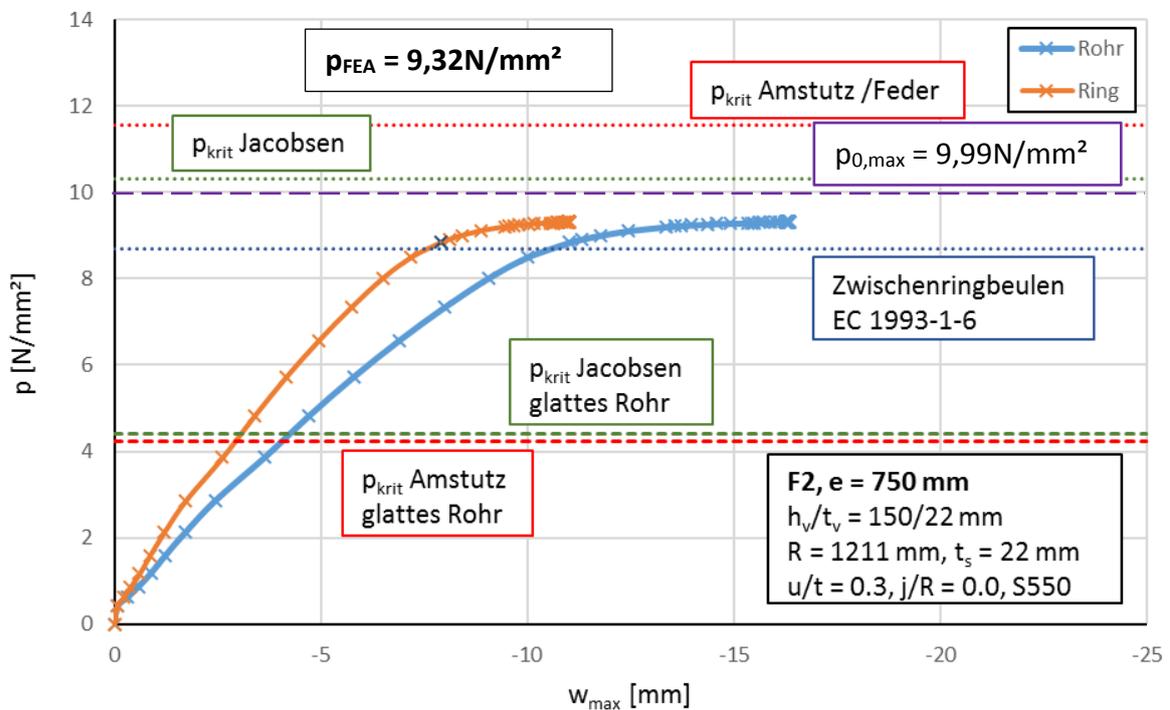


Abbildung 78: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2a, $e = 750$, S550

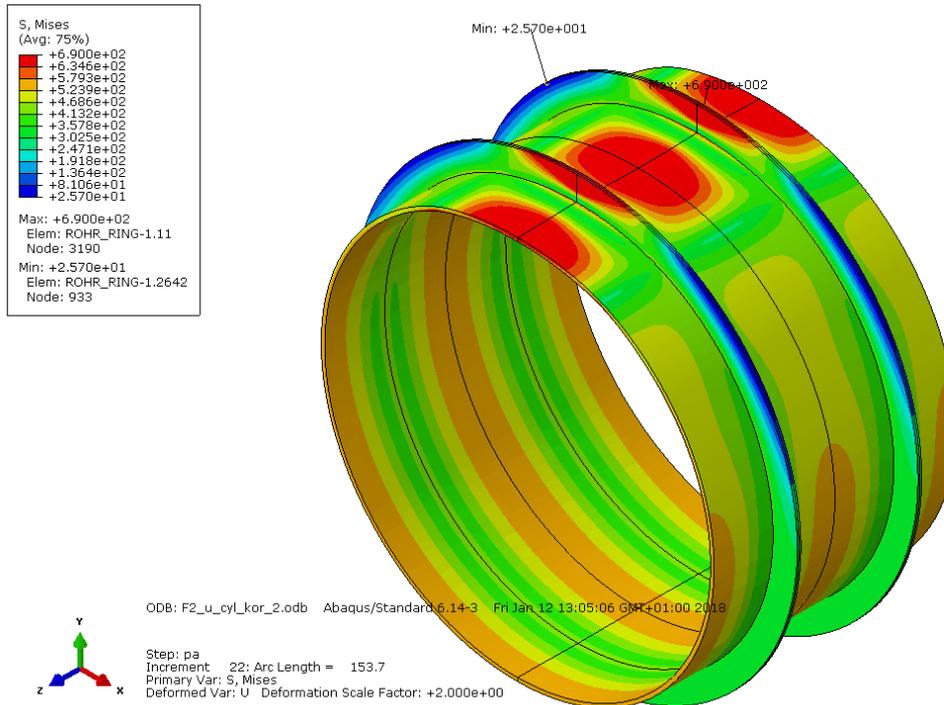


Abbildung 79: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2a mit $e = 750$, S690

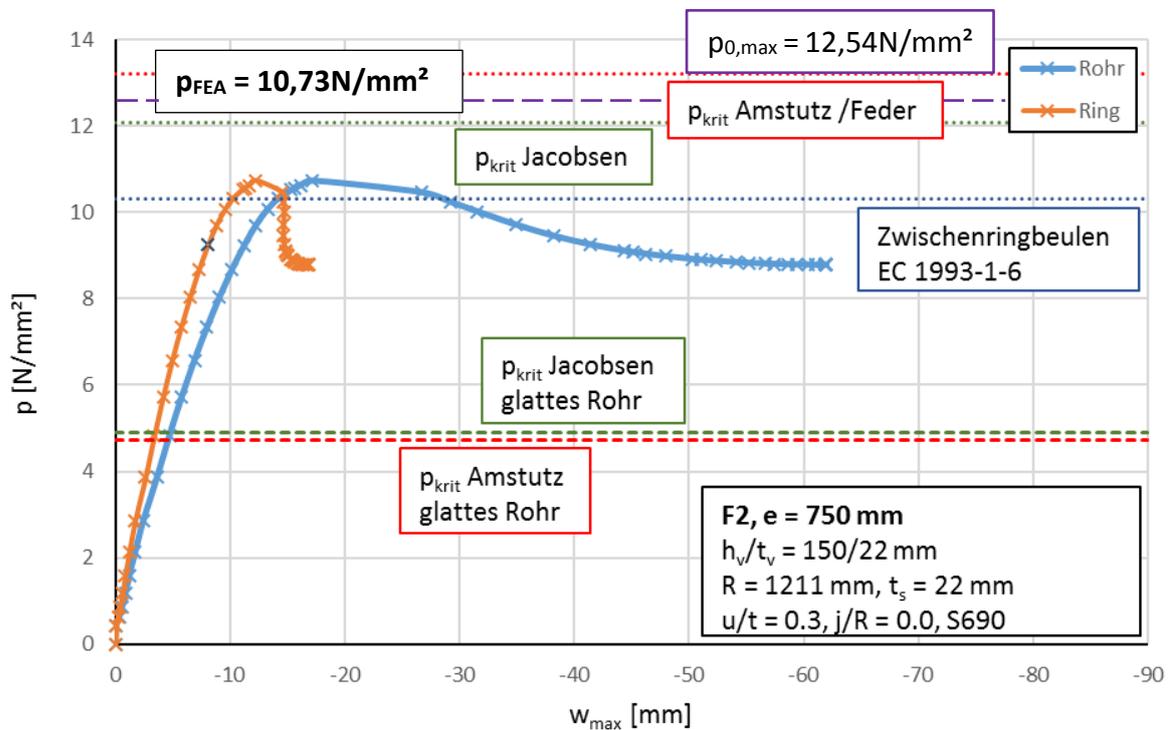


Abbildung 80: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2a, $e = 750$, S690

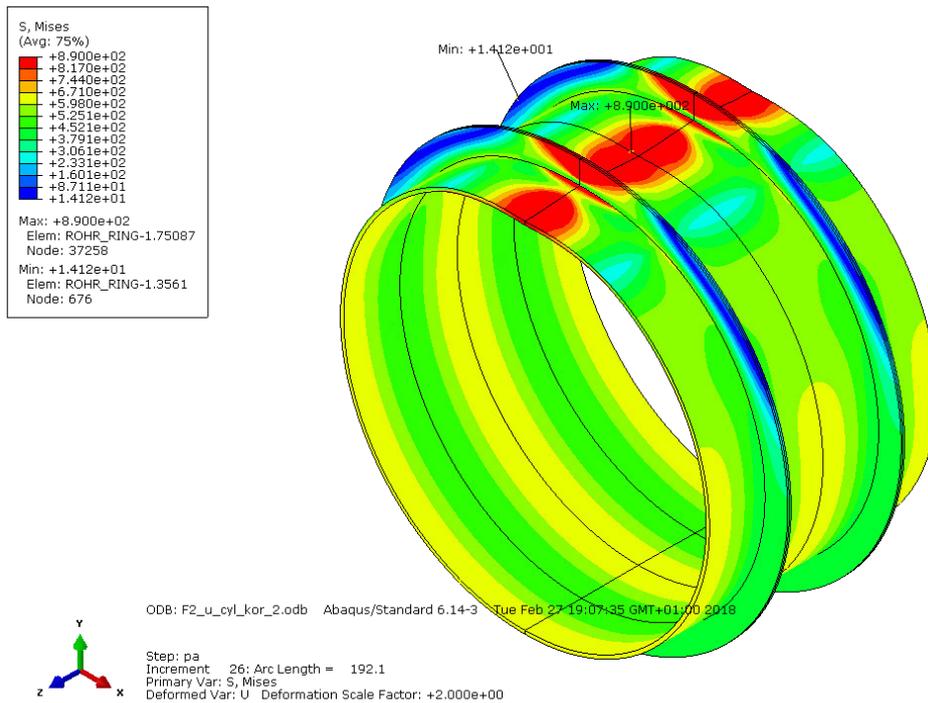


Abbildung 81: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2a mit $e = 750$, S890

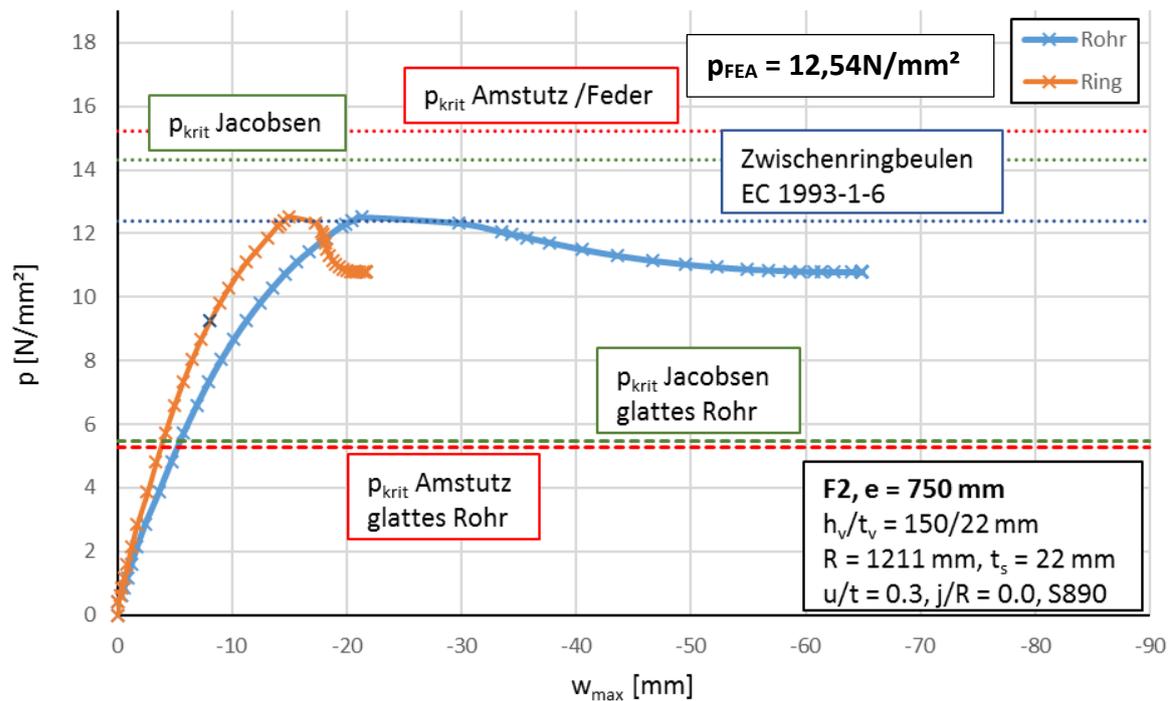


Abbildung 82: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2a, $e = 750$, S890

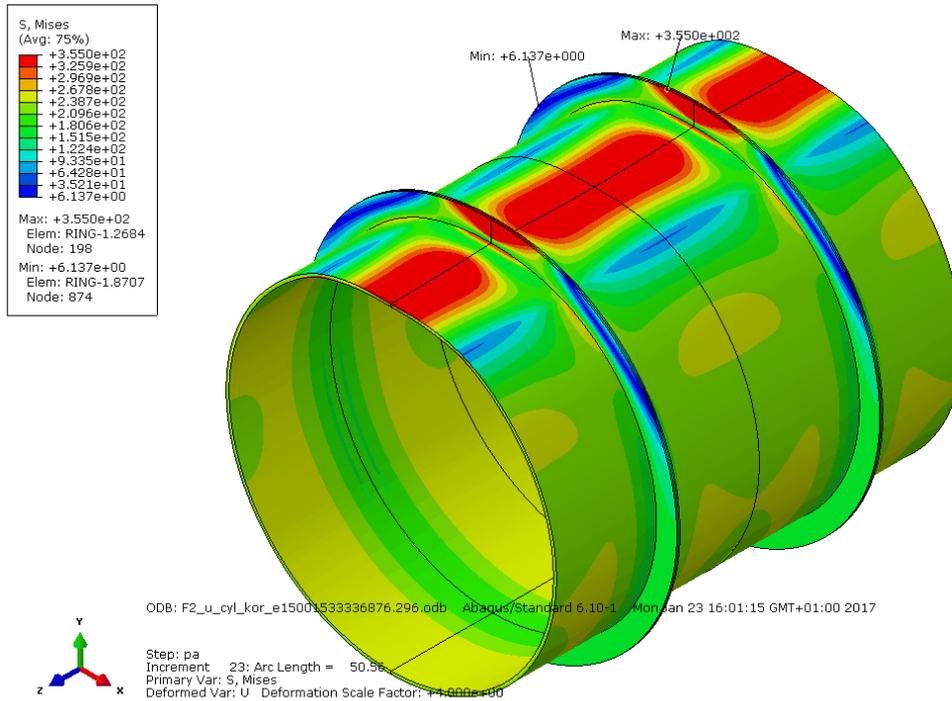


Abbildung 83: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2b mit $e = 1500$, S355

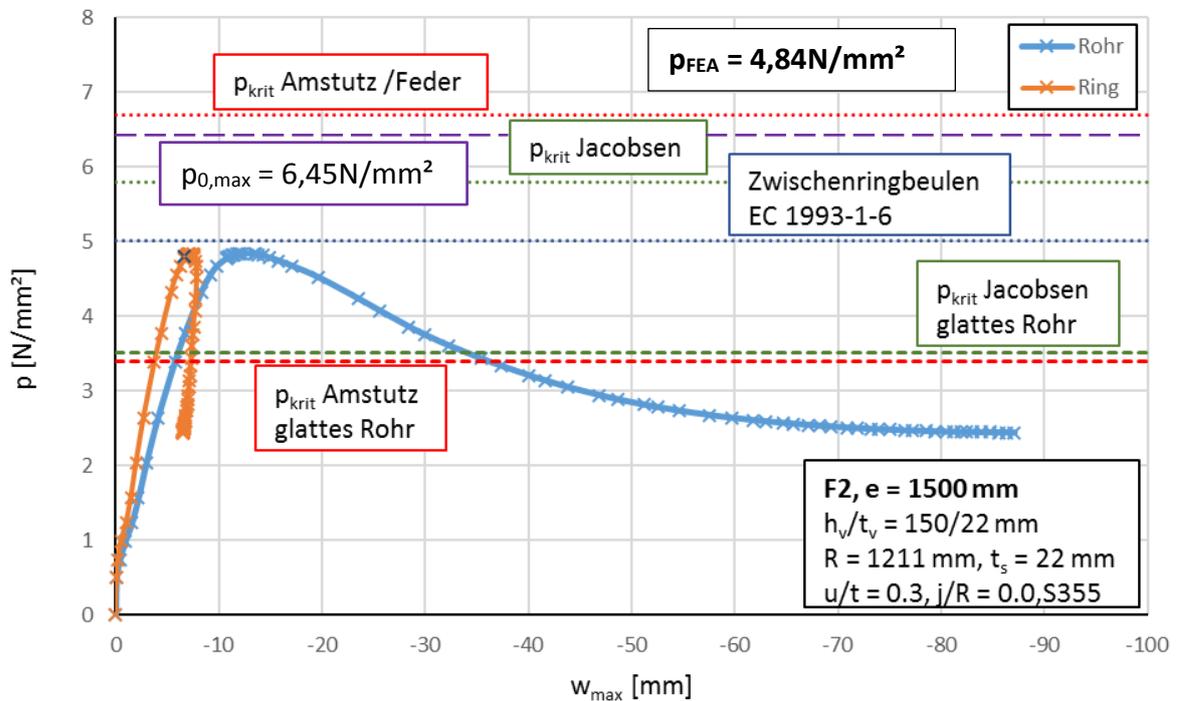


Abbildung 84: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2b, $e = 1500$, S355

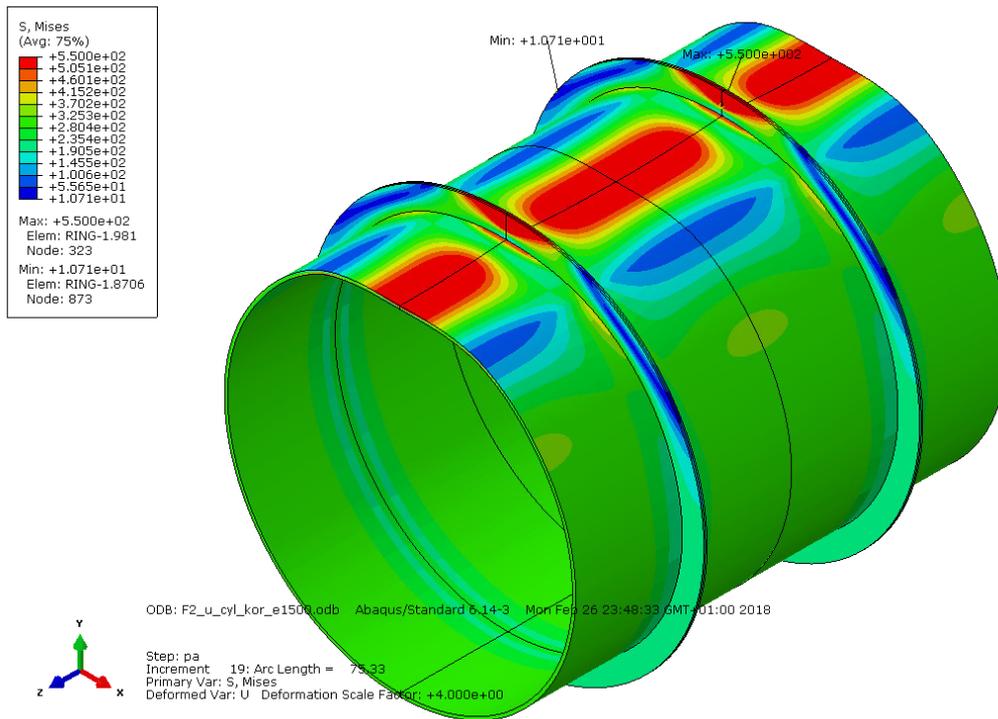


Abbildung 85: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2b mit $e = 1500$, S550

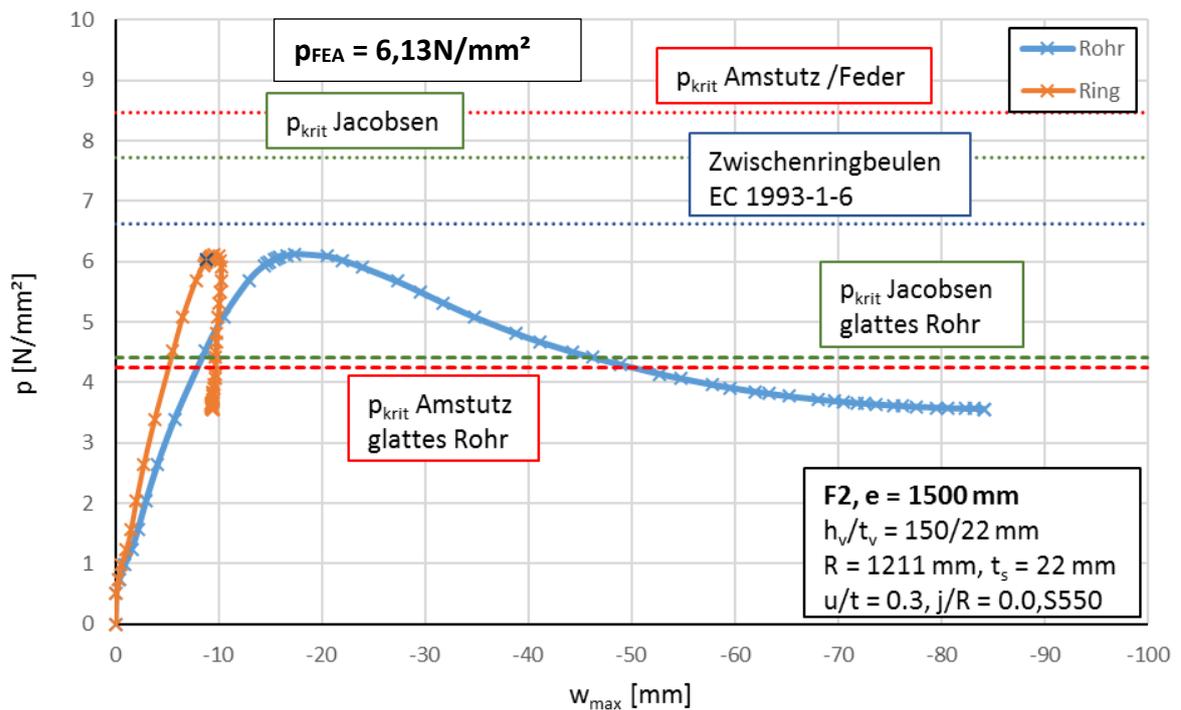


Abbildung 86: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2b, $e = 1500$, S550

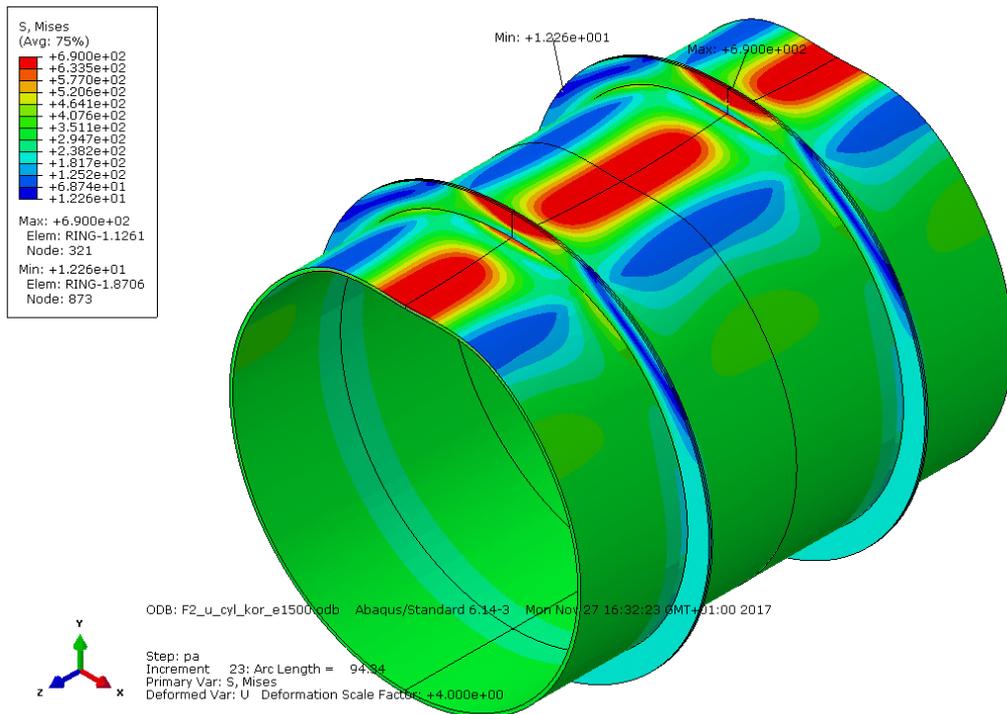


Abbildung 87: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2b mit $e = 1500$, S690

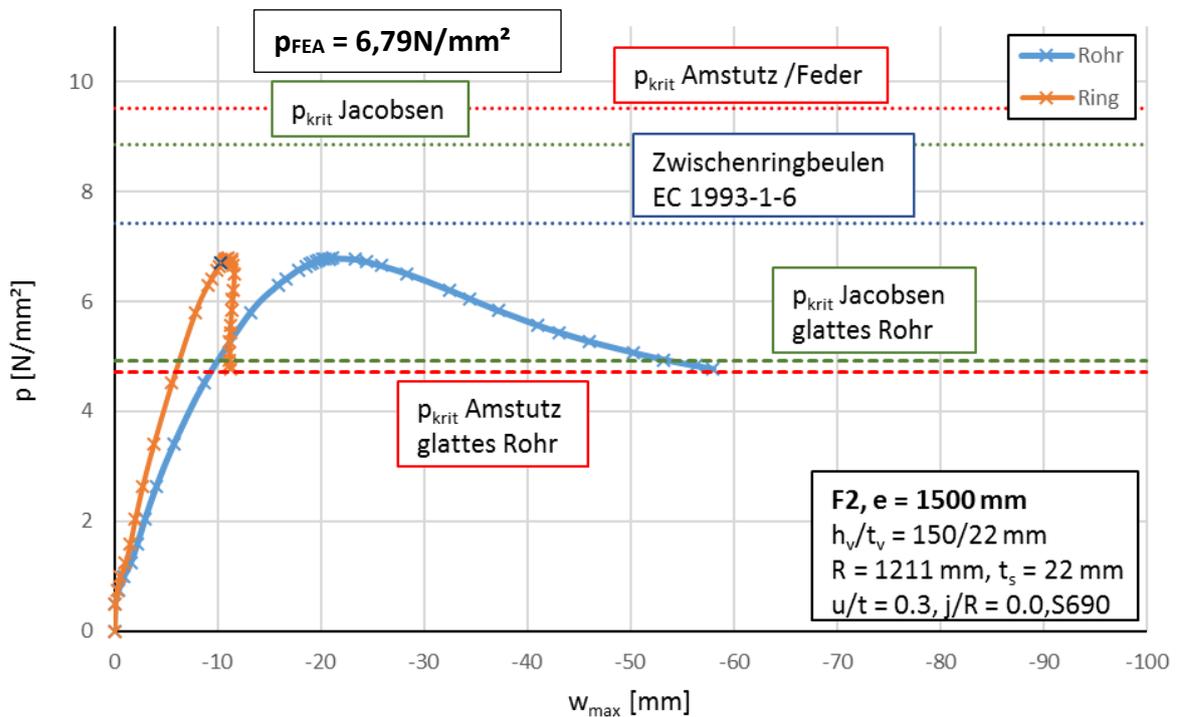


Abbildung 88: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2b, $e = 1500$, S690

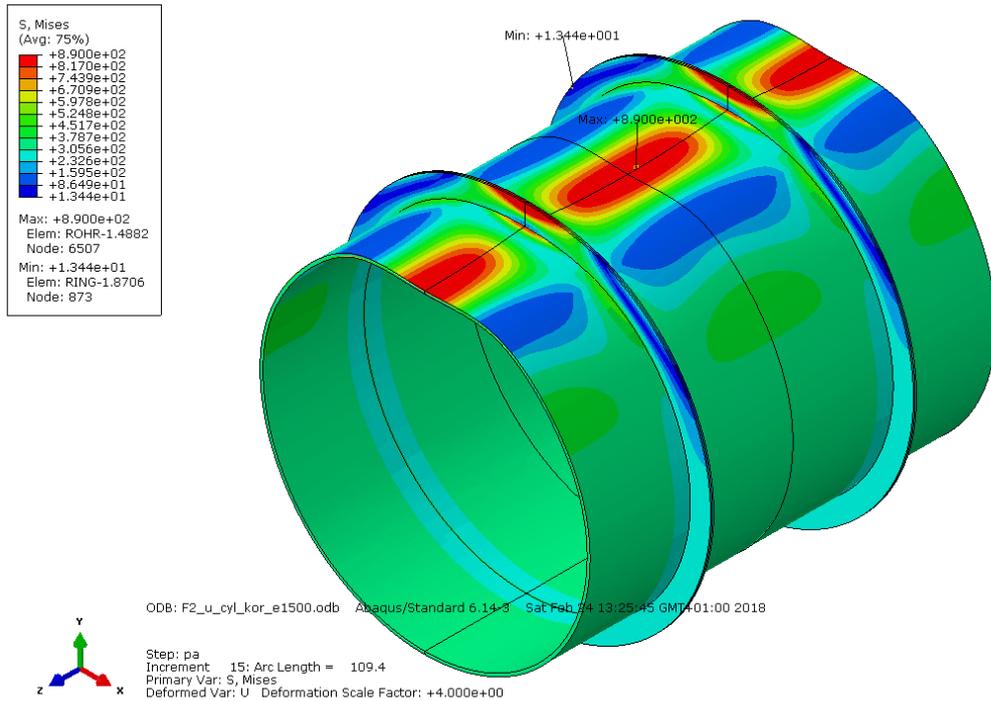


Abbildung 89: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2b mit $e = 1500$, S890

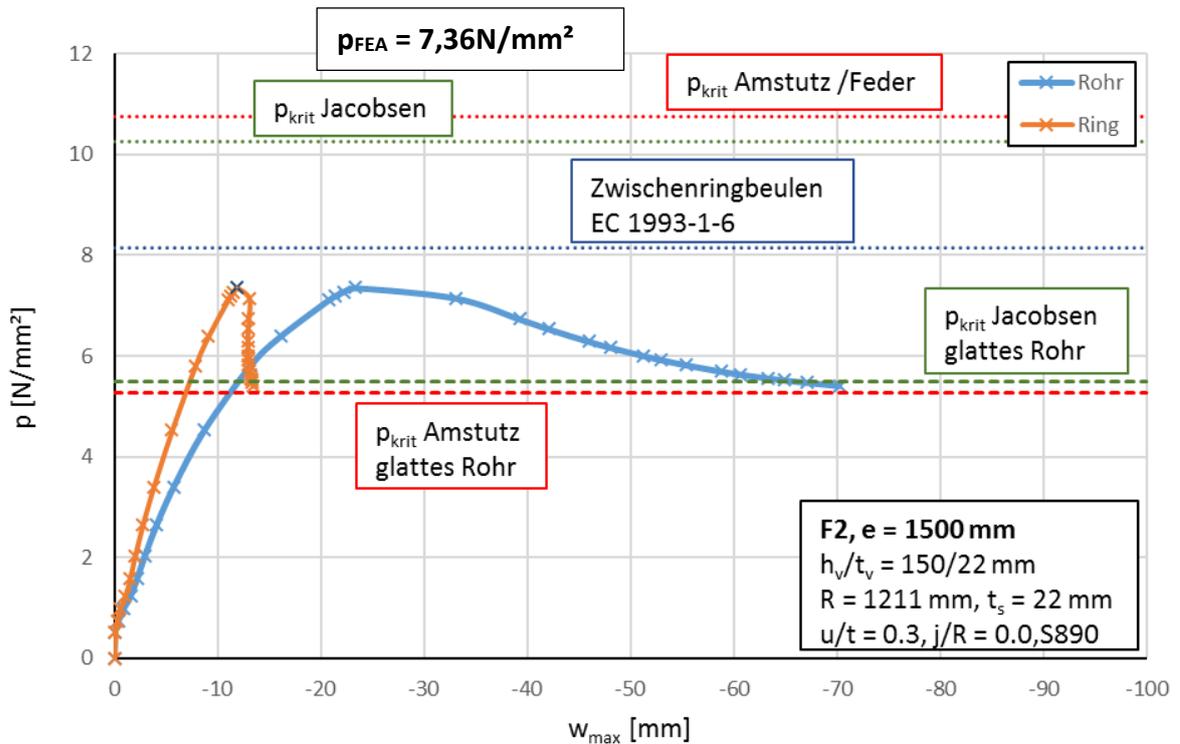


Abbildung 90: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2b, $e = 1500$, S890

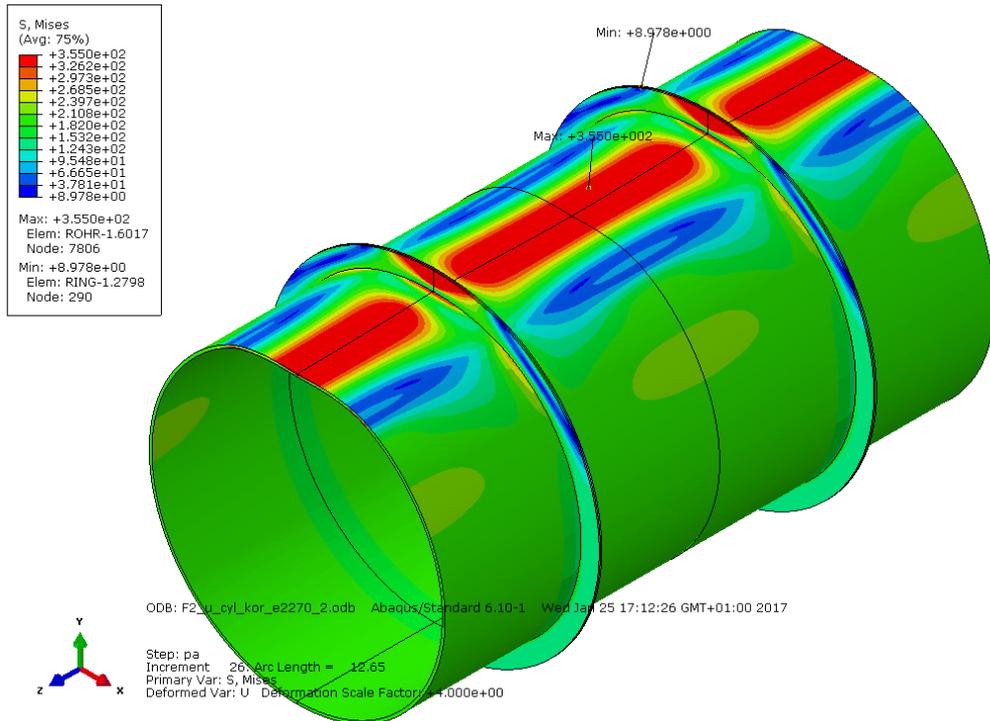


Abbildung 91: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2c mit $e = 2270$, S355

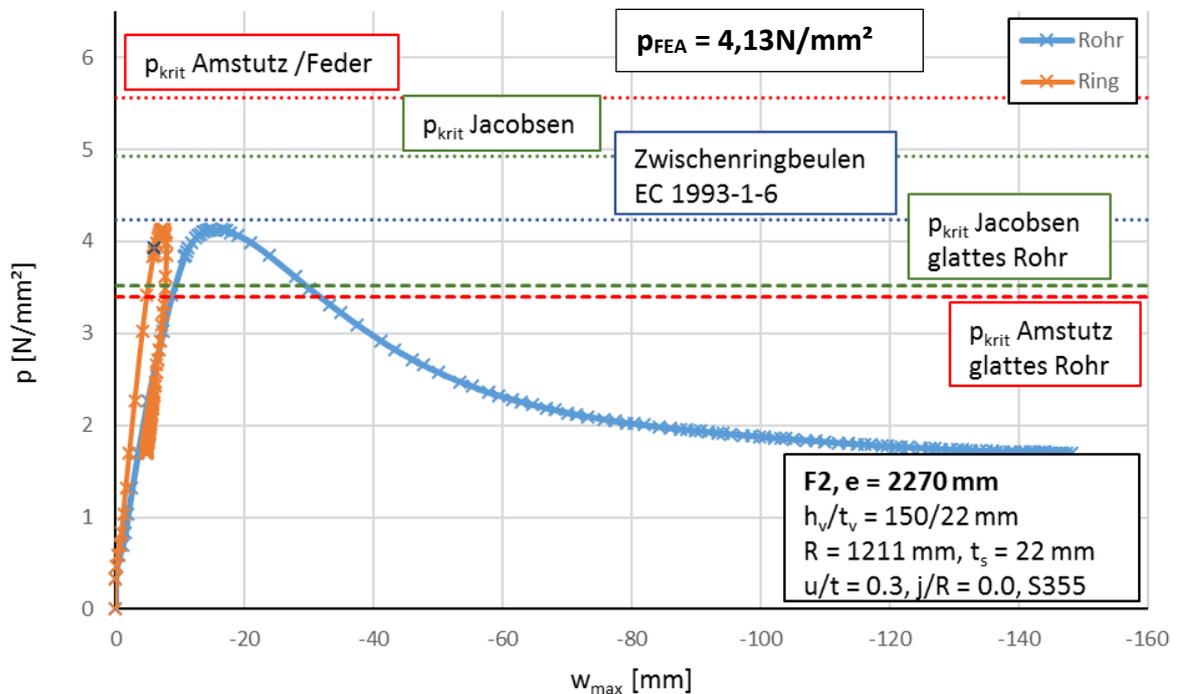


Abbildung 92: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2c, $e = 2270$, S355

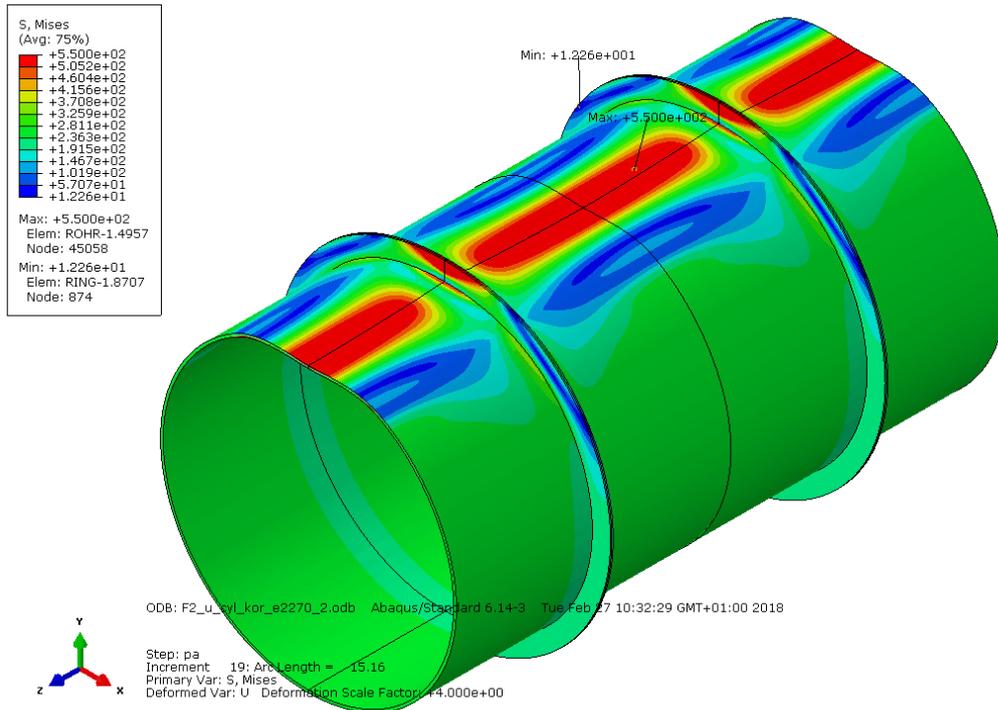


Abbildung 93: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2c mit $e = 2270$, S550

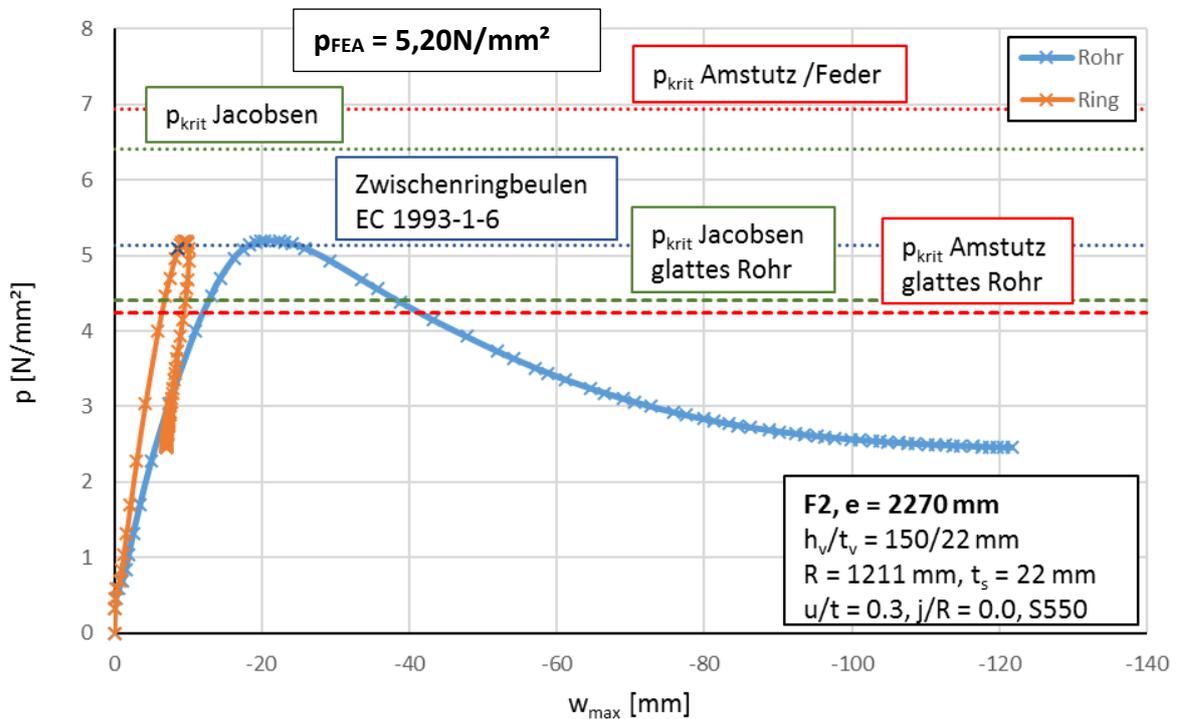


Abbildung 94: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2c, $e = 2270$, S550

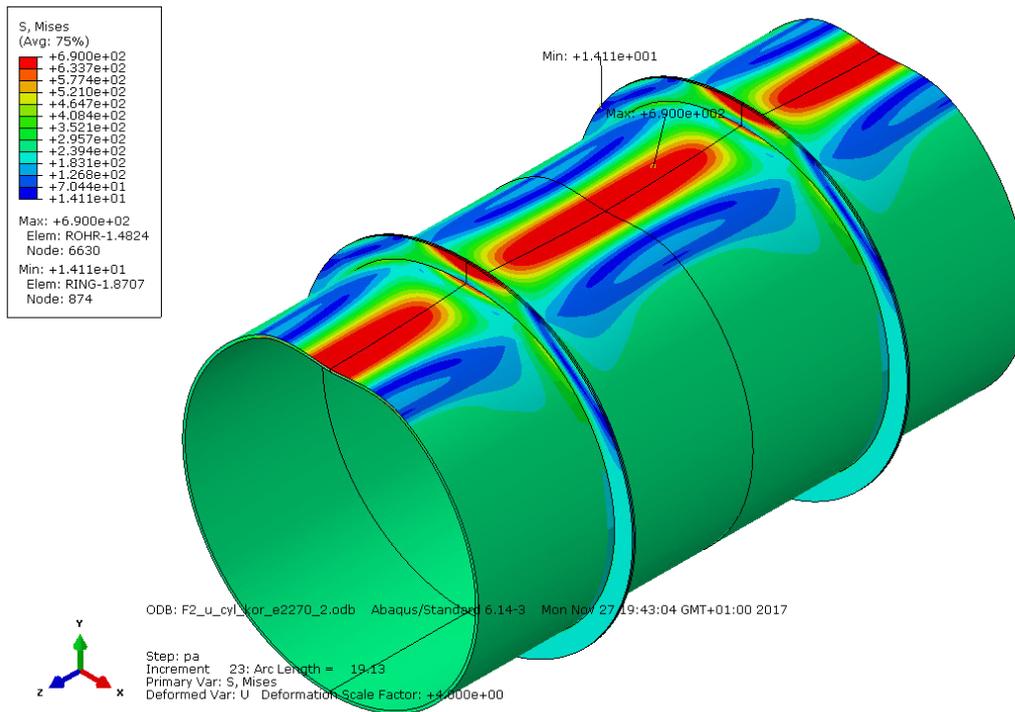


Abbildung 95: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2c mit $e = 2270$, S690

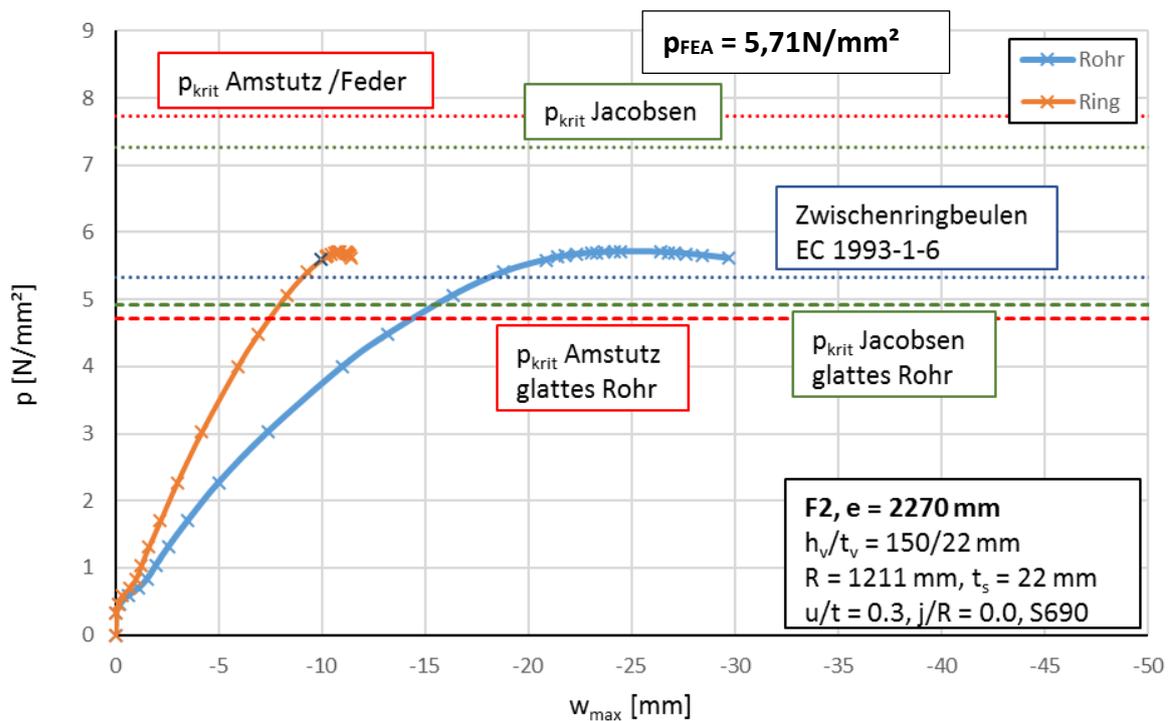


Abbildung 96: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2c, $e = 2270$, S690

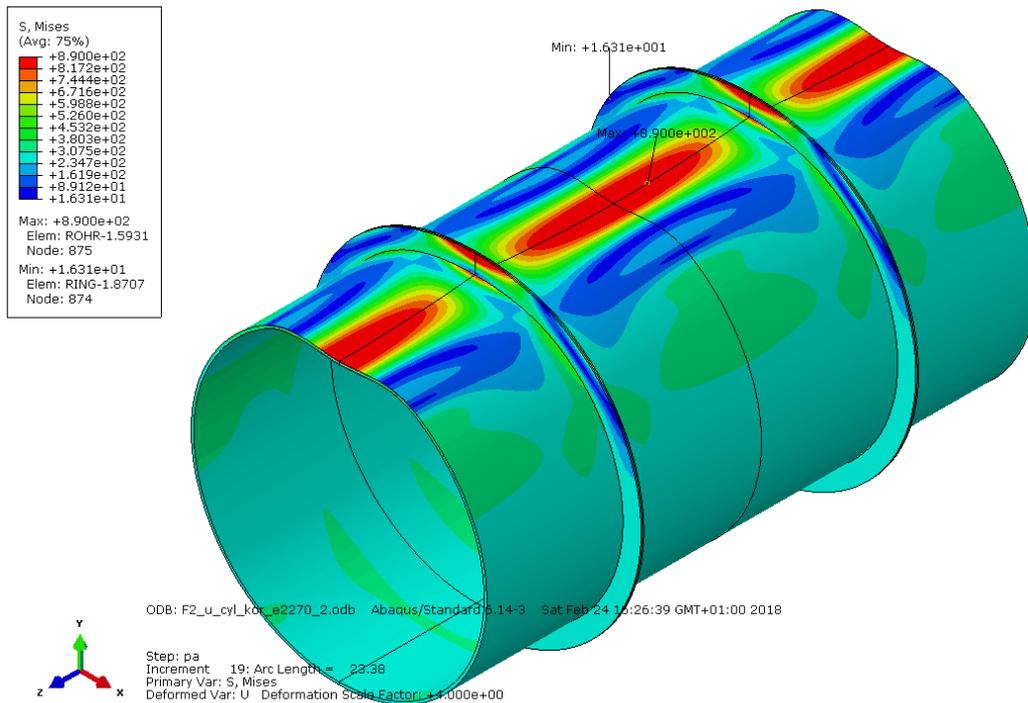


Abbildung 97: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2c mit $e = 2270$, S890

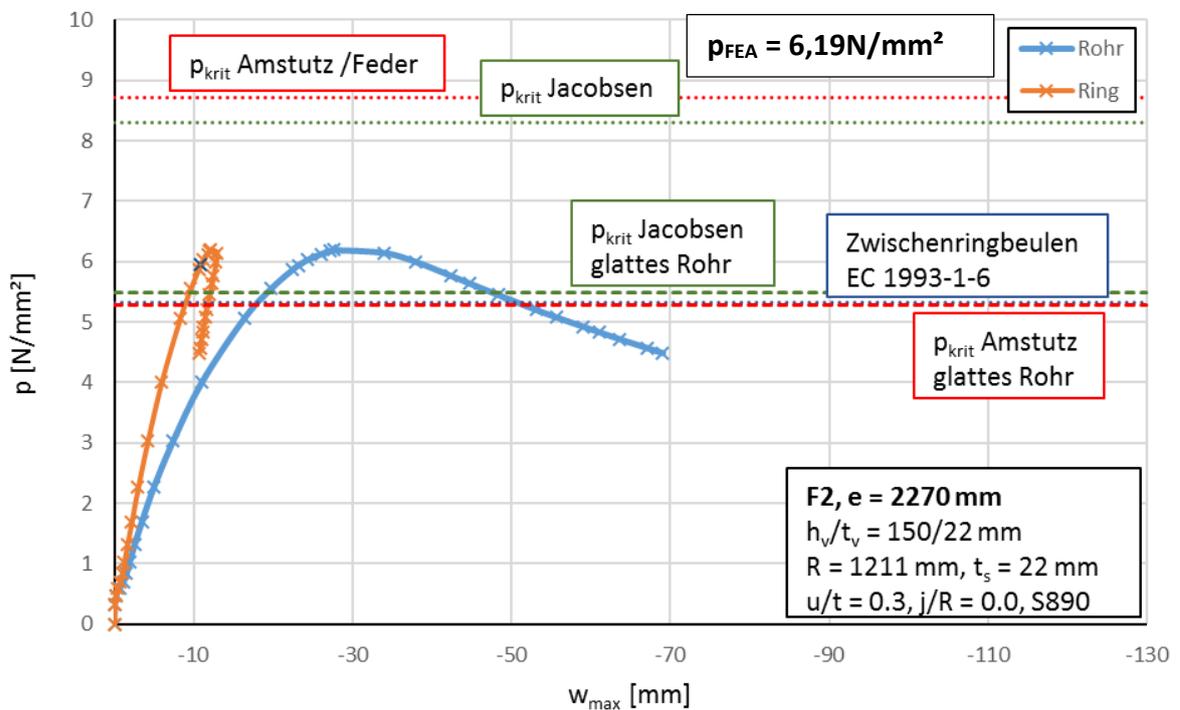


Abbildung 98: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2c, $e = 2270$, S890

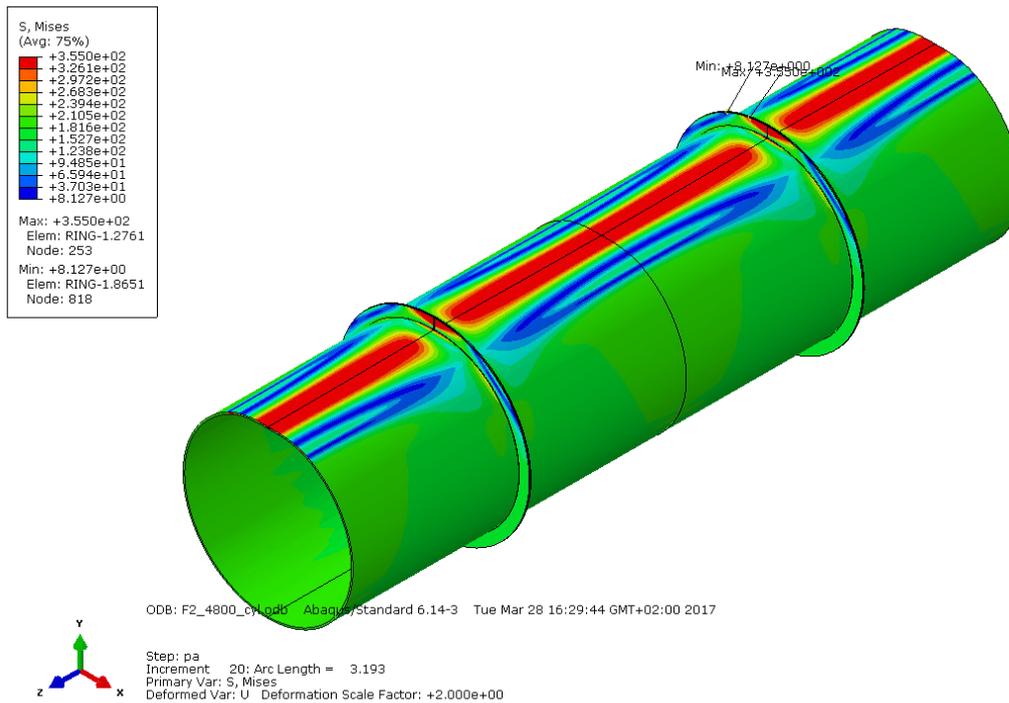


Abbildung 99: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2d mit $e = 4800$, S355

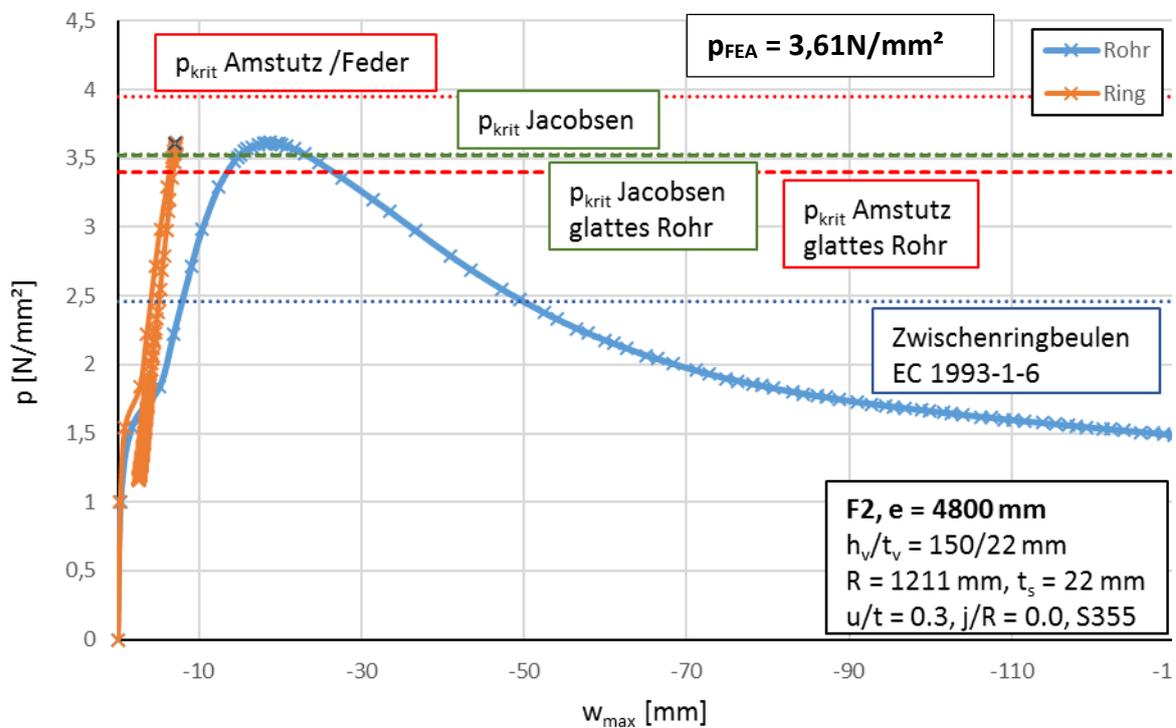


Abbildung 100: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2d, $e = 4800$, S355

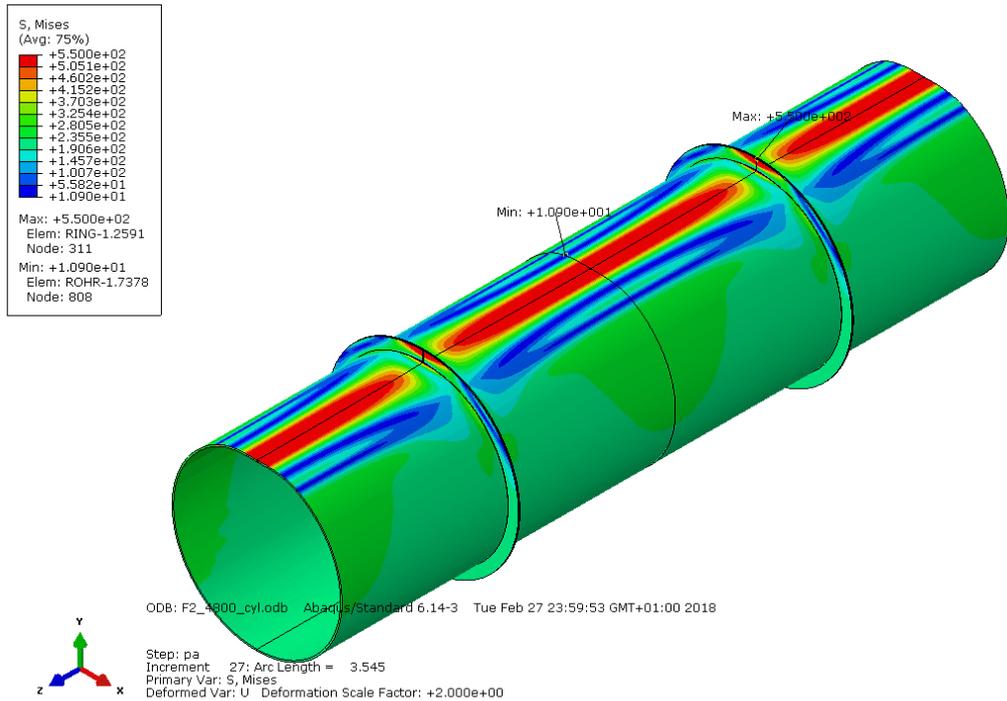


Abbildung 101: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2d mit $e = 4800$, S550

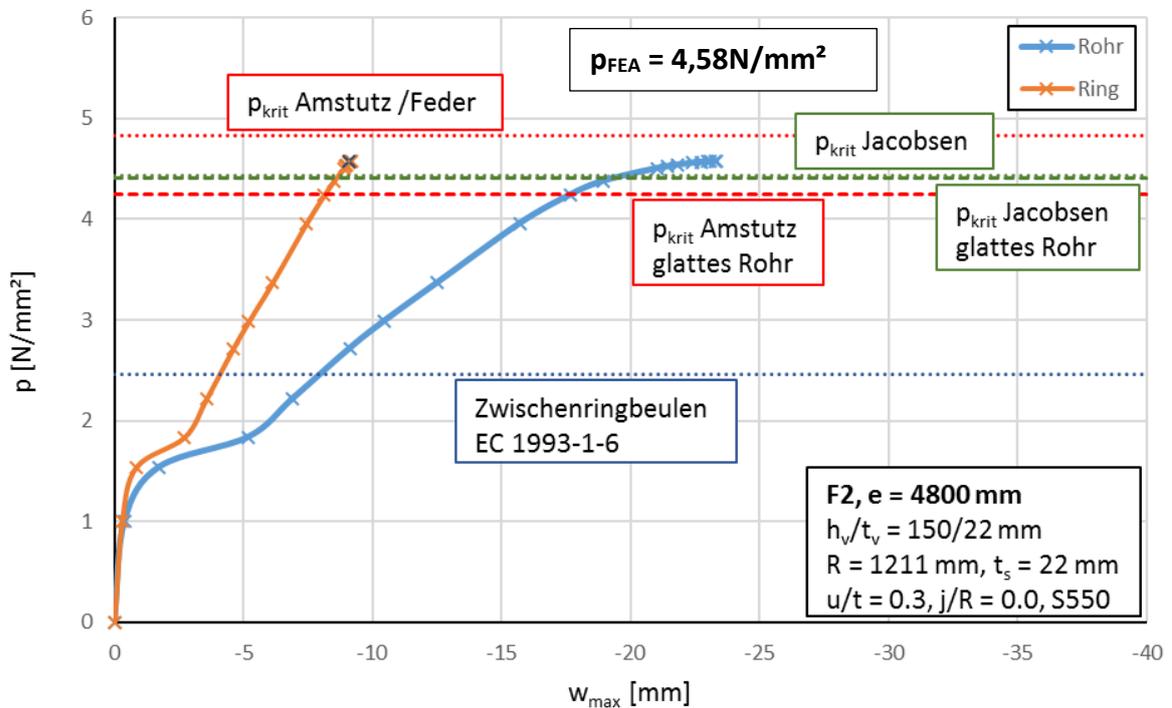


Abbildung 102: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2d, $e = 4800$, S550

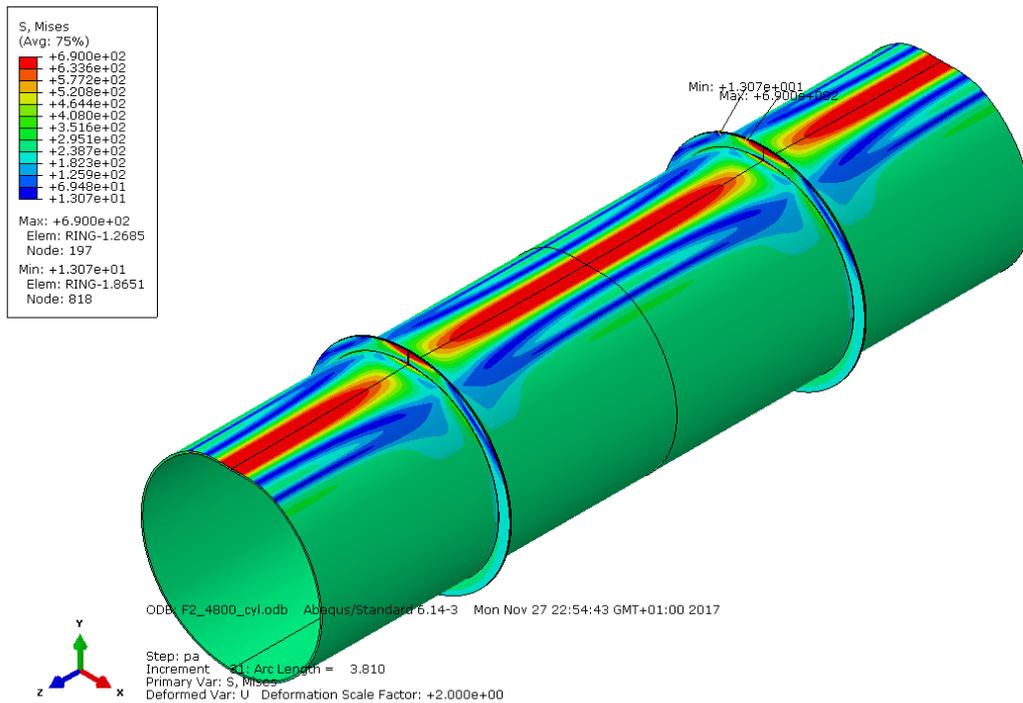


Abbildung 103: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2d mit $e = 4800$, S690

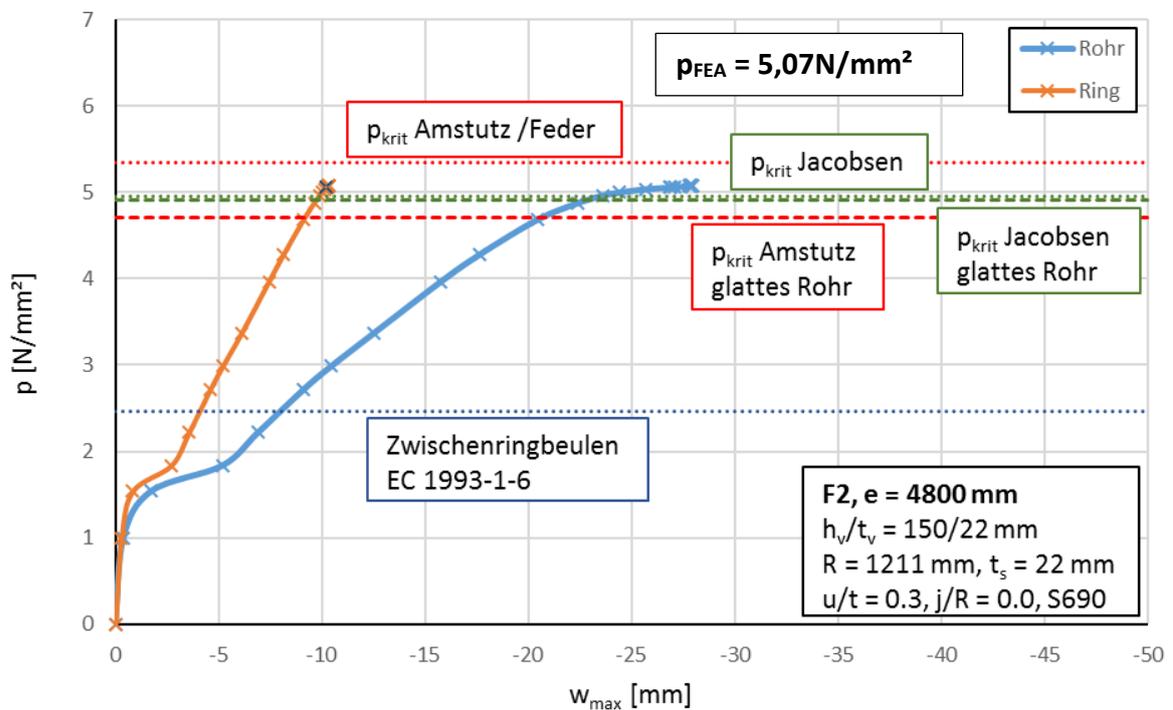


Abbildung 104: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2d, $e = 4800$, S690

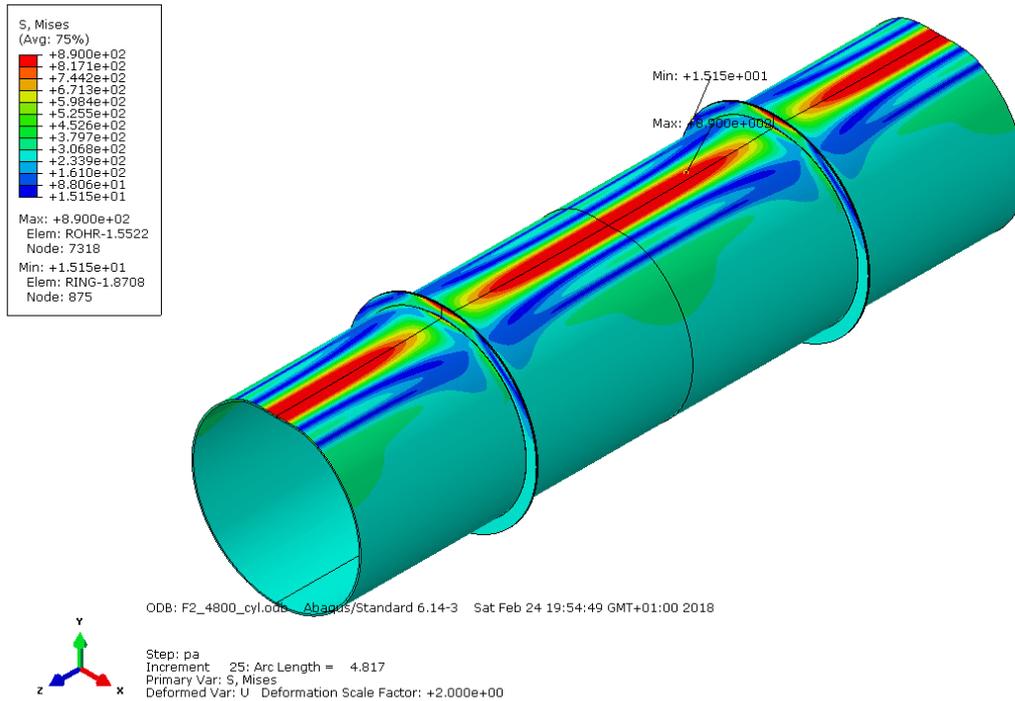


Abbildung 105: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2d mit $e = 4800$, S890

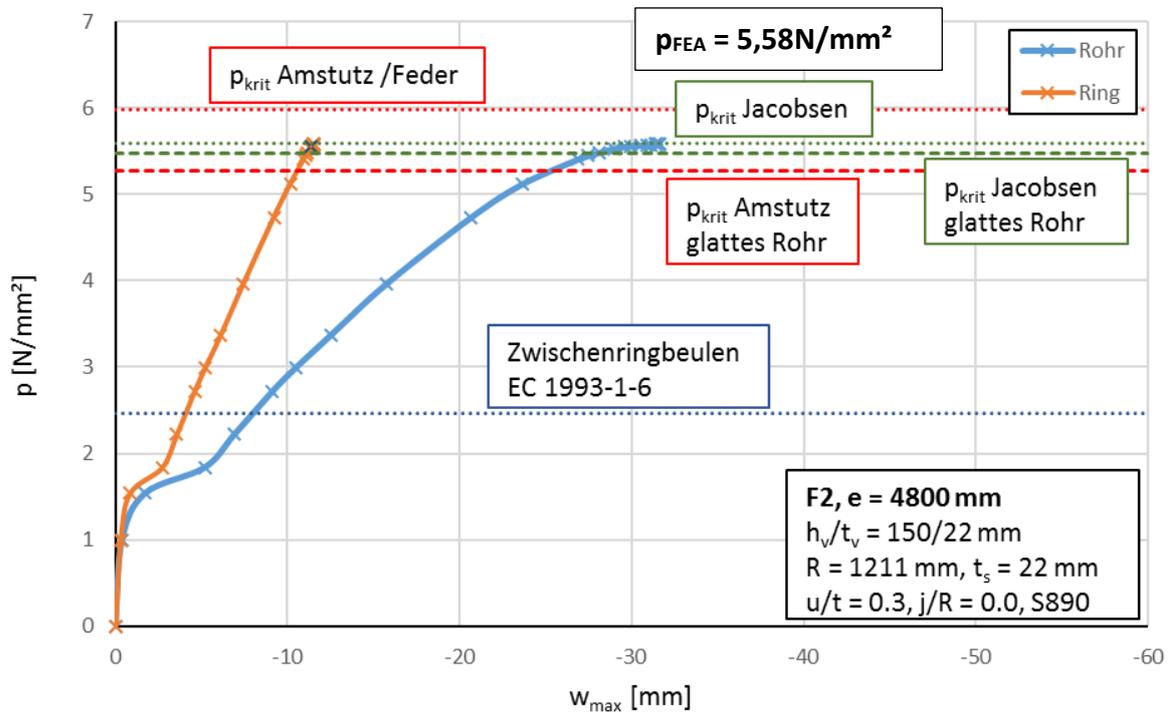


Abbildung 106: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2d, $e = 4800$, S890

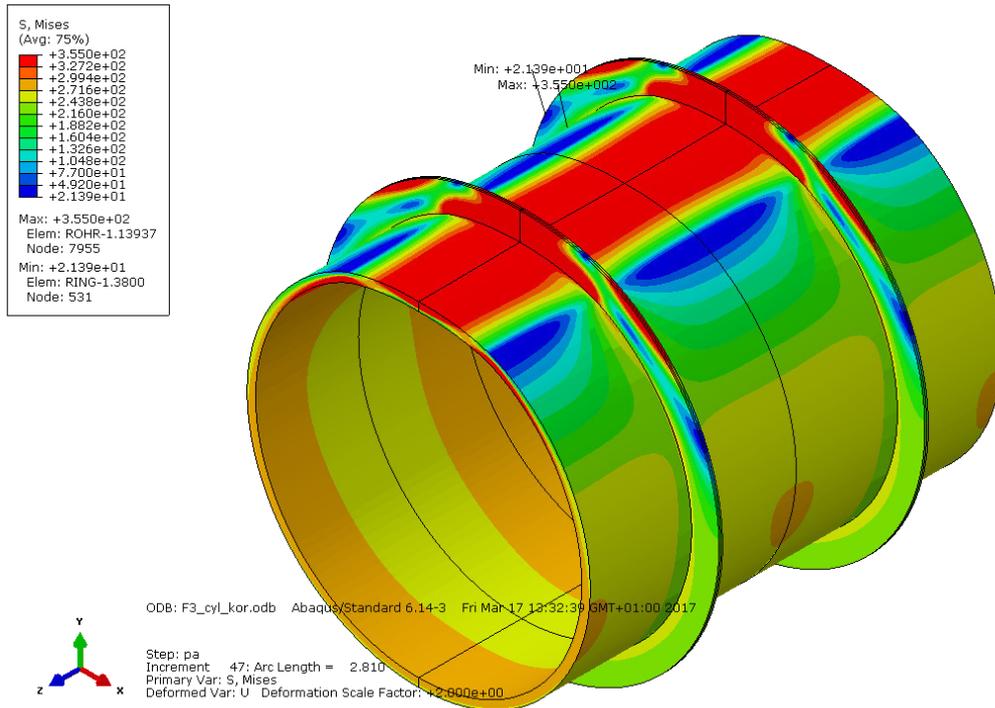


Abbildung 107: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3a mit $e = 1500$, S355

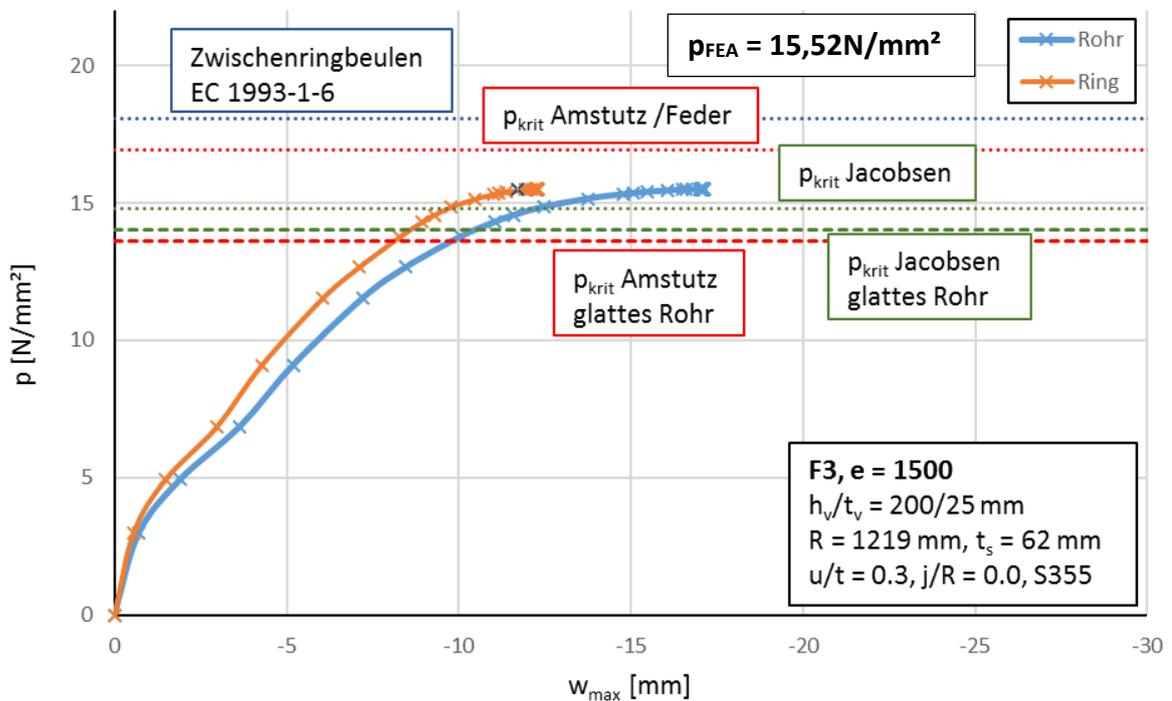


Abbildung 108: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3a, $e = 1500$, S355

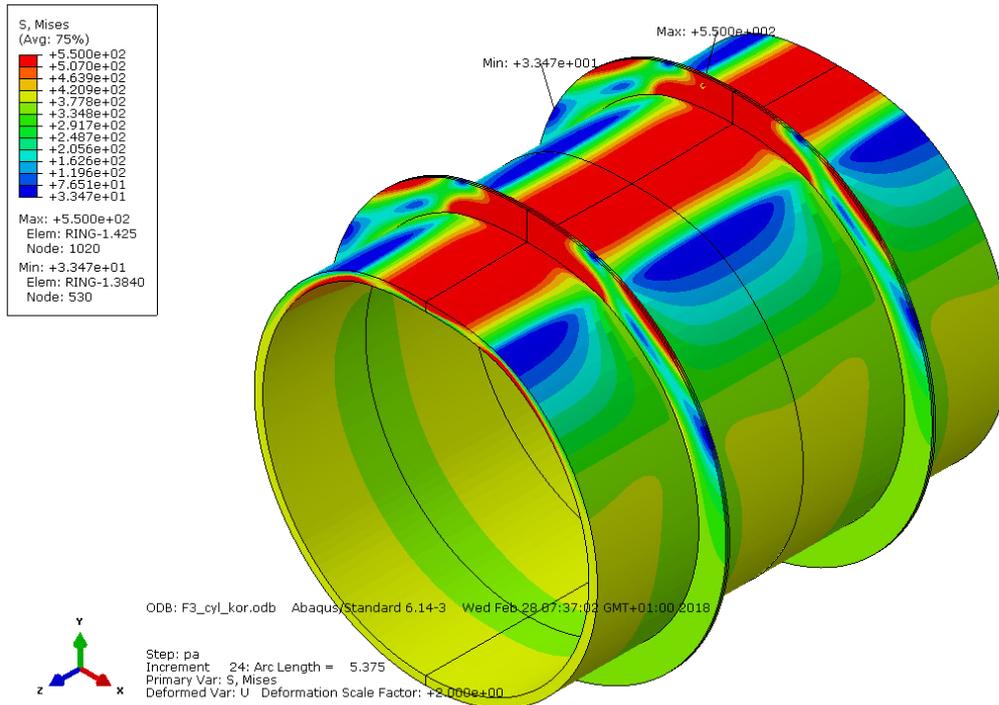


Abbildung 109: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3a mit $e = 1500$, S550

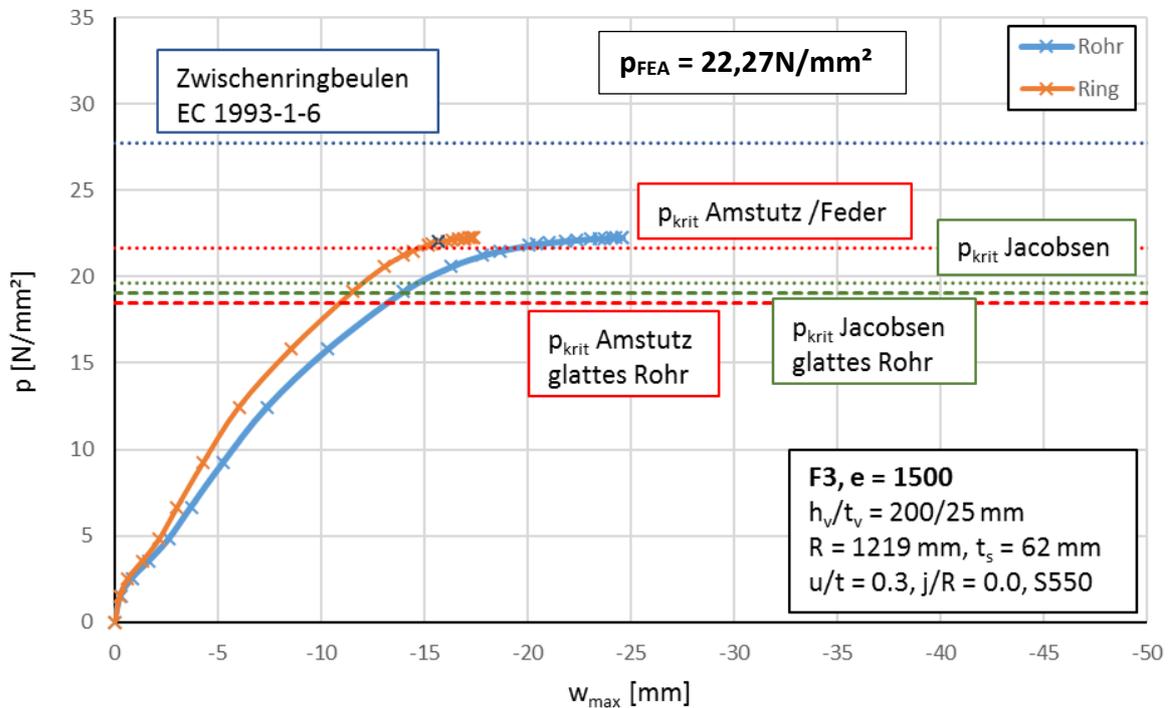


Abbildung 110: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3a, $e = 1500$, S550

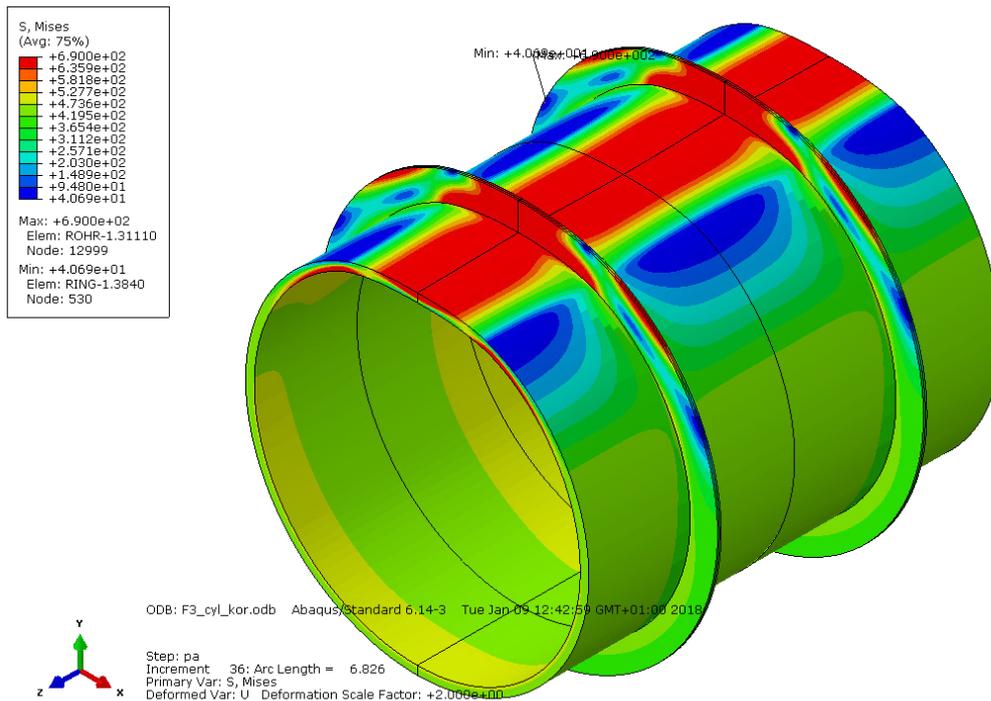


Abbildung 111: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3a mit $e = 1500$, S690

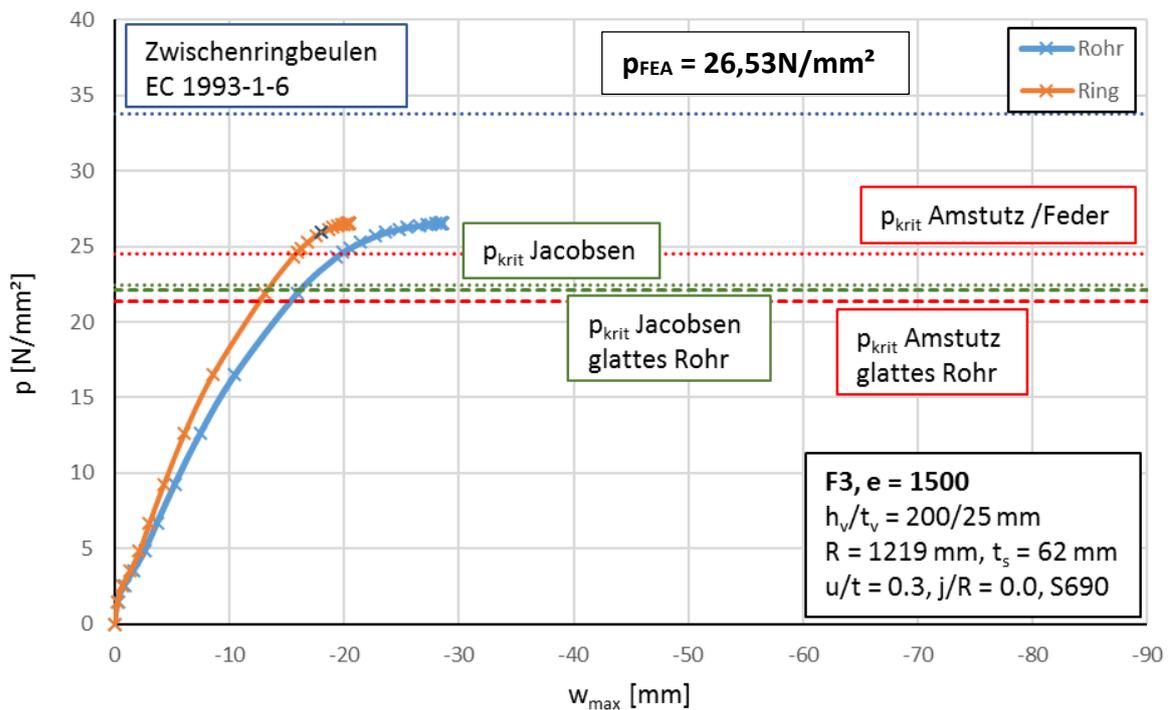


Abbildung 112: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3a, $e = 1500$, S690

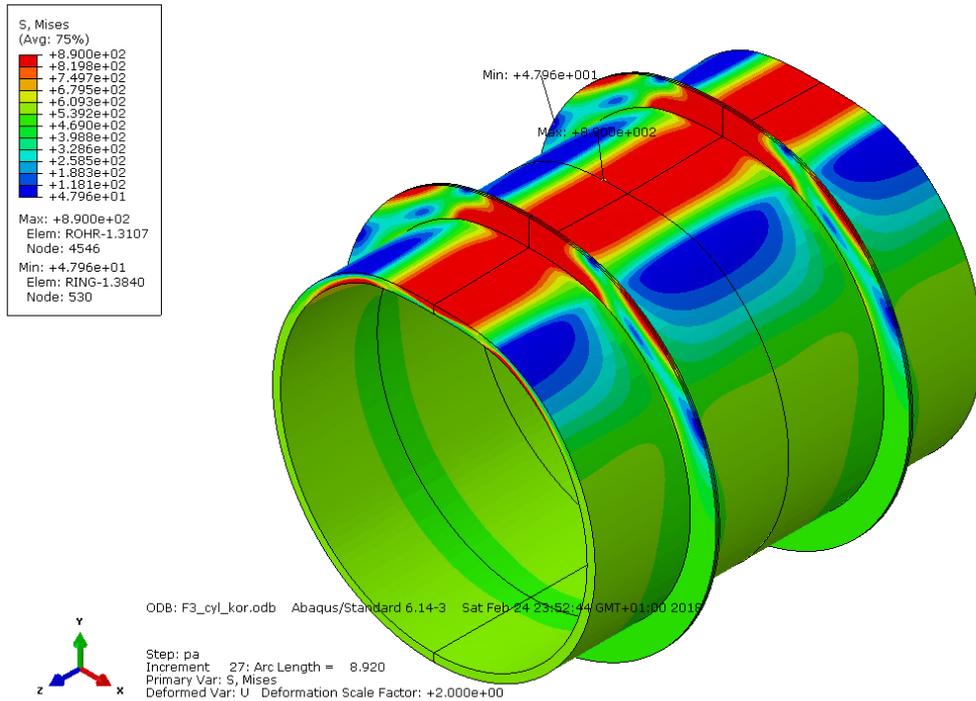


Abbildung 113: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3a mit $e = 1500$, S890

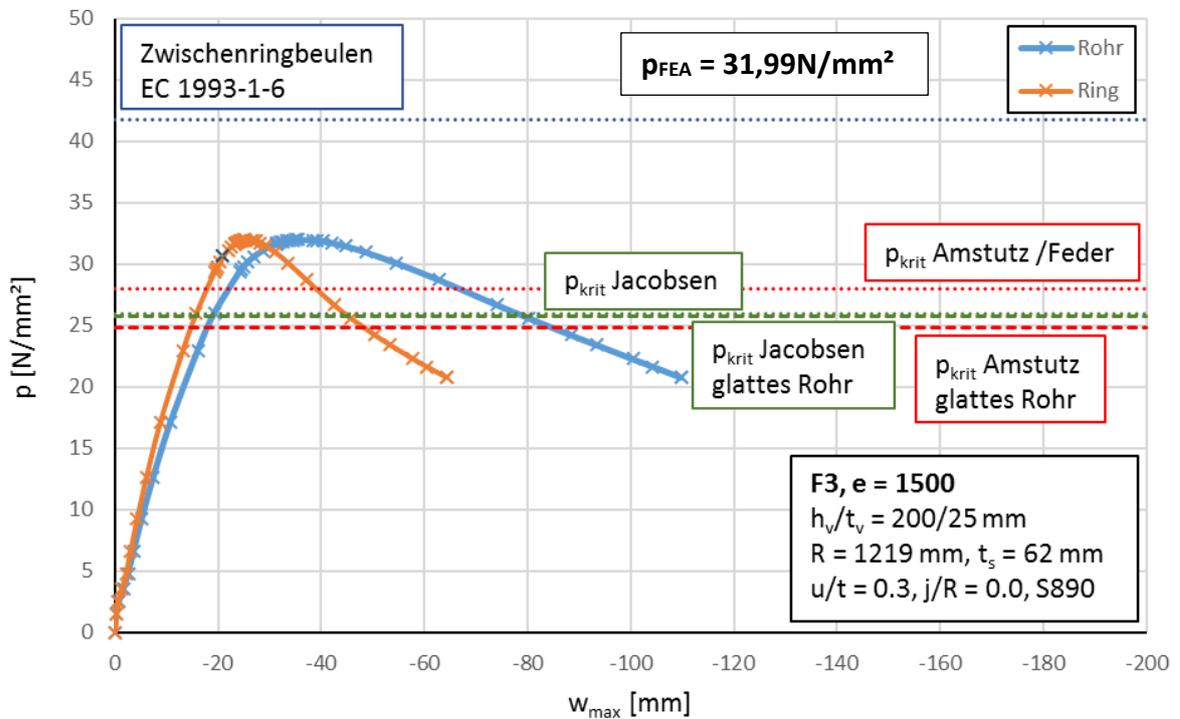


Abbildung 114: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3a, $e = 1500$, S890

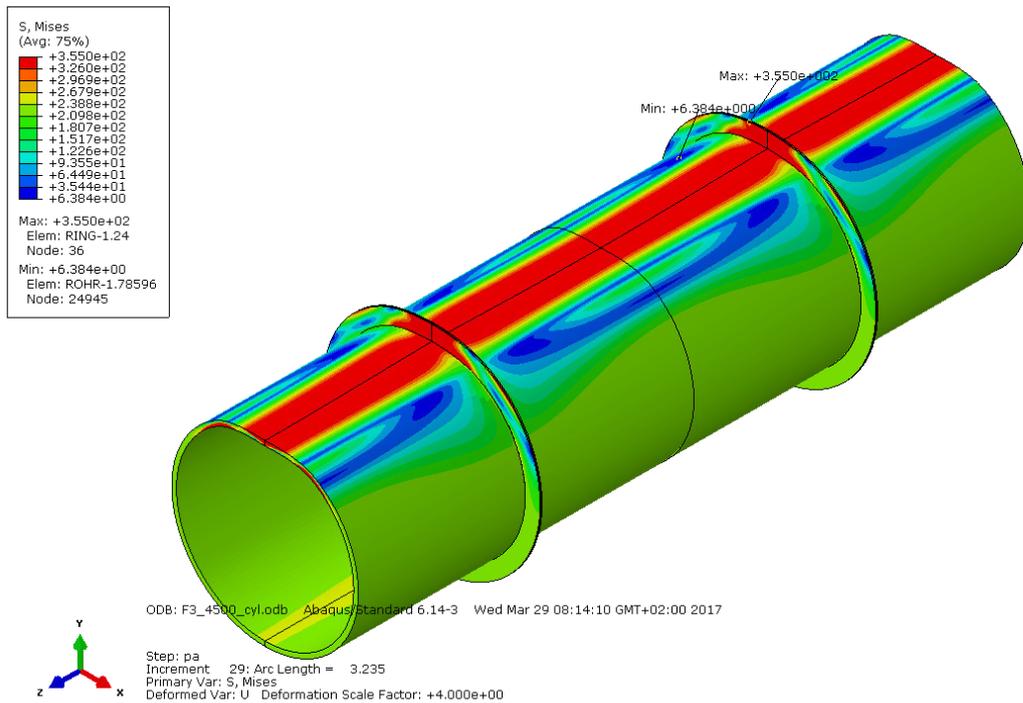


Abbildung 115: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3b mit $e = 4500$, S355

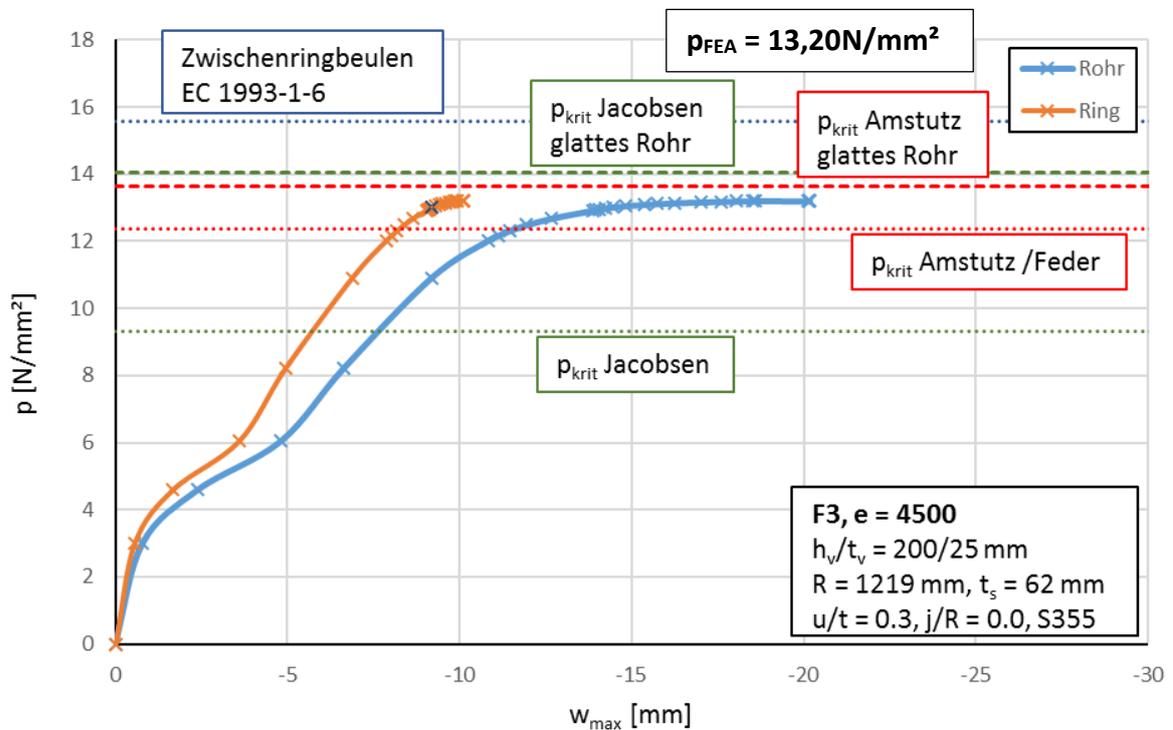


Abbildung 116: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3b, $e = 4500$, S355

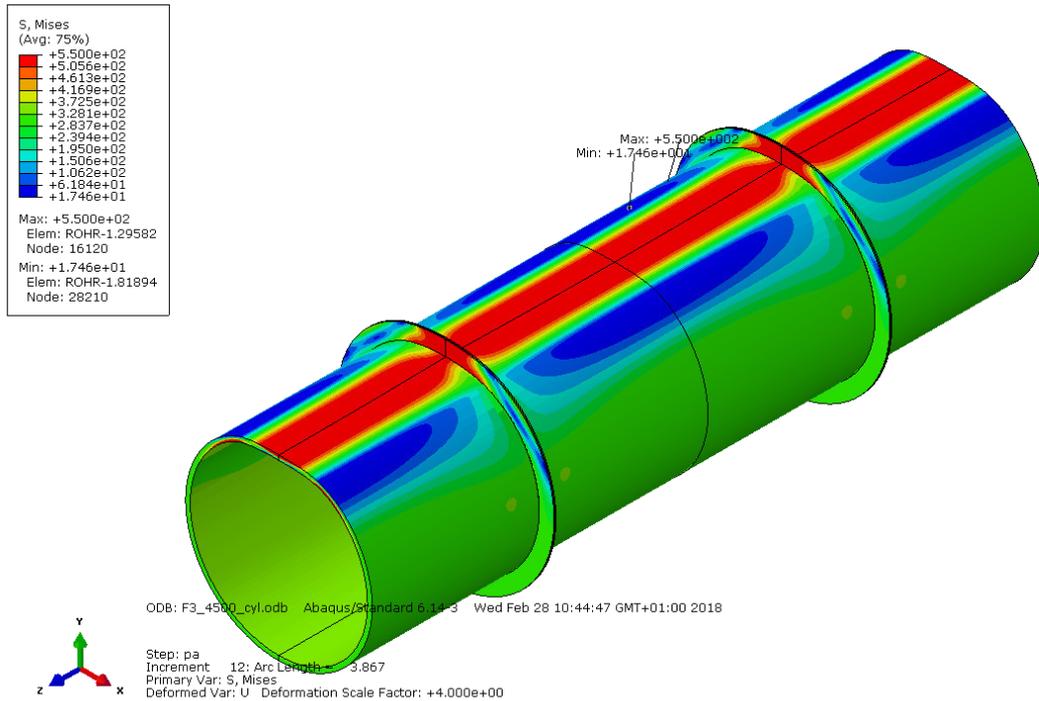


Abbildung 117: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3b mit $e = 4500$, S550

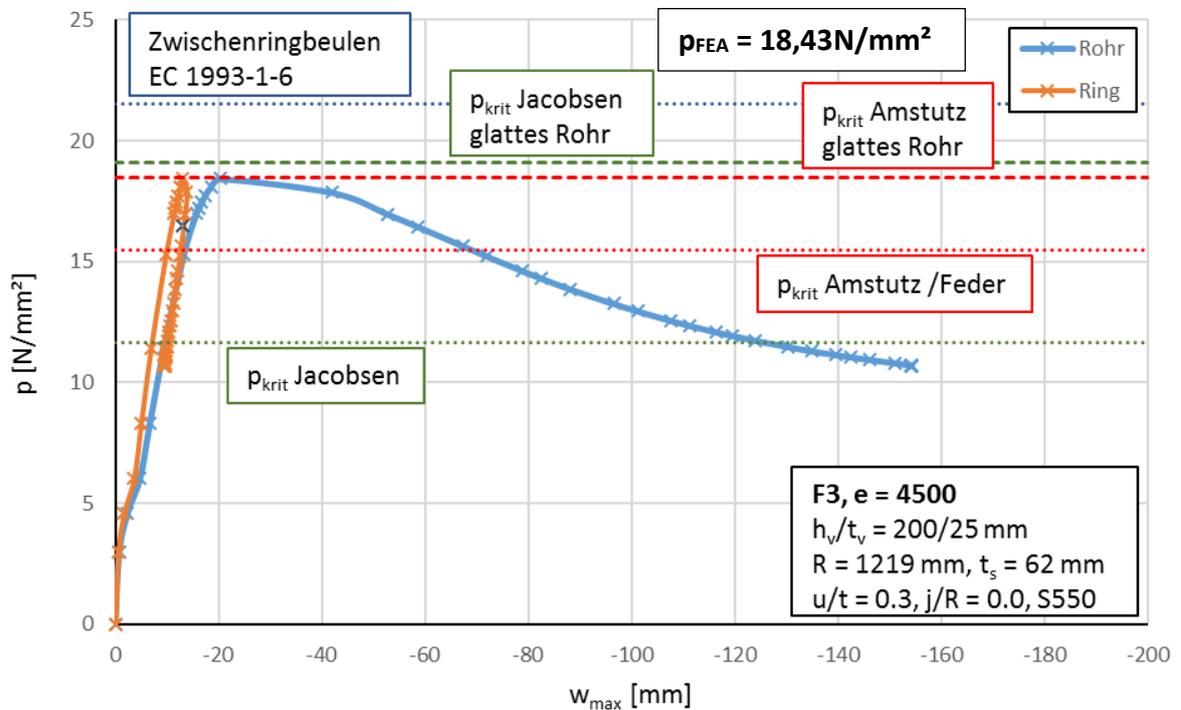


Abbildung 118: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3b, $e = 4500$, S550

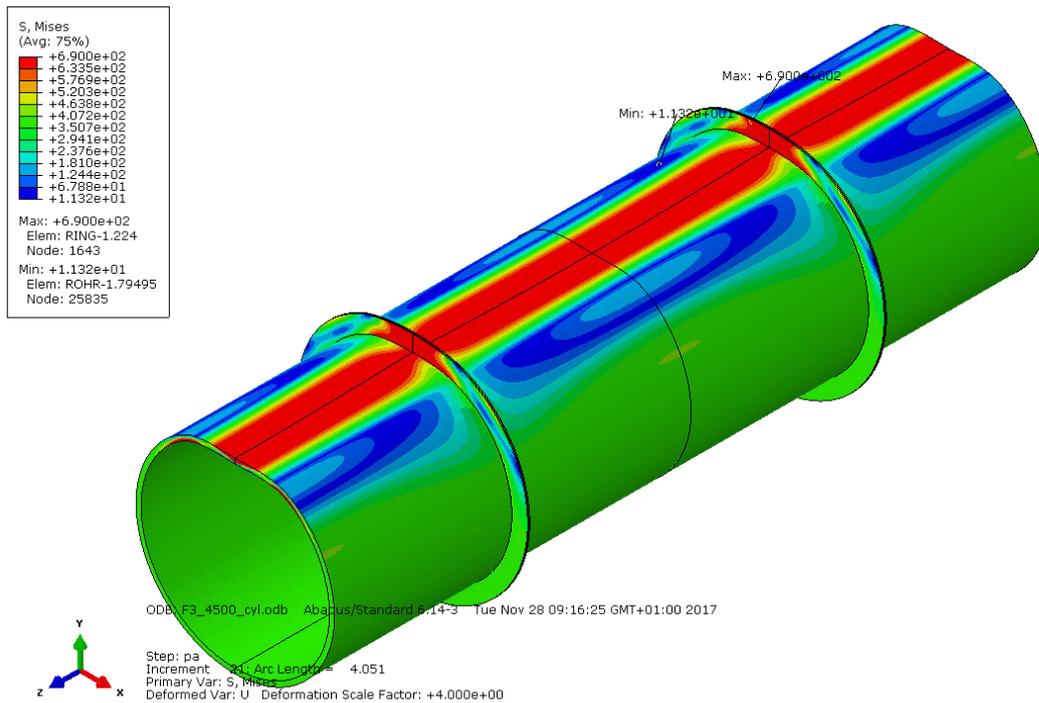


Abbildung 119: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3b mit $e = 4500$, S690

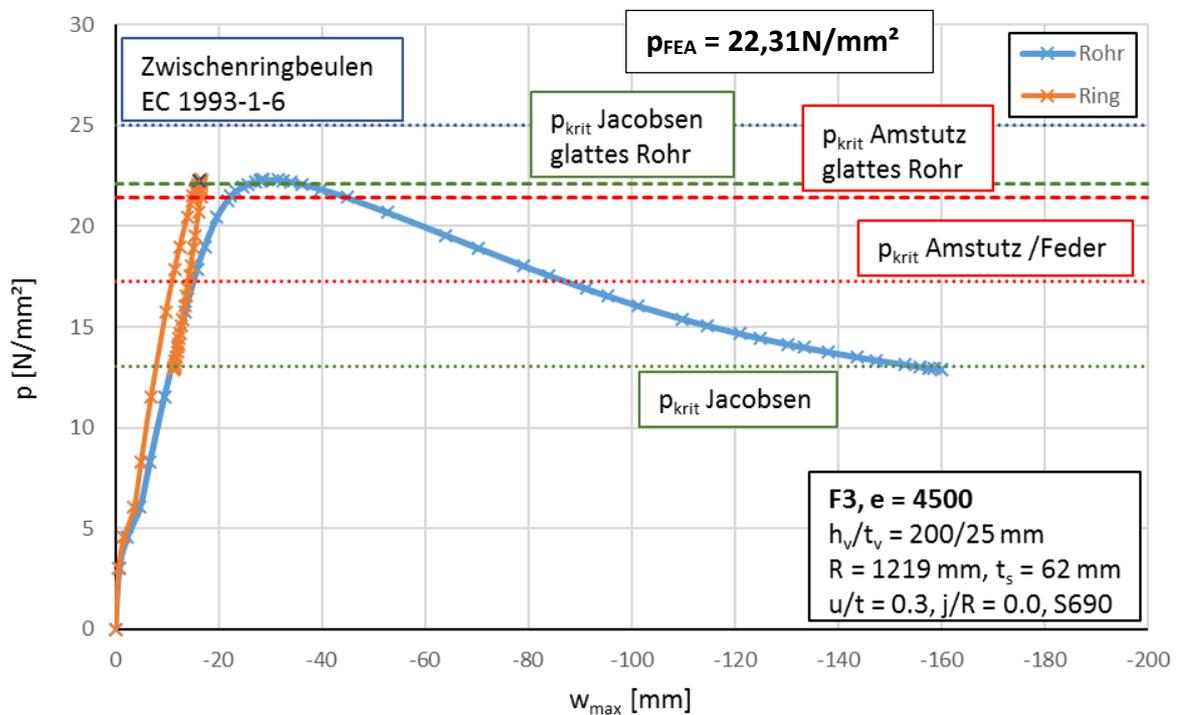


Abbildung 120: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3b, $e = 4500$, S690

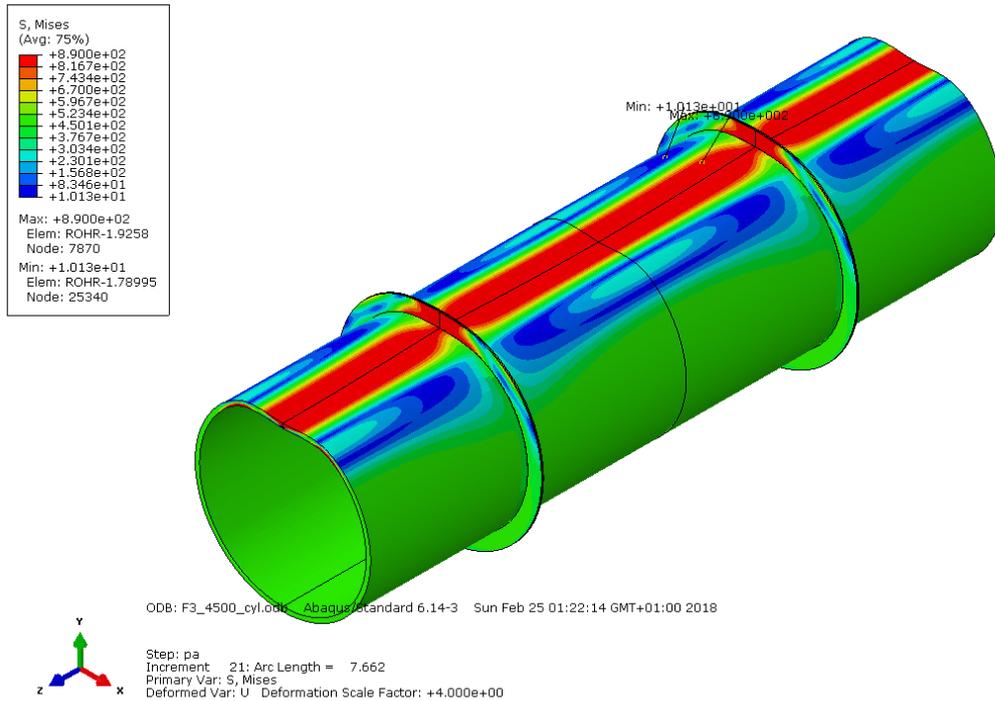


Abbildung 121: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3b mit $e = 4500$, S890

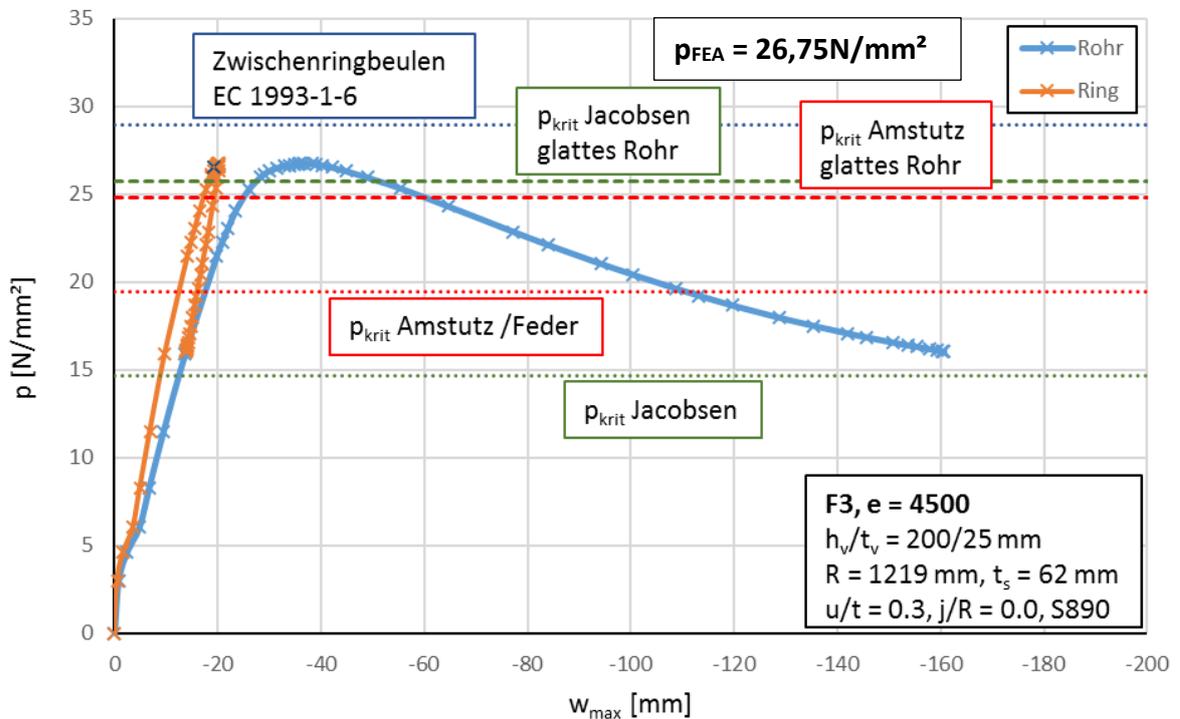


Abbildung 122: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3b, $e = 4500$, S890

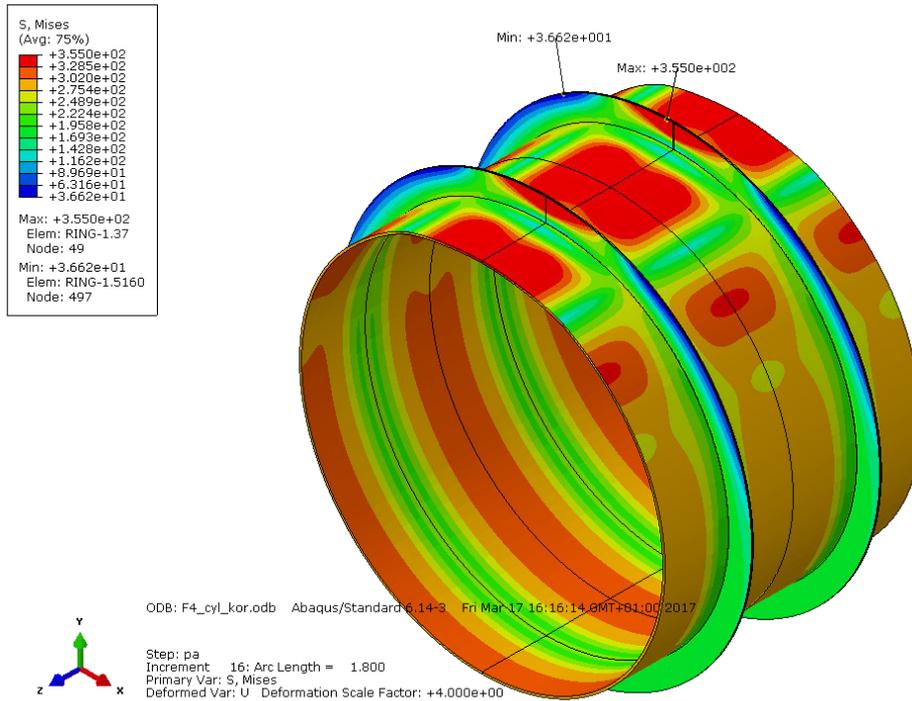


Abbildung 123: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 4 mit $e = 1167$, S355

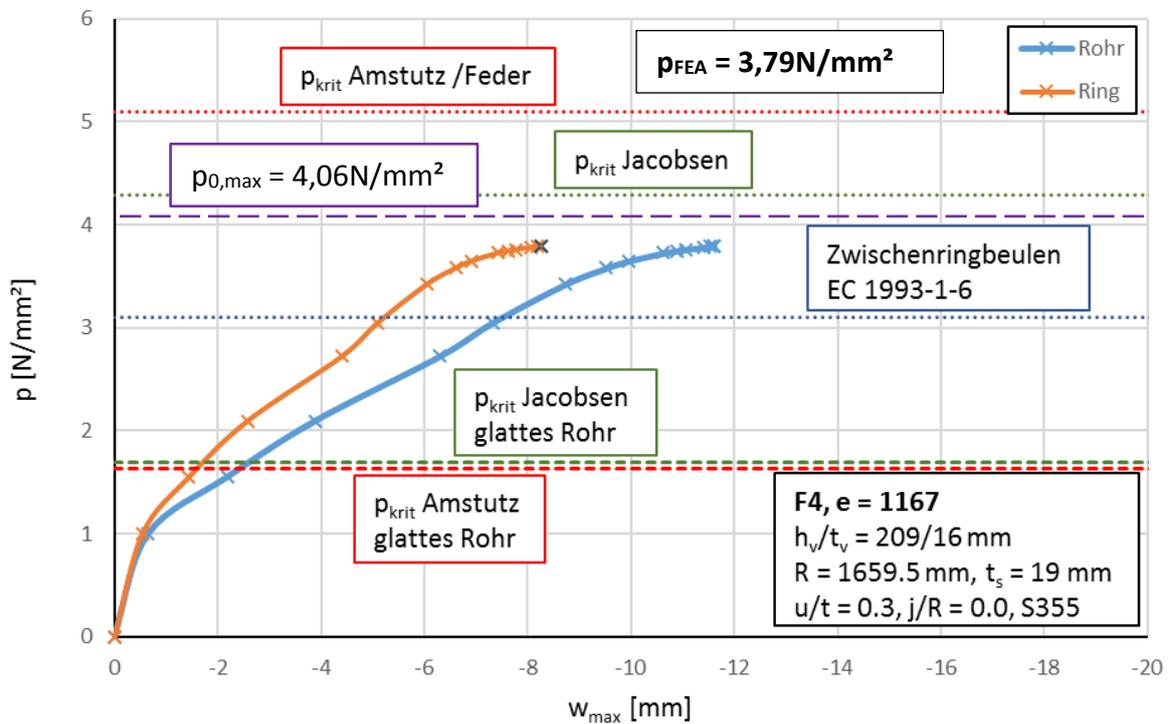


Abbildung 124: Lastverformungskurve Anwendungsfall 4, $e = 1167$, S355

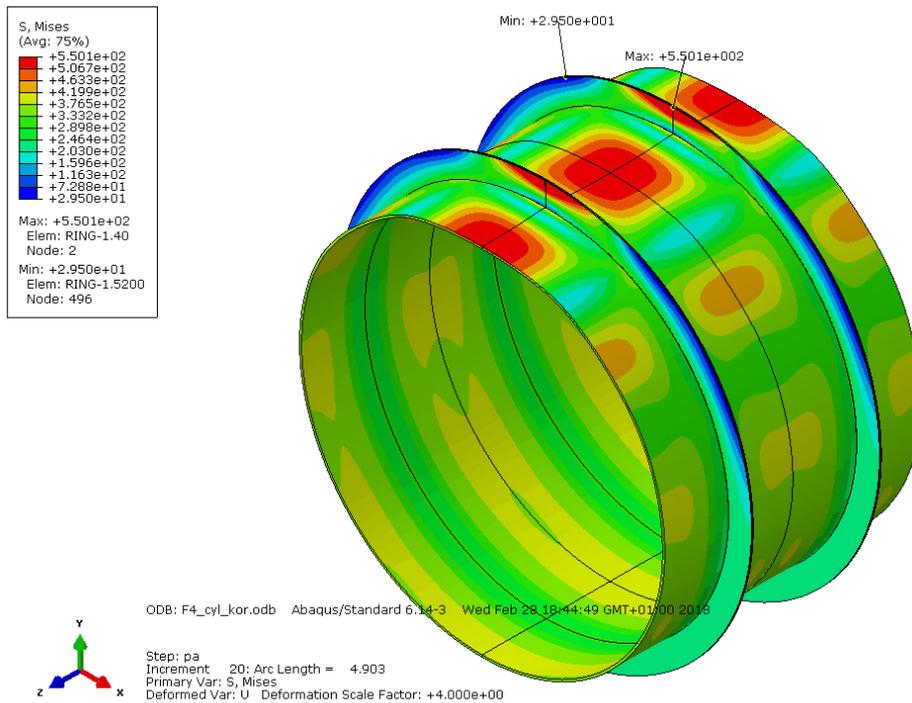


Abbildung 125: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 4 mit $e = 1167$, S550

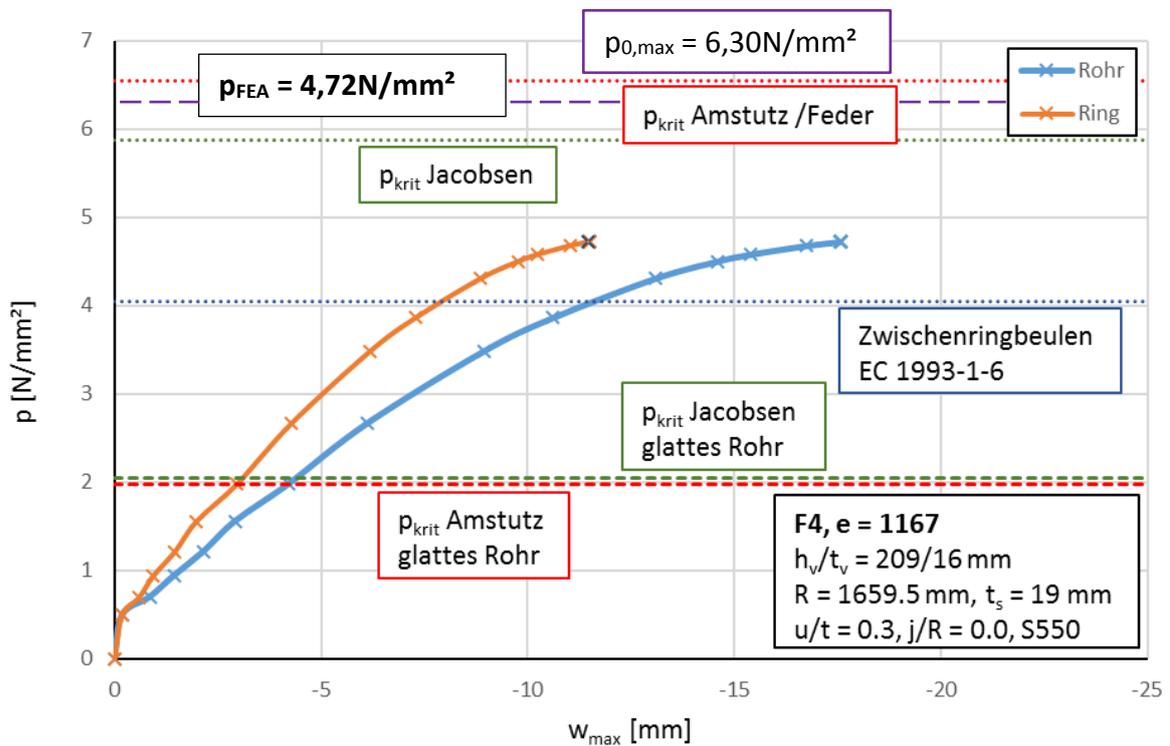


Abbildung 126: Lastverformungskurve Anwendungsfall 4, $e = 1167$, S550

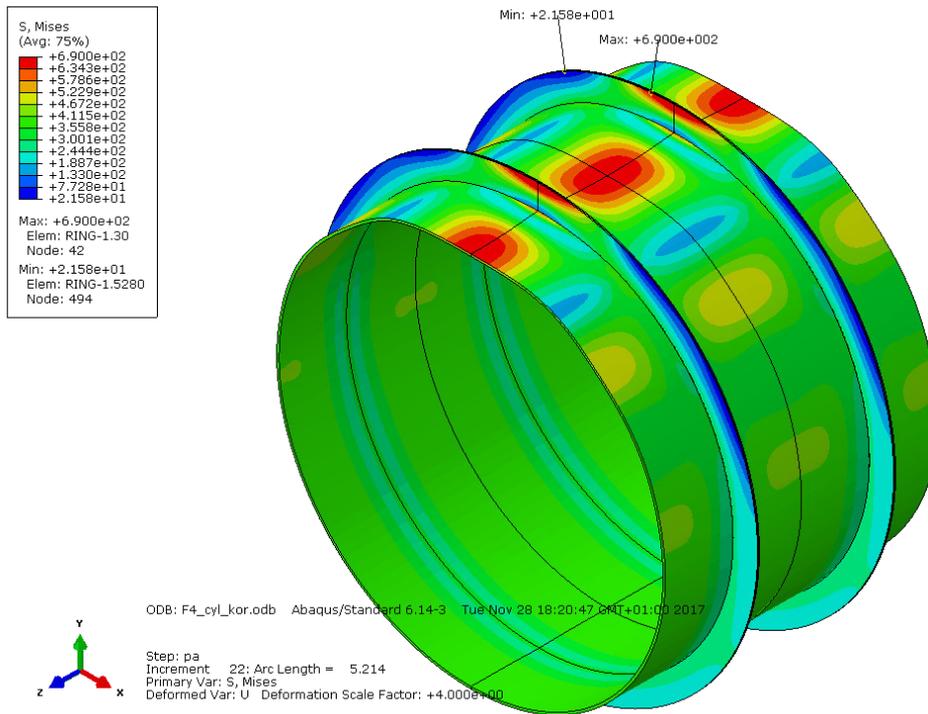


Abbildung 127: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 4 mit $e=1167$, S690

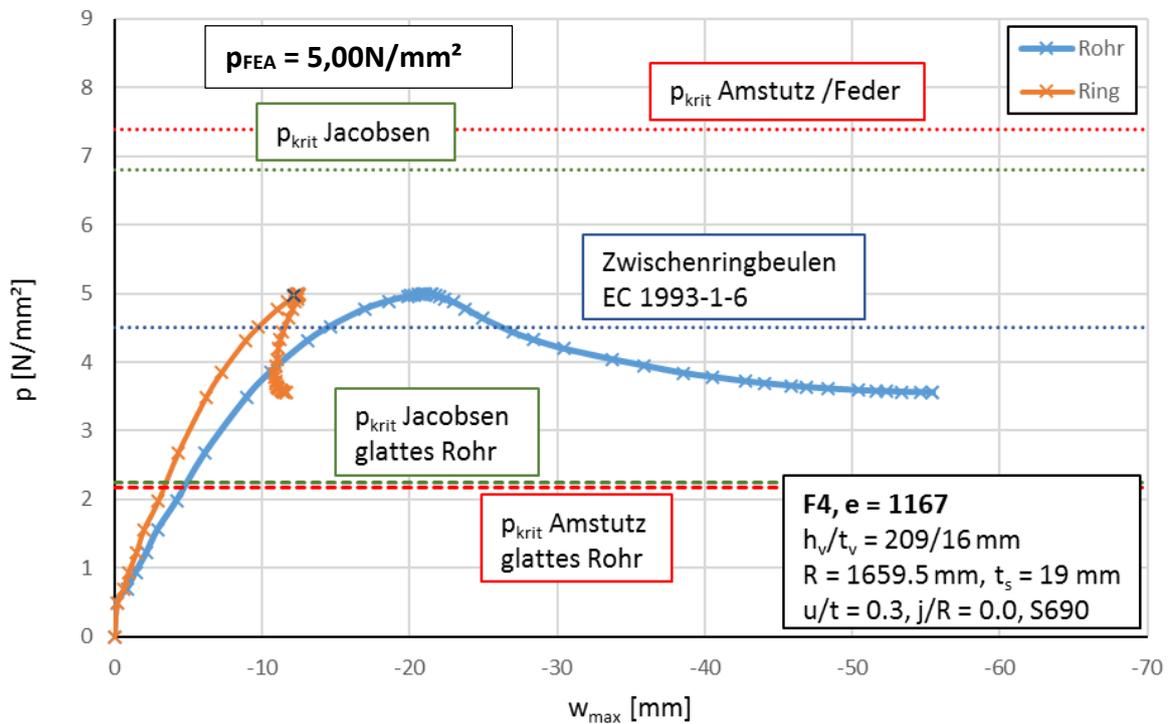


Abbildung 128: Lastverformungskurve Anwendungsfall 4, $e = 1167$, S690

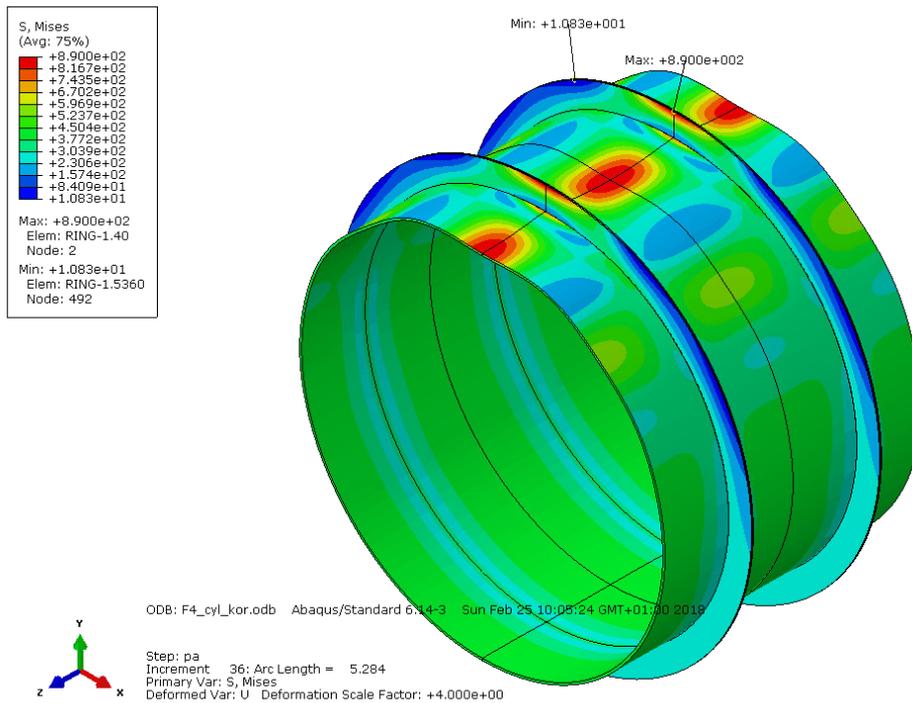


Abbildung 129: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 4 mit $e=1167$, S890

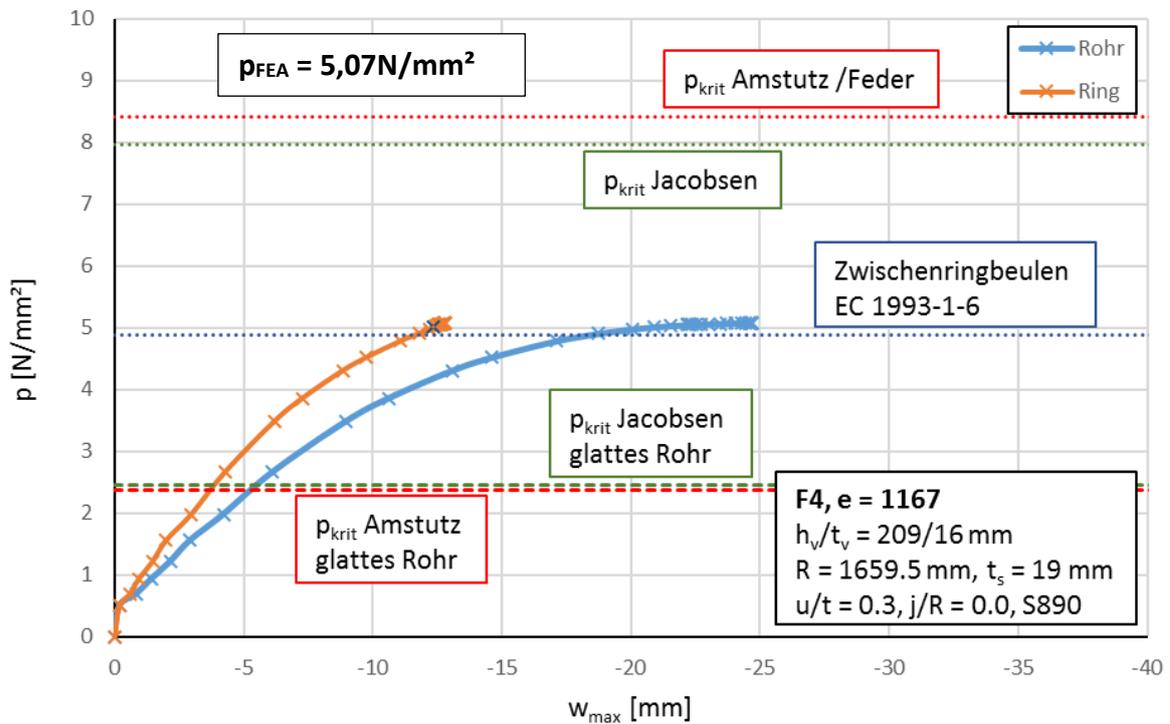


Abbildung 130: Lastverformungskurve Anwendungsfall 4, $e = 1167$, S890

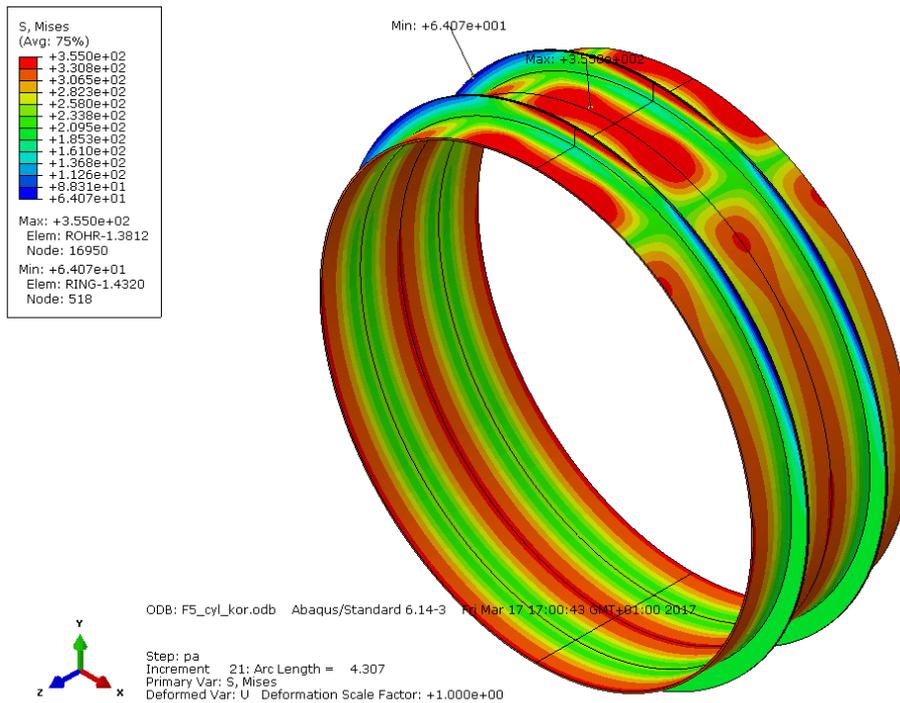


Abbildung 131: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5a mit $e = 1000$, S355

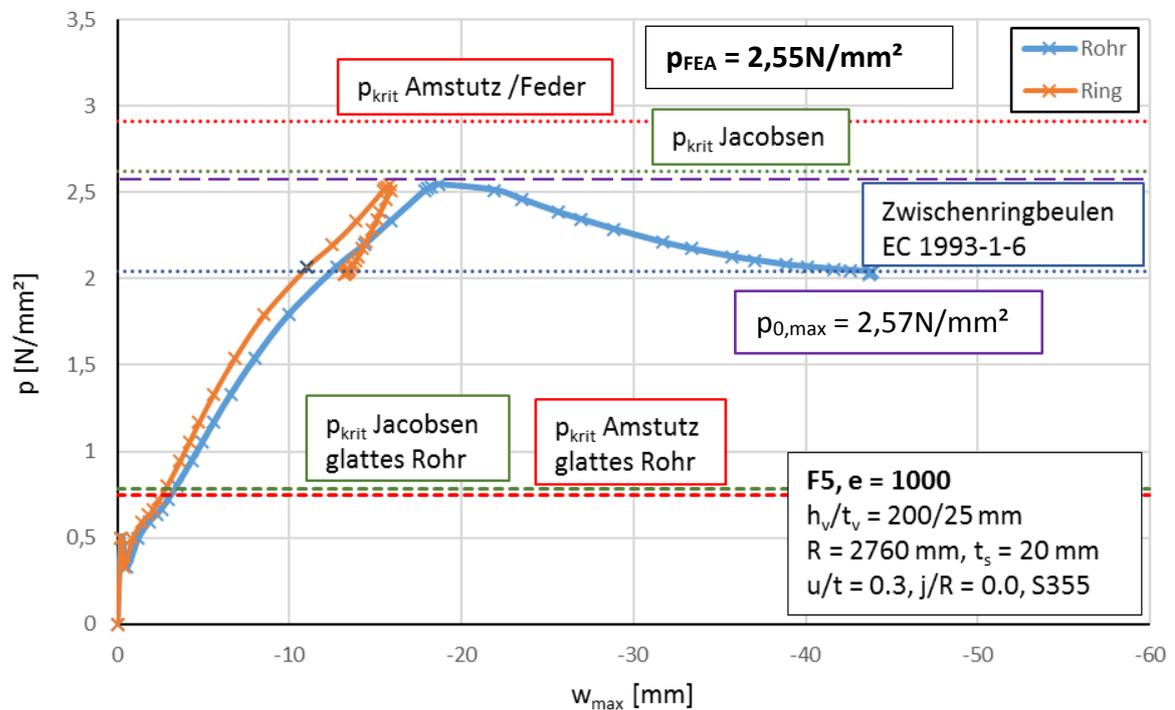


Abbildung 132: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5a, $e = 1000$, S355

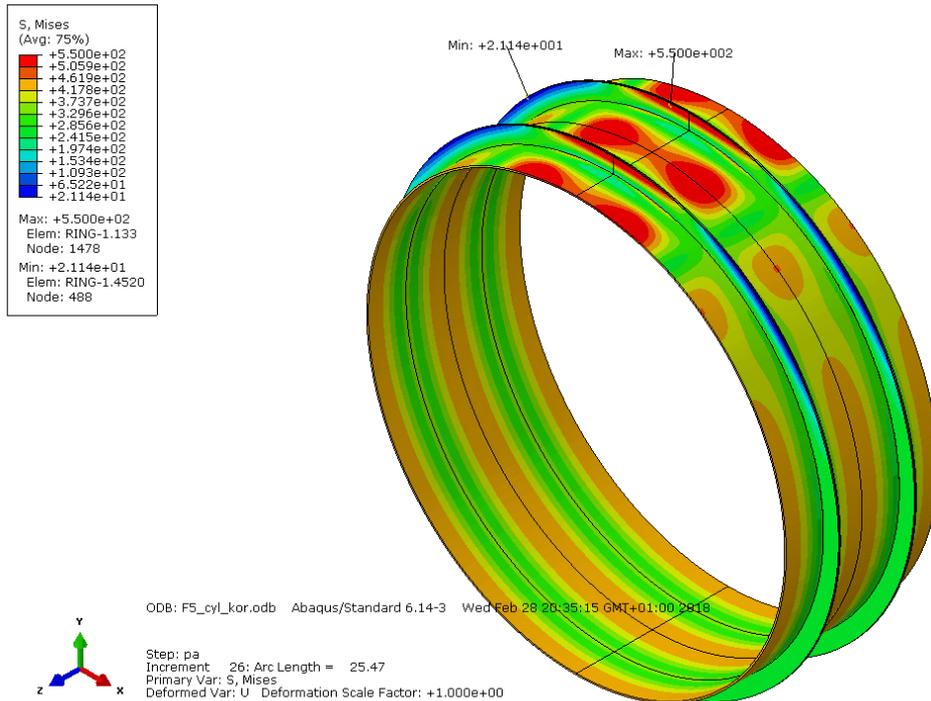


Abbildung 133: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5a mit $e = 1000$, S550

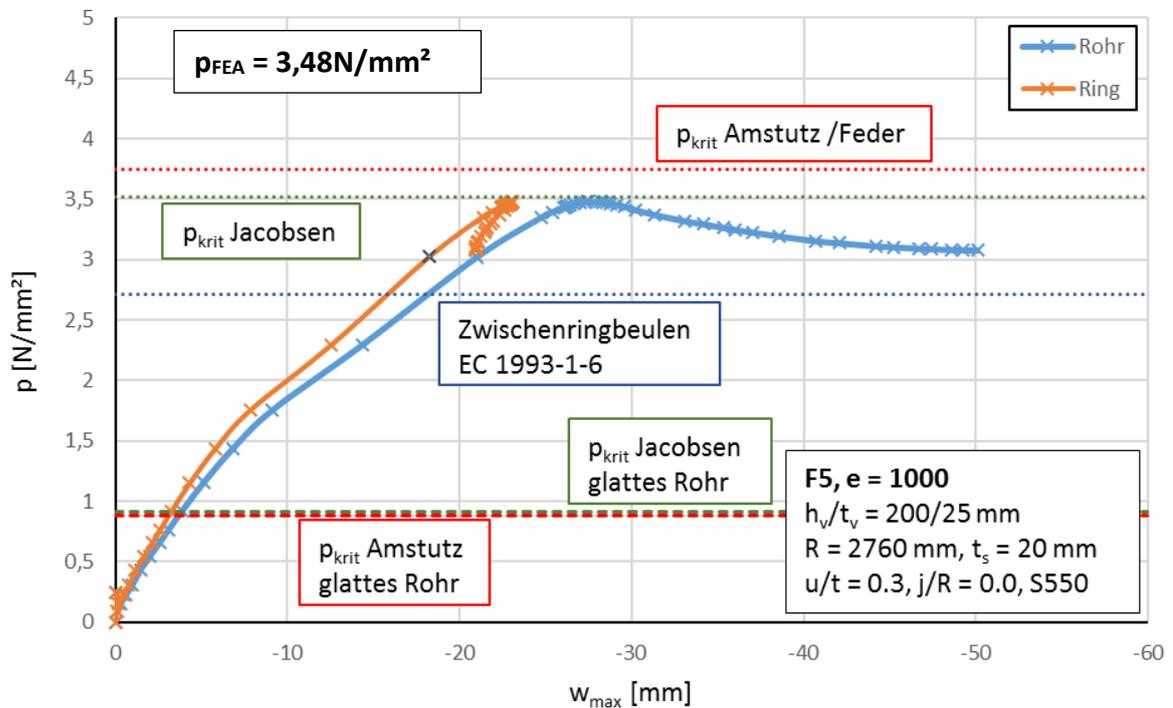


Abbildung 134: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5a, $e = 1000$, S550

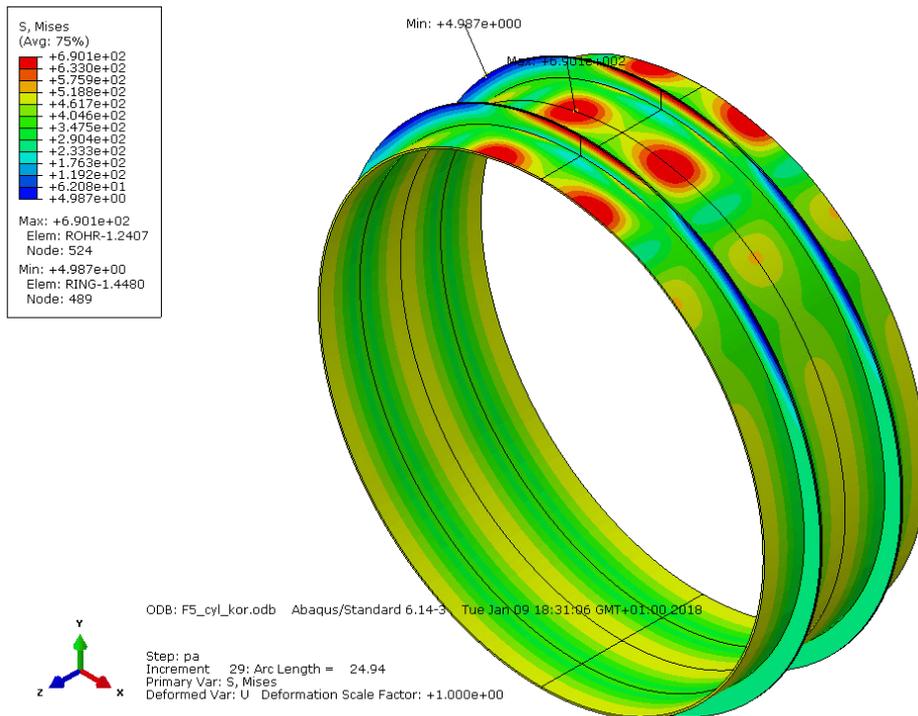


Abbildung 135: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5a mit $e = 1000$, S690

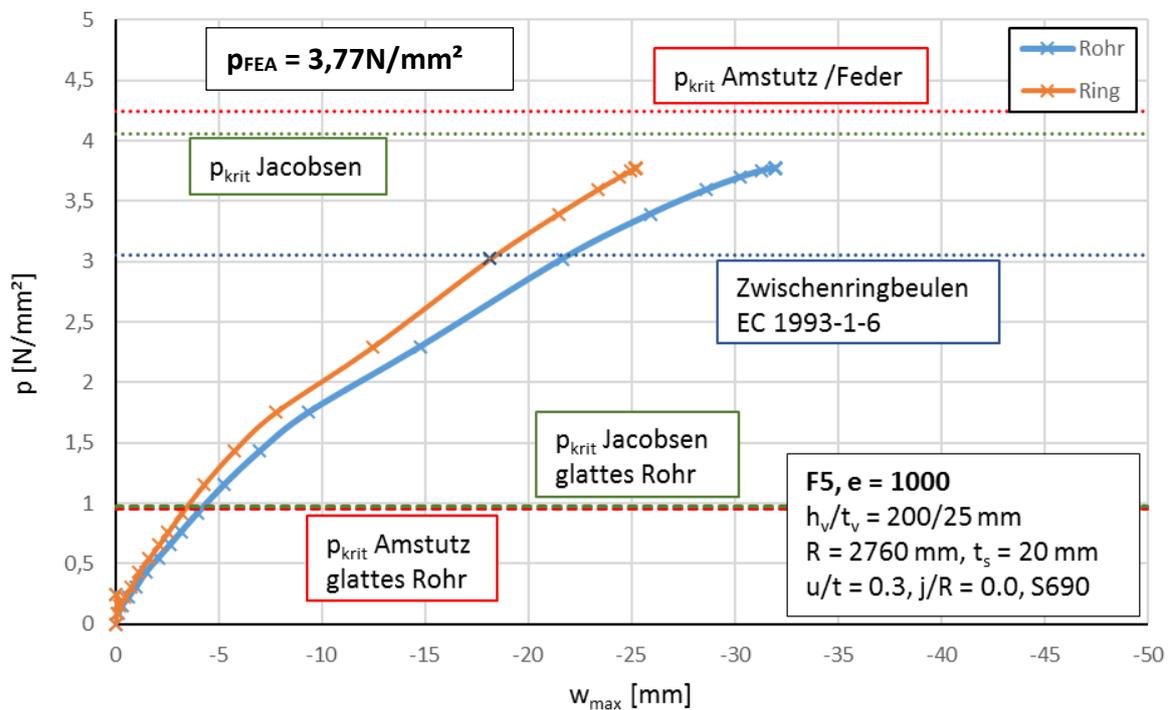


Abbildung 136: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5a, $e = 1000$, S690

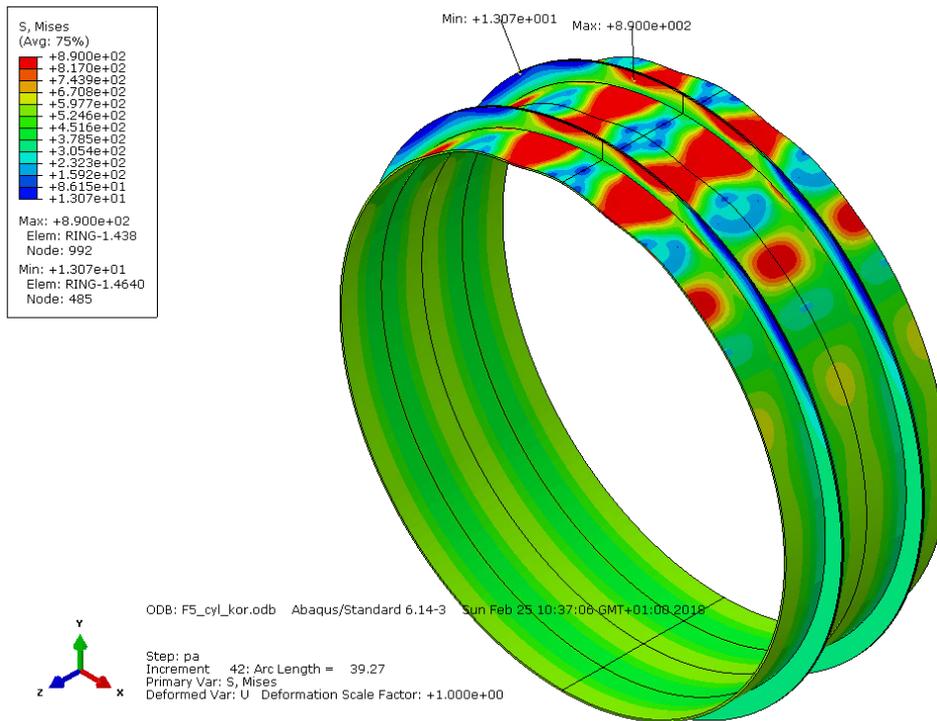


Abbildung 137: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5a mit $e = 1000$, S890

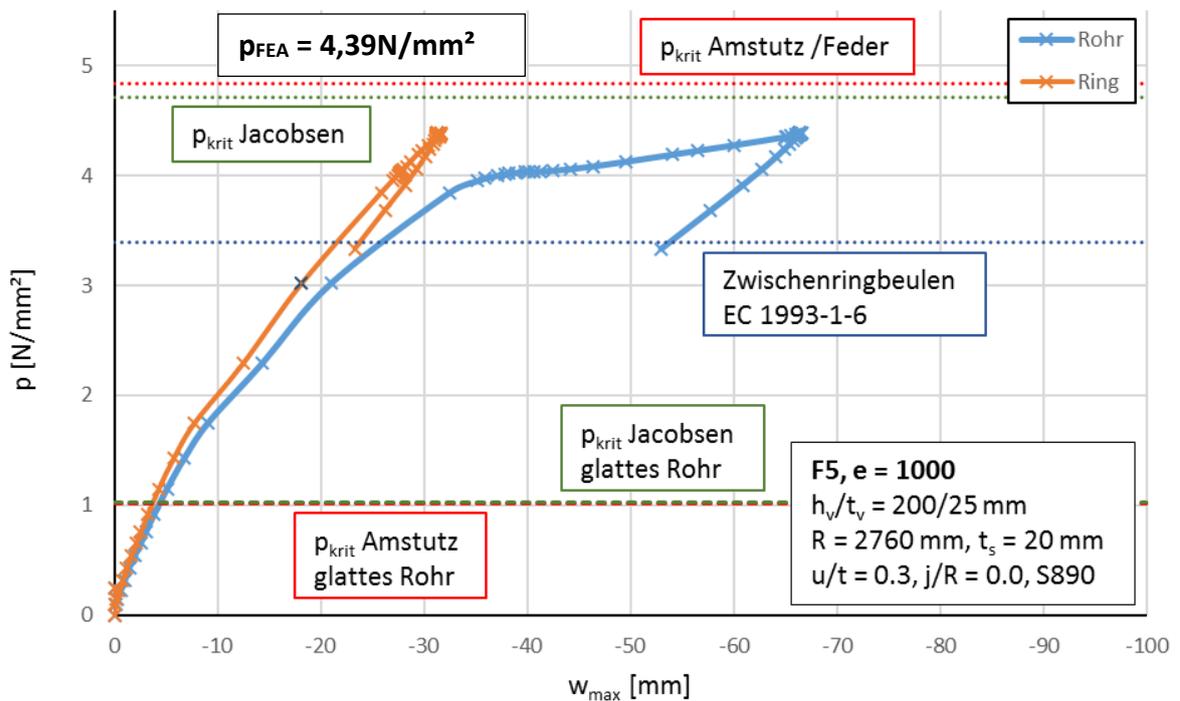


Abbildung 138: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5a, $e = 1000$, S890

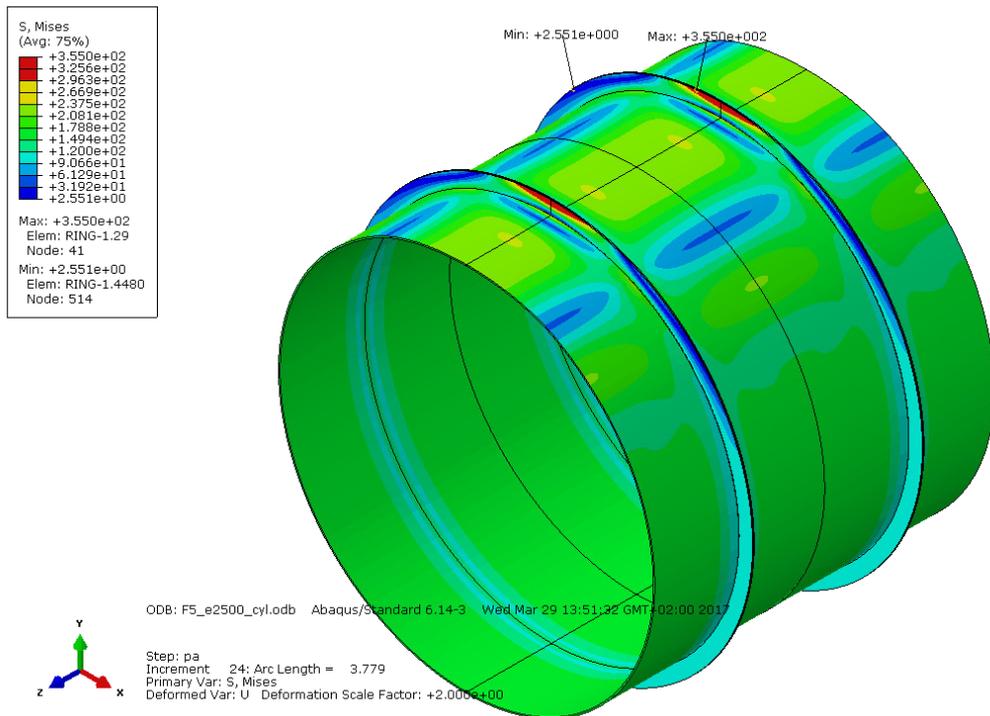


Abbildung 139: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5b mit $e = 2500$, S355

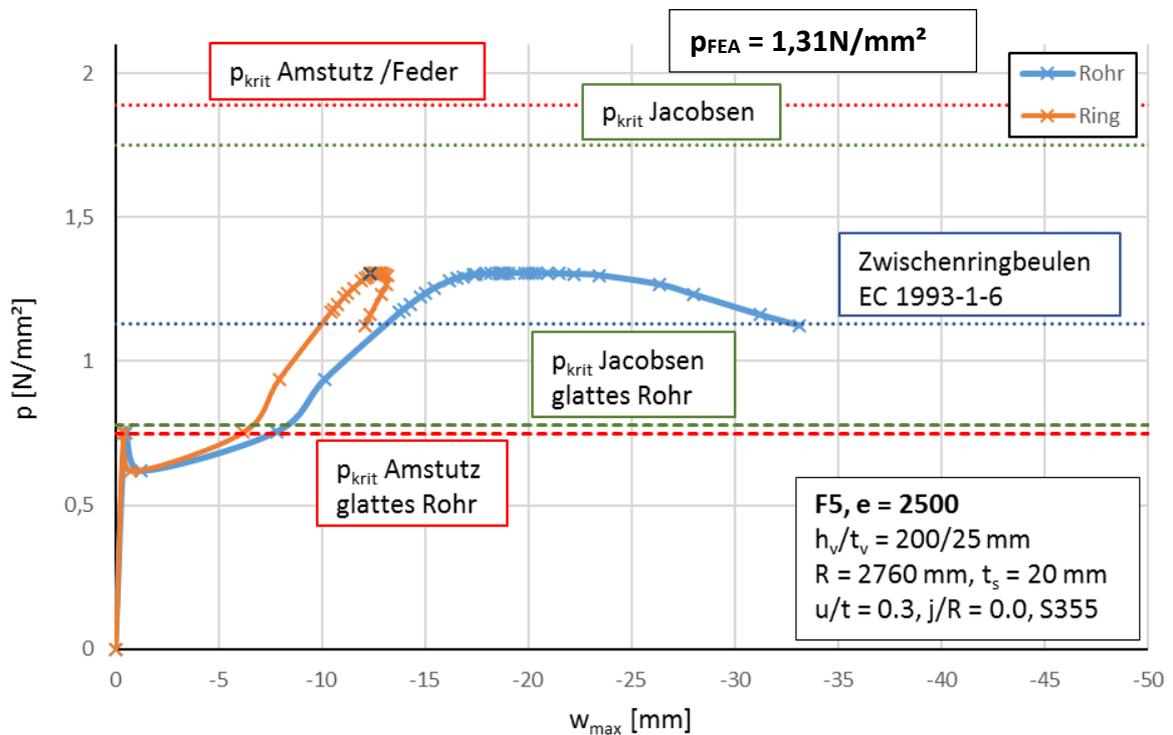


Abbildung 140: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5b, $e = 2500$, S355

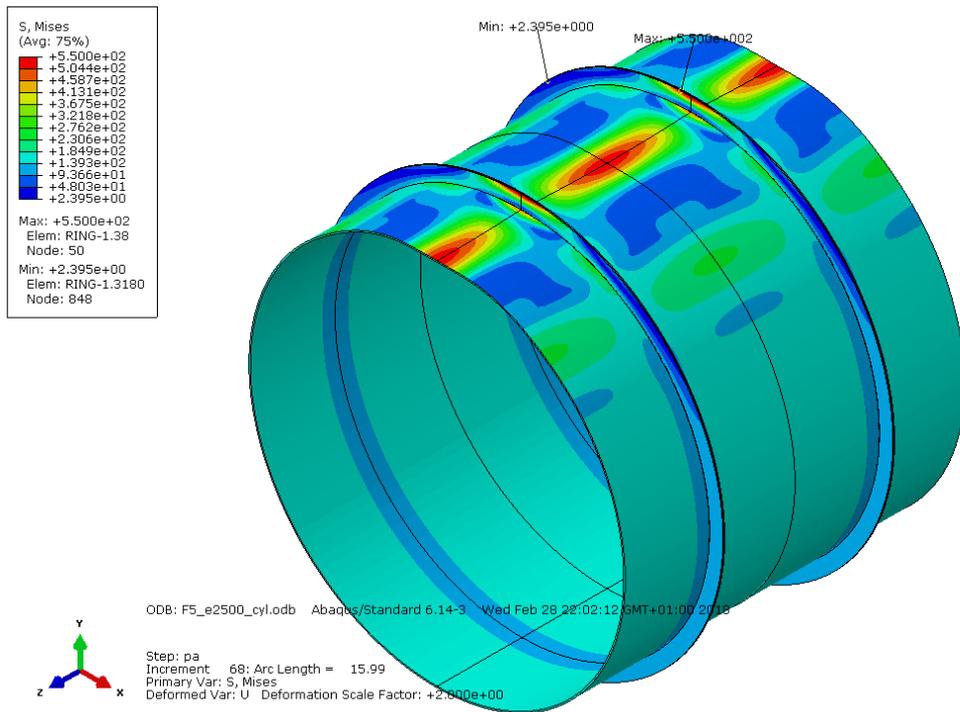


Abbildung 141: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5b mit $e = 2500$, S550

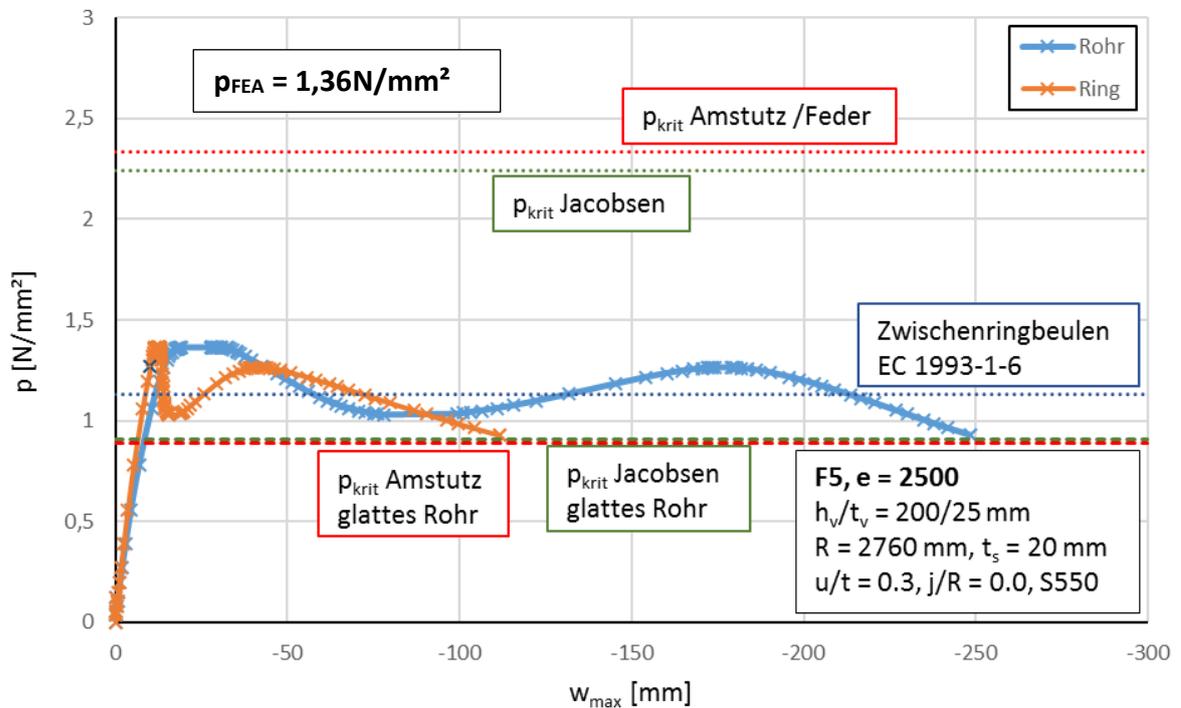


Abbildung 142: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5b, $e = 2500$, S550

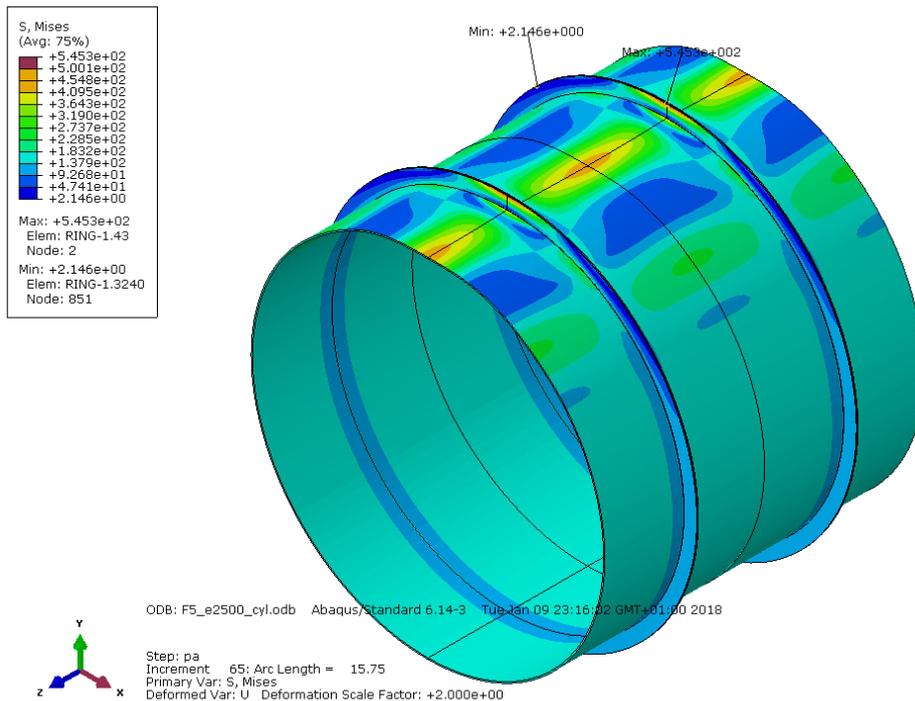


Abbildung 143: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5b mit $e = 2500$, S690

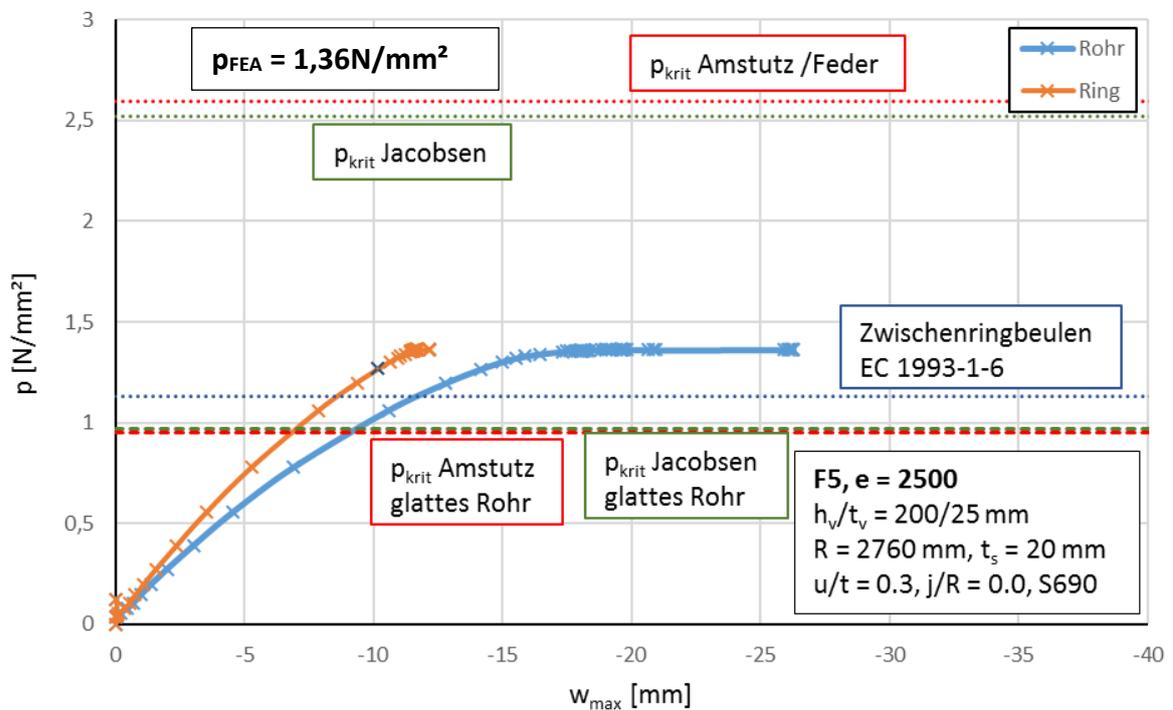


Abbildung 144: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5b, $e = 2500$, S690

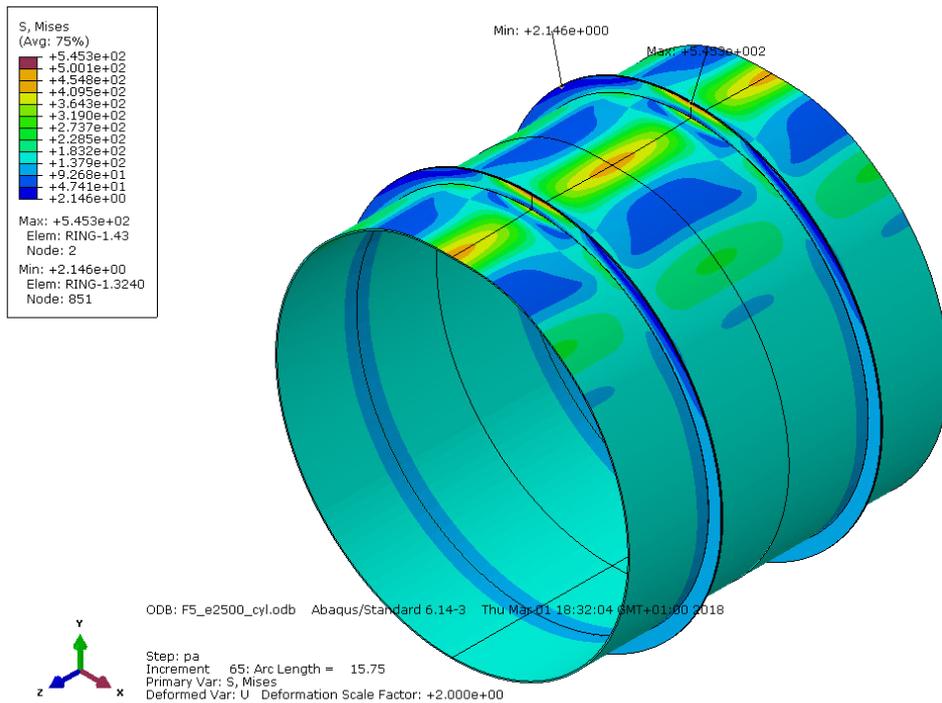


Abbildung 145: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5b mit $e = 2500$, S890

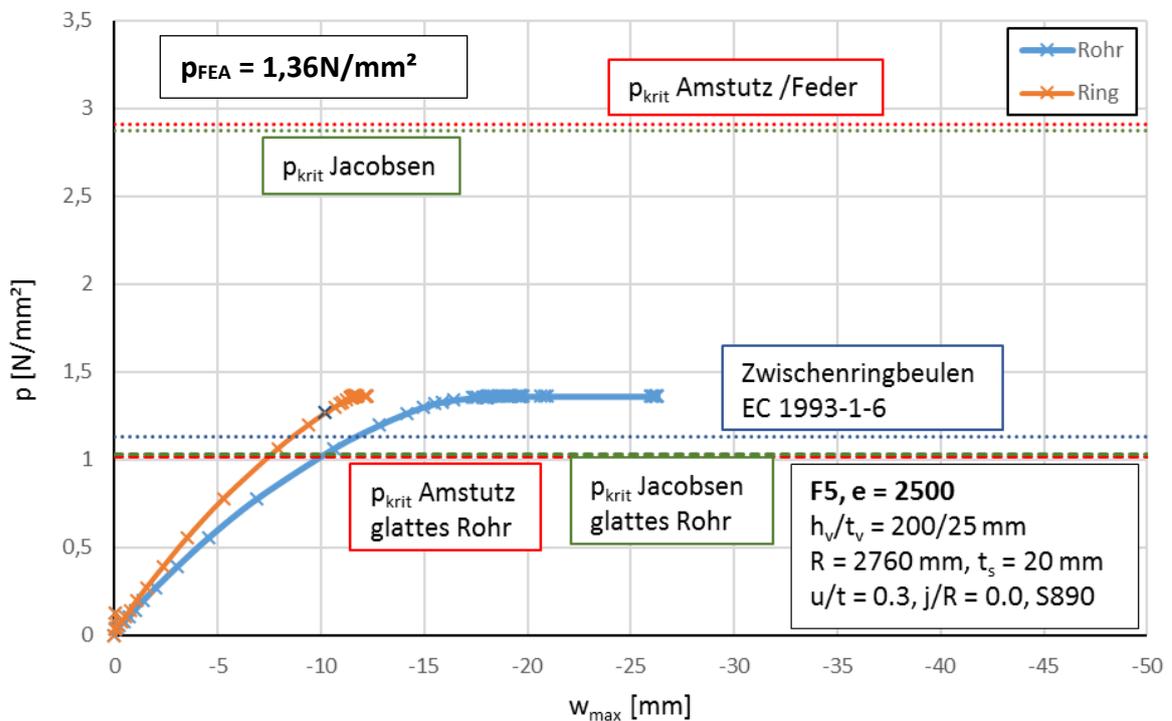


Abbildung 146: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5b, $e = 2500$, S890

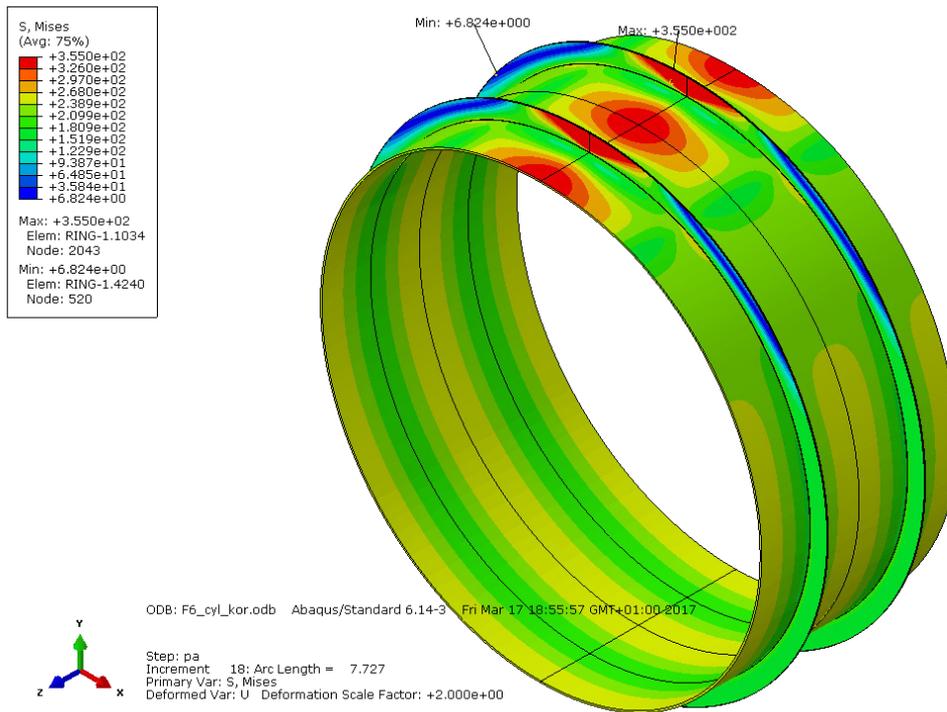


Abbildung 147: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6a mit $e = 2000$, S355

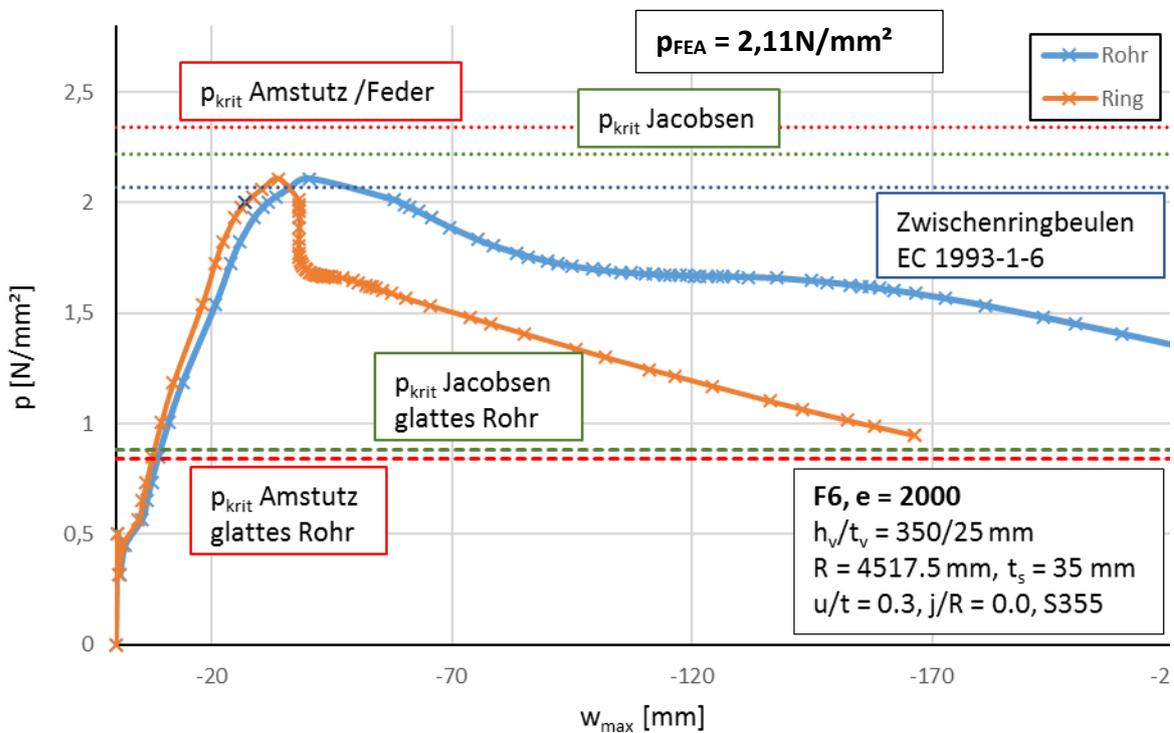


Abbildung 148: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6a, $e = 2000$, S355

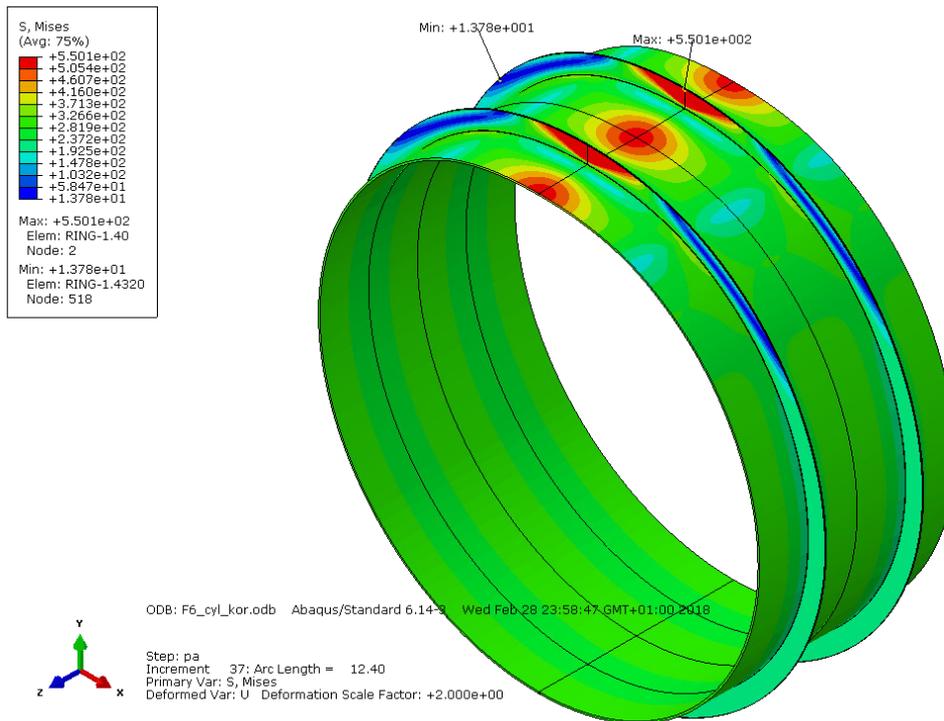


Abbildung 149: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6a mit $e=2000$, S550

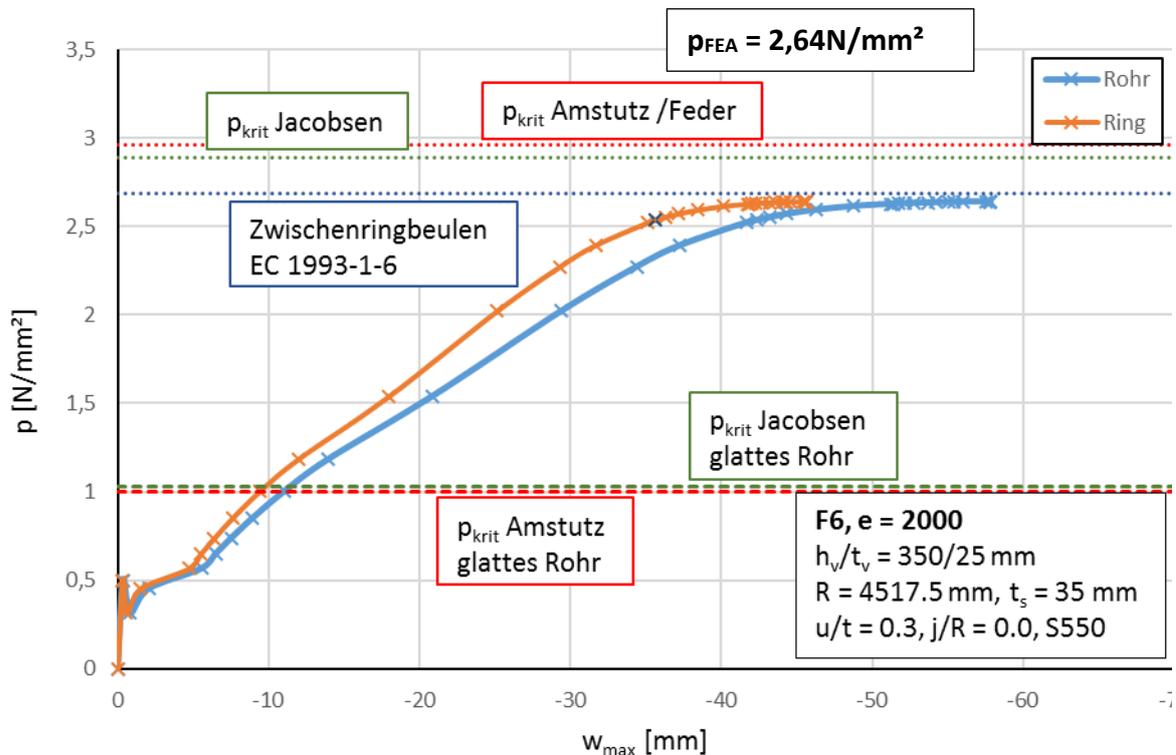


Abbildung 150: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6a, $e = 2000$, S550

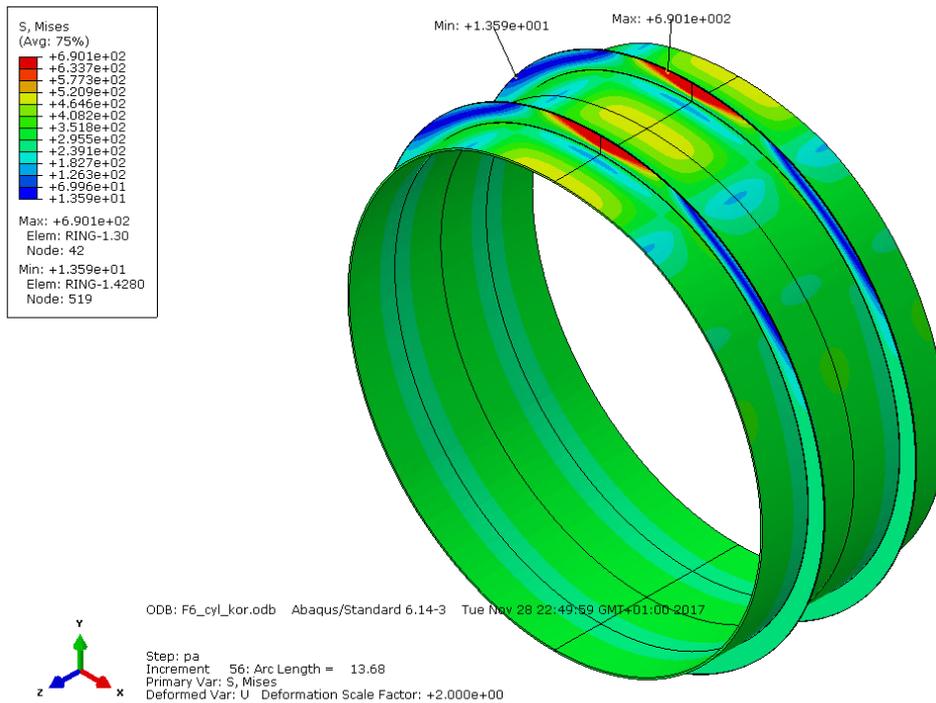


Abbildung 151: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6a mit $e = 2000$, S690

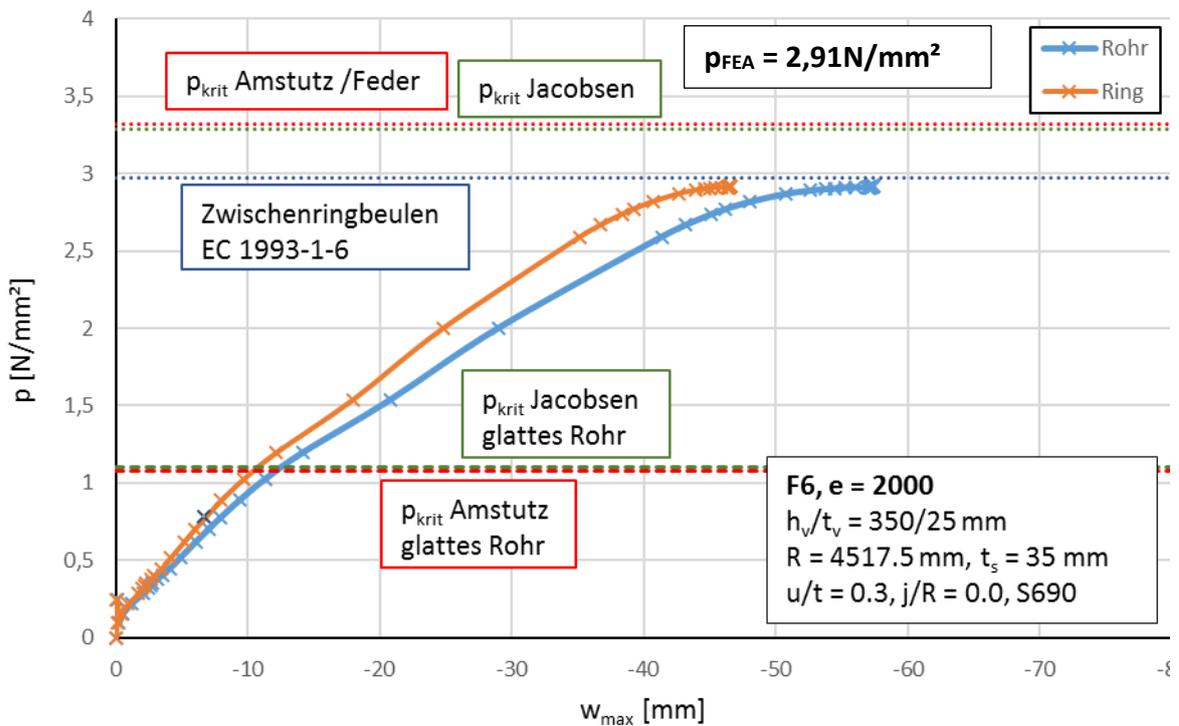


Abbildung 152: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6a, $e = 2000$, S690

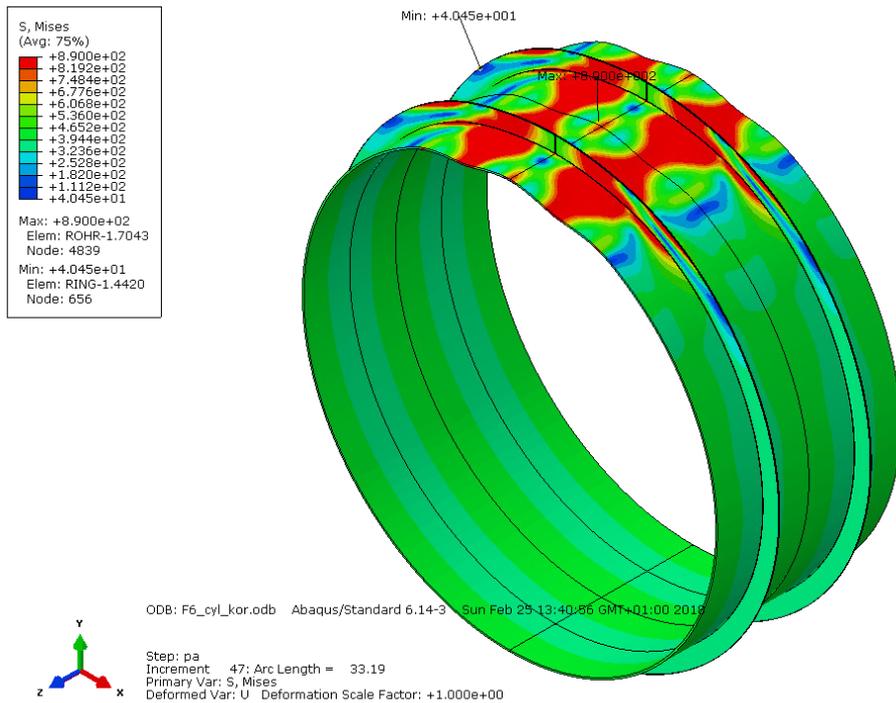


Abbildung 153: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6a mit $e = 2000$, S890

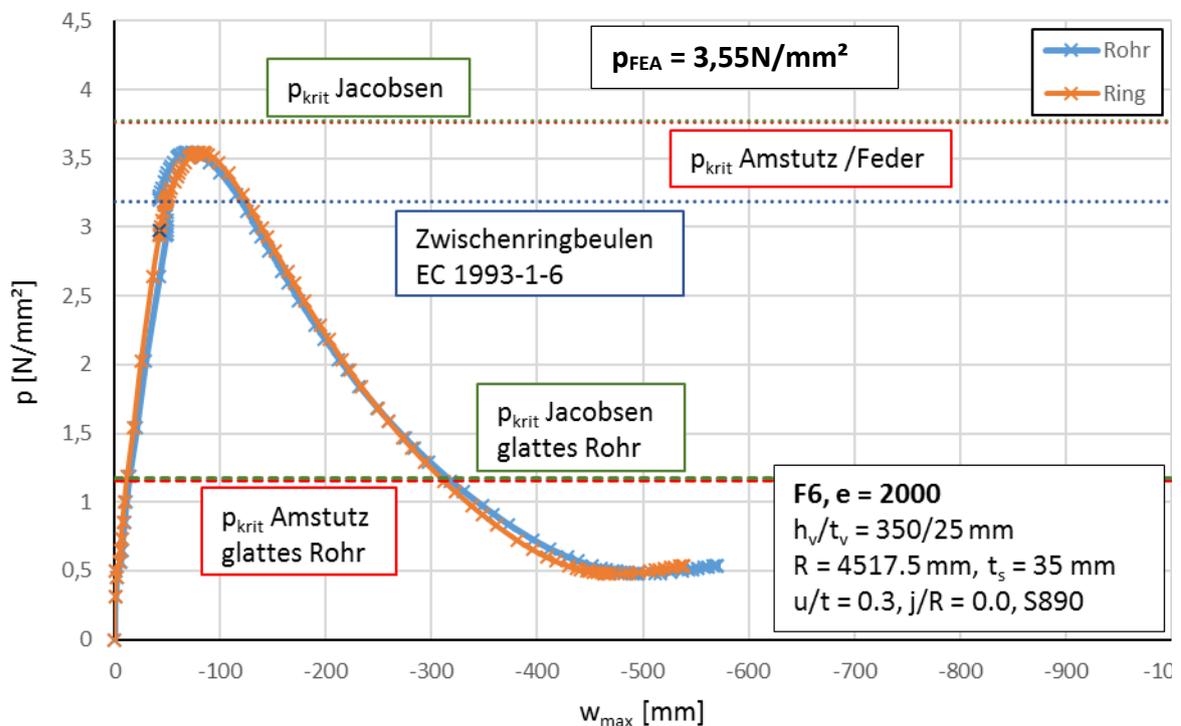


Abbildung 154: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6a, $e = 2000$, S890

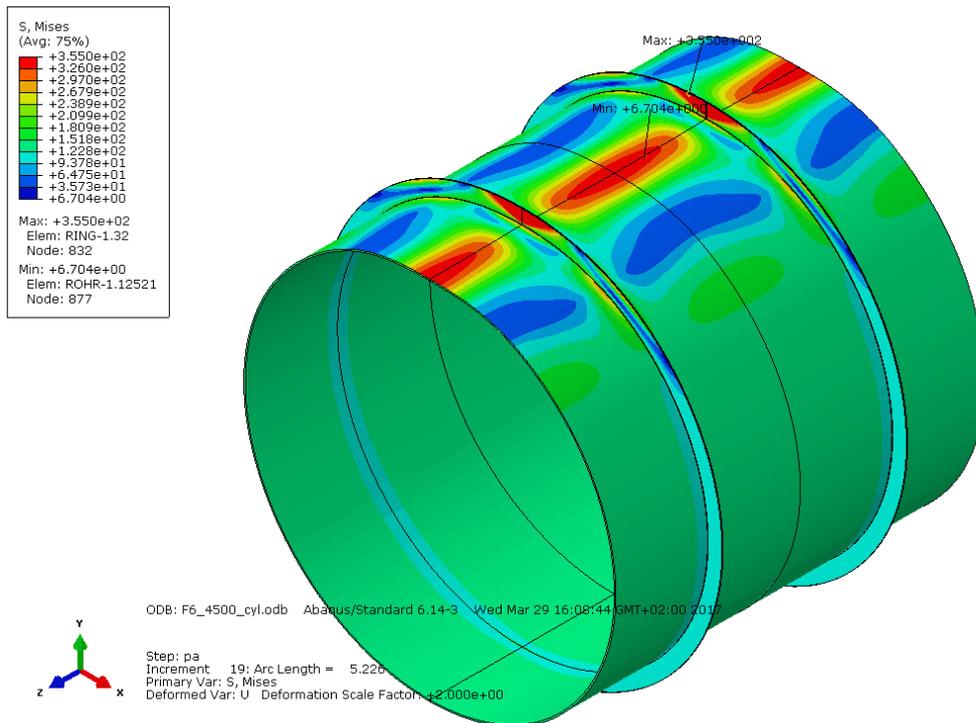


Abbildung 155: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6b mit $e=4500$, S355

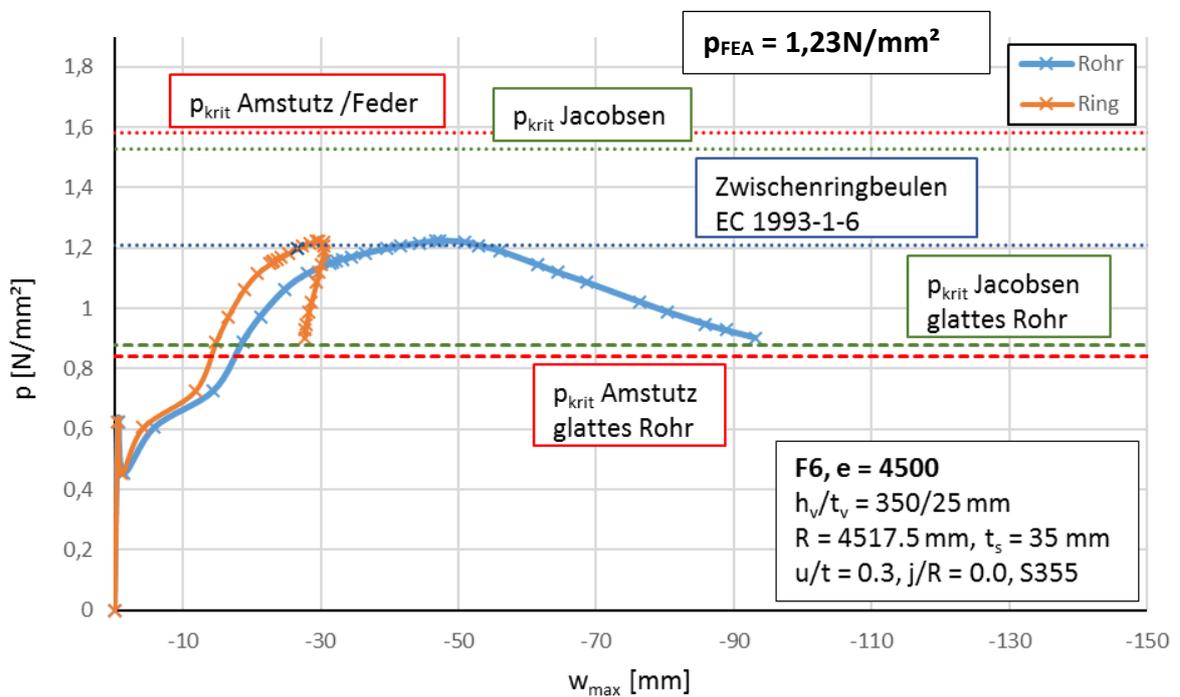


Abbildung 156: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6b, $e = 4500$, S355

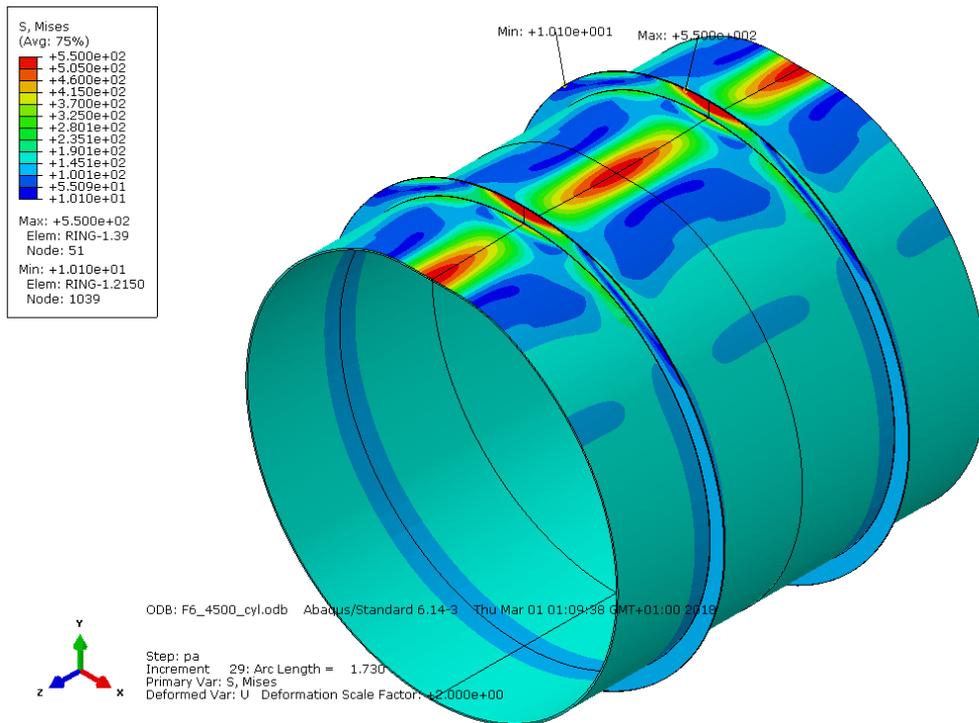


Abbildung 157: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6b mit $e=4500$, S550

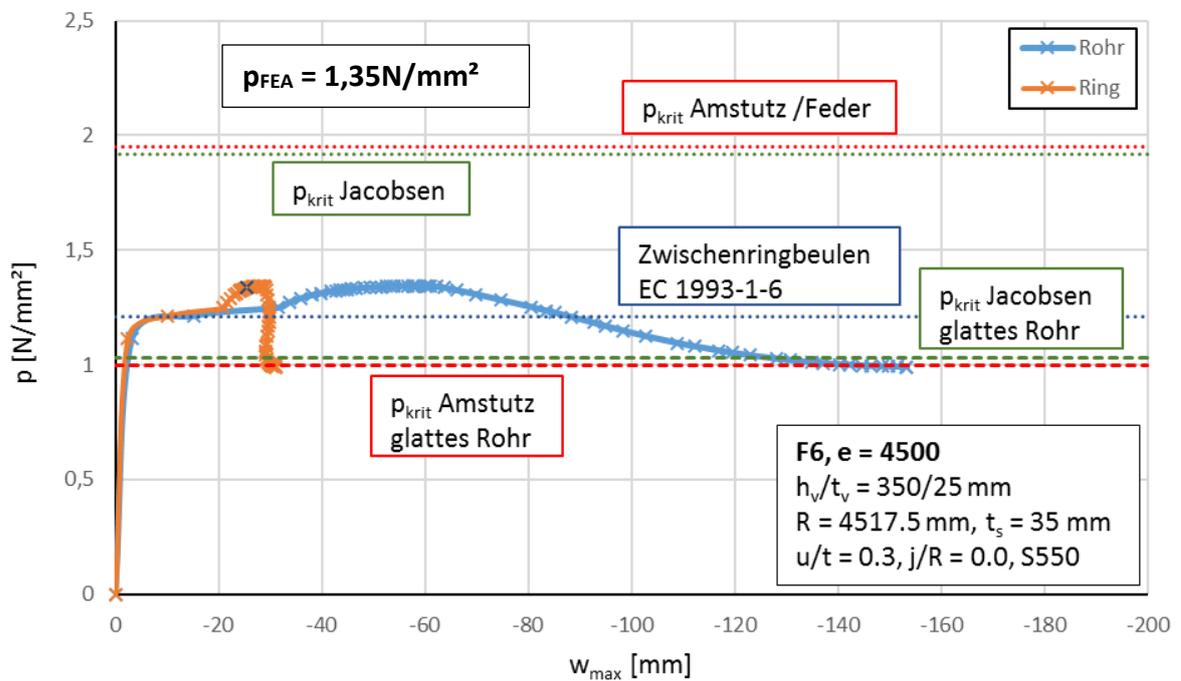


Abbildung 158: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6b, $e = 4500$, S550

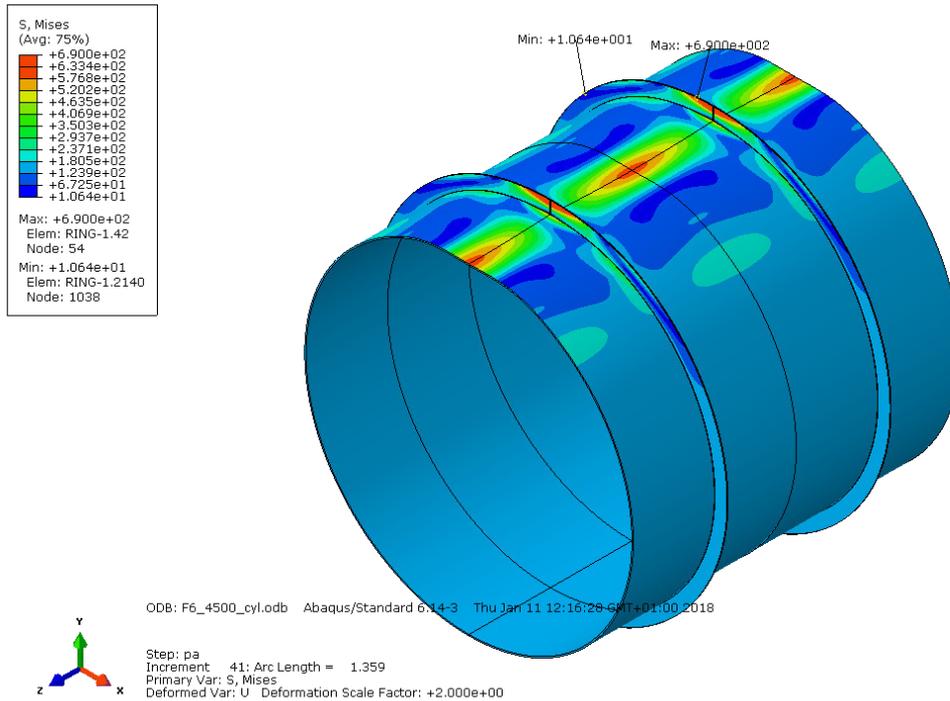


Abbildung 159: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6b mit $e=4500$, S690

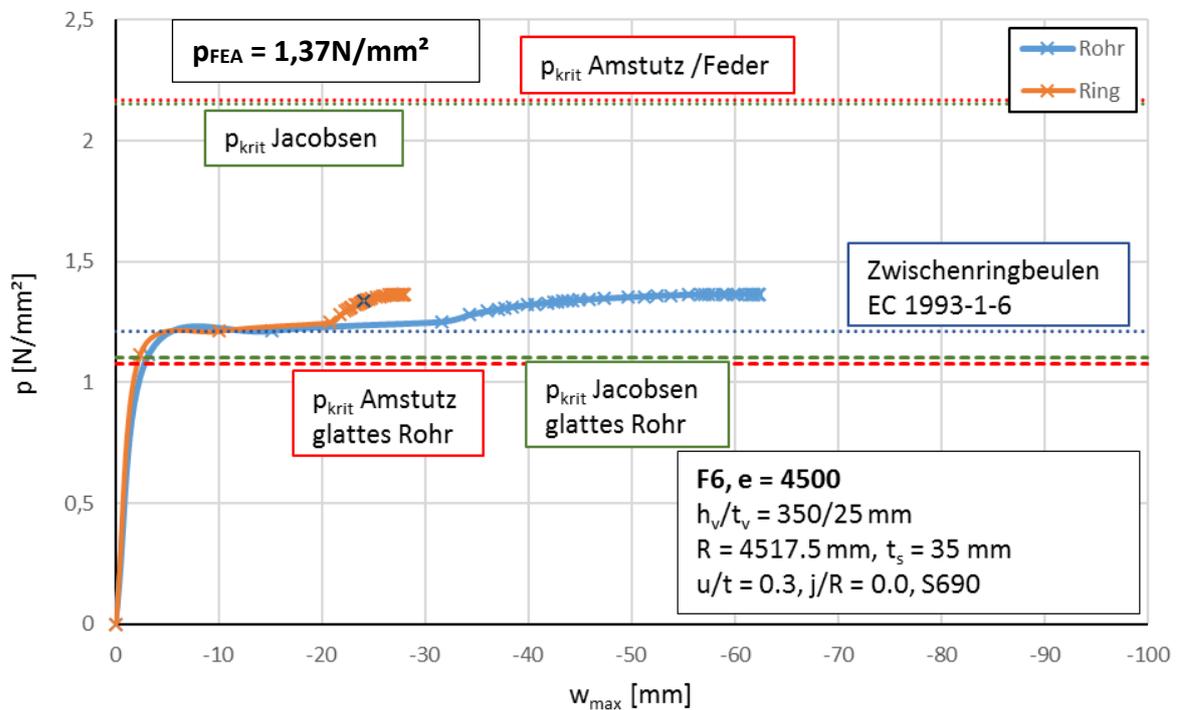


Abbildung 160: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6b, $e = 4500$, S690

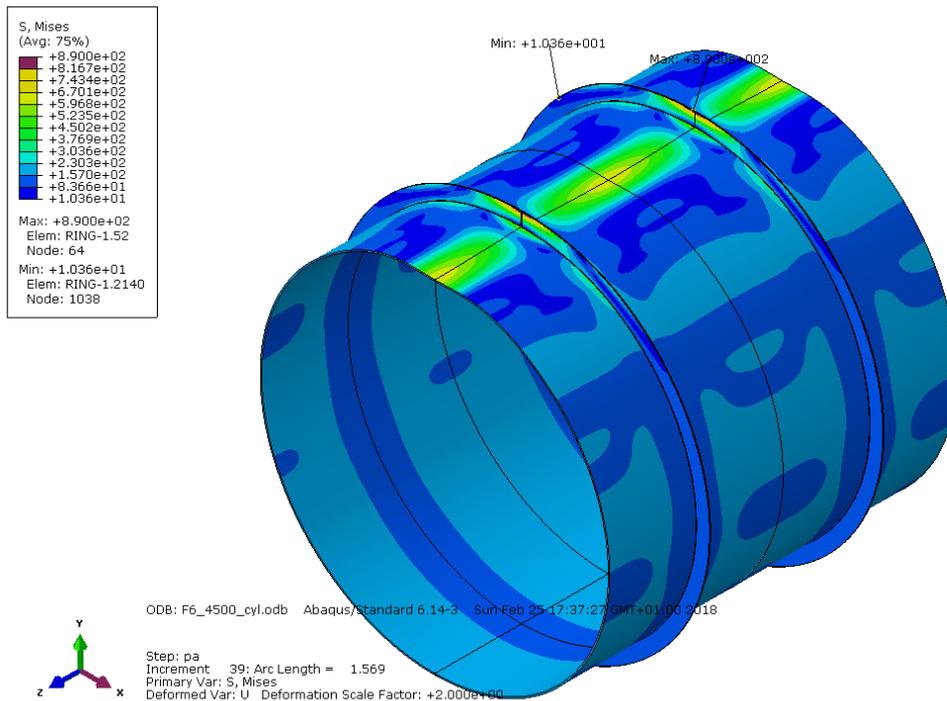


Abbildung 161: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6b mit $e=4500$, S890

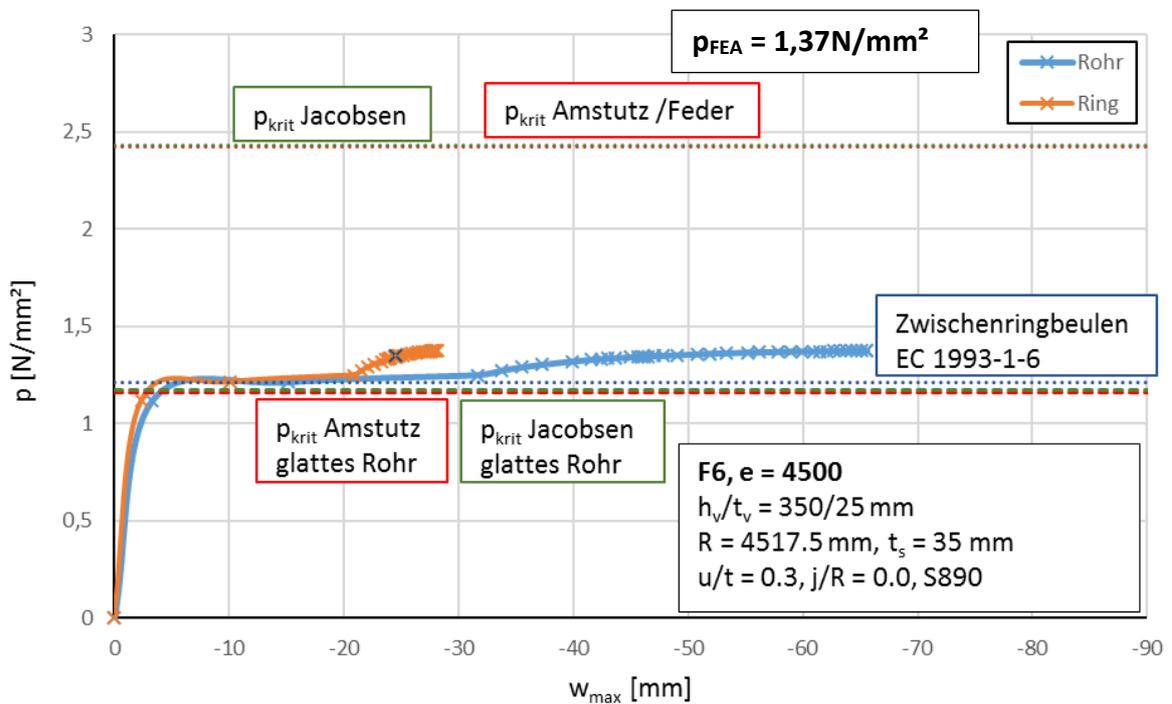


Abbildung 162: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6b, $e = 4500$, S890

7 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die in den Kapiteln 4 bis 6 angeführten Ergebnisse der analytischen sowie numerischen Berechnungen für den kritischen Außendruck der ringversteiften Panzerungen sind in diesem Abschnitt zusammengefasst. Für die einzelnen Anwendungsfälle sind die kritischen Außendrucke nach Amstutz/Feder [5] und Jacobsen [7] (Nachweis N1), der kritische Außendruck bei Erreichen der Fließgrenze in der Schale unter Anwendung der Kesselformel ($p_{0,max} = f_y \cdot t / r$), der kritische Außendruck aus der numerischen FEM-Berechnung und der Außendruck beim Zwischenringbeulen nach Eurocode 1996-1-6 [8] (Nachweis N2) in Form von Balkendiagrammen dargestellt.

Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt zunächst auf, dass die Ergebnisse der analytischen Berechnungsverfahren (Nachweis N1 und N2) oft keine zutreffenden Ergebnisse liefern.

Der realitätsnahe kritische Außendruck $p_{0,FEA}$ der ringversteiften Panzerung aus der numerischen Berechnung kommt zumeist zwischen dem Außendruck für den Nachweis N1 (Amstutz/Feder, Jacobsen) und den Nachweis N2 (Eurocode 1993-1-6 [8]) zu liegen, beziehungsweise orientiert sich der realitätsnahe kritische Außendruck eventuell an einem dieser beiden Werte.

Somit ist für jene Fälle, bei denen der realitätsnahe kritische Außendruck $p_{0,FEA}$ über dem kleineren der beiden Werte liegt, ein höherer kritischer Außendruck möglich als durch die bisherige Nachweisführung, bei der der jeweils kleinere Wert des Nachweises N1 oder N2 als kritischer Außendruck angesetzt wurde.

Außerdem erkennt man, dass der kritische Außendruck aus der numerischen Berechnung nie größer ist als der Außendruck $p_{0,max}$ aus der Anwendung der Kesselformel für die Schale.

7.1 Anwendungsfall 1

Beim Anwendungsfall 1a mit Ringabstand $e=875$ mm erkennt man, dass die Ergebnisse für den Nachweis N1 (Amstutz/Feder, Jacobsen) und N2 (EC 1993-1-6) bei niedrigen Fließgrenzen in etwa die gleiche Größenordnung aufweisen und der realitätsnahe Außendruck auch in diesem Bereich liegt. Mit zunehmender Fließgrenze weichen die kritischen Außendrucke für N1 und N2 deutlicher voneinander ab, wobei der Wert für N2 kleiner ist als für N1 und daher maßgebend wird. Der kritische Außendruck der realitätsnahen Berechnung $p_{0,FEA}$ kommt zwischen den beiden Werten zu liegen (siehe Abbildung 163).

Somit könnte für diesen Fall bei Ermittlung des kritischen Außendrucks über die Nachweise N1 und N2 ein realitätsnaher Wert für niedrige Fließgrenzen angegeben werden. Bei höheren Fließgrenzen wäre die Abweichung zum realitätsnahen kritischen Außendruck schon eklatant.

Für den Fall 1b mit Ringabstand $e=1750$ mm liegt der realitätsnahe kritische Außendruck durchwegs beim Wert für das Zwischenringbeulen nach Eurocode 1993-1-6. Hier wäre die Ermittlung des kritischen Außendrucks über N1 und N2 also wieder recht zutreffend (siehe Abbildung 164).

Bei den Ringabständen $e=3500$ mm und $e=7000$ mm kommt der kritische Außendruck aus der realitätsnahen Berechnung zwischen den beiden Werten für die Nachweise N1 und N2 zu liegen. Hier ist also wieder eine eklatante Abweichung gegeben (siehe Abbildung 165 und Abbildung 166).

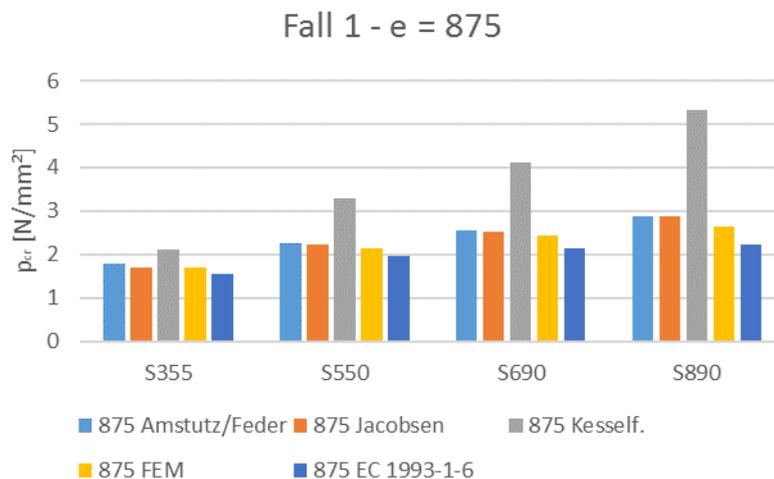


Abbildung 163: Fall 1a, e = 875

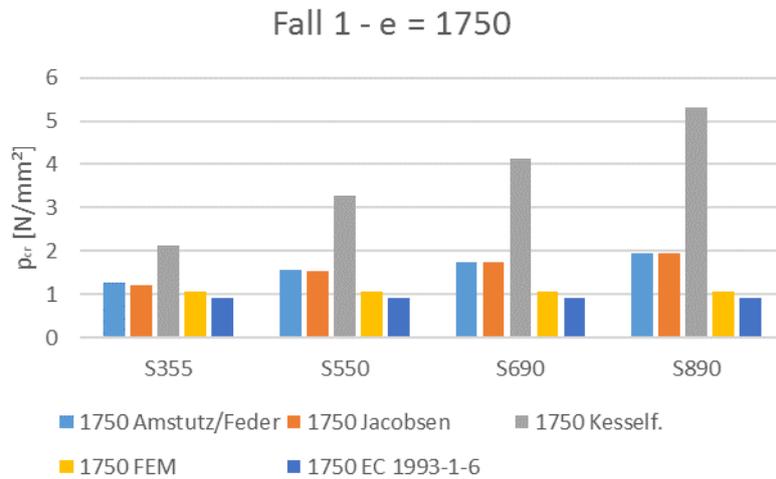


Abbildung 164: Fall 1b, e = 1750

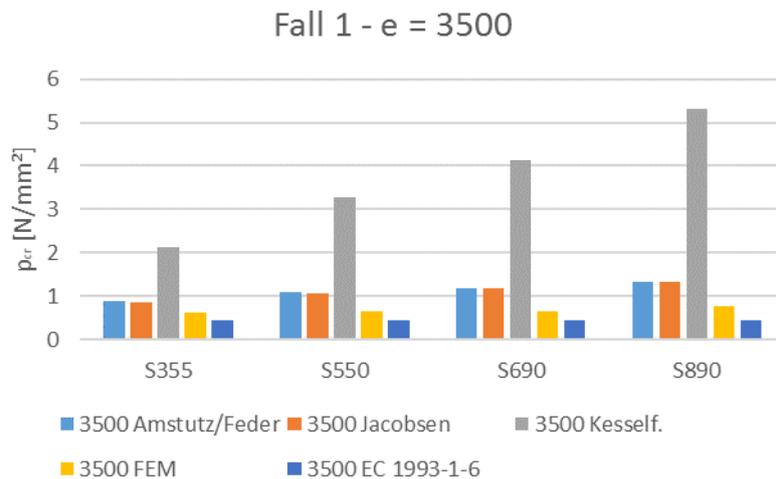


Abbildung 165: Fall 1c, e = 3500

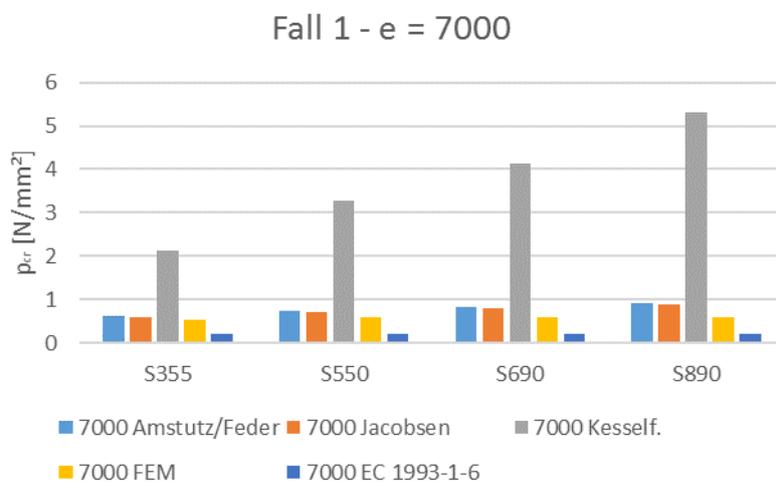


Abbildung 166: Fall 1d, e = 7000

7.2 Anwendungsfall 2

Beim Anwendungsfall 2 ist der kritische Außendruck für N1 stets größer als für N2, wodurch N2 maßgebend ist (siehe Abbildung 167 bis Abbildung 170).

Der realitätsnahe kritische Außendruck $p_{0,FEA}$ für die Ringabstände $e=750$ mm, $e=1500$ mm und $e= 2270$ mm liegt durchwegs im Bereich des Wertes für den Nachweis N2 (Zwischenringbeulen) und kann daher mit der analytischen Nachweisführung gut getroffen werden (Abbildung 167 bis Abbildung 169). Zum Ringabstand $e=1500$ mm ist zu sagen, dass hier der realitätsnahe kritische Außendruck unterhalb des Wertes für N2 liegt.

Für den Fall 2d mit $e=4800$ mm liegt der realitätsnahe kritische Außendruck näher beim Wert für N1 und würde daher mit Nachweis N2 unterschätzt werden (Abbildung 170).

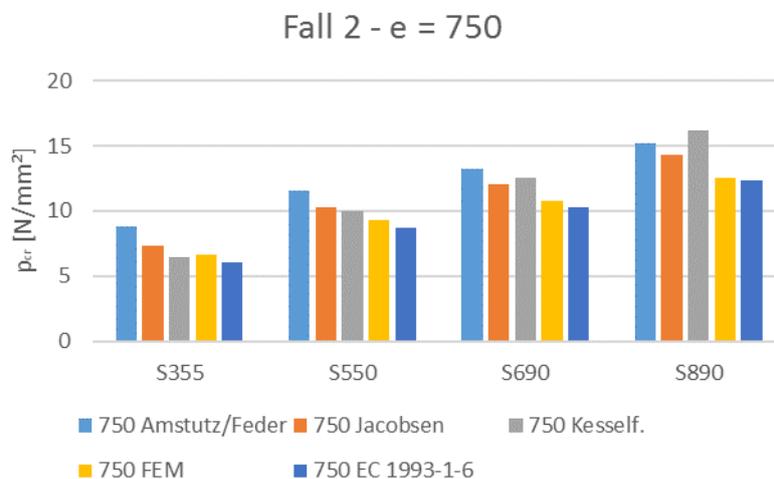


Abbildung 167: Fall 2a, e = 750

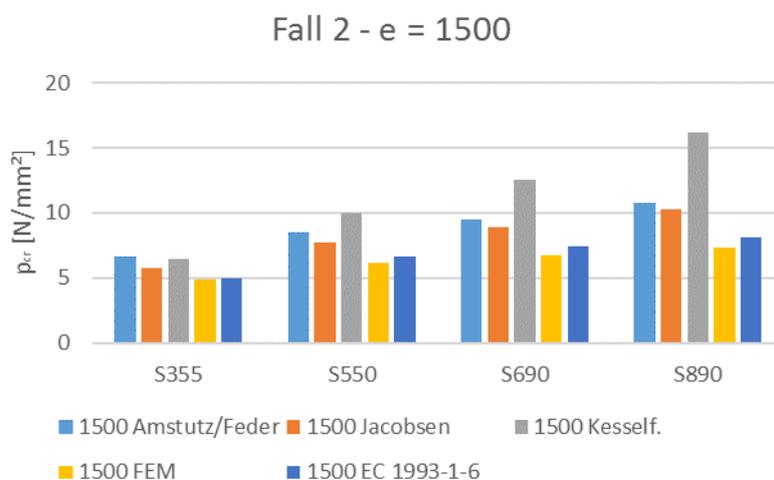


Abbildung 168: Fall 2b, e = 1500

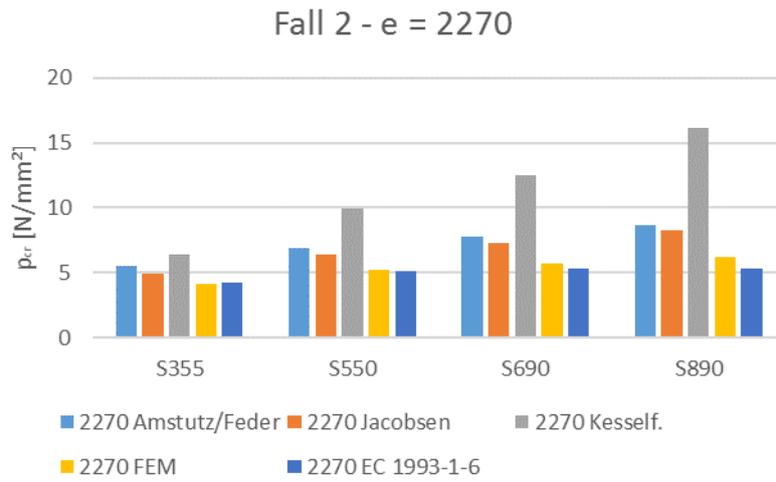


Abbildung 169: Fall 2c, e = 2270

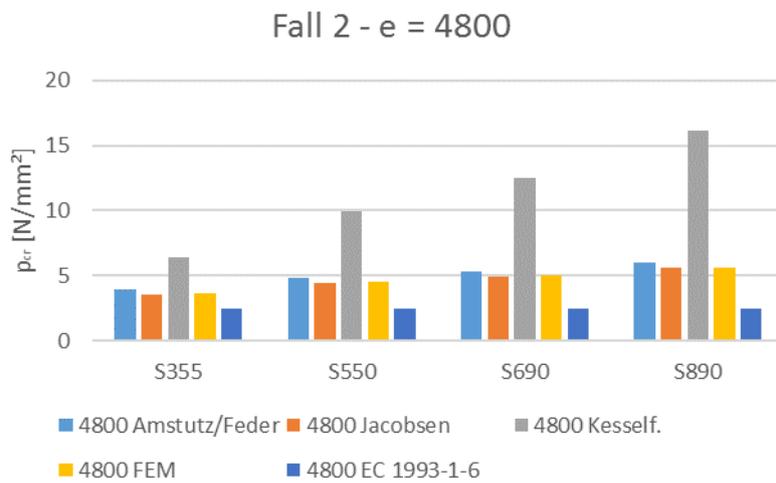


Abbildung 170: Fall 2d, e = 4800

7.3 Anwendungsfall 3

Der Anwendungsfall 3 weist für die beiden betrachteten Ringabstände für den Nachweis N2 aufgrund der dicken Rohrwandung jeweils einen größeren Wert auf als für den Nachweis N1 (siehe Abbildung 171 und Abbildung 172).

Der realitätsnahe kritische Außendruck $p_{0,FEA}$ liegt bei Fall 3a mit $e=1500$ mm für S355 unterhalb von N1, für S550 und S690 etwas über N1 und für S890 in einem Mittelbereich zwischen N1 und N2 (siehe Abbildung 171).

Bei Fall 3b mit $e=4500$ mm liegt der realitätsnahe kritische Außendruck $p_{0,FEA}$ stets zwischen N1 und N2. Für höhere Fließgrenzen liegt er näher bei N2 (siehe Abbildung 172).

Für den Anwendungsfall 3 ist eine Bestimmung des kritischen Außendrucks über die Nachweise N1 und N2 also nur mit größerer Ungenauigkeit möglich.

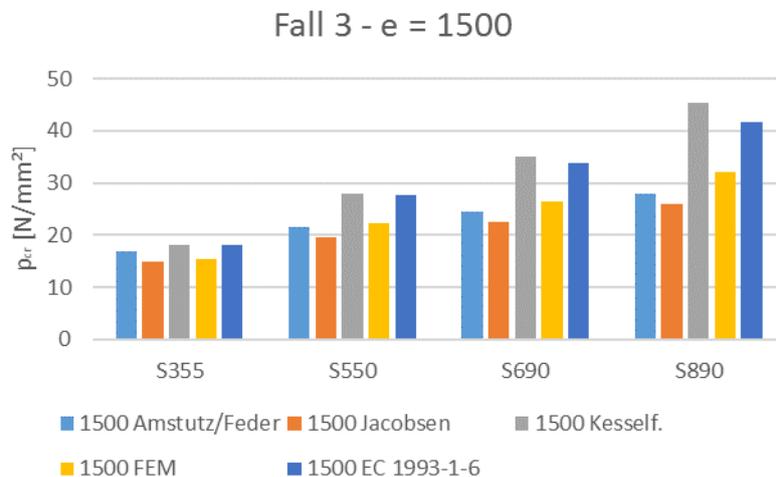


Abbildung 171: Fall 3a, e = 1500

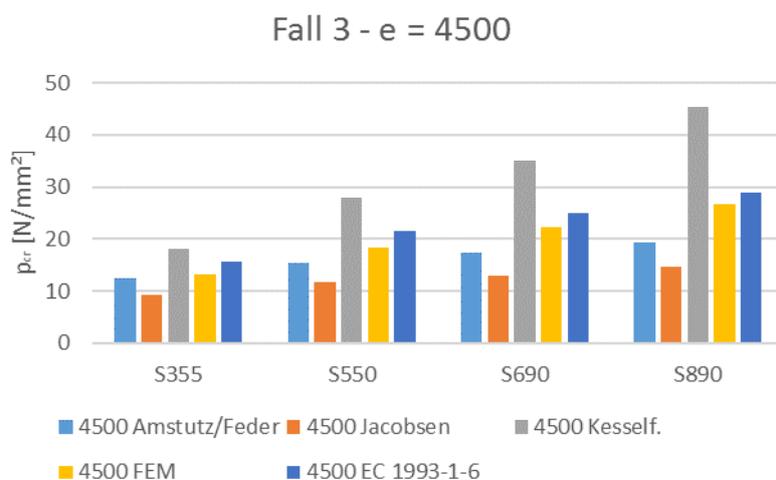


Abbildung 172: Fall 3b, e = 4500

7.4 Anwendungsfall 4

Beim Anwendungsfall 4 ist der kritische Außendruck für den Nachweis N1 größer als für den Nachweis N2 (siehe Abbildung 173).

Der realitätsnahe kritische Außendruck $p_{0,FEA}$ der GMNIA-Rechnung liegt für die Fließgrenzen 690 N/mm² und 890 N/mm² in der Nähe von N2 und für 355 N/mm² und 550 N/mm² zwischen N1 und N2.

Eine genaue Bestimmung des kritischen Außendruckes über die Nachweise N1 und N2 ist also auch für den Anwendungsfall 4 nur bedingt möglich.

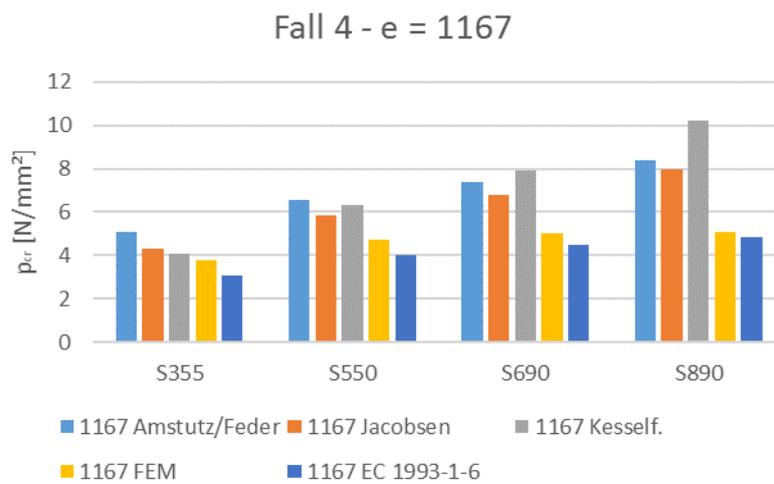


Abbildung 173: Fall 4, e = 1167

7.5 Anwendungsfall 5

Der kritische Außendruck für den Nachweis N1 liegt beim Anwendungsfall 5 für beide betrachteten Ringabstände über dem Wert für den Nachweis N2 (siehe Abbildung 174 und Abbildung 175).

Der realitätsnahe kritische Außendruck $p_{0,FEA}$ liegt bei Fall 5a mit $e=1000$ mm für alle Fließgrenzen in der Nähe von N1. Bei Fall 5b mit $e=2500$ mm liegt der realitätsnahe kritische Außendruck $p_{0,FEA}$ in der Nähe von N2 (Abbildung 174).

Für $e=1000$ mm weicht der kritische Außendruck bei Ermittlung über die Nachweise N1 und N2 also deutlich vom realitätsnahen kritischen Außendruck ab (Abbildung 175).

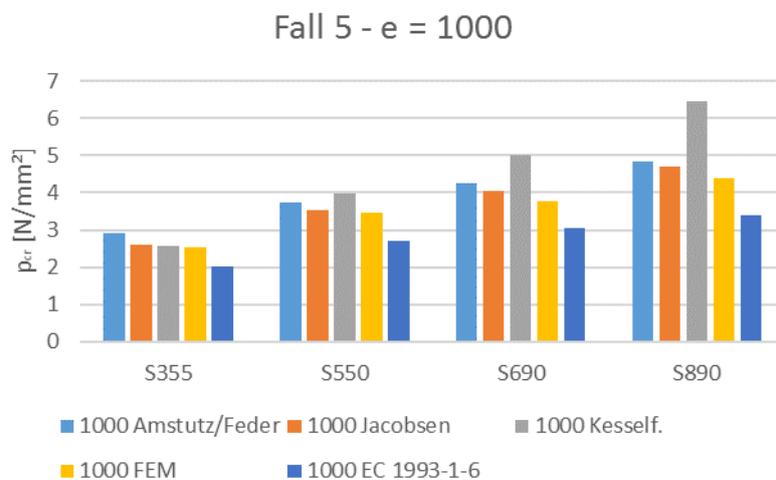


Abbildung 174: Fall 5a, e = 1000

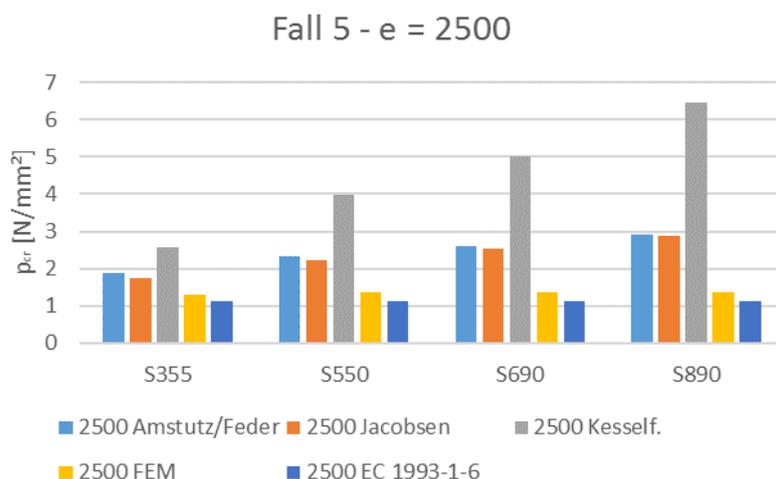


Abbildung 175: Fall 5b, e = 2500

7.6 Anwendungsfall 6

Der kritische Außendruck für den Nachweis N1 liegt beim Anwendungsfall 6 für beide betrachteten Ringabstände durchwegs über dem Wert für den Nachweis N2 (siehe Abbildung 176 und Abbildung 177).

Der realitätsnahe kritische Außendruck $p_{0,FEA}$ liegt bei Fall 6a mit $e=2000$ mm für S890 zwischen den Werten von N1 und N2. Für alle anderen Fließgrenzen beziehungsweise für Fall 6b mit $e=4500$ mm liegt der realitätsnahe kritische Außendruck in der Nähe von N2 (Abbildung 176).

Somit weicht der realitätsnahe kritische Außendruck nur für $e=2000$ mm und S890 deutlich von jenem bei Ermittlung über die Nachweise N1 und N2 ab (Abbildung 176).

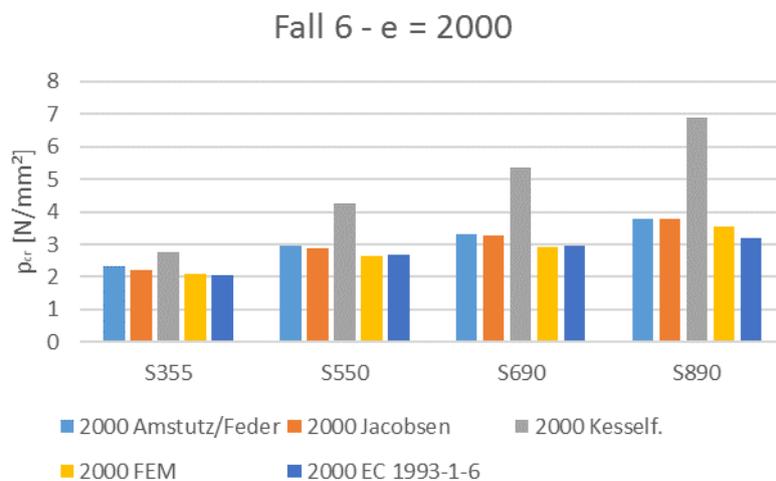


Abbildung 176: Fall 6a, e = 2000

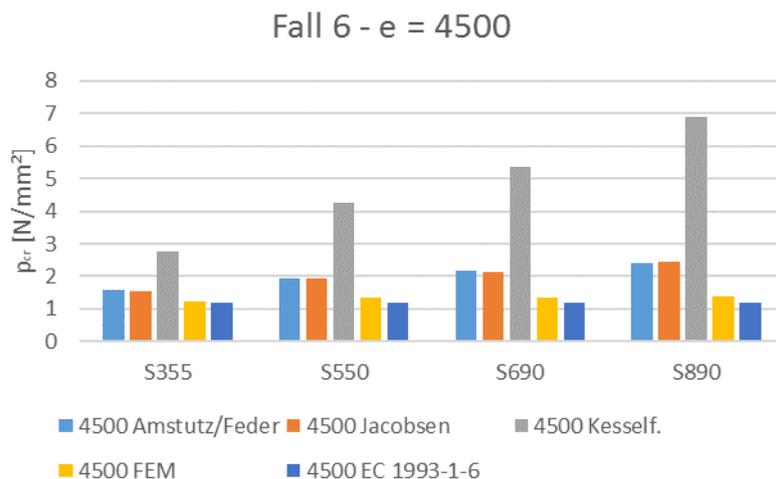


Abbildung 177: Fall 6b, e = 4500

Die Steifigkeitswerte A_V und I_V werden dabei unter den bekannten Annahmen von Feder (Gl. 11) beziehungsweise Jacobsen (Gl. 56) für die mitwirkende Breite b_m ermittelt (Bezeichnungen siehe Abbildung 178):

$$\text{Feder: } b_m = t_V + 1,56 * \sqrt{R_S * t_S}$$

$$\text{Jacobsen: } b_m = 1,56 * \sqrt{R * t}$$

Mit A_V und I_V kann nun entweder mit dem von Taras/Greiner aufbereiteten Verfahren von Amstutz/Feder [5] (Gl. 12 bis Gl. 47 in Abschnitt 2.1.3) oder mit den Bestimmungsgleichungen von Jacobsen [7] (Gl. 53 bis Gl. 55 in Abschnitt 2.1.4) der kritische Außendruck p_{Ring} für den Versteifungsring und das über die Breite b_m mitwirkende Stahlrohr ermittelt werden. Der kritische Außendruck p_{Ring} ergibt sich in dem Verfahren als Linienlast und kann durch Division durch die mitwirkende Breite in eine entsprechende Flächenlast $p_{a,Ring}$ umgerechnet werden:

$$p_{a,Ring} = \frac{p_{Ring}}{b_m} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad \text{Gl. 73}$$

In weiterer Folge wird das neue Bemessungsverfahren bei Ermittlung von $p_{a,Ring}$ nach Amstutz/Feder (Taras/Greiner) [5] „neues Bemessungsverfahren nach Amstutz/Feder“ und nach Jacobsen [7] „neues Bemessungsverfahren nach Jacobsen“ bezeichnet.

Für eine ringversteifte Panzerung ergibt sich unter der Annahme einer alleinigen Außendruckabtragung durch die Ringsteifen (Gesamtbelastung somit $p_{gesamt} = p_a * e_{Ring}$) der kritische Außendruck p_a^* zu:

$$p_a^* = \frac{p_{Ring}}{b_m} * \frac{b_m}{e_{Ring}} = p_{a,Ring} * \frac{b_m}{e_{Ring}} \quad \text{Gl. 74}$$

Die beiden Werte $p_{a,Ring}$ und p_a^* stellen den oberen beziehungsweise unteren Grenzwert des kritischen Außendruckes dar. Der kritische Außendruck aus der numerischen Berechnung liegt somit immer zwischen diesen beiden Grenzwerten. Außerdem kann dadurch sehr anschaulich gezeigt werden, dass über das Rohr zwischen den Ringen in den meisten Fällen ein wesentlicher Anteil der Außendruckbelastung abgetragen wird.

Für das neue Bemessungsverfahren kann nun eine Kalibrierung des kritischen Außendruckes mit den beiden Grenzwerten $p_{a,Ring}$ und p_a^* anhand der numerischen Berechnungsergebnisse $p_{0,FEA}$ erfolgen. Dazu wird ein Faktor f_{FEA} eingeführt, mit welchem eine Interpolation zwischen den beiden genannten Grenzwerten durchgeführt wird (siehe Gl. 78). Der Wert f_{FEA} liegt somit zwischen 0 und 1. Die Herleitung der Gl. 78 ist mit Hilfe der Gl. 75, Gl. 76 und Gl. 77 gezeigt.

Ist der Wert für $f_{FEA} = 0$, erhält man aus der nachstehenden Gleichung (Gl. 78) unmittelbar den kritischen Außendruck für den Versteifungsring $p_{a,Ring}$ alleine ($p_{FEA} = p_{a,Ring}$). Das bedeutet, dass das Rohr zwischen den Ringen vollständig an der Lastabtragung beteiligt ist (selbständige Übernahme von p_a im Rohrbereich) und dies somit den oberen Grenzfall des kritischen Außendruckes darstellt. Ist der Faktor $f_{FEA} = 1$, wird der kritische Außendruck abgemindert, sodass dieser dem Wert p_a^* entspricht ($p_{FEA} = p_{a,Ring} * b_m / e_{Ring} = p_a^*$).

$$p_{0,FEA} = p_{a, Ring} - f_{FEA} * (p_{a, Ring} - p_a^*) \quad \text{Gl. 75}$$

$$p_{0,FEA} = p_{a, Ring} - f_{FEA} * \left(p_{a, Ring} - p_{a, Ring} * \frac{b_m}{e_{Ring}} \right) \quad \text{Gl. 76}$$

$$p_{0,FEA} = p_{a, Ring} * \left(1 - f_{FEA} * \left(1 - \frac{b_m}{e_{Ring}} \right) \right) \quad \text{Gl. 77}$$

$$p_{0,FEA} = p_{a, Ring} * \left(1 + f_{FEA} * \frac{b_m - e_{Ring}}{e_{Ring}} \right) \quad \text{Gl. 78}$$

Der Faktor f_{FEA} hängt somit von der Mitwirkung des Stahlrohrs zwischen den Ringen ab. Dies äußert sich dadurch, dass die Größe von f_{FEA} vom Verhältnis des kritischen Außendruckes für das Zwischenringbeulen p_{zw} nach Eurocode 1993-1-6 [8] (siehe Abschnitt 2.2; bisher bezeichnet als $p_{0,cr}$) zum kritischen Außendruck für den Versteifungsring $p_{a, Ring}$ abhängt. Dieser Zusammenhang ist, nach Auswertung der Ergebnisse der Anwendungsfälle, nahezu linear und nimmt mit zunehmender Fließgrenze ab, wie an späterer Stelle gezeigt wird.

Mit diesem einfachen Zusammenhang kann nun f_{FEA} als Geradengleichung näherungsweise beschrieben werden. Die angenäherte Kurve liefert dann, mit dem Verhältnis von $p_{zw}/p_{a, Ring}$ als Eingangsgröße, einen Faktor f_{Bem} , der sich aus den rückgerechneten Werten f_{FEA} ergibt und mit welchem dann der kritische Außendruck unter Berücksichtigung beider Nachweise (N1 und N2) ermittelt werden kann (siehe zum Beispiel Abbildung 180). Dabei ergeben sich für unterschiedliche Fließgrenzen unterschiedliche Kurven.

Außerdem hat sich herausgestellt, dass der lineare Trend noch verstärkt werden kann, wenn anstatt des kritischen Außendruckes für das Zwischenringbeulen $p_{zw, EC}$ der Wert für das glatte Rohr nach Amstutz [5] $p_{Amstutz, glatt}$ beziehungsweise Jacobsen [7] $p_{Jacobsen, glatt}$ verwendet wird, wenn dieser $p_{zw, EC}$ nach Eurocode 1993-1-6 [8] übersteigt. Dadurch ergibt sich $p_{zw} = \max(p_{Amstutz, glatt}; p_{zw, EC})$. Diese Annahme ist für die Entwicklung der Kurven für f_{FEA} auf der sicheren Seite, da die betreffenden Datenpunkte nach „rechts“ wandern und die Ausgleichsgerade somit nach „oben“ verschieben. Dadurch wird für ein bestimmtes Verhältnis $p_{zw}/p_{a, Ring}$ der abgelesene Wert etwas größer, was eine stärkere Abminderung des kritischen Außendruckes bedeutet.

Die Formel zur Ermittlung des kritischen Außendruckes, unter Berücksichtigung des kritischen Außendruckes für den Versteifungsring $p_{a, Ring}$ und für das Zwischenringbeulen p_{zw} lautet dann für die Bemessung (entspricht Gl. 78 mit an FE-Ergebnissen kalibrierten Werten, anstatt f_{FEA} für die FE-Einzelberechnung):

$$p_{a, Bem} = p_{a, Ring} \cdot \left(1 + f_{Bem} \cdot \frac{b_m - e_{Ring}}{e_{Ring}} \right) \quad \text{Gl. 79}$$

oder

$$p_{a, Bem} = p_{a, Ring} \cdot \left(1 - f_{Bem} \cdot \left(1 - \frac{b_m}{e_{Ring}} \right) \right) \quad \text{Gl. 80}$$

Die Kurven für f_{Bem} wurden mit den vorliegenden Auswertungen für die Anwendungsfälle (Kapitel 4 bis 6) entwickelt. Der dazu außerdem notwendige kritische Außendruck für den Versteifungsring $p_{a,\text{Ring}}$ ist in den nachfolgenden Abschnitten angeführt, in denen auch die Entwicklung der Kurven für f_{Bem} dargestellt ist.

Zur Ausgleichsgerade für f_{Bem} ist zu sagen, dass diese mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt wurde. Um mit Hilfe des neuen Bemessungsverfahrens für den kritischen Außendruck keine zu günstigen Werte zu erhalten, wurde zu dem Ordinatenabschnitt der jeweiligen Kurve für f_{Bem} (S355, S550, S690, S890 für Amstutz/Feder und Jacobsen) pauschal der Wert $\Delta f_{\text{Bem}} = 0,05$ addiert. Dadurch ergeben sich für f_{Bem} Werte, mit denen der kritische Außendruck meist für alle Einzelergebnisse auf der sicheren Seite liegt. Eine Addition eines größeren Wertes zum Ordinatenabschnitt hätte zur Folge, dass sich der kritische Außendruck jeweils auf der sicheren Seite liegend ergibt, jedoch wird dadurch der kritische Außendruck für viele Fälle zu ungünstig, das heißt zu stark abgemindert. Ob ein anderer Wert als 0,05 zutreffender wäre ist durch Auswertung von weiteren Fällen zu untersuchen.

Außerdem wird der kritische Außendruck $p_{a,\text{Ring}}$ für manche Fälle zu stark abgemindert, wenn der Außendruck für das Zwischenringbeulen kleiner ist als der kritische Außendruck für das glatte Rohr nach der Theorie von Amstutz oder Jacobsen (Fälle mit großem Ringabstand). Aus diesem Grund wird für diese Fälle der kritische Außendruck für das glatte Rohr als Eingangsgröße in das Diagramm für f_{Bem} verwendet.

8.2 Neues Bemessungsverfahren – Berechnung nach Amstutz/Feder

8.2.1 Entwicklung der Kurven für f_{Bem}

In diesem Abschnitt ist nun die Entwicklung der Kurven für f_{Bem} für unterschiedliche Stahlgüten nach der Theorie von Amstutz/Feder [5] dargestellt. Dazu wurde zunächst der kritische Außendruck $p_{a,ring}$ für den Versteifungsring unter alleiniger Berücksichtigung der mitwirkenden Breite b_m nach der Theorie von Amstutz/Feder ermittelt. Die mitwirkende Breite b_m und der kritische Außendruck sind in der Tabelle 11 für alle Anwendungsfälle angegeben. In manchen Fällen wird für den kritischen Außendruck für den Versteifungsring mit dem von Taras/Greiner modifizierten Verfahren nach Amstutz/Feder bereits bei einer sehr kleinen Beulauslenkung aufgrund der großen Biegesteifigkeit eine sehr hohe Randspannung erreicht, sodass der kritische Außendruck mit diesem Verfahren für manche Stahlgüten nicht ermittelt werden kann. In diesen Fällen wird der kritische Außendruck $p_{a,ring,max}$ über die Kesselformel und somit über die Querschnittstragfähigkeit des Versteifungsringes, samt dem über die Breite b_m mitwirkenden Rohres, ermittelt (Gl. 81). Diese Fälle sind in der Tabelle 11 gelb markiert.

Die Einzelergebnisse für alle untersuchten Fälle sind zusammenfassend in Tabelle 12 bis Tabelle 15 ausgegriest, wobei auf die weiteren Werte in den Tabellen noch folgend eingegangen wird.

In Abbildung 179 ist für den Anwendungsfall 2 beispielhaft für den Versteifungsring und das über die Breite b_m mitwirkende Rohr die mit dem von Taras/Greiner modifizierten Verfahren nach Amstutz/Feder ermittelte Lastverformungskurve (blau) und der Außendruck bei der Anwendung der Kesselformel für S355 (rot) dargestellt. Man erkennt, wie bereits beschrieben, dass der kritische Außendruck beim Einbeulen des Versteifungsringes nie erreicht werden kann.

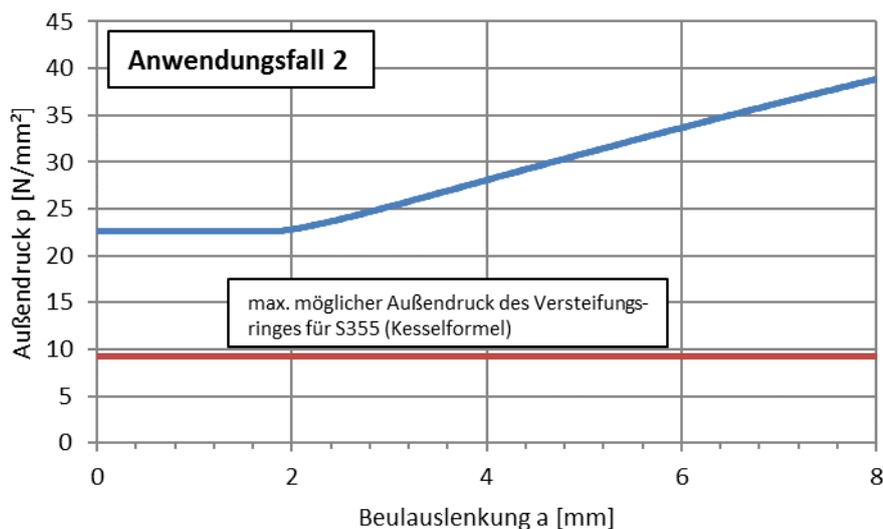


Abbildung 179: Außendruck p [N/mm²] – Beulauslenkung a [mm] (blau; siehe Abbildung 3); max. möglicher Außendruck (Kesselformel, rot)

$$p_{a, Ring, max} = f_y * \frac{A_{V+S}}{R_{V+S, unrund} * b_m} \quad \text{Gl. 81}$$

- A_{V+S} ... Querschnittsfläche des Versteifungsringes und des über die Breite b_m mitwirkenden Rohres
- $R_{V+S, unrund}$... Radius des unrunder Versteifungsringes im Schwerpunkt von A_{V+S}
- b_m ... mitwirkende Breite des Rohres

			S355	S550	S690	S890
	b_m [mm]	$R_{V+S, unrund}$ [mm]	$p_{a, Ring}$ [N/mm ²]			
Fall 1	318	2578,4	2,66	3,62	4,19	4,62
Fall 2	277	1309,2	9,20	14,25	17,88	22,89
Fall 3	454	1455,5	17,81	27,59	34,61	44,54
Fall 4	293	1759,6	6,14	9,51	11,93	15,38
Fall 5	392	2862,4	3,96	5,52	6,48	7,67
Fall 6	645	4675,6	3,52	4,83	5,62	6,61

Tabelle 11: Kritischer Außendruck des Versteifungsringes nach Amstutz/Feder (gelb = Werte $p_{a, Ring, max}$)

Im nächsten Schritt wurde der kritische Außendruck p_a^* für die Anwendungsfälle nach Gl. 74 ermittelt, wobei angenommen wird, dass die Außendruckabtragung nur über die Ringsteifen erfolgt. Anhand des kritischen Außendrucks aus der numerischen Berechnung p_{FEA} und den beiden Werten $p_{a, ring}$ und p_a^* , erfolgte dann die Ermittlung von f_{FEA} durch Umstellung von Gl. 78. Die Werte für f_{FEA} sind in den folgenden Diagrammen (Abbildung 180 bis Abbildung 184) für die jeweilige Stahlgüte gegen den größeren Wert von $p_{ZW, EC} / p_{a, Ring}$ beziehungsweise $p_{Amstutz, glatt} / p_{a, Ring}$ aufgetragen (Gl. 82; das zutreffende Verhältnis $p_{ZW} / p_{a, Ring}$ ist in der letzte Spalte von Tabelle 12 bis Tabelle 15 eingetragen). Dabei sind die jeweiligen Punkte eines Anwendungsfalles, das heißt für unterschiedliche Ringabstände, mit dem gleichen Symbol farbig dargestellt. Diese Werte dienen anschließend der Bestimmung der Ausgleichsgerade für f_{Bem} . Die als graue Kreise dargestellten Datenpunkten sind die direkt gegen $p_{ZW, EC} / p_{a, Ring}$ aufgetragenen Werte für f_{FEA} und zeigen, in welchen Fällen der kritische Außendruck für das glatte Rohr nach Amstutz ($p_{Amstutz, glatt}$) für die Bestimmung der Ausgleichsgerade von f_{Bem} verwendet wurde. Sind die grauen und farbigen Datenpunkte nicht ident, wurde der Wert für das glatte Rohr nach Amstutz ($p_{Amstutz, glatt}$) verwendet.

$$p_{ZW} = \max(p_{ZW, EC}; p_{Amstutz, glatt}) \quad \text{Gl. 82}$$

Mit den farbigen Datenpunkten wurde schließlich die Ausgleichsgerade mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Diese ist rot dargestellt. Die schwarz strichlierte Linie ist die um $\Delta f_{Bem} = 0,05$ versetzte Kurve, aus der f_{Bem} für das Bemessungsverfahren abgegriffen werden kann. Diese ist formelmäßig in Abbildung 180 bis Abbildung 183 eingetragen

Die in den Diagrammen verwendeten Werte sind, wie bereits erwähnt, in den anschließenden Tabellen (Tabelle 12 bis Tabelle 15) detailliert angeführt.

Neues Bemessungsverfahren für den kritischen Außendruck

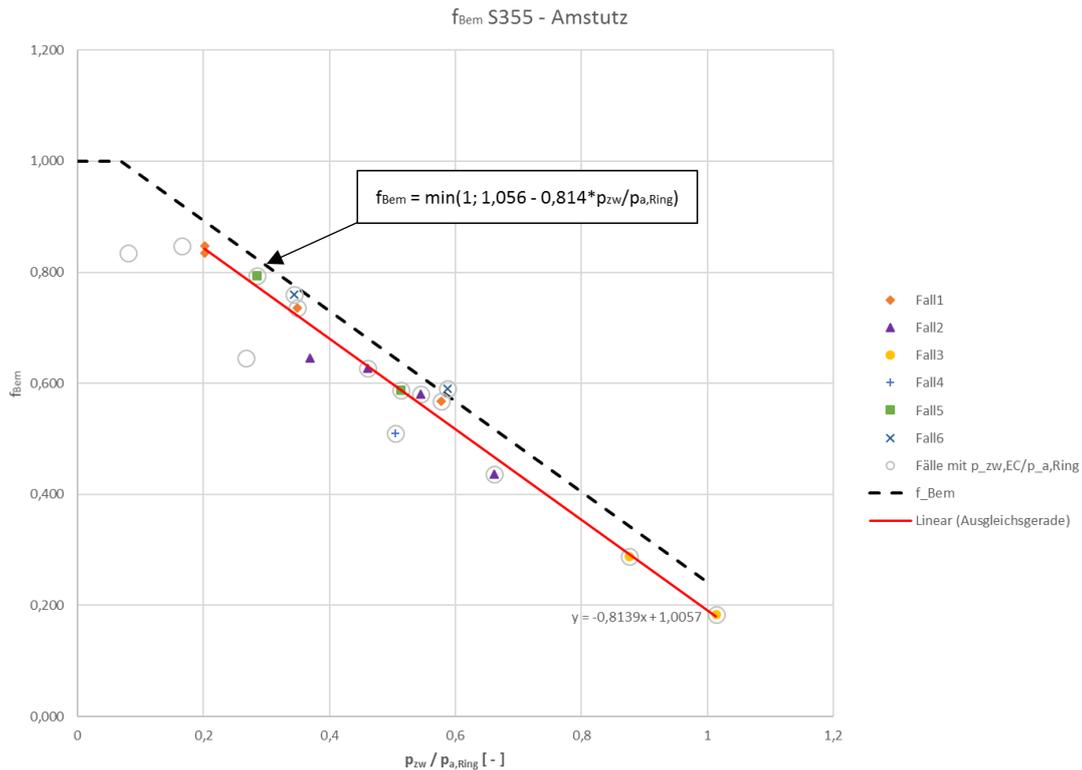


Abbildung 180: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Amstutz und einer Stahlgüte von S355

S355	b_m [mm]	e [mm]	p_a,Ring [N/mm²]	p_a* [N/mm²]	p_FEA [N/mm²]	f_FEA	p_ZW,EC3 [N/mm²]	p_Ams.,gl. [N/mm²]	p_ZW [N/mm²]	p_ZW/p_a,Ring
Fall 1a	317,546	875	2,663	0,966	1,700	0,568	1,538	0,537	1,538	0,577
Fall 1b	317,546	1750	2,663	0,483	1,060	0,735	0,928	0,537	0,928	0,348
Fall 1c	317,546	3500	2,663	0,242	0,610	0,848	0,440	0,537	0,537	0,202
Fall 1d	317,546	7000	2,663	0,121	0,540	0,835	0,215	0,537	0,537	0,202
Fall 2a	276,63	750	9,200	3,393	6,662	0,437	6,083	3,396	6,083	0,661
Fall 2b	276,63	1500	9,200	1,697	4,842	0,581	5,015	3,396	5,015	0,545
Fall 2c	276,63	2270	9,200	1,121	4,130	0,628	4,243	3,396	4,243	0,461
Fall 2d	276,63	4800	9,200	0,530	3,610	0,645	2,458	3,396	3,396	0,369
Fall 3a	453,87	1500	17,809	5,389	15,522	0,184	18,056	13,617	18,056	1,014
Fall 3b	453,87	4500	17,809	1,796	13,200	0,288	15,592	13,617	15,592	0,876
Fall 4	293,01	1167	6,136	1,541	3,793	0,510	3,097	1,629	3,097	0,505
Fall 5a	391,52	1000	3,965	1,552	2,546	0,588	2,036	0,752	2,036	0,513
Fall 5b	391,52	2500	3,965	0,621	1,310	0,794	1,131	0,752	1,131	0,285
Fall 6a	645,31	2000	3,517	1,135	2,110	0,591	2,067	0,844	2,067	0,587
Fall 6b	645,31	4500	3,517	0,504	1,230	0,759	1,209	0,844	1,209	0,344

Tabelle 12: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S355 nach der Theorie von Amstutz

Neues Bemessungsverfahren für den kritischen Außendruck

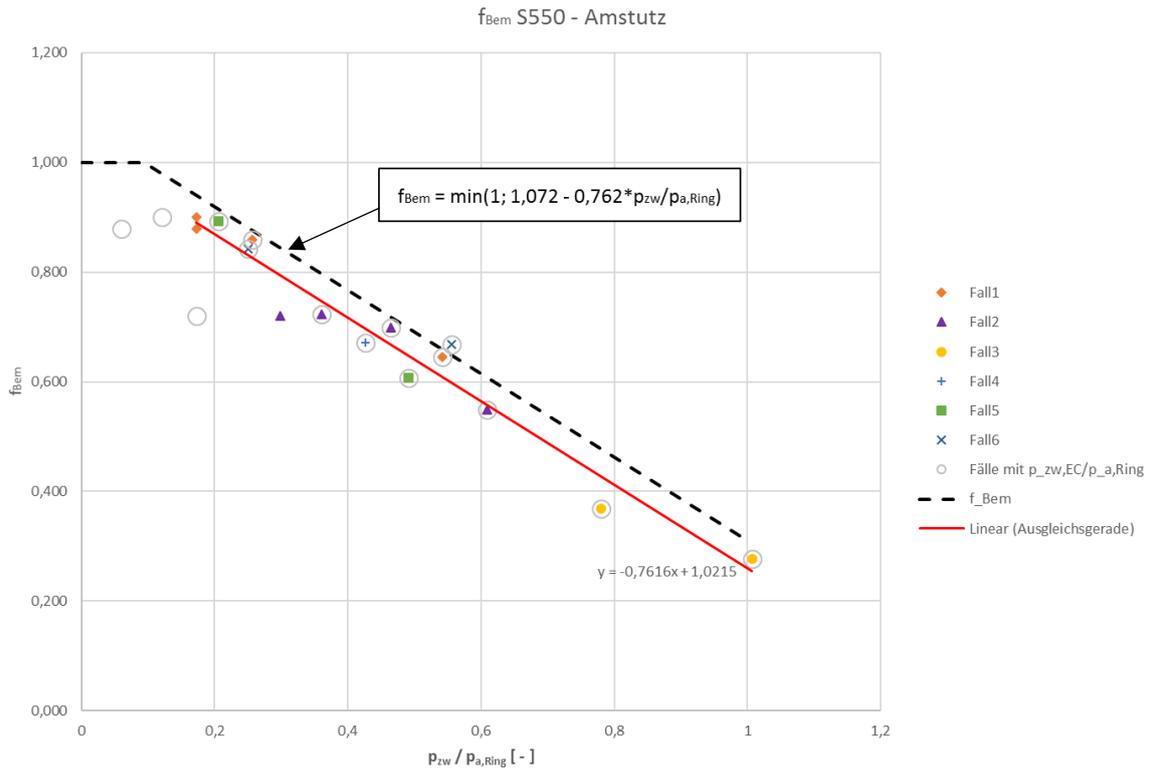


Abbildung 181: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Amstutz und einer Stahlgüte von S550

S550	b_m [mm]	e [mm]	p_a, Ring [N/mm ²]	p_a* [N/mm ²]	p_FEA [N/mm ²]	f_FEA	p_ZW, EC3 [N/mm ²]	p_Ams., gl. [N/mm ²]	p_ZW [N/mm ²]	p_ZW / p_a, Ring
Fall 1a	317,546	875	3,619	1,313	2,131	0,645	1,960	0,624	1,960	0,542
Fall 1b	317,546	1750	3,619	0,657	1,073	0,859	0,929	0,624	0,929	0,257
Fall 1c	317,546	3500	3,619	0,328	0,655	0,901	0,440	0,624	0,624	0,172
Fall 1d	317,546	7000	3,619	0,164	0,583	0,879	0,215	0,624	0,624	0,172
Fall 2a	276,63	750	14,254	5,257	9,315	0,549	8,680	4,246	8,680	0,609
Fall 2b	276,63	1500	14,254	2,629	6,127	0,699	6,620	4,246	6,620	0,464
Fall 2c	276,63	2270	14,254	1,737	5,199	0,723	5,132	4,246	5,132	0,360
Fall 2d	276,63	4800	14,254	0,821	4,577	0,720	2,458	4,246	4,246	0,298
Fall 3a	453,87	1500	27,591	8,349	22,273	0,276	27,778	18,476	27,778	1,007
Fall 3b	453,87	4500	27,591	2,783	18,433	0,369	21,528	18,476	21,528	0,780
Fall 4	293,01	1167	9,506	2,387	4,723	0,672	4,050	1,978	4,050	0,426
Fall 5a	391,52	1000	5,515	2,159	3,479	0,607	2,709	0,886	2,709	0,491
Fall 5b	391,52	2500	5,515	0,864	1,364	0,892	1,133	0,886	1,133	0,205
Fall 6a	645,31	2000	4,829	1,558	2,642	0,669	2,684	0,999	2,684	0,556
Fall 6b	645,31	4500	4,829	0,693	1,346	0,842	1,210	0,999	1,210	0,251

Tabelle 13: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S550 nach der Theorie von Amstutz

Neues Bemessungsverfahren für den kritischen Außendruck

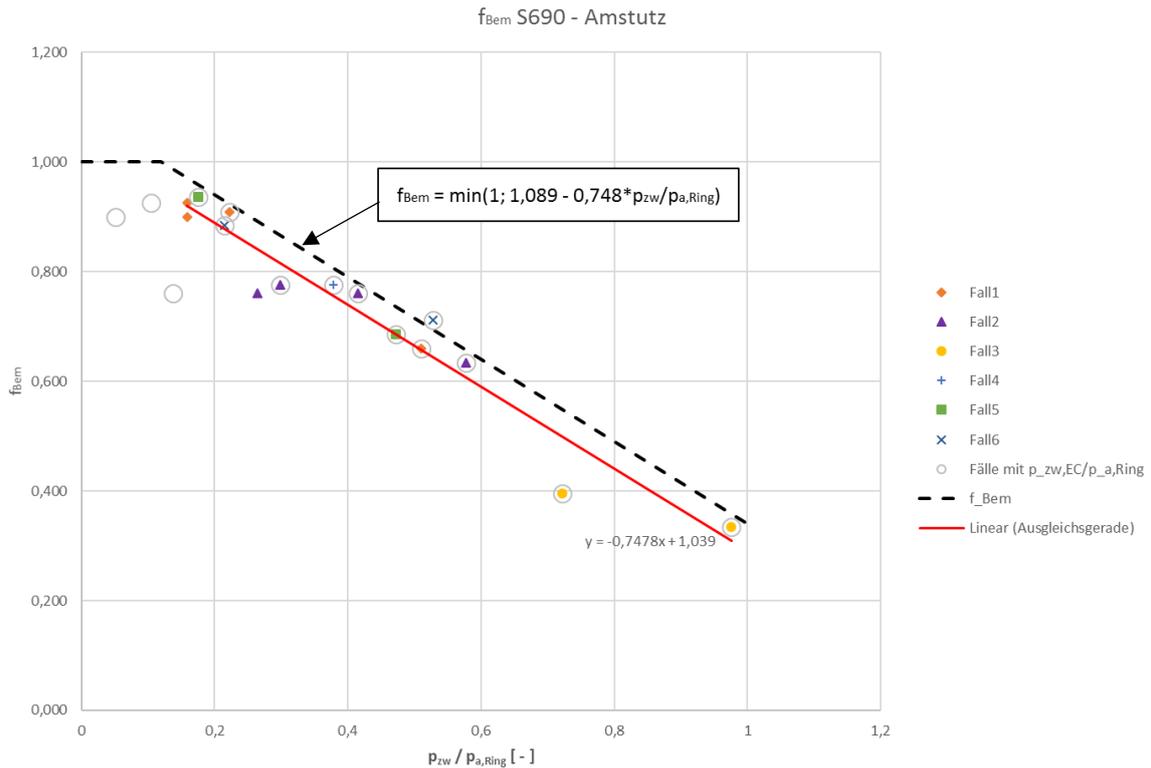


Abbildung 182: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Amstutz und einer Stahlgüte von S690

S690	b _m [mm]	e [mm]	p _{a, Ring} [N/mm ²]	p _a * [N/mm ²]	p _{FEA} [N/mm ²]	f _{FEA}	p _{ZW, EC3} [N/mm ²]	p _{Ams., gl.} [N/mm ²]	p _{ZW} [N/mm ²]	p _{ZW} /p _{a, Ring}
Fall 1a	317,546	875	4,189	1,520	2,427	0,660	2,137	0,664	2,137	0,510
Fall 1b	317,546	1750	4,189	0,760	1,073	0,909	0,929	0,664	0,929	0,222
Fall 1c	317,546	3500	4,189	0,380	0,661	0,926	0,440	0,664	0,664	0,159
Fall 1d	317,546	7000	4,189	0,190	0,592	0,900	0,215	0,664	0,664	0,159
Fall 2a	276,63	750	17,882	6,596	10,734	0,633	10,320	4,713	10,320	0,577
Fall 2b	276,63	1500	17,882	3,298	6,787	0,761	7,424	4,713	7,424	0,415
Fall 2c	276,63	2270	17,882	2,179	5,710	0,775	5,333	4,713	5,333	0,298
Fall 2d	276,63	4800	17,882	1,031	5,074	0,760	2,458	4,713	4,713	0,264
Fall 3a	453,87	1500	34,614	10,474	26,535	0,335	33,776	21,394	33,776	0,976
Fall 3b	453,87	4500	34,614	3,491	22,312	0,395	24,993	21,394	24,993	0,722
Fall 4	293,01	1167	11,926	2,994	4,997	0,776	4,508	2,165	4,508	0,378
Fall 5a	391,52	1000	6,477	2,536	3,773	0,686	3,058	0,952	3,058	0,472
Fall 5b	391,52	2500	6,477	1,014	1,362	0,936	1,133	0,952	1,133	0,175
Fall 6a	645,31	2000	5,623	1,814	2,915	0,711	2,971	1,077	2,971	0,528
Fall 6b	645,31	4500	5,623	0,806	1,366	0,884	1,210	1,077	1,210	0,215

Tabelle 14: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S690 nach der Theorie von Amstutz

Neues Bemessungsverfahren für den kritischen Außendruck

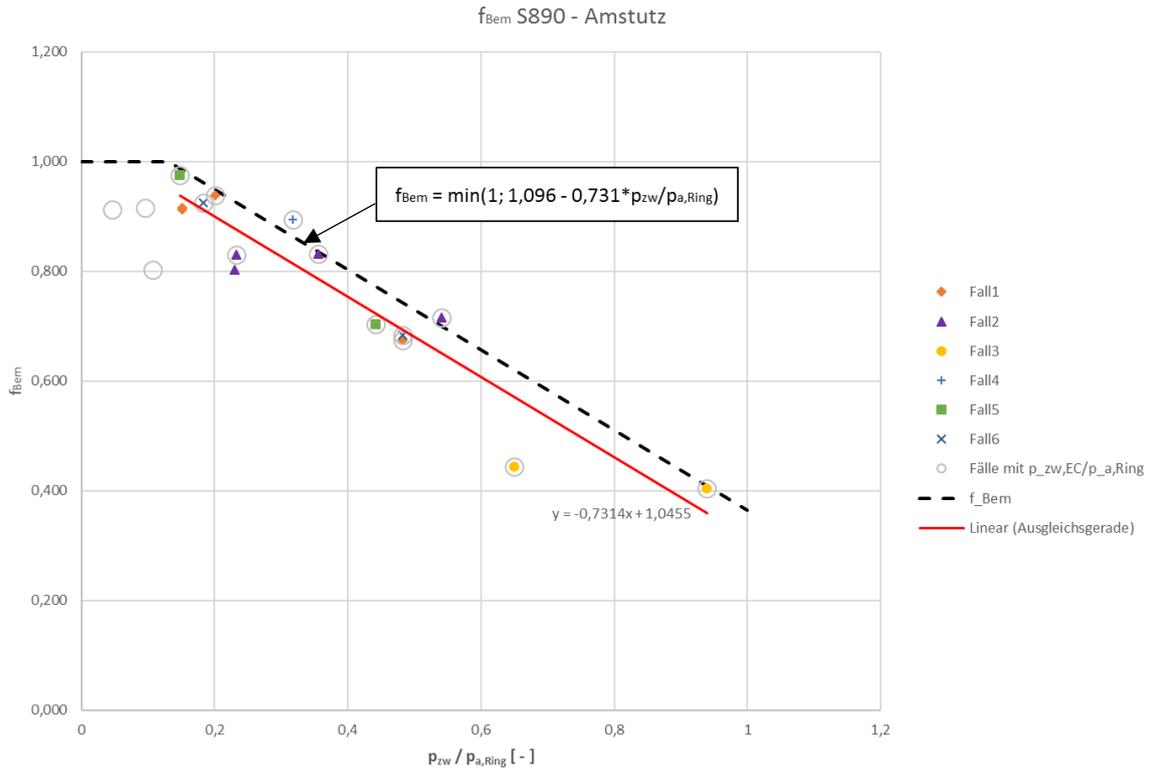


Abbildung 183: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Amstutz und einer Stahlgüte von S890

S890	b_m [mm]	e [mm]	p_a,Ring [N/mm ²]	p_a* [N/mm ²]	p_FEA [N/mm ²]	f_FEA	p_ZW,EC3 [N/mm ²]	p_Ams.,gl. [N/mm ²]	p_ZW [N/mm ²]	p_ZW/p_a,Ring
Fall 1a	317,546	875	4,621	1,677	2,634	0,675	2,228	0,701	2,228	0,482
Fall 1b	317,546	1750	4,621	0,838	1,073	0,938	0,929	0,701	0,929	0,201
Fall 1c	317,546	3500	4,621	0,419	0,770	0,917	0,440	0,701	0,701	0,152
Fall 1d	317,546	7000	4,621	0,210	0,592	0,913	0,215	0,701	0,701	0,152
Fall 2a	276,63	750	22,887	8,442	12,540	0,716	12,380	5,269	12,380	0,541
Fall 2b	276,63	1500	22,887	4,221	7,355	0,832	8,138	5,269	8,138	0,356
Fall 2c	276,63	2270	22,887	2,789	6,192	0,831	5,329	5,269	5,329	0,233
Fall 2d	276,63	4800	22,887	1,319	5,580	0,802	2,458	5,269	5,269	0,230
Fall 3a	453,87	1500	44,536	13,476	31,992	0,404	41,814	24,808	41,814	0,939
Fall 3b	453,87	4500	44,536	4,492	26,751	0,444	28,948	24,808	28,948	0,650
Fall 4	293,01	1167	15,382	3,862	5,074	0,895	4,878	2,373	4,878	0,317
Fall 5a	391,52	1000	7,670	3,003	4,385	0,704	3,388	1,019	3,388	0,442
Fall 5b	391,52	2500	7,670	1,201	1,362	0,975	1,133	1,019	1,133	0,148
Fall 6a	645,31	2000	6,608	2,132	3,546	0,684	3,185	1,158	3,185	0,482
Fall 6b	645,31	4500	6,608	0,948	1,373	0,925	1,210	1,158	1,210	0,183

Tabelle 15: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S890 nach der Theorie von Amstutz

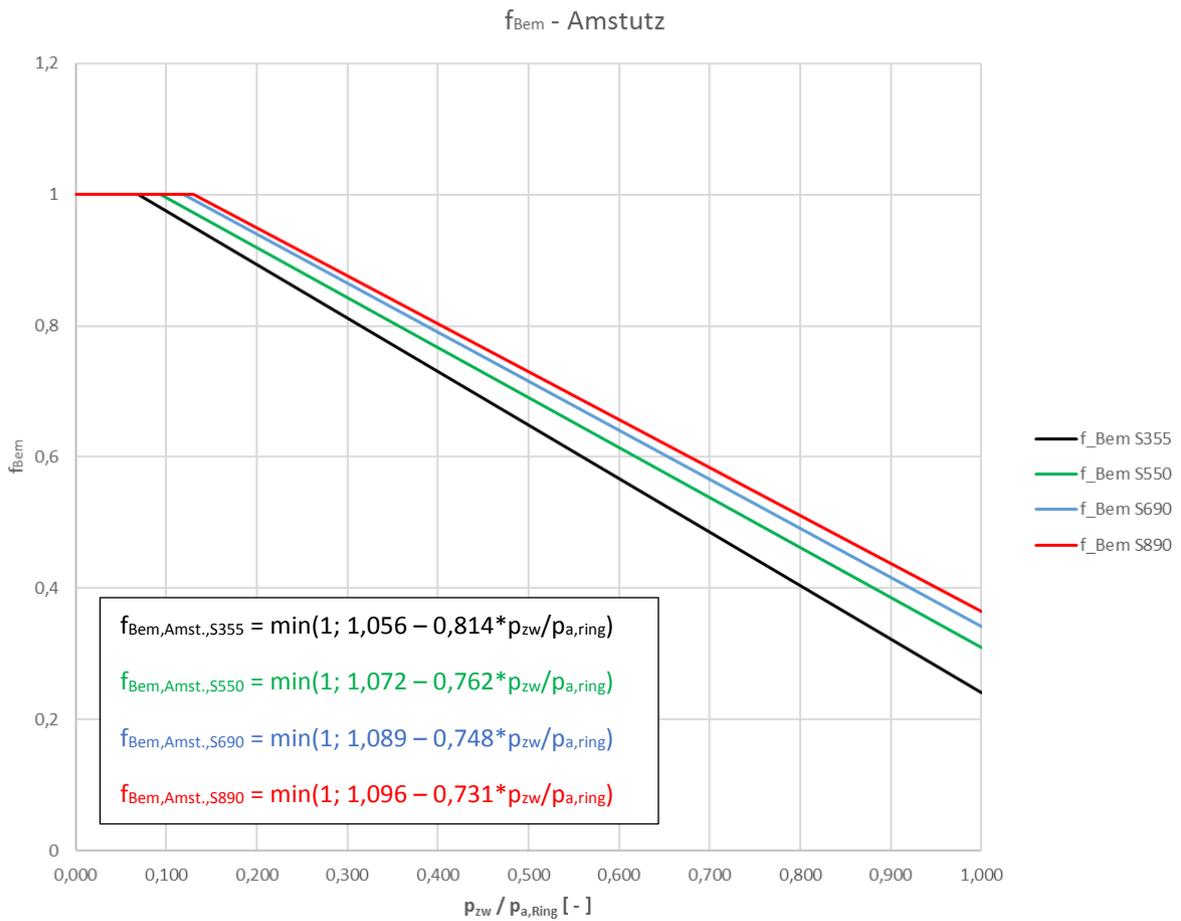


Abbildung 184: f_{Bem} für die Stahlgüten S355, S550, S690 und S890 nach der Theorie von Amstutz

In Abbildung 184 sind die ermittelten Kurven für f_{Bem} nach der Theorie von Amstutz für jede untersuchte Fließgrenze dargestellt (strichlierte Kurven aus Abbildung 180 bis Abbildung 183). Zusätzlich ist für jede Kurve die zugehörige Formel angegeben. Man erkennt, dass die Kurven mit zunehmender Fließgrenze „nach oben wandern“, wodurch sich für gleiche Verhältnisse von $p_{zw}/p_{a,ring}$ bei höheren Fließgrenzen ein größerer Wert für f_{Bem} ergibt und dadurch eine stärkere Abminderung von $p_{a,ring}$ mit der Bemessungsformel (Gl. 79) erfolgt.

8.2.2 Kritische Außendrucke mit dem neuen Bemessungsverfahren

In diesem Kapitel sind die mit dem neuen Bemessungsverfahren ermittelten kritischen Außendrucke dargestellt.

Die Bestimmung der Außendrucke erfolgte nach Gl. 79, nach vorheriger Ermittlung des Faktors f_{Bem} über das größere Verhältnis von entweder $p_{zw,EC}/p_{a,ring}$ oder $p_{Amstutz,glatt}/p_{a,ring}$. Der größere dieser beiden Werte (p_{zw} siehe Gl. 82) wird deswegen verwendet, weil bei Fällen mit großen Ringabständen der mit dem neuen Bemessungsverfahren ermittelte kritische Außendruck sonst zu stark abgemindert wird. Zu den Fällen mit großem Ringabstand ist anzumerken, dass sich das neue Bemessungsverfahren weniger gut eignet. Die Gründe dafür werden in Kapitel 8.4.1 (Fälle mit schlechter Anwendbarkeit des Bemessungsverfahrens) erläutert.

Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen (Tabelle 16 bis Tabelle 19) angeführt. Dabei sind für jeden Anwendungsfall bei unterschiedlichen Fließgrenzen (S355, S550, S690, S890) die Ergebnisse für $p_{a,ring}$, p_{zw} (lt. Gl. 82), $p_{zw}/p_{a,ring}$, f_{Bem} , der mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Amstutz/Feder ermittelte kritische Außendruck $p_{a,Bem}$, der kritische Außendruck aus der numerischen Berechnung p_{FEA} , der mit dem modifizierten Verfahren nach Taras/Greiner ermittelte kritische Außendruck für den Versteifungsring nach Amstutz/Feder p_{Amst} (Nachweis N1), der kritische Außendruck für das glatte Rohr nach Amstutz $p_{Ams,gl.}$, der kritische Außendruck für das Zwischenringbeulen nach Eurocode 1993-1-6 $p_{ZW,EC3}$ (Nachweis N2) und das Verhältnis p_{Bem}/p_{FEA} angegeben. Bei Betrachtung vom Verhältnis p_{Bem}/p_{FEA} erkennt man, dass dieser Wert meistens knapp unter 100 Prozent liegt und daher der mit dem neuen Bemessungsverfahren ermittelte kritische Außendruck $p_{a,Bem}$ den realitätsnahen kritischen Außendruck p_{FEA} zumeist auf der sicheren Seite liegend gut trifft.

Des Weiteren sind in Form von Balkendiagrammen p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$ und der aus der Kesselformel für die Schale resultierende Außendruck $p_{a,Schale,max}$ für den jeweiligen Fall mit den unterschiedlichen Fließgrenzen dargestellt (Abbildung 185 bis Abbildung 208).

In den Balkendiagrammen ist ersichtlich, dass der kritische Außendruck $p_{a,Bem}$ mit dem neuen Bemessungsverfahren in den meisten Fällen viel näher beim realitätsnahen kritischen Außendruck $p_{a,FEA}$ liegt, als der aus dem Minimum der Nachweise N1 (Amstutz/Feder) und N2 (Zwischenringbeulen) ermittelte in der Praxis übliche Wert. Außerdem erkennt man, dass der realitätsnahe kritische Außendruck $p_{a,FEA}$ in der Regel kleiner ist als jener aus der Anwendung der Kesselformel für die Schale.

Neues Bemessungsverfahren für den kritischen Außendruck

S355	b_m [mm]	e [mm]	p_a,Ring [N/mm ²]	p_zw [N/mm ²]	p_zw/ p_a,Ring	f_Bem	p_Bem [N/mm ²]	p_FEA [N/mm ²]	p_Amst [N/mm ²]	p_Ams.,gl. [N/mm ²]	p_ZW,EC3 [N/mm ²]	p_Bem/ p_FEA
Fall 1a	318	875	2,663	1,538	0,577	0,586	1,669	1,700	1,791	0,537	1,538	98,2%
Fall 1b	318	1750	2,663	0,928	0,348	0,772	0,980	1,060	1,273	0,537	0,928	92,5%
Fall 1c	318	3500	2,663	0,537	0,202	0,892	0,504	0,610	0,890	0,537	0,440	82,6%
Fall 1d	318	7000	2,663	0,537	0,202	0,892	0,396	0,540	0,623	0,537	0,215	73,3%
Fall 2a	277	750	9,200	6,083	0,661	0,517	6,195	6,662	8,852	3,396	6,083	93,0%
Fall 2b	277	1500	9,200	5,015	0,545	0,612	4,608	4,842	6,694	3,396	5,015	95,2%
Fall 2c	277	2270	9,200	4,243	0,461	0,680	3,704	4,130	5,562	3,396	4,243	89,7%
Fall 2d	277	4800	9,200	3,396	0,369	0,755	2,652	3,610	3,949	3,396	2,458	73,5%
Fall 3a	454	1500	17,809	18,056	1,014	0,230	14,947	15,522	16,949	13,617	18,056	96,3%
Fall 3b	454	4500	17,809	15,592	0,876	0,343	12,316	13,200	12,382	13,617	15,592	93,3%
Fall 4	293	1167	6,136	3,097	0,505	0,645	3,173	3,793	5,098	1,629	3,097	83,6%
Fall 5a	392	1000	3,965	2,036	0,513	0,638	2,426	2,546	2,909	0,752	2,036	95,3%
Fall 5b	392	2500	3,965	1,131	0,285	0,823	1,211	1,310	1,886	0,752	1,131	92,5%
Fall 6a	645	2000	3,517	2,067	0,587	0,577	2,142	2,110	2,335	0,844	2,067	101,5%
Fall 6b	645	4500	3,517	1,209	0,344	0,776	1,179	1,230	1,582	0,844	1,209	95,9%

Tabelle 16: Ermittlung des kritischen Außendruckes p_{Bem} für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S355 und $p_{a,Ring}$ nach Amstutz

S550	b_m [mm]	e [mm]	p_a,Ring [N/mm ²]	p_zw [N/mm ²]	p_zw/ p_a,Ring	f_Bem	p_Bem [N/mm ²]	p_FEA [N/mm ²]	p_Amst [N/mm ²]	p_Ams.,gl. [N/mm ²]	p_ZW,EC3 [N/mm ²]	p_Bem/ p_FEA
Fall 1a	318	875	3,619	1,960	0,542	0,659	2,100	2,131	2,266	0,624	1,960	98,5%
Fall 1b	318	1750	3,619	0,929	0,257	0,876	1,024	1,073	1,572	0,624	0,929	95,4%
Fall 1c	318	3500	3,619	0,624	0,172	0,940	0,525	0,655	1,082	0,624	0,440	80,1%
Fall 1d	318	7000	3,619	0,624	0,172	0,940	0,371	0,583	0,751	0,624	0,215	63,5%
Fall 2a	277	750	14,254	8,680	0,609	0,608	8,787	9,315	11,556	4,246	8,680	94,3%
Fall 2b	277	1500	14,254	6,620	0,464	0,718	5,909	6,127	8,472	4,246	6,620	96,4%
Fall 2c	277	2270	14,254	5,132	0,360	0,797	4,274	5,199	6,936	4,246	5,132	82,2%
Fall 2d	277	4800	14,254	4,246	0,298	0,845	2,908	4,577	4,829	4,246	2,458	63,5%
Fall 3a	454	1500	27,591	27,778	1,007	0,305	21,727	22,273	21,664	18,476	27,778	97,5%
Fall 3b	454	4500	27,591	21,528	0,780	0,477	15,751	18,433	15,463	18,476	21,528	85,4%
Fall 4	293	1167	9,506	4,050	0,426	0,747	4,188	4,723	6,544	1,978	4,050	88,7%
Fall 5a	392	1000	5,515	2,709	0,491	0,697	3,175	3,479	3,751	0,886	2,709	91,3%
Fall 5b	392	2500	5,515	1,133	0,205	0,915	1,259	1,364	2,336	0,886	1,133	92,3%
Fall 6a	645	2000	4,829	2,684	0,556	0,648	2,709	2,642	2,959	0,999	2,684	102,5%
Fall 6b	645	4500	4,829	1,210	0,251	0,881	1,186	1,346	1,953	0,999	1,210	88,2%

Tabelle 17: Ermittlung des kritischen Außendruckes p_{Bem} für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S550 und $p_{a,Ring}$ nach Amstutz

S690	b_m [mm]	e [mm]	p_a,Ring [N/mm ²]	p_zw [N/mm ²]	p_zw/ p_a,Ring	f_Bem	p_Bem [N/mm ²]	p_FEA [N/mm ²]	p_Amst [N/mm ²]	p_Ams.,gl. [N/mm ²]	p_ZW,EC3 [N/mm ²]	p_Bem/ p_FEA
Fall 1a	318	875	4,189	2,137	0,510	0,708	2,301	2,427	2,541	0,664	2,137	94,8%
Fall 1b	318	1750	4,189	0,929	0,222	0,923	1,023	1,073	1,745	0,664	0,929	95,4%
Fall 1c	318	3500	4,189	0,664	0,159	0,970	0,493	0,661	1,194	0,664	0,440	74,5%
Fall 1d	318	7000	4,189	0,664	0,159	0,970	0,308	0,592	0,827	0,664	0,215	52,1%
Fall 2a	277	750	17,882	10,320	0,577	0,657	10,462	10,734	13,210	4,713	10,320	97,5%
Fall 2b	277	1500	17,882	7,424	0,415	0,779	6,528	6,787	9,511	4,713	7,424	96,2%
Fall 2c	277	2270	17,882	5,333	0,298	0,866	4,284	5,710	7,735	4,713	5,333	75,0%
Fall 2d	277	4800	17,882	4,713	0,264	0,892	2,852	5,074	5,345	4,713	2,458	56,2%
Fall 3a	454	1500	34,614	33,776	0,976	0,359	25,940	26,535	24,536	21,394	33,776	97,8%
Fall 3b	454	4500	34,614	24,993	0,722	0,549	17,526	22,312	17,260	21,394	24,993	78,5%
Fall 4	293	1167	11,926	4,508	0,378	0,806	4,724	4,997	7,388	2,165	4,508	94,5%
Fall 5a	392	1000	6,477	3,058	0,472	0,736	3,576	3,773	4,240	0,952	3,058	94,8%
Fall 5b	392	2500	6,477	1,133	0,175	0,958	1,243	1,362	2,594	0,952	1,133	91,2%
Fall 6a	645	2000	5,623	2,971	0,528	0,694	2,980	2,915	3,322	1,077	2,971	102,2%
Fall 6b	645	4500	5,623	1,210	0,215	0,928	1,153	1,366	2,166	1,077	1,210	84,4%

Tabelle 18: Ermittlung des kritischen Außendruckes p_{Bem} für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S690 und $p_{a,Ring}$ nach Amstutz

Neues Bemessungsverfahren für den kritischen Außendruck

S890	b_m [mm]	e [mm]	p_a, Ring [N/mm ²]	p_zw [N/mm ²]	p_zw/ p_a, Ring	f_Bem	p_Bem [N/mm ²]	p_FEA [N/mm ²]	p_Amst [N/mm ²]	p_Ams., gl. [N/mm ²]	p_ZW, EC3 [N/mm ²]	p_Bem/ p_FEA
Fall 1a	318	875	4,621	2,228	0,482	0,743	2,434	2,634	2,875	0,701	2,228	92,4%
Fall 1b	318	1750	4,621	0,929	0,201	0,949	1,033	1,073	1,954	0,701	0,929	96,3%
Fall 1c	318	3500	4,621	0,701	0,152	0,985	0,484	0,770	1,330	0,701	0,440	62,9%
Fall 1d	318	7000	4,621	0,701	0,152	0,985	0,278	0,592	0,917	0,701	0,215	46,9%
Fall 2a	277	750	22,887	12,380	0,541	0,700	12,777	12,540	15,208	5,269	12,380	101,9%
Fall 2b	277	1500	22,887	8,138	0,356	0,835	7,293	7,355	10,766	5,269	8,138	99,2%
Fall 2c	277	2270	22,887	5,329	0,233	0,925	4,293	6,192	8,704	5,269	5,329	69,3%
Fall 2d	277	4800	22,887	5,269	0,230	0,927	2,891	5,580	5,978	5,269	2,458	51,8%
Fall 3a	454	1500	44,536	41,814	0,939	0,409	31,838	31,992	28,037	24,808	41,814	99,5%
Fall 3b	454	4500	44,536	28,948	0,650	0,620	19,705	26,751	19,455	24,808	28,948	73,7%
Fall 4	293	1167	15,382	4,878	0,317	0,864	5,434	5,074	8,414	2,373	4,878	107,1%
Fall 5a	392	1000	7,670	3,388	0,442	0,772	4,065	4,385	4,839	1,019	3,388	92,7%
Fall 5b	392	2500	7,670	1,133	0,148	0,987	1,282	1,362	2,912	1,019	1,133	94,1%
Fall 6a	645	2000	6,608	3,185	0,482	0,743	3,282	3,546	3,767	1,158	3,185	92,6%
Fall 6b	645	4500	6,608	1,210	0,183	0,962	1,165	1,373	2,426	1,158	1,210	84,8%

Tabelle 19: Ermittlung des kritischen Außendrucks p_{Bem} für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S890 und $p_{a, Ring}$ nach Amstutz

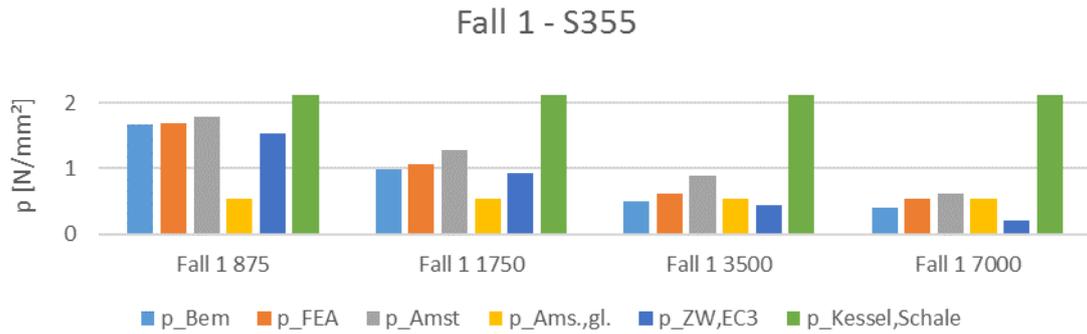


Abbildung 185: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S355

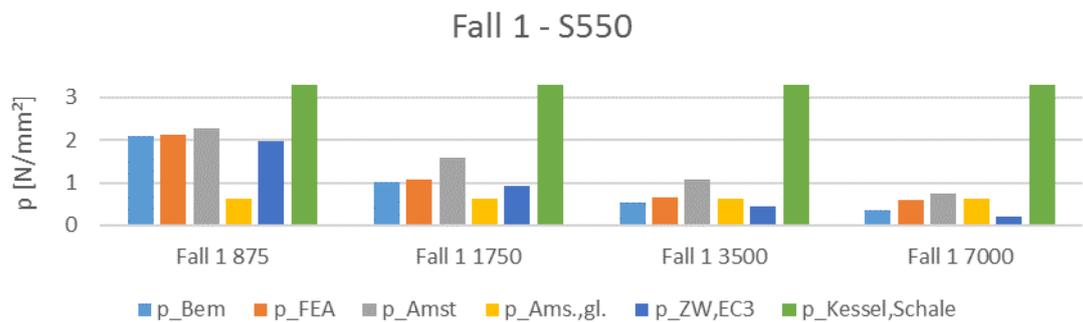


Abbildung 186: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S550

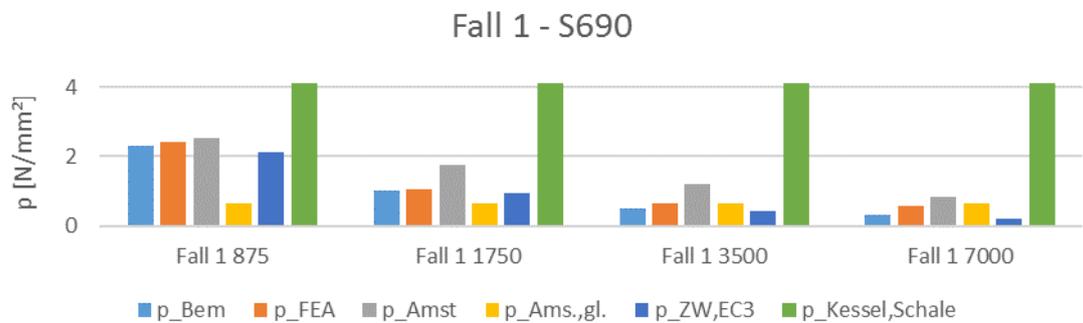


Abbildung 187: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S690

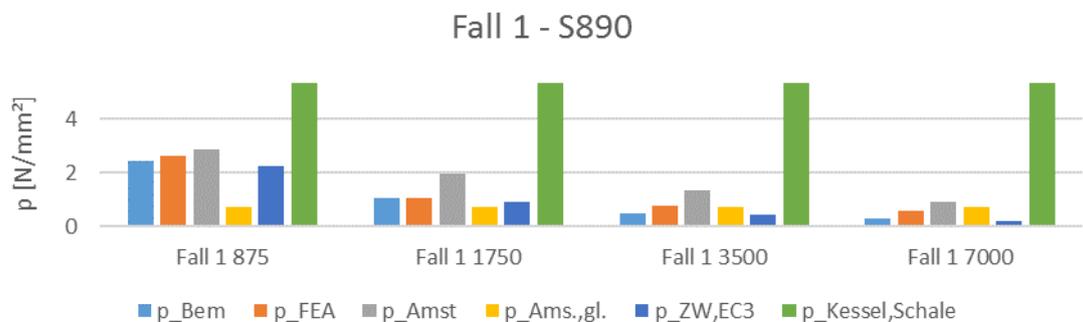


Abbildung 188: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S890

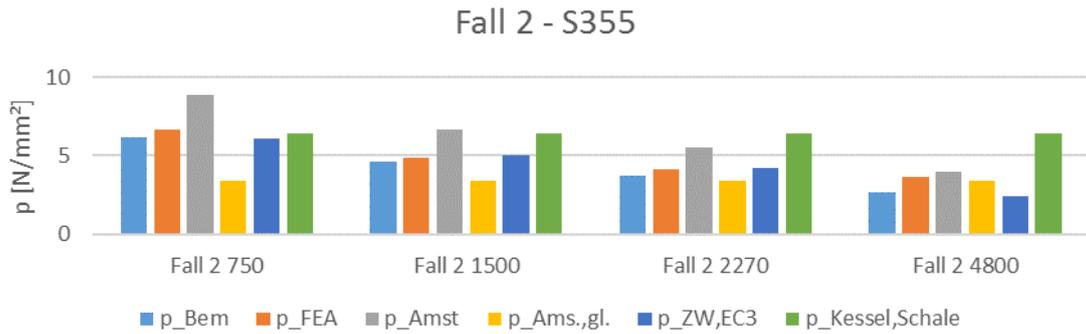


Abbildung 189: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S355

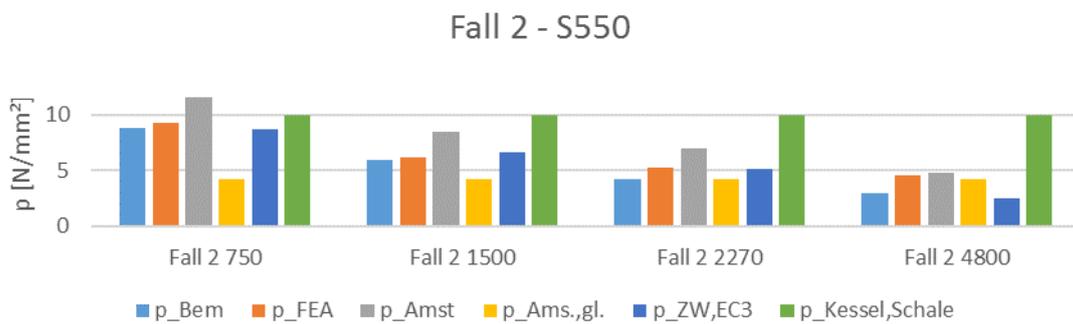


Abbildung 190: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S550

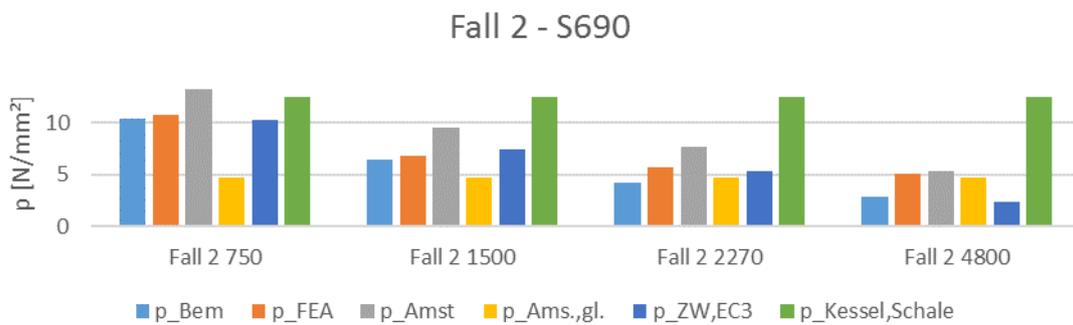


Abbildung 191: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S690

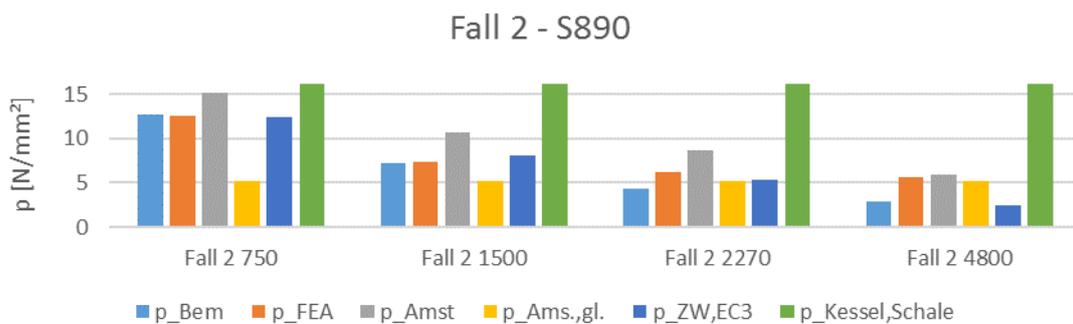


Abbildung 192: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S890

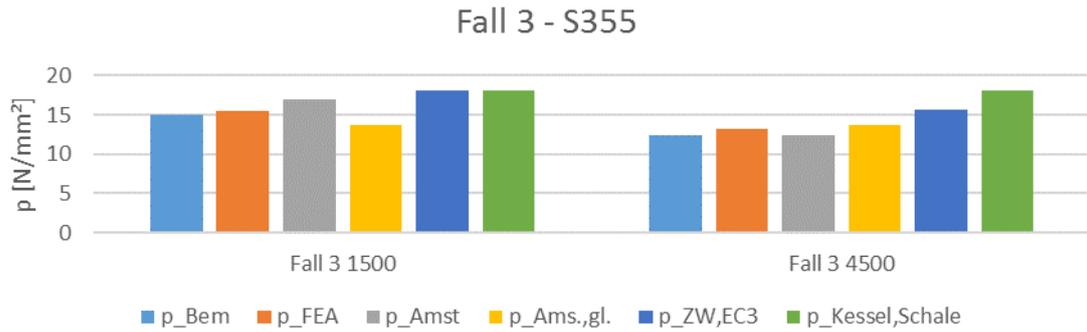


Abbildung 193: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S355

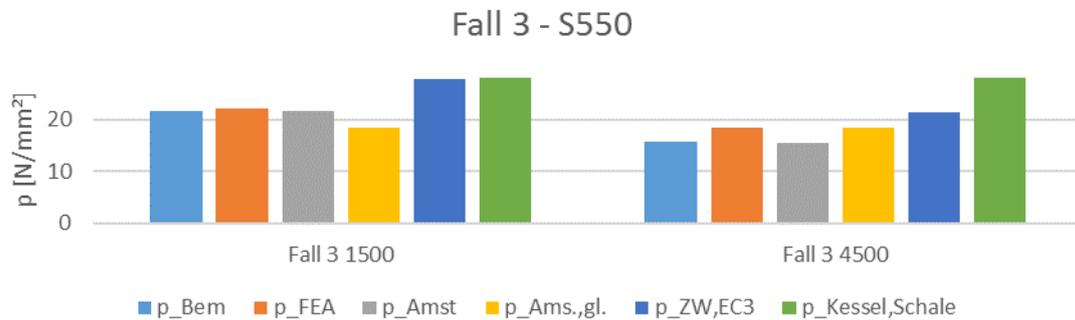


Abbildung 194: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S550

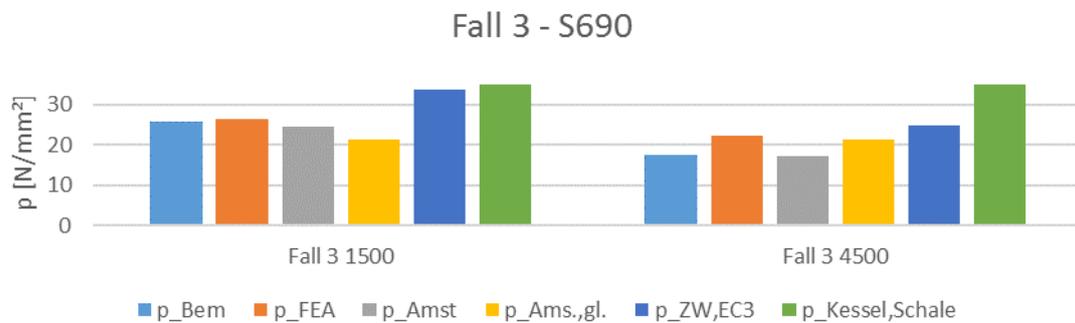


Abbildung 195: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S690

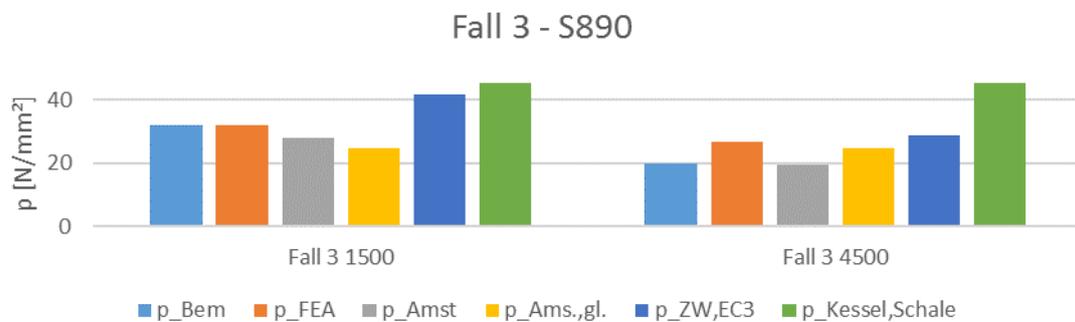


Abbildung 196: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S890

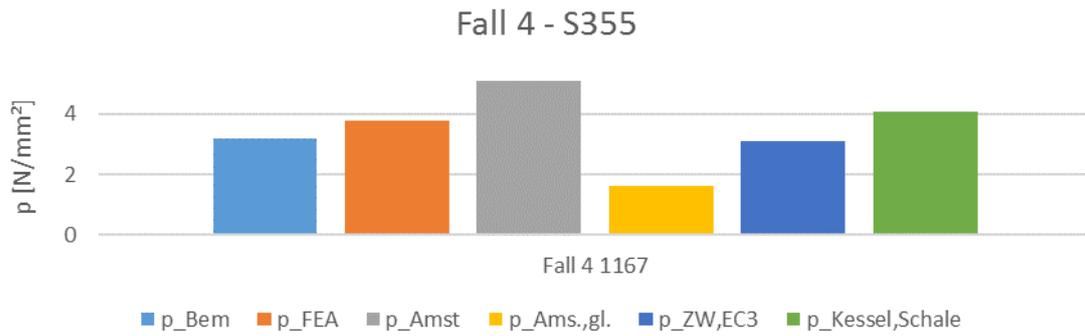


Abbildung 197: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S355

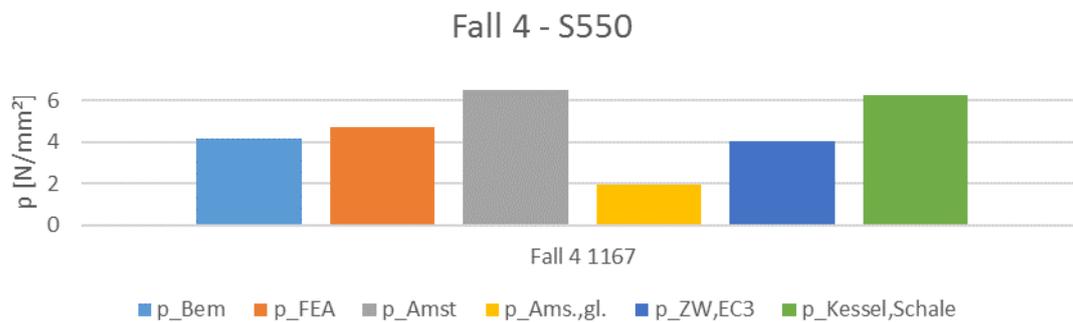


Abbildung 198: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S550

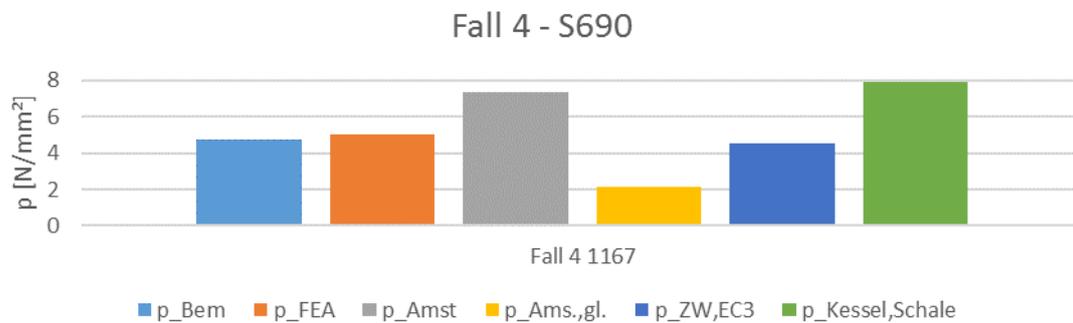


Abbildung 199: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S690

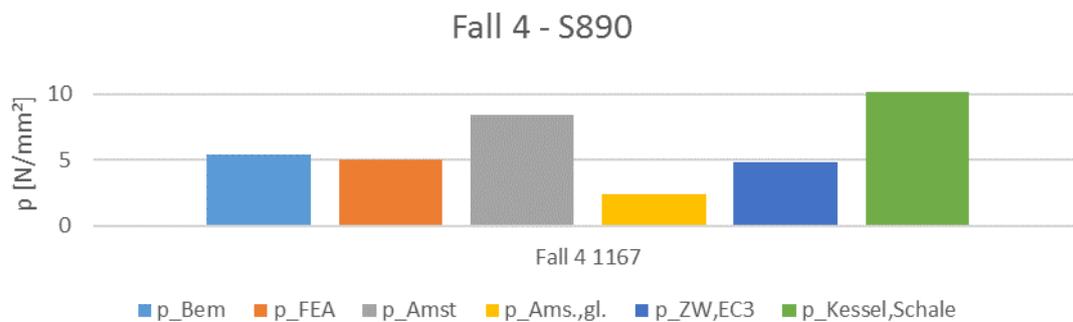


Abbildung 200: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S890

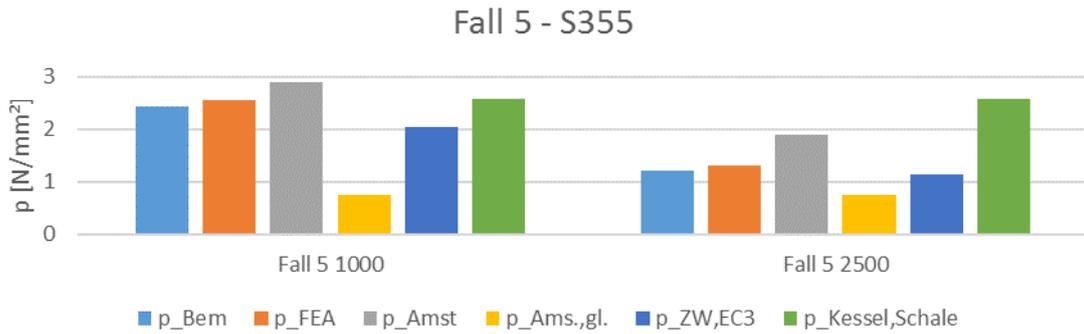


Abbildung 201: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S355

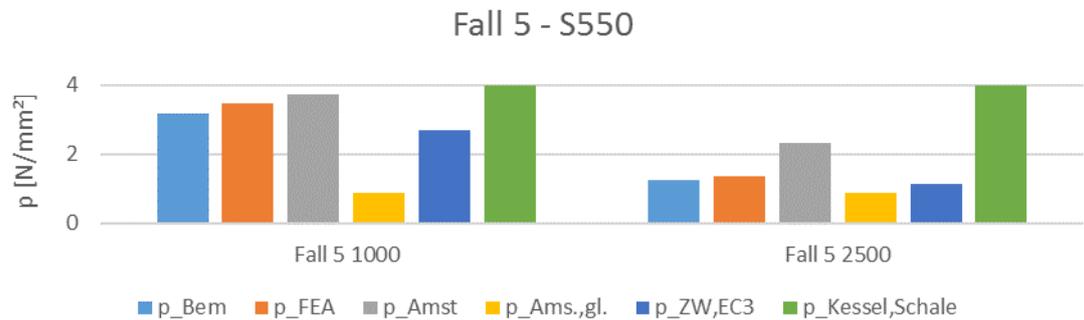


Abbildung 202: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S550

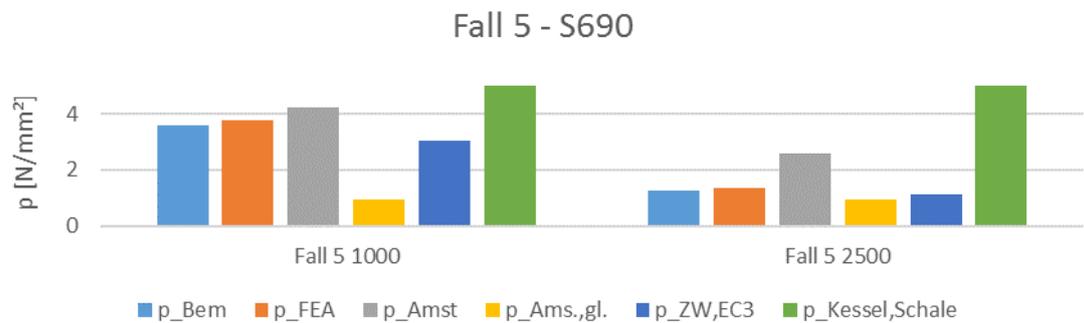


Abbildung 203: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S690

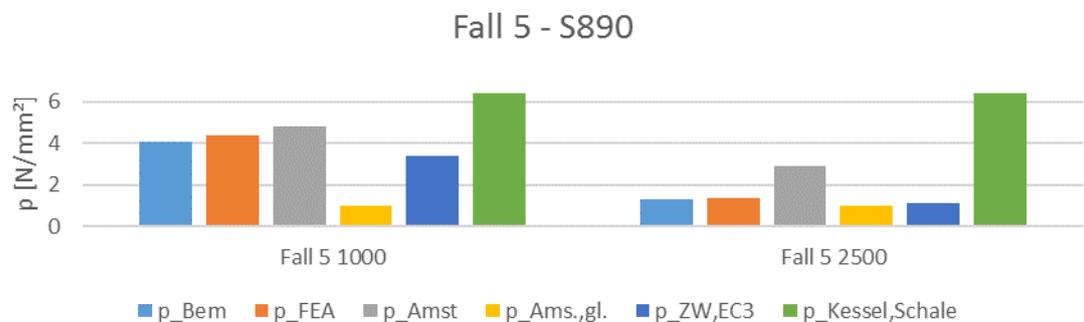


Abbildung 204: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S890

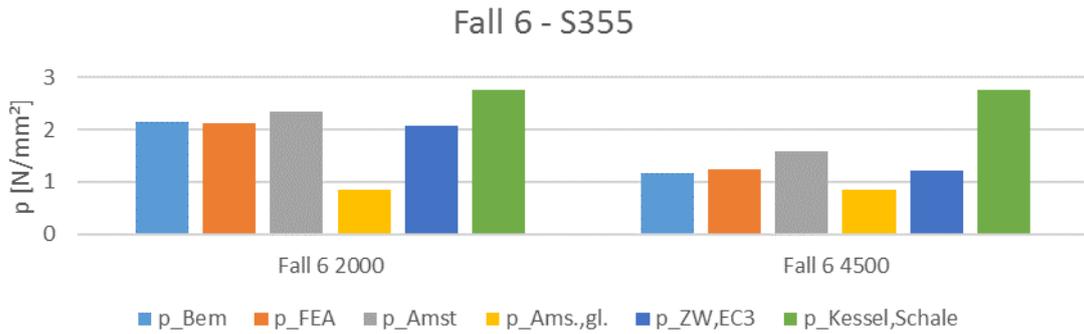


Abbildung 205: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500; S355$

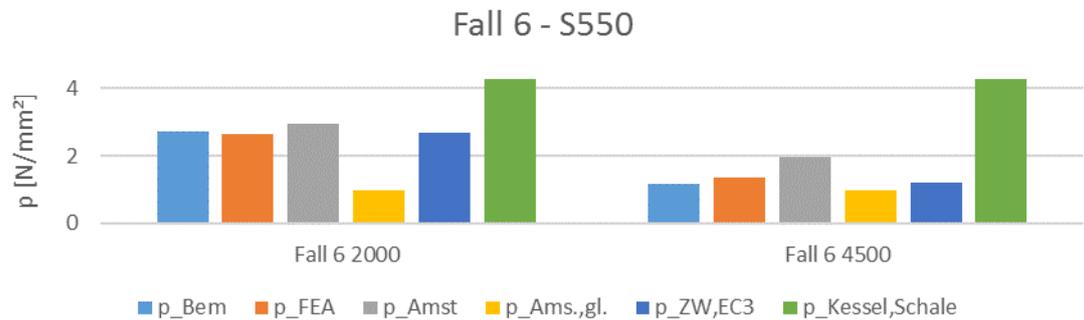


Abbildung 206: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500; S550$

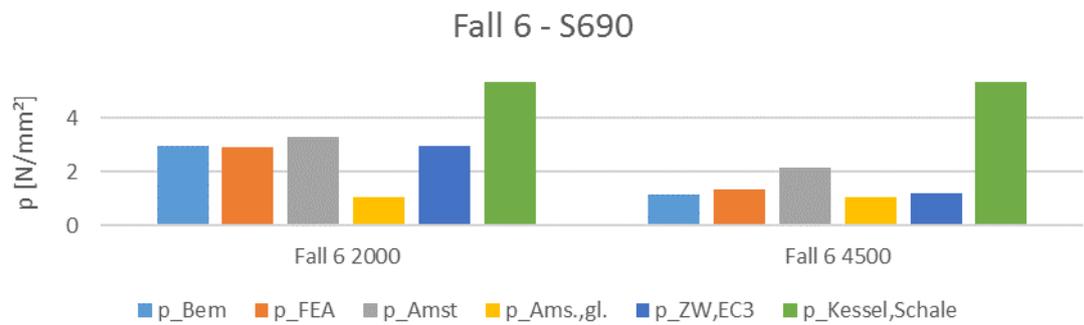


Abbildung 207: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500; S690$

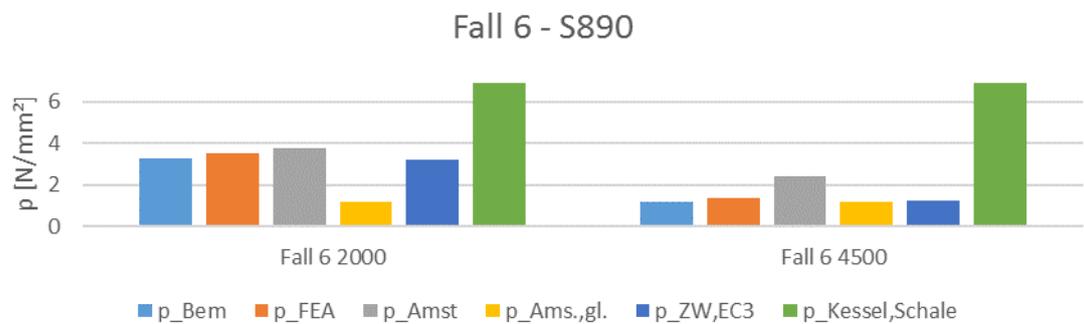


Abbildung 208: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500; S890$

8.2.3 Analyse der Ergebnisse

In Abbildung 209 ist für jeden Fall der relative Unterschied des kritischen Außendruckes des neuen Bemessungsverfahrens $p_{a,Bem}$ und des derzeitigen Bemessungsverfahrens (Minimum aus Nachweis N1 und N2) zum kritischen Außendruck aus der numerischen Berechnung $p_{a,FEA}$ in Bezug auf letzteren angegeben (Gl. 83 und Gl. 84). Das bedeutet es wird angegeben, um wieviel Prozent der kritische Außendruck im neuen Bemessungsverfahren (blau) beziehungsweise im aktuellen Bemessungsverfahren (orange) vom realitätsnahen kritischen Außendruck aus der numerischen Berechnung abweicht. Die Prozentzahl stellt somit dar, wie groß die Tragfähigkeitsreserve bei Bemessung einer ringversteiften Druckschachtpanzerung mit dem jeweiligen Bemessungsverfahren ist. Negative Prozentwerte weisen auf Überschreitungen der Tragfähigkeit hin.

$$rel. \text{Unterschied}_{Bem} = \left(1 - \frac{p_{a,Bem}}{p_{a,FEA}} \right) * 100 [\%] \quad \text{Gl. 83}$$

$$rel. \text{Unterschied}_{N1,N2} = \left(1 - \frac{\min(p_{Amst}, p_{zw,EC3})}{p_{a,FEA}} \right) * 100 [\%] \quad \text{Gl. 84}$$

Man erkennt in der Darstellung, dass mit dem neuen Bemessungsverfahren die Tragfähigkeit der ringversteiften Druckschachtpanzerung in den meisten Fällen sehr gut getroffen werden kann. In manchen Fällen (Fall 2a, $e=750$ mm, S890; Fall 6a, $e=2000$ mm, S355, S550, S690) kommt es zu einer geringfügigen Überschreitung der Tragfähigkeit und beim Fall 4, $e=1167$ mm, S890 zu einer deutlichen Überschreitung (7,1%). Der Fall 4, $e=1167$ mm, S890 stellt allerdings einen äußerst exotischen Fall dar, da hier eine hohe Festigkeit (S890) mit einer massiven Ringsteife kombiniert wird.

Mit zunehmendem Abstand der Ringsteifen wird die Tragfähigkeit der Panzerung mit den beiden Bemessungsmodellen immer schlechter getroffen bzw. zunehmend unterschätzt. Mit dem neuen Bemessungsverfahren ist dieser Effekt allerdings wesentlich geringer ausgeprägt als mit dem aktuellen.

Der kritische Außendruck aus dem aktuellen Nachweisverfahren (Minimum aus N1 und N2) weicht im Allgemeinen immer etwas mehr vom realitätsnahen kritischen Außendruck ab, als jener aus dem neuen Bemessungsverfahren. Die einzige Ausnahme ist der Anwendungsfall 6b mit $e=4500$ mm, bei welchem mit dem aktuellen Bemessungsverfahren geringfügig bessere Ergebnisse erzielt werden.

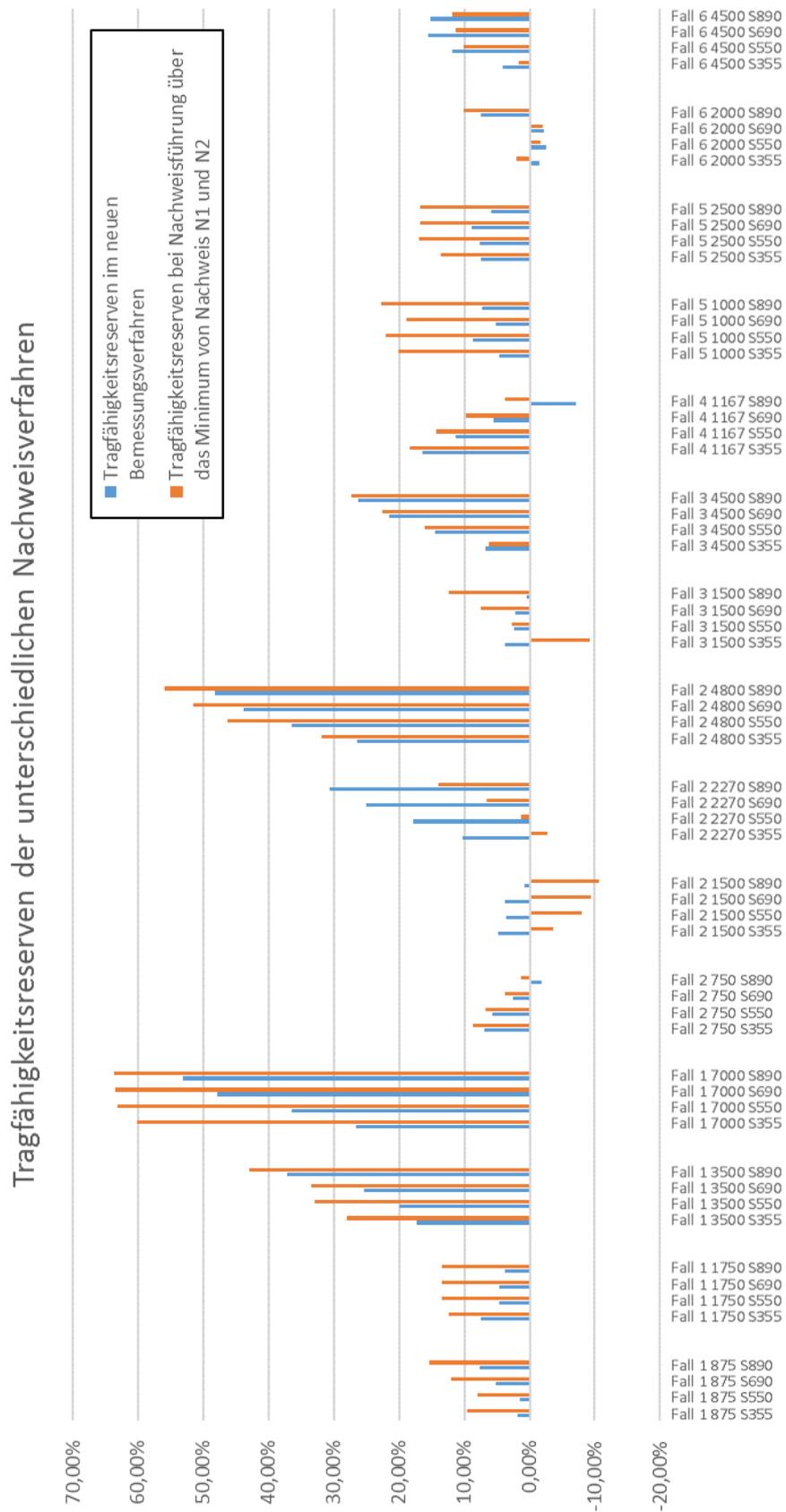


Abbildung 209: Tragfähigkeitsreserven bei Bemessung mit dem neuen Nachweisverfahren (blau) und dem aktuellen Nachweisverfahren (orange) nach der Theorie von Amstutz

Wie in Abbildung 209 ersichtlich ist, nimmt die Treffsicherheit des kritischen Außendrucks bei den einzelnen Anwendungsfällen mit zunehmenden Ringabstand ab. Für praktische Fälle kann der kritische Außendruck allerdings gut getroffen werden. Neben dem Ringabstand als wichtigste Einflussgröße, spielt für die Treffsicherheit des kritischen Außendrucks vor allem die Schlankheit der Schale eine Rolle, beziehungsweise auch die Schlankheit des Versteifungsringes.

Um nun zu verifizieren wie treffsicher die Ermittlung des kritischen Außendrucks mit dem neuen Bemessungsverfahren ist, wurde die ermittelte Tragfähigkeitsreserve (siehe Abbildung 209) gegen den dimensionslosen Längenparameter ω für Zylinderschalen nach Eurocode 1993-1-6 [8] aufgetragen.

$$\omega = \frac{e}{\sqrt{R * t}} \quad \text{Gl. 85}$$

Mit:

e ... Ringabstand

R ... mittlerer Radius des Rohres

t ... Wanddicke des Stahlrohrs

Aus den folgenden Abbildungen (Abbildung 210 bis Abbildung 213) ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Längenparameter ω die Abweichung des kritischen Außendrucks mit dem neuen Bemessungsverfahren vom realitätsnahen kritischen Außendruck aus der numerischen Berechnung und somit die Tragfähigkeitsreserve zunimmt.

Außerdem erkennt man, dass die Tragfähigkeitsreserve für S355 bis zu einem Längenparameter ω von 15 und für S550, S690 und S890 bis einem Längenparameter ω von 10 einen Wert von 10 % nicht übersteigt.

Die Diagramme sind nachfolgend für unterschiedliche Stahlgüten (S355, S550, S690 und S890) dargestellt (Abbildung 210 bis Abbildung 213) und zeigen, dass für praktisch relevante ω -Werte eine gute Treffsicherheit erzielt werden kann.

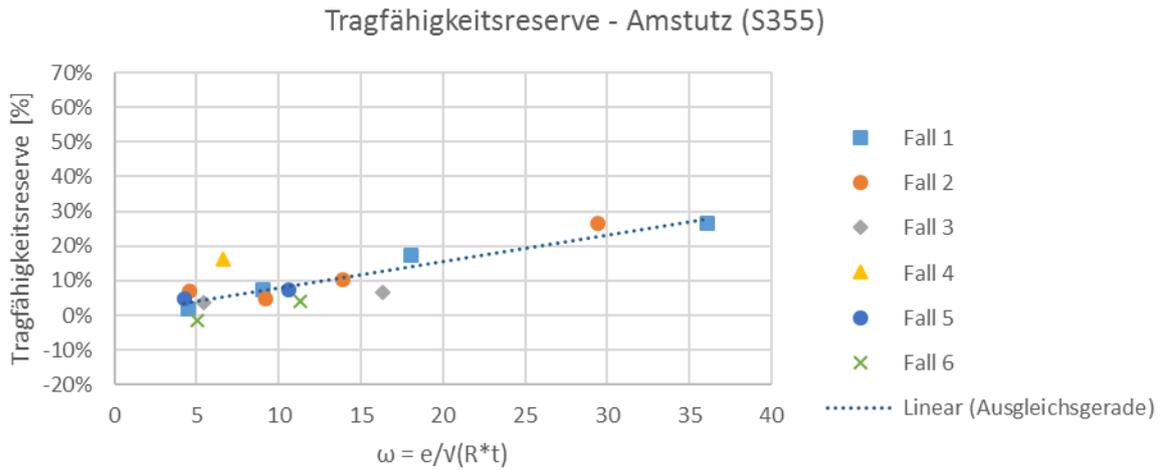


Abbildung 210: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Amstutz (S355)

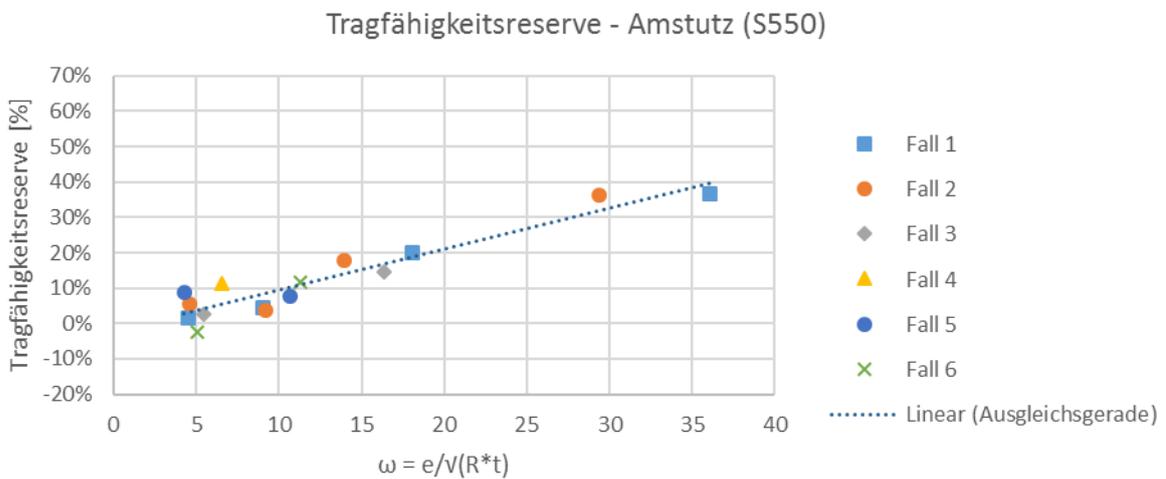


Abbildung 211: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Amstutz (S550)

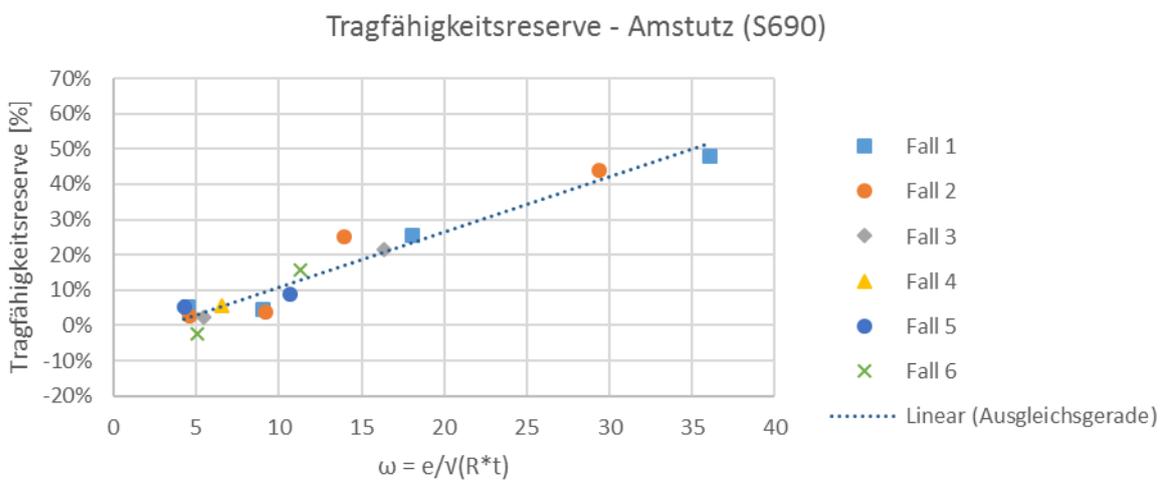


Abbildung 212: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Amstutz (S690)

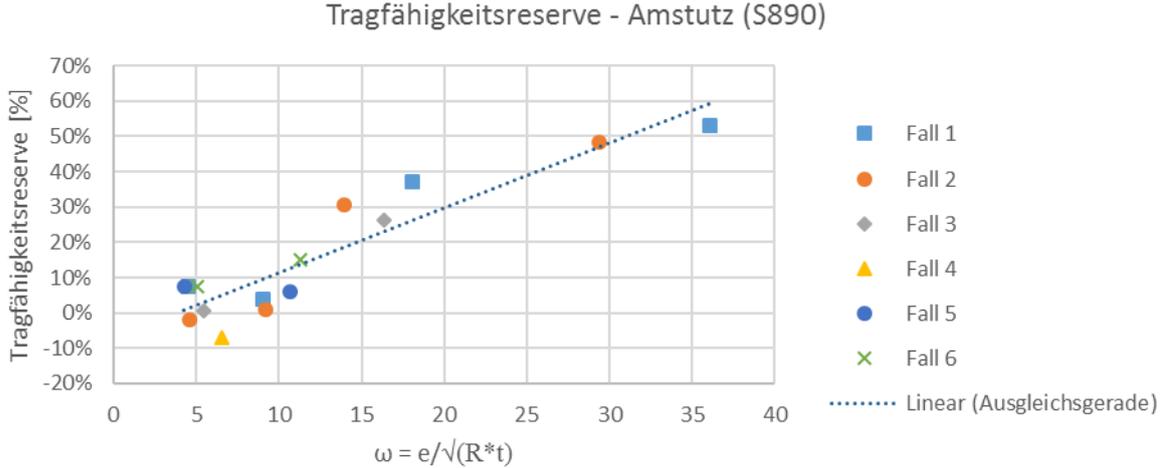


Abbildung 213: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Amstutz (S890)

8.3 Neues Bemessungsverfahren – Berechnung nach Jacobsen

8.3.1 Entwicklung der Kurven für f_{Bem}

Wie im vorigen Kapitel für die Theorie von Amstutz/Feder [5], ist in diesem Abschnitt die Entwicklung der Kurven für f_{Bem} für die Theorie von Jacobsen [7] dargestellt. Die Vorgehensweise ist dabei die gleiche wie für Amstutz/Feder. Zunächst wurde der kritische Außendruck $p_{a,ring}$ für den Versteifungsring unter alleiniger Berücksichtigung der mitwirkenden Breite b_m nach der Theorie von Jacobsen ermittelt. Die mitwirkende Breite b_m und der kritische Außendruck sind in der Tabelle 20 für die Anwendungsfälle angegeben. Fälle bei denen sich der kritische Außendruck durch Anwendung der Kesselformel für den Versteifungsring mit der mitwirkenden Schale ergibt, sind in der Tabelle gelb markiert. Anzumerken ist, dass diese Werte $p_{a,ring,max}$ nach Gl. 81 geringfügig größer sind als in Tabelle 11 für die Ergebnisse nach Amstutz/Feder, bedingt durch die unterschiedlich definierten Breiten b_m (vgl. Abschnitt 8.1).

			S355	S550	S690	S890
	b_m [mm]	R_V+S,unrund [mm]	$p_{a,ring}$ [N/mm ²]			
Fall 1	305	2551,9	2,77	3,82	4,44	5,22
Fall 2	262	1279,0	9,61	14,88	18,67	23,63
Fall 3	465	1435,7	17,99	27,87	34,96	43,37
Fall 4	282	1716,8	6,38	9,89	12,41	15,80
Fall 5	370	2819,5	4,10	5,83	6,90	8,24
Fall 6	627	4621,8	3,58	5,02	5,89	6,97

Tabelle 20: Kritischer Außendruck des Versteifungsringes nach Jacobsen (gelb = Werte $p_{a,ring,max}$)

Die weitere Vorgehensweise zur Bestimmung von f_{Bem} mit den kritischen Außendrücken für die Ringsteife $p_{a,ring}$ nach Jacobsen ist analog zur Vorgehensweise für $p_{a,ring}$ nach Amstutz/Feder und daher im Kapitel 8.2.1 nachzulesen. Zur Vollständigkeit sei angemerkt, dass für die Entwicklung der Kurven für f_{Bem} wieder der größere Wert von $p_{ZW,EC}/p_{a,ring}$ beziehungsweise $p_{Jacobsen,glatt}/p_{a,ring}$ verwendet wurde (mit p_{ZW} in Tabelle 21 bis Tabelle 24 bezeichnet, Ermittlung nach Gl. 86).

$$p_{ZW} = \max(p_{ZW,EC}; p_{Jacobsen,glatt}) \quad \text{Gl. 86}$$

Nachfolgend sind die Diagramme mit f_{Bem} und den Datenpunkten der Anwendungsfälle ($p_{ZW}/p_{a,ring}$, f_{FEA}) dargestellt (Abbildung 214 bis Abbildung 217). Außerdem ist in den Diagrammen auch die formelmäßige Beschreibung zur Bestimmung von f_{Bem} angegeben. Die in den Diagrammen verwendeten Werte sind in den anschließenden Tabellen (Tabelle 21 bis Tabelle 24) detailliert angeführt.

Neues Bemessungsverfahren für den kritischen Außendruck

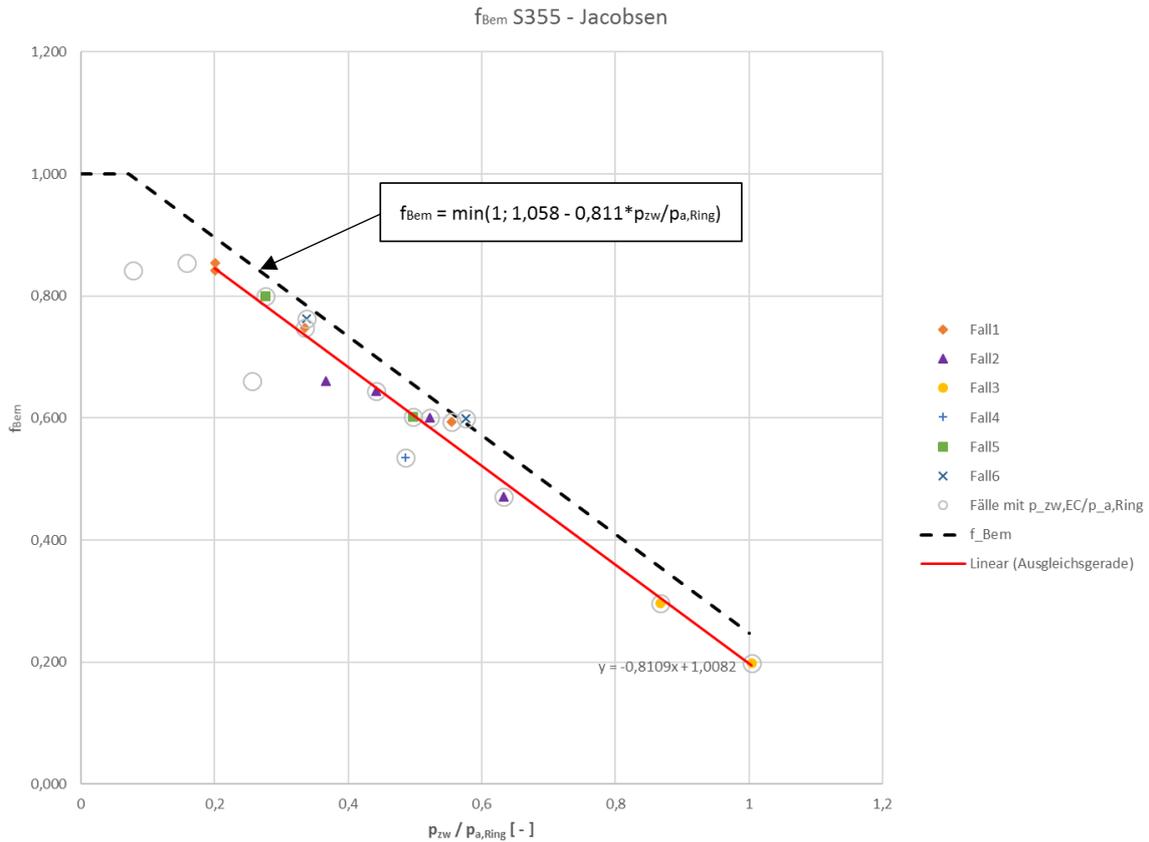


Abbildung 214: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Jacobsen und einer Stahlgüte von S355

S355	b_m [mm]	e [mm]	$p_{a, Ring}$ [N/mm ²]	p_{a^*} [N/mm ²]	p_{FEA} [N/mm ²]	f_{FEA}	$p_{ZW, EC3}$ [N/mm ²]	$p_{Jacob, gl}$ [N/mm ²]	p_{zw} [N/mm ²]	$p_{zw}/p_{a, Ring}$
Fall 1a	305,214	875	2,770	0,966	1,700	0,593	1,538	0,555	1,538	0,555
Fall 1b	305,214	1750	2,770	0,483	1,060	0,748	0,928	0,555	0,928	0,335
Fall 1c	305,214	3500	2,770	0,242	0,610	0,854	0,440	0,555	0,555	0,200
Fall 1d	305,214	7000	2,770	0,121	0,540	0,842	0,215	0,555	0,555	0,200
Fall 2a	261,679	750	9,607	3,352	6,662	0,471	6,083	3,521	6,083	0,633
Fall 2b	261,679	1500	9,607	1,676	4,842	0,601	5,015	3,521	5,015	0,522
Fall 2c	261,679	2270	9,607	1,107	4,130	0,644	4,243	3,521	4,243	0,442
Fall 2d	261,679	4800	9,607	0,524	3,610	0,660	2,458	3,521	3,521	0,367
Fall 3a	465,433	1500	17,986	5,581	15,522	0,199	18,056	14,038	18,056	1,004
Fall 3b	465,433	4500	17,986	1,860	13,200	0,297	15,592	14,038	15,592	0,867
Fall 4	281,752	1167	6,383	1,541	3,793	0,535	3,097	1,694	3,097	0,485
Fall 5a	370,446	1000	4,100	1,519	2,546	0,602	2,036	0,779	2,036	0,497
Fall 5b	370,446	2500	4,100	0,608	1,310	0,799	1,131	0,779	1,131	0,276
Fall 6a	627,427	2000	3,584	1,124	2,110	0,599	2,067	0,876	2,067	0,577
Fall 6b	627,427	4500	3,584	0,500	1,230	0,763	1,209	0,876	1,209	0,337

Tabelle 21: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S355 nach der Theorie von Jacobsen

Neues Bemessungsverfahren für den kritischen Außendruck

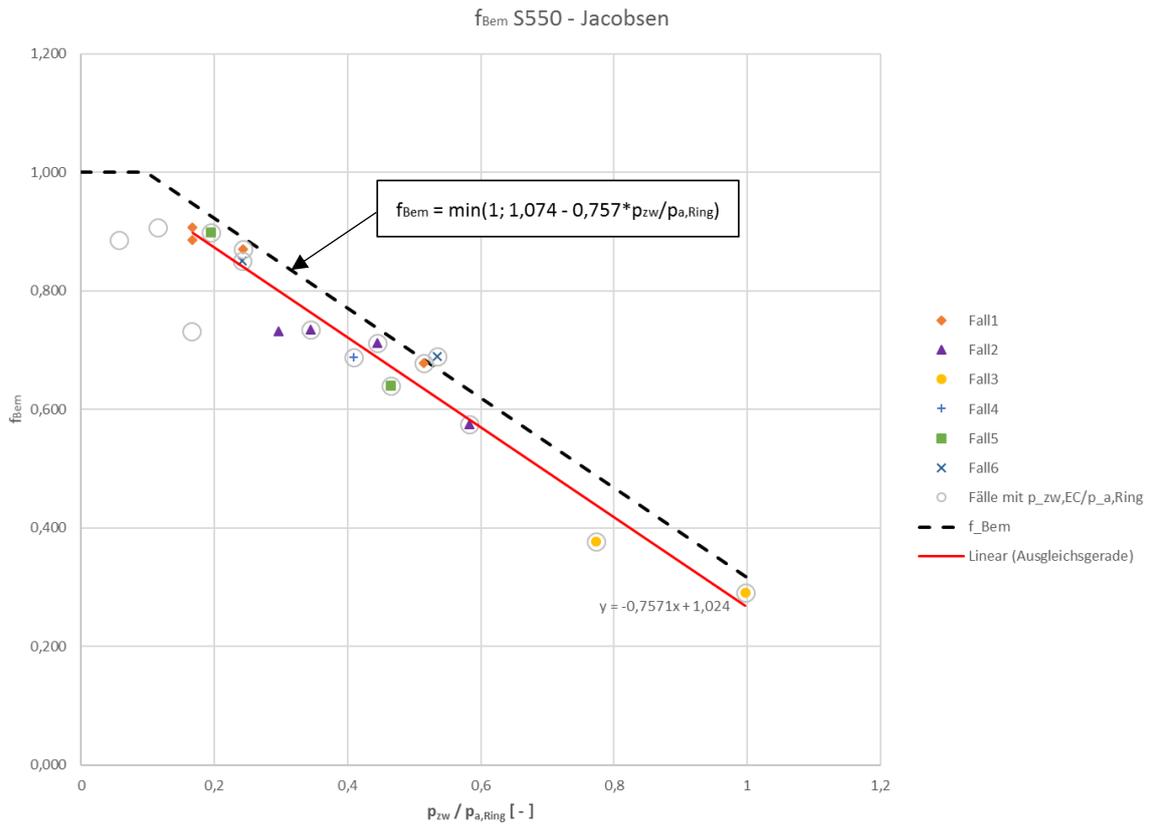


Abbildung 215: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Jacobsen und einer Stahlgüte von S550

S550	b_m [mm]	e [mm]	p_a,Ring [N/mm ²]	p_a* [N/mm ²]	p_FEA [N/mm ²]	f_FEA	p_ZW,EC3 [N/mm ²]	p_Jacob,gl [N/mm ²]	p_zw [N/mm ²]	p_zw/p_a,Ring
Fall 1a	305,214	875	3,816	1,331	2,131	0,678	1,960	0,637	1,960	0,514
Fall 1b	305,214	1750	3,816	0,665	1,073	0,871	0,929	0,637	0,929	0,243
Fall 1c	305,214	3500	3,816	0,333	0,655	0,907	0,440	0,637	0,637	0,167
Fall 1d	305,214	7000	3,816	0,166	0,583	0,886	0,215	0,637	0,637	0,167
Fall 2a	261,679	750	14,884	5,193	9,315	0,575	8,680	4,412	8,680	0,583
Fall 2b	261,679	1500	14,884	2,596	6,127	0,713	6,620	4,412	6,620	0,445
Fall 2c	261,679	2270	14,884	1,716	5,199	0,735	5,132	4,412	5,132	0,345
Fall 2d	261,679	4800	14,884	0,811	4,577	0,732	2,458	4,412	4,412	0,296
Fall 3a	465,433	1500	27,866	8,647	22,273	0,291	27,778	19,090	27,778	0,997
Fall 3b	465,433	4500	27,866	2,882	18,433	0,378	21,528	19,090	21,528	0,773
Fall 4	281,752	1167	9,889	2,388	4,723	0,689	4,050	2,053	4,050	0,410
Fall 5a	370,446	1000	5,830	2,160	3,479	0,640	2,709	0,912	2,709	0,465
Fall 5b	370,446	2500	5,830	0,864	1,364	0,899	1,133	0,912	1,133	0,194
Fall 6a	627,427	2000	5,016	1,574	2,642	0,690	2,684	1,030	2,684	0,535
Fall 6b	627,427	4500	5,016	0,699	1,346	0,850	1,210	1,030	1,210	0,241

Tabelle 22: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S550 nach der Theorie von Jacobsen

Neues Bemessungsverfahren für den kritischen Außendruck

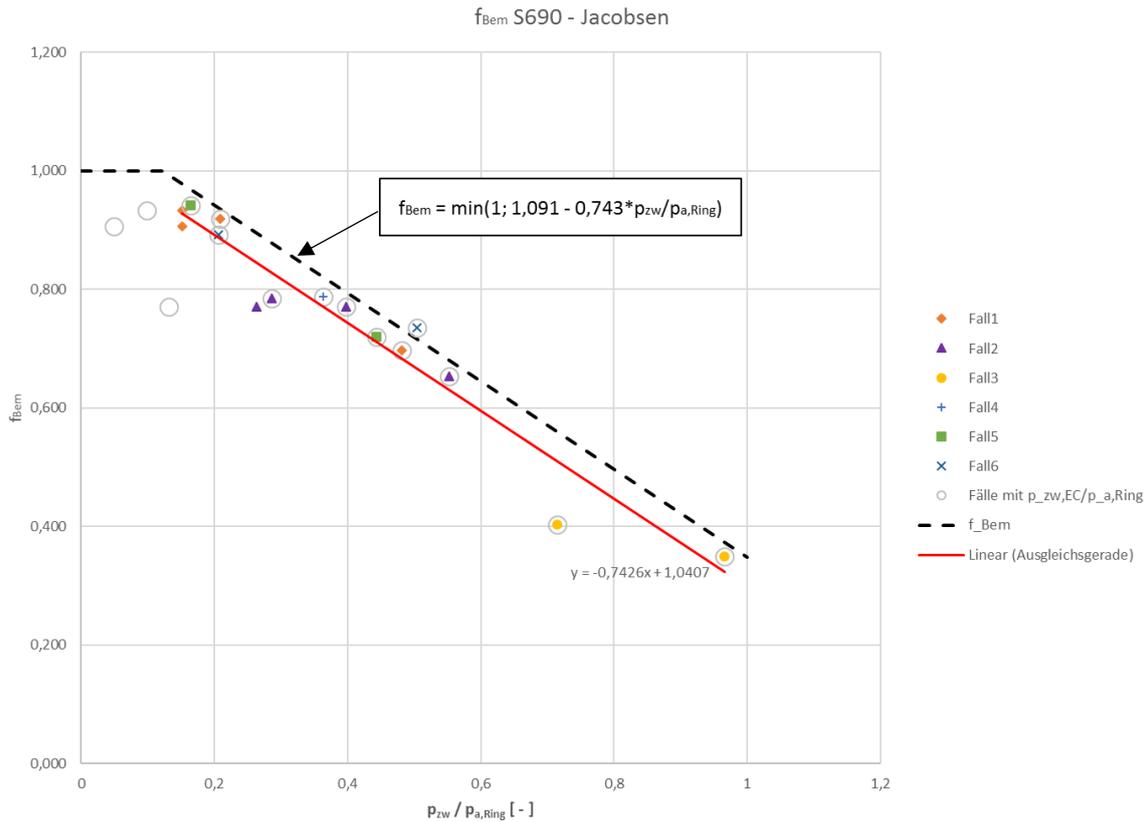


Abbildung 216: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Jacobsen und einer Stahlgüte von S690

S690	b_m [mm]	e [mm]	p_a,Ring [N/mm ²]	p_a* [N/mm ²]	p_FEA [N/mm ²]	f_FEA	p_ZW,EC3 [N/mm ²]	p_Jacob,gl [N/mm ²]	p_zw [N/mm ²]	p_zw/p_a,Ring
Fall 1a	305,214	875	4,445	1,550	2,427	0,697	2,137	0,672	2,137	0,481
Fall 1b	305,214	1750	4,445	0,775	1,073	0,919	0,929	0,672	0,929	0,209
Fall 1c	305,214	3500	4,445	0,388	0,661	0,933	0,440	0,672	0,672	0,151
Fall 1d	305,214	7000	4,445	0,194	0,592	0,906	0,215	0,672	0,672	0,151
Fall 2a	261,679	750	18,672	6,515	10,734	0,653	10,320	4,905	10,320	0,553
Fall 2b	261,679	1500	18,672	3,257	6,787	0,771	7,424	4,905	7,424	0,398
Fall 2c	261,679	2270	18,672	2,152	5,710	0,785	5,333	4,905	5,333	0,286
Fall 2d	261,679	4800	18,672	1,018	5,074	0,770	2,458	4,905	4,905	0,263
Fall 3a	465,433	1500	34,960	10,848	26,535	0,349	33,776	22,090	33,776	0,966
Fall 3b	465,433	4500	34,960	3,616	22,312	0,404	24,993	22,090	24,993	0,715
Fall 4	281,752	1167	12,406	2,995	4,997	0,787	4,508	2,242	4,508	0,363
Fall 5a	370,446	1000	6,899	2,556	3,773	0,720	3,058	0,973	3,058	0,443
Fall 5b	370,446	2500	6,899	1,022	1,362	0,942	1,133	0,973	1,133	0,164
Fall 6a	627,427	2000	5,888	1,847	2,915	0,736	2,971	1,104	2,971	0,505
Fall 6b	627,427	4500	5,888	0,821	1,366	0,892	1,210	1,104	1,210	0,206

Tabelle 23: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S690 nach der Theorie von Jacobsen

Neues Bemessungsverfahren für den kritischen Außendruck

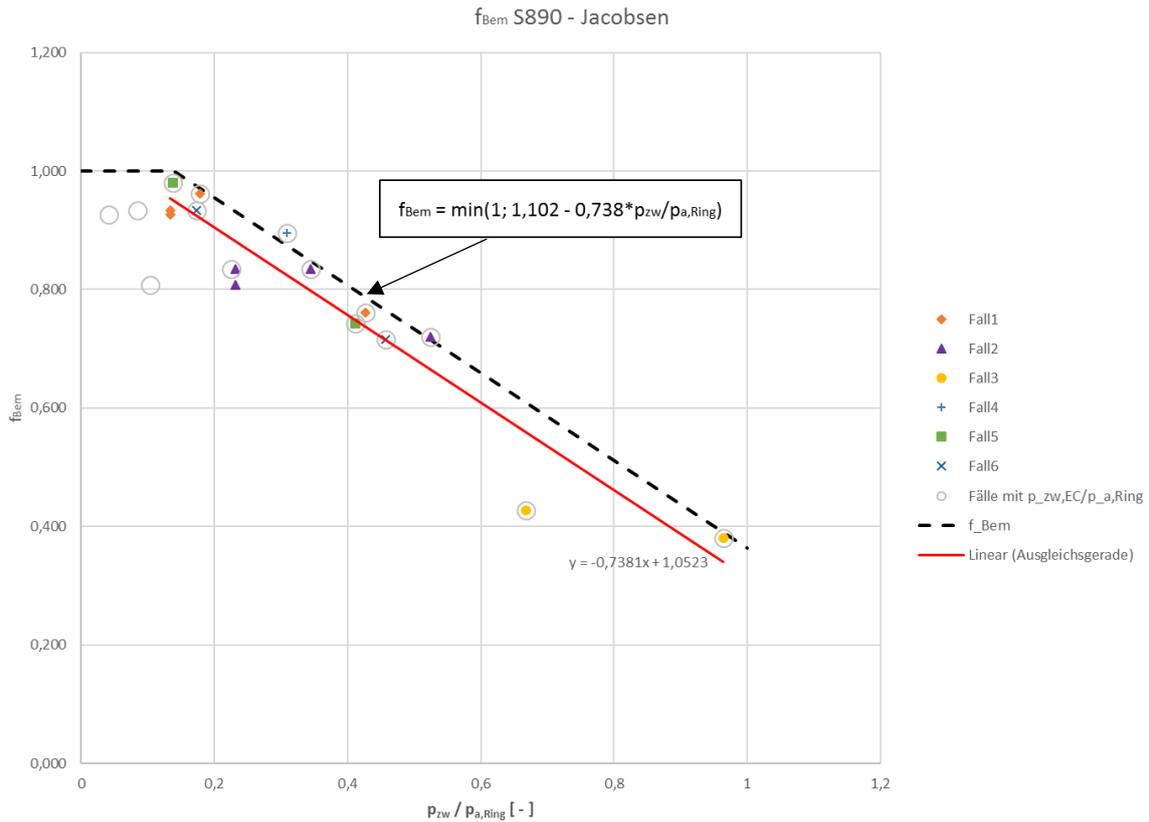


Abbildung 217: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Jacobsen und einer Stahlgüte von S890

S890	b_m [mm]	e [mm]	p_a,Ring [N/mm ²]	p_a* [N/mm ²]	p_FEA [N/mm ²]	f_FEA	p_ZW,EC3 [N/mm ²]	p_Jacob,gl [N/mm ²]	p_zw [N/mm ²]	p_zw/p_a,Ring
Fall 1a	305,214	875	5,222	1,822	2,634	0,761	2,228	0,696	2,228	0,427
Fall 1b	305,214	1750	5,222	0,911	1,073	0,962	0,929	0,696	0,929	0,178
Fall 1c	305,214	3500	5,222	0,455	0,770	0,934	0,440	0,696	0,696	0,133
Fall 1d	305,214	7000	5,222	0,228	0,592	0,927	0,215	0,696	0,696	0,133
Fall 2a	261,679	750	23,627	8,244	12,540	0,721	12,380	5,475	12,380	0,524
Fall 2b	261,679	1500	23,627	4,122	7,355	0,834	8,138	5,475	8,138	0,344
Fall 2c	261,679	2270	23,627	2,724	6,192	0,834	5,329	5,475	5,475	0,232
Fall 2d	261,679	4800	23,627	1,288	5,580	0,808	2,458	5,475	5,475	0,232
Fall 3a	465,433	1500	43,371	13,457	31,992	0,380	41,814	25,758	41,814	0,964
Fall 3b	465,433	4500	43,371	4,486	26,751	0,427	28,948	25,758	28,948	0,667
Fall 4	281,752	1167	15,799	3,814	5,074	0,895	4,878	2,446	4,878	0,309
Fall 5a	370,446	1000	8,242	3,053	4,385	0,743	3,388	1,028	3,388	0,411
Fall 5b	370,446	2500	8,242	1,221	1,362	0,980	1,133	1,028	1,133	0,137
Fall 6a	627,427	2000	6,974	2,188	3,546	0,716	3,185	1,173	3,185	0,457
Fall 6b	627,427	4500	6,974	0,972	1,373	0,933	1,210	1,173	1,210	0,174

Tabelle 24: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S890 nach der Theorie von Jacobsen

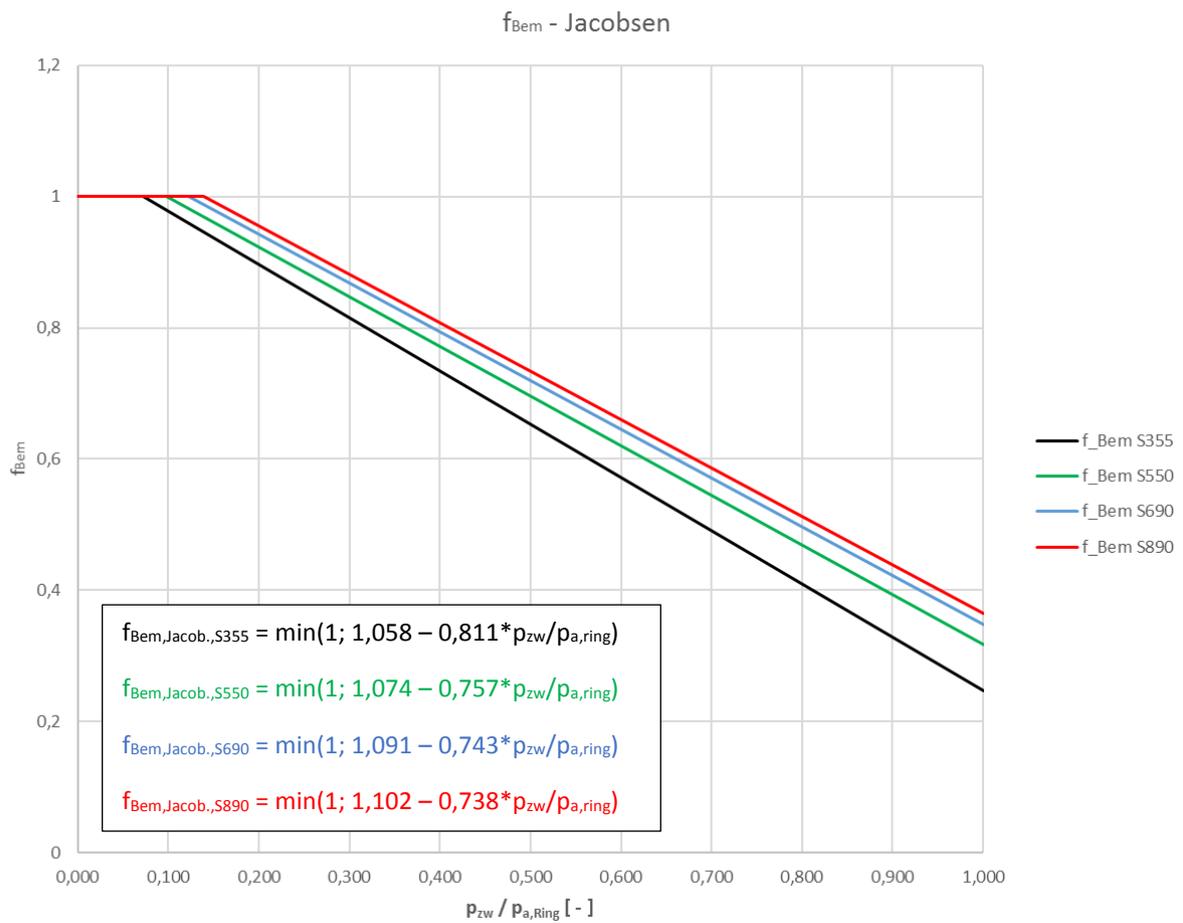


Abbildung 218: f_{Bem} für die Stahlgüten S355, S550, S690 und S890 nach der Theorie von Jacobsen

In Abbildung 218 sind die ermittelten Kurven für f_{Bem} nach der Theorie von Jacobsen für jede untersuchte Fließgrenze dargestellt (strichlierte Kurven aus Abbildung 214 bis Abbildung 217). Zusätzlich ist für jede Kurve die zugehörige Formel angegeben.

8.3.2 Kritische Außendrucke mit dem neuen Bemessungsverfahren

In diesem Kapitel sind die mit dem neuen Bemessungsverfahren ermittelten kritischen Außendrucke angeführt. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen (Tabelle 25 bis Tabelle 28) und Diagrammen (Abbildung 219 bis Abbildung 242) dargestellt.

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung entspricht jener in Kapitel 8.2.2, mit dem Unterschied, dass $p_{a, Ring}$ nach der Theorie von Jacobsen bestimmt und für $p_{ZW}/p_{a, Ring}$ der größere Wert von $p_{ZW, EC}$ und $p_{Jacobsen, glatt}$ verwendet wurde.

S355	b_m [mm]	e [mm]	$p_{a, Ring}$ [N/mm ²]	p_{zw} [N/mm ²]	$p_{zw}/p_{a, Ring}$	f_{Bem}	p_{Bem} [N/mm ²]	p_{FEA} [N/mm ²]	p_{Jacob} [N/mm ²]	$p_{Jacob, gl}$ [N/mm ²]	$p_{ZW, EC3}$ [N/mm ²]	p_{Bem}/p_{FEA}
Fall 1a	305	875	2,770	1,538	0,555	0,608	1,673	1,700	1,703	0,555	1,538	98,4%
Fall 1b	305	1750	2,770	0,928	0,335	0,787	0,971	1,060	1,225	0,555	0,928	91,6%
Fall 1c	305	3500	2,770	0,555	0,200	0,896	0,505	0,610	0,862	0,555	0,440	82,8%
Fall 1d	305	7000	2,770	0,555	0,200	0,896	0,397	0,540	0,595	0,555	0,215	73,5%
Fall 2a	262	750	9,607	6,083	0,633	0,545	6,199	6,662	7,370	3,521	6,083	93,1%
Fall 2b	262	1500	9,607	5,015	0,522	0,635	4,571	4,842	5,797	3,521	5,015	94,4%
Fall 2c	262	2270	9,607	4,243	0,442	0,700	3,657	4,130	4,929	3,521	4,243	88,5%
Fall 2d	262	4800	9,607	3,521	0,367	0,761	2,695	3,610	3,528	3,521	2,458	74,6%
Fall 3a	465	1500	17,986	18,056	1,004	0,244	14,957	15,522	14,807	14,038	18,056	96,4%
Fall 3b	465	4500	17,986	15,592	0,867	0,355	12,258	13,200	9,312	14,038	15,592	92,9%
Fall 4	282	1167	6,383	3,097	0,485	0,665	3,164	3,793	4,290	1,694	3,097	83,4%
Fall 5a	370	1000	4,100	2,036	0,497	0,656	2,408	2,546	2,618	0,779	2,036	94,6%
Fall 5b	370	2500	4,100	1,131	0,276	0,834	1,186	1,310	1,746	0,779	1,131	90,5%
Fall 6a	627	2000	3,584	2,067	0,577	0,591	2,131	2,110	2,215	0,876	2,067	101,0%
Fall 6b	627	4500	3,584	1,209	0,337	0,785	1,164	1,230	1,528	0,876	1,209	94,6%

Tabelle 25: Ermittlung des kritischen Außendruckes $p_{a, Bem}$ für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S355 und $p_{a, Ring}$ nach Jacobsen

S550	b_m [mm]	e [mm]	$p_{a, Ring}$ [N/mm ²]	p_{zw} [N/mm ²]	$p_{zw}/p_{a, Ring}$	f_{Bem}	p_{Bem} [N/mm ²]	p_{FEA} [N/mm ²]	p_{Jacob} [N/mm ²]	$p_{Jacob, gl}$ [N/mm ²]	$p_{ZW, EC3}$ [N/mm ²]	p_{Bem}/p_{FEA}
Fall 1a	305	875	3,816	1,960	0,514	0,685	2,114	2,131	2,215	0,637	1,960	99,2%
Fall 1b	305	1750	3,816	0,929	0,243	0,890	1,013	1,073	1,546	0,637	0,929	94,4%
Fall 1c	305	3500	3,816	0,637	0,167	0,948	0,515	0,655	1,065	0,637	0,440	78,7%
Fall 1d	305	7000	3,816	0,637	0,167	0,948	0,358	0,583	0,724	0,637	0,215	61,3%
Fall 2a	262	750	14,884	8,680	0,583	0,632	8,755	9,315	10,308	4,412	8,680	94,0%
Fall 2b	262	1500	14,884	6,620	0,445	0,737	5,825	6,127	7,725	4,412	6,620	95,1%
Fall 2c	262	2270	14,884	5,132	0,345	0,813	4,179	5,199	6,403	4,412	5,132	80,4%
Fall 2d	262	4800	14,884	4,412	0,296	0,850	2,928	4,577	4,427	4,412	2,458	64,0%
Fall 3a	465	1500	27,866	27,778	0,997	0,319	21,729	22,273	19,622	19,090	27,778	97,6%
Fall 3b	465	4500	27,866	21,528	0,773	0,489	15,646	18,433	11,655	19,090	21,528	84,9%
Fall 4	282	1167	9,889	4,050	0,410	0,764	4,158	4,723	5,867	2,053	4,050	88,0%
Fall 5a	370	1000	5,830	2,709	0,465	0,722	3,179	3,479	3,521	0,912	2,709	91,4%
Fall 5b	370	2500	5,830	1,133	0,194	0,927	1,227	1,364	2,236	0,912	1,133	89,9%
Fall 6a	627	2000	5,016	2,684	0,535	0,669	2,714	2,642	2,892	1,030	2,684	102,7%
Fall 6b	627	4500	5,016	1,210	0,241	0,891	1,168	1,346	1,922	1,030	1,210	86,8%

Tabelle 26: Ermittlung des kritischen Außendruckes $p_{a, Bem}$ für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S550 und $p_{a, Ring}$ nach Jacobsen

Neues Bemessungsverfahren für den kritischen Außendruck

S690	b_m [mm]	e [mm]	p_a, Ring [N/mm ²]	p_zw [N/mm ²]	p_zw/ p_a, Ring	f_Bem	p_Bem [N/mm ²]	p_FEA [N/mm ²]	p_Jacob [N/mm ²]	p_Jacob, gl [N/mm ²]	p_ZW, EC3 [N/mm ²]	p_Bem/ p_FEA
Fall 1a	305	875	4,445	2,137	0,481	0,734	2,321	2,427	2,514	0,672	2,137	95,6%
Fall 1b	305	1750	4,445	0,929	0,209	0,936	1,012	1,073	1,732	0,672	0,929	94,3%
Fall 1c	305	3500	4,445	0,672	0,151	0,978	0,475	0,661	1,182	0,672	0,440	71,9%
Fall 1d	305	7000	4,445	0,672	0,151	0,978	0,286	0,592	0,799	0,672	0,215	48,3%
Fall 2a	262	750	18,672	10,320	0,553	0,680	10,402	10,734	12,092	4,905	10,320	96,9%
Fall 2b	262	1500	18,672	7,424	0,398	0,795	6,411	6,787	8,859	4,905	7,424	94,5%
Fall 2c	262	2270	18,672	5,333	0,286	0,879	4,158	5,710	7,263	4,905	5,333	72,8%
Fall 2d	262	4800	18,672	4,905	0,263	0,896	2,861	5,074	4,949	4,905	2,458	56,4%
Fall 3a	465	1500	34,960	33,776	0,966	0,373	25,960	26,535	22,446	22,090	33,776	97,8%
Fall 3b	465	4500	34,960	24,993	0,715	0,560	17,413	22,312	13,016	22,090	24,993	78,0%
Fall 4	282	1167	12,406	4,508	0,363	0,821	4,681	4,997	6,809	2,242	4,508	93,7%
Fall 5a	370	1000	6,899	3,058	0,443	0,762	3,591	3,773	4,056	0,973	3,058	95,2%
Fall 5b	370	2500	6,899	1,133	0,164	0,969	1,206	1,362	2,520	0,973	1,133	88,5%
Fall 6a	627	2000	5,888	2,971	0,505	0,716	2,995	2,915	3,287	1,104	2,971	102,7%
Fall 6b	627	4500	5,888	1,210	0,206	0,938	1,135	1,366	2,151	1,104	1,210	83,1%

Tabelle 27: Ermittlung des kritischen Außendrucks $p_{a, Bem}$ für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S690 und $p_{a, Ring}$ nach Jacobsen

S890	b_m [mm]	e [mm]	p_a, Ring [N/mm ²]	p_zw [N/mm ²]	p_zw/ p_a, Ring	f_Bem	p_Bem [N/mm ²]	p_FEA [N/mm ²]	p_Jacob [N/mm ²]	p_Jacob, gl [N/mm ²]	p_ZW, EC3 [N/mm ²]	p_Bem/ p_FEA
Fall 1a	305	875	5,222	2,228	0,427	0,787	2,545	2,634	2,878	0,696	2,228	96,6%
Fall 1b	305	1750	5,222	0,929	0,178	0,971	1,036	1,073	1,958	0,696	0,929	96,5%
Fall 1c	305	3500	5,222	0,696	0,133	1,000	0,455	0,770	1,325	0,696	0,440	59,1%
Fall 1d	305	7000	5,222	0,696	0,133	1,000	0,228	0,592	0,890	0,696	0,215	38,5%
Fall 2a	262	750	23,627	12,380	0,524	0,716	12,619	12,540	14,311	5,475	12,380	100,6%
Fall 2b	262	1500	23,627	8,138	0,344	0,848	7,085	7,355	10,249	5,475	8,138	96,3%
Fall 2c	262	2270	23,627	5,475	0,232	0,931	4,160	6,192	8,312	5,475	5,329	67,2%
Fall 2d	262	4800	23,627	5,475	0,232	0,931	2,824	5,580	5,587	5,475	2,458	50,6%
Fall 3a	465	1500	43,371	41,814	0,964	0,391	31,684	31,992	25,899	25,758	41,814	99,0%
Fall 3b	465	4500	43,371	28,948	0,667	0,610	19,665	26,751	14,676	25,758	28,948	73,5%
Fall 4	282	1167	15,799	4,878	0,309	0,874	5,320	5,074	7,971	2,446	4,878	104,8%
Fall 5a	370	1000	8,242	3,388	0,411	0,799	4,097	4,385	4,711	1,028	3,388	93,4%
Fall 5b	370	2500	8,242	1,133	0,137	1,000	1,221	1,362	2,867	1,028	1,133	89,6%
Fall 6a	627	2000	6,974	3,185	0,457	0,765	3,311	3,546	3,769	1,173	3,185	93,4%
Fall 6b	627	4500	6,974	1,210	0,174	0,974	1,127	1,373	2,430	1,173	1,210	82,1%

Tabelle 28: Ermittlung des kritischen Außendrucks $p_{a, Bem}$ für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S890 und $p_{a, Ring}$ nach Jacobsen

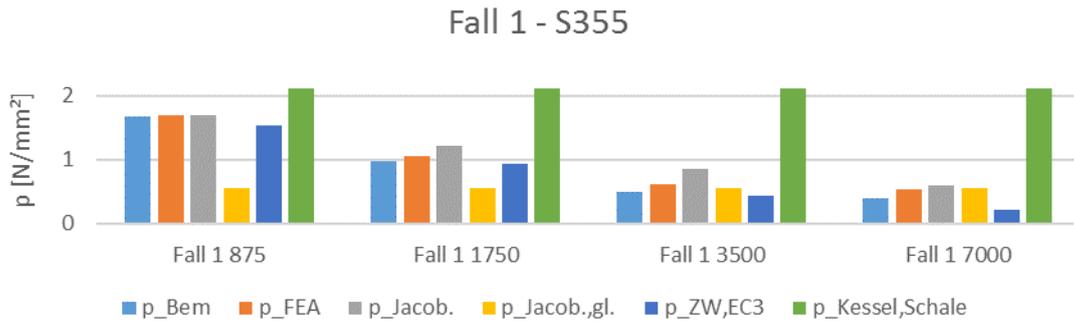


Abbildung 219: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S355

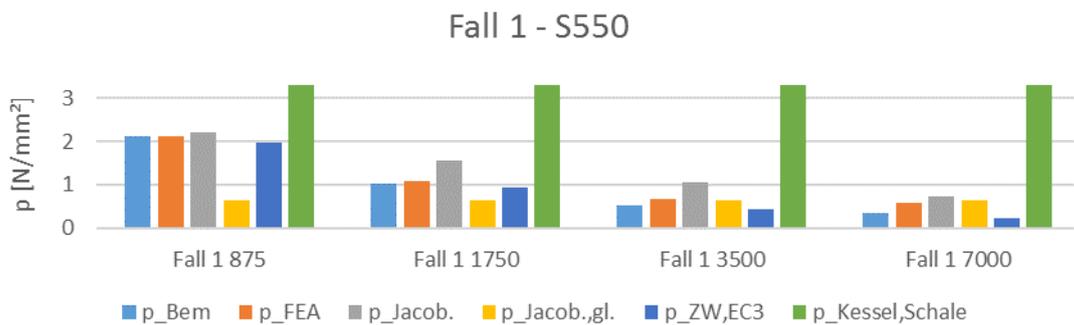


Abbildung 220: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S550

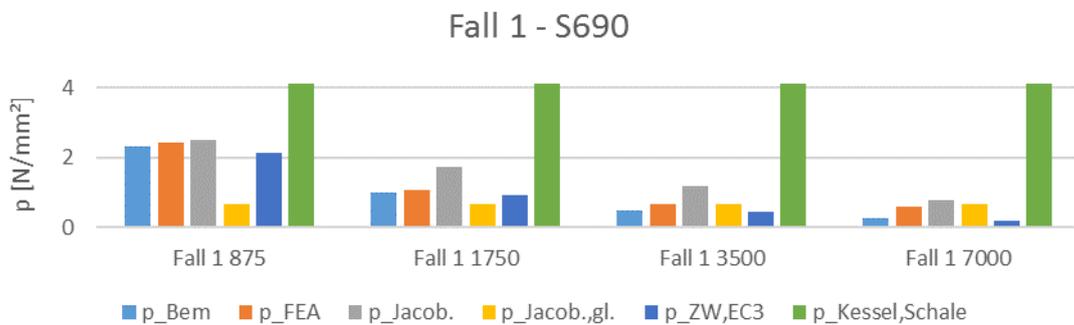


Abbildung 221: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S690

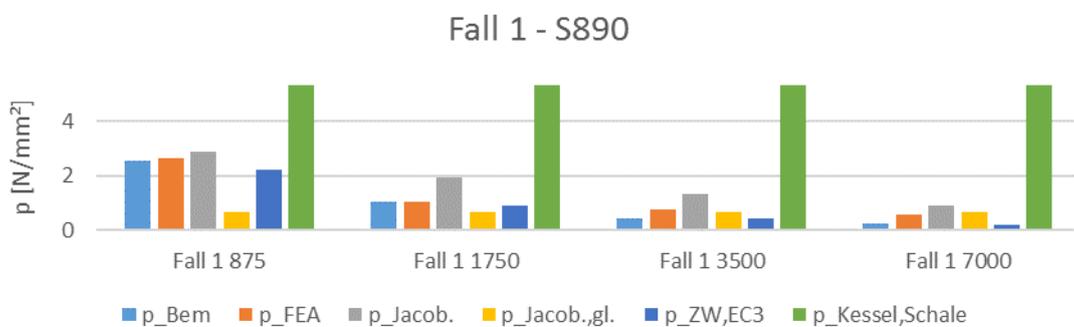


Abbildung 222: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S890

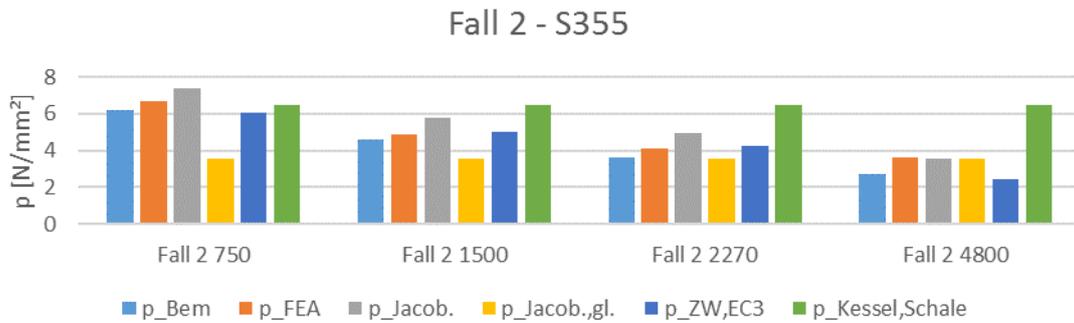


Abbildung 223: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S355

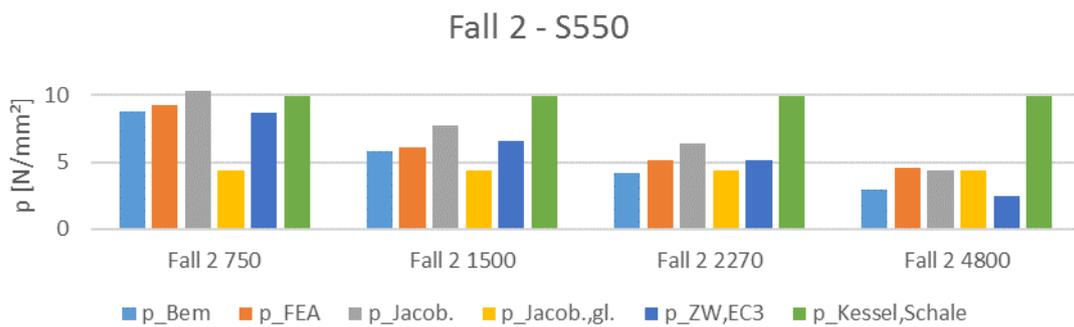


Abbildung 224: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S550

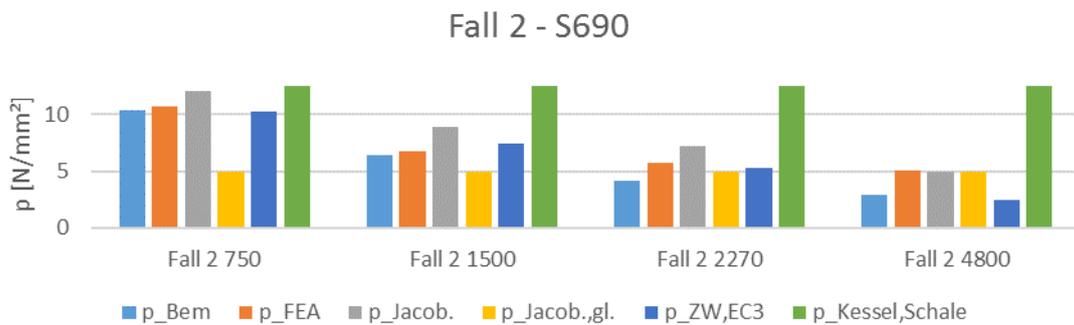


Abbildung 225: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S690

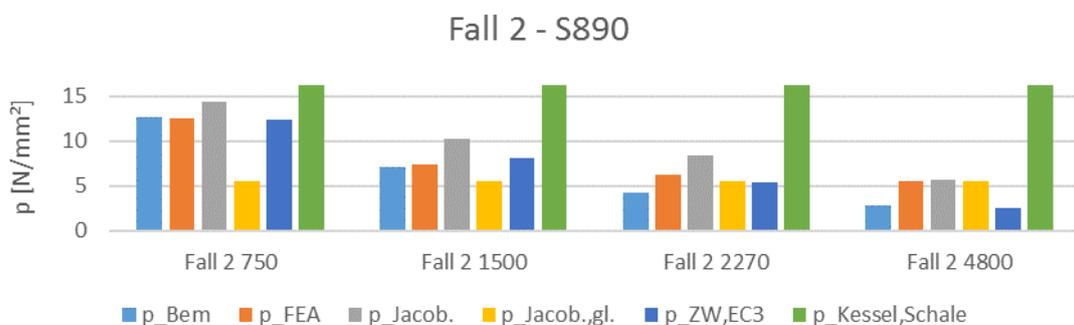


Abbildung 226: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S890

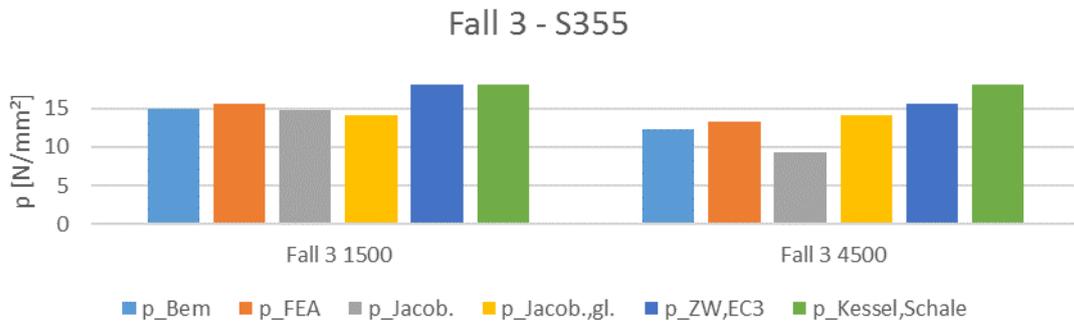


Abbildung 227: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S355

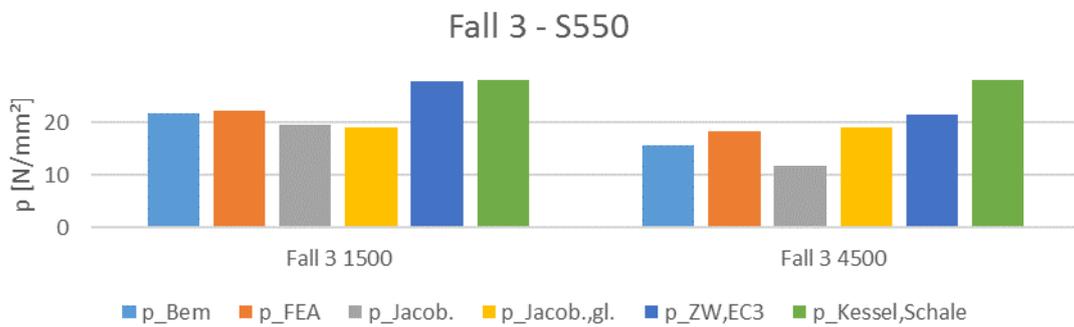


Abbildung 228: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S550

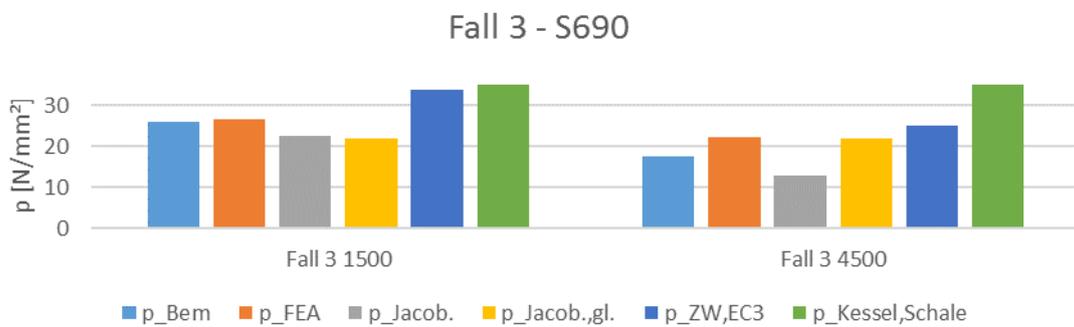


Abbildung 229: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S690

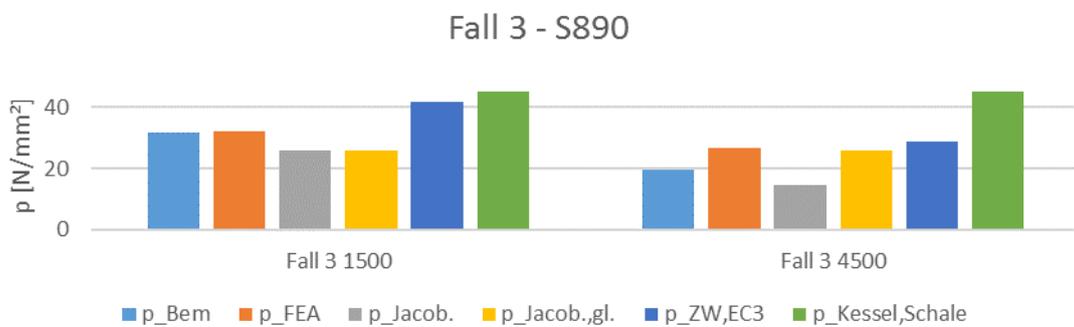


Abbildung 230: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S890

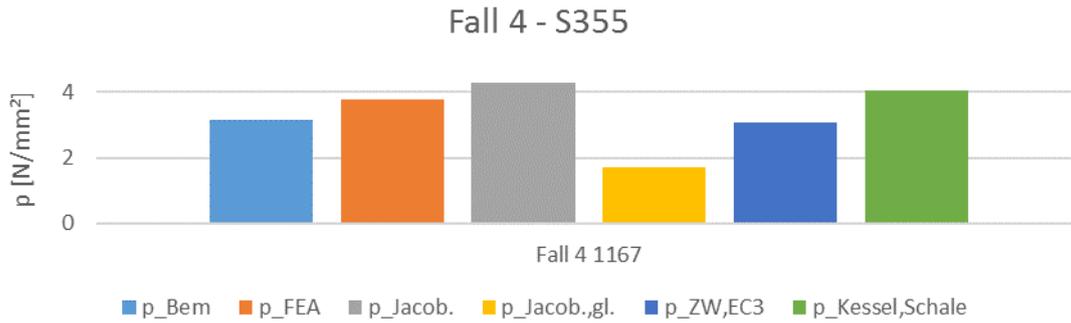


Abbildung 231: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S355

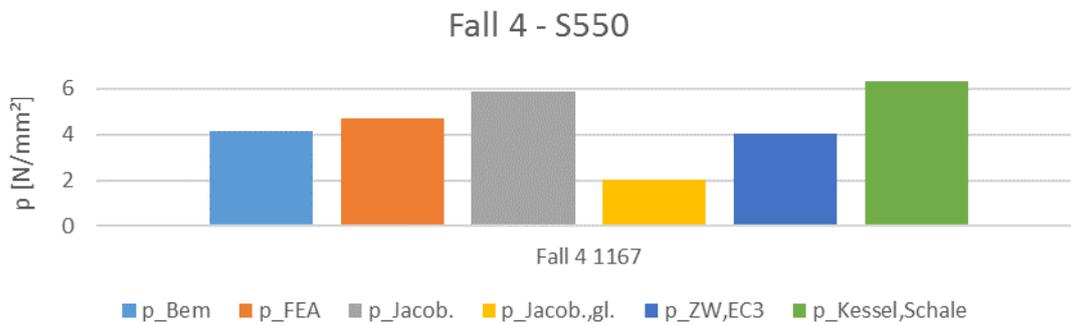


Abbildung 232: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S550

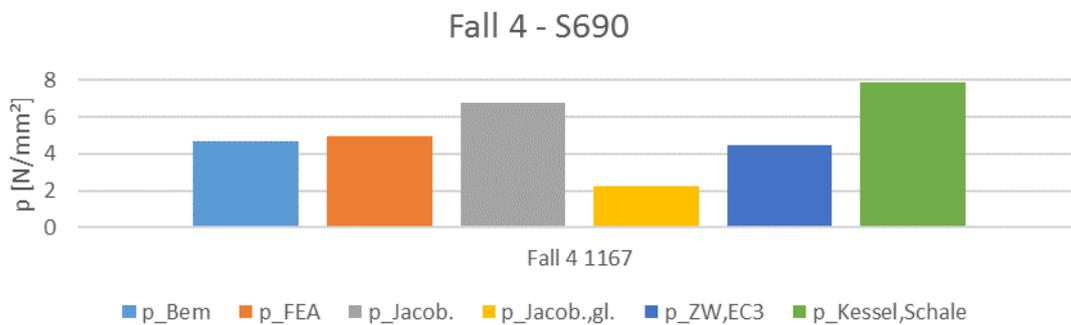


Abbildung 233: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S690

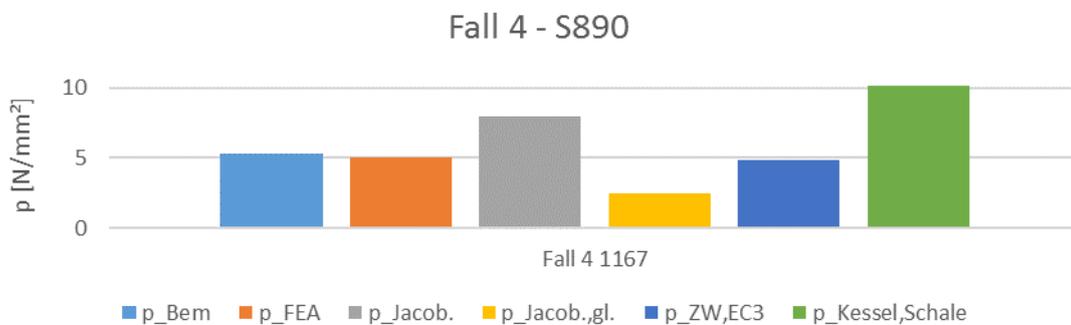


Abbildung 234: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S890

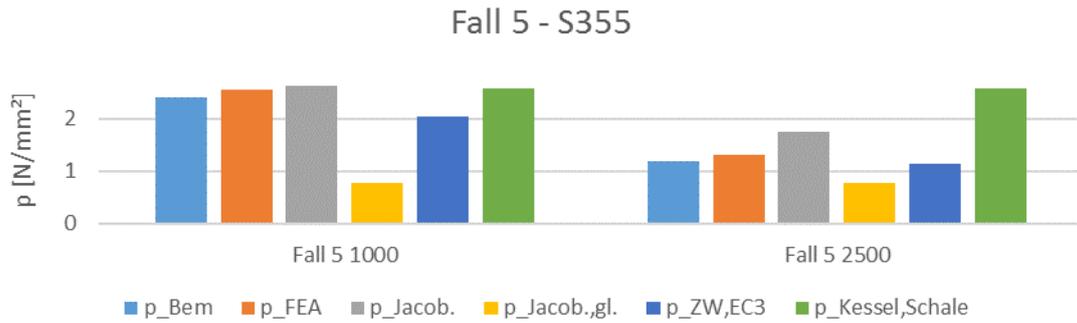


Abbildung 235: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S355

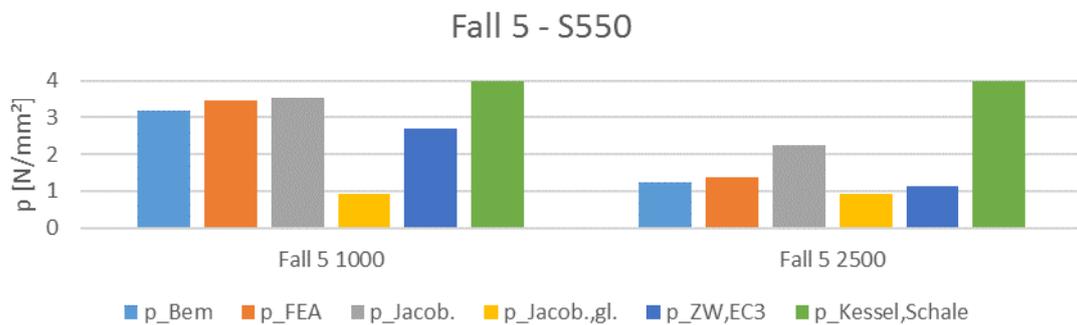


Abbildung 236: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S550

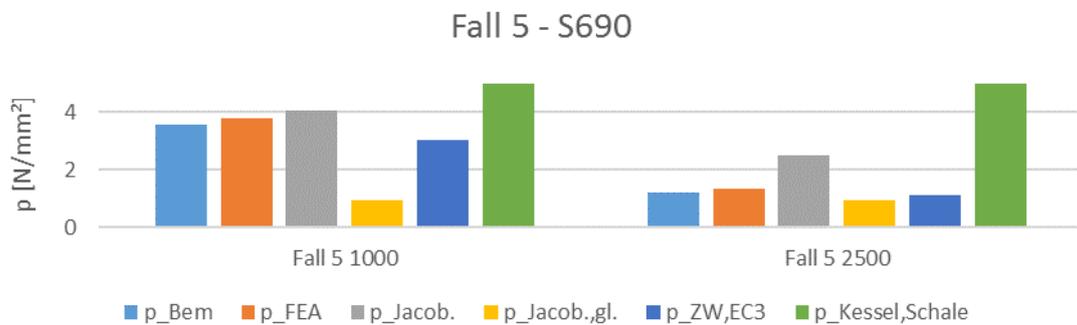


Abbildung 237: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S690

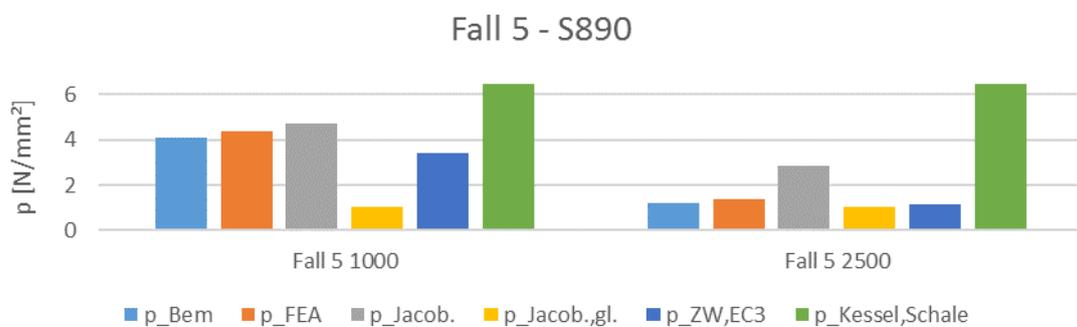


Abbildung 238: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S890

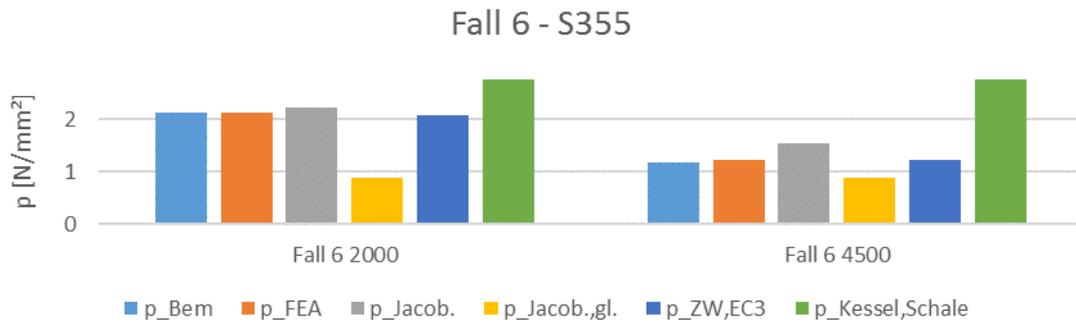


Abbildung 239: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500$; S355

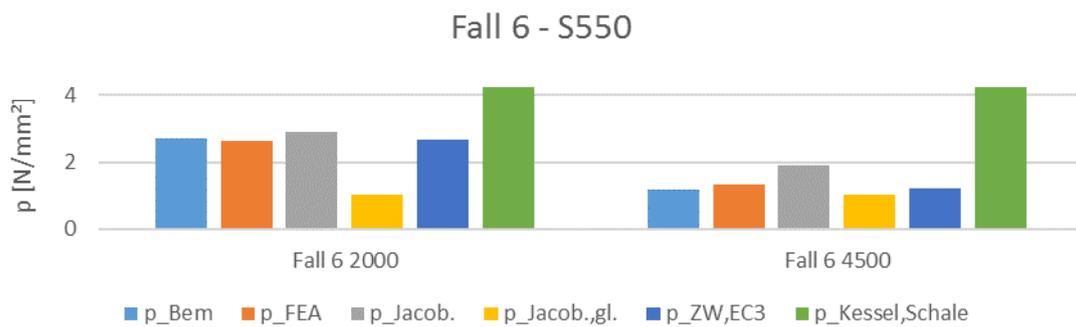


Abbildung 240: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500$; S550

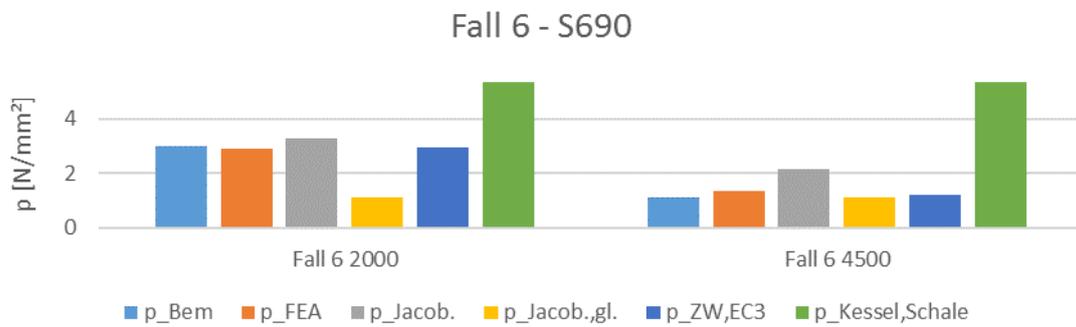


Abbildung 241: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500$; S690

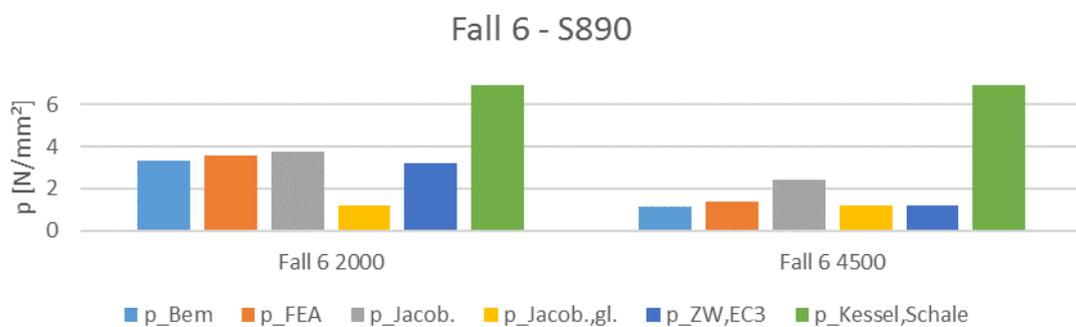


Abbildung 242: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500$; S890

8.3.3 Analyse der Ergebnisse

In Abbildung 243 ist wieder für jeden Anwendungsfall die prozentuelle Unterschreitung der Tragfähigkeit (Tragfähigkeitsreserve; Gl. 87 und Gl. 88) bei Bemessung einer ringversteiften Druckschichtpanzerung mit dem jeweiligen Bemessungsverfahren (neues Bemessungsverfahren nach Jacobsen, aktuelles Bemessungsverfahren → kleinerer Wert aus Nachweis N1 und N2) angegeben. Negative Prozentwerte sind Überschreitungen der Tragfähigkeit.

$$rel. \text{Unterschied}_{Bem} = \left(1 - \frac{p_{a,Bem}}{p_{a,FEA}}\right) * 100 [\%] \quad \text{Gl. 87}$$

$$rel. \text{Unterschied}_{N1,N2} = \left(1 - \frac{\min(p_{Jacobsen}, p_{zw,EC3})}{p_{a,FEA}}\right) * 100 [\%] \quad \text{Gl. 88}$$

Die Ergebnisse sind fast ident wie für das neue Bemessungsverfahren nach Amstutz in Kapitel 8.2.2, da sich die Ergebnisse der Lösungen nach Amstutz und Jacobsen kaum unterscheiden.

Zur Abschätzung der Treffsicherheit des neuen Bemessungsverfahrens nach Jacobsen wurden die Tragfähigkeitsreserven ebenfalls mit dem dimensionslosen Längenparameter ω für Zylinderschalen nach Eurocode 1993-1-6 [8] ausgewertet.

Der Trend, dass mit zunehmendem Längenparameter ω die Abweichung des kritischen Außendruck mit dem neuen Bemessungsverfahren vom realitätsnahen kritischen Außendruck aus der numerischen Berechnung zunimmt, ist für die Ergebnisse nach Jacobsen gleichermaßen gegeben.

Die Diagramme sind nachfolgend für unterschiedliche Stahlgüten (S355, S550, S690 und S890) dargestellt (Abbildung 244 bis Abbildung 247).

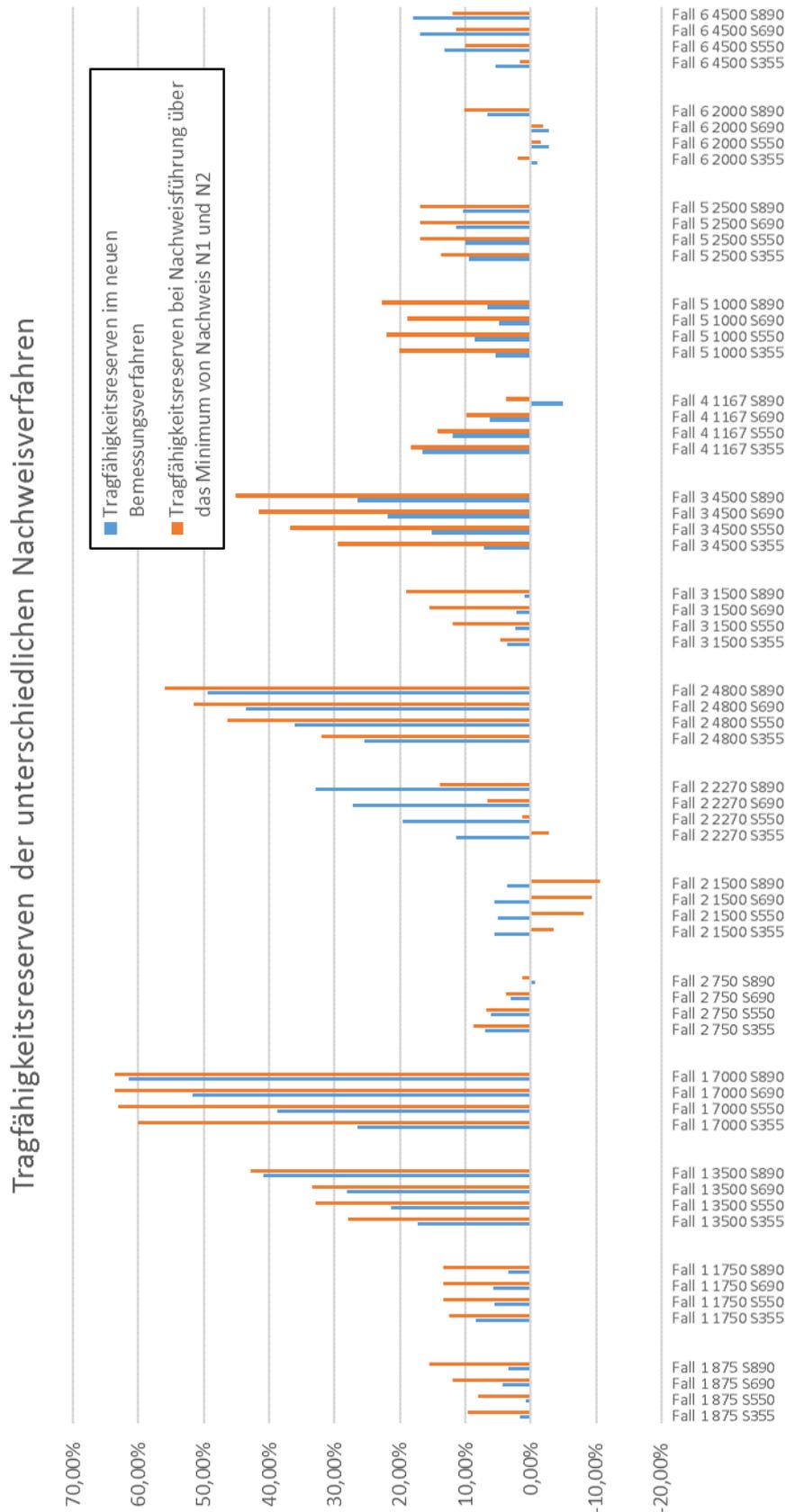


Abbildung 243: Tragfähigkeitsreserven bei Bemessung mit dem neuen Nachweisverfahren (blau) und dem aktuellen Nachweisverfahren (orange) nach der Theorie von Jacobsen

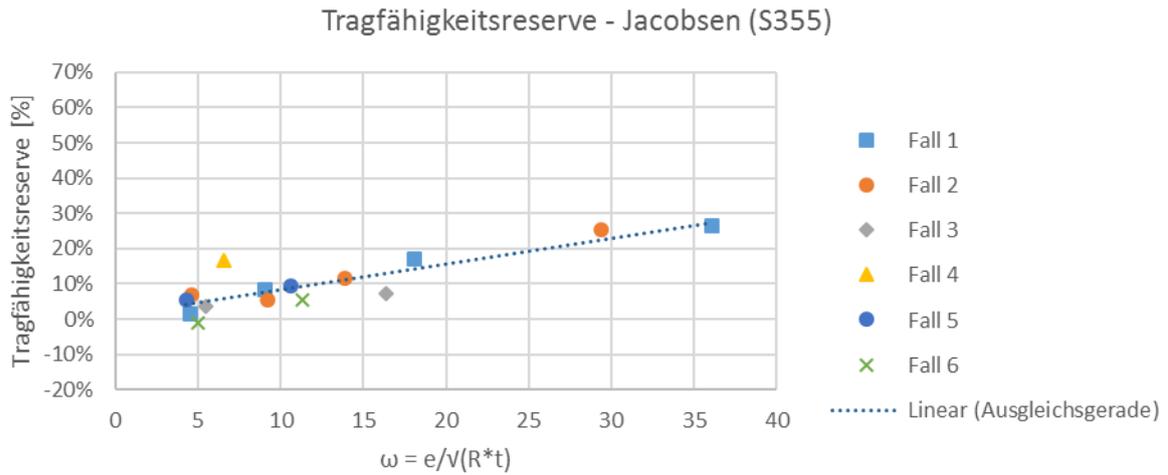


Abbildung 244: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Jacobsen (S355)

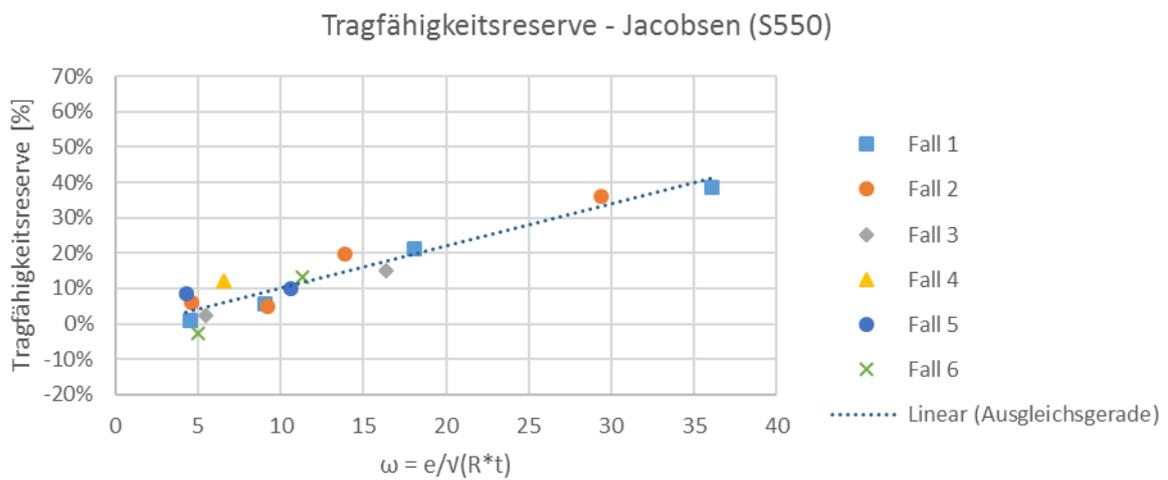


Abbildung 245: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Jacobsen (S550)

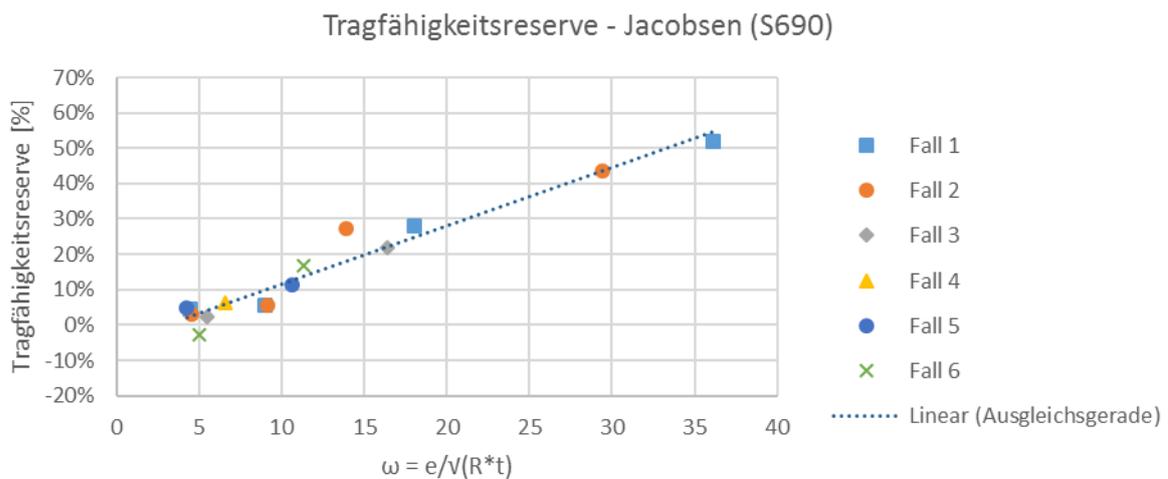


Abbildung 246: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Jacobsen (S690)

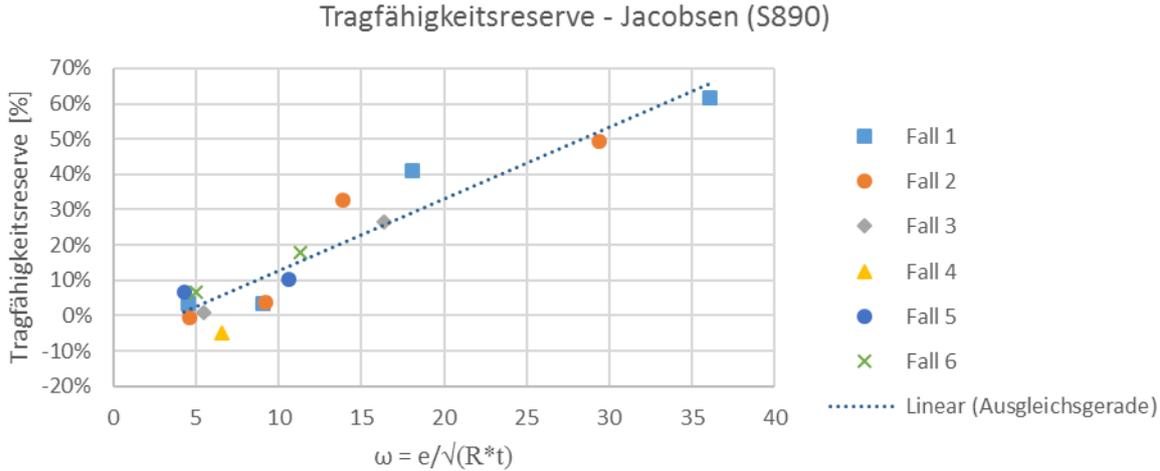


Abbildung 247: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Jacobsen (S890)

8.4 Anmerkungen zur Anwendbarkeit des neuen Bemessungsverfahrens

8.4.1 Fälle mit schlechter Anwendbarkeit des Bemessungsverfahrens

Wie in den vorigen Kapiteln bereits festgestellt werden konnte, ist die Treffsicherheit für den kritischen Außendruck mit dem neuen Bemessungsverfahren stark vom Abstand der Versteifungsringe abhängig. Der kritische Außendruck kann bei Fällen mit größeren Ringabständen nur sehr ungenau, jedoch auf der sicheren Seite liegend, bestimmt werden. Dies ergibt sich durch die Abweichung der Werte für f_{Bem} von f_{FEA} für diese Fälle. Diese Abweichung wirkt sich in weiterer Folge bei größerem Ringabstand immer stärker aus, da der Wert für p_a^* ($= p_{a, Ring} \cdot b_m / e$; alleinige Abtragung des Außendrucks über die Ringsteife) immer kleiner wird. Außerdem liegen die Werte für f_{Bem} beziehungsweise f_{FEA} für Fälle mit großem Ringabstand aufgrund des kleinen Verhältnisses von $p_{zw} / p_{a, Ring}$ nahe bei 1 oder, anders ausgedrückt, ist die Mitwirkung des Stahlrohres an der Außendruckabtragung sehr klein.

Ist also das Verhältnis von p_a^* zu $p_{a, Ring}$ durch den großen Ringabstand sehr klein, wirkt sich eine Abweichung von f_{Bem} zu f_{FEA} umso stärker auf den Unterschied von p_{Bem} zu p_{FEA} aus, je näher f_{Bem} beziehungsweise f_{FEA} bei 1 liegt.

Dies kann leicht anhand des **Anwendungsfalles 1 (S890)** gezeigt werden, indem man die Ergebnisse für die **Ringabstände 3500 mm (Fall 1c)** und **7000 mm (Fall 1d)** betrachtet.

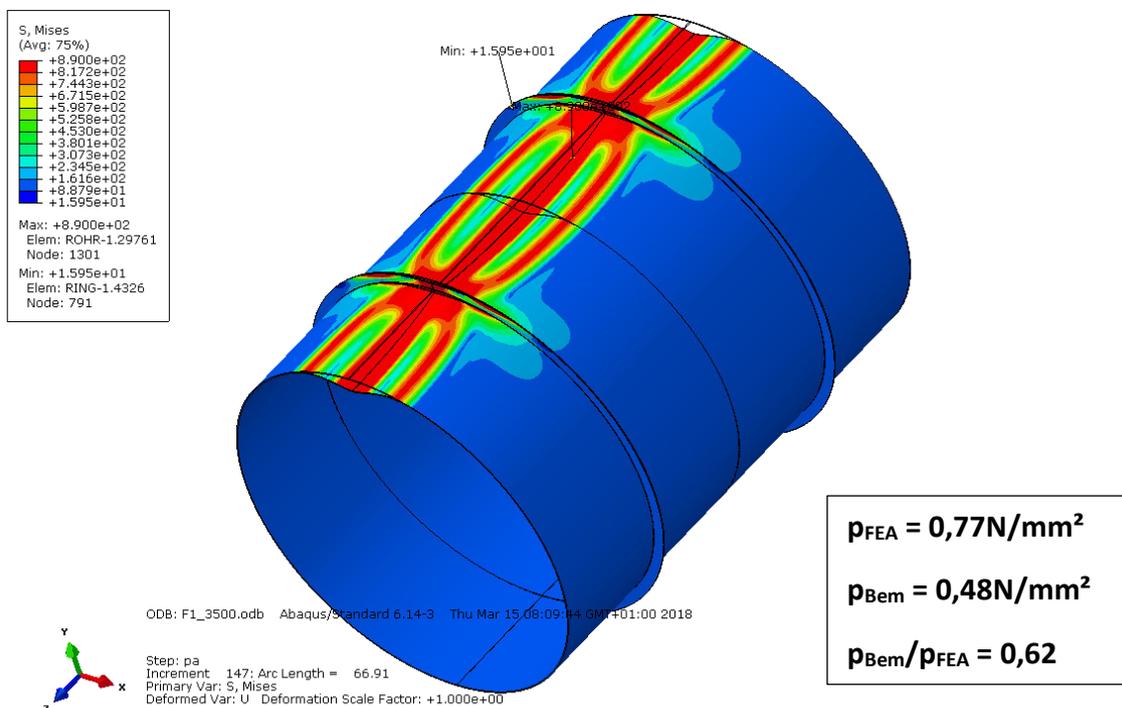


Abbildung 248: Anwendungsfall 1c (S890), $e = 3500 \text{ mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

Der Anwendungsfall 1c, $e = 3500 \text{ mm}$ (S890) stellt einen Sonderfall dar, da der Außendruck nach Erreichen des ersten Hochpunktes in der Lastverformungskurve (Abbildung 66) erneut gesteigert werden kann, bis der kritische Außendruck erreicht ist.

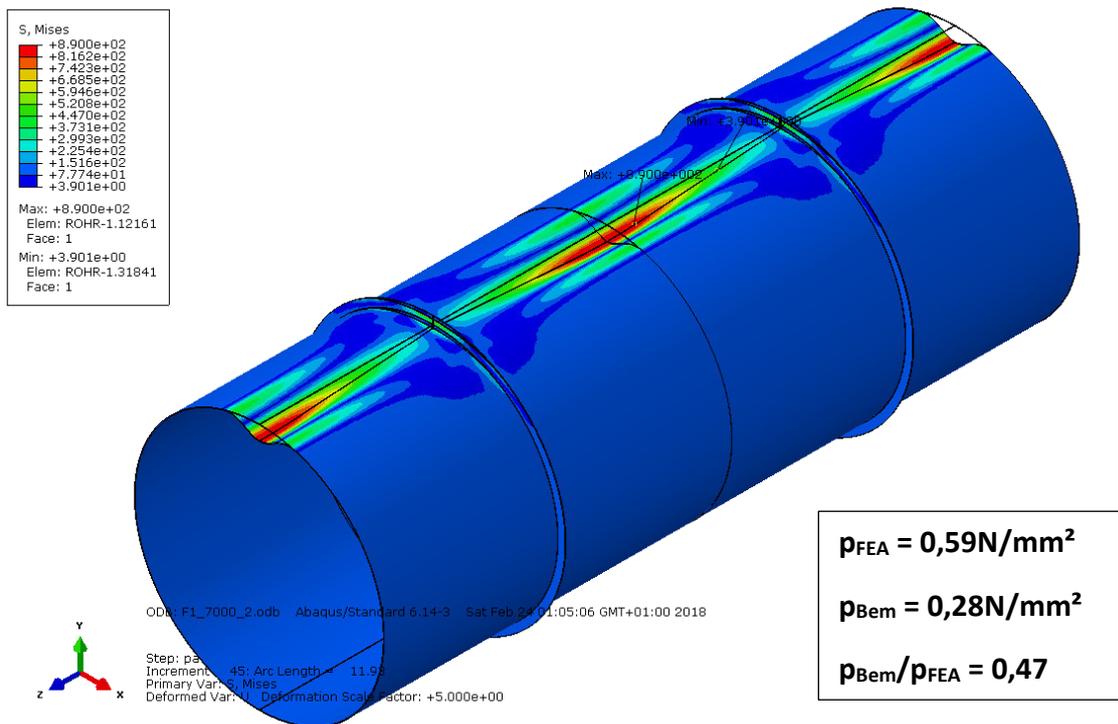


Abbildung 249: Anwendungsfall 1d (S890), $e = 7000\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

In beiden Fällen ergibt sich für $p_{a,Ring} = 4,62\text{ N/mm}^2$ (nach Amstutz) und für $p_{ZW} = 0,70\text{ N/mm}^2$. Somit ist auch der Faktor f_{Bem} in beiden Fällen mit 0,985 gleich groß. Auch die Werte für f_{FEA} haben mit 0,917 für $e = 3500\text{ mm}$ und mit 0,913 für $e = 7000\text{ mm}$ die gleiche Größenordnung, was bedeutet, dass die Unterschiede zwischen f_{FEA} und f_{Bem} in etwa gleich groß sind.

Der relative Unterschied des kritischen Außendruckes aus dem Bemessungsverfahren $p_{a,Bem}$ zum realitätsnahen kritischen Außendruck aus der numerischen Berechnung $p_{a,FEA}$, ist allerdings für den Fall mit dem größeren Ringabstand deutlich größer. Es sei zur Vollständigkeit angemerkt, dass die Treffsicherheit des neuen Bemessungsverfahrens in beiden Fällen nicht gut ist, da die Ringabstände zu groß sind, jedoch noch immer besser als das Minimum der Nachweise N1 und N2 (vgl. Abbildung 209 und Abbildung 243).

Das neue Bemessungsverfahren (nach Amstutz) liefert folgende Ergebnisse:

$$\text{Anwendungsfall 1c (S890) } e = 3500: \quad p_{Bem} = 0,484\text{N/mm}^2$$

$$\text{Anwendungsfall 1d (S890) } e = 7000: \quad p_{Bem} = 0,278\text{N/mm}^2$$

Die realitätsnahen kritischen Außendrucke der beiden Fälle sind:

$$\text{Anwendungsfall 1c (S890) } e = 3500: \quad p_{FEA} = 0,770\text{N/mm}^2$$

$$\text{Anwendungsfall 1d (S890) } e = 7000: \quad p_{FEA} = 0,592\text{N/mm}^2$$

Somit können mit dem neuen Bemessungsverfahren für

Anwendungsfall 1c (S890) $e = 3500$ mm: $0,484/0,77 = \mathbf{62,8\%}$

und

Anwendungsfall 1d (S890) $e = 7000$ mm: $0,278/0,592 = \mathbf{47,0\%}$

des realitätsnahen kritischen Außendrucks erreicht werden.

Der Unterschied von f_{Bem} zu f_{FEA} wirkt sich im Fall mit dem größeren Ringabstand also deutlich mehr auf die Genauigkeit des kritischen Außendrucks aus.

Die Auswirkungen eines größeren Ringabstandes und der Größenordnung von f_{FEA} , wenn der Wert f_{FEA} näher bei 1 liegt, auf die Treffsicherheit des neuen Bemessungsverfahrens werden deutlich, wenn man die relative Differenz aus p_{FEA} und p_{Bem} in Bezug auf p_{FEA} betrachtet.

Diese ergibt sich zu:

$$\frac{\Delta p_{Bem,FEA}}{p_{FEA}} = \frac{p_{a, Ring} * \left(1 + f_{FEA} * \frac{b_m - e}{e}\right) - p_{a, Ring} * \left(1 + f_{Bem} * \frac{b_m - e}{e}\right)}{p_{a, Ring} * \left(1 + f_{FEA} * \frac{b_m - e}{e}\right)}$$

$$= \frac{(f_{FEA} - f_{Bem}) * \frac{b_m - e}{e}}{1 + f_{FEA} * \frac{b_m - e}{e}}$$

Gl. 89

Daraus erkennt man sofort, dass sich die Differenz von f_{FEA} und f_{Bem} mit einem großen Ringabstand ($e \gg b_m$) stärker auf den Unterschied des kritischen Außendrucks aus dem Bemessungsverfahren zum realitätsnahen Außendruck auswirkt. Des Weiteren nähert sich der Nenner bei einem größeren, nahe bei 1 liegenden Wert von f_{FEA} , dem Grenzwert Null an, wodurch der Unterschied noch größer wird.

Im nachfolgenden Diagramm sind die Auswirkungen des Ringabstandes, der Differenz von f_{Bem} und f_{FEA} und der Größenordnung von f_{FEA} auf die Genauigkeit des neuen Bemessungsverfahrens dargestellt. Dazu ist auf der x-Achse die Größe $f_{Bem} - f_{FEA}$ und auf der y-Achse die Größe $(p_{FEA} - p_{Bem})/p_{FEA}$, also der relative Unterschied, aufgetragen. Die blauen Kurven stellen die Auswirkungen auf die Genauigkeit des Bemessungsverfahrens für $f_{FEA} = 0,95$ mit $(b_m - e)/e = -0,99$ (dunkelblau) und $(b_m - e)/e = -0,80$ (hellblau) dar. Die dunkelrote ($(b_m - e)/e = -0,99$) und orange ($(b_m - e)/e = -0,80$) Kurve stellen die Auswirkungen für $f_{FEA} = 0,90$ und die dunkelgrüne ($(b_m - e)/e = -0,99$) und hellgrüne ($(b_m - e)/e = -0,80$) Kurve die Auswirkungen für $f_{FEA} = 0,80$ dar. Die Werte $-0,80$ und $-0,99$ für $(b_m - e)/e$ wurden frei gewählt und sollen veranschaulichen, wie sehr sich die Genauigkeit des neuen Bemessungsmodells bei größeren Ringabständen verschlechtert.

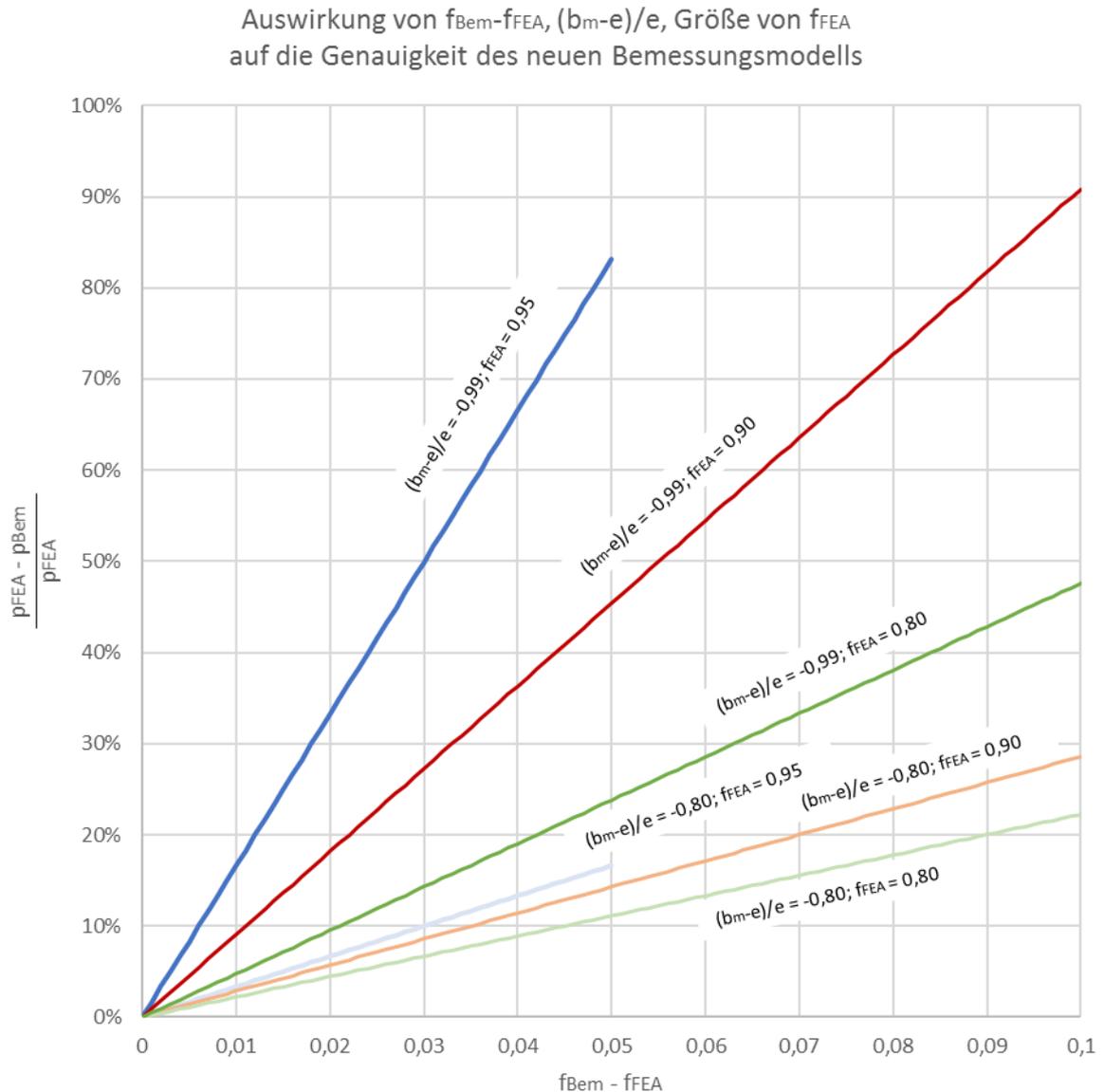


Abbildung 250: Auswirkung von $f_{Bem-fFEA}$, $(b_m-e)/e$ und der Größe von f_{FEA} auf die Genauigkeit des neuen Bemessungsverfahrens

Zur Ungenauigkeit des neuen Bemessungsverfahrens ist zu sagen, dass diese für Fälle mit großen Ringabständen mitunter kleiner ist, als mit dem aktuellen Bemessungsverfahren (Nachweise N1 und N2), wie in Abbildung 209 und Abbildung 243 ersichtlich ist.

Wie vorhin gezeigt, nimmt die Ungenauigkeit des neuen Bemessungsverfahrens erst bei großen Ringabständen zu. Diese Fälle sind allerdings praktisch von keiner großen Relevanz. Die große Ungenauigkeit des neuen Bemessungsverfahrens für diese Fälle ist daher von nicht allzu großer Bedeutung.

Eine Ausnahme bildet der **Anwendungsfall 4, e = 1167 mm**. Bei diesem Anwendungsfall ist die relative Abweichung des kritischen Außendrucks mit dem neuen Bemessungsmodell nach Amstutz zum realitätsnahen kritischen Außendruck bei einer Fließgrenze von 355 N/mm² mit 15,3 Prozent relativ groß und nimmt mit zunehmender Fließgrenze ab, beziehungsweise kommt es für $f_y = 890 \text{ N/mm}^2$ sogar zu einer Überschreitung der Tragfähigkeit (S550 → 11,3%; S690 → 5,5%; S890 → -7,1%; vgl. Abbildung 256).

Als wichtige Einflussgröße für die schlechte Treffsicherheit des kritischen Außendrucks bei niedrigen Fließgrenzen konnte das Verhältnis der Schlankheit des Rohres (R/t) zur Schlankheit des Versteifungsringes (R/i; i...Trägheitsradius des Querschnitts des Versteifungsringes mit dem über b_m mitwirkenden Rohr) identifiziert werden. So ist bei diesem Anwendungsfall das Verhältnis (R/t):(R/i) von allen Fällen am größten. Dadurch kommt es bei niedrigen Fließgrenzen zu großflächigen plastischen Verformungen des Stahlrohres, wodurch der Außendruck noch deutlich gesteigert werden kann. Neben dem Verhältnis (R/t):(R/i) spielt für diesen Effekt auch der Ringabstand eine wesentliche Rolle.

Die Verhältnisse (R/t):(R/i) der einzelnen Fälle sind in der Tabelle 29 angegeben. In den nachfolgenden Abbildungen sind die verformte Figur und die von Mises-Vergleichsspannungen für den Anwendungsfall 4 bei unterschiedlichen Fließgrenzen dargestellt. Die erste Darstellung (Abbildung 251) für die Stahlgüte S355 zeigt die Verhältnisse bei erstmaligem Erreichen der Fließspannung. Der dazugehörige Laststeigerungsfaktor für den Außendruck beträgt $LPF = 0,61$. In der zweiten Darstellung (Abbildung 252) für die Stahlgüte S355 sind die Verhältnisse bei Erreichen des kritischen Außendrucks ersichtlich. Der Laststeigerungsfaktor entspricht hier $LPF = 0,76$. Dies ist eine Steigerung von +24,6 Prozent. In Abbildung 253 bis Abbildung 255 werden die verformte Figur und die von Mises-Vergleichsspannungen für den Anwendungsfall 4 mit den Stahlgüten S550, S690 und S890 gezeigt.

	e_R [mm]	R/i	R/t	(R/t)/(R/i)
Fall 4	1167	24,93	87	3,49
Fall 5a	1000	42,6	138	3,24
Fall 5b	2500	42,6	138	3,24
Fall 1a	875	54,75	167	3,05
Fall 1b	1750	54,75	167	3,05
Fall 1c	3500	54,75	167	3,05
Fall 1d	7000	54,75	167	3,05
Fall 6a	1500	44,35	129	2,91
Fall 6b	4500	44,35	129	2,91
Fall 2a	750	24,87	55	2,21
Fall 2b	1500	24,87	55	2,21
Fall 2c	2270	24,87	55	2,21
Fall 2d	4800	24,87	55	2,21
Fall 3a	1500	22,35	20	0,89
Fall 3b	4500	22,35	20	0,89

Tabelle 29: Verhältnisse der Schlankheiten des Rohres (R/t) und des Versteifungsringes (R/i)

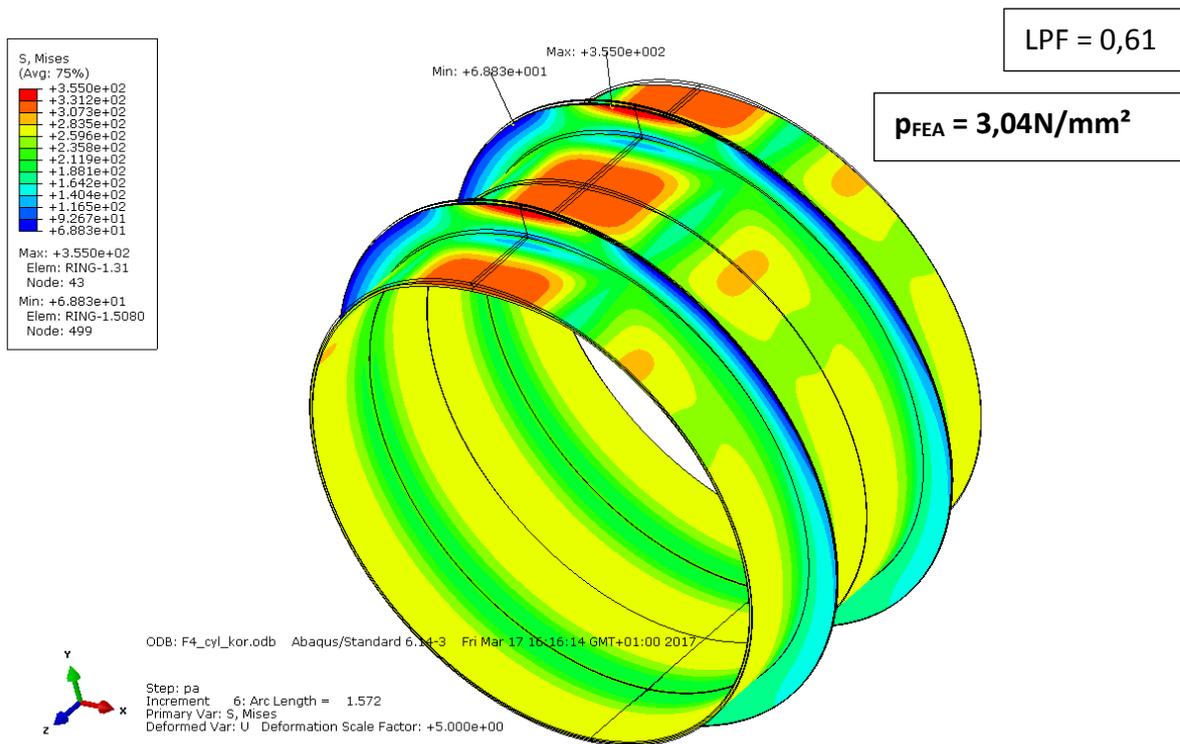


Abbildung 251: Anwendungsfall 4 (S355), $e = 1167\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei erstmaligen Erreichen der Fließspannung (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

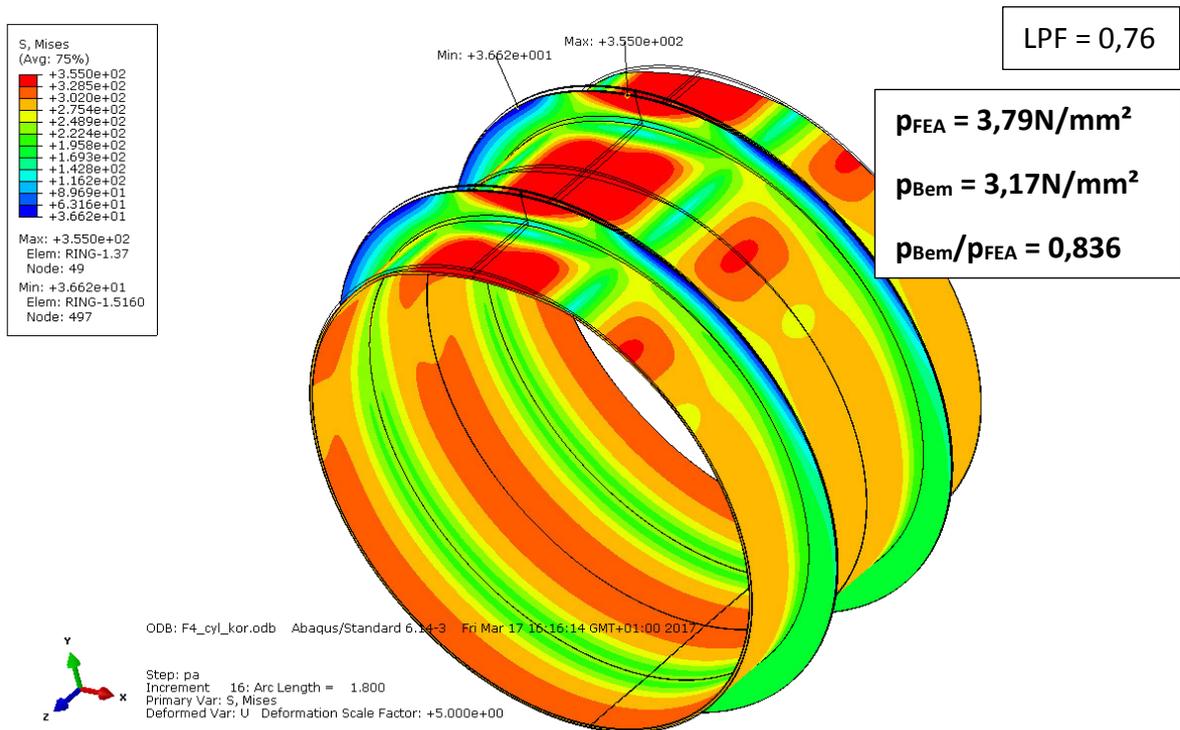


Abbildung 252: Anwendungsfall 4 (S355), $e = 1167\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

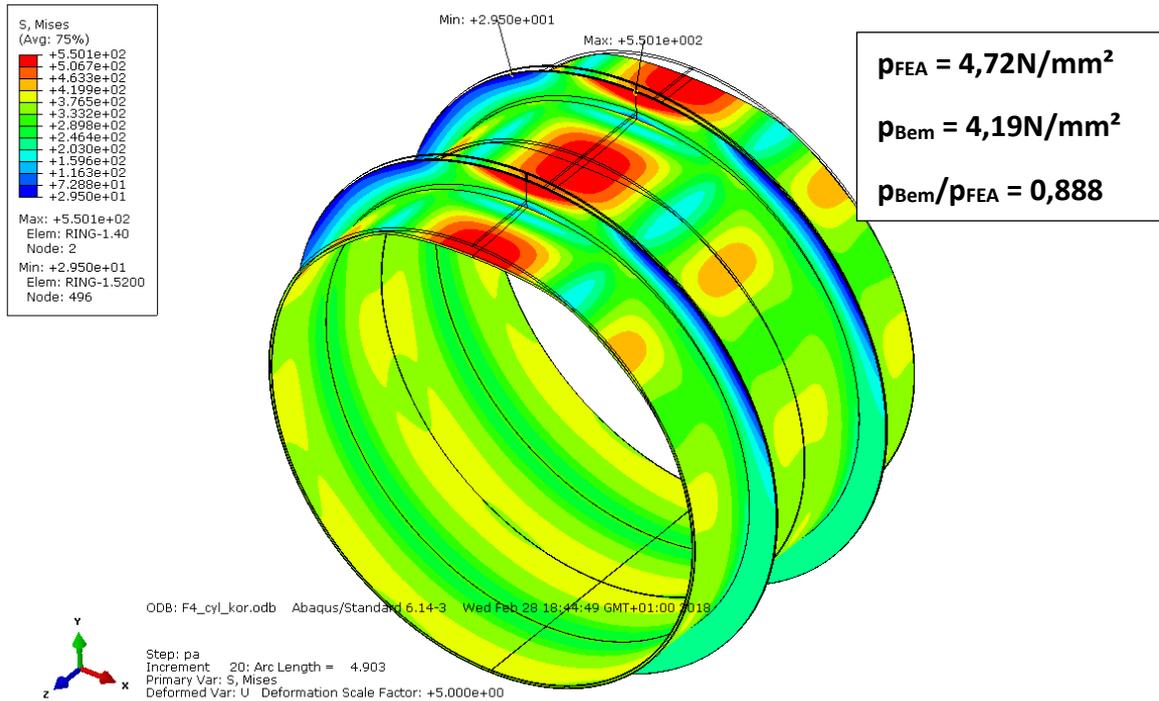


Abbildung 253: Anwendungsfall 4 (S550), $e = 1167 \text{ mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

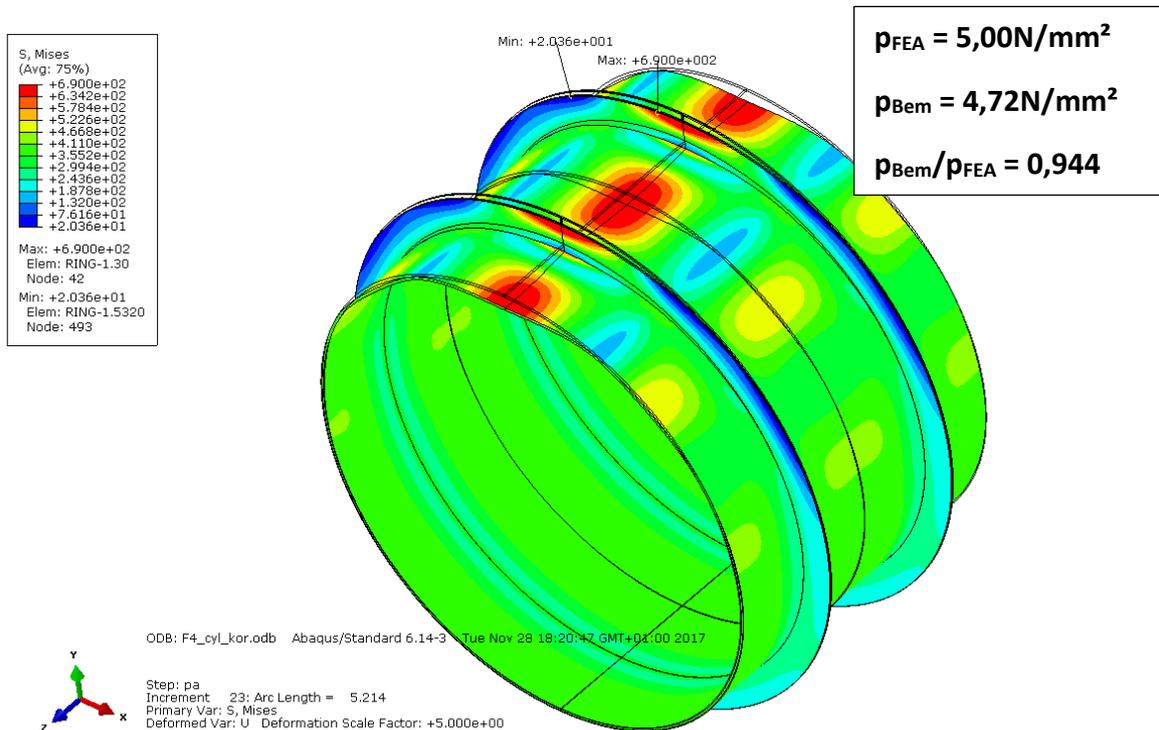


Abbildung 254: Anwendungsfall 4 (S690), $e = 1167 \text{ mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

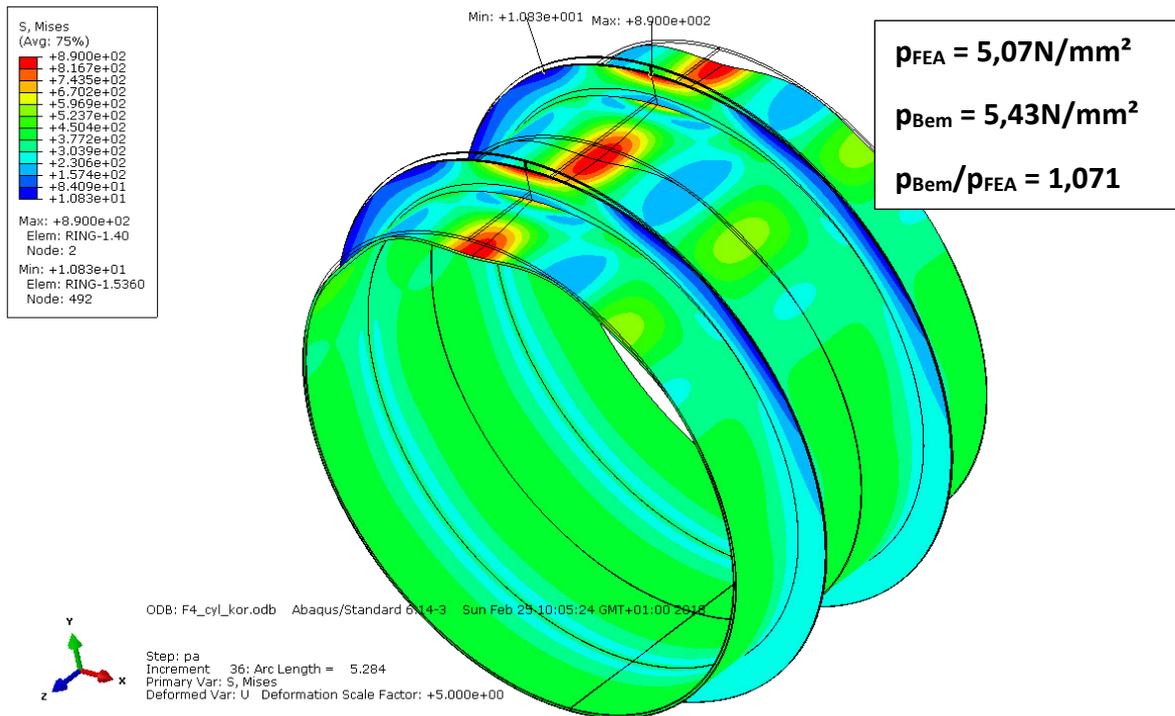


Abbildung 255: Anwendungsfall 4 (S890), $e = 1167 \text{ mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

Tragfähigkeitsreserven der unterschiedlichen Nachweisführungen

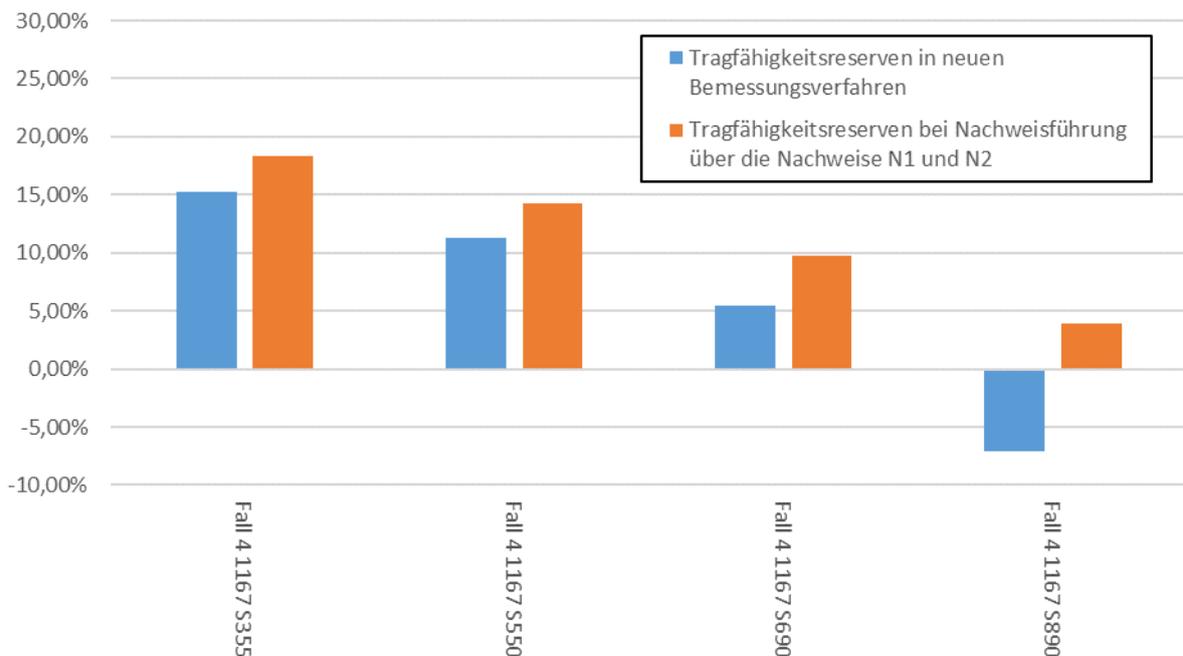


Abbildung 256: Anwendungsfall 4; Tragfähigkeitsreserven bei Bemessung mit dem neuen Nachweisverfahren (blau) und dem aktuellen Nachweisverfahren (orange) nach der Theorie von Amstutz

8.4.2 Fälle mit guter Anwendbarkeit des neuen Bemessungsverfahrens

Für alle praktischen Anwendungsfälle, das heißt für Fälle mit einem engen Ringabstand, ist eine genaue Ermittlung des kritischen Außendruckes mit dem neuen Bemessungsverfahren möglich. Nur für den Anwendungsfall 4 ist aus den genannten Gründen eine größere Unterschreitung des realitätsnahen kritischen Außendruckes bei niedrigen Fließgrenzen gegeben.

Am besten wird mit dem neuen Bemessungsverfahren der kritische Außendruck für den **Anwendungsfall 3a (e = 1500 mm)** getroffen. Die Abweichungen zum realitätsnahen kritischen Außendruck der numerischen Berechnung sind für alle Fließgrenzen (S355, S550, S690 und S890) sehr klein und liegen auf der sicheren Seite. Die numerische Berechnung zeigt für diesen Fall außerdem, dass bei allen angenommenen Fließgrenzen nur eine Beule entsteht. In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 257 bis Abbildung 260) sind die verformten Figuren und die von Mises-Vergleichsspannungen für jede untersuchte Fließgrenze bei Erreichen des kritischen Außendruckes p_{FEA} dargestellt. Außerdem sind der kritische Außendruck $p_{a,FEA}$ und der mit dem neuen Bemessungsverfahren ermittelte kritische Außendruck $p_{a,Bem}$ angegeben.

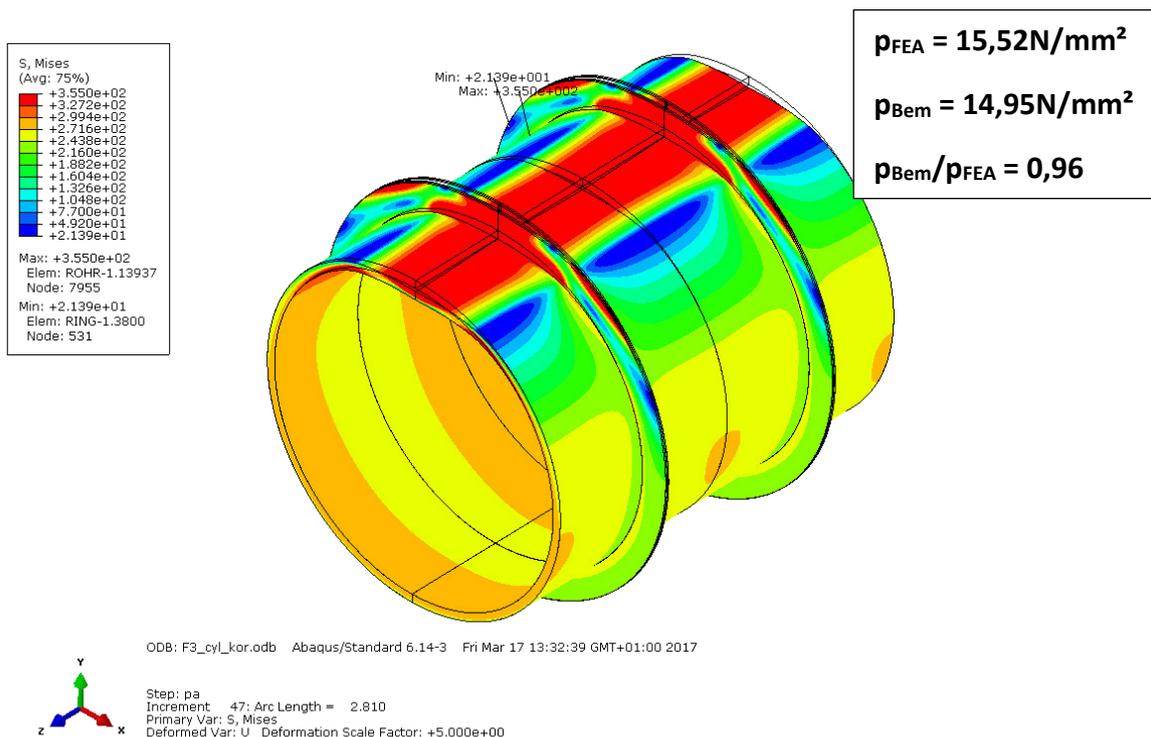


Abbildung 257: Anwendungsfall 3a (S355), e = 1500mm; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

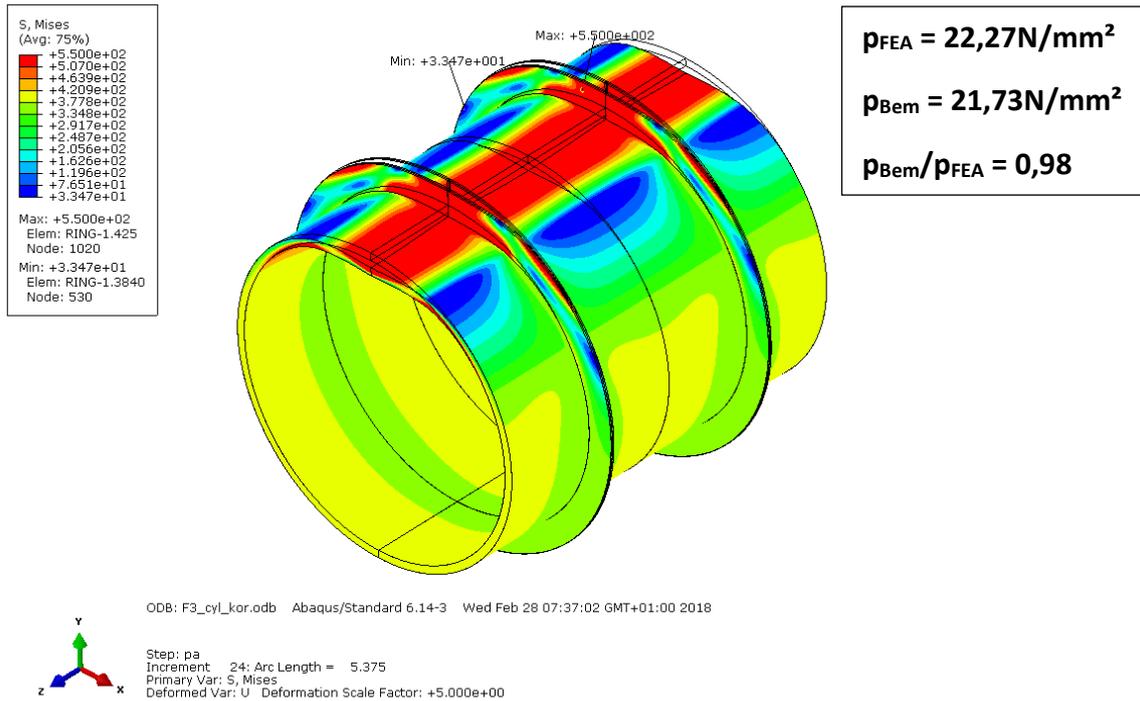


Abbildung 258: Anwendungsfall 3a (S550), $e = 1500\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

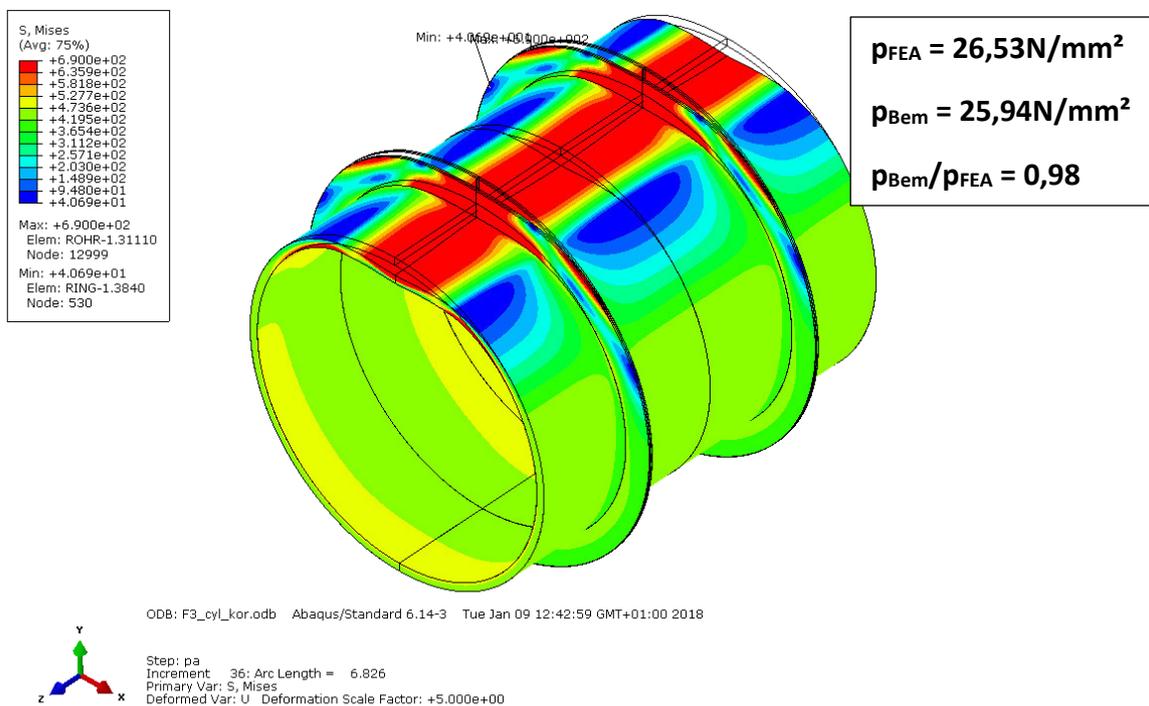


Abbildung 259: Anwendungsfall 3a (S690), $e = 1500\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

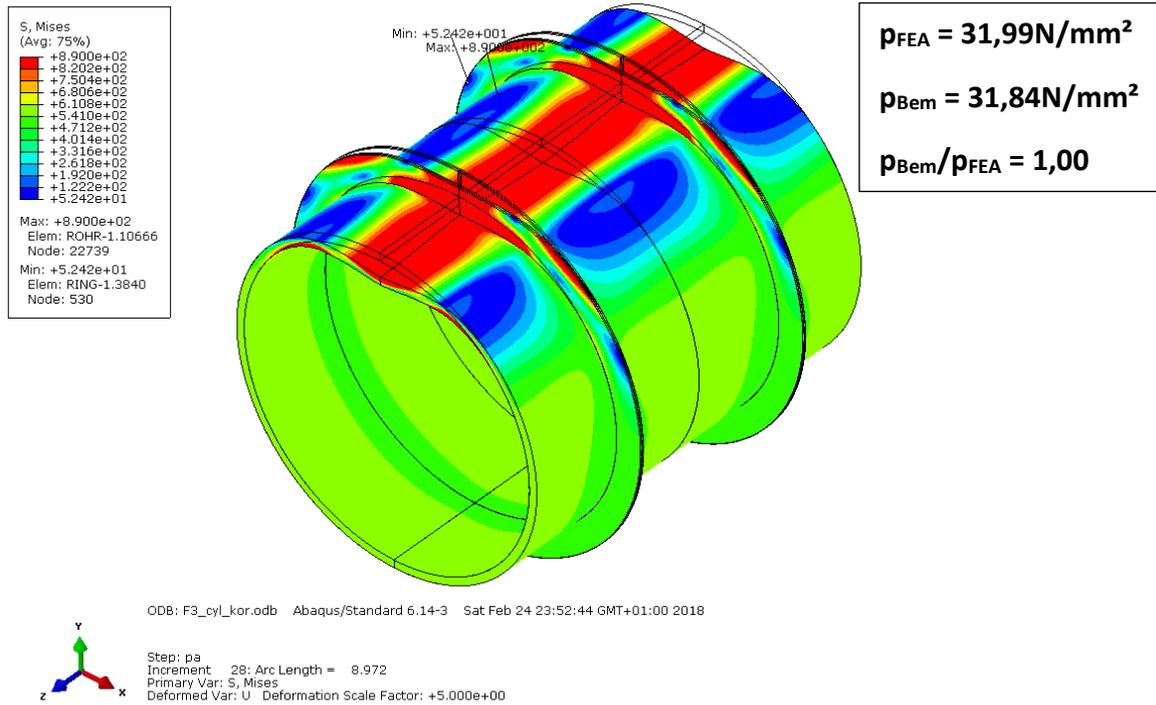


Abbildung 260: Anwendungsfall 3a (S890), e = 1500mm; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

Der kritische Außendruck für den **Anwendungsfall 6a (e = 2000 mm)** kann mit dem neuen Bemessungsmodell ebenfalls sehr genau ermittelt werden. Hier ist allerdings anzumerken, dass der realitätsnahe kritische Außendruck für die Fließgrenzen S355, S550 und S690 geringfügig überschritten ist. Nur bei der Fließgrenze S890 ist der ermittelte kritische Außendruck deutlich unterschritten. Der Grund dafür kann bei Betrachtung der verformten Figuren für jeden Anwendungsfall leicht identifiziert werden. Während sich bei S355, S550 und S690 nur eine Beule einstellt, entstehen bei einer Fließgrenze von 890 N/mm² durch die Verformungszunahme zwei Beulen.

Die verformten Figuren mit den von Mises-Vergleichsspannungen sind anschließend dargestellt (Abbildung 261 bis Abbildung 264). Die Werte für $p_{a,FEA}$ und $p_{a,Bem}$ sind ebenfalls wieder angegeben.

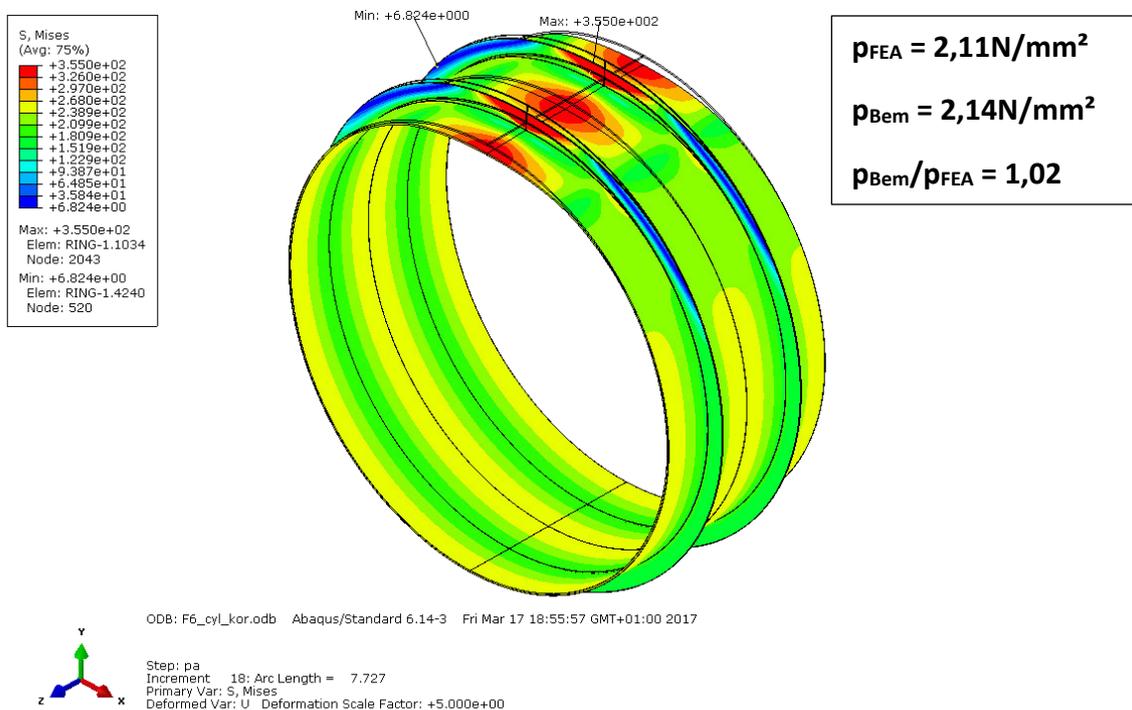


Abbildung 261: Anwendungsfall 6a (S355), e = 2000mm; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

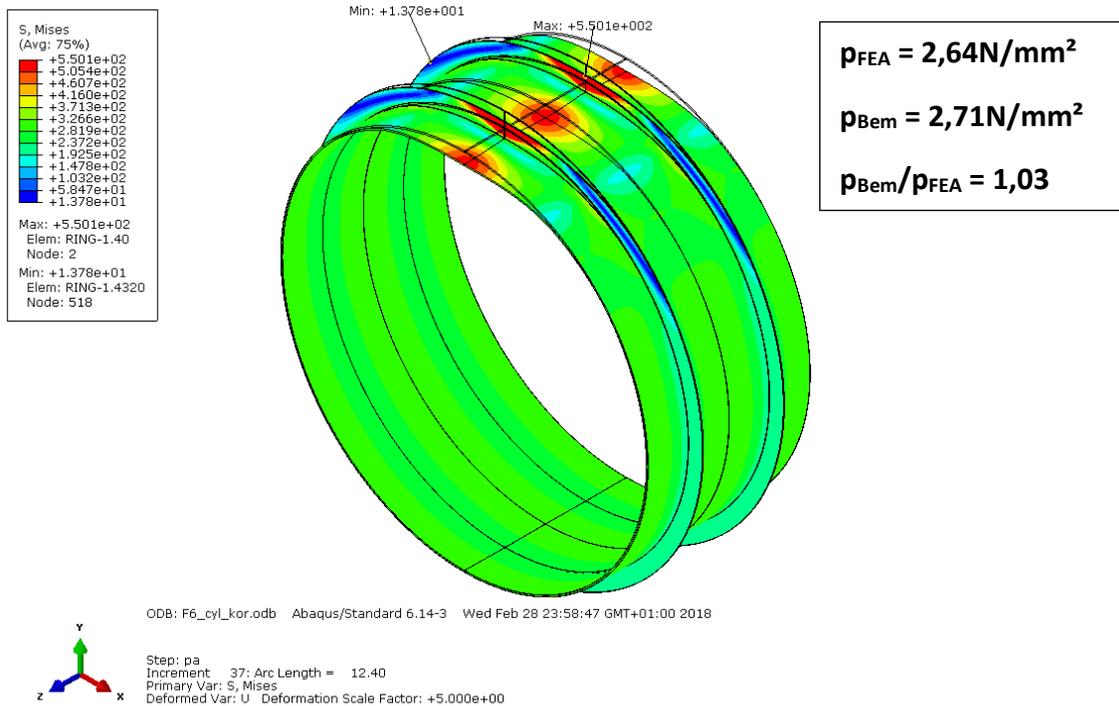


Abbildung 262: Anwendungsfall 6a (S550), $e = 2000\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

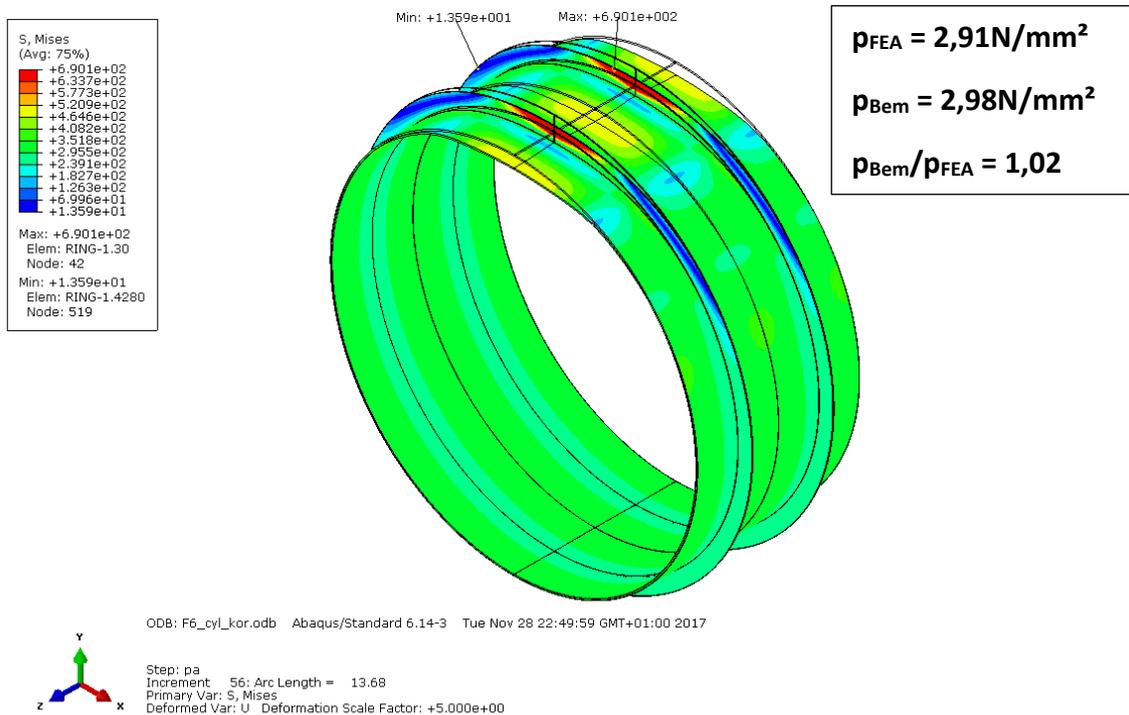


Abbildung 263: Anwendungsfall 6a (S690), $e = 2000\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

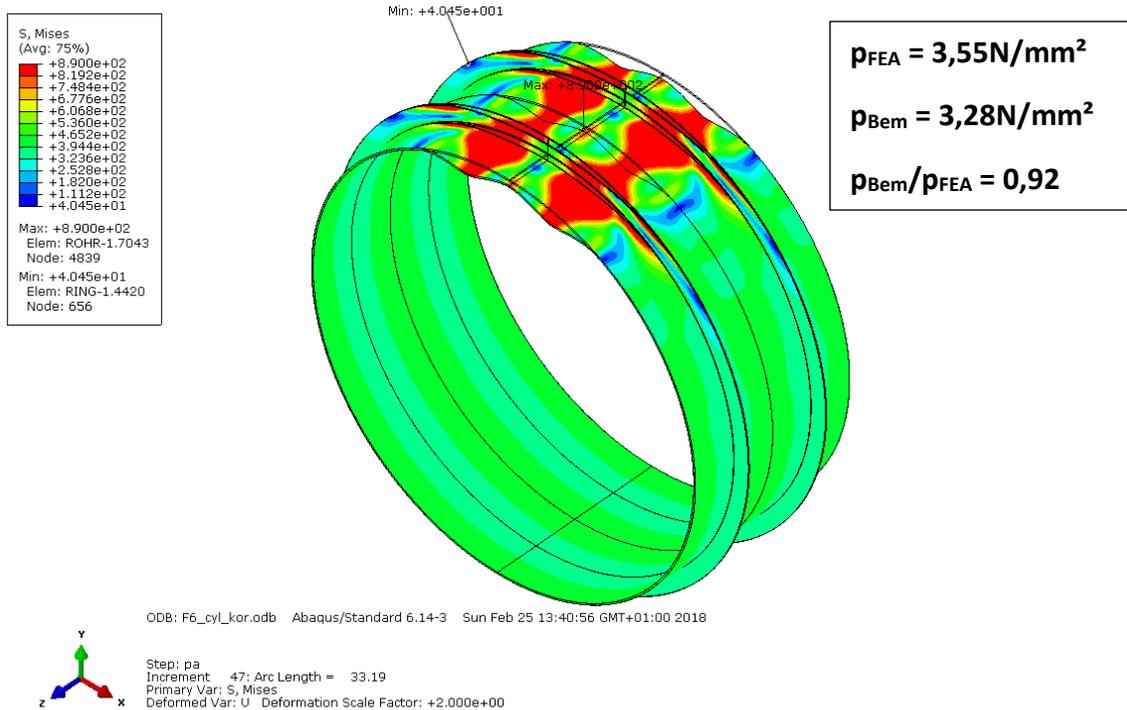


Abbildung 264: Anwendungsfall 6a (S890), $e = 2000\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung

9 pa,Ring der mitwirkenden Breite bm

Im neuen Bemessungsvorschlag ist der kritische Außendruck $p_{a,Ring}$ für den Versteifungsring und das über die Breite b_m mitwirkende Stahlrohr die wesentliche Kenngröße. Der mitwirkenden Breite b_m kommt daher eine wesentliche Bedeutung zu. Wie bereits in Kapitel 2.1.2 angeführt, legt Feder [6] die mitwirkende Breite mit

$$b_m = t_V + 1,56 * \sqrt{R * t_S} \quad \dots \text{Feder}$$

fest.

Jacobsen [7] gibt die mitwirkende Breite ohne die Stärke der Steife t_V an.

$$b_m = 1,56 * \sqrt{R * t_S} \quad \dots \text{Jacobsen}$$

R ... mittlerer Radius des Rohres

t_S ... Wanddicke des Rohres

In der Veröffentlichung von Feder aus dem Jahr 1971 [6] ist zu b_m angemerkt, dass dieses Maß nur zur Ermittlung der Normalspannungen berechtigt und zur Ermittlung der Biegespannungen eine andere mitwirkende Breite verwendet werden sollte, die jedoch nicht angeführt ist.

Aus diesem Grund ist die Ermittlung der Biegespannungen für den Versteifungsring mit der mitwirkenden Breite b_m nicht ganz korrekt. Daher wurde eine Analyse des kritischen Außendrucks $p_{a,Ring}$, bei Variation der mitwirkenden Breite, durchgeführt. Die mitwirkende Breite nach Feder wurde für die einzelnen Anwendungsfälle je einmal halbiert und einmal um die Hälfte erhöht. Mit den daraus resultierenden Querschnittswerten wurde der kritische Außendruck $p_{a,Ring}$ nach der Theorie von Amstutz/Feder [5] ermittelt.

Es zeigt sich dabei, dass für Fälle mit hohen Ringsteifen ($R/i_{Ring} \ll$) und niedrigen Fließgrenzen meist die Kesselformel für den Versteifungsring maßgebend ist ($p_{a,Ring,max}$; Gl. 81). Für diese Fälle ändert sich $p_{a,Ring}$ bei Variation der mitwirkenden Breite daher im Verhältnis v (Gl. 90).

$$v = \frac{\frac{A_{Ring,1,0b_m}}{b_m * R_{m,1,0b_m}}}{\frac{A_{Ring,k*b_m}}{k * b_m * R_{m,k*b_m}}} \quad \text{Gl. 90}$$

Dabei ist k der Faktor zur Variation der mitwirkenden Breite b_m (0,5; 1,5), A_{Ring} die Querschnittsfläche des Versteifungsringes und der über b_m beziehungsweise $k*b_m$ mitwirkenden Schale und R_m der Radius des Versteifungsringes im Schwerpunkt des Querschnitts.

Da die Kesselformel vor allem bei Fällen mit relativ hohen Ringsteifen, das heißt mit einer geringen Schlankheit ($R/i_{Ring} \ll$) maßgebend ist, ist die Auswirkung durch die Variation der

mitwirkenden Breite für diese Fälle eher gering, wie in Tabelle 30 und den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 265 bis Abbildung 270) zu sehen ist (Werte in gelb, wenn $p_{a, Ring} = p_{a, Ring, max}$ nach Gl. 81 maßgebend ist). Die Gesamtquerschnittsfläche (Ringsteife + mitwirkendes Rohr) ändert sich in diesen Fällen durch die Variation der mitwirkenden Breite nur geringfügig.

Bei schlankeren Ringsteifen ($R/i_{Ring} \gg$) ergibt sich der kritische Außendruck für den Versteifungsring $p_{a, Ring}$ gemäß der Theorie von Amstutz [5]. Bei diesen Fällen sind die Unterschiede für $p_{a, Ring}$ bei Variation der mitwirkenden Breite, größer. Vor allem für den Fall 5 sind die Abweichungen für $p_{a, Ring}$ bei Variation der mitwirkenden Breite sehr groß. Bei diesem Fall wird ein sehr schlankes Rohr mit einer schlanken Ringsteife kombiniert. Dies ist auch für die Fälle 1 und 6 gegeben.

Je schlanker also das Rohr beziehungsweise der Versteifungsring ist, desto mehr wirkt sich eine Änderung der mitwirkenden Breite auf $p_{a, Ring}$ aus.

Die kritischen Außendrucke $p_{a, Ring}$ für den Versteifungsring sind in der Tabelle 30 für unterschiedliche mitwirkende Breiten (b_m , $0,5 \cdot b_m$, $1,5 \cdot b_m$) angegeben. Jene Fälle bei denen die Kesselformel maßgebend wird, sind in der Tabelle gelb markiert. Zusätzlich ist für jeden Fall die Schlankheit R/i_{bm} für den Querschnitt des Versteifungsringes mit dem über die Breite b_m mitwirkenden Stahlrohr angegeben.

In den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 265 bis Abbildung 270) sind die kritischen Außendrucke für jeden Fall und den unterschiedlichen Fließgrenzen unter Variation von b_m veranschaulicht.

Grundsätzlich kann mit dieser Studie gezeigt werden, dass der Einfluss einer Abweichung von b_m auf den kritischen Außendruck $p_{a, Ring}$ nicht allzu groß ist, vor allem wenn die mitwirkende Breite größer ist als b_m . Insbesondere wenn man bedenkt, dass bei dieser Studie die mitwirkende Breite einmal halbiert und einmal um die Hälfte erhöht wurde und die mitwirkenden Breiten damit sehr große Unterschiede aufweisen.

F1						p_a,Ring [N/mm ²]			p_a,Ring,0,5b_m/ p_a,Ring,b_m	p_a,Ring,1,5b_m/ p_a,Ring,b_m
	R_S [mm]	A_Ring,bm [mm ²]	I_Ring,bm [mm ⁴]	i_bm [mm]	R_S/ i_bm	b_m	0.5b_m	1.5b_m		
S355	2507,5	7013,2	14709000	45,8	54,75	2,66	3,71	2,24	1,39	0,84
S550	2507,5	7013,2	14709000	45,8	54,75	3,62	5,16	2,99	1,43	0,83
S690	2507,5	7013,2	14709000	45,8	54,75	4,19	6,04	3,43	1,44	0,82
S890	2507,5	7013,2	14709000	45,8	54,75	4,62	6,61	3,82	1,43	0,83
F2						p_a,Ring [N/mm ²]			p_a,Ring,0,5b_m/ p_a,Ring,b_m	p_a,Ring,1,5b_m/ p_a,Ring,b_m
	R_S [mm]	A_Ring,bm [mm ²]	I_Ring,bm [mm ⁴]	i_bm [mm]	R_S/ i_bm	b_m	0.5b_m	1.5b_m		
S355	1211,0	9385,8	22258000	48,7	24,87	9,20	12,30	8,17	1,34	0,89
S550	1211,0	9385,8	22258000	48,7	24,87	14,25	19,05	12,66	1,34	0,89
S690	1211,0	9385,8	22258000	48,7	24,87	17,88	23,91	15,88	1,34	0,89
S890	1211,0	9385,8	22258000	48,7	24,87	22,89	30,83	19,05	1,35	0,83
F3						p_a,Ring [N/mm ²]			p_a,Ring,0,5b_m/ p_a,Ring,b_m	p_a,Ring,1,5b_m/ p_a,Ring,b_m
	R_S [mm]	A_Ring,bm [mm ²]	I_Ring,bm [mm ⁴]	i_bm [mm]	R_S/ i_bm	b_m	0.5b_m	1.5b_m		
S355	1219,0	33140,0	98540000	54,5	22,35	17,81	20,29	16,98	1,14	0,95
S550	1219,0	33140,0	98540000	54,5	22,35	27,59	31,44	26,31	1,14	0,95
S690	1219,0	33140,0	98540000	54,5	22,35	34,61	39,44	32,72	1,14	0,95
S890	1219,0	33140,0	98540000	54,5	22,35	44,54	50,88	37,75	1,14	0,85
F4						p_a,Ring [N/mm ²]			p_a,Ring,0,5b_m/ p_a,Ring,b_m	p_a,Ring,1,5b_m/ p_a,Ring,b_m
	R_S [mm]	A_Ring,bm [mm ²]	I_Ring,bm [mm ⁴]	i_bm [mm]	R_S/ i_bm	b_m	0.5b_m	1.5b_m		
S355	1659,5	8911,1	39490000	66,6	24,93	6,14	8,35	5,40	1,36	0,88
S550	1659,5	8911,1	39490000	66,6	24,93	9,51	12,93	8,37	1,36	0,88
S690	1659,5	8911,1	39490000	66,6	24,93	11,93	16,22	10,50	1,36	0,88
S890	1659,5	8911,1	39490000	66,6	24,93	15,38	20,93	12,79	1,36	0,83
F5						p_a,Ring [N/mm ²]			p_a,Ring,0,5b_m/ p_a,Ring,b_m	p_a,Ring,1,5b_m/ p_a,Ring,b_m
	R_S [mm]	A_Ring,bm [mm ²]	I_Ring,bm [mm ⁴]	i_bm [mm]	R_S/ i_bm	b_m	0.5b_m	1.5b_m		
S355	2760,0	12830,0	53851000	64,8	42,60	3,96	5,61	3,33	1,42	0,84
S550	2760,0	12830,0	53851000	64,8	42,60	5,52	7,97	4,57	1,44	0,83
S690	2760,0	12830,0	53851000	64,8	42,60	6,48	9,44	5,32	1,46	0,82
S890	2760,0	12830,0	53851000	64,8	42,60	7,67	11,29	6,24	1,47	0,81
F6						p_a,Ring [N/mm ²]			p_a,Ring,0,5b_m/ p_a,Ring,b_m	p_a,Ring,1,5b_m/ p_a,Ring,b_m
	R_S [mm]	A_Ring,bm [mm ²]	I_Ring,bm [mm ⁴]	i_bm [mm]	R_S/ i_bm	b_m	0.5b_m	1.5b_m		
S355	4517,5	31336,0	325330000	101,9	44,34	3,52	4,69	3,00	1,33	0,85
S550	4517,5	31336,0	325330000	101,9	44,34	4,83	6,66	4,05	1,38	0,84
S690	4517,5	31336,0	325330000	101,9	44,34	5,62	7,86	4,67	1,40	0,83
S890	4517,5	31336,0	325330000	101,9	44,34	6,61	9,38	5,44	1,42	0,82

Tabelle 30: Kritischer Außendruck p_{a,Ring} des Versteifungsringes nach Amstutz/Feder bei Variation der mitwirkenden Breite b_m (Werte in gelb entsprechen p_{a,Ring} = p_{a,Ring,max} nach Gl. 80; R_s entspricht R)

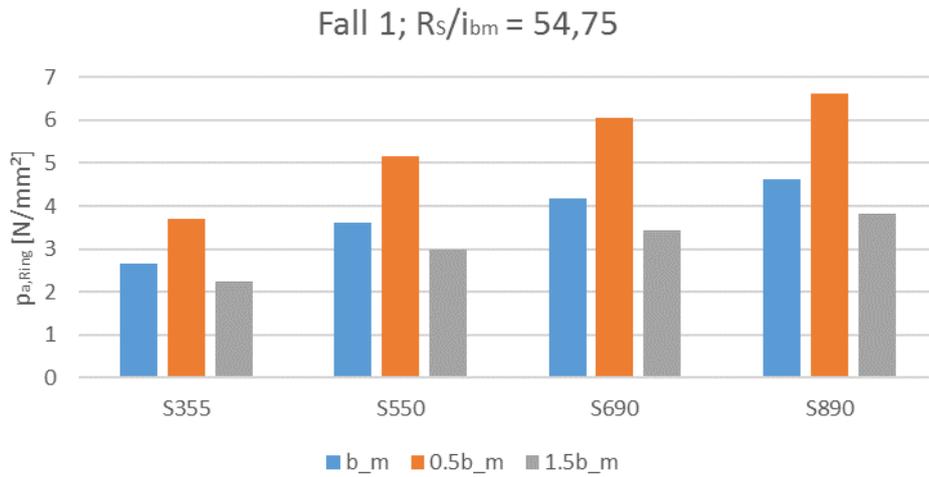


Abbildung 265: Anwendungsfall 1; $p_{a, Ring}$ mit mitwirkenden Breiten $b_m, 0,5 \cdot b_m, 1,5 \cdot b_m$ (S355, S550, S690, S890)

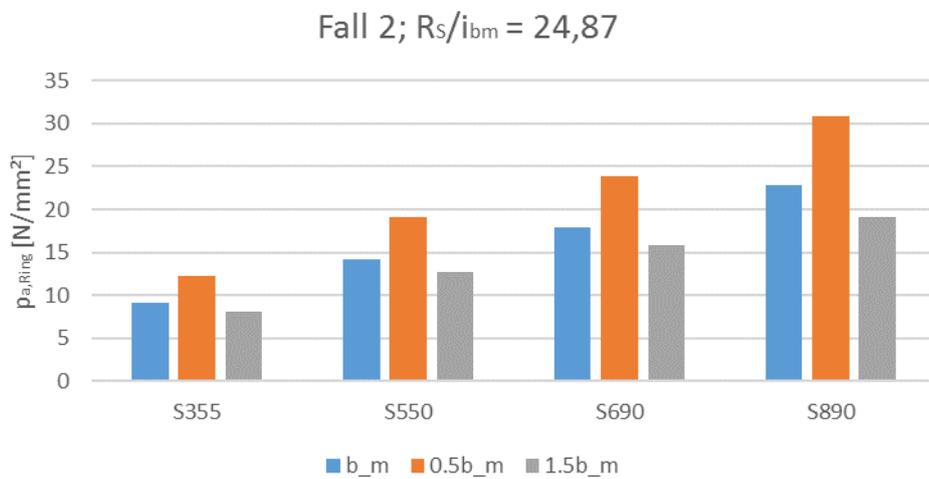


Abbildung 266: Anwendungsfall 2; $p_{a, Ring}$ mit mitwirkenden Breiten $b_m, 0,5 \cdot b_m, 1,5 \cdot b_m$ (S355, S550, S690, S890)

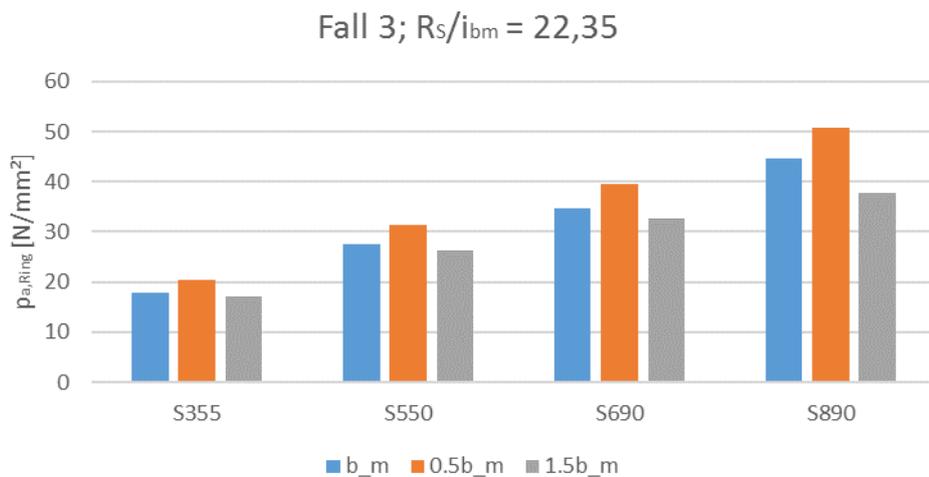


Abbildung 267: Anwendungsfall 3; $p_{a, Ring}$ mit mitwirkenden Breiten $b_m, 0,5 \cdot b_m, 1,5 \cdot b_m$ (S355, S550, S690, S890)

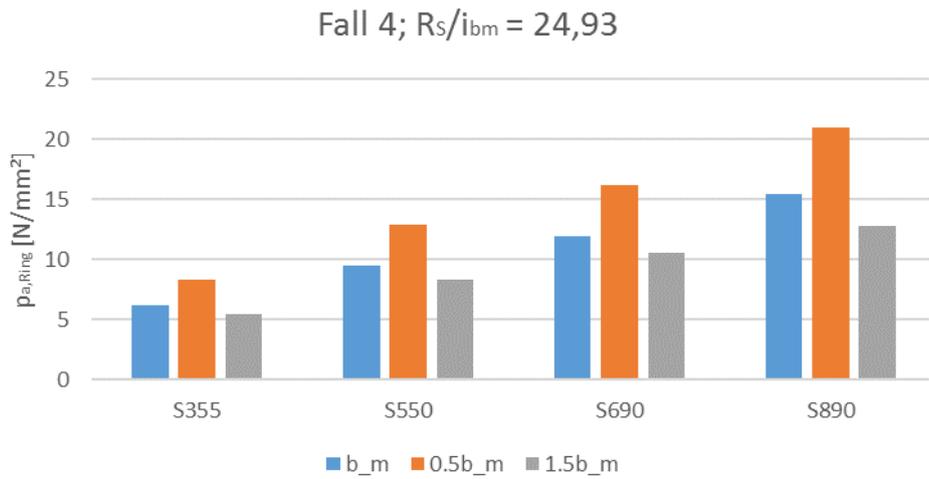


Abbildung 268: Anwendungsfall 4; $p_{a, Ring}$ mit mitwirkenden Breiten b_m , $0,5 \cdot b_m$, $1,5 \cdot b_m$ (S355, S550, S690, S890)

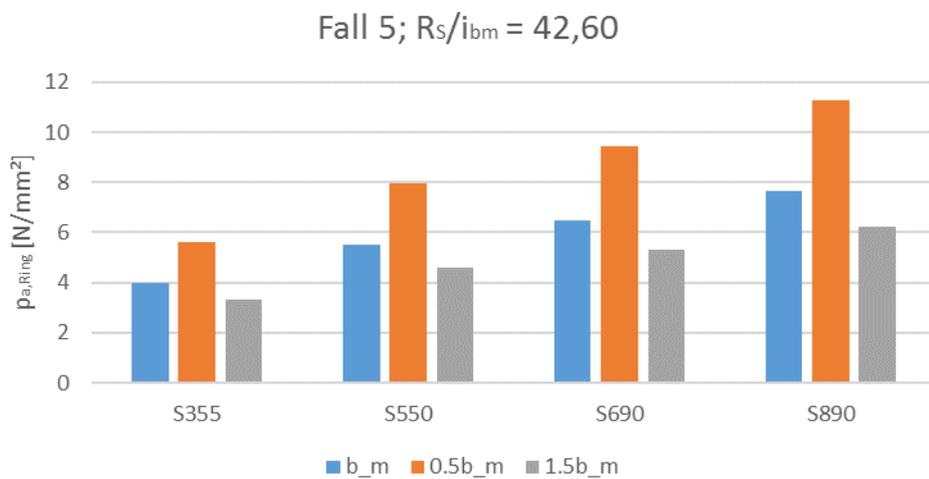


Abbildung 269: Anwendungsfall 5; $p_{a, Ring}$ mit mitwirkenden Breiten b_m , $0,5 \cdot b_m$, $1,5 \cdot b_m$ (S355, S550, S690, S890)

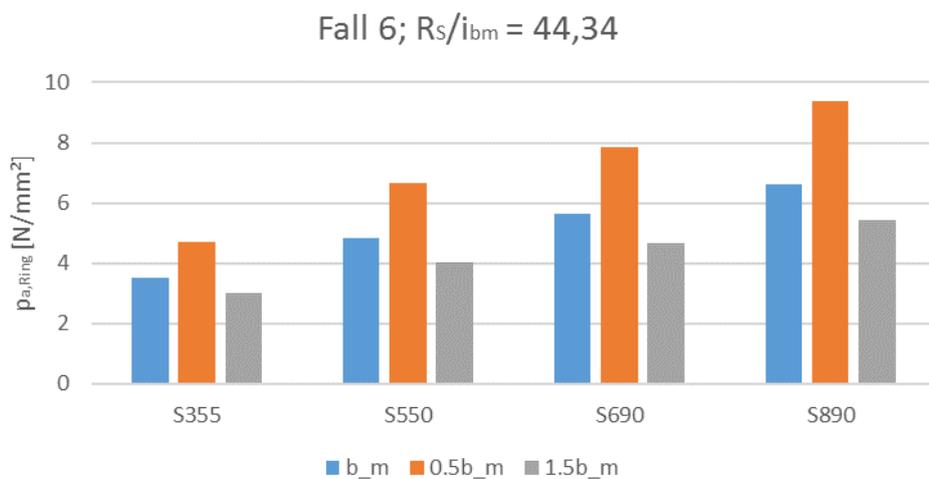


Abbildung 270: Anwendungsfall 6; $p_{a, Ring}$ mit mitwirkenden Breiten b_m , $0,5 \cdot b_m$, $1,5 \cdot b_m$ (S355, S550, S690, S890)

10 Zusammenfassung

Bei der Bemessung von ringversteiften Druckschachtpanzerungen ist der Nachweis gegen Außendruck und somit das Beulen meist bemessungsbestimmend. Die Nachweisführung erfolgt aktuell anhand von zwei getrennten Nachweisen für den Versteifungsring (Amstutz/Feder [2], [3], [4], [5], [6]; Jacobsen [7] – Nachweis N1 – Abschnitte 2.1.3 und 2.1.4) und das dazwischenliegende Rohr (Zwischenringbeulen nach Eurocode 1993-1-6 [8] – Nachweis N2 – Abschnitt 2.2), wobei für beide Bereiche der kritische Außendruck ermittelt wird. Der kritische Außendruck für die ringversteifte Panzerung ergibt sich dann aus dem Minimum dieser beiden Werte.

Vorhergehende Untersuchungen [1] und Untersuchungen im Rahmen dieser Masterarbeit haben jedoch gezeigt, dass mit diesem Nachweisverfahren der reale kritische Außendruck oft nicht genau genug getroffen werden kann. Trotz des relativ hohen Rechenaufwands bei Ermittlung des kritischen Außendrucks mit den Bestimmungsgleichungen nach Amstutz/Feder beziehungsweise Jacobsen und dem in Eurocode 1993-1-6 [8] festgelegten Verfahren für das Zwischenringbeulen, wird die Tragfähigkeit der Panzerung häufig deutlich unterschätzt und in manchen Fällen sogar überschätzt. Dadurch kann es auf der einen Seite zu Tragfähigkeitsproblemen und auf der anderen Seite zu unwirtschaftlichen Auslegungen der Panzerungen kommen.

Aus diesem Grund ergibt sich die Notwendigkeit für ein neues Bemessungsverfahren, mit dem eine genauere Bestimmung des kritischen Außendrucks möglich ist.

Im neuen Bemessungsverfahren wird der kritische Außendruck unter Berücksichtigung der Nachweise N1 (in vereinfachter Form) und N2 bestimmt. Anders als bisher wird nicht der kleinere kritische Außendruck der beiden Nachweise verwendet, sondern es erfolgt eine einfachere Berechnung aus der ein realitätsnäherer kritischer Außendruck resultiert.

Dazu wird zunächst mit den Bestimmungsgleichungen nach Amstutz/Feder oder Jacobsen der kritische Außendruck $p_{a, \text{Ring}}$ für den Versteifungsring unter alleiniger Berücksichtigung des Rohres mit der mitwirkenden Breite b_m ermittelt (vgl. Abbildung 271). Dies gestaltet sich einfacher als der Nachweis N1, da bei diesem die Schnittkräfte auf den Ring mit mitwirkender Breite des Rohres und auf das dazwischenliegende Rohr aufgeteilt werden müssen (vgl. Abschnitt 2.1.3). Für Fälle mit hohen Biegesteifigkeiten des Versteifungsringes ergibt sich der kritische Außendruck im Grenzfall aus der Anwendung der Kesselformel für den unrunder Versteifungsring.

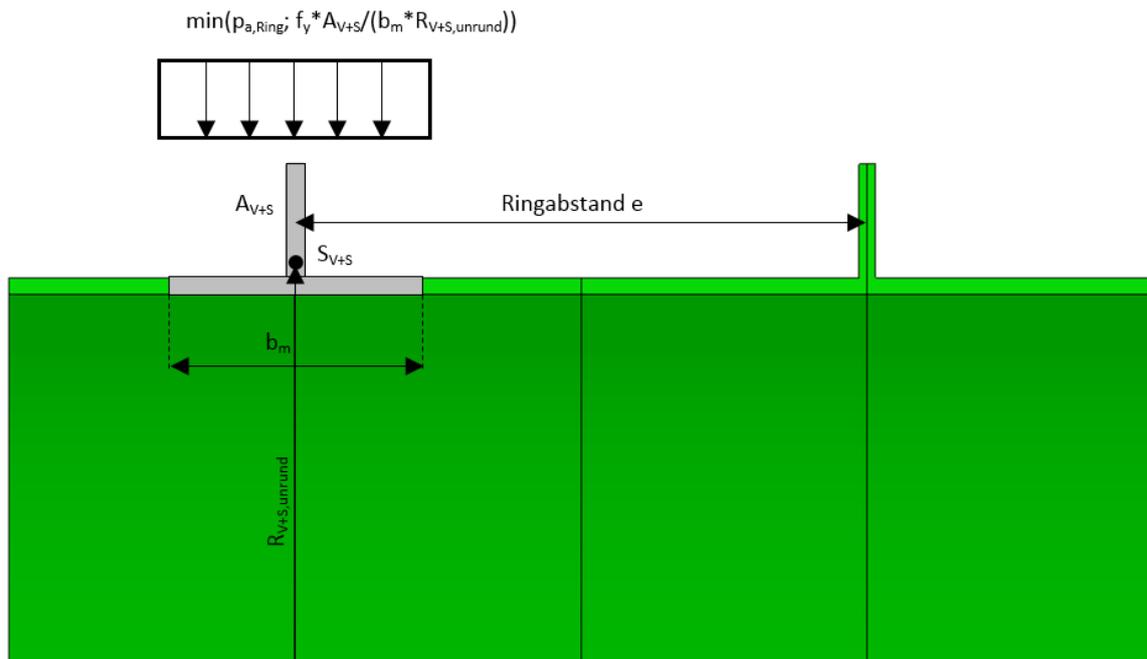


Abbildung 271: Vorgeschlagenes Bemessungsmodell – Ermittlung von $p_{a,Ring}$

Der kritische Außendruck für das zwischen den Ringen liegende Rohr wird mit dem in Eurocode 1993-1-6 [8] angeführten Verfahren für Zylinderschalen unter Außendruck bestimmt (vgl. Abschnitt 2.2), wobei die Ringe als starr angesehen werden dürfen – Größe $p_{ZW,EC}$. Ist der kritische Außendruck nach Eurocode 1993-1-6 kleiner als der kritische Außendruck für das glatte Rohr nach Amstutz oder Jacobsen, wird dieser Wert verwendet. Dies ist bei Fällen mit größeren Ringabständen möglich (siehe Abbildung 272).

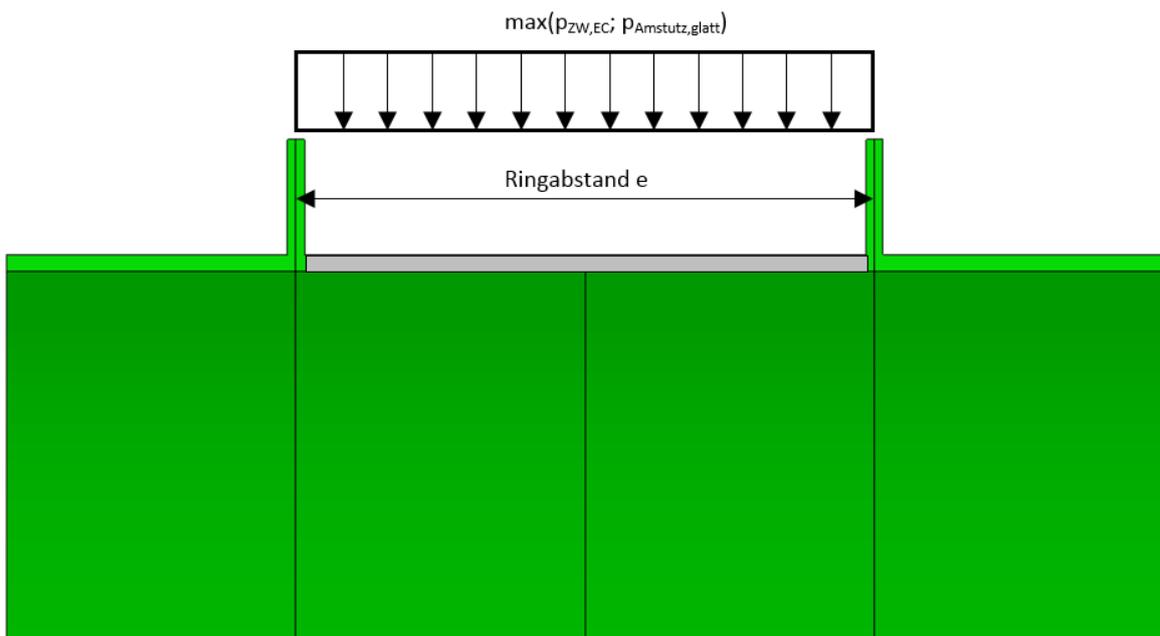


Abbildung 272: Vorgeschlagenes Bemessungsmodell – Tragfähigkeit der Schale zwischen den Ringen $p_{ZW,EC}$, $p_{Amstutz,glatt}$ ($p_{Jacobsen,glatt}$)

Mit den derart ermittelten Werten, dem daraus ableitbaren Tragfähigkeitsverhältnis ($\max[p_{zw,EC}/p_{a,ring}; p_{Amstutz,glatt}/p_{a,ring}]$) und den im Zuge dieser Masterarbeit erstellten Diagrammen und Formeln für den Faktor f_{Bem} (siehe Abbildung 273 für die Theorie nach Amstutz [5] und Abbildung 274 für die Theorie nach Jacobsen [7]), wird dieser Wert f_{Bem} bestimmt und in weiterer Folge mit der Formel für $p_{a,Bem}$ (Gl. 91 oder Gl. 92) der kritische Bemessungsaußendruck $p_{a,Bem}$ ermittelt. Dabei ist der Faktor f_{Bem} von der Stahlgüte beziehungsweise der Fließgrenze abhängig. Es sei angemerkt, dass beide Verfahren (Amstutz beziehungsweise Jacobsen) fast den identen Faktor f_{Bem} wiedergeben, das heißt das Verfahren kann frei gewählt werden.

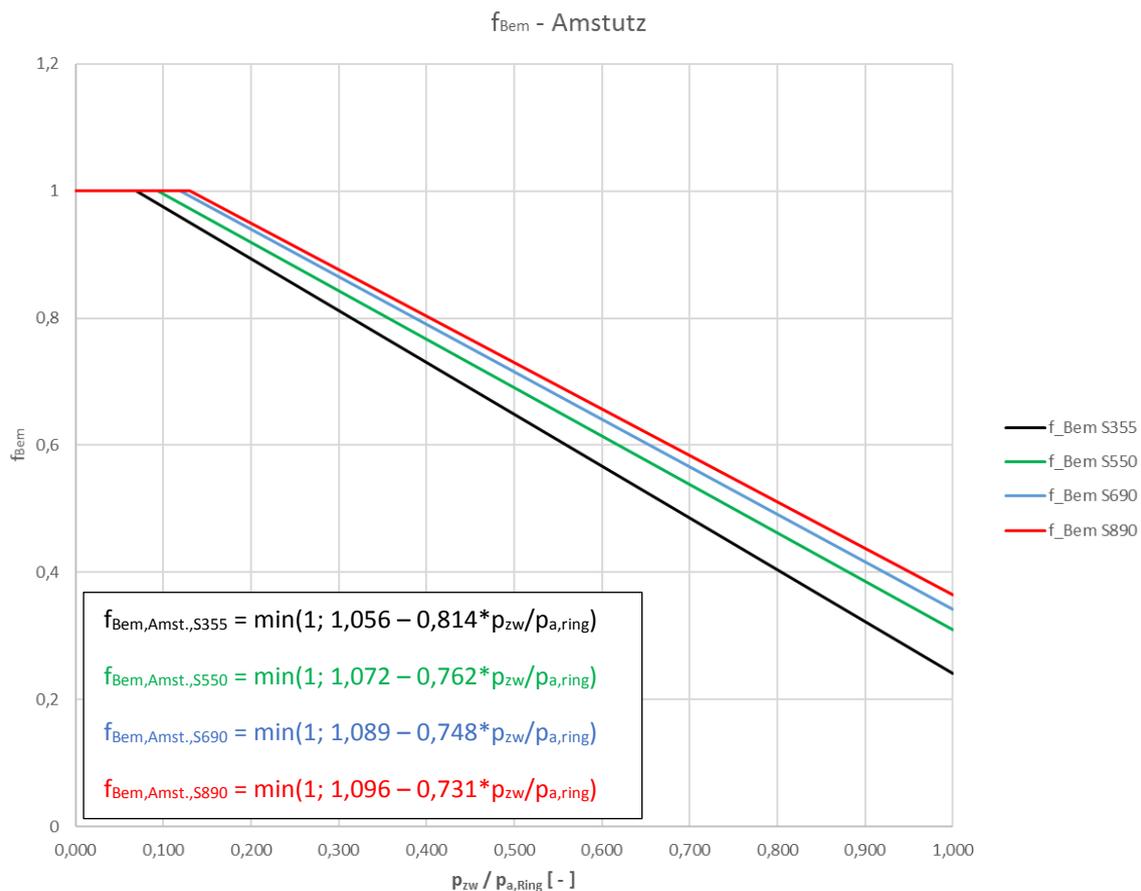


Abbildung 273: Beiwert f_{Bem} für die Stahlgüten S355, S550, S690 und S890 nach der Theorie von Amstutz

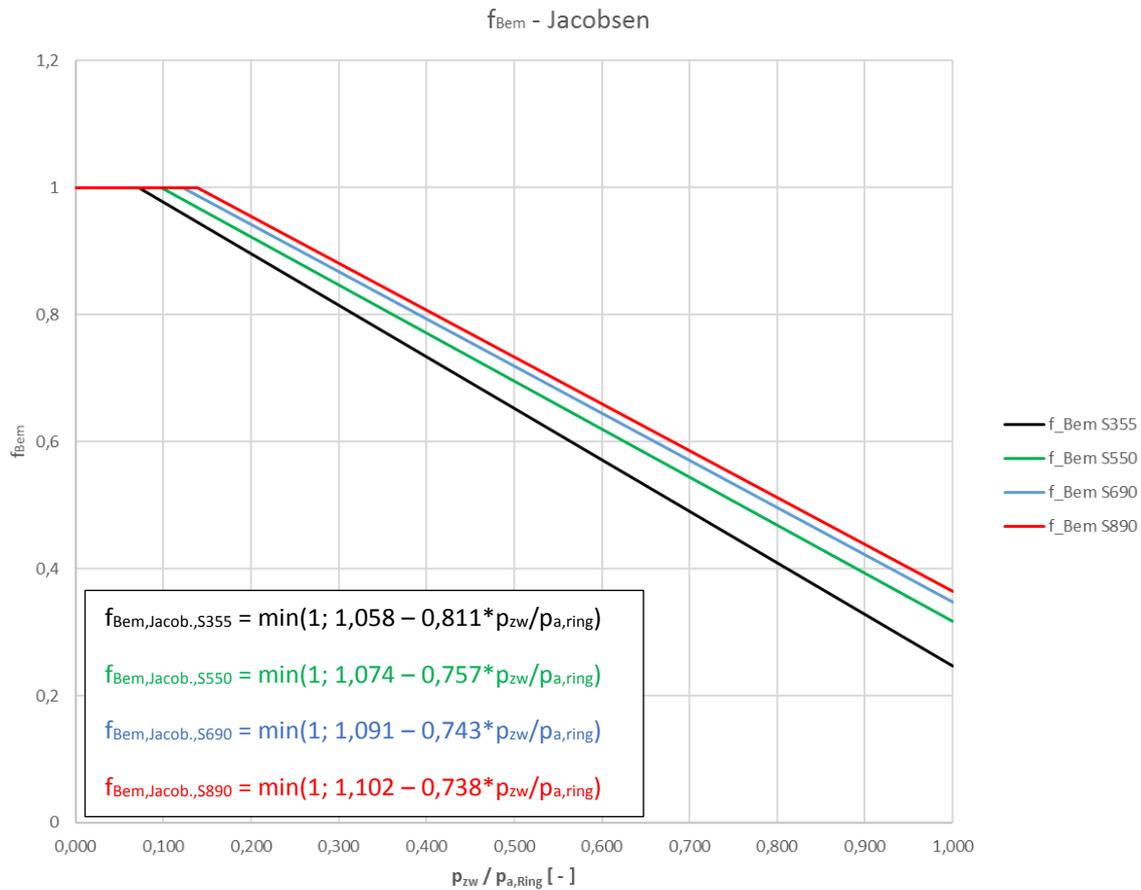


Abbildung 274: Beiwert f_{Bem} für die Stahlgüten S355, S550, S690 und S890 nach der Theorie von Jacobsen

$$p_{a,Bem} = p_{a,ring} \cdot \left(1 + f_{Bem} \cdot \frac{b_m - e_{Ring}}{e_{Ring}} \right) \quad \text{Gl. 91}$$

oder

$$p_{a,Bem} = p_{a,ring} \cdot \left(1 - f_{Bem} \cdot \left(1 - \frac{b_m}{e_{Ring}} \right) \right) \quad \text{Gl. 92}$$

Die Bestimmung des kritischen Außendrucks $p_{a,Bem}$ mit dem neuen Bemessungsverfahren für die untersuchten Anwendungsfälle hat gezeigt, dass mit diesem Verfahren der kritische Außendruck für ringversteifte Druckschachtpanzerungen bei baupraktisch üblichen Ringabständen sehr realitätsnah getroffen werden kann. Bei unüblich großen Ringabstände wird der kritische Außendruck meist unterschätzt, da dieser verfahrensbedingt zu stark abgemindert wird. Nichtsdestotrotz können mit diesem Verfahren auch für diese Fälle realitätsnähere Ergebnisse erzielt werden, als es durch die bisherige Bemessungspraxis über die Nachweise N1 und N2 möglich ist.

Das Verfahren ermöglicht daher eine realitätsnähere Bestimmung des kritischen Außendrucks von ringversteiften Druckschachtpanzerungen, wenn für die Bemessung keine hochstehenden Finite-Elemente-Programme zur Verfügung stehen.

Bei Bestimmung des kritischen Außendrucks mit FE-Programmen wiederum, kann mit diesem Verfahren der kritische Außendruck von ringversteiften Druckschachtpanzerungen mit engen Ringabstand überprüft werden und bietet somit eine einfache Kontrollmöglichkeit.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geometrische Zusammenhänge für den Ansatz der Beulfigur von Amstutz [4] S. 542.....	4
Abbildung 2: Ansatz von Feder [6] zur Bestimmung der Steifigkeiten und Aufteilung der Schnittkräfte [1] S. 73.....	8
Abbildung 3: Darstellung der Ansätze nach Taras/Greiner [5] S.3	9
Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung der Durchschlaglast	10
Abbildung 5: Darstellung der Ringspannungen um den Umfang nach dem Bemessungsmodell von Amstutz/Feder für den Anwendungsfall 1 ($R_0 = 2507,5 \text{ mm}$; $t = 15 \text{ mm}$; $h_v = 150 \text{ mm}$; $t_v = 15 \text{ mm}$; $e = 1750$; $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$) [1] S. 82.....	15
Abbildung 6: Geometrische Zusammenhänge für den Ansatz der Beulfigur von Jacobsen [7] S. 374.....	17
Abbildung 7: Definition von h und R [7], S. 377	20
Abbildung 8: Geometrische Beziehungen der Unrundheit u (gemessen an einer Montelschablone) [1] S.43	21
Abbildung 9: Vorgehensweise nach EN 1993-1-6 [8] – Zylinderschalen unter Außendruck und Hervorhebung der Anwendungsfälle für ringverstefte Druckschachtpanzerungen [1] S. 108	23
Abbildung 10: Vorgehensweise nach EN 1993-1-6 [8] – Zylinderschalen unter Längsdruck und Umfangsdruck; Ermittlung der Beultragfähigkeiten und Nachweis der gemeinsamen Wirkung [1] S. 146.....	24
Abbildung 11: Anwendungsfall 1b (Ringabstand $e = 1750\text{mm}$) links; Anwendungsfall 2a (Ringabstand $e = 750\text{mm}$) rechts	27
Abbildung 12: Anwendungsfall 3a (Ringabstand $e = 1500\text{mm}$) links; Anwendungsfall 4 (Ringabstand $e = 1167\text{mm}$) rechts	27
Abbildung 13: Anwendungsfall 5a (Ringabstand $e = 1000\text{mm}$) links; Anwendungsfall 6a (Ringabstand $e = 2000\text{mm}$) rechts	27
Abbildung 14: Ermittlung des kritischen Außendrucks $p_{0,\text{krit}}$ für den Anwendungsfall 1a mit $e = 875\text{mm}$ nach der Theorie von Amstutz/Feder mit dem modifizierten Ansatz von Taras/Greiner [5]	30
Abbildung 15: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 1a mit Ringabstand $e = 875\text{mm}$	36
Abbildung 16: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 1b mit Ringabstand $e = 1750\text{mm}$	37
Abbildung 17: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 1c mit Ringabstand $e = 3500\text{mm}$	37
Abbildung 18: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 1d mit Ringabstand $e = 7000\text{mm}$	38
Abbildung 19: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 2a mit Ringabstand $e = 750\text{mm}$	39

Abbildung 20: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 2b mit Ringabstand $e = 1500\text{mm}$ 40

Abbildung 21: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 2c mit Ringabstand $e = 2270\text{mm}$ 40

Abbildung 22: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 2d mit Ringabstand $e = 4800\text{mm}$ 41

Abbildung 23: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 3a mit Ringabstand $e = 1500\text{mm}$ 42

Abbildung 24: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 3b mit Ringabstand $e = 4500\text{mm}$ 42

Abbildung 25: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife nach in Punkt 1 im Scheitel Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 4 mit Ringabstand $e = 1167\text{mm}$ 43

Abbildung 26: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 5a mit Ringabstand $e = 1000\text{mm}$ 44

Abbildung 27: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 5b mit Ringabstand $e = 2500\text{mm}$ 44

Abbildung 28: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 6a mit Ringabstand $e = 2000\text{mm}$ 45

Abbildung 29: Normal- und Biegespannungsanteile in der Ringsteife in Punkt 1 im Scheitel nach Amstutz/Feder und Jacobsen für den Anwendungsfall 6b mit Ringabstand $e = 4500\text{mm}$ 45

Abbildung 30: Gegenüberstellung der kritischen Außendrucke nach Amstutz und Jacobsen für den 1. und 2. Anwendungsfall ohne Ringsteife 48

Abbildung 31: Gegenüberstellung der kritischen Außendrucke nach Amstutz und Jacobsen für den 3. und 4. Anwendungsfall ohne Ringsteife 48

Abbildung 32: Gegenüberstellung der kritischen Außendrucke nach Amstutz und Jacobsen für den 5. und 6. Anwendungsfall ohne Ringsteife 48

Abbildung 33: Darstellung der unrunder Schale im ABAQUS-Modell des Anwendungsfalls 3 52

Abbildung 34: Gegenüberstellung der kritischen Außendrucke $p_{0,FEA}$ des Anwendungsfalls 3b ($e = 4500$) mit unterschiedlichen finiten Elementen und Netzen und der zur Ermittlung nötigen Rechenzeit (wct) in Stunden 55

Abbildung 35: Gegenüberstellung der relativen kritischen Außendrucke und Rechenzeiten des Anwendungsfalls 3b ($e = 4500$) mit unterschiedlichen finiten Elementen und Netzen 55

Abbildung 36: Lastverformungskurve im Scheitel des Anwendungsfalls 3b – Vernetzung des Modells mit vier Elementen über die Schalendicke (lineare Elemente)..... 56

Abbildung 37: Lastverformungskurve im Scheitel des Anwendungsfalls 3b – Vernetzung des Modells mit vier Elementen über die Schalendicke und Anpassung der Elemente in Längs- und Umfangsrichtung (lineare Elemente) 56

Abbildung 38: Lastverformungskurve im Scheitel des Anwendungsfalls 3b – Vernetzung des Modells mit sechs Elementen über die Schalendicke und Anpassung der Elemente in Längs- und Umfangsrichtung (lineare Elemente)..... 57

Abbildung 39: Lastverformungskurve im Scheitel des Anwendungsfalls 3b – Vernetzung des Modells mit einem Element über die Schalendicke (quadratische Elemente)..... 57

Abbildung 40: Lastverformungskurve im Scheitel des Anwendungsfalls 3b – Vernetzung des Modells mit zwei Elementen über die Schalendicke (quadratische Elemente)..... 58

Abbildung 41: Lastverformungskurve im Scheitel des Anwendungsfalls 3b – Vernetzung des Modells mit zwei Elementen über die Schalendicke und Anpassung der Elemente in Längs- und Umfangsrichtung (quadratische Elemente) 58

Abbildung 42: Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung und der Verformungen (5-fach überhöht) in der Schale ($w_{\text{Schale}} = 35,8 \text{ mm}$) und im Ring ($w_{\text{Ring}} = 12,4 \text{ mm}$) bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1c mit $e = 3500$, S550 60

Abbildung 43: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1a mit $e = 875$, S355..... 61

Abbildung 44: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1a, $e = 875$, S355..... 61

Abbildung 45: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1a mit $e = 875$, S550..... 62

Abbildung 46: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1a, $e = 875$, S550..... 62

Abbildung 47: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1a mit $e = 875$, S690..... 63

Abbildung 48: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1a, $e = 875$, S690..... 63

Abbildung 49: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1a mit $e = 875$, S890..... 64

Abbildung 50: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1a, $e = 875$, S890..... 64

Abbildung 51: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1b mit $e = 1750$, S355..... 65

Abbildung 52: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1b, $e = 1750$, S355 65

Abbildung 53: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1b mit $e = 1750$, S550..... 66

Abbildung 54: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1b, $e = 1750$, S550 66

Abbildung 55: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1b mit $e = 1750$, S690 67

Abbildung 56: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1b, $e = 1750$, S690 67

Abbildung 57: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1b mit $e = 1750$, S890..... 68

Abbildung 58: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1b, $e = 1750$, S890 68

Abbildung 59: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1c mit $e = 3500$, S355 69

Abbildung 60: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1c, $e = 3500$, S355..... 69

Abbildung 61: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1c mit $e = 3500$, S550 70

Abbildung 62: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1c, $e = 3500$, S550 70

Abbildung 63: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1c mit $e = 3500$, S690 71

Abbildung 64: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1c, $e = 3500$, S690 71

Abbildung 65: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1c mit $e = 3500$, S890 72

Abbildung 66: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1c, $e = 3500$, S890 72

Abbildung 67: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1d mit $e = 7000$, S355..... 73

Abbildung 68: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1d, $e = 7000$, S355 73

Abbildung 69: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1d mit $e = 7000$, S550..... 74

Abbildung 70: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1d, $e = 7000$, S550 74

Abbildung 71: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1d mit $e = 7000$, S690..... 75

Abbildung 72: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1d, $e = 7000$, S690 75

Abbildung 73: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 1d mit $e = 7000$, S890..... 76

Abbildung 74: Lastverformungskurve Anwendungsfall 1d, $e = 7000$, S890 76

Abbildung 75: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2a mit $e = 750$, S355..... 77

Abbildung 76: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2a, $e = 750$, S355..... 77

Abbildung 77: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2a mit $e = 750$, S550..... 78

Abbildung 78: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2a, $e = 750$, S550..... 78

Abbildung 79: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2a mit $e = 750$, S690..... 79

Abbildung 80: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2a, $e = 750$, S690..... 79

Abbildung 81: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2a mit $e = 750$, S890..... 80

Abbildung 82: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2a, $e = 750$, S890..... 80

Abbildung 83: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2b mit $e = 1500$, S355..... 81

Abbildung 84: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2b, $e = 1500$, S355 81

Abbildung 85: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2b mit $e = 1500$, S550..... 82

Abbildung 86: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2b, $e = 1500$, S550 82

Abbildung 87: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2b mit $e = 1500$, S690..... 83

Abbildung 88: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2b, $e = 1500$, S690 83

Abbildung 89: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2b mit $e = 1500$, S890..... 84

Abbildung 90: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2b, $e = 1500$, S890 84

Abbildung 91: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2c mit $e = 2270$, S355 85

Abbildung 92: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2c, $e = 2270$, S355	85
Abbildung 93: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2c mit $e = 2270$, S550	86
Abbildung 94: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2c, $e = 2270$, S550	86
Abbildung 95: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2c mit $e = 2270$, S690	87
Abbildung 96: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2c, $e = 2270$, S690	87
Abbildung 97: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2c mit $e = 2270$, S890	88
Abbildung 98: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2c, $e = 2270$, S890	88
Abbildung 99: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2d mit $e = 4800$, S355	89
Abbildung 100: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2d, $e = 4800$, S355	89
Abbildung 101: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2d mit $e = 4800$, S550	90
Abbildung 102: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2d, $e = 4800$, S550	90
Abbildung 103: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2d mit $e = 4800$, S690	91
Abbildung 104: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2d, $e = 4800$, S690	91
Abbildung 105: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 2d mit $e = 4800$, S890	92
Abbildung 106: Lastverformungskurve Anwendungsfall 2d, $e = 4800$, S890	92
Abbildung 107: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3a mit $e = 1500$, S355	93
Abbildung 108: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3a, $e = 1500$, S355	93
Abbildung 109: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3a mit $e = 1500$, S550	94
Abbildung 110: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3a, $e = 1500$, S550	94
Abbildung 111: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3a mit $e = 1500$, S690	95
Abbildung 112: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3a, $e = 1500$, S690	95
Abbildung 113: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3a mit $e = 1500$, S890	96
Abbildung 114: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3a, $e = 1500$, S890	96
Abbildung 115: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3b mit $e = 4500$, S355	97
Abbildung 116: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3b, $e = 4500$, S355	97
Abbildung 117: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3b mit $e = 4500$, S550	98
Abbildung 118: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3b, $e = 4500$, S550	98
Abbildung 119: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3b mit $e = 4500$, S690	99
Abbildung 120: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3b, $e = 4500$, S690	99
Abbildung 121: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 3b mit $e = 4500$, S890	100

Abbildung 122: Lastverformungskurve Anwendungsfall 3b, $e = 4500$, S890	100
Abbildung 123: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 4 mit $e = 1167$, S355.....	101
Abbildung 124: Lastverformungskurve Anwendungsfall 4, $e = 1167$, S355.....	101
Abbildung 125: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 4 mit $e = 1167$, S550.....	102
Abbildung 126: Lastverformungskurve Anwendungsfall 4, $e = 1167$, S550.....	102
Abbildung 127: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 4 mit $e = 1167$, S690.....	103
Abbildung 128: Lastverformungskurve Anwendungsfall 4, $e = 1167$, S690.....	103
Abbildung 129: 3D-Darstellung der verformten Figur (4-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 4 mit $e = 1167$, S890.....	104
Abbildung 130: Lastverformungskurve Anwendungsfall 4, $e = 1167$, S890.....	104
Abbildung 131: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5a mit $e = 1000$, S355	105
Abbildung 132: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5a, $e = 1000$, S355.....	105
Abbildung 133: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5a mit $e = 1000$, S550	106
Abbildung 134: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5a, $e = 1000$, S550.....	106
Abbildung 135: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5a mit $e = 1000$, S690	107
Abbildung 136: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5a, $e = 1000$, S690.....	107
Abbildung 137: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5a mit $e = 1000$, S890	108
Abbildung 138: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5a, $e = 1000$, S890.....	108
Abbildung 139: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5b mit $e = 2500$, S355.....	109
Abbildung 140: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5b, $e = 2500$, S355	109
Abbildung 141: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5b mit $e = 2500$, S550.....	110
Abbildung 142: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5b, $e = 2500$, S550	110
Abbildung 143: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5b mit $e = 2500$, S690.....	111
Abbildung 144: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5b, $e = 2500$, S690	111
Abbildung 145: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 5b mit $e = 2500$, S890.....	112
Abbildung 146: Lastverformungskurve Anwendungsfall 5b, $e = 2500$, S890	112
Abbildung 147: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6a mit $e = 2000$, S355.....	113
Abbildung 148: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6a, $e = 2000$, S355.....	113
Abbildung 149: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6a mit $e = 2000$, S550.....	114
Abbildung 150: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6a, $e = 2000$, S550.....	114
Abbildung 151: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6a mit $e = 2000$, S690.....	115

Abbildung 152: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6a, $e = 2000$, S690.....	115
Abbildung 153: 3D-Darstellung der verformten Figur und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6a mit $e = 2000$, S890	116
Abbildung 154: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6a, $e = 2000$, S890.....	116
Abbildung 155: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6b mit $e = 4500$, S355.....	117
Abbildung 156: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6b, $e = 4500$, S355	117
Abbildung 157: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6b mit $e = 4500$, S550.....	118
Abbildung 158: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6b, $e = 4500$, S550	118
Abbildung 159: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6b mit $e = 4500$, S690.....	119
Abbildung 160: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6b, $e = 4500$, S690	119
Abbildung 161: 3D-Darstellung der verformten Figur (2-fach überhöht) und der von Mises-Vergleichsspannung bei p_{FEA} für den Anwendungsfall 6b mit $e = 4500$, S890.....	120
Abbildung 162: Lastverformungskurve Anwendungsfall 6b, $e = 4500$, S890	120
Abbildung 163: Fall 1a, $e = 875$	122
Abbildung 164: Fall 1b, $e = 1750$	123
Abbildung 165: Fall 1c, $e = 3500$	123
Abbildung 166: Fall 1d, $e = 7000$	123
Abbildung 167: Fall 2a, $e = 750$	124
Abbildung 168: Fall 2b, $e = 1500$	124
Abbildung 169: Fall 2c, $e = 2270$	125
Abbildung 170: Fall 2d, $e = 4800$	125
Abbildung 171: Fall 3a, $e = 1500$	126
Abbildung 172: Fall 3b, $e = 4500$	126
Abbildung 173: Fall 4, $e = 1167$	127
Abbildung 174: Fall 5a, $e = 1000$	128
Abbildung 175: Fall 5b, $e = 2500$	128
Abbildung 176: Fall 6a, $e = 2000$	129
Abbildung 177: Fall 6b, $e = 4500$	129
Abbildung 178: Abmessungen und Belastung für den Ringquerschnitt [1] S. 181	130
Abbildung 179: Außendruck p [N/mm ²] – Beulauslenkung a [mm] (blau; siehe Abbildung 3); max. möglicher Außendruck (Kesselformel, rot)	134
Abbildung 180: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Amstutz und einer Stahlgüte von S355.....	136
Abbildung 181: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Amstutz und einer Stahlgüte von S550.....	137
Abbildung 182: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Amstutz und einer Stahlgüte von S690.....	138
Abbildung 183: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Amstutz und einer Stahlgüte von S890.....	139
Abbildung 184: f_{Bem} für die Stahlgüten S355, S550, S690 und S890 nach der Theorie von Amstutz	140

Abbildung 185: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S355	144
Abbildung 186: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S550	144
Abbildung 187: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S690	144
Abbildung 188: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S890	144
Abbildung 189: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S355	145
Abbildung 190: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S550	145
Abbildung 191: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S690	145
Abbildung 192: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S890	145
Abbildung 193: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S355	146
Abbildung 194: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S550	146
Abbildung 195: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S690	146
Abbildung 196: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S890	146
Abbildung 197: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S355 ...	147
Abbildung 198: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S550 ...	147
Abbildung 199: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S690 ...	147
Abbildung 200: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S890 ...	147
Abbildung 201: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S355	148
Abbildung 202: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S550	148
Abbildung 203: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S690	148
Abbildung 204: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S890	148
Abbildung 205: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500$; S355	149
Abbildung 206: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500$; S550	149
Abbildung 207: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500$; S690	149
Abbildung 208: p_{Bem} , p_{FEA} , p_{Amst} , $p_{Ams.gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500$; S890	149

Abbildung 209: Tragfähigkeitsreserven bei Bemessung mit dem neuen Nachweisverfahren (blau) und dem aktuellen Nachweisverfahren (orange) nach der Theorie von Amstutz	151
Abbildung 210: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Amstutz (S355).....	153
Abbildung 211: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Amstutz (S550).....	153
Abbildung 212: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Amstutz (S690).....	153
Abbildung 213: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Amstutz (S890).....	154
Abbildung 214: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Jacobsen und einer Stahlgüte von S355.....	156
Abbildung 215: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Jacobsen und einer Stahlgüte von S550.....	157
Abbildung 216: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Jacobsen und einer Stahlgüte von S690.....	158
Abbildung 217: f_{Bem} und f_{FEA} für die Anwendungsfälle nach der Theorie von Jacobsen und einer Stahlgüte von S890.....	159
Abbildung 218: f_{Bem} für die Stahlgüten S355, S550, S690 und S890 nach der Theorie von Jacobsen	160
Abbildung 219: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S355	163
Abbildung 220: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S550.....	163
Abbildung 221: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S690.....	163
Abbildung 222: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 1 für $e_{Ring} = 875, 1750, 3500, 7000$; S890.....	163
Abbildung 223: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S355.....	164
Abbildung 224: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S550.....	164
Abbildung 225: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S690.....	164
Abbildung 226: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 2 für $e_{Ring} = 750, 1500, 2270, 4800$; S890.....	164
Abbildung 227: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S355.....	165
Abbildung 228: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S550.....	165
Abbildung 229: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S690.....	165
Abbildung 230: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 3 für $e_{Ring} = 1500, 4500$; S890.....	165
Abbildung 231: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S355.....	166

Abbildung 232: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S550 166

Abbildung 233: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S690 166

Abbildung 234: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 4 für $e_{Ring} = 1167$; S890 166

Abbildung 235: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S355 167

Abbildung 236: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S550 167

Abbildung 237: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S690 167

Abbildung 238: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 5 für $e_{Ring} = 1000, 2500$; S890 167

Abbildung 239: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500$; S355 168

Abbildung 240: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500$; S550 168

Abbildung 241: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500$; S690 168

Abbildung 242: p_{Bem} , p_{FEA} , $p_{Jacob.}$, $p_{Jacob.,gl.}$, $p_{ZW,EC3}$; Anwendungsfall 6 für $e_{Ring} = 2000, 4500$; S890 168

Abbildung 243: Tragfähigkeitsreserven bei Bemessung mit dem neuen Nachweisverfahren (blau) und dem aktuellen Nachweisverfahren (orange) nach der Theorie von Jacobsen 170

Abbildung 244: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Jacobsen (S355) 171

Abbildung 245: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Jacobsen (S550) 171

Abbildung 246: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Jacobsen (S690) 171

Abbildung 247: Tragfähigkeitsreserve [%] mit dem neuen Bemessungsverfahren nach Jacobsen (S890) 172

Abbildung 248: Anwendungsfall 1c (S890), $e = 3500\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung 173

Abbildung 249: Anwendungsfall 1d (S890), $e = 7000\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung 174

Abbildung 250: Auswirkung von $f_{Bem}-f_{FEA}$, $(b_m-e)/e$ und der Größe von f_{FEA} auf die Genauigkeit des neuen Bemessungsverfahrens 176

Abbildung 251: Anwendungsfall 4 (S355), $e = 1167\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei erstmaligen Erreichen der Fließspannung (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung 178

Abbildung 252: Anwendungsfall 4 (S355), $e = 1167\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung 178

Abbildung 253: Anwendungsfall 4 (S550), $e = 1167\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung 179

Abbildung 254: Anwendungsfall 4 (S690), $e = 1167\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung 179

Abbildung 255: Anwendungsfall 4 (S890), $e = 1167\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung.....	180
Abbildung 256: Anwendungsfall 4; Tragfähigkeitsreserven bei Bemessung mit dem neuen Nachweisverfahren (blau) und dem aktuellen Nachweisverfahren (orange) nach der Theorie von Amstutz.....	180
Abbildung 257: Anwendungsfall 3a (S355), $e = 1500\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung.....	181
Abbildung 258: Anwendungsfall 3a (S550), $e = 1500\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung.....	182
Abbildung 259: Anwendungsfall 3a (S690), $e = 1500\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung.....	182
Abbildung 260: Anwendungsfall 3a (S890), $e = 1500\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung.....	183
Abbildung 261: Anwendungsfall 6a (S355), $e = 2000\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung.....	184
Abbildung 262: Anwendungsfall 6a (S550), $e = 2000\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung.....	185
Abbildung 263: Anwendungsfall 6a (S690), $e = 2000\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung.....	185
Abbildung 264: Anwendungsfall 6a (S890), $e = 2000\text{mm}$; 3D-Darstellung der verformten Figur bei p_{FEA} (5-fach überhöht) mit Darstellung der von Mises-Vergleichsspannung.....	186
Abbildung 265: Anwendungsfall 1; $p_{a, Ring}$ mit mitwirkenden Breiten b_m , $0,5 \cdot b_m$, $1,5 \cdot b_m$ (S355, S550, S690, S890)	190
Abbildung 266: Anwendungsfall 2; $p_{a, Ring}$ mit mitwirkenden Breiten b_m , $0,5 \cdot b_m$, $1,5 \cdot b_m$ (S355, S550, S690, S890)	190
Abbildung 267: Anwendungsfall 3; $p_{a, Ring}$ mit mitwirkenden Breiten b_m , $0,5 \cdot b_m$, $1,5 \cdot b_m$ (S355, S550, S690, S890)	190
Abbildung 268: Anwendungsfall 4; $p_{a, Ring}$ mit mitwirkenden Breiten b_m , $0,5 \cdot b_m$, $1,5 \cdot b_m$ (S355, S550, S690, S890)	191
Abbildung 269: Anwendungsfall 5; $p_{a, Ring}$ mit mitwirkenden Breiten b_m , $0,5 \cdot b_m$, $1,5 \cdot b_m$ (S355, S550, S690, S890)	191
Abbildung 270: Anwendungsfall 6; $p_{a, Ring}$ mit mitwirkenden Breiten b_m , $0,5 \cdot b_m$, $1,5 \cdot b_m$ (S355, S550, S690, S890)	191
Abbildung 271: Vorgeschlagenes Bemessungsmodell – Ermittlung von $p_{a, Ring}$	193
Abbildung 272: Vorgeschlagenes Bemessungsmodell – Tragfähigkeit der Schale zwischen den Ringen $p_{ZW, EC}$, $p_{Amstutz, glatt}$ ($p_{Jacobsen, glatt}$)	193
Abbildung 273: Beiwert f_{Bem} für die Stahlgüten S355, S550, S690 und S890 nach der Theorie von Amstutz.....	194
Abbildung 274: Beiwert f_{Bem} für die Stahlgüten S355, S550, S690 und S890 nach der Theorie von Jacobsen	195

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geometrische Parameter der untersuchten Anwendungsfälle	26
Tabelle 2: Kritische Außendrucke $p_{0,krit}$ für die Ringsteife der Anwendungsfälle nach Amstutz/Feder (gelb = Werte $p_{0,krit}$ wenn $p_{0,krit} > p_{0,max}$).....	31
Tabelle 3: Kritische Außendrucke $p_{0,krit}$ für die Ringsteife der Anwendungsfälle nach Amstutz/Feder mit Begrenzung des Außendruckes durch die Anwendung der Kesselformel in der Schale (gelb = Werte $p_{0,max}$ wenn $p_{0,krit} > p_{0,max}$)	32
Tabelle 4: Kritische Außendrucke $p_{0,krit}$ der Anwendungsfälle nach Jacobsen (gelb = Werte $p_{0,krit}$ wenn $p_{0,krit} > p_{0,max}$).....	33
Tabelle 5: Kritische Außendrucke $p_{0,krit}$ der Anwendungsfälle nach Jacobsen mit Begrenzung des Außendruckes durch die Anwendung der Kesselformel in der Schale (gelb = Werte $p_{0,max}$ wenn $p_{0,krit} > p_{0,max}$).....	34
Tabelle 6: Kritische Außendrucke der Anwendungsfälle ohne Ringsteifen nach Amstutz/Feder	46
Tabelle 7: Kritische Außendrucke der Anwendungsfälle ohne Ringsteifen nach Jacobsen.....	46
Tabelle 8: Prozentuelle Unterschiede der ermittelten Beuldrücke für das glatte Rohr der Anwendungsfälle nach Jacobsen im Vergleich zum Beuldruck nach Amstutz (Ergebnisse Amstutz = 100%).....	47
Tabelle 9: Außendrucke $p_{0,cr}$ beim Einbeulen der Zylinderschale (Panzerung zwischen den Ringen).....	51
Tabelle 10: Realitätsnahe, kritische Außendrucke $p_{0,FEA}$ der ringversteiften Panzerung (GMNIA)	59
Tabelle 11: Kritischer Außendruck des Versteifungsringes nach Amstutz/Feder (gelb = Werte $p_{a, Ring, max}$).....	135
Tabelle 12: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S355 nach der Theorie von Amstutz	136
Tabelle 13: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S550 nach der Theorie von Amstutz	137
Tabelle 14: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S690 nach der Theorie von Amstutz	138
Tabelle 15: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S890 nach der Theorie von Amstutz	139
Tabelle 16: Ermittlung des kritischen Außendruckes p_{Bem} für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S355 und $p_{a, Ring}$ nach Amstutz.....	142
Tabelle 17: Ermittlung des kritischen Außendruckes p_{Bem} für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S550 und $p_{a, Ring}$ nach Amstutz.....	142
Tabelle 18: Ermittlung des kritischen Außendruckes p_{Bem} für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S690 und $p_{a, Ring}$ nach Amstutz.....	142
Tabelle 19: Ermittlung des kritischen Außendruckes p_{Bem} für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S890 und $p_{a, Ring}$ nach Amstutz.....	143
Tabelle 20: Kritischer Außendruck des Versteifungsringes nach Jacobsen (gelb = Werte $p_{a, Ring, max}$).....	155
Tabelle 21: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S355 nach der Theorie von Jacobsen	156

Tabelle 22: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S550 nach der Theorie von Jacobsen	157
Tabelle 23: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S690 nach der Theorie von Jacobsen	158
Tabelle 24: Werte zur Entwicklung von f_{Bem} für die Stahlgüte S890 nach der Theorie von Jacobsen	159
Tabelle 25: Ermittlung des kritischen Außendrucks $p_{a,Bem}$ für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S355 und $p_{a,ring}$ nach Jacobsen	161
Tabelle 26: Ermittlung des kritischen Außendrucks $p_{a,Bem}$ für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S550 und $p_{a,ring}$ nach Jacobsen	161
Tabelle 27: Ermittlung des kritischen Außendrucks $p_{a,Bem}$ für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S690 und $p_{a,ring}$ nach Jacobsen	162
Tabelle 28: Ermittlung des kritischen Außendrucks $p_{a,Bem}$ für die Anwendungsfälle mit der Stahlgüte S890 und $p_{a,ring}$ nach Jacobsen	162
Tabelle 29: Verhältnisse der Schlankheiten des Rohres (R/t) und des Versteifungsringes (R/i)	177
Tabelle 30: Kritischer Außendruck $p_{a,ring}$ des Versteifungsringes nach Amstutz/Feder bei Variation der mitwirkenden Breite b_m (Werte in gelb entsprechen $p_{a,ring} = p_{a,ring,max}$ nach Gl. 80; R_s entspricht R).....	189

13 Literaturverzeichnis

- [1] *Unterweger H., Ecker, A.*, „Beulen von stählernen Druckschachtpanzerungen unter Außendruck“, Bericht zum FFG-Forschungsprojekt „DS-Beulen“, TU Graz, 2017.
- [2] *Amstutz E.*, „Das Einbeulen von Schacht- und Stollenpanzerungen“, Schweizerische Bauzeitung, Nr.9, S. 102 – 105, 1950.
- [3] *Amstutz E.*, „Das Einbeulen von vorgespannten Schacht- und Stollenpanzerungen“, Schweizerische Bauzeitung, Nr.16, S. 229 – 230, 1953.
- [4] *Amstutz E.*, „Das Einbeulen von Schacht- und Stollenpanzerungen“, Schweizerische Bauzeitung, Heft 28, S 541 – 549, 10. Juli 1969.
- [5] *Taras A., Greiner R.*, „Zum Gültigkeitsbereich der Bemessungsformeln für Druckschachtpanzerungen unter Außendruck“, Ernst & Sohn, Stahlbau 76, Heft 10, S.730 – 738, 2007.
- [6] *Feder G.*, „Zur Stabilität ringversteifter Rohre unter Außendruckbelastung“, Schweizerische Bauzeitung, Sonderdruck aus dem 89. Jahrgang, Heft 42, S. 1043 - 1051, 1971.
- [7] *Jacobsen S.*, „Einbeulen von kreisrunden Ringen und zylindrischen Rohren die gegen radiales Ausweichen behindert sind“, Rohre - Rohrleitungsbau - Rohrleitungstransport, Heft 6, S. 374 - 385, Dezember 1972.
- [8] ÖNORM EN 1993-1-6 „Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten“; Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen, Ausgabe: 2012-06-15
- [9] *Anderiasch B.*, „Skriptum Rohrleitungsbau“, TU Graz, Jänner 2017
- [10] *Dassault Systèmes (2014)*, „ABAQUS Manual 6.14“, <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/index.html>, Februar 2018

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe:

D – Diplom-, Masterarbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte
S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl