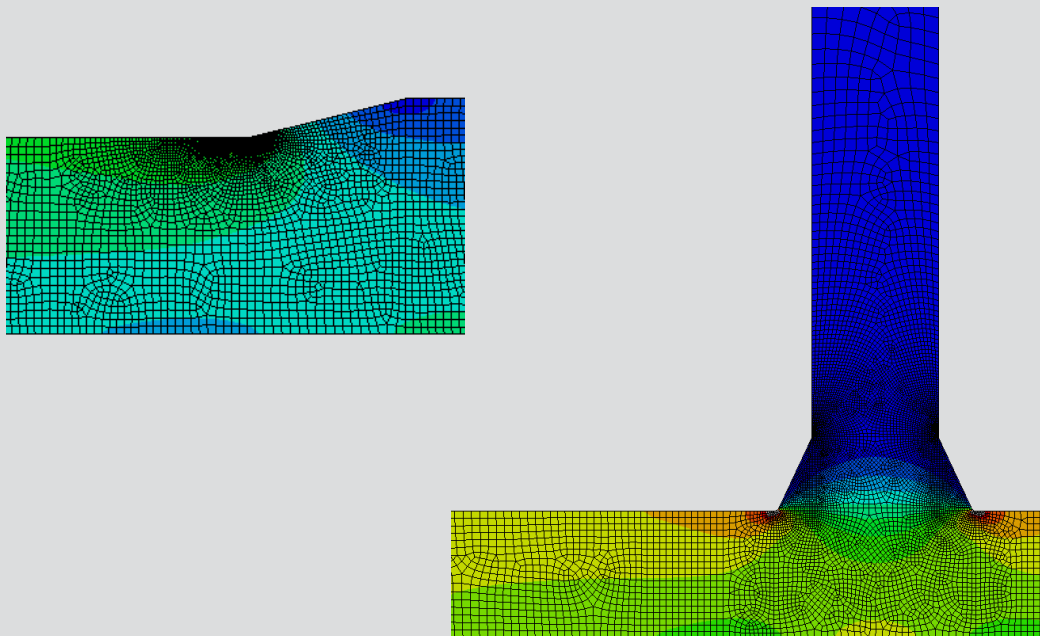


Struktur- und Kerbspannungskonzept – Einfluss der Blechdicke auf die Ergebnisse für Rohrdetails unter Längskräften



D-5-86/2020

Armend Nura, Bsc
Institut für Stahlbau
Technische Universität Graz

MASTERARBEIT

**STRUKTUR- UND KERBSPANNUNGSKONZEPT –
EINFLUSS DER BLECHDICKE AUF DIE ERGEBNISSE FÜR
ROHRDETAILS UNTER LÄNGSKRÄFTEN**

von

Armend Nura

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science (MSc) bzw. Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

eingereicht an der

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften
Technische Universität Graz

Graz, im Jänner 2021

Betreuer:

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

Deutsche Fassung: Beschluss der Curricula Kommission für Bachelor, Master und Diplomstudien vom 10.11.2008

Genehmigung des Senates am 1.12.2008

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 wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, 12. Jänner 2021

Armend Nura

Englische Fassung:

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, 12th of January 2021

Armend Nura

Danksagung

Ich danke ganz besonders meinen Eltern Zadin und Imrije, meinen Großeltern Ramiz und Vahide Nura als auch meinen Geschwistern Adil und Alisa für die Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen während der gesamten Studienzzeit.

Besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.techn. Dipl.-Ing. Harald Unterweger dafür, dass ich das Thema der vorliegenden Masterarbeit am Institut für Stahlbau bearbeiten konnte. Durch die laufenden Besprechungstermine zur Unterstützung und seine große Erfahrung konnten ständig Fortschritte während der Ausarbeitungszeit verzeichnet werden.

Ein großer Dank auch an meinen Betreuer Dr.techn. Dipl.-Ing. Alexander Ecker für seine hilfreiche Unterstützung und Ratschläge am Anfang und auch während der Ausarbeitung dieser Arbeit.

Struktur- und Kerbspannungskonzept – Einfluss der Blechdicke auf die Ergebnisse für Rohrdetails unter Längskräften

Kurzfassung

Diese Arbeit behandelt die Ermüdungsnachweise von zwei in der Praxis häufig vorkommenden Rohrdetails unter alleiniger Längskraftbeanspruchung. Die Ergebnisse in dieser Arbeit können sowohl für den Rohrleitungsbau als auch für den Mastbau mit kreisrunden Querschnitten herangezogen werden.

Die untersuchten Details sind einerseits ein Wanddickenübergang von einem dünneren Rohrschuss zu einem dickeren Rohrschuss und andererseits eine außen auf das Rohr aufgeschweißte Ringsteife; dabei wird immer von voll durchgeschweißten Nähten ausgegangen.

Zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Bauteilen können grundsätzlich folgende rechnerische Verfahren angewendet werden: Nenn-, Struktur-, und Kerbspannungskonzept.

Durch die rasante Entwicklung der numerischen Berechnungsmethoden (FEM) werden die alternativen Nachweismethoden auf Basis der Struktur- und Kerbspannungen möglich und attraktiv.

Die beiden Details werden sowohl mit dem Struktur- als auch mit dem Kerbspannungskonzept untersucht. Dabei wird besonders der Einfluss auf die Ermüdungstragfähigkeit vom Verhältnis Radius zu Wanddicke sowie der Rohrwanddicke untersucht. Ebenso werden für beide Details die wesentlichen Geometrieparameter variiert und deren Einfluss auf die lokale Struktur- bzw. Kerbspannung herausgearbeitet.

Abschließend werden die Ermüdungstragfähigkeiten für beide Details nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept miteinander verglichen.

Structural hot spot- and effective notch stress approach – Impact of the plate thickness on the results of pipe details under axial forces

Abstract

This thesis deals with the fatigue check on pipes, especially for two in practice commonly used pipe details under axial forces. The results in this master thesis can be used for penstocks as well as for masts with circular cross-sections. Furthermore, the investigated details are on one hand a wall thickness transition, a thinner pipe section to a thicker pipe section, and on the other hand a ring stiffener, that is welded onto the outside of the pipe.

For fatigue design of welded parts there can be principally the following methods used: the nominal stress method, the structural (hot spot) stress method and the effective notch stress method.

It is important to emphasize that due to the rapid development of the numerical calculation methods (FEM) the alternative methods, based on the structural hot spot- and effective notch stress method, become possible and attractive.

Both details have been investigated with the structural stress method as well as with the effective notch stress method. Especially the influence on fatigue design of the radius to pipe wall thickness relation (r_i/t) and the wall thickness itself will be determined. In addition, the main geometrical parameters have been varied to determine their impact on the local structural hot spot- and effective notch stress.

Finally, the fatigue strengths for both details based on the nominal, structure and notch stress approach will be compared with each other.

Inhaltsverzeichnis

1. Ermüdungsnachweise – Allgemein	1
1.1. Einleitung	1
1.2. Ermüdungsnachweis nach dem Nennspannungskonzept	1
1.3. Ermüdungsnachweis nach dem Strukturspannungskonzept	2
1.4. Ermüdungsnachweis nach dem Kerbspannungskonzept	5
2. Ziele dieser Arbeit	7
3. Untersuchte Details	9
3.1. Detail 1 – Ringsteifenanschluss	9
3.2. Detail 2 – Wanddickensprung	11
4. Numerische Berechnung nach dem Struktur- und Kerbspannungskonzept.....	13
4.1. Detail 1 – Ringsteifenanschluss	13
4.1.1. FE-Modell im Überblick.....	13
4.1.2. Ergebnisse für Wanddicke $t = 25$ mm mit Nahtaufweitung	19
4.1.3. Ergebnisse für Wanddicke $t = 25$ mm ohne Nahtaufweitung.....	20
4.1.4. Vergleich mit und ohne Nahtaufweitung	21
4.1.5. Ergebnisse für Wanddicke $t = 50$ mm	22
4.1.6. Ergebnisse für Wanddicke $t = 75$ mm	23
4.1.7. Vergleich Struktur- und Kerbspannungen bei unterschiedlicher Rohrwanddicke t ...	24
4.2. Detail 2 – Wanddickensprung	26
4.2.1. FE-Modell im Überblick.....	26
4.2.2. Vergleich quadratische und lineare Spannungsextrapolation	27
4.2.3. Ergebnisse für Wanddicke $t_1 = 25$ mm	27
4.2.4. Ergebnisse für Wanddicke $t_1 = 50$ mm	32
4.2.5. Ergebnisse für Wanddicke $t_1 = 75$ mm	36
5. Vergleich der Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept.....	41
5.1. Detail 1 – Ringsteifenanschluss	41
5.1.1. Ermüdungsfestigkeiten nach Eurocode EN 1993-1-9	41
5.1.2. Ergebnisse für Wanddicke $t = 25$ mm mit Nahtaufweitung	43
5.1.3. Ergebnisse für Wanddicke $t = 25$ mm ohne Nahtaufweitung.....	45
5.1.4. Ergebnisse für Wanddicke $t = 50$ mm	46
5.1.5. Ergebnisse für Wanddicke $t = 75$ mm	48
5.1.6. Graphische Darstellung der Ergebnisse.....	49
5.2. Detail 2 – Wanddickensprung	53
5.2.1. Ermüdungsfestigkeiten nach Eurocode EN 1993-1-9	53
5.2.2. Ergebnisse für Wanddicke $t_1 = 25$ mm	55
5.2.3. Ergebnisse für Wanddicke $t_1 = 50$ mm	57

5.2.4.	Ergebnisse für Wanddicke $t_1 = 75 \text{ mm}$	59
5.2.5.	Graphische Darstellung der Ergebnisse.....	61
6.	Zusammenfassung und Erkenntnisse dieser Arbeit.....	63
7.	Literatur	65
Anhang A.	FE-Berechnungen - Ringsteifenanschluss	A-1 bis A-120
Anhang B.	FE-Berechnungen - Wanddickensprung	B-1 bis B-188

1. Ermüdungsnachweise – Allgemein

1.1. Einleitung

Stählerne Rohrleitungen von Triebwasserwegen (freie Druckrohrleitungen und Druckschächte) sowie Rohre im Mastbau müssen eine hohe Lebensdauer aufweisen. Durch die im Betrieb auftretenden sehr hohen Längskraftschwankungen und die daraus resultierenden Spannungsspiele $\Delta\sigma$ in der Druckschachtpanzerung, müssen bei der Auslegung auch Ermüdungsnachweise beachtet werden. Diese Arbeit befasst sich mit reinen Längsspannungen aus einer Belastung in axialer Richtung.

Hinsichtlich Materialermüdung bei stählernen Druckrohrleitungen sind hierbei nahezu immer die Nahtbereiche von Schweißnähten maßgebend, da diese die größere Kerbwirkung aufweisen. Zur Ermittlung der Ermüdungstragfähigkeit von geschweißten Bauteilen können grundsätzlich folgende rechnerische Verfahren angewendet werden: Das Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept.

Hier wird nur kurz auf die einzelnen Konzepte eingegangen. Ausführliche Erläuterungen finden sich in Abschnitt 1.2 bis 1.4.

Das Nennspannungskonzept ist das klassische und am häufigsten verwendete Verfahren, welches auf früheren Schwingungsversuchen von Bauteilen basiert und im Allgemeinen nur auf einfache stab- und flächenförmige Bauteile anwendbar ist. Die lokale Kerbwirkung durch die Schweißnaht wird hierbei nur indirekt durch die unterschiedlichen Kerbfallklassen erfasst. Der Grund, weshalb oft auf dieses Konzept zurückgegriffen wird, ist der, dass die entsprechenden Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_R$, $\Delta\tau_R$ sehr schnell und ohne aufwendige numerische Berechnungen aus den Kerbfallkatalogen im Eurocode EN 1993-1-9 [1] entnommen werden können.

Beim Strukturspannungskonzept werden mögliche Ermüdungsrisse am Schweißnahtübergang mitberücksichtigt. Ermüdungsrisse ausgehend von der Schweißnahtwurzel bei Kehlnähten sind hierbei nicht erfassbar. Im Eurocode EN 1993-1-9 [1] sind Ermüdungsfestigkeiten auf Basis des Strukturspannungskonzeptes im Anhang B Tabelle B.1 angegeben, jedoch fehlen jegliche Hinweise für die Spannungsberechnung selbst. Die Grundlagen zur Spannungsberechnung, wie z.B. die notwendige Spannungsextrapolation zum „hot spot“ hin, findet man in der IIW-Richtlinie [2]. Für zutreffende Ergebnisse nach dem Strukturspannungskonzept spielen die Netzteilung, die Elemente, sowie die Ansatzfunktionen der Elemente beim verwendeten FE-Modell eine große Rolle.

Das Kerbspannungskonzept erfasst neben den möglichen Ermüdungsrisse am Schweißnahtübergang auch die Ermüdungsrisse von der Schweißnahtwurzel aus. Aktuell ist das Kerbspannungskonzept im Eurocode EN 1993-1-9 [1] nicht verankert, jedoch soll sich das künftig ändern und im neuen Eurocode zu finden sein. Man findet jedoch Hinweise zur Anwendung in der IIW-Richtlinie [2].

1.2. Ermüdungsnachweis nach dem Nennspannungskonzept

Dieses Nachweiskonzept basiert, wie schon oben erwähnt, auf Ergebnissen von früheren Schwingungs- bzw. Ermüdungsversuchen mit geometrischen und strukturellen Imperfektionen, wie z.B. die aus der Stahlproduktion und Bauteilherstellung resultierenden Herstellungstoleranzen und Eigenspannungen infolge Schweißens. Diese Spannungserhöhungen werden bei diesem Konzept zur Gänze durch eine reduzierte Ermüdungsfestigkeit erfasst. Dabei ist zu beachten, dass damit primär nur Konstruktionsdetails von stabförmigen Bauteilen (siehe Abb. 1) abgedeckt sind.

Mit der Festigkeits-Wöhlerlinie sind nun Geometrie einschließlich der Wirkung von Kerb- und Größeneffekten, Werkstoff und Oberflächenzustand inkl. Aufhärtung oder Erhärtung sowie oberflächennaher Eigenspannungen abgedeckt [3].

Die Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Nennspannung beruhen auf elastischem Verhalten von Bauteilen und Verbindungen. Um die wesentlichen Ausführungsdetails der Stahlbaupraxis zu erfassen, sind umfangreiche Kerbfallkataloge notwendig, die im Eurocode EN 1993-1-9 [1] abgebildet sind.

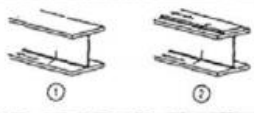




Kategorie	Schweißnaht-Detail (Auswahl)
125	
112	
100	
80	
71	

Abb. 1: Kerbfallkatalog nach EN 1993-1-9 für das Nennspannungskonzept [1]

1.3. Ermüdungsnachweis nach dem Strukturspannungskonzept

Grundsätzlich ist bei der Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit immer die lokale Spannungsspitze an der maßgebenden Kerbstelle von Bedeutung. Beim Strukturspannungskonzept wird die durch die Geometrie bedingte Erhöhung der Spannung am Schweißnahtübergang miterfasst. Die lokale Kerbwirkung der Schweißnaht selbst wird indirekt in einer gegenüber dem Grundmaterial reduzierten Ermüdungsfestigkeit berücksichtigt.

In Abb. 2 sind einige Beispiele für den geometriebedingten erhöhten Spannungsverlauf, welcher beim Strukturspannungskonzept miterfasst werden muss, abgebildet. Dies ist nurmehr mit Einsatz von Finite-Elemente (FE) -Berechnungen möglich.

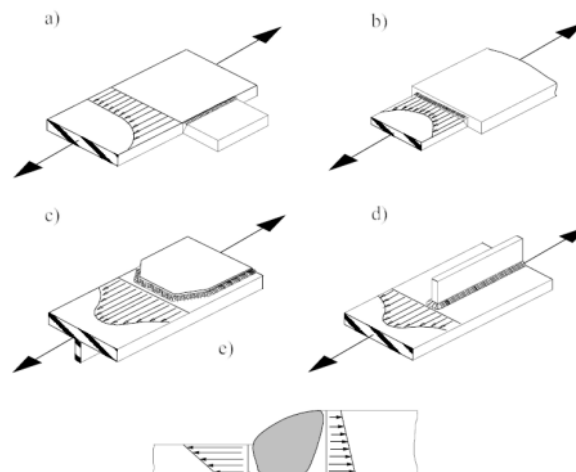


Abb. 2: Beispiele a) bis e) für Bauteile mit zugehöriger Strukturspannung aus [2]

Im Eurocode EN 1993-1-9 [1] sind Ermüdungsfestigkeiten auf Basis des Strukturspannungskonzeptes im Anhang B Tabelle B.1 angegeben, jedoch fehlen jegliche Hinweise für die Spannungsberechnung selbst. Die Grundlagen zur Spannungsberechnung, wie z.B. die notwendige Spannungsextrapolation zum sogenannten „hot spot“ hin, findet man in der IIW-Richtlinie [2], die nachfolgend zusammengefasst sind.

Grundsätzlich unterscheidet die IIW-Richtlinie [2] zwischen zwei unterschiedlichen Typen von „hot spots“. Für jeden dieser zwei Typen gibt es unterschiedliche Extrapolationsvorschriften zur Ermittlung der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Strukturspannung.

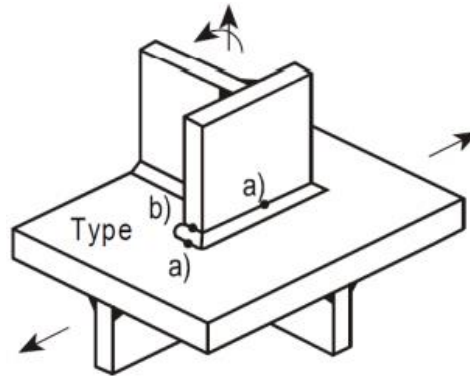


Abb. 3: Unterschiedliche Typen von „hot spots“ [2]

- Hot spot Typ a): Dieser befindet sich am Übergang zwischen Schweißnaht und Stahlblechoberfläche.
- Hot spot Typ b): Dieser befindet sich am Übergang zwischen Schweißnaht u. Stahlblechseitenfläche.

Für diese Arbeit ist nur der Typ a) von Bedeutung, da dieser vorwiegend bei Stahlwasserbaudetails vorkommt und den Standardfall bei Druckrohrleitungen (DRL) darstellt. Auf Typ b) wird daher nicht näher eingegangen.

Um die Spannungen am maßgebenden Punkt zu ermitteln und den spannungserhöhenden Einfluss der Kerbe am Schweißnahtübergang auszuschließen, kommt eine Extrapolation der Strukturspannung zum Einsatz. Dabei unterscheidet man zwischen linearer und quadratischer Spannungsextrapolation (vgl. Abb. 4 und Abb. 5). In Kapitel 4 „Numerische Berechnung nach dem Struktur- und Kerbspannungskonzept“ werden diese beiden Extrapolationsvorschriften anhand eines Beispiels miteinander verglichen und untersucht, ob Unterschiede der Strukturspannungen auftreten.

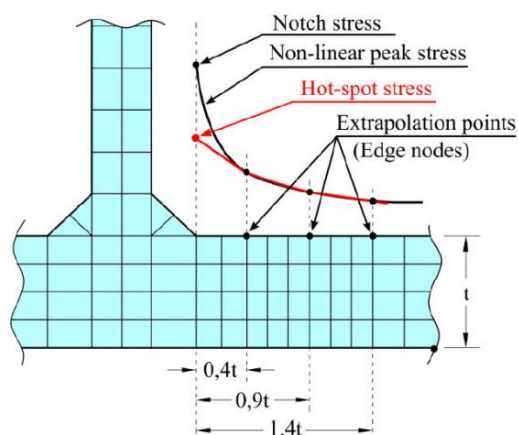


Abb. 4: quadr. Extrapolation einer feinen Vernetzung [2]

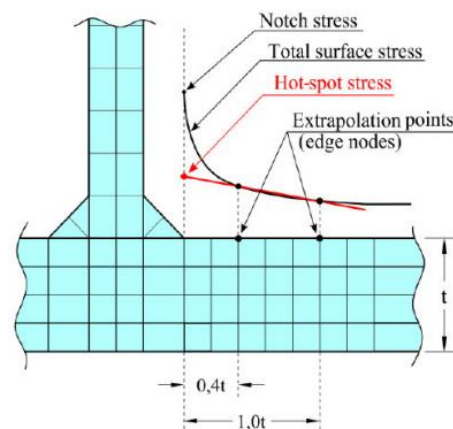


Abb. 5: lin. Extrapolation einer feinen Vernetzung [2]

- **Extrapolationsvorschriften – hot spot Typ a):**

Folgende Varianten der Extrapolation sind möglich, wobei sich die erforderliche Elementlänge w nach der Blechdicke t orientiert:

Var. 1: Feine Vernetzung (Elementlänge des ersten Elements vor dem hot spot $w \leq 0,4 t$): lineare Extrapolation mit zwei Basispunkten (Lage bei $0,4 t$ und $1,0 t$ vor dem „hot spot“); siehe Abb. 6 a; t stellt dabei die Blechdicke dar. Für die Spannung im hot spot (hs) gilt:

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} \quad \text{Gl. (1)}$$

Var. 2: Feine Vernetzung (Elementlänge des ersten Elements vor dem hot spot $w \leq 0,4 t$): quadratische Extrapolation mit drei Basispunkten (Lage bei $0,4 t$, $0,9 t$ und $1,4 t$ vor dem „hot spot“); Empfohlen für eine ausgesprochen nichtlineare Spannungserhöhung zum hot spot hin, für scharfe Richtungsänderungen der Belastung oder für dickwandige Bauteile; (in Abb. 6 nicht dargestellt); Für die Spannung im hot spot gilt:

$$\sigma_{hs} = 2.52\sigma_{0.4t} - 2.24\sigma_{0.9t} + 0.72\sigma_{1.4t} \quad \text{Gl. (2)}$$

Var. 3: Grobe Vernetzung (Elementlänge des ersten Elements vor dem hot spot $w = 1,0 t$): Ansatzfunktion höherer Ordnung bei den einzelnen FE-Elementen; lineare Extrapolation mit zwei Basispunkten (Lage bei $0,5 t$ und $1,5 t$ vor dem „hot spot“); siehe Abb. 6 b; Für die Spannung im hot spot gilt:

$$\sigma_{hs} = 1.5\sigma_{0.5t} - 0.5\sigma_{1.5t} \quad \text{Gl. (3)}$$

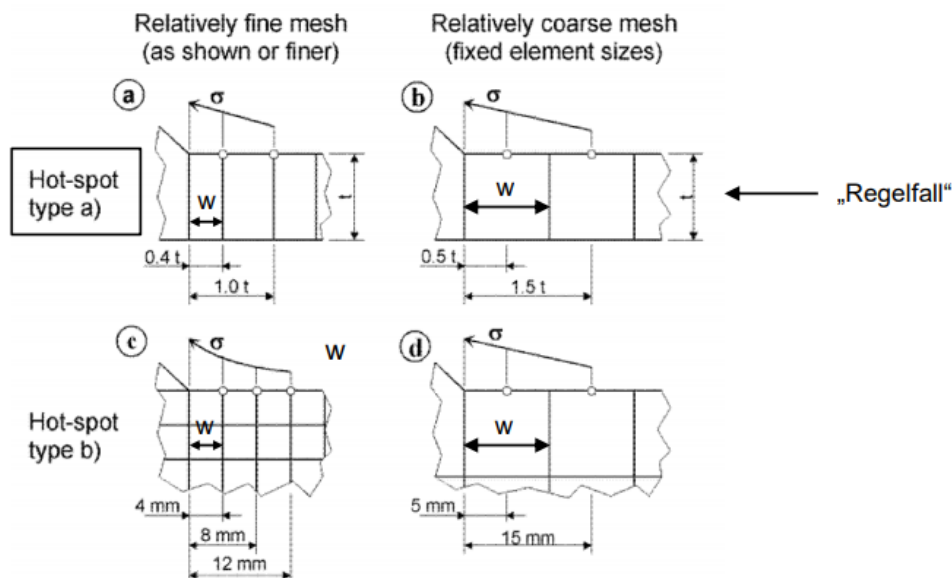


Abb. 6: Basispunkte für Extrapolation der Strukturspannungen bei unterschiedlichen FE-Netzen [2]

- **Erfassung des Blechdickeneffekts für $t > 25 \text{ mm}$**

Die Ermüdungsfestigkeiten des Strukturspannungskonzeptes sind bei Blechdicke $t > 25 \text{ mm}$ entsprechend abzumindern, da die Ermüdungstragfähigkeit mit zunehmender Blechdicke abnimmt. Darauf wird bei den einzelnen Konstruktionsdetails noch näher eingegangen.

1.4. Ermüdungsnachweis nach dem Kerbspannungskonzept

Ergänzend zum Strukturspannungskonzept wird beim Kerbspannungskonzept auch die lokale Kerbwirkung der Schweißnaht selbst erfasst. Wie schon in der Einleitung erwähnt, ist dieses Konzept aktuell nicht im Eurocode verankert, weshalb die IIW-Richtlinie [2] für diese Arbeit herangezogen wird. Die IIW-Richtlinie [2] findet hauptsächlich im Maschinenbau Anwendung, bietet aber auch für das Bauingenieurwesen relevante Hinweise.

Die Bestimmung der Kerbspannungen an Schweißnähten erfolgt grundsätzlich auf Basis von FEM-Analysen durch entsprechende Detailmodelle. Bei der Erstellung eines FE-Modells sollten die Empfehlungen aus Abb. 8 und Tabelle 1 eingehalten werden.

Die Kerbwirkung der Schweißnaht wird vereinfacht in Form eines Kerbradius von $r = 1 \text{ mm}$ erfasst, welcher sowohl bei der Schweißnahtwurzel als auch beim Schweißnahtübergang angesetzt wird (vgl. Abb. 7).

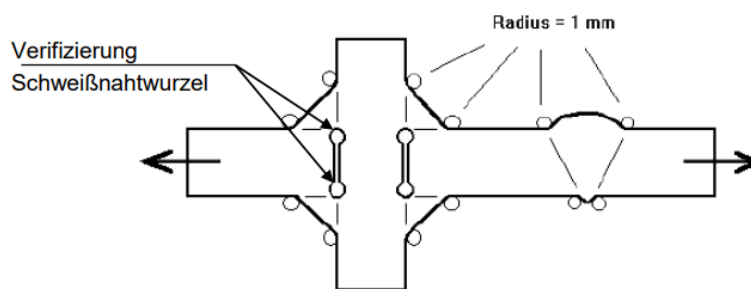


Abb. 7: Kerbspannungskonzept: Modellierung der effektiven Ausrundungsradien am Schweißnahtübergang und der Schweißnahtwurzel [2]

Für eine zutreffende Wiedergabe der Spannungsspitzen an den Kerbradien sind lokal sehr feine FE-Netze erforderlich, wie die Abb. 8 und Tabelle 1 zeigt.

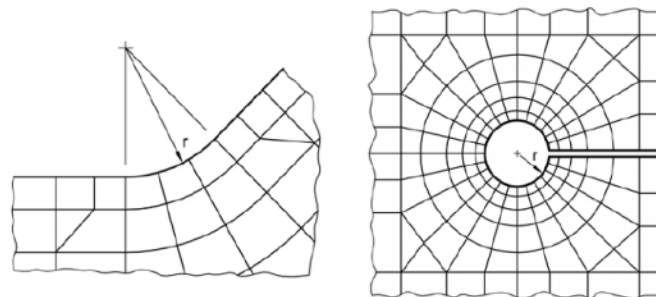


Abb. 8: Kerbspannungskonzept: Empfohlene FE-Vernetzung von Schweißnahtübergängen und -wurzeln [2]

Elementtyp	Relative Elementgröße w	Absolute Elementgröße w [mm]	Elementanzahl im 45° Bogen (Abb. 8 links)	Elementanzahl im 360° Bogen (Abb. 8 rechts)
Quadratische Elemente	$\leq r/4$	≤ 0.25	≥ 3	≥ 24
Lineare Elemente	$\leq r/6$	≤ 0.15	≥ 5	≥ 40

Tabelle 1: Empfohlene Elementanzahl und Elementgrößen im Bereich der Kerbe mit $r = 1 \text{ mm}$

Die Notwendigkeit eines eigenen Kerbfallkataloges entfällt hierbei, da für die Berechnung der Ermüdungsfestigkeit mit dem Kerbspannungskonzept nur eine Wöhler-Linie (FAT-Klasse) maßgebend ist. Für Stahl beträgt diese 225 [2], wobei Eigenspannungen in extremer Höhe bereits berücksichtigt sind. Auch der Blechdickeneffekt ist implizit miterfasst. Das bedeutet, dass die Abminderung der Ermüdungsfestigkeit bei großer Blechdicke entfällt.

Im Entwurf zum neuen Eurocode EN 1993-1-9 [4] gibt es eine Regelung, die besagt, dass Exzentrizitäten berücksichtigt werden müssen, wenn die Kerbspannung kleiner gleich zweimal der Nennspannung ist. Da die FE-Berechnungen allesamt ohne Berücksichtigung von Exzentrizitäten erfolgen, sollte der Kerbspannungsfaktor, wenn dieser kleiner als 2.0 ist, für den Ermüdungsnachweis nicht herangezogen werden. In den Tabellen, mit den jeweiligen Kerbspannungsfaktoren, sind diese deshalb rot hinterlegt.

2. Ziele dieser Arbeit

Wie schon am Anfang erwähnt, wird traditionell auf das Nennspannungskonzept zurückgegriffen, welches ohne eine aufwendige, numerische Berechnung mit der Finite-Elemente-Methode (kurz FEM) angewendet werden kann.

Durch die rasante Entwicklung der numerischen Berechnungen mit FEM und deren anwenderfreundliche Software wurden alternative Nachweismethoden auf Basis der Struktur- und Kerbspannungen möglich und attraktiv. Diese neuen numerischen Berechnungsmethoden bilden den Schwerpunkt dieser Masterarbeit, wobei auch für die untersuchten Details der quantitative Unterschied gegenüber dem Nennspannungskonzept aufgezeigt werden soll.

Die untersuchten Details sind einerseits ein Wanddickenübergang von einem dünneren Rohrschuss zu einem dickeren Rohrschuss und andererseits eine außen auf das Rohr aufgeschweißte Ringsteife. Dabei wird immer von voll durchgeschweißten Nähten ausgegangen. Diese beiden Details werden mit Variation der wichtigsten Geometrieparameter analysiert und die Ermüdungsnachweise für jedes dieser Konstruktionsdetails detailliert aufbereitet. In Form einer Parameterstudie werden dabei Tabellen und Diagramme mit Spannungserhöhungsfaktoren, die für jedes Detail aufbereitet werden, erstellt, sodass zukünftig eine aufwändige FE-Berechnung auf Basis des Struktur- und Kerbspannungskonzeptes für diese Details entfallen kann. Dabei wird besonders der Einfluss des Verhältnisses Radius zu Wanddicke sowie unterschiedlicher Rohrwanddicken untersucht. Ebenso werden für beide Details die wesentlichen Geometrieparameter variiert und deren Einfluss auf die lokale Struktur- bzw. Kerbspannung untersucht. Die Ergebnisse dieser Arbeit können sowohl für den Rohleitungsbau als auch für den Mastbau herangezogen werden.

Hinzuzufügen ist, dass für beide Ermüdungskonzepte (Struktur-, Kerbspannungskonzept) das gleiche numerische FE-Modell aufgrund der feinen Netzteilung herangezogen wurde.

Das Kerbspannungskonzept, welches zurzeit nicht im Eurocode EN 1993-1-9:2013 [1] zu finden ist, wird künftig im neuen Eurocode verankert sein. Hier liegt schon ein zweiter Entwurf des Eurocodes EN 1993-1-9:2020 [4] vor, worin auch das Kerbspannungskonzept zu finden ist.

3. Untersuchte Details

In diesem Kapitel werden die beiden untersuchten Details Ringsteifenanschluss und Wanddickensprung kurz erläutert und beschrieben, wie und welche Parameter variiert werden.

3.1. Detail 1 – Ringsteifenanschluss

Ringsteifen sind im Druckrohrleitungsbau ein häufig verwendetes Bauteil. Sie dienen zum einen dazu, die Rohrleitung gegen Außendruck zu versteifen (Beulringe), zum anderen, die Längskräfte in der Rohrleitung in den angrenzenden Beton weiterzuleiten (Schubringe) [3].

Im Zuge dieser Arbeit werden voll durchgeschweißte Nähte (vgl. Abb. 9) für den Ringsteifenanschluss untersucht. Zudem wird auch der Einfluss einer Nahtaufweitung auf die Ermüdungstragfähigkeit überprüft. Hierbei werden unterschiedliche Modelle miteinander verglichen, bei denen zum einen eine Naht mitmodelliert und zum anderen diese außer Acht gelassen wurde, um zu sehen, wie sich die Nahtaufweitung auf die Struktur- und Kerbspannung auswirkt.

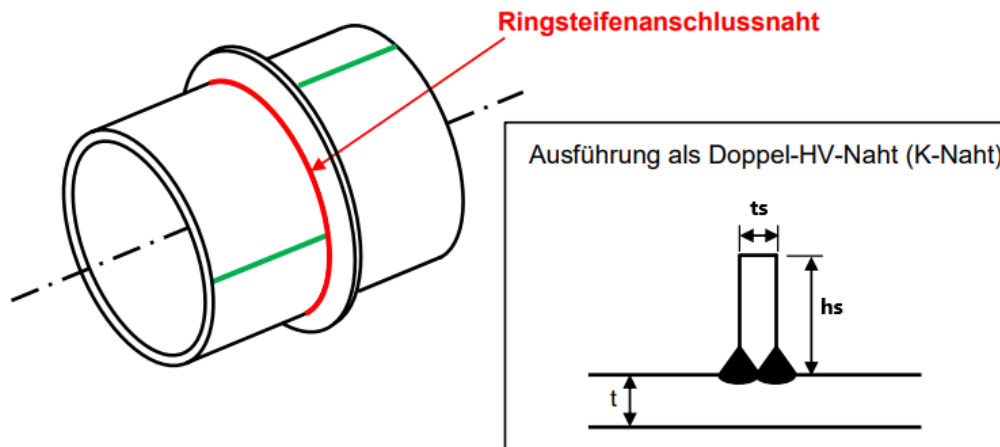


Abb. 9: Schematische Darstellung der Ringsteifenanschlussnaht [3]

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die Parameter aufgelistet, die für die FE-Modellierung vom Ringsteifenanschluss variiert wurden:

Rohrwanddicke t [mm]	Verhältnis h_s/t_s [-]	Verhältnis t_s/t [-]
25	3.5	1
50	7	2
75	14	

Tabelle 2: Verwendete Parameter für den Ringsteifenanschluss

Dabei wird grundsätzlich die Rohrwanddicke t gleich gehalten und mit den Geometrieverhältnissen h_s/t_s die Ringhöhe bzw. t_s/t die Ringdicke für die verschiedenen Varianten zur Modellberechnung festgelegt. Anschließend werden diese Varianten mit gleichbleibender Rohrwanddicke t und verschiedenen r_i/t -Verhältnissen (20, 50, 100, 200 und 500) in Abaqus v.6.14 [5] modelliert. Das Ziel hierbei ist, durch die Variierung der Geometrieparameter und den r/t -Verhältnissen, deren Einfluss auf die Struktur- und Kerbspannung zu untersuchen.

Um einen Überblick zu bekommen, sind in der nachfolgenden Tabelle 3 die verschiedenen Geometrie-Varianten zum Ringsteifenanschluss mit ihren jeweiligen Parametern abgebildet:

Variante	t [mm]	t _s /t	t _s [mm]	h _s /t _s	h _s [mm]	r _i /t	
1	25	1	25	3.5	87.5	20, 200, 500	Mit Nahtaufweitung
2	25	2	50	3.5	175	20, 50, 100, 200, 500	
3	25	1	25	7	175	20, 50, 100, 200, 500	
4	25	2	50	7	350	20, 200, 500	
5	25	1	25	14	350	20, 50, 100, 200, 500	
6	25	2	50	14	700	20, 200, 500	
7	25	1	25	3.5	87.5	20, 200, 500	Ohne Nahtaufweitung
8	25	2	50	3.5	175	20, 200, 500	
9	25	1	25	7	175	20, 200, 500	
10	25	2	50	7	350	20, 200, 500	
11	50	1	50	3.5	175	20, 200, 500	
12	50	2	100	3.5	350	20, 200, 500	
13	50	1	50	7	350	20, 200, 500	
14	50	2	100	7	700	20, 200, 500	
15	75	1	75	3.5	262.5	20, 200, 500	
16	75	2	150	3.5	525	20, 200, 500	
17	75	1	75	7	525	20, 200, 500	
18	75	2	150	7	1050	20, 200, 500	

Tabelle 3: Überblick der untersuchten Modelle zum Ringsteifenanschluss

Zu Beginn dieser Arbeit wurden die Modell-Varianten 1-6 mit einer praxisgerechten Naht modelliert (vgl. Abb. 10 links) und lediglich die Geometrie der Ringsteife verändert (vgl. Tabelle 3 h_s/t_s), um allein deren Einfluss auf die Struktur- und Kerbspannung zu erfassen.

Um den Einfluss der Nahtaufweitung auf die Struktur- und Kerbspannung festzustellen, wurden anschließend die Modell-Varianten 7-10 ohne Schweißnaht untersucht (vgl. Abb. 10 rechts). Dabei stellte sich heraus, dass es nahezu keinen Unterschied beim Strukturspannungskonzept macht, ob man die Schweißnaht bei der numerischen Berechnung berücksichtigt oder nicht (vgl. Abschnitt 4.1.4.). Daher wurde beschlossen, die weiteren Modelle ohne Schweißnahtaufweitung auszuführen. Im weiteren Verlauf wurde die Rohrwanddicke t um 2 x 25 mm erhöht (t = 50 mm und 75 mm), um den Blechdickeneffekt zu erfassen.

Das Rohrwandradius-Dicken-Verhältnis r_i/t = 500 spiegelt hierbei nahezu den ebenen Fall wider.

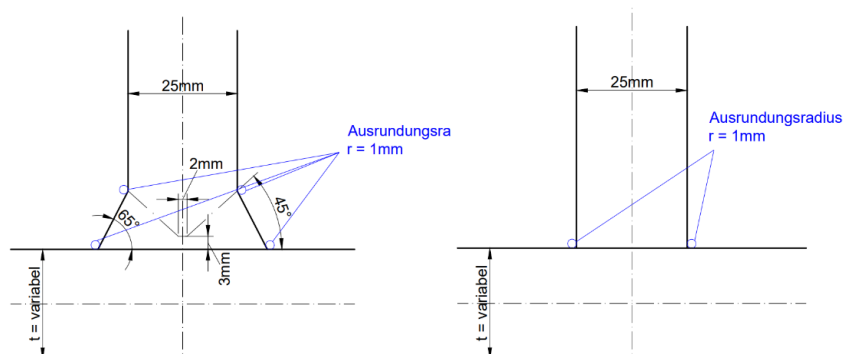


Abb. 10: links mit Nahtaufweitung und rechts ohne Nahtaufweitung

3.2. Detail 2 – Wanddickensprung

Wanddickensprünge werden sehr häufig dort eingesetzt, wo es zu einem Übergang von einer im Freien zu einer im Gebirge verlegten Druckrohrleitung kommt, oder aufgrund des im Druckschacht steigenden Innendrucks. Das Ziel des Wanddickensprunges ist es, das Stahlgewicht möglichst gering zu halten. Die Quernaht wird gleich ausgeführt wie jene ohne Wanddickensprung [3].

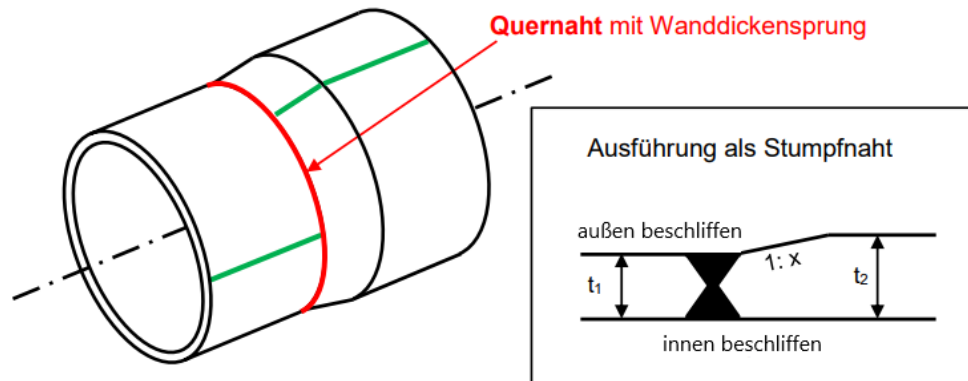


Abb. 11: Schematische Darstellung der Rohrquernaht mit Wanddickensprung [3]

In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die Parameter aufgelistet, die für die FE-Modellierung vom Wanddickensprung verwendet wurden:

Rohrwanddicke t_1 [mm]	Neigung der Fase 1:x	Verhältnis t_2/t_1 [-]
25	1:4	1.2
50	1:5.5	1.5
75	1:10	2

Tabelle 4: Verwendete Parameter für den Wanddickensprung

Dabei ist zu beachten, dass die Quernaht sowohl an der Innenseite als auch an der Außenseite als beschliffen angenommen wurde, was zu einem anderen Kerbfall führt.

Wie beim Ringstifenanschluss wird auch beim Wanddickensprung vorzugsweise die Rohrwanddicke t_1 gleich behalten und die anderen Geometrieparameter variiert (Neigung der Fase 1:x und Verhältnis t_2/t_1). Dabei erhält man $3 \times 3 \times 3 = 27$ Variationen der Modelle, die auf der nächsten Seite in Tabelle 5 abgebildet sind. Anschließend werden diese Modelle mit gleichbleibender Rohrwanddicke t_1 und verschiedenen r_i/t_1 -Verhältnissen (20, 50, 100, 200 und 500) in Abaqus v.6.14 [5] modelliert.

Modell	t_1 [mm]	t_2/t_1	t_2	Fase 1:x	r_i/t_1
1	25	1.2	30	1:4	20, 50, 100, 200, 500
2	25	1.2	30	1:5.5	20, 200, 500
3	25	1.2	30	1:10	20, 50, 100, 200, 500
4	25	1.5	37.5	1:4	20, 50, 100, 200, 500
5	25	1.5	37.5	1:5.5	20, 200, 500
6	25	1.5	37.5	1:10	20, 50, 100, 200, 500
7	25	2	50	1:4	20, 50, 100, 200, 500
8	25	2	50	1:5.5	20, 200, 500
9	25	2	50	1:10	20, 50, 100, 200, 500
10	50	1.2	60	1:4	20, 200, 500
11	50	1.2	60	1:5.5	20, 200, 500
12	50	1.2	60	1:10	20, 200, 500
13	50	1.5	75	1:4	20, 200, 500
14	50	1.5	75	1:5.5	20, 200, 500
15	50	1.5	75	1:10	20, 200, 500
16	50	2	100	1:4	20, 200, 500
17	50	2	100	1:5.5	20, 200, 500
18	50	2	100	1:10	20, 200, 500
19	75	1.2	90	1:4	20, 200, 500
20	75	1.2	90	1:5.5	20, 200, 500
21	75	1.2	90	1:10	20, 200, 500
22	75	1.5	112.5	1:4	20, 200, 500
23	75	1.5	112.5	1:5.5	20, 200, 500
24	75	1.5	112.5	1:10	20, 200, 500
25	75	2	150	1:4	20, 200, 500
26	75	2	150	1:5.5	20, 200, 500
27	75	2	150	1:10	20, 200, 500

Tabelle 5: Überblick der untersuchten Modelle zum Wanddickensprung

Mithilfe dieser Modelle kann man feststellen, wie sich der Einfluss der Fase und den Rohrwanddicken-Verhältnissen t_2/t_1 auf die Struktur- und Kerbspannungen auswirken.

Ausgegangen wird hierbei von einer Rohrwanddicke t_1 von 25 mm, die dementsprechend mit den Geometrieparametern variiert wird. Die Fasen 1:4 und 1:10 stellen die Grenzen dar, weshalb bei diesen die Struktur- und Kerbspannungen genauer untersucht werden, indem die r_i/t_1 -Verhältnisse verfeinert werden (vgl. Tabelle 5). Bei der dazwischenliegenden Fase 1:5.5, die die Winkelhalbierende zwischen den Grenzfaser 1:4 und 1:10 darstellt, sind die r_i/t_1 -Verhältnisse 20, 200, 500 ausreichend genau.

Das Rohrwandradius-Dicken-Verhältnis $r_i/t_1 = 500$ spiegelt hierbei nahezu den ebenen Fall wider.

Im weiteren Verlauf wird bei den Modellen 10-27 auf eine Rohrwanddicke t_1 von 50 und 75 mm mit gleichbleibenden Geometrieverhältnissen (t_2/t_1 bzw. Fase 1:x) erhöht und genauer untersucht. Damit kann man feststellen, wie sich die Dicke der Bauteile auf die Struktur- und Kerbspannungen auswirkt. Man spricht hierbei vom sogenannten Blechdickeneffekt.

4. Numerische Berechnung nach dem Struktur- und Kerbspannungskonzept

In diesem Kapitel sind alle Ergebnisse zu den numerischen Berechnungen nach dem Struktur- und Kerbspannungskonzept in Form von Diagrammen zusammengefasst. Die detaillierten Ergebnisse zu den Längs- und Umfangsspannungen für jedes berechnete Modell sind im Anhang A und B abgebildet.

4.1. Detail 1 – Ringsteifenanschluss

4.1.1. FE-Modell im Überblick

▪ Allgemeines

In diesem Unterkapitel wird das Erstellen des FE-Modells anhand des Modells 3 (vgl. Tabelle 3) genauer beschrieben. Die Geometrie ist der Abb. 12 bzw. Abb. 13 zu entnehmen. Die Abb. 12 zeigt dabei die Längsspannungen; die Abb. 13 die Umfangsspannungen bei einer aufgetragenen Längsspannung von 100 N/mm^2 .

Zur Modellierung und Berechnung der Druckrohrleitungen mit Ringsteifenanschluss wurde das FE-Programm Abaqus v.6.14 [5] eingesetzt. Da die Schweißnaht für die Ermittlung der Struktur- und Kerbspannungen sehr bedeutsam ist, wurde diese anfangs mitabgebildet. Durch das Ausnutzen der Rotationssymmetrie des Rohres ist es möglich das Rohr 2D mit axialsymmetrischen Elementen zu berechnen (siehe Abb. 12), was die Berechnung um ein Vielfaches schneller macht und die Eingabe der Geometrie um einiges erleichtert. Das Rohr wird dabei, wie schon erwähnt, mit einer Längsspannung von 100 N/mm^2 beansprucht.

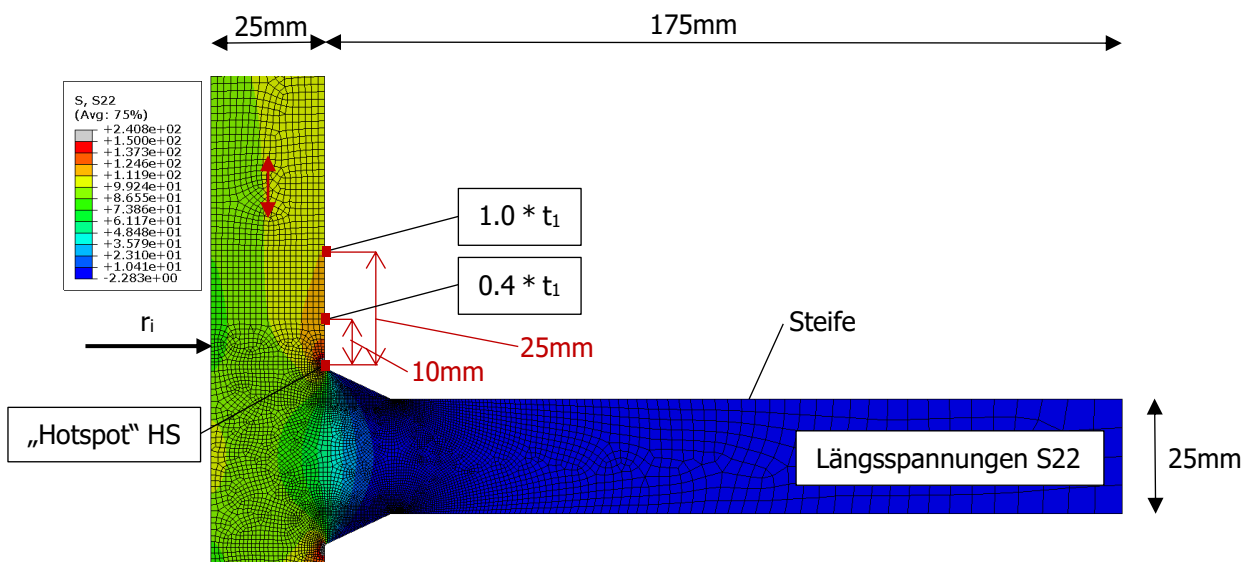


Abb. 12: Ermittlung der Struktur- und Kerbspannung am „Hotspot“ HS für Längsspannungen am Modell 3

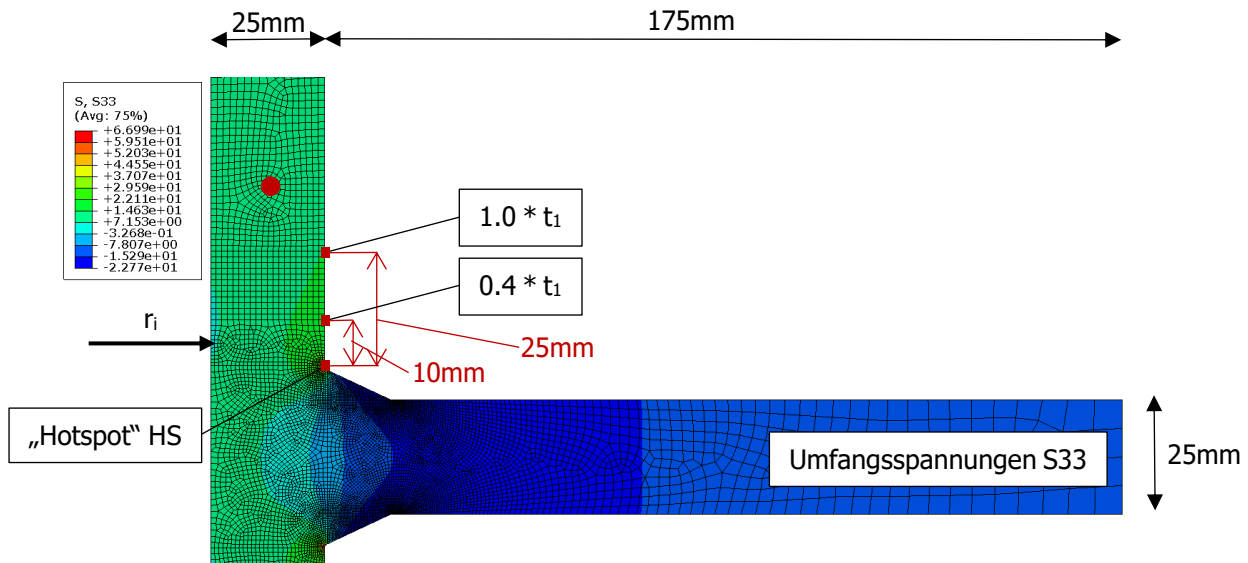


Abb. 13: Ermittlung der Struktur- und Kerbspannung am „Hotspot“ HS für Umfangsspannungen am Modell 3

▪ **Verwendete Materialeigenschaften von Stahl**

- Elastizitätsmodul $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$
- Poissonzahl $\nu = 0,3$
- Ideal elastisch

▪ **Randbedingungen der FE-Berechnung**

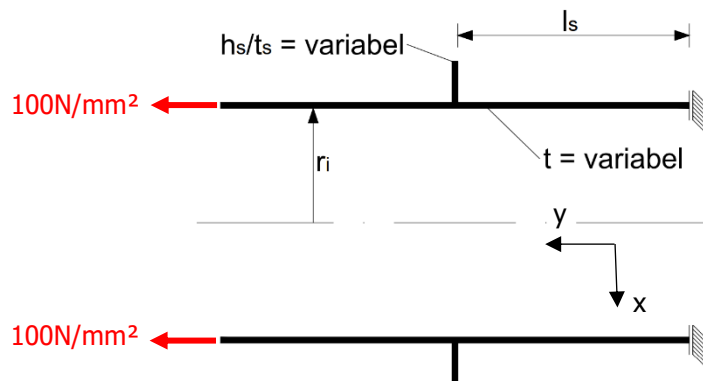


Abb. 14: Randbedingungen für Ringsteifenanschluss

Am rechten Rand des Auflagers wird eine Symmetrierandbedingung in y definiert. Dabei sind die Verschiebung in y -Richtung und die Verdrehungen um x und z gesperrt. Am Kraftangriffspunkt ist nur die Verdrehung um z gesperrt. Diese Randbedingungen sind für alle Modelle gleich definiert.

Zu berücksichtigen ist hierbei, dass eine ausreichende Abklinglänge l_s (vgl. Abb. 14 und Diagramm 1) vorhanden ist. Die Abklinglänge l_s einer Biegestörung für Zylinderschalen lässt sich errechnen zu:

$$l_{s,vorh} > l_{s,erf} = 2.5 * \sqrt{r_i * t} \tag{4}$$

▪ Netzaufteilung

Für eine zutreffende Wiedergabe der Spannungsspitzen an den Kerbradien sind lokal sehr feine FE-Netze erforderlich, wie die Abb. 8 und Tabelle 1 laut IIW-Richtlinie [2] beschreibt. Dabei wurden 4 Elemente an der Ausrundung vorgenommen, wie der untere Detailausschnitt zeigt (vgl. Abb. 15) und davon ausgehend das Netz am gesamten Modell angepasst. Dabei wurden quadratische Ansatzfunktionen angesetzt.

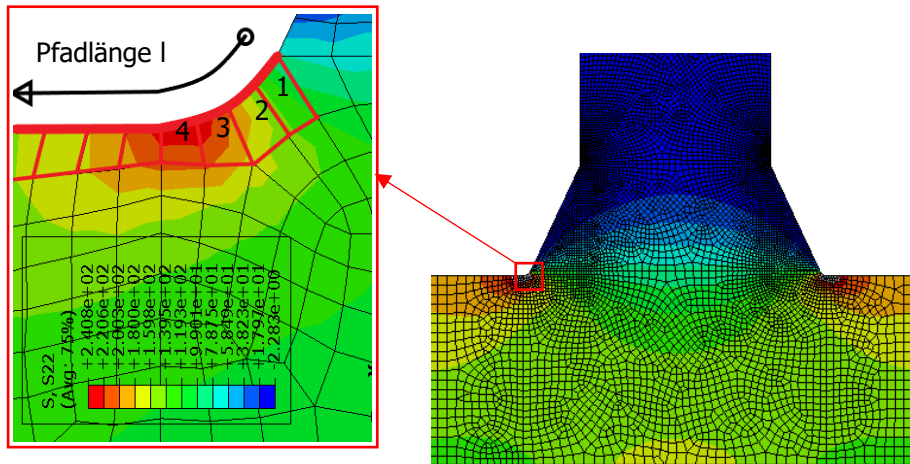


Abb. 15: feine Netzteilung im Bereich der Ausrundung

▪ Darstellung der Spannungen

Die hier dargestellten Spannungen werden beispielhaft, in Form von Diagrammen, am Modell 3 für den Fall $r_f/t = 20$ gezeigt. In den Anhängen A und B sind alle Längs- und Umfangsspannungen für alle Modell-Varianten zum Ringstiefenanschluss und Wanddickensprung zu finden.

Die Spannungen werden entlang der Pfadlänge l dargestellt; dabei werden drei Pfade benötigt, um die Außenspannung, Innenspannung sowie die Membranspannung darzustellen (vgl. Abb. 16). Dabei ist anzumerken, dass der Pfad den Ursprung beim Radius am Anschluss der Ringstiefe zum Rohr hat.

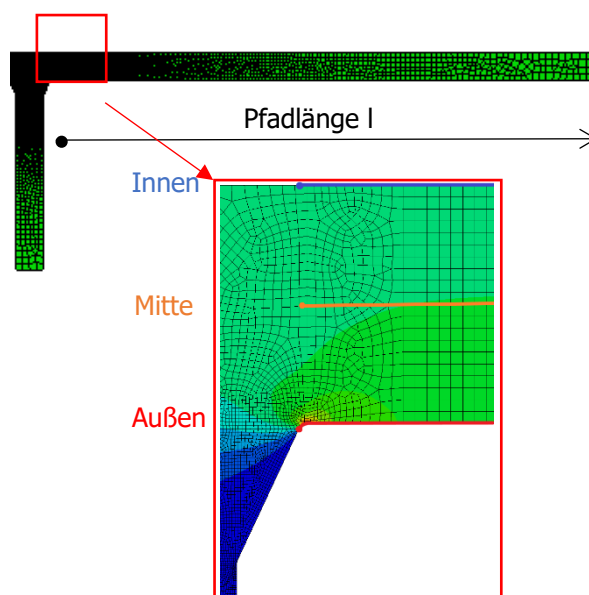


Abb. 16: Darstellung der Struktur- und Kerbspannungen an der Außen- und Innenseite sowie in der Mitte

Das nächste Diagramm 1 zeigt die Längsspannungen entlang der drei Pfade beispielhaft am Modell 3 für den Fall $r_i/t = 20$: Die massive Zunahme der Außenspannung im Bereich der Kerbe ist dabei sehr deutlich zusehen. Aufgrund der Steife entstehen auch Längsbiegespannungen, die über die Länge des Rohres bzw. Pfadlänge schnell wieder auf die Nennspannung von 100 N/mm^2 abklingen.

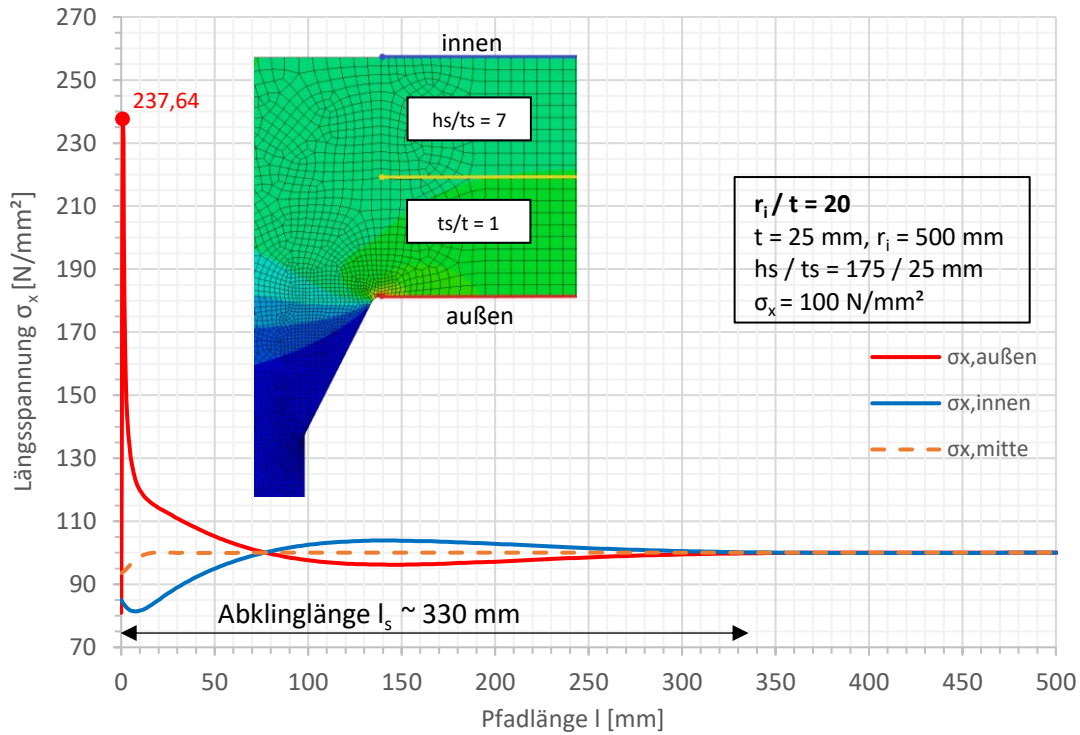


Diagramm 1: Darstellung der Längsspannungen entlang der drei Pfade am Modell 3 (vgl. Tabelle 5)

Das Diagramm 2 zeigt dabei die dazugehörigen Umfangsspannungen: Auch hier wird eine massive Zunahme der Außenumfangsspannung verzeichnet. Die entstandenen Biegespannungen in Umfangsrichtung φ klingen auch hier über die Pfadlänge schnell wieder ab. Die Umfangsspannungen sind im Vergleich zu den Längsspannungen vernachlässigbar klein (vgl. auch Diagramm 3).

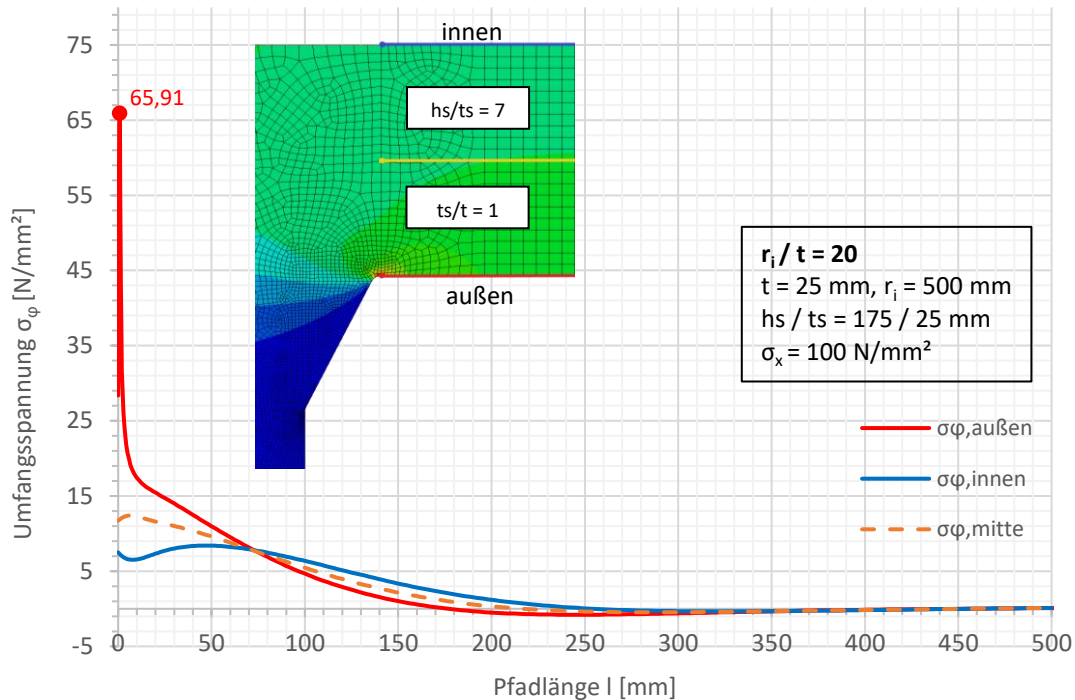


Diagramm 2: Darstellung der Umfangsspannungen entlang der drei Pfade am Modell 3 (vgl. Tabelle 5)

Im Diagramm 3 ist der Verlauf der beiden Außenspannungen (Längsspannung und Umfangsspannung) sowie der Wert an der Kerbe gemeinsam abgebildet:

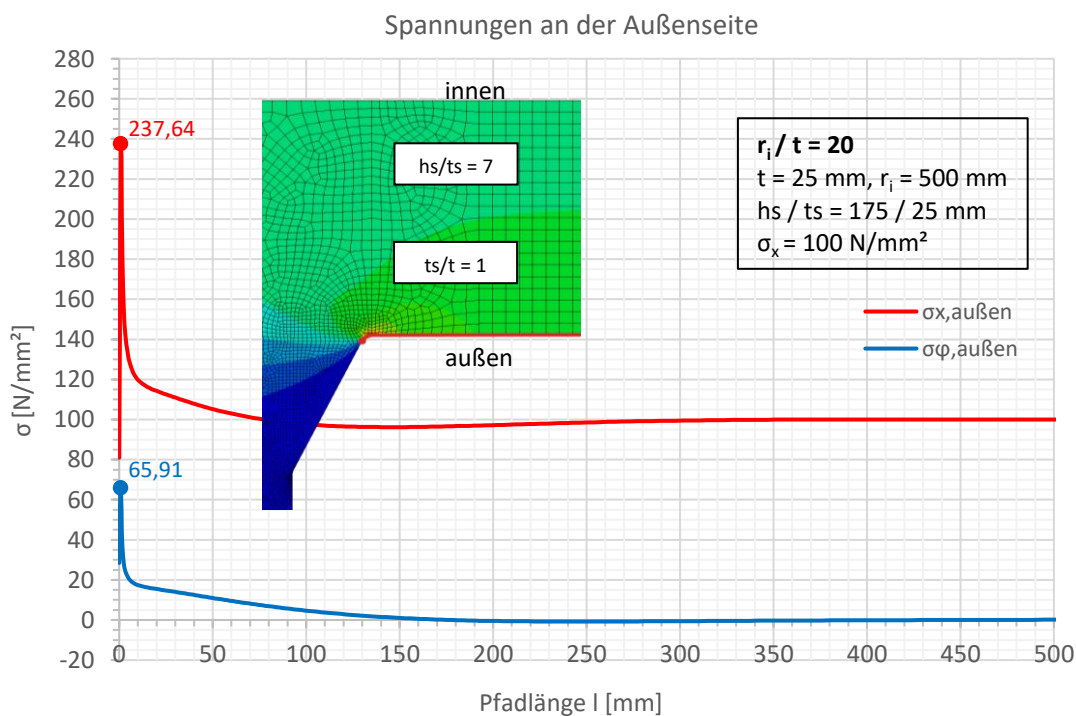


Diagramm 3: Darstellung der Außenspannungen (Längs- und Umfangsspannungen) am Modell 3 (vgl. Tabelle 5)

▪ **Extrapolation der Strukturspannung**

Um die Strukturspannung am maßgebenden Punkt (hot spot) zu ermitteln und den spannungserhöhenden Einfluss der Kerbe am Schweißnahtübergang auszuschließen, kommt die Extrapolation der Strukturspannung (vgl. Diagramm 4) zum Einsatz. Die Extrapolation der Strukturspannung erfolgte bei jedem Modell linear.

Eine andere Variante ist die quadratische Extrapolation. Um zu sehen, ob ein Unterschied zwischen diesen beiden Extrapolationsvorschriften vorliegt, wurde beim Detail Wanddickensprung ein Modell als Beispiel herangezogen, woran beide Vorschriften angewendet wurden. Mehr dazu ist in Kapitel 4.2 Detail 2 – Wanddickensprung zu finden.

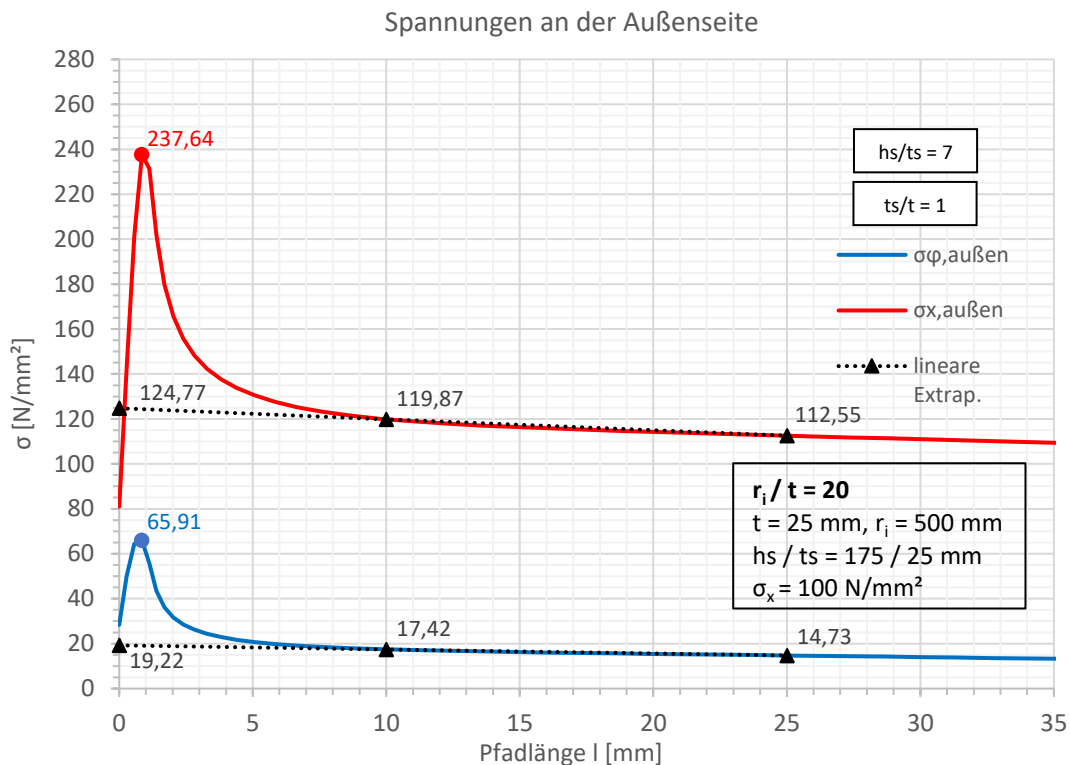


Diagramm 4: lineare Extrapolation der Strukturspannung

Der Spannungskonzentrationsfaktor ergibt sich aus:

$$k_f = \frac{\sigma_{HS,Struktur}}{\sigma_{Nenn}} \quad \dots \text{ Strukturspannungsfaktor}$$

$$k_t = \frac{\sigma_{HS,Kerb}}{\sigma_{Nenn}} \quad \dots \text{ Kerbspannungsfaktor}$$

mit $\sigma_{Nenn} = 100 \text{ N/mm}^2$.

Hier ergibt sich beispielsweise: (vgl. Diagramm 4)

- Für die Längsspannungen

$$k_{f,x} = \frac{124.8}{100} = 1.25$$

$$k_{t,x} = \frac{237.6}{100} = 2.38$$

- Für die Umfangsspannungen

$$k_{f,\phi} = \frac{19.22}{100} = 0.19$$

$$k_{t,\phi} = \frac{65.9}{100} = 0.66$$

4.1.2. Ergebnisse für Wanddicke $t = 25 \text{ mm}$ mit Nahtaufweitung

Anzumerken ist, dass in diesem gesamten Kapitel 4. nur die Spannungskonzentrationsfaktoren nach dem Strukturspannungskonzept aufbereitet wurden und die nach dem Kerbspannungskonzept erst im nächsten Kapitel 5 „Vergleich der Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept“ tabelliert sind.

Im nachfolgenden Diagramm 5 sind die Strukturspannungsfaktoren für den Ringsteifenanschluss mit einer Wanddicke $t = 25 \text{ mm}$ und Nahtaufweitung (vgl. Abb. 10) abgebildet. Die numerischen Berechnungen zu den dargestellten Fällen in den nächsten Diagrammen sind detailliert im Anhang A: Ringsteifenanschluss zu finden.

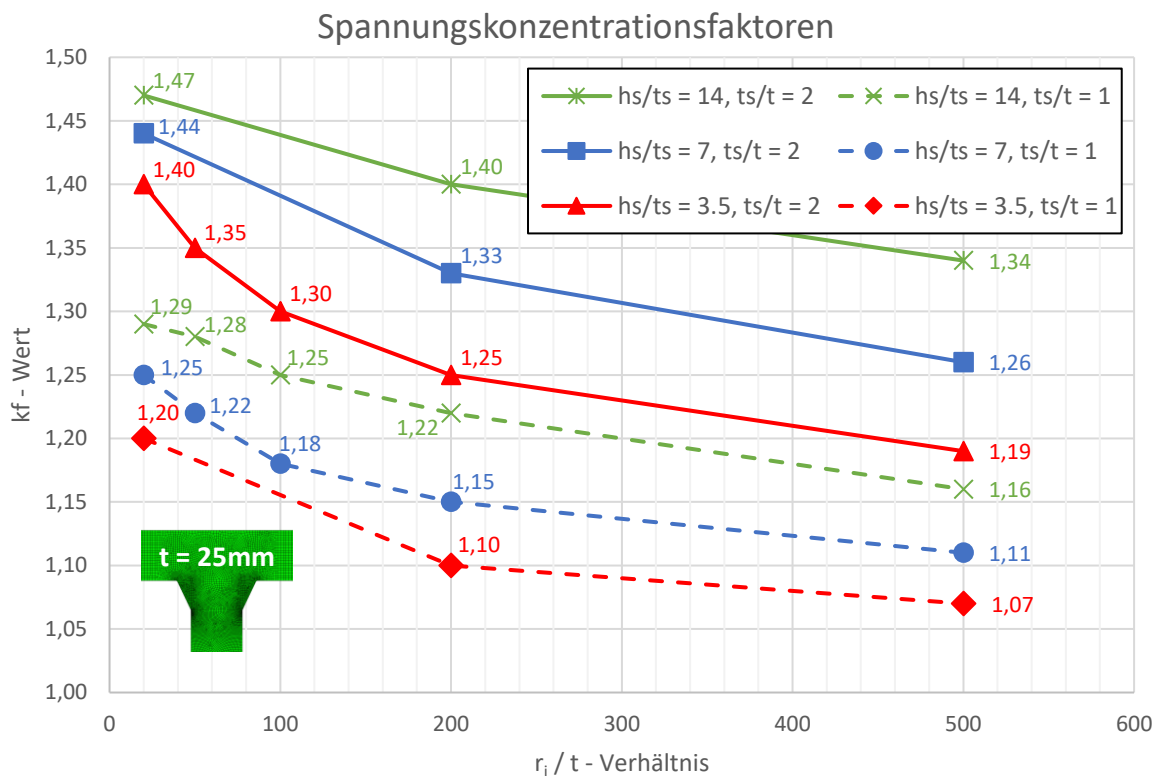


Diagramm 5: Spannungskonzentrationsfaktoren für Ringsteifenanschluss mit Wanddicke $t = 25 \text{ mm}$ und Nahtaufweitung (Strukturspannungen)

Die strichlierten Linien im obigen Diagramm 5 stellen die Steifenhöhe / Steifendicke – Verhältnisse (h_s/t_s) in Abhängigkeit vom Steifendicke / Wanddicke – Verhältnis $t_s/t=1$ dar. Die vollen Linien stellen dabei die h_s/t_s -Verhältnisse in Abhängigkeit vom Verhältnis $t_s/t = 2$ dar.

Betrachtet man nur die Steifengeometrie, also die strichlierten und vollen Linien getrennt voneinander, sieht man, dass bei Zunahme der Steifengröße h_s/t_s auch die Strukturspannung zunimmt. Dies kann dadurch begründet werden, dass der Materialwiderstand bzw. die Dehnungsbehinderung im Bereich der Kerbe durch die höhere Steife größer wird und deshalb die Spannungen zunehmen.

Den größeren Einfluss auf die Strukturspannungen hat jedoch, wie zu erkennen ist, das Steifendicke/Wanddicke – Verhältnis.

Es ist auch zu erkennen, dass die Spannungen bei größerem Radius abnehmen. Das r_i/t -Verhältnis 500 spiegelt hierbei, wie schon erwähnt, nahezu den ebenen Fall wider.

4.1.3. Ergebnisse für Wanddicke $t = 25 \text{ mm}$ ohne Nahtaufweitung

Im nachfolgenden Diagramm 6 sind die Spannungskonzentrationsfaktoren nach dem Strukturspannungskonzept für den Ringstiftenanschluss mit einer Wanddicke $t = 25 \text{ mm}$ ohne Nahtaufweitung (vgl. Abb. 10) abgebildet.

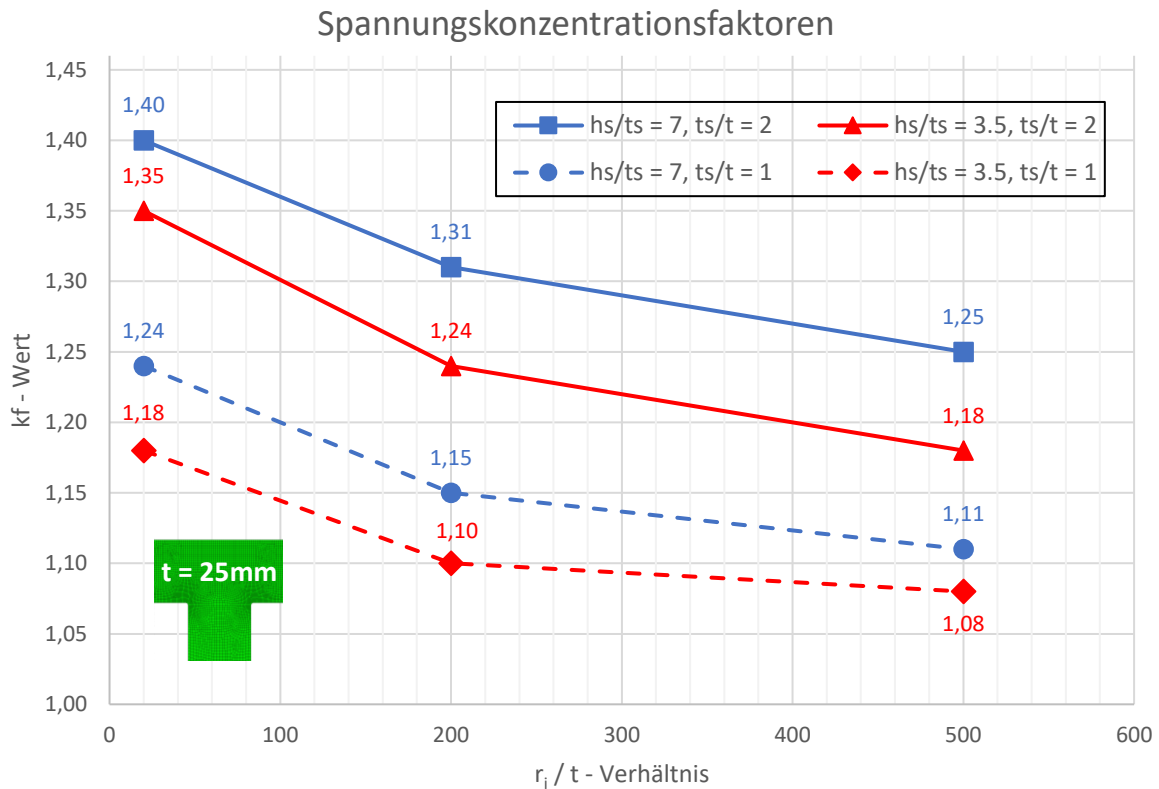


Diagramm 6: Spannungskonzentrationsfaktoren für Ringstiftenanschluss mit Wanddicke $t = 25 \text{ mm}$ ohne Nahtaufweitung (Strukturspannungen)

Vergleicht man die Spannungskonzentrationsfaktoren aus dem obigen Diagramm 6 mit denen aus Diagramm 5, zeigt sich, dass es einen vernachlässigbar kleinen Unterschied beim Strukturspannungskonzept macht, ob man die Nahtaufweitung beim FE-Modell berücksichtigt oder nicht. Dies ist auch der Grund, wieso die weiteren Modellvarianten $t = 50 \text{ mm}$ und $t = 75 \text{ mm}$ ohne Nahtaufweitung berechnet wurden.

Es ist aber zu beachten, dass dies nicht für das Kerbspannungskonzept gilt. Hier macht es sehr wohl einen Unterschied, ob man die Nahtaufweitung bei der Berechnung berücksichtigt oder nicht. Die Diagramme 7 und 8 auf der nächsten Seite geben Aufschluss darüber, inwiefern die Nahtaufweitung das Kerbspannungskonzept beeinflusst.

4.1.4. Vergleich mit und ohne Nahtaufweitung

Die nachfolgenden Diagramme 7 und 8 vergleichen hierbei anhand von zwei Beispielen die Spannungskonzentrationsfaktoren des Kerbspannungs- und Strukturspannungskonzeptes mit und ohne Nahtaufweitung. Die Geometrie der Ringsteife ist den Diagrammen zu entnehmen. Die strichlierten Linien stellen dabei die Kerbspannungsfaktoren und die vollen Linien die Strukturspannungsfaktoren dar.

Wie man erkennen kann, erhöht sich die Kerbspannung beim Ringsteifenanschluss mit Nahtaufweitung maximal um 12% (vgl. Diagramm 7) bzw. 13% (vgl. Diagramm 8) im Vergleich zum Ringsteifenanschluss ohne Nahtaufweitung, während die Strukturspannung nahezu gleichbleibt. Die blauen Linien mit dreiecksförmigen Icons stellen die Ringsteife mit Nahtaufweitung und die roten Linien mit kreisförmigen Icons die Ringsteife ohne Nahtaufweitung dar.

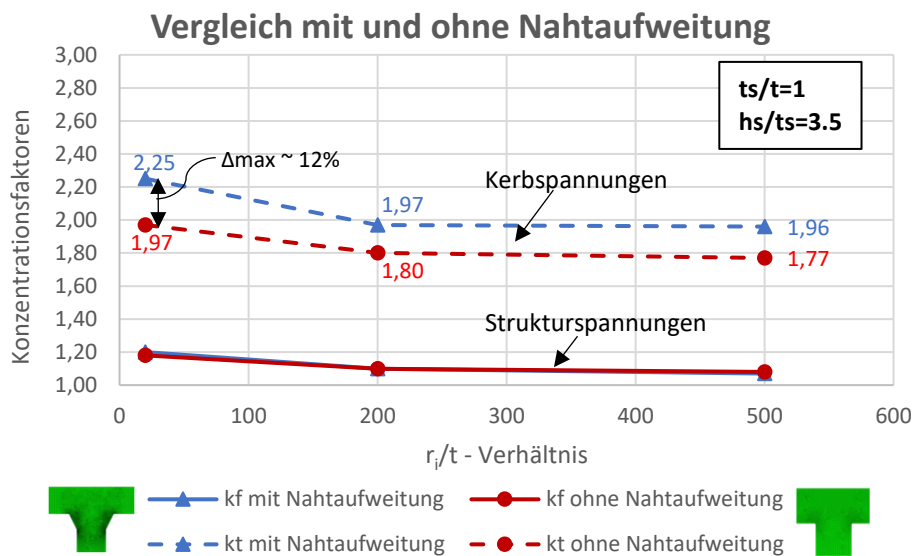


Diagramm 7: Einfluss der Nahtaufweitung auf das Kerbspannungskonzept mit $t_s/t = 1$ und $h_s/t_s = 3.5$

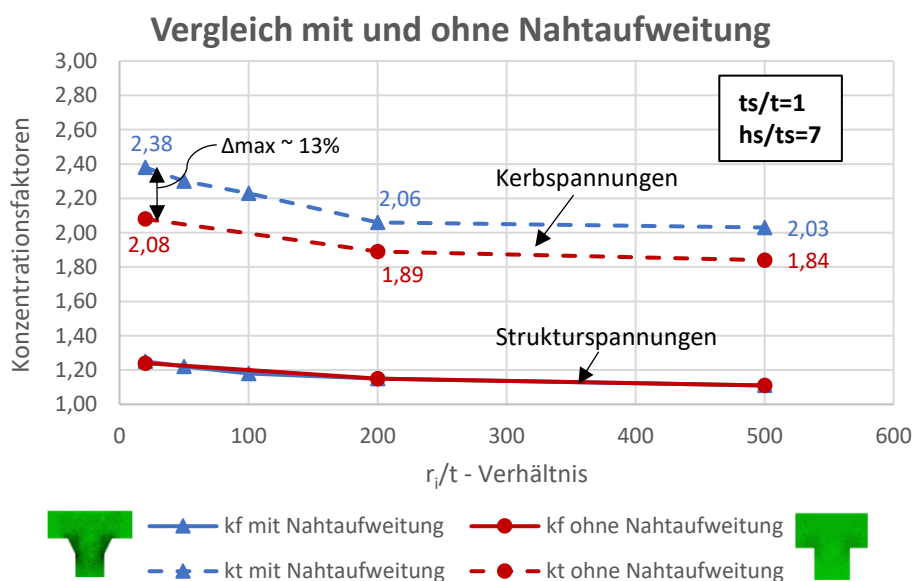


Diagramm 8: Einfluss der Nahtaufweitung auf das Kerbspannungskonzept mit $t_s/t = 1$ und $h_s/t_s = 7$

4.1.5. Ergebnisse für Wanddicke $t = 50 \text{ mm}$

Das folgende Diagramm 9 zeigt die Spannungskonzentrationsfaktoren für den Ringsteifenanschluss mit einer Wanddicke $t = 50 \text{ mm}$. Die Geometrieverhältnisse h_s/t_s und t_s/t bleiben dabei gleich wie bei der Wanddicke $t = 25 \text{ mm}$. Das heißt einfach gesagt: Die Modelle der Wanddicke $t = 25 \text{ mm}$ werden um den Faktor zwei skaliert, um einen möglichen Blechdickeneffekt zu untersuchen.

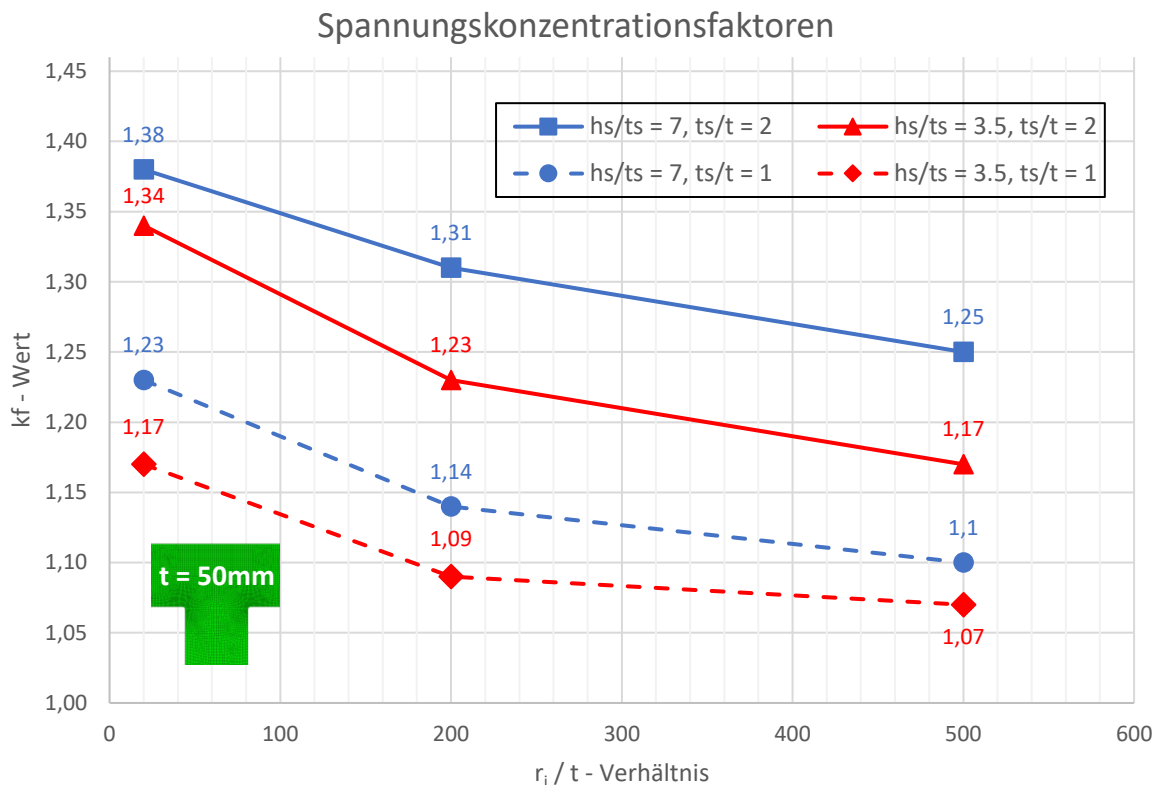


Diagramm 9: Spannungskonzentrationsfaktoren für Ringsteifenanschluss mit Wanddicke $t = 50 \text{ mm}$ ohne Nahtaufweitung (Strukturspannungen)

Vergleicht man die Ergebnisse der Spannungskonzentrationsfaktoren aus Diagramm 9 ($t = 50 \text{ mm}$) mit jenen aus Diagramm 6 ($t = 25 \text{ mm}$) sind nur minimale Unterschiede der Strukturspannung zu verzeichnen. Um genaueren Aufschluss darüber zu erhalten, werden zunächst noch die Ergebnisse für die Wanddicke $t = 75 \text{ mm}$ im nächsten Unterkapitel zusammengefasst und danach anhand von drei Modellen mit den Wanddicken $t = 25 \text{ mm}$, $t = 50 \text{ mm}$, $t = 75 \text{ mm}$, welche die gleichen Geometrieverhältnisse (h_s, t_s) aufweisen, verglichen. Die Ergebnisse der Kerbspannungsfaktoren aller berechneten Modelle sind in Kapitel 5 „Vergleich der Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept“ in Form von Tabellen abgebildet.

4.1.6. Ergebnisse für Wanddicke $t = 75 \text{ mm}$

Das folgende Diagramm 10 zeigt die Spannungskonzentrationsfaktoren für den Ringsteifenanschluss mit einer Wanddicke $t = 75 \text{ mm}$ und gleichen Geometrieverhältnissen t_s/t und h_s/t_s wie bei $t = 25 \text{ mm}$ und $t = 50 \text{ mm}$. Dadurch sind diese Modelle miteinander sehr gut vergleichbar.

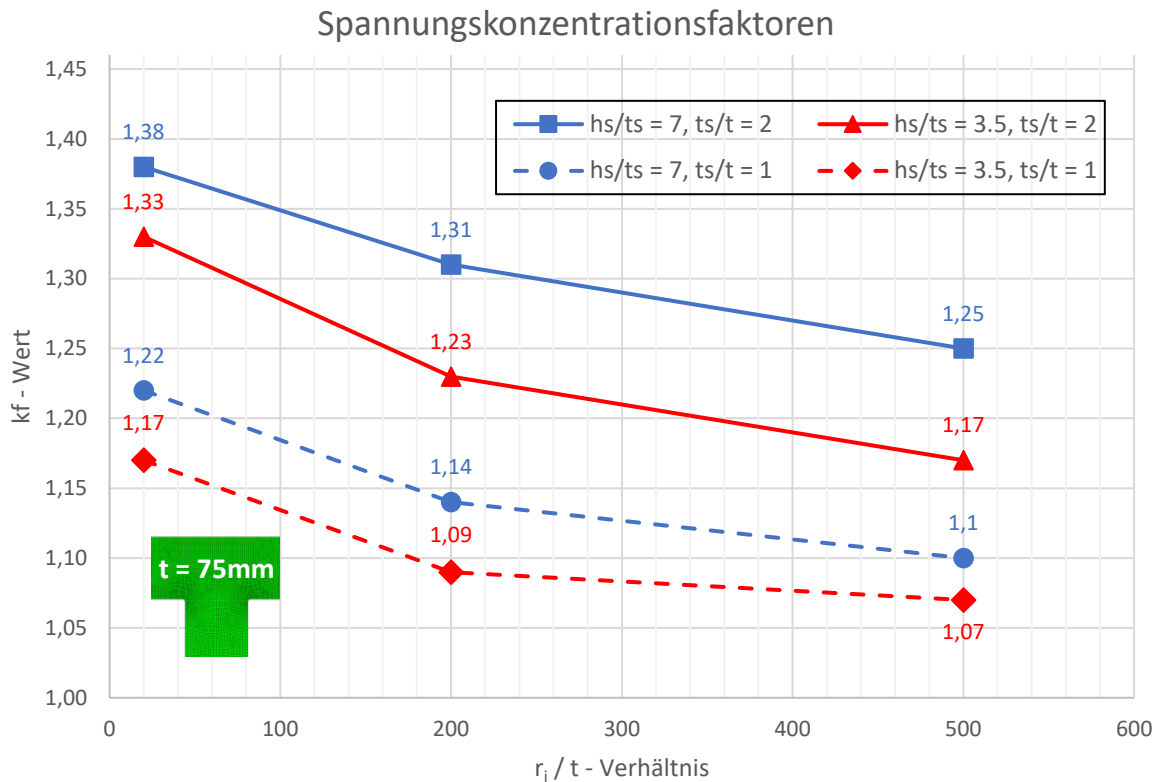


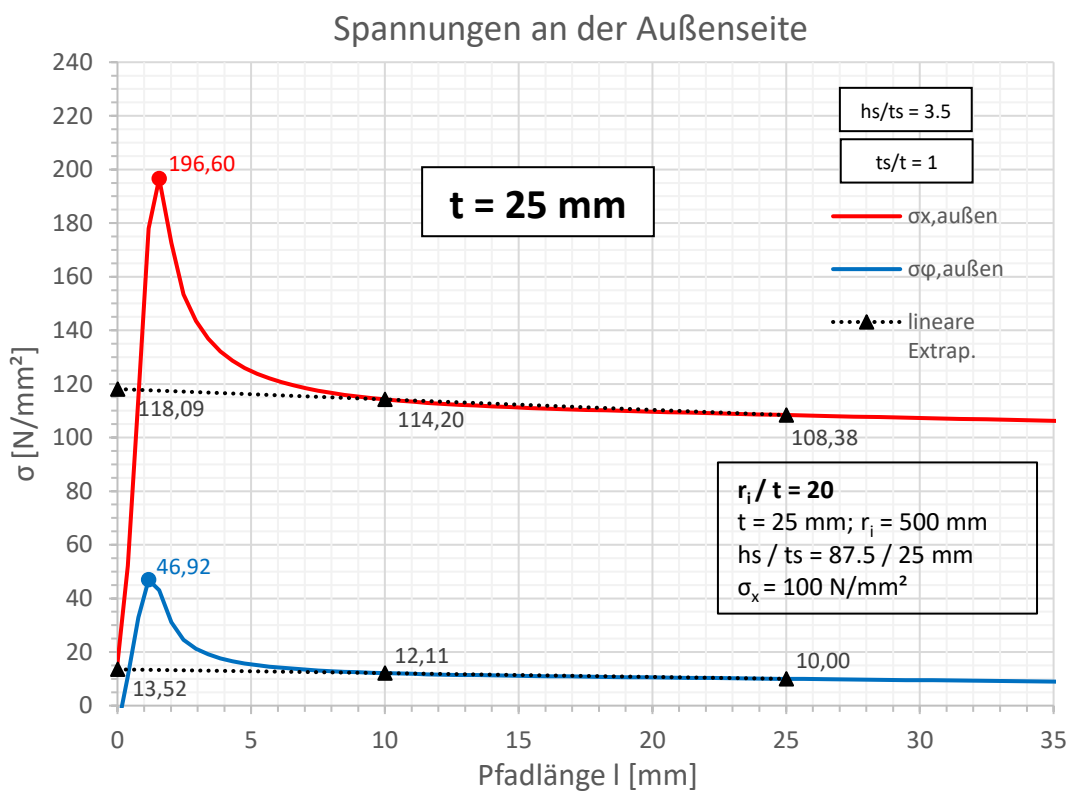
Diagramm 10: Spannungskonzentrationsfaktoren für Ringsteifenanschluss mit Wanddicke $t = 75 \text{ mm}$ ohne Nahtaufweitung (Strukturspannungen)

Auch hierbei treten minimale bis keine Unterschiede beim Strukturspannungskonzept auf (vgl. Diagramm 6, Diagramm 9 und Diagramm 10). Interessant wird es beim Kerbspannungskonzept. Im nächsten Unterkapitel, in den nächsten zwei Seiten, zeigt sich, dass die Kerbspannung mit zunehmender Wanddicke t zunimmt, während die Strukturspannung annähernd gleich bleibt (vgl. Diagramm 11, Diagramm 12 und Diagramm 13). In diesen Diagrammen ist in Rot die Längsspannung und in Blau die Umfangsspannung mit der zugehörigen linearen Spannungsextrapolation für die Strukturspannung abgebildet.

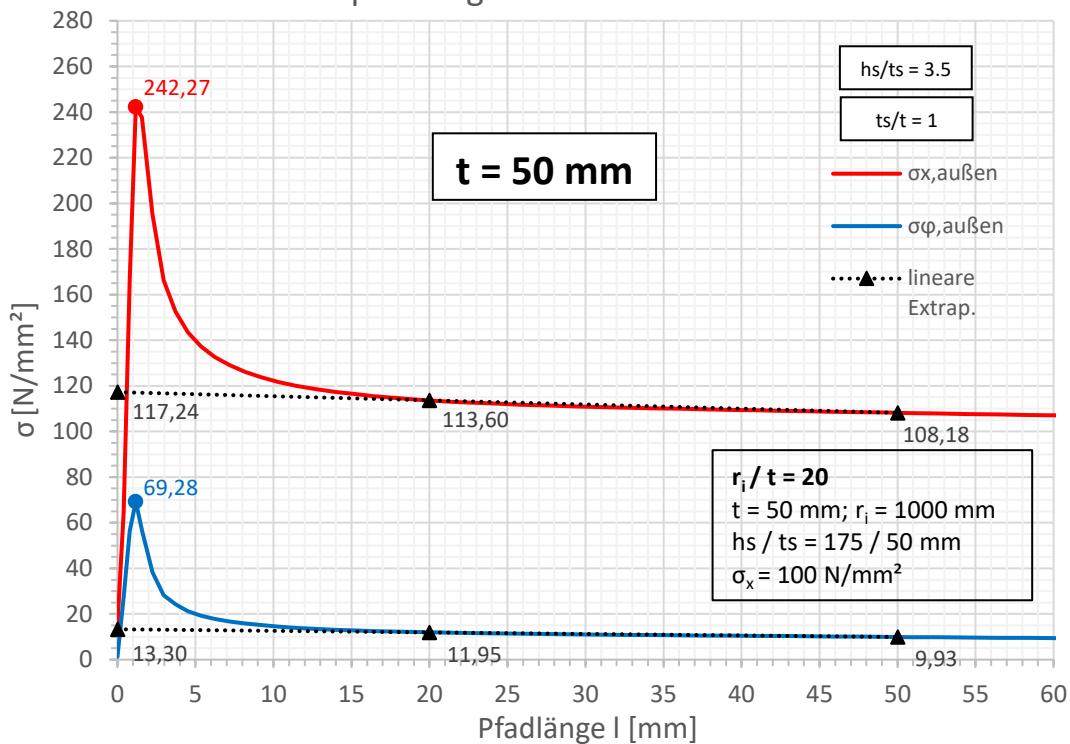
4.1.7. Vergleich Struktur- und Kerbspannungen bei unterschiedlicher Rohrwanddicke t

Wie schon vorhin beschrieben, werden in diesem Kapitel nun anhand eines Beispiels die Struktur- und Kerbspannungen bei unterschiedlicher Rohrwanddicke t verglichen. Die unten angeführten Diagramme 11, 12 und 13 zeigen die Längs- und Umfangsspannungen mit der zugehörigen linearen Spannungsextrapolation für die Strukturspannung für den Fall $h_s/t_s = 3.5$ und $t_s/t = 1$ bei einem r_i/t -Verhältnis von 20. Hierbei wird nur die Rohrwanddicke variiert: In Diagramm 11 sind die Ergebnisse für $t = 25\text{mm}$, in Diagramm 12 für $t = 50\text{mm}$ und in Diagramm 13 die Ergebnisse für $t = 75\text{mm}$ abgebildet.

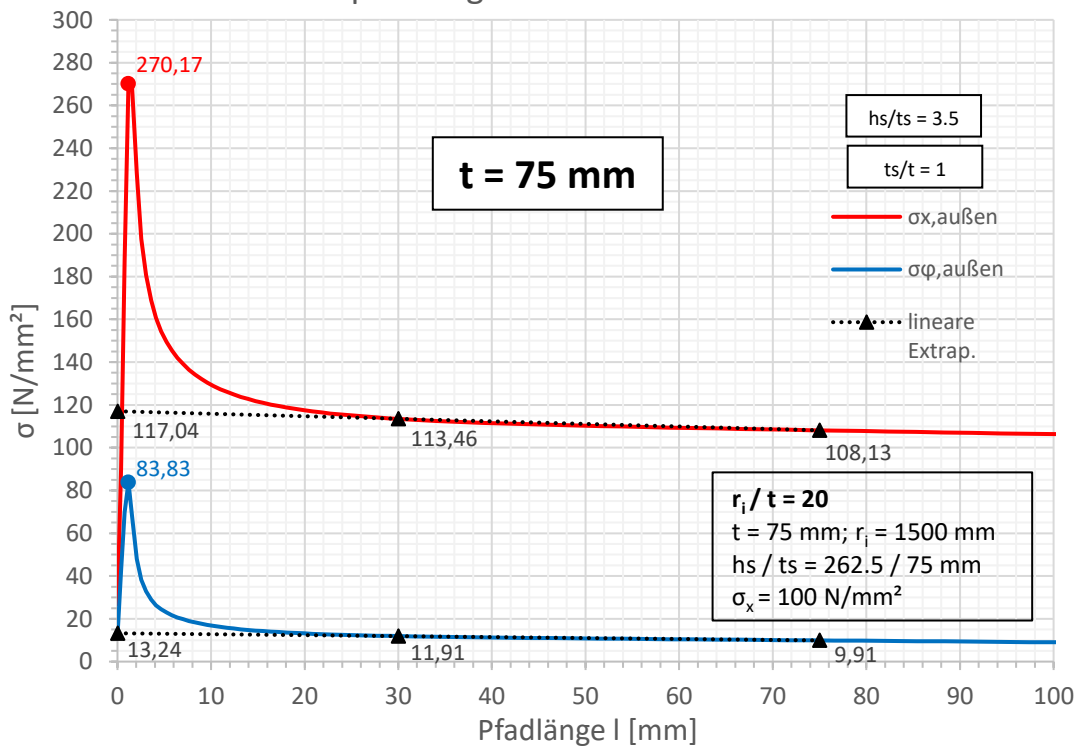
Wie schon erwähnt, bleibt die Strukturspannung bei unterschiedlicher Rohrwanddicke mit 118.09 N/mm^2 bei $t = 25\text{ mm}$ (vgl. Diagramm 11), 117.24 N/mm^2 bei $t = 50\text{ mm}$ (vgl. Diagramm 12) und 117.04 N/mm^2 bei $t = 75\text{ mm}$ (vgl. Diagramm 13) annähernd gleich. Die Kerbspannung hingegen nimmt bei zunehmender Rohrwanddicke mit 196.60 N/mm^2 bei $t = 25\text{ mm}$, 242.27 N/mm^2 bei $t = 50\text{ mm}$ und 270.17 N/mm^2 bei $t = 75\text{ mm}$ erheblich zu. Daher ist ein Erhöhungsfaktor für die Strukturspannung notwendig und sinnvoll. Dieser wird meist mit $\frac{1}{(\frac{25}{t})^{0.2}}$ angegeben.



Spannungen an der Außenseite


 Diagramm 12: Struktur- und Kerbspannungen am Modell 11 ($t = 50 \text{ mm}$, $h_s/t_s = 3.5$; $t_s/t = 1$)

Spannungen an der Außenseite


 Diagramm 13: Struktur- und Kerbspannungen am Modell 15 ($t = 75 \text{ mm}$, $h_s/t_s = 3.5$; $t_s/t = 1$)

4.2. Detail 2 – Wanddickensprung

4.2.1. FE-Modell im Überblick

- Allgemein

Zur Modellierung und Berechnung der Druckrohrleitungen mit Wanddickensprung wurde ebenfalls das FE-Programm Abaqus v6.14 [5] eingesetzt. Auch hier ist es möglich, durch das Ausnutzen der Rotationssymmetrie des Rohres, das Rohr 2D mit axialsymmetrischen Elementen zu berechnen (siehe Abb. 17, Abb. 18), was die Berechnung um ein Vielfaches schneller macht und die Eingabe der Geometrie um einiges erleichtert. Das Rohr wird dabei mit einer Längsspannung, wie bei der Ringsteife, von 100 N/mm² beansprucht.

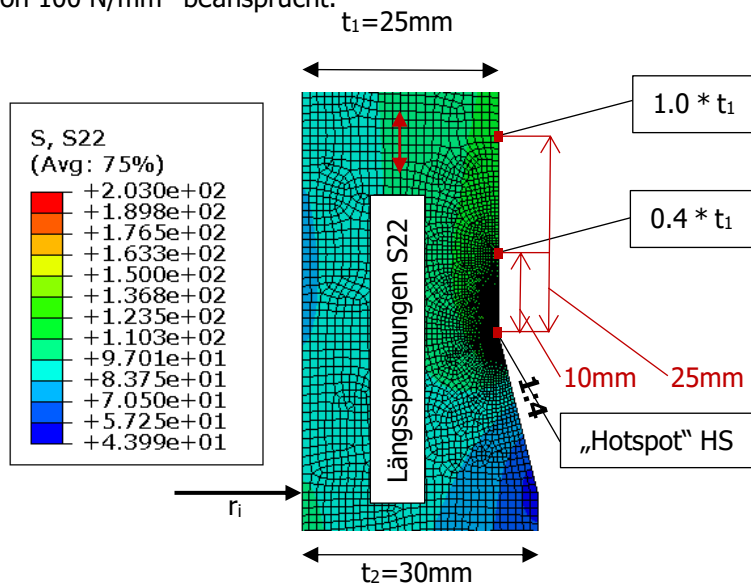


Abb. 17: Ermittlung der Struktur- und Kerbspannung am „Hotspot“ HS für Längsspannungen für Modell 1 Wanddickensprung (vgl. Tabelle 4)

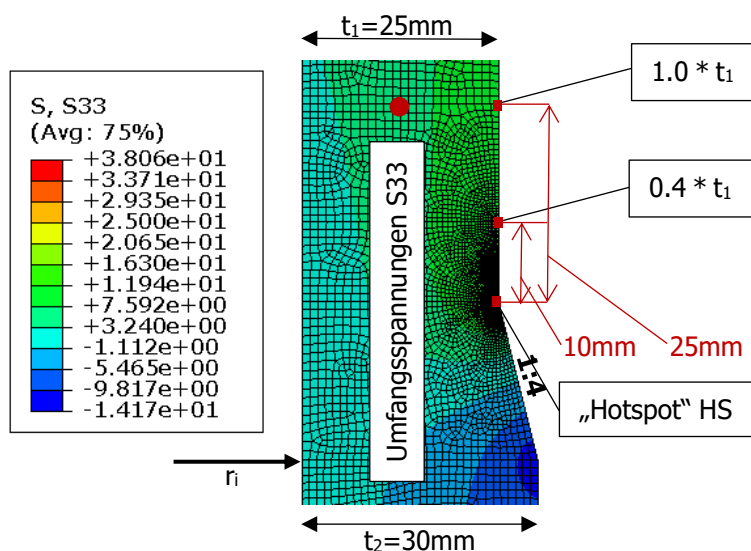


Abb. 18: Ermittlung der Struktur- und Kerbspannung am „Hotspot“ HS für Umfangsspannungen für Modell 1 Wanddickensprung (vgl. Tabelle 4)

Beispielhaft werden in Abb. 17 und Abb. 18 das FE-Modell, die Extrapolationspunkte für die Strukturspannung und die Spannungsplots der FE-Berechnung gezeigt. Die Geometrie ist der Abb. 17 bzw. Abb. 18 zu entnehmen. Die Abb. 17 zeigt dabei die Längsspannungen; die Abb. 18 die Umfangsspannungen des Details Wanddickensprung.

Das Erstellen des FE-Modells wurde schon anhand des Details Ringsteifenanschluss beschrieben, weshalb beim Detail Wanddickensprung nicht näher darauf eingegangen wird. Die feine Netzteilung an der Ausrundung, die Materialeigenschaften, Randbedingungen, sowie die Spannungsextrapolation der Strukturspannung bleiben dieselben wie beim Ringsteifenanschluss. In diesem Kapitel werden die quadratische und die lineare Spannungsextrapolation verglichen und die Ergebnisse der numerischen Berechnungen graphisch dargestellt und erläutert. Die detaillierten Ergebnisse aller numerischen Berechnungen zum Wanddickensprung sind im Anhang B abgebildet.

4.2.2. Vergleich quadratische und lineare Spannungsextrapolation

Wie schon am Anfang erwähnt, gibt es zwei Vorschriften die Spannungsextrapolation der Strukturspannung durchzuführen: die lineare und quadratische Spannungsextrapolation. Um diese beiden Extrapolationsvorschriften zu vergleichen wurden drei Fälle ($t_2/t_1 = 1.2, 1.5$ und 2.0) beim Wanddickensprung mit jeweils dem kleinsten und größten r_i/t_1 -Verhältnis (20 und 500) näher untersucht. Die Wanddicke t_1 beträgt in diesen Beispielen 25 mm und die Fasenneigung 1:4 (vgl. Tabelle 6).

Dabei wurden nur minimale Erhöhungen bei Anwendung der quadratischen Extrapolation im Vergleich zur linearen Extrapolation (vgl. obige Tabelle 6) festgestellt. Diese Erhöhungen, welche zwischen 0.60% und 1.60% bei diesen Beispielen liegen, nehmen bei steigendem r_i/t_1 -Verhältnis ab. Daraus lässt sich schließen, dass es für die Ermüdungsnachweise keine Bedeutung hat, welche Vorschrift angewendet wird.

Es wurde bei allen weiteren Modellen die lineare Spannungsextrapolation durchgeführt.

Fall	$t_1=25\text{mm}; 1:x=1:4$					
	r_i/t	$\sigma_{hs, lin.}$	k_f	$\sigma_{hs, quad.}$	k_f	$\Delta\sigma_{hs}$
$t_2/t_1 = 1.2$	20	123.20	1.23	124.35	1.24	+0.93%
	500	126.16	1.26	127.04	1.27	+0.70%
$t_2/t_1 = 1.5$	20	140.57	1.41	142.42	1.42	+1.32%
	500	151.91	1.52	152.79	1.53	+0.58%
$t_2/t_1 = 2.0$	20	151.69	1.52	154.17	1.54	+1.63%
	500	176.94	1.77	178.50	1.79	+0.88%

Tabelle 6: Vergleich quadratische und lineare Spannungsextrapolation

4.2.3. Ergebnisse für Wanddicke $t_1 = 25$ mm

In den nächsten Diagrammen Diagramm 14 Diagramm 16 Diagramm 17 werden die Ergebnisse der Strukturspannungsfaktoren vom Wanddickensprung mit der Wanddicke $t_1 = 25$ mm in Abhängigkeit der Fase (1:4, 1:5.5 und 1:10) und dem r_i/t_1 -Verhältnis graphisch dargestellt, wobei die Wanddicken t_2/t_1 konstant gelassen werden. Die Ergebnisse werden im Anschluss verglichen und näher erläutert. Diagramm 14 und Diagramm 15 (Detailausschnitt von Diagramm 14) zeigen dann die gleichen Strukturspannungsfaktoren in Abhängigkeit der Fasen 1:4, 1:5.5, 1:10 und den r_i/t_1 -Verhältnissen, bei einem konstanten t_2/t_1 -Verhältnis = 1.2, Diagramm 16 bei einem t_2/t_1 -Verhältnis = 1.5 und Diagramm 17 zeigt die Ergebnisse bei einem $t_2/t_1 = 2.0$.

▪ **Spannungskonzentrationsfaktoren in Abhängigkeit der Fase und dem r_i/t_1 -Verhältnis:**

Die rote Linie mit quadratischen Icons stellt dabei die Fase 1:4, die blaue Linie mit dreiecksförmigen Icons die Fase 1:5.5 und die orange Linie mit kreisförmigen Icons die Fase 1:10 dar.

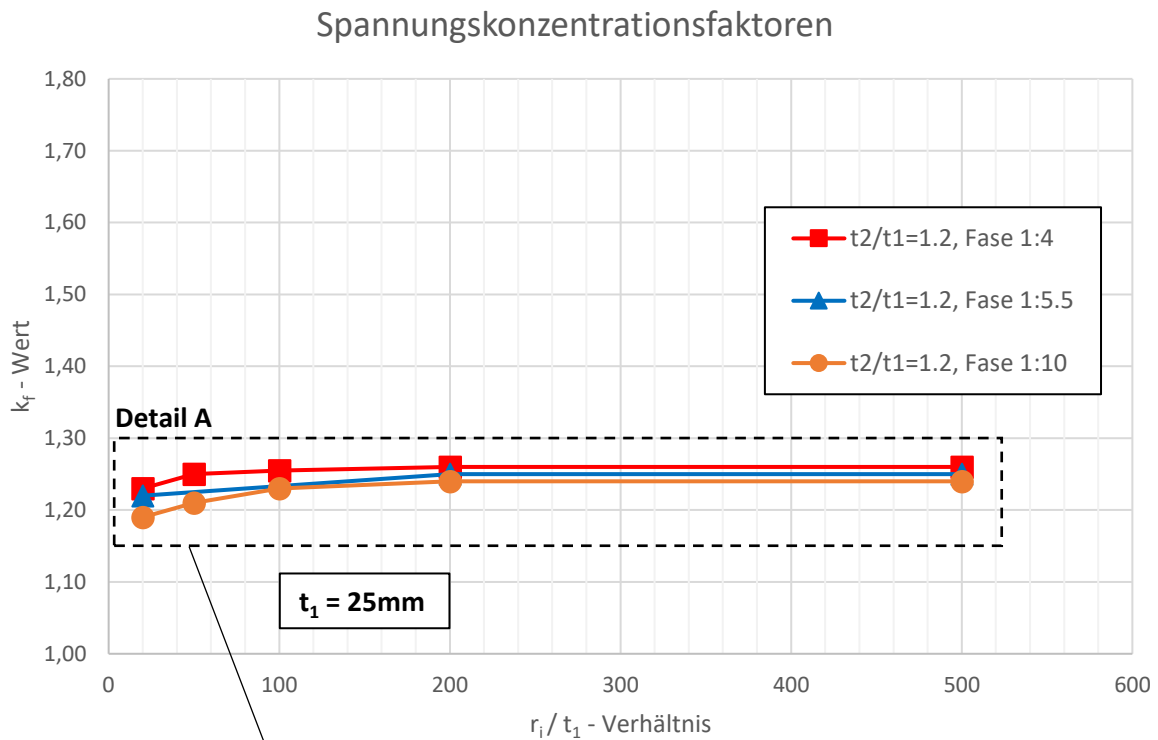


Diagramm 14: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 25 \text{ mm}$ und $t_2/t_1 = 1.2$ in Abhängigkeit der Fase und dem r_i/t_1 -Verhältnis

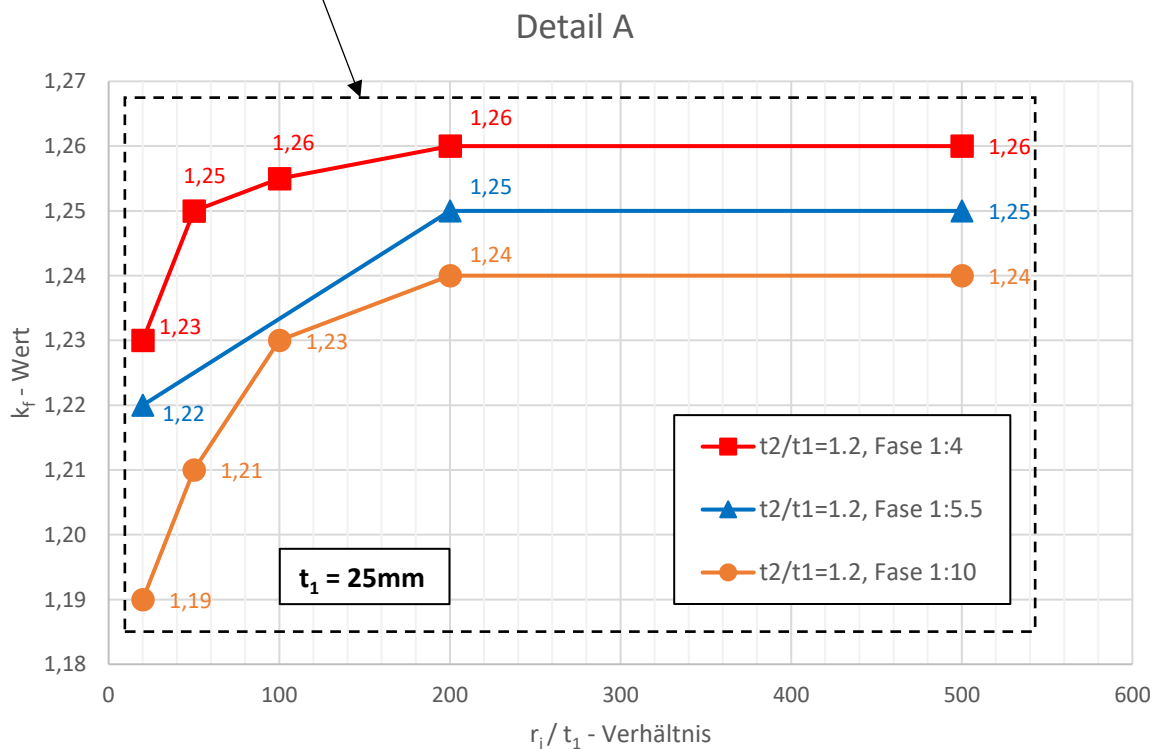


Diagramm 15: Detaillierte Darstellung der Ergebnisse aus Diagramm 14 (Detail A)

Spannungskonzentrationsfaktoren

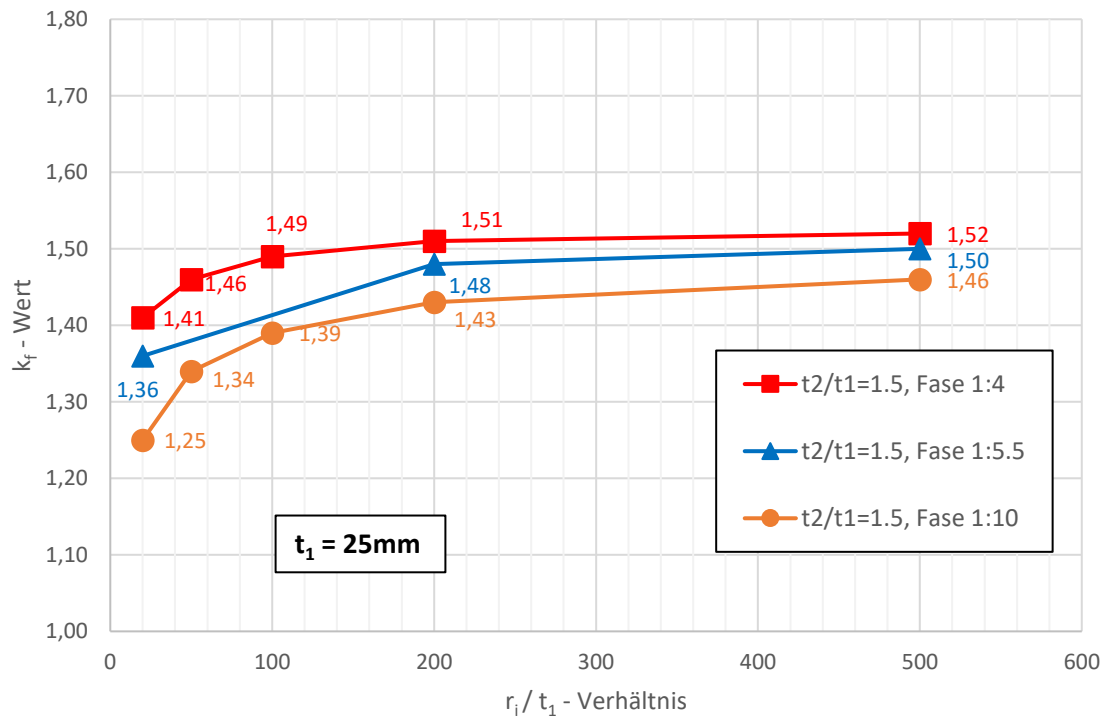


Diagramm 16: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 25 \text{ mm}$ und $t_2/t_1 = 1.5$ in Abhängigkeit der Fase und dem r_i/t_1 -Verhältnis

Spannungskonzentrationsfaktoren

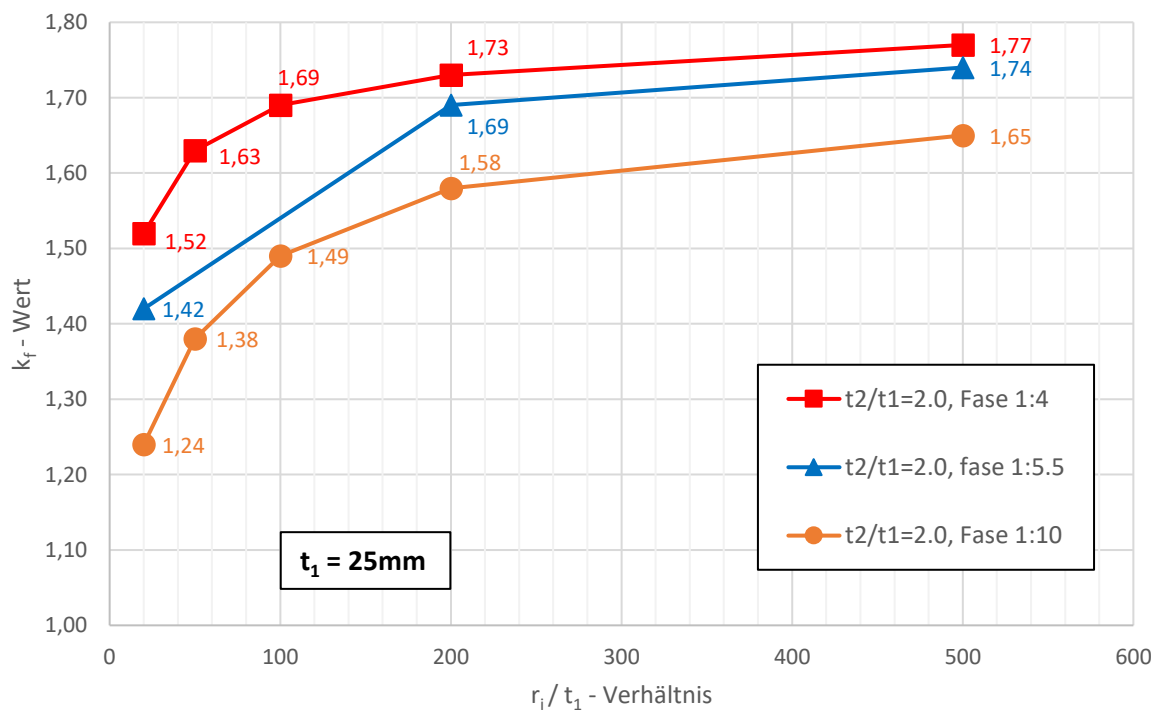


Diagramm 17: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 25 \text{ mm}$ und $t_2/t_1 = 2.0$ in Abhängigkeit der Fase und dem r_i/t_1 -Verhältnis

Betrachtet man Diagramm 14 bzw. Diagramm 15 sieht man, dass die Fase bei einem t_2/t_1 -Verhältnis von 1.20 keinen allzu großen Einfluss auf die Ergebnisse der Strukturspannungen hat. Man bemerkt auch, dass ab einem gewissen r_i/t -Verhältnis ≥ 200 die Spannungen sich nicht mehr verändern und konstant bleiben. Die r_i/t -Verhältnisse ≥ 200 haben bei einem t_2/t_1 -Verhältnis von 1.2 sozusagen keinen Einfluss mehr auf die Strukturspannungen.

Bei steigendem t_2/t_1 -Verhältnis (1.5 und 2.0) nehmen die Spannungskonzentrationsfaktoren deutlich zu und die verschiedenen Fasenneigungen haben einen größeren Einfluss auf die Strukturspannungen (vgl. Diagramm 16 und Diagramm 17) als bei einem t_2/t_1 -Verhältnis von 1.2. Auch hierbei lässt sich verzeichnen, dass ab einem r_i/t -Verhältnis von 200 die Fasen keinen allzu großen Einfluss auf die Ergebnisse der Strukturspannungen mehr haben und abflachen.

Hinzuzufügen ist, dass die Spannungskonzentrationsfaktoren vom Wanddickensprung, im Gegensatz zu jenem vom Ringsteifenanschluss, mit größerem r_i/t_1 -Verhältnis ansteigen.

▪ Spannungskonzentrationsfaktoren in Abhängigkeit vom t_2/t_1 -Verhältnis und dem r_i/t_1 -Verhältnis:

Die folgenden Diagramm 18, Diagramm 19, Diagramm 20 zeigen nun die gleichen Strukturspannungsfaktoren für $t_1 = 25\text{mm}$ in Abhängigkeit vom t_2/t_1 -Verhältnis (1.2, 1.5, 2.0) und dem r_i/t -Verhältnis, wobei hier die drei Fasenneigungen konstant gelassen werden. Die Ergebnisse werden im Anschluss verglichen und näher erläutert. Diagramm 18 zeigt die Strukturspannungen in Abhängigkeit von den t_2/t_1 -Verhältnissen = 1.2, 1.5 und 2.0 und den verschiedenen r_i/t_1 -Verhältnissen, bei einer konstanten Fase 1:4, Diagramm 19 bei einer Fase 1:5.5 und Diagramm 20 zeigt die Ergebnisse bei einer Fase 1:10.

Die rote Linie mit quadratischen Icons stellt dabei das t_2/t_1 -Verhältnis von 1.2, die blaue Linie mit dreiecksförmigen Icons t_2/t_1 -Verhältnis von 1.5 und die orange Linie mit kreisförmigen Icons t_2/t_1 -Verhältnis von 2 dar.

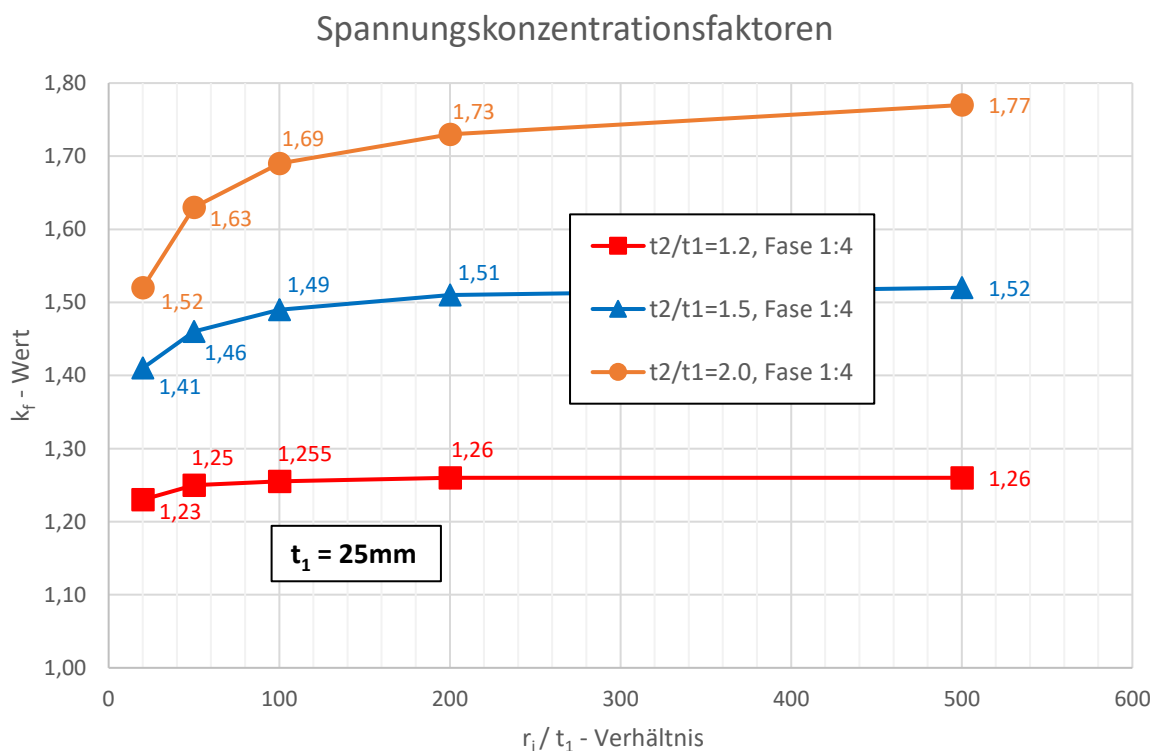


Diagramm 18: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 25\text{ mm}$ und Fase 1:4 in Abhängigkeit vom t_2/t_1 -Verhältnis und r_i/t_1 -Verhältnis

Spannungskonzentrationsfaktoren

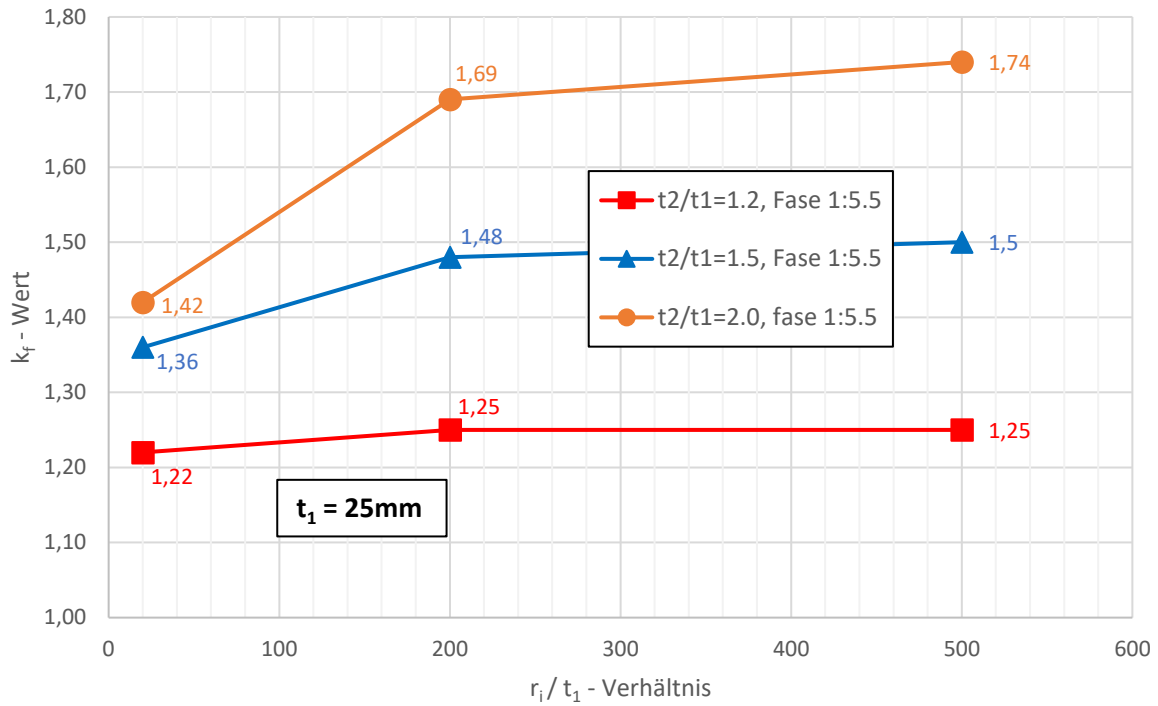


Diagramm 19: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 25\text{ mm}$ und Fase 1:5.5 in Abhängigkeit vom t_2/t_1 -Verhältnis und r_i/t_1 -Verhältnis

Spannungskonzentrationsfaktoren

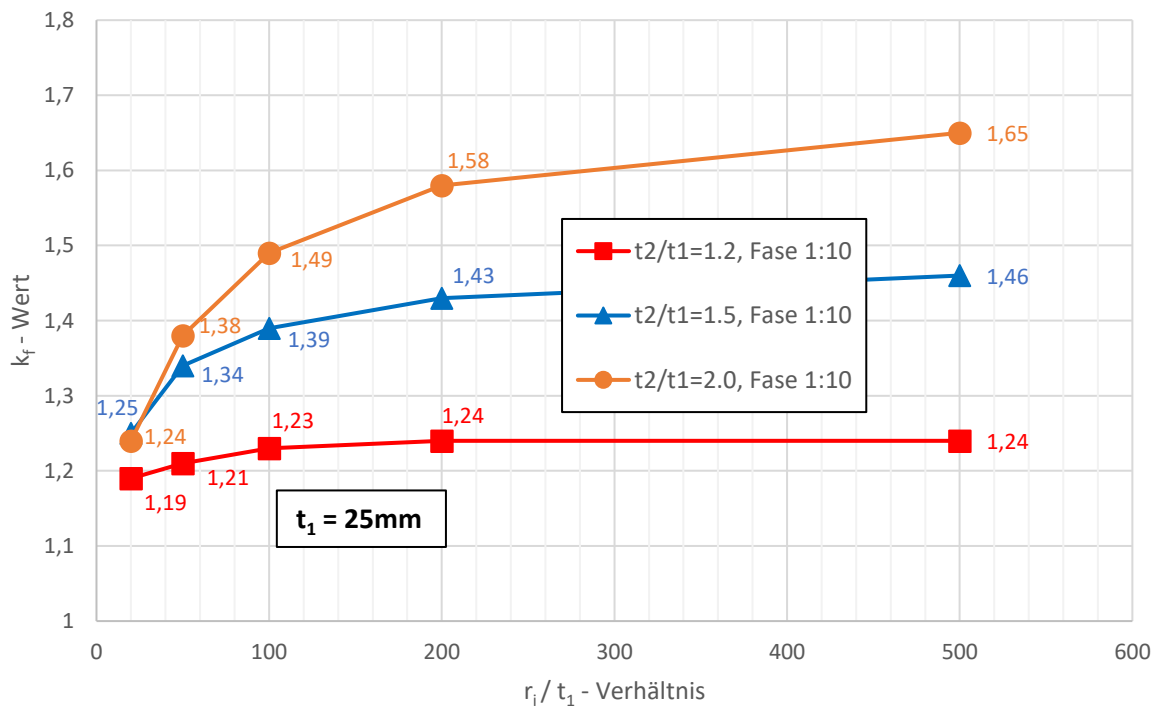


Diagramm 20: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 25\text{ mm}$ und Fase 1:10 in Abhängigkeit vom t_2/t_1 -Verhältnis und r_i/t_1 -Verhältnis

Vergleicht man die obigen Diagramme ist deutlich zu sehen, dass bei einem kleinen r_i/t_1 -Verhältnis von 20 die Faktoren bei einer flachen Fase von 1:10 (vgl. Diagramm 20) interessanterweise nahe beieinander liegen und bei der steilen Fase 1:4 (vgl. Diagramm 18) weiter auseinander gehen. Die Spannungskonzentrationsfaktoren nehmen, wie zu erwarten, bei steiler Fase (1:4) zu. Wie schon erwähnt, haben auf die kleinen Wanddicken-Verhältnisse t_2/t_1 von 1.2 (rote Linien mit quadratischen Icons in den Diagrammen) die r_i/t_1 -Verhältnisse fast keinen Einfluss auf die Strukturspannungen.

4.2.4. Ergebnisse für Wanddicke $t_1 = 50$ mm

Die hier dargestellten Spannungskonzentrationsfaktoren in den Diagramm 21 - Diagramm 27 entsprechen der Tendenz von Wanddicke $t_1 = 25$ mm und werden deshalb nicht näher erläutert. Die Ergebnisse der Spannungskonzentrationsfaktoren nach dem Strukturspannungskonzept für die Wanddicke $t_1 = 50$ mm werden gleich dargestellt wie im zuvor beschriebenen Kapitel für die Ergebnisse $t_1 = 25$ mm und sind exakt dieselben. Die Rohrwanddicke t_1 hat also keinen Einfluss auf die Strukturspannungen.

- Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren in Abhängigkeit der Fase und dem r_i/t_1 -Verhältnis:

Spannungskonzentrationsfaktoren

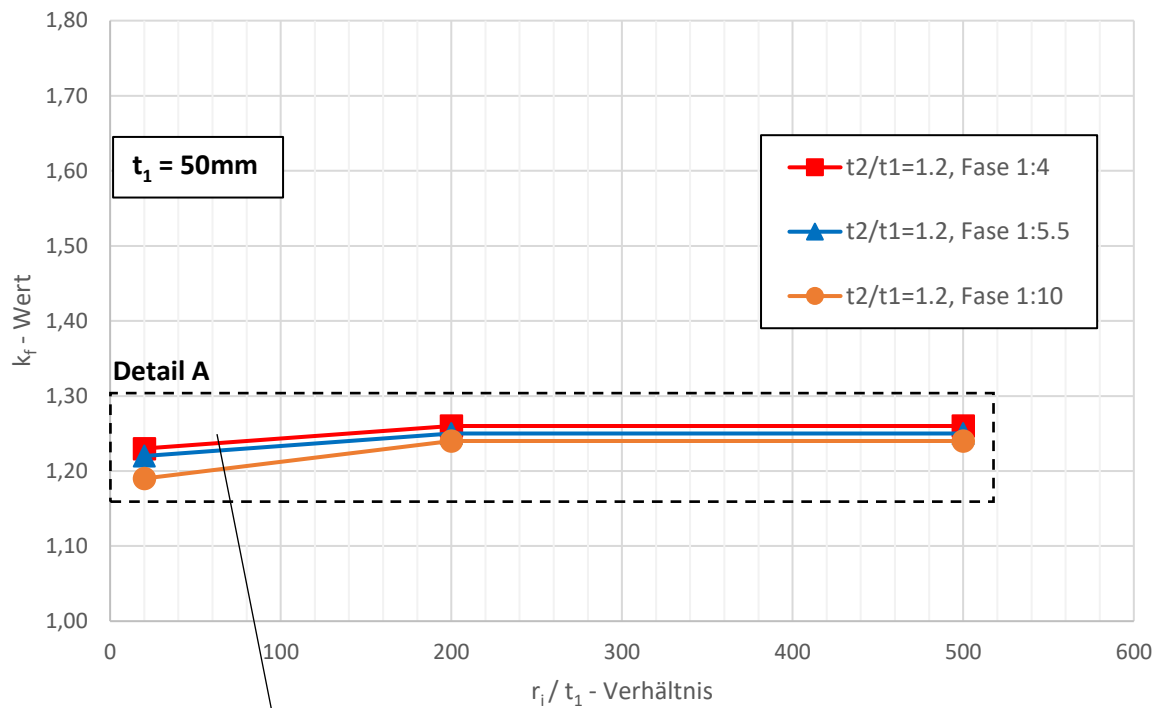


Diagramm 21: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 50 \text{ mm}$ und $t_2/t_1 = 1.2$ in Abhängigkeit der Fase und dem r_i/t_1 -Verhältnis

Detail A

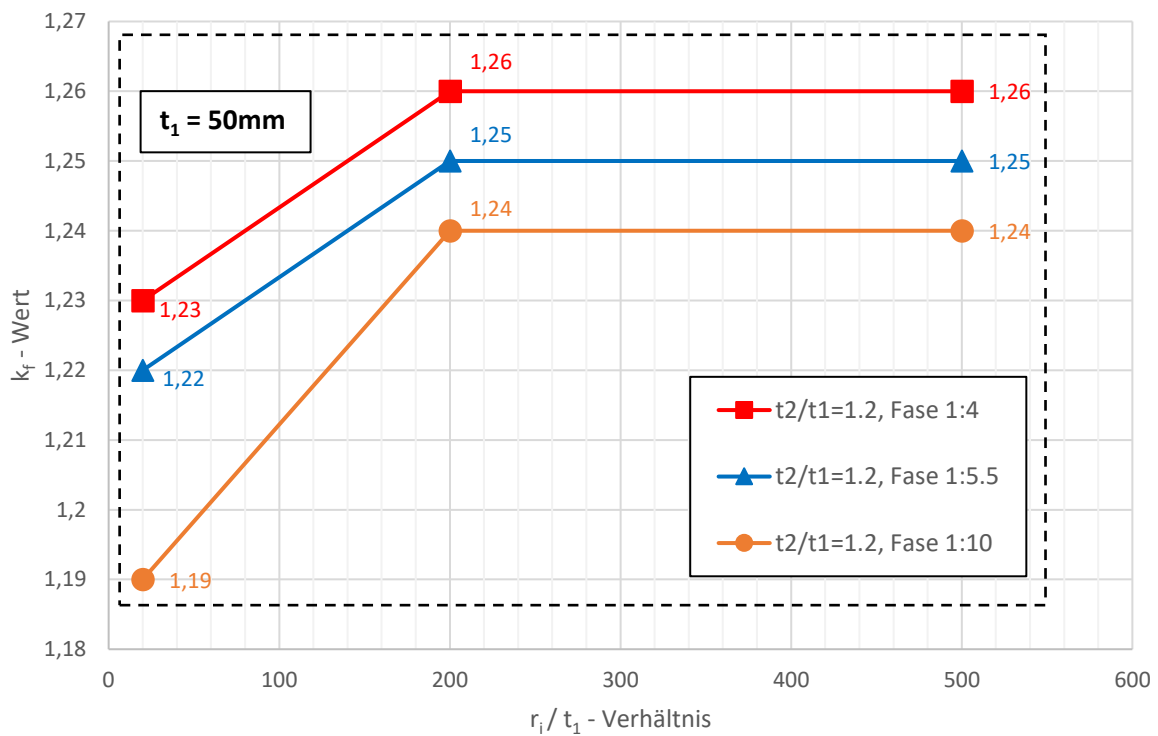


Diagramm 22: Detaillierte Darstellung der Ergebnisse aus Diagramm 21 (Detail A)

Spannungskonzentrationsfaktoren

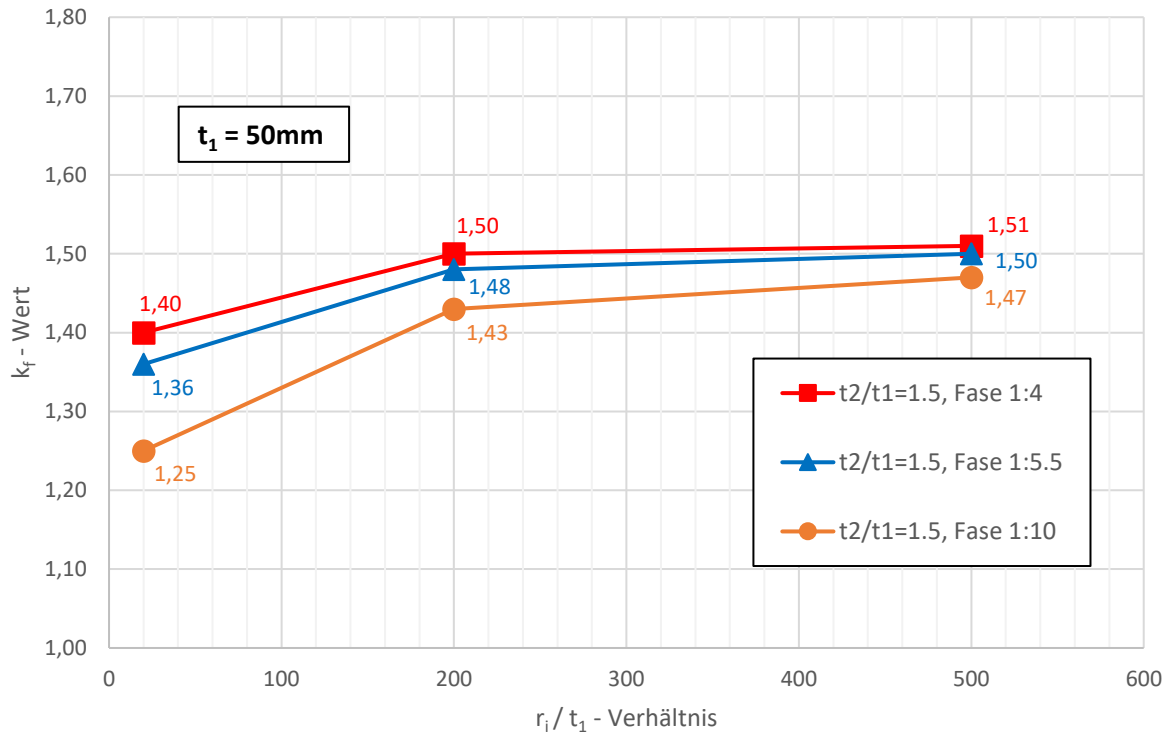


Diagramm 23: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 50$ mm und $t_2/t_1 = 1.5$ in Abhängigkeit der Fase und dem r_i/t_1 -Verhältnis

Spannungskonzentrationsfaktoren

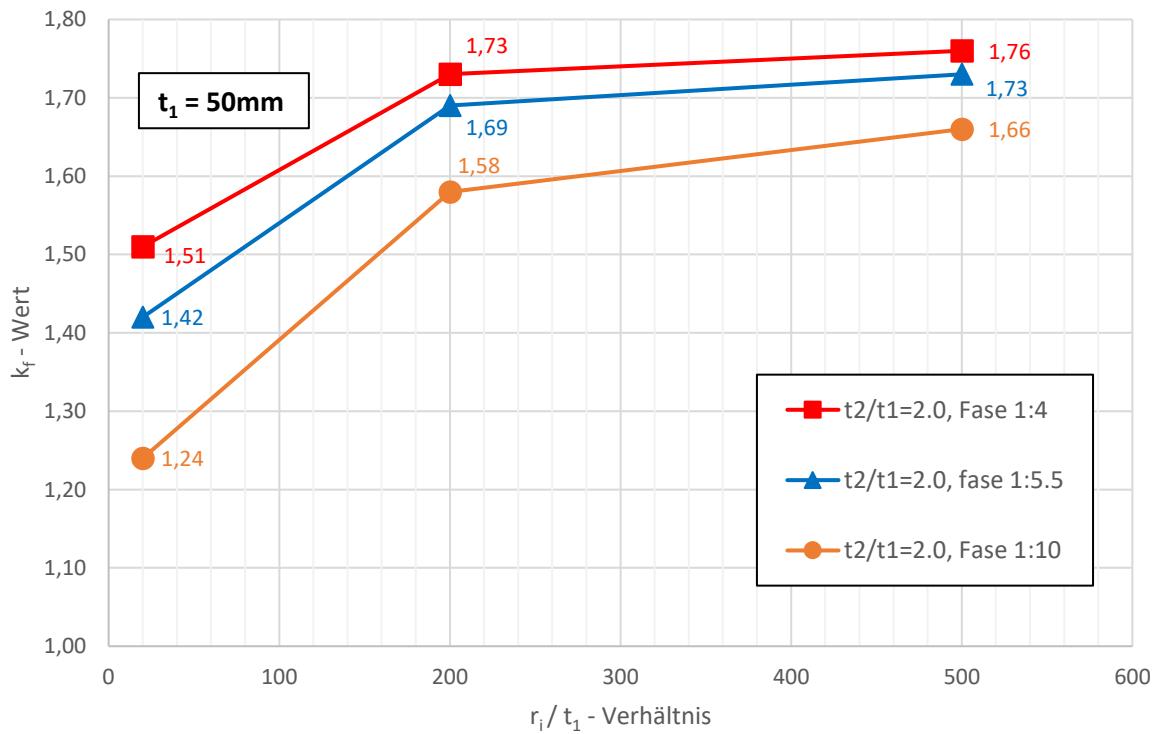


Diagramm 24: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 50$ mm und $t_2/t_1 = 2.0$ in Abhängigkeit der Fase und dem r_i/t_1 -Verhältnis

- Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren in Abhängigkeit vom t_2/t_1 -Verhältnis und dem r_i/t_1 -Verhältnis:**

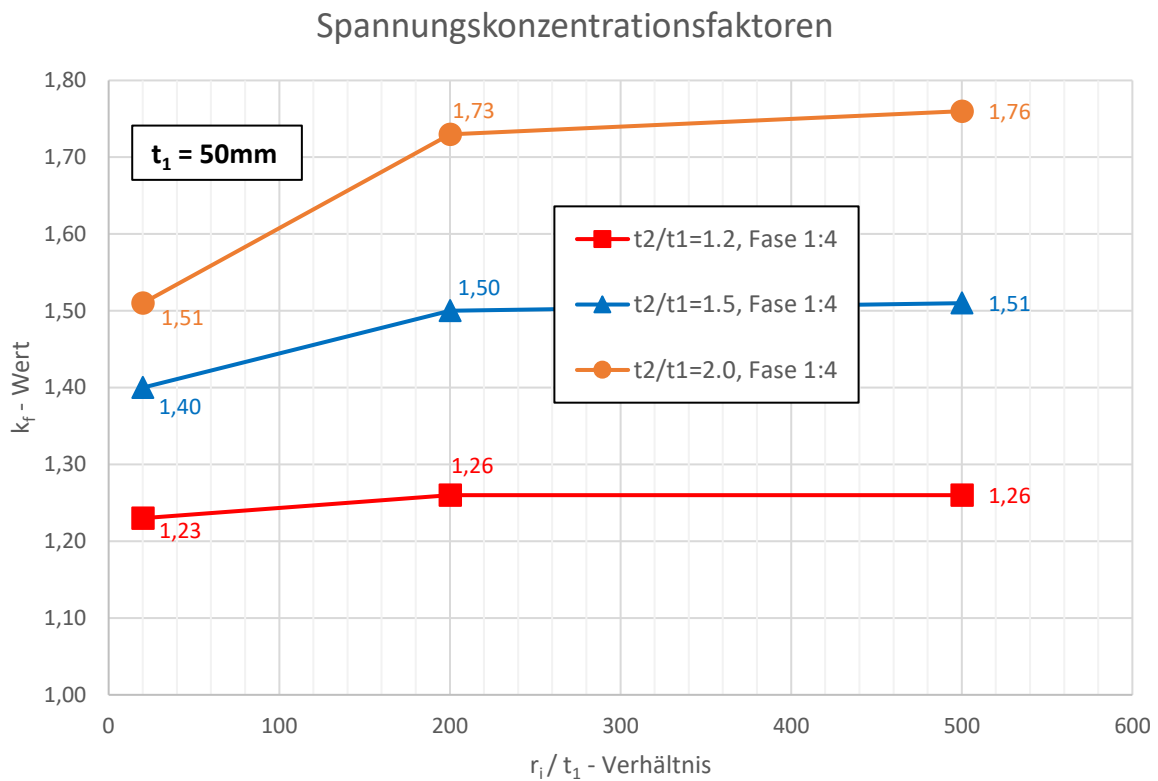


Diagramm 25: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 50$ mm und Fase 1:4 in Abhängigkeit vom t_2/t_1 -Verhältnis und r_i/t_1 -Verhältnis

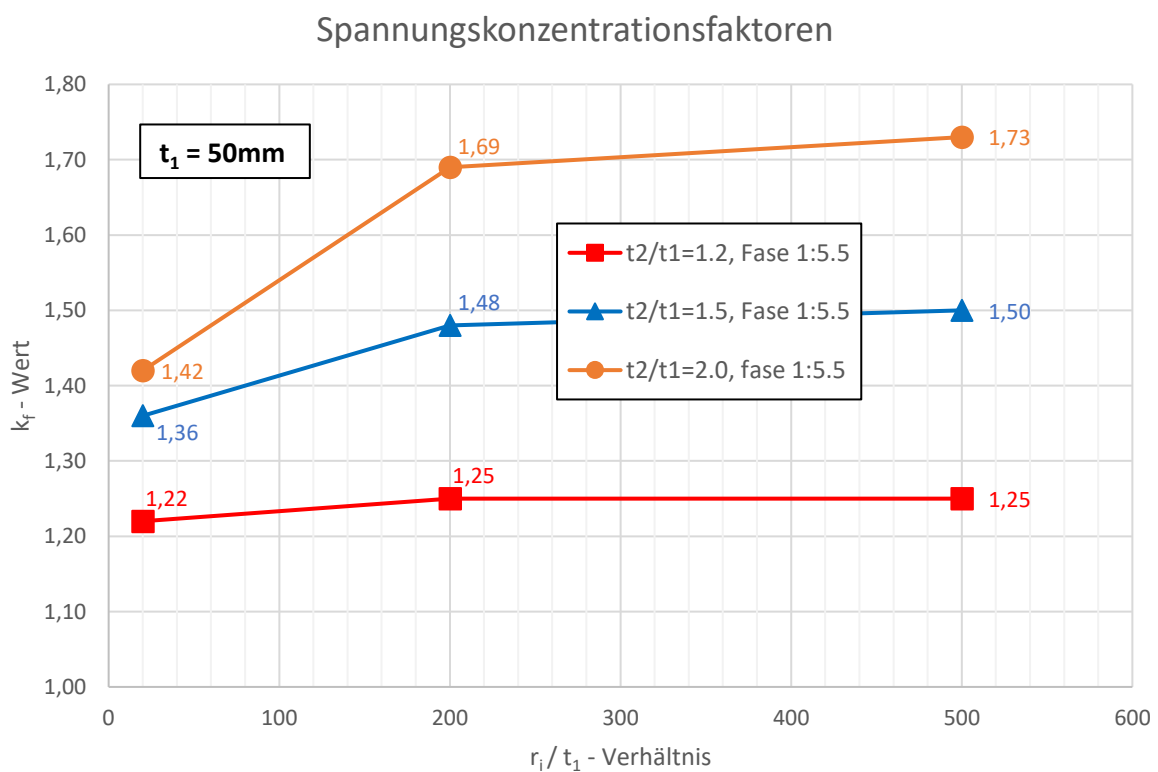


Diagramm 26: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 50$ mm und Fase 1:5.5 in Abhängigkeit vom t_2/t_1 -Verhältnis und r_i/t_1 -Verhältnis

Spannungskonzentrationsfaktoren

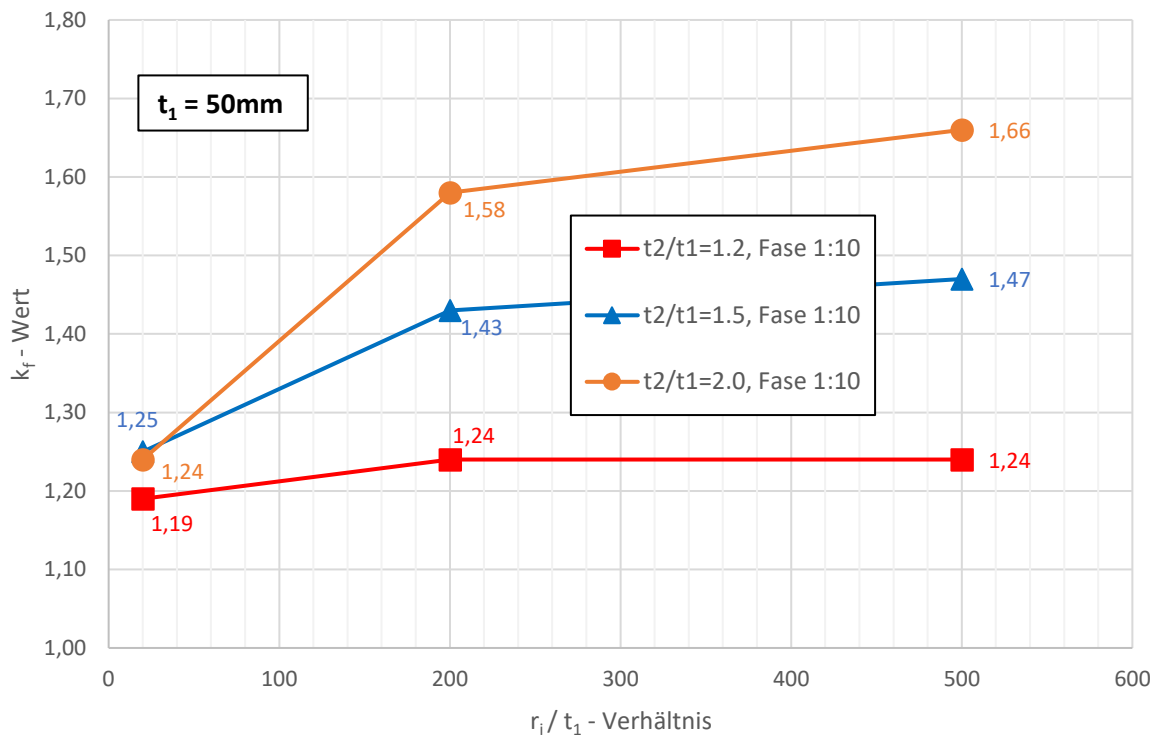


Diagramm 27: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 50$ mm und Fase 1:10 in Abhängigkeit vom t_2/t_1 -Verhältnis und r_i/t_1 -Verhältnis

4.2.5. Ergebnisse für Wanddicke $t_1 = 75$ mm

Auch hierbei ist das gleiche Muster wieder zu erkennen wie bei $t_1 = 25$ mm und $t_1 = 50$ mm, weshalb nicht näher auf die Ergebnisse eingegangen wird. Die Spannungskonzentrationsfaktoren sind exakt dieselben wie bei $t_1 = 25$ mm und $t_1 = 50$ mm. Die Rohrwanddicke t_1 hat auch hierbei keinen Einfluss auf die Strukturspannungen.

- Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren in Abhängigkeit der Fase und dem r_i/t_1 -Verhältnis:

Spannungskonzentrationsfaktoren

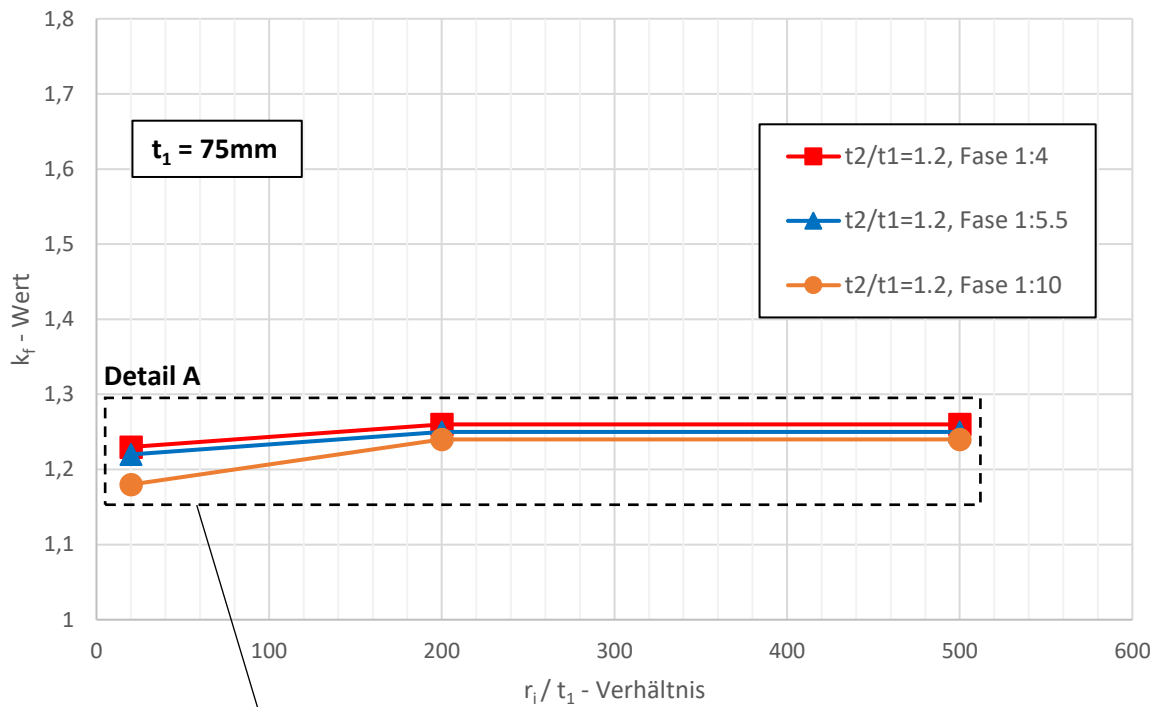


Diagramm 28: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 75 \text{ mm}$ und $t_2/t_1 = 1.2$ in Abhängigkeit der Fase und dem r_i/t_1 -Verhältnis

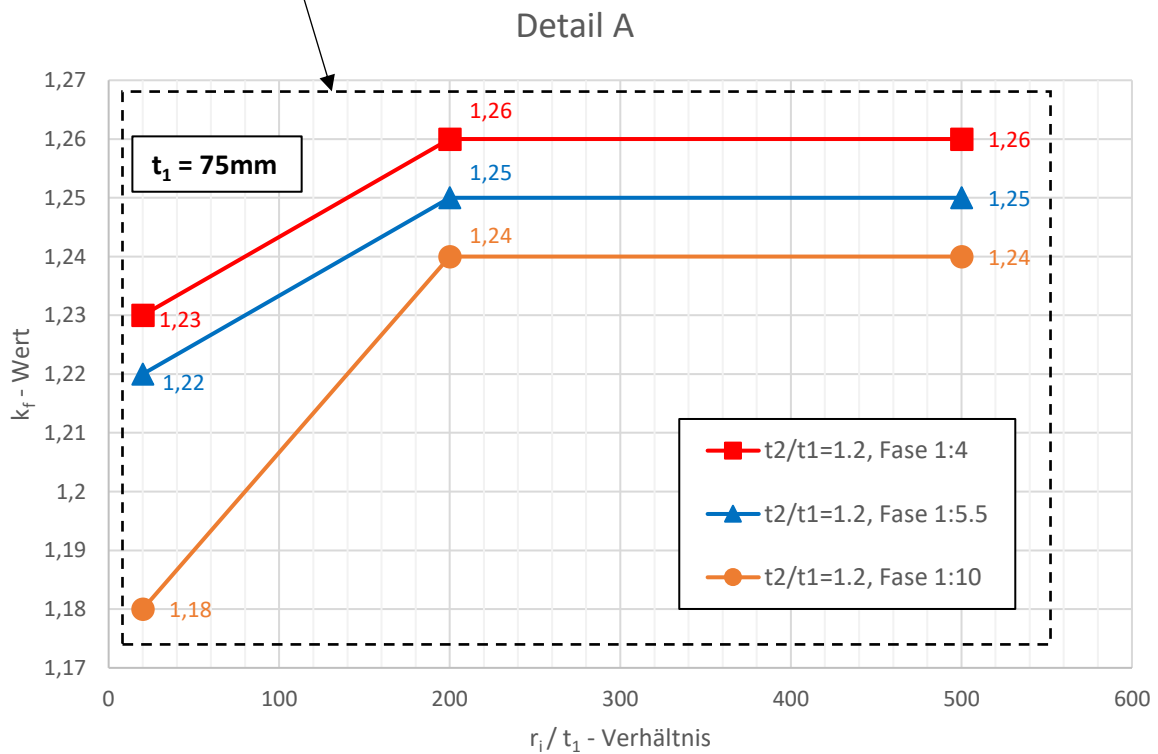


Diagramm 29: Detaillierte Darstellung der Ergebnisse aus Diagramm 28 (Detail A)

Spannungskonzentrationsfaktoren

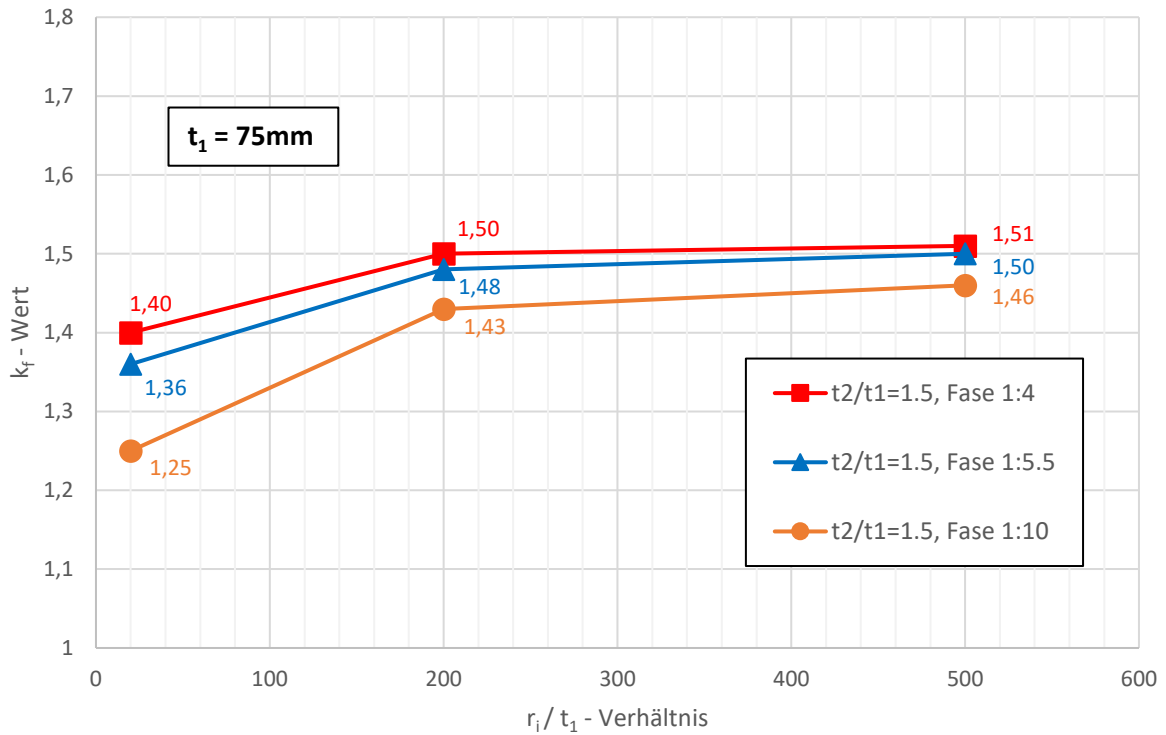


Diagramm 30: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 75$ mm und $t_2/t_1 = 1.5$ in Abhängigkeit der Fase und dem r_i/t_1 -Verhältnis

Spannungskonzentrationsfaktoren

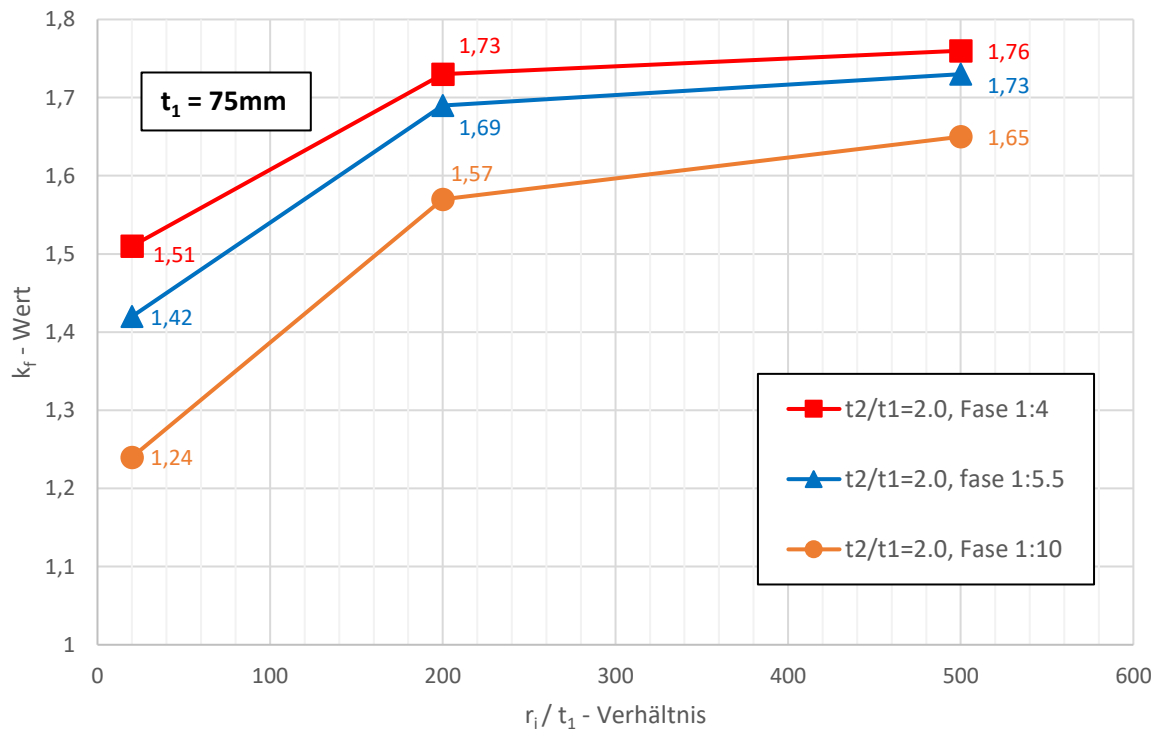


Diagramm 31: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 75$ mm und $t_2/t_1 = 2.0$ in Abhängigkeit der Fase und dem r_i/t_1 -Verhältnis

- Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren in Abhängigkeit vom t_2/t_1 -Verhältnis und dem r_i/t -Verhältnis:**

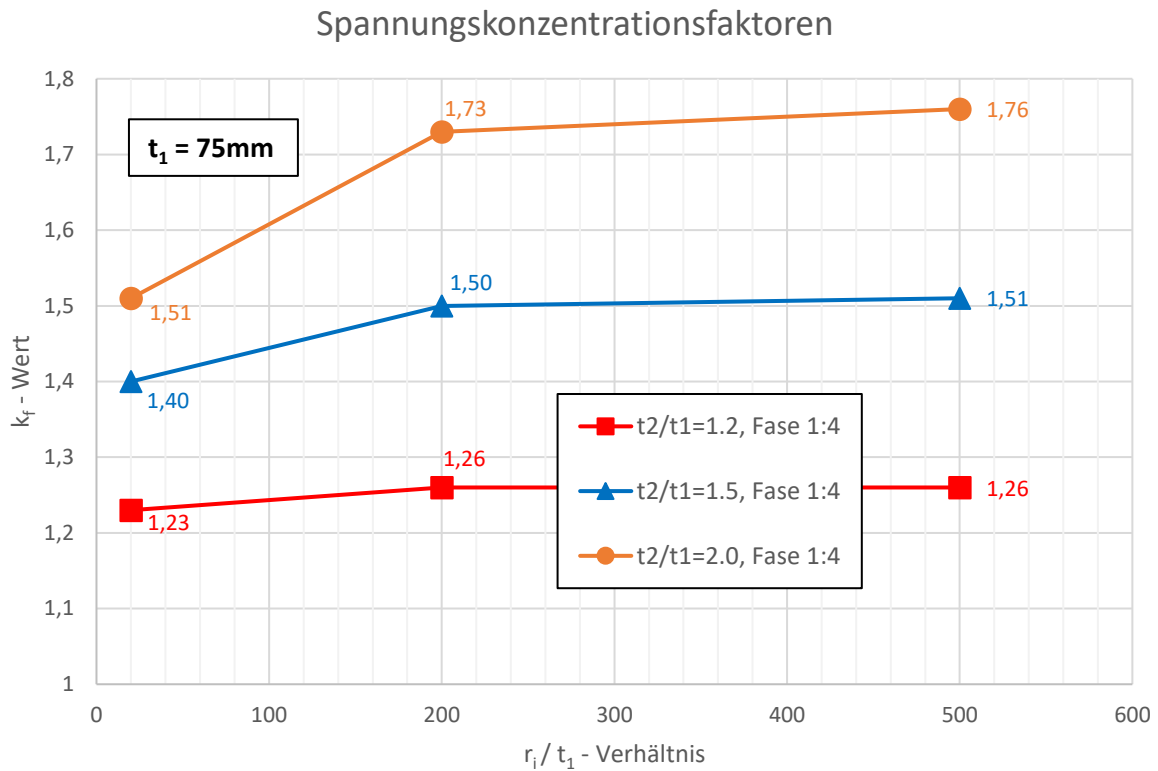


Diagramm 32: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 75\text{ mm}$ und Fase 1:4 in Abhängigkeit vom t_2/t_1 -Verhältnis und r_i/t_1 -Verhältnis

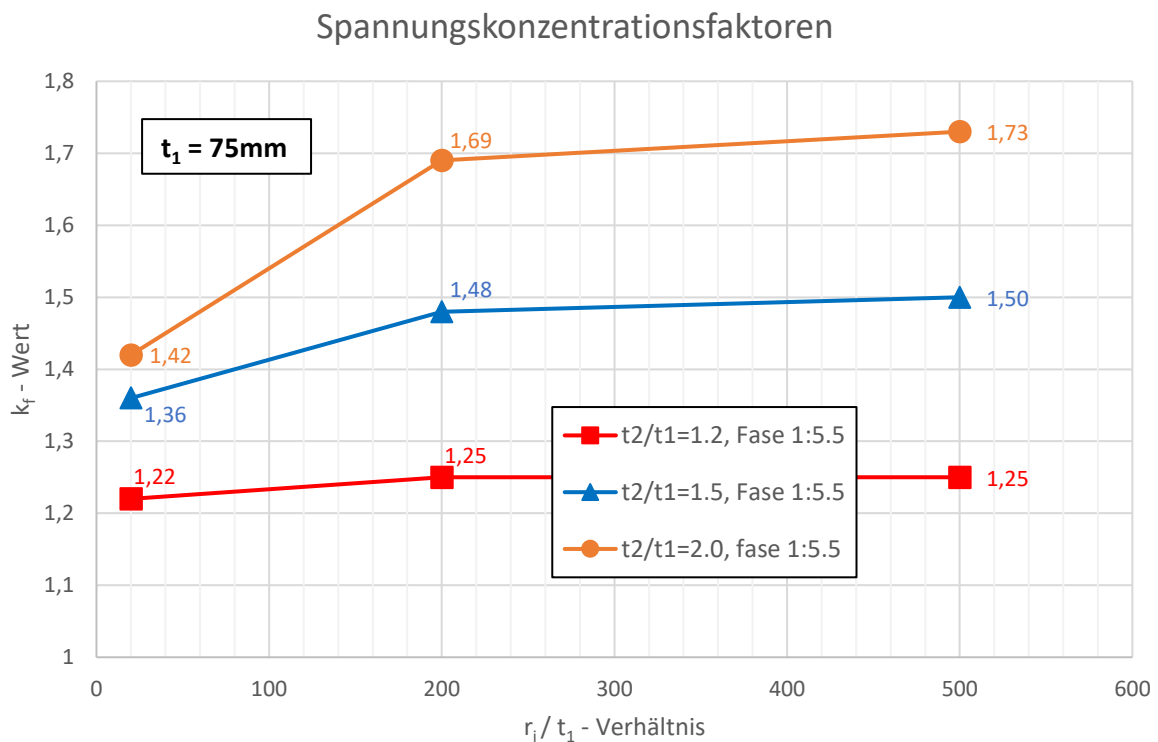


Diagramm 33: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 75\text{ mm}$ und Fase 1:5.5 in Abhängigkeit vom t_2/t_1 -Verhältnis und r_i/t_1 -Verhältnis

Spannungskonzentrationsfaktoren

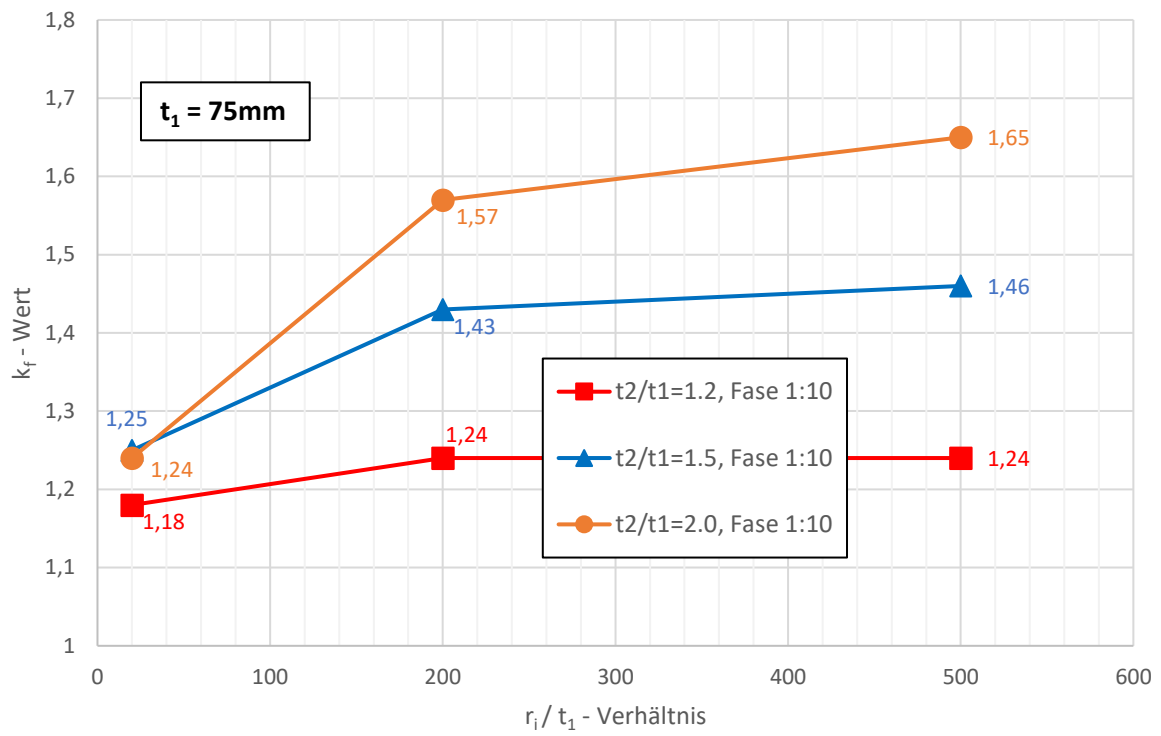


Diagramm 34: Darstellung der Spannungskonzentrationsfaktoren für $t_1 = 75\text{ mm}$ und Fase 1:10 in Abhängigkeit vom t_2/t_1 -Verhältnis und r_i/t_1 -Verhältnis

5. Vergleich der Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept

5.1. Detail 1 – Ringsteifenanschluss

In diesem Kapitel werden die Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept in Form von Tabellen verglichen. Die nachfolgenden Tabellen mit den zu berücksichtigten Faktoren sind so ausgeführt, dass sich diese ganz einfach von links nach rechts lesen lassen.

5.1.1. Ermüdungsfestigkeiten nach Eurocode EN 1993-1-9

- **Nennspannungskonzept**

Für die Ermittlung der Kerbfälle nach dem Nennspannungskonzept wird der zweite Entwurf des Eurocodes EN 1993-1-9 (2020) [4] herangezogen. Für das Detail Ringsteifenanschluss werden zwei Kerbfälle unterschieden (vgl. untere Abb. 19, wobei nicht alle Kerbfälle gezeigt sind):

Table 9.5: Weld attachments and stiffeners

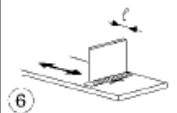
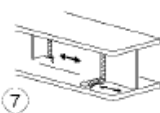
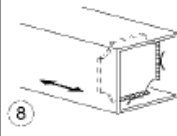

Detail category	Constructional detail	Description	Requirements
80	$\ell \leq 50 \text{ mm}$  	Transverse attachments: 6) Welded to plate. 7) Vertical stiffeners welded to a beam or plate girder. 8) Diaphragm of box girders welded to the flange or the web. May not be possible for small hollow sections.	Details 6) and 7): Ends of welds to be carefully ground to remove any undercut that may be present. 7) $\Delta\sigma$ to be calculated using principal stresses if the stiffener terminates in the web, see left side.
71	$50 < \ell \leq 80 \text{ mm}$  	The values are also valid for ring stiffeners.	

Abb. 19: Ausschnitt vom Kerbfallkatalog im Eurocode EN 1993-1-9:2020 (zweiter Entwurf) für Ringsteifenanschluss [4]

Der anzuwendende Kerbfall ist von der Länge $l = L_T = \text{Steifendicke } t_s + 2 \cdot \text{Nahtaufweitung}$ (links und rechts) abhängig (vgl. Abb. 19 u. Abb. 20). Das bedeutet, dass nach dem Nennspannungskonzept für die Fälle $t = 25 \text{ mm}$ und $t = 50 \text{ mm}$ der Kerbfall 80 ($\Delta\sigma_{R,nenn} = 80 \text{ N/mm}^2$) und für $t = 75 \text{ mm}$ der Kerbfall 71 ($\Delta\sigma_{R,nenn} = 71 \text{ N/mm}^2$) herangezogen werden muss.

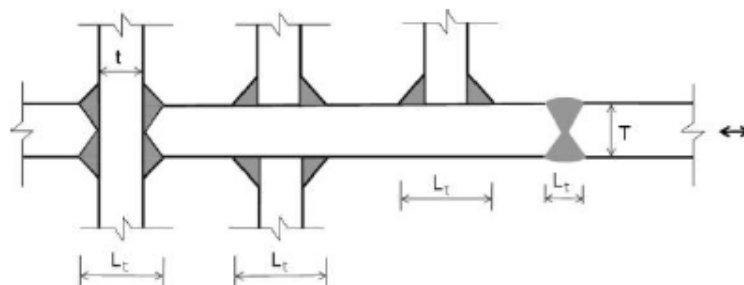
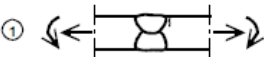
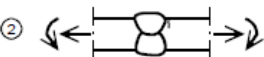
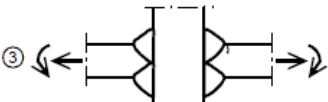

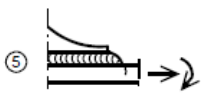

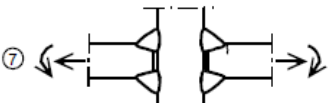


Abb. 20: Befestigungslänge von ans Rohr geschweißter Steife

▪ **Strukturspannungskonzept**

Im Anhang B in Tabelle B.1 im neuen Eurocode EN 1993-1-9 (2020) [4] sind die Kerbfälle nach dem Strukturspannungskonzept zu finden (vgl. Abb. 21, wobei hier nicht alle Kerbfälle gezeigt sind):

Table B.1: Detail categories for use with hot spot stress method

Detail category	α	Constructional detail	Description	Requirements
112	0.1		1) Full penetration butt joint.	1) All welds ground flush to plate surface parallel to direction of the arrow. Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed, plate edges to be ground flush in direction of stress. Welded from both sides, checked by NDT. For misalignment see NOTE 1.
100	0.2		2) Full penetration butt joint, made from both sides. In case of tubular, made from one side.	2) Weld not ground flush. Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed, plate edges to be ground flush in direction of stress. Welded from both sides. For misalignment see NOTE 1.
100	0.3		3) Cruciform joint with full penetration K-butt welds.	3) Weld toe angle $\leq 60^\circ$. For misalignment see NOTE 1.
100	0.3		4) Non load-carrying fillet welds.	4) Weld toe angle $\leq 60^\circ$. See also NOTE 2.
100	0.3		5) Bracket ends of longitudinal stiffeners.	5) Weld toe angle $\leq 60^\circ$. See also NOTE 2.
100	0.3		6) Cover plate ends and similar joints.	6) Weld toe angle $\leq 60^\circ$. See also NOTE 2.
90	0.3		7) Cruciform joints with load-carrying fillet welds.	7) Weld toe angle $\leq 60^\circ$. For misalignment see NOTE 1. See also NOTE 2.

NOTE 1 Table B.1 does not cover effects of misalignment corresponding to the tolerances from EN 1090-2, except if the stress increase due to misalignment is negligible (5% or less). In this case the hot spot stress can be assumed to be equal to the nominal stress. In any other case, the tolerances either from EN 1090-2 or project specific have to be considered explicitly in determination of the hot spot stress.

NOTE 2 Table B.1 does not cover fatigue initiation from the root followed by propagation through the throat. In this case either nominal or effective notch stress method (see Annex C) should be applied.

Abb. 21: Ausschnitt vom Kerbfalkatalog im Eurocode EN 1993-1-9:2020 (zweiter Entwurf) für Ringstiftenanschluss (Anhang B) [4]

Der in Rot eingerahmte Kerbfall 100 (vgl. Abb. 21) entspricht dem des Ringstiftenanschlusses und wird für den Ermüdungsnachweis nach dem Strukturspannungskonzept ($\Delta\sigma_{R,hs} = 100 \text{ N/mm}^2$) herangezogen.

Der Grund, weshalb zwei Exponenten (0.20 und 0.30) in den Tabellen untersucht werden, ist darauf zurückzuführen, dass der neue Eurocode EN 1993-1-9 (Entwurf 2020) den Wert mit 0.30 angibt und der alte Eurocode den Wert mit 0.20.

Vergleicht man die Spannungskonzentrationsfaktoren vom Struktur- und Kerbspannungskonzept k_f und k_t (vgl. Tabelle 7/Tabelle 8) ist zu sehen, dass diese mit größerem r/t -Verhältnis abfallen, welche deshalb auch zu niedrigeren Ausnutzungsgraden bzw. höheren Ermüdungstragfähigkeiten führen. Die Kerbspannungsfaktoren sind dabei um fast das doppelte höher als die Strukturspannungsfaktoren. Auf die Strukturspannungsfaktoren wird in diesem Kapitel nicht näher eingegangen, da diese schon vorhin im Kapitel 4: „Numerische Berechnung nach dem Struktur- und Kerbspannungskonzept“ erläutert worden sind: Die Rohrwanddicke t hat keinen Einfluss auf die Nenn- und Strukturspannungen. Tabelle 7 zeigt die Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für eine Rohrwanddicke $t=25\text{mm}$ und einem Ringsteifen/Rohrwanddicken-Verhältnis $t_s/t = 1$ für die Fälle $h_s/t_s = 3.5, 7, 14$ mit Nahtaufweitung. Für Tabelle 8 ist das gleiche gezeigt, mit dem Unterschied, dass dieses Ringsteifen/Rohrwanddicken-Verhältnis $t_s/t = 2$ beträgt.

Generell ist auch zu sehen, dass die Ermüdungstragfähigkeiten nach dem Kerbspannungskonzept (AG_{Kerb}) um einiges höher (d.h. die Ausnutzungsgrade liegen deutlich unter eins) als die vom Nenn- und Strukturspannungskonzept (AG_{Nenn} und $AG_{HS,n}$) (vgl. Tabelle 7 u. Tabelle 8).

Es ist anzumerken, dass das Nennspannungskonzept sich eigentlich nur auf stabförmige Bauteile bezieht und deshalb auch die Ausnutzungsgrade für alle r_i/t -Verhältnisse gleich eins sind. Das Strukturspannungskonzept liefert dabei sehr ähnliche Ausnutzungsgrade wie das Nennspannungskonzept.


 $\Delta\sigma_{nenn} = 80 \frac{N}{mm^2}$		$t_s/t=1; h_s/t_s=3.5$									
		$\frac{r_i}{t_1}$	Nennspannung	Strukturspannung						Kerbspannung	
			AG_{nenn}	k_f	AG_{hs}	$k_{s,\alpha 1}$	$AG_{hs,1}$	$k_{s,\alpha 2}$	$AG_{hs,2}$	k_t	AG_{Kerb}
			$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,20}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha 1}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,30}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha 2}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$
t=25mm	$t_{eff} = \min(14+0.66*t_s; t) = 25\text{mm}$	20	1.00	1.20	0.96	1.00	0.96	1.00	0.96	2.25	0.80
		200	1.00	1.10	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.97	0.70
		500	1.00	1.07	0.86	1.00	0.86	1.00	0.86	1.96	0.70
		$t_s/t=1; h_s/t_s=7$									
		20	1.00	1.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.38	0.85
		50	1.00	1.22	0.98	1.00	0.98	1.00	0.98	2.30	0.82
		100	1.00	1.18	0.94	1.00	0.94	1.00	0.94	2.23	0.79
		200	1.00	1.15	0.92	1.00	0.92	1.00	0.92	2.06	0.73
		500	1.00	1.11	0.89	1.00	0.89	1.00	0.89	2.03	0.72
		$t_s/t=1; h_s/t_s=14$									
		20	1.00	1.29	1.03	1.00	1.03	1.00	1.03	2.49	0.89
		50	1.00	1.28	1.02	1.00	1.02	1.00	1.02	2.42	0.86
		100	1.00	1.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.28	0.81
		200	1.00	1.22	0.98	1.00	0.98	1.00	0.98	2.20	0.78
		500	1.00	1.16	0.93	1.00	0.93	1.00	0.93	2.14	0.76

Tabelle 7: Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für $t = 25 \text{ mm}$ und $t_s/t = 1$ für die Fälle $h_s/t_s = 3.5, 7, 14$ mit Nahtaufweitung


 $\Delta\sigma_{nenn} = 80 \frac{N}{mm^2}$		$t_s/t=2; h_s/t_s=3.5$									
		$\frac{r_i}{t_1}$	Nennspannung	Strukturspannung						Kerbspannung	
			AG _{nenn}	k _f	AG _{hs}	k _{s,α1}	AG _{hs,1}	k _{s,α2}	AG _{hs,2}	k _t	AG _{Kerb}
			$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,20}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha1}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,30}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha2}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$
t=25mm $t_{eff} = \min(1,4+0,66 * t_s; t) = 25mm$	20	1.00	1.40	1.12	1.00	1.12	1.00	1.12	2.65	0.94	
	50	1.00	1.35	1.08	1.00	1.08	1.00	1.08	2.49	0.89	
	100	1.00	1.30	1.04	1.00	1.04	1.00	1.04	2.37	0.84	
	200	1.00	1.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.34	0.83	
	500	1.00	1.19	0.95	1.00	0.95	1.00	0.95	2.13	0.76	
	$t_s/t=2; h_s/t_s=7$										
	20	1.00	1.44	1.15	1.00	1.15	1.00	1.15	2.76	0.98	
	200	1.00	1.33	1.06	1.00	1.06	1.00	1.06	2.51	0.89	
	500	1.00	1.26	1.01	1.00	1.01	1.00	1.01	2.29	0.81	
	$t_s/t=2; h_s/t_s=14$										
	20	1.00	1.47	1.18	1.00	1.18	1.00	1.18	2.83	1.01	
	200	1.00	1.40	1.12	1.00	1.12	1.00	1.12	2.69	0.96	
500	1.00	1.34	1.07	1.00	1.07	1.00	1.07	2.47	0.88		

Tabelle 8: Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für t = 25 mm und t_s/t = 2 für die Fälle h_s/t_s = 3.5, 7, 14 mit Nahtaufweitung

5.1.3. Ergebnisse für Wanddicke t = 25 mm ohne Nahtaufweitung

In diesem Unterkapitel sind alle Ergebnisse der numerischen Berechnungen nach dem Struktur- und Kerbspannungskonzept für den Ringsteifenanschluss mit der Wanddicke t=25mm ohne Nahtaufweitung aufgelistet. Auch hierbei wurde $\Delta\sigma_{nenn}$ so gewählt, dass sich beim Nennspannungskonzept ein Ausnutzungsgrad von 1.00 ergibt, um so das Struktur- und Kerbspannungskonzept besser mit dem Nennspannungskonzept vergleichen zu können. Auch hier beträgt $\Delta\sigma_{nenn} = 80 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 9 zeigt die Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für t = 25 mm und t_s/t = 1 für die Fälle h_s/t_s = 3.5, 7 ohne Nahtaufweitung. Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse für t = 25 mm und t_s/t = 2 für die Fälle h_s/t_s = 3.5, 7 und 14 ohne Nahtaufweitung.

Vergleicht man die Ermüdungskonzepte für den Ringsteifenanschluss mit und ohne Nahtaufweitung (vgl. Tabelle 7Tabelle 8 – mit NahtaufweitungTabelle 9Tabelle 10 – ohne Nahtaufweitung) sind keine Unterschiede nach dem Nenn- und Strukturspannungsnachweis zu verzeichnen. Nach dem Kerbspannungskonzept sind jedoch beim Ringsteifenanschluss ohne Nahtaufweitung viel kleinere Ausnutzungsgrade als beim Ringsteifenanschluss mit Nahtaufweitung zu sehen. Hier spielt die Nahtaufweitung, wie schon in Kapitel 4 „Numerische Berechnung nach dem Struktur- und Kerbspannungskonzept“ erwähnt, eine große Rolle. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Dehnungsbehinderung beim Modell mit Nahtaufweitung größer ist und dadurch höhere Kerbspannungen entstehen.

Das Strukturspannungskonzept liefert dabei sehr ähnliche Ausnutzungsgrade wie das Nennspannungskonzept, während die Ausnutzungsgrade nach dem Kerbspannungskonzept die kleinsten sind.


 $\Delta\sigma_{nenn} = 80 \frac{N}{mm^2}$		t _s /t=1; h _s /t _s =3.5									
		r _i t ₁	Nennspannung	Strukturspannung						Kerbspannung	
			AG _{nenn}	k _f	AG _{hs}	k _{s,α1}	AG _{hs,1}	k _{s,α2}	AG _{hs,2}	k _t	AG _{Kerb}
			$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,20}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha1}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,30}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha2}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$
t=25mm t _{eff} = min(14+0.66*t _s ; t) = 25mm	20	1.00	1.18	0.94	1.00	0.94	1.00	0.94	1.97	0.70	
	200	1.00	1.10	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.80	0.64	
	500	1.00	1.08	0.86	1.00	0.86	1.00	0.86	1.77	0.63	
	t _s /t=1; h _s /t _s =7										
	20	1.00	1.24	0.99	1.00	0.99	1.00	0.99	2.08	0.74	
	200	1.00	1.15	0.92	1.00	0.92	1.00	0.92	1.89	0.67	
500	1.00	1.11	0.89	1.00	0.89	1.00	0.89	1.84	0.65		

Tabelle 9: Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für t = 25 mm und t_s/t = 1 für die Fälle h_s/t_s = 3.5, 7 ohne Nahtaufweitung


 $\Delta\sigma_{nenn} = 80 \frac{N}{mm^2}$		t _s /t=2; h _s /t _s =3.5									
		r _i t ₁	Nennspannung	Strukturspannung						Kerbspannung	
			AG _{nenn}	k _f	AG _{hs}	k _{s,α1}	AG _{hs,1}	k _{s,α2}	AG _{hs,2}	k _t	AG _{Kerb}
			$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,20}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha1}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,30}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha2}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$
t=25mm t _{eff} = min(14+0.66*t _s ; t) = 25mm	20	1.00	1.35	1.08	1.00	1.08	1.00	1.08	2.37	0.84	
	200	1.00	1.24	0.99	1.00	0.99	1.00	0.99	2.12	0.75	
	500	1.00	1.18	0.94	1.00	0.94	1.00	0.94	1.97	0.70	
	t _s /t=2; h _s /t _s =7										
	20	1.00	1.40	1.12	1.00	1.12	1.00	1.12	2.50	0.89	
	200	1.00	1.31	1.05	1.00	1.05	1.00	1.05	2.28	0.81	
500	1.00	1.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.09	0.74		

Tabelle 10: Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für t = 25 mm und t_s/t = 2 für die Fälle h_s/t_s = 3.5, 7 mit Nahtaufweitung

5.1.4. Ergebnisse für Wanddicke t = 50 mm

In den Tabellen Tabelle 11 Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für die Wanddicke t=50mm tabelliert. Tabelle 11 zeigt dabei die Ergebnisse für t_s/t = 1 und die Fälle h_s/t_s = 3.5, 7. Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse für t_s/t = 2 und die Fälle h_s/t_s = 3.5, 7.

Auch hierbei wurde Δσ_{nenn} so gewählt, dass sich beim Nennspannungskonzept ein Ausnutzungsgrad von 1.00 ergibt, um so das Struktur- und Kerbspannungskonzept besser mit dem Nennspannungskonzept vergleichen zu können. Auch hier beträgt Δσ_{nenn} = 80 N/mm².

Betrachtet man die Ausnutzungsgrade AG_{hs}, AG_{hs1} und AG_{hs2} nach dem Strukturspannungskonzept, lässt sich erkennen, dass durch Berücksichtigung des Blechdickeneffektes k_{s,α}, die Ermüdungstragfähigkeiten sinken (vgl. Tabelle 11 und Tabelle 12).

AG_{hs} definiert dabei den Ausnutzungsgrad nach dem Strukturspannungskonzept ohne Berücksichtigung des Blechdickeneffektes, AG_{hs1} den Ausnutzungsgrad mit Blechdickeneffekt nach dem aktuellen Eurocode (Ausgabe 2013) [1], wo der Exponent im k_{s,α}-Faktor mit 0.20 festgelegt ist, und AG_{hs2} den Ausnutzungsgrad nach dem zweiten Entwurf bzw. künftig neuen Eurocode (Ausgabe 2020) [4] (vgl. Abb. 21) mit dem Exponenten 0.30 im Faktor k_{s,α}.

Für die Fälle t_s/t = 1 mit h_s/t_s = 3.5, 7 und t_s/t = 2 mit h_s/t_s = 3.5, 7 bei t = 50 mm (vgl. Tabelle 11 u. Tabelle 12) sind die Ermüdungstragfähigkeiten nach dem Kerbspannungskonzept auch hier um einiges höher als die vom Nenn- oder Strukturspannungskonzept. Es zeichnet sich hierbei der gleiche Trend wie bei t = 25 mm ab, wo die Ringdicke (t_s) einen maßgebenden Einfluss auf die k_f- und k_t-Faktoren hat. Diese steigen bei größerer Ringdicke (t_s = 2 * t) erheblich an.


 $\Delta\sigma_{nenn} = 80 \frac{N}{mm^2}$		t _s /t=1; h _s /t _s =3.5									
		$\frac{r_i}{t_1}$	Nenn- spannung	Strukturspannung						Kerbspannung	
			AG _{nenn}	k _f	AG _{hs}	k _{s,α1}	AG _{hs,1}	k _{s,α2}	AG _{hs,2}	k _t	AG _{Kerb}
			$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,20}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha1}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,30}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha2}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$
t=50mm t _{eff} = min(14+0.66*t _s ; t) = 47mm	20	1.00	1.17	0.94	0.88	1.06	0.83	1.13	2.42	0.86	
	200	1.00	1.09	0.87	0.88	0.99	0.83	1.05	2.19	0.78	
	500	1.00	1.07	0.86	0.88	0.97	0.83	1.03	2.14	0.76	
	t _s /t=1; h _s /t _s =7										
	20	1.00	1.23	0.98	0.88	1.12	0.83	1.19	2.58	0.92	
	200	1.00	1.14	0.91	0.88	1.03	0.83	1.10	2.30	0.82	
500	1.00	1.10	0.88	0.88	1.00	0.83	1.06	2.22	0.79		

Tabelle 11: Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für t = 50 mm und t_s/t = 1 für die Fälle h_s/t_s = 3.5, 7 ohne Nahtaufweitung


 $\Delta\sigma_{nenn} = 80 \frac{N}{mm^2}$		t _s /t=2; h _s /t _s =3.5									
		$\frac{r_i}{t_1}$	Nenn- spannung	Strukturspannung						Kerbspannung	
			AG _{nenn}	k _f	AG _{hs}	k _{s,α1}	AG _{hs,1}	k _{s,α2}	AG _{hs,2}	k _t	AG _{Kerb}
			$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,20}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha1}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,30}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha2}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$
t=50mm t _{eff} = min(14+0.66*t _s ; t) = 47mm	20	1.00	1.34	1.07	0.88	1.22	0.83	1.30	2.98	1.06	
	200	1.00	1.23	0.98	0.88	1.12	0.83	1.19	2.57	0.91	
	500	1.00	1.17	0.94	0.88	1.06	0.83	1.13	2.43	0.86	
	t _s /t=2; h _s /t _s =7										
	20	1.00	1.38	1.10	0.88	1.25	0.83	1.33	3.12	1.11	
	200	1.00	1.31	1.05	0.88	1.19	0.83	1.27	2.80	1.00	
500	1.00	1.24	0.99	0.88	1.13	0.83	1.20	2.62	0.93		

Tabelle 12: Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für t = 50 mm und t_s/t = 2 für die Fälle h_s/t_s = 3.5, 7 ohne Nahtaufweitung

5.1.5. Ergebnisse für Wanddicke t = 75 mm

In den Tabelle 13 Tabelle 14 sind die Ergebnisse der Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für die Wanddicke t = 75 mm tabelliert. Tabelle 13 zeigt dabei die Ergebnisse für $t_s/t = 1$ und die Fälle $h_s/t_s = 3.5, 7$. Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse für $t_s/t = 2$ und die Fälle $h_s/t_s = 3.5, 7$.

Wie bei den Wanddicken t = 25 mm und t = 50 mm wurde auch hierbei $\Delta\sigma_{nenn}$ so gewählt, dass sich beim Nennspannungskonzept ein Ausnutzungsgrad von 1.00 ergibt, um so das Struktur- und Kerbspannungskonzept besser mit dem Nennspannungskonzept vergleichen zu können. σ_{nenn} beträgt für diesen Fall 71 N/mm². $\Delta\sigma_{R,hs} = 100$ N/mm² und $\Delta\sigma_{R,Kerb} = 225$ N/mm² sind für alle Fälle des Details Ringsteifenanschluss gleich. Wie schon erwähnt, verändern sich die Strukturspannungsfaktoren bei unterschiedlicher Rohrwanddicke nicht. Die Kerbspannungsfaktoren sind für den Fall t = 75 mm am größten.

Aufgrund des Blechdicken- bzw. Größeneffekts verringern sich die Ausnutzungsgrade der Strukturspannungen im Vergleich zu t = 50 mm nur minimal. Vergleicht man beispielsweise $AG_{hs,1}$ aus Tabelle 11 (t = 50 mm) mit $AG_{hs,1}$ aus Tabelle 13 (t = 75 mm), also für die Fälle $t_s/t = 1$, sinkt dieser bei einem r_i/t -Verhältnis = 20 von 1.06 auf 1.00, bei $r_i/t = 200$ von 0.99 auf 0.93 und bei $r_i/t = 500$ von 0.97 auf 0.92. Für die Fälle $t_s/t = 2$ ist der gleiche Trend zu erkennen (vgl. Tabelle 12 für t = 50 mm und Tabelle 14 für t = 75 mm).


 $\Delta\sigma_{nenn} = 71 \frac{N}{mm^2}$		t _s /t=1; h _s /t _s =3.5									
		r _i /t ₁	Nennspannung	Strukturspannung						Kerbspannung	
			AG _{nenn}	k _f	AG _{hs}	k _{s,α1}	AG _{hs,1}	k _{s,α2}	AG _{hs,2}	k _t	AG _{Kerb}
			$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,20}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha1}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,30}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha2}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$
t=75mm	t _{eff} = min(14+0.66*t _s ; t) = 63.5mm	20	1.00	1.17	0.83	0.83	1.00	0.76	1.10	2.70	0.85
		200	1.00	1.09	0.77	0.83	0.93	0.76	1.02	2.37	0.75
		500	1.00	1.07	0.76	0.83	0.92	0.76	1.00	2.39	0.75
		t _s /t=1; h _s /t _s =7									
		20	1.00	1.22	0.87	0.83	1.04	0.76	1.15	2.88	0.91
		200	1.00	1.14	0.81	0.83	0.98	0.76	1.07	2.49	0.79
500	1.00	1.10	0.78	0.83	0.94	0.76	1.03	2.49	0.79		

Tabelle 13: Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für t = 75 mm und t_s/t = 1 für die Fälle h_s/t_s = 3.5, 7 ohne Nahtaufweitung


 $\Delta\sigma_{nenn} = 71 \frac{N}{mm^2}$		$t_s/t=2; h_s/t_s=3.5$									
		$\frac{r_i}{t_1}$	Nennspannung	Strukturspannung						Kerbspannung	
			AG _{nenn}	k _f	AG _{hs}	k _{s,α1}	AG _{hs,1}	k _{s,α2}	AG _{hs,2}	k _t	AG _{Kerb}
			$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,20}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha1}}$	$\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^{0,30}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha2}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$
t=75mm $t_{eff} = \min(14+0.66*t_s; t) = 63.5mm$	20	1.00	1.33	0.94	0.83	1.14	0.76	1.25	3.37	1.06	
	200	1.00	1.23	0.87	0.83	1.05	0.76	1.16	2.87	0.91	
	500	1.00	1.17	0.83	0.83	1.00	0.76	1.10	2.70	0.85	
	$t_s/t=2; h_s/t_s=7$										
	20	1.00	1.38	0.98	0.83	1.18	0.76	1.30	3.53	1.11	
	200	1.00	1.31	0.93	0.83	1.12	0.76	1.23	3.16	1.00	
500	1.00	1.24	0.88	0.83	1.06	0.76	1.16	2.92	0.92		

Tabelle 14: Ermüdungsnachweise nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für t = 75 mm und t_s/t = 2 für die Fälle h_s/t_s = 3.5, 7 ohne Nahtaufweitung

5.1.6. Graphische Darstellung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden einige von den zuvor tabellierten Ausnutzungsgraden in Form von Diagrammen gezeigt, um so mit einem Blick zu sehen, in welchem Bereich die einzelnen Ermüdungsnachweise liegen und wie die Geometrieparameter die Ergebnisse beeinflussen. Es werden dabei die Ausnutzungsgrade nach dem Kerbspannungskonzept für t = 25 mm mit und ohne Nahtaufweitung für alle berechneten Fälle graphisch dargestellt und mit dem Nennspannungskonzept verglichen (vgl. Diagramm 35 und Diagramm 36). In Diagramm 37 sind die Ausnutzungsgrade nach den drei Ermüdungskonzepten (Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept) für t = 25 mm und t = 50 mm für die Fälle t_s/t = 1 und h_s/t_s = 3.5 abgebildet. In Diagramm 38 sind dieselben Ergebnisse für t = 75 mm, t_s/t = 1 und h_s/t_s = 3.5 und 7 dargestellt.

▪ **Vergleich $t = 25$ mm mit und ohne Nahtaufweitung nach dem Kerbspannungskonzept**

Im Diagramm 35 sind die Ausnutzungsgrade nach dem Kerbspannungskonzept für die Fälle $t_s/t = 1, 2$ und $h_s/t_s = 3.5, 7$ und 14 mit der Wanddicke $t = 25$ mm gezeigt. Hierbei ist deutlich zu sehen, dass die Ausnutzungsgrade für die Fälle $t_s/t = 2$ höher sind als für die Fälle $t_s/t = 1$. Dabei überschreitet, bis auf einem Fall ($r_i/t = 20, h_s/t_s = 14$ und $t_s/t = 2$), keiner dem AG mittels Nennspannung. Das Kerbspannungskonzept sagt hierbei eine längere Lebensdauer voraus als das Nenn- und Strukturspannungskonzept.

Vergleicht man die Ergebnisse aus Diagramm 35 (AG mit Nahtaufweitung) und Diagramm 36 (AG ohne Nahtaufweitung) lässt sich deutlich erkennen, dass bei Nichtberücksichtigung der Nahtaufweitung beim FE-Modell die Ausnutzungsgrade deutlich geringer sind. Wenn das Kerbspannungskonzept für zukünftige Berechnungen herangezogen wird, muss auch die Naht mitmodelliert werden, da diese für die Sicherheit der Ergebnisse nach diesem Konzept wichtig ist. Man würde ansonsten möglicherweise die Ermüdungstragfähigkeit überschätzen.

Die strichlierten Linien stellen das Verhältnis Ringsteifendicke zu Rohrwanddicke $t_s/t = 2$ und die vollen Linien $t_s/t = 1$ dar.

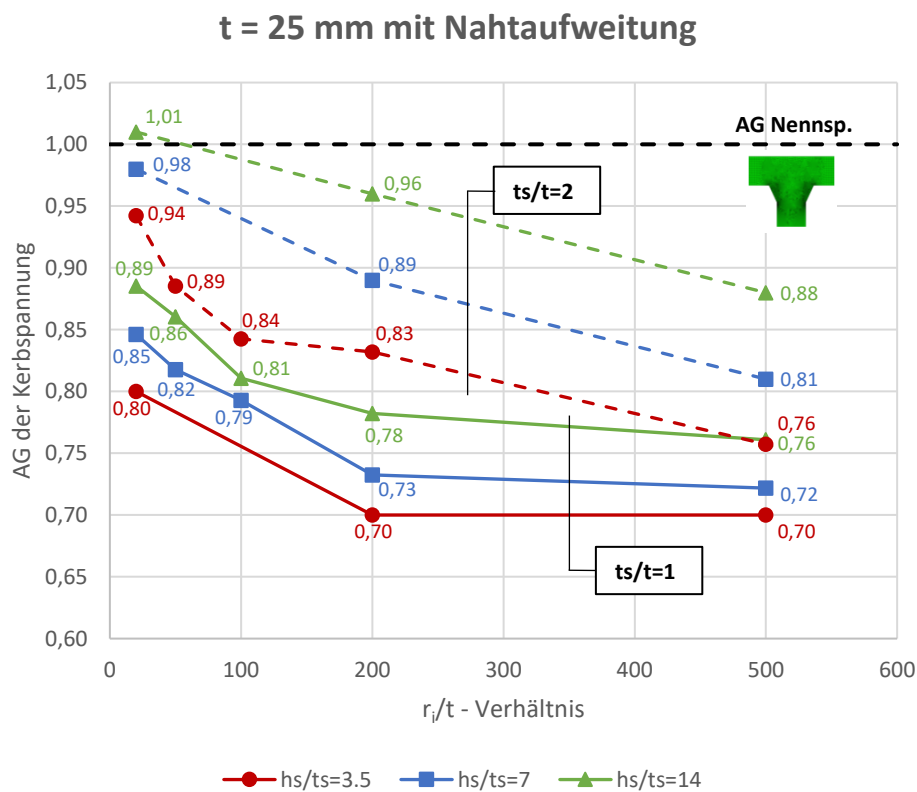


Diagramm 35: AG der Kerbspannungen Ringsteifenanschluss für $t = 25$ mm mit Nahtaufweitung für die Fälle $t_s/t = 1$ und 2 , $h_s/t_s = 3.5, 7$ und 14

t = 25 mm ohne Nahtaufweitung

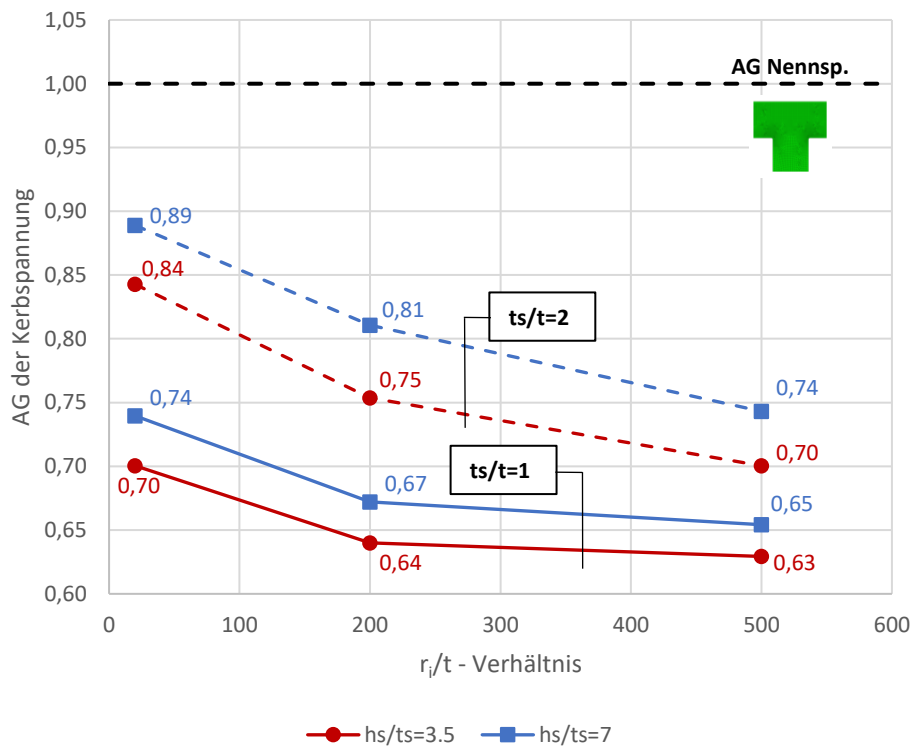


Diagramm 36: AG der Kerbspannungen Ringstiefenanschluss für t = 25 mm ohne Nahtaufweitung für die Fälle $t_s/t = 1$ und 2 , $h_s/t_s = 3.5$ und 7

▪ Vergleich t = 25, 50 und 75 mm nach den drei Ermüdungskonzepten

Im Diagramm 37 sind die Ausnutzungsgrade nach den drei Ermüdungskonzepten (Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept) für die Fälle $t_s/t = 1$ und $h_s/t_s = 3.5$ mit der Wanddicke t = 25 mm und t = 50 mm gezeigt. Die strichlierten Linien stellen dabei die Ausnutzungsgrade für t = 25 mm und die vollen Linien die Ausnutzungsgrade für t = 50 mm dar. Es ist dabei anzumerken, dass die Ausnutzungsgrade AG_{hs} , AG_{hs1} und AG_{hs2} nach dem Strukturspannungskonzept für t = 25 mm den gleichen Wert haben, da hier kein Blechdickeneffekt ($k_{s,\alpha} = 1$) einfließt und deshalb nur eine Linie, hier in blau für AG_{hs} , dargestellt ist.

In Diagramm 38 sind ebenfalls die Ausnutzungsgrade nach den drei Konzepten, für die Fälle $t_s/t = 1$ und $h_s/t_s = 3.5, 7$ mit der Wanddicke 75 mm abgebildet.

Die roten Linien mit kreisförmigen Icons stellen dabei den AG_{Kerb} nach dem Kerbspannungskonzept dar; die blauen Linien mit quadratischen Icons AG_{hs} ohne Berücksichtigung des Blechdickeneffekts, die grünen Linien mit dreiecksförmigen Icons AG_{hs1} sowie die gelben Linien mit um 45° gedrehten quadratischen Icons AG_{hs2} unter Berücksichtigung des Blechdickeneffekts (einmal nach der aktuellen Norm und einmal nach dem zweiten Entwurf der künftig neuen Norm) nach dem Strukturspannungskonzept dar. Die horizontale strichlierte Linie mit dem Wert eins stellt das Nennspannungskonzept dar.

Es ist deutlich zu sehen, wie schon mehrmals erwähnt, dass das Kerbspannungskonzept die kleinsten Ausnutzungsgrade liefert und deshalb die Ermüdungstragfähigkeiten am größten sind. Es ist auch zu erkennen, dass die AG_{hs} ohne Berücksichtigung des Blechdickeneffekts sich mit größerer Wanddicke t mehr dem Kerbspannungskonzept nähern und vom Nennspannungskonzept abweichen (vgl. Diagramm 37 und Diagramm 38).

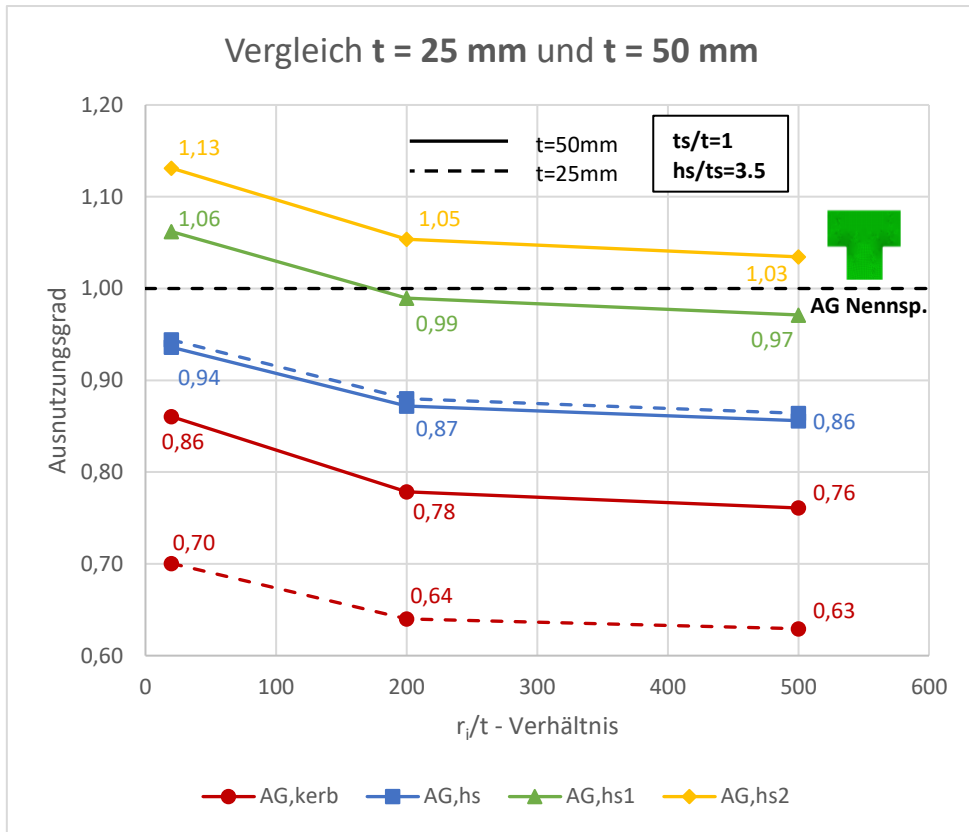


Diagramm 37: Ausnutzungsgrade nach den drei Ermüdungskonzepten für $t = 25$ und 50 mm für die Fälle $t_s/t = 1$, $h_s/t_s = 3.5$

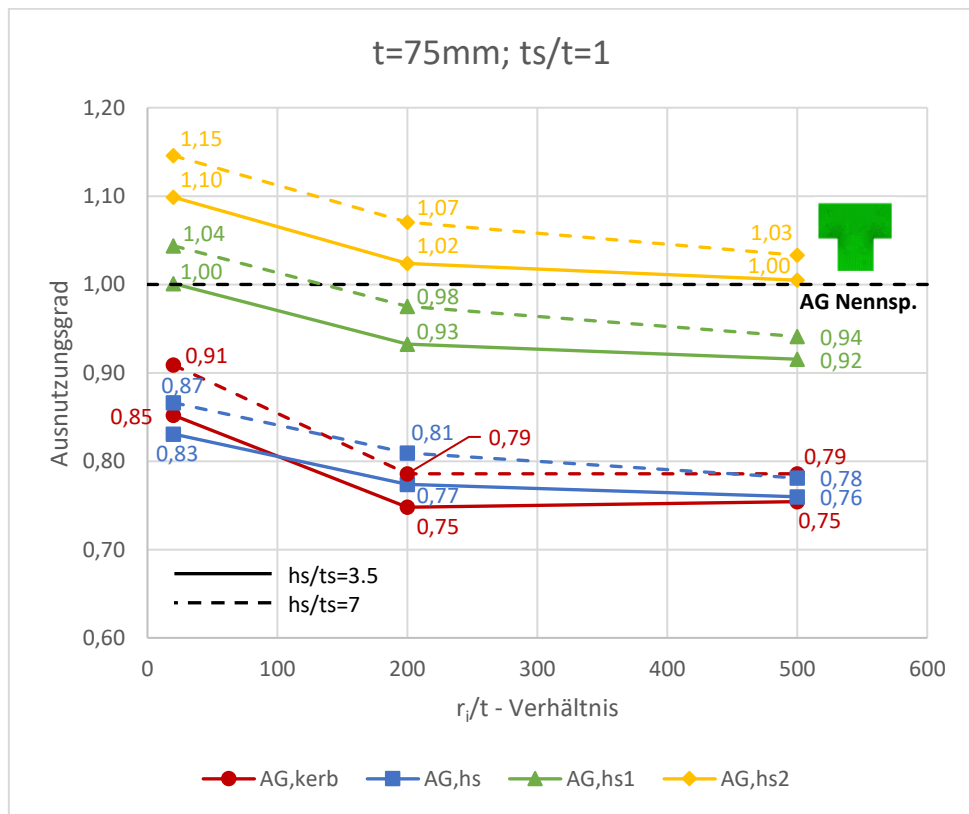


Diagramm 38: Ausnutzungsgrade nach den drei Ermüdungskonzepten für $t = 75 \text{ mm}$ für die Fälle $t_s/t = 1$, $h_s/t_s = 3.5, 7$

5.2. Detail 2 – Wanddickensprung

5.2.1. Ermüdungsfestigkeiten nach Eurocode EN 1993-1-9

- **Nennspannungskonzept**

Für die Ermittlung der Kerbfälle nach dem Nennspannungskonzept wird auch bei diesem Detail der zweite Entwurf des Eurocodes EN 1993-1-9 (2020) [4] herangezogen (vgl. untere Abb. 23):

Table 9.4: Transverse butt welds (full penetration) (continued)


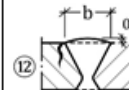
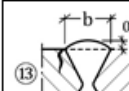


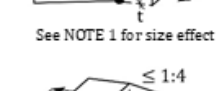
Detail category	Constructional detail	Symbol	Description	Supplementary Requirements
112		$\nabla \times K$	⑪ Full cross-section butt welds of rolled sections of same dimensions without tolerance difference, ground flush, without cope holes	Rolled sections cut and rewelded. See Detail ①.
90		$\nabla \times K$	⑫ as forementioned, but as-welded with weld convexity of $\leq 10\%$ of weld width and with tolerance differences	See Detail ②.
63		$\nabla \times K$	⑬ as forementioned, but as-welded with weld convexity of $\leq 20\%$ of weld width and with tolerance differences	See Detail ③.
112	 Taper in thickness	$\nabla \times K$	⑭ Transverse splices in plates or flats tapered in width or in thickness with slope 1:4, welded from both sides, ground flush	See Detail ④. $\Delta\sigma$ based on direct stress in the thinner parent material. See Notes 3 and 4.
90	 Taper in thickness	$\nabla \times K$	⑮ as forementioned, but as-welded with weld convexity of $\leq 10\%$ of weld width <Welded in flat position?>	See Details ②. Weld toes blended smoothly. See Notes 3 and 4.
			⑯ Transverse splices in plates or flats tapered in width or in thickness with slope 1:4 (including misalignment)	See Detail ④. $\Delta\sigma$ based on direct stress in the thinner parent material
<p>NOTE 1 Size effect for $t > 25$ mm should be considered by stress modification with $k_s = (25/t)^{0.2}$ where t is the thinner plate thickness in mm for which the stress range is calculated.</p> <p>NOTE 2 Misalignment due to fabrication $\leq 5\%$ of plate thickness. Greater misalignment is considered by appropriate nominal stress modification, see Annex C, (7).</p> <p>NOTE 3 Details ⑭ to ⑯ and ⑰ are also applicable for girder flanges (see Fig. C.1 and C.2).</p> <p>NOTE 4 For Details ⑭ to ⑯ and ⑰, as parts of girder flanges in bending, the modified stress range approach should be used. Recommended stress concentration factors k_s are provided by Annex C.</p>				

Abb. 23: Ausschnitt vom Kerbfalkatalog im Eurocode 1993-1-9:2020 (zweiter Entwurf) für Berechnung nach dem Nennspannungskonzept für Wanddickensprung [4]

Es ist anzumerken, dass es sich in der obigen Abbildung nur um einen Ausschnitt des Kerbfalkataloges handelt und hierbei nicht alle Kerbfälle, die keine Relevanz für diese Arbeit haben, gezeigt werden.

Der in Rot eingerahmte Kerbfall 112 (vgl. Abb. 23) entspricht dem des Wanddickensprunges und wird für den Ermüdungsnachweis nach dem Nennspannungskonzept ($\Delta\sigma_{R,nenn} = 112 \text{ N/mm}^2$) herangezogen.

Der Eurocode 1993-1-9:2020 [4] merkt dabei an, dass der Blechdickeeffekt mit $k_s = (25/t)^{0.2}$ für $t > 25$ mm im Nennspannungskonzept zu berücksichtigen ist, wobei t als die dünnere Blechdicke definiert ist (vgl. Note 1 in Abb. 23).

Weiters schreibt der Eurocode für dieses Detail Wanddickensprung vor, das modifizierte Nennspannungskonzept anzuwenden (vgl. Note 4) und verweist auf einen anzuwendenden

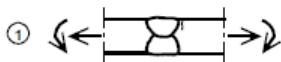
Spannungskonzentrationsfaktor k_F , der die Exzentrizitäten und die daraus resultierenden zusätzlichen Biegespannungen berücksichtigt:

$$k_F = \left(1 + \frac{3 * \left(\frac{t_2}{t_1} - 1 \right)}{1 + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^{1,50}} \right)$$

▪ **Strukturspannungskonzept**

Im Anhang B in Tabelle B.1 vom neuen Eurocode EN 1993-1-9 (2020) [4] sind die Kerbfälle nach dem Strukturspannungskonzept zu finden (vgl. Abb. 24).

Table B.1: Detail categories for use with hot spot stress method

Detail category	α	Constructional detail	Description	Requirements
112	0.1		1) Full penetration butt joint.	1) All welds ground flush to plate surface parallel to direction of the arrow. Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed, plate edges to be ground flush in direction of stress. Welded from both sides, checked by NDT. For misalignment see NOTE 1.

NOTE 1 Table B.1 does not cover effects of misalignment corresponding to the tolerances from EN 1090-2, except if the stress increase due to misalignment is negligible (5% or less). In this case the hot spot stress can be assumed to be equal to the nominal stress. In any other case, the tolerances either from EN 1090-2 or project specific have to be considered explicitly in determination of the hot spot stress.

NOTE 2 Table B.1 does not cover fatigue initiation from the root followed by propagation through the throat. In this case either nominal or effective notch stress method (see Annex C) should be applied.

NOTE 3 For the definition of the weld toe angle see EN 1090-2.

Abb. 24: Ausschnitt vom Kerbfallkatalog im Eurocode 1993-1-9:2020 (zweiter Entwurf) für Berechnung nach dem Strukturspannungskonzept für Wanddickensprung [4]

Es ist anzumerken, dass es sich in der obigen Abbildung nur um einen Ausschnitt des Kerbfallkataloges handelt und hierbei nicht alle Kerbfälle, die keine Relevanz für diese Arbeit haben, gezeigt werden.

Der in Rot eingerahmte Kerbfall 112 (vgl. Abb. 24), welcher eine beidseitig beschliffene Naht darstellt, entspricht dem des Wanddickensprunges und wird für den Ermüdungsnachweis nach dem Strukturspannungskonzept ($\Delta\sigma_{R,hs} = 112 \text{ N/mm}^2$) herangezogen. Es fällt auf, dass dies der gleiche Kerbfall wie nach dem Nennspannungskonzept ist.

Der Eurocode 1993-1-9:2020 [4] merkt dabei an, dass die in Tabelle B.1 abgebildeten Kerbfälle die Effekte von unvermeidbaren Kantenversätzen und Exzentrizitäten nicht berücksichtigen (vgl. Note 1 „effects of misalignment“ in Abb. 24).

Weiter ist der Exponent α im $k_{s,\alpha}$ -Faktor mit 0.1 angegeben, woraus sich folgende Formel für die Berücksichtigung des Blechdickeeffekts nach dem Strukturspannungskonzept ergibt:

$$k_{s,\alpha} = \left(\frac{25}{t_1} \right)^{0,10}$$

▪ **Kerbspannungskonzept**

Hierbei wird der Kerbfall 225 ($\Delta\sigma_{R,Kerb} = 225 \text{ N/mm}^2$) herangezogen, der für alle Schweißnahtausführungen gilt und vorhin schon im Kapitel 5.1.1. beim Ringsteifenanschluss beschrieben wurde (vgl. Abb. 22).

5.2.2. Ergebnisse für Wanddicke $t_1 = 25 \text{ mm}$

In diesem Unterkapitel sind alle Ergebnisse der numerischen Berechnungen nach dem Struktur- und Kerbspannungskonzept für den Wanddickensprung mit der Wanddicke $t = 25 \text{ mm}$ angeführt. Die Nennspannung $\Delta\sigma_{Nenn,m=0}$ mit 112 N/mm^2 wurde so gewählt, dass sich nach dem Nennspannungskonzept ein Ausnutzungsgrad von 1.00 ergibt. Das Struktur- und Kerbspannungskonzept können so besser mit dem Nennspannungskonzept verglichen werden.

Im Anhang C vom Eurocode 1993-1-9:2020 [4] wird darauf hingewiesen, dass das Kerbspannungskonzept für milde Kerben nicht herangezogen werden sollte, da dies zu einer Überschätzung der Ermüdungstragfähigkeit aufgrund von unberücksichtigten Exzentrizitäten führen kann. Eine milde Kerbe liegt laut spannungstechnischer Definition vor, wenn die Kerbspannung kleiner als zweimal der Nennspannung ist. In diesem Fall müssen unplanmäßige Exzentrizitäten berücksichtigt werden (vgl. Abb. 25). Die rot hinterlegten Ausnutzungsgrade nach dem Kerbspannungskonzept in den nachfolgenden Tabellen definieren diese milden Kerben und dürfen für weitere Berechnungen nicht herangezogen werden.

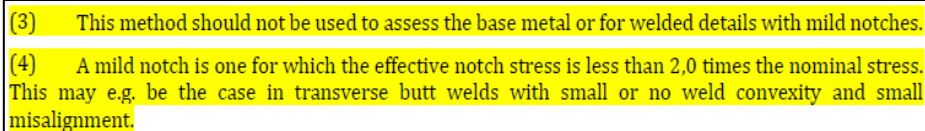


Abb. 25: Auszug aus Anhang C im Eurocode EN 1993-1-9:2020 (zweiter Entwurf) – Hinweise für die Verwendung vom Kerbspannungskonzept [4]

Vergleicht man die Spannungskonzentrationsfaktoren vom Struktur- und Kerbspannungskonzept k_f und k_t in Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17 ist zu sehen, dass diese mit größerem r_i/t_1 -Verhältnis zunehmen, was in weiterer Folge zu höheren Ausnutzungsgraden bzw. niedrigeren Ermüdungstragfähigkeiten führt. Beim Ringsteifenanschluss war das Umgekehrte der Fall. Die Erhöhung der Spannungskonzentrationsfaktoren aufgrund der r_i/t_1 -Verhältnisse für die Fälle $t_2/t_1 = 1.2$ fällt nur minimal aus (vgl. Tabelle 15). Bei größeren Wanddickenverhältnissen $t_2/t_1 = 1.5$ (vgl. Tabelle 16) bzw. $t_2/t_1 = 2$ (vgl. Tabelle 17) nehmen die Konzentrationsfaktoren in Abhängigkeit der r_i/t_1 -Verhältnisse signifikant zu.

Weiters ist zu bemerken, dass die Spannungskonzentrationsfaktoren bei flacher Fase 1:5.5 bzw. 1:10 stark abnehmen und soweit führen können, dass das Kerbspannungskonzept verworfen werden muss ($\frac{\Delta\sigma_{Kerb}}{\Delta\sigma_{Nenn}} \leq 2.0$). Ansonsten könnte es, wie schon beschrieben, zu einer Überschätzung der Ermüdungstragfähigkeit führen. Die Abnahme der Spannungen bei flacher Fase ist darauf zurückzuführen, dass aufgrund der verlaufenden Ausmitte e der Anteil der Biegespannungen kleiner ist.

Die Ermüdungstragfähigkeiten nach dem Kerbspannungskonzept (AG_{Kerb}) sind für alle Fälle $t_2/t_1 = 1.2, 1.5$ und 2 (vgl. Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17) um einiges höher als die vom Nenn- und Strukturspannungskonzept (AG_{Nenn}, AG_{hs} und $AG_{hs,1}$). Das Strukturspannungskonzept liefert dabei sehr ähnliche Ergebnisse wie das Nennspannungskonzept. Das r_i/t_1 -Verhältniss von 500 spiegelt hierbei den ebenen Fall wider und passt, wie es auch sein sollte, am besten zum Nennspannungskonzept. Das Nennspannungskonzept, wie schon beschrieben, ist nämlich nur für stabförmige Bauteile gedacht.

Bei größerem Wanddickenverhältnis $t_2/t_1 = 1.5$ (vgl. Tabelle 16) nehmen die Spannungskonzentrationsfaktoren des Strukturspannungskonzepts sowie des Kerbspannungskonzepts rasant zu und weisen deswegen niedrigere Ermüdungstragfähigkeiten auf. Bei $t_2/t_1 = 2$ (vgl. Tabelle 17) ist der gleiche Trend zu erkennen.

$\Delta\sigma_{nenn} = 112 \frac{N}{mm^2}$		$t_2/t_1=1.2; 1:x=1:4$									
		Nennspannung			Strukturspannung			Kerbspannung			
		$\frac{r_i}{t_1}$	$AG_{nenn,m=0}$	k_F	AG_{nenn}	k_f	AG_{hs}	$AG_{hs,1}$	k_t	AG_{Kerb}	
		$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	$(1 + \frac{3 * (\frac{t_2}{t_1} - 1)}{1 + (\frac{t_2}{t_1})^{1.50}})$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_F}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$		
$t_1=25mm$	$k_s = \left(\frac{25}{t_1}\right)^{0.20} = 1.00; k_{s,\alpha} = \left(\frac{25}{t_1}\right)^{0.10} = 1.00$	20	1.00	1.26	1.26	1.23	1.23	1.23	2.03	1.01	
		50	1.00	1.26	1.26	1.25	1.25	1.25	2.05	1.02	
		100	1.00	1.26	1.26	1.25	1.25	1.25	2.05	1.02	
		200	1.00	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	2.07	1.03	
		500	1.00	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	2.07	1.03	
		$t_2/t_1=1.2; 1:x=1:5.5$									
		20	1.00	1.26	1.26	1.22	1.22	1.22	1.85	0.92	
		200	1.00	1.26	1.26	1.25	1.25	1.25	1.89	0.94	
		500	1.00	1.26	1.26	1.25	1.25	1.25	1.88	0.94	
		$t_2/t_1=1.2; 1:x=1:10$									
		20	1.00	1.26	1.26	1.19	1.19	1.19	1.57	0.78	
		50	1.00	1.26	1.26	1.21	1.21	1.21	1.60	0.80	
		100	1.00	1.26	1.26	1.23	1.23	1.23	1.62	0.81	
		200	1.00	1.26	1.26	1.24	1.24	1.24	1.62	0.81	
		500	1.00	1.26	1.26	1.24	1.24	1.24	1.65	0.82	

Tabelle 15: Spannungskonzentrationsfaktoren und Ausnutzungsgrade für $t_1 = 25$ mm für die Fälle $t_2/t_1 = 1.2$ und Fasen $1:x = 1:4, 1:5.5, 1:10$

$\Delta\sigma_{nenn} = 112 \frac{N}{mm^2}$		$t_2/t_1=1.5; 1:x=1:4$									
		Nennspannung			Strukturspannung			Kerbspannung			
		$\frac{r_i}{t_1}$	$AG_{nenn,m=0}$	k_F	AG_{nenn}	k_f	AG_{hs}	$AG_{hs,1}$	k_t	AG_{Kerb}	
		$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	$(1 + \frac{3 * (\frac{t_2}{t_1} - 1)}{1 + (\frac{t_2}{t_1})^{1.50}})$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_F}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$		
$t_1=25mm$	$k_s = \left(\frac{25}{t_1}\right)^{0.20} = 1.00; k_{s,\alpha} = \left(\frac{25}{t_1}\right)^{0.10} = 1.00$	20	1.00	1.53	1.53	1.41	1.41	1.41	2.34	1.16	
		50	1.00	1.53	1.53	1.46	1.46	1.46	2.42	1.20	
		100	1.00	1.53	1.53	1.49	1.49	1.49	2.45	1.22	
		200	1.00	1.53	1.53	1.51	1.51	1.51	2.48	1.23	
		500	1.00	1.53	1.53	1.52	1.52	1.52	2.50	1.24	
		$t_2/t_1=1.5; 1:x=1:5.5$									
		20	1.00	1.53	1.53	1.36	1.36	1.36	2.08	1.04	
		200	1.00	1.53	1.53	1.48	1.48	1.48	2.25	1.12	
		500	1.00	1.53	1.53	1.50	1.50	1.50	2.25	1.12	
		$t_2/t_1=1.5; 1:x=1:10$									
		20	1.00	1.53	1.53	1.25	1.25	1.25	1.67	0.83	
		50	1.00	1.53	1.53	1.34	1.34	1.34	1.77	0.88	
		100	1.00	1.53	1.53	1.39	1.39	1.39	1.85	0.92	
		200	1.00	1.53	1.53	1.43	1.43	1.43	1.88	0.94	
		500	1.00	1.53	1.53	1.46	1.46	1.46	1.94	0.97	

Tabelle 16: Spannungskonzentrationsfaktoren und Ausnutzungsgrade für $t_1 = 25$ mm für die Fälle $t_2/t_1 = 1.5$ und Fasen $1:x = 1:4, 1:5.5, 1:10$

$\Delta\sigma_{nenn} = 112 \frac{N}{mm^2}$		$t_2/t_1=2; 1:x=1:4$								
		Nennspannung			Strukturspannung			Kerbspannung		
		$\frac{r_i}{t_1}$ $\frac{AG_{nenn,m=0}}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	k_F $\frac{3 * (\frac{t_2}{t_1} - 1)}{1 + (\frac{t_2}{t_1})^{1.50}}$	AG_{nenn} $\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_F}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	k_f -	AG_{hs} $\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$AG_{hs,1}$ $\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha}}$	k_t -	AG_{Kerb} $\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$	
$t_1=25mm$	$k_s = \left(\frac{25}{t_1}\right)^{0.20} = 1.00 ; k_{s,\alpha} = \left(\frac{25}{t_1}\right)^{0.10} = 1.00$	20	1.00	1.78	1.78	1.52	1.52	1.52	2.54	1.26
		50	1.00	1.78	1.78	1.63	1.63	1.63	2.71	1.35
		100	1.00	1.78	1.78	1.69	1.69	1.69	2.80	1.39
		200	1.00	1.78	1.78	1.73	1.73	1.73	2.87	1.43
		500	1.00	1.78	1.78	1.77	1.77	1.77	2.91	1.45
		$t_2/t_1=2; 1:x=1:5.5$								
		20	1.00	1.78	1.78	1.42	1.42	1.42	2.19	1.09
		200	1.00	1.78	1.78	1.69	1.69	1.69	2.57	1.28
		500	1.00	1.78	1.78	1.74	1.74	1.74	2.61	1.30
		$t_2/t_1=2; 1:x=1:10$								
		20	1.00	1.78	1.78	1.24	1.24	1.24	1.65	0.82
		50	1.00	1.78	1.78	1.38	1.38	1.38	1.83	0.91
		100	1.00	1.78	1.78	1.49	1.49	1.49	1.98	0.99
		200	1.00	1.78	1.78	1.58	1.58	1.58	2.07	1.03
		500	1.00	1.78	1.78	1.65	1.65	1.65	2.19	1.09

Tabelle 17: Spannungskonzentrationsfaktoren und Ausnutzungsgrade für $t_1 = 25mm$ für die Fälle $t_2/t_1 = 2$ und Fasen $1:x = 1:4, 1:5.5, 1:10$

5.2.3. Ergebnisse für Wanddicke $t_1 = 50 mm$

In Tabelle 18, Tabelle 19 und Tabelle 20 sind die Spannungskonzentrationsfaktoren (k_f und k_t) und Ausnutzungsgrade nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für die Wanddicke $t_1 = 50 mm$ tabelliert. Tabelle 18 zeigt dabei die Ergebnisse für $t_2/t_1 = 1.2$ und die Fasen $1:x = 1:4, 1:5.5, 1:10$, Tabelle 19 für $t_2/t_1 = 1.5$ und die Fasen $1:x = 1:4, 1:5.5, 1:10$ und Tabelle 20 zeigt diese für $t_2/t_1 = 1.5$ und die Fasen $1:x = 1:4, 1:5.5, 1:10$. Wie man sieht, wurde hierbei lediglich die Wanddicke t_1 verändert bzw. die vorherigen Modelle von $t_1 = 25 mm$ mit dem Faktor zwei skaliert.

Auch hierbei wurde $\Delta\sigma_{nenn}$ so gewählt, dass sich beim Nennspannungskonzept $AG_{nenn,m=0}$ ein Ausnutzungsgrad von 1.00 ergibt, um so das Struktur- und Kerbspannungskonzept besser mit dem Nennspannungskonzept vergleichen zu können. $M = 0$ bedeutet, dass keine Exzentrizitäten berücksichtigt werden. $\Delta\sigma_{nenn}$ beträgt in diesem Fall $= 112 * k_s = 112 * (25/50)^{0.2} = 97.44 N/mm^2$.

Betrachtet man die Ausnutzungsgrade AG_{hs} und $AG_{hs,1}$ nach dem Strukturspannungskonzept, lässt sich erkennen, dass durch Berücksichtigung des Blechdickeneffektes $k_{s,\alpha}$, die Ermüdungstragfähigkeiten sinken bzw. die Ausnutzungsgrade höher werden und sich dem Nennspannungskonzept nähern (vgl. Tabelle 18, Tabelle 19 und Tabelle 20). AG_{hs} definiert dabei den Ausnutzungsgrad nach dem Strukturspannungskonzept ohne Berücksichtigung des Blechdickeneffektes und $AG_{hs,1}$ den Ausnutzungsgrad mit Blechdickeneffekt nach dem Eurocode 1993-1-9:2020 (zweiter Entwurf) [4], wo der Exponent im $k_{s,\alpha}$ -Faktor mit 0.10 festgelegt ist und die beschliffene Naht berücksichtigt.

Vergleicht man die nachfolgenden Tabellen mit denen aus dem vorherigen Kapitel für $t_1 = 25 mm$ ist zu erkennen, dass die Strukturspannungsfaktoren exakt dieselben sind. Daraus ist zu schließen, dass wie beim Ringsteifenanschluss auch hier die Wanddicke t_1 keinen Einfluss auf die Strukturspannungen hat.

Lediglich die Kerbspannung steigt an und verfolgt den gleichen Trend wie bei $t_1 = 25$ mm: Die Kerbspannungen nehmen bei flacher Fase ab. Weiters ist zu erkennen, dass die Ausnutzungsgrade des Strukturspannungskonzepts für $t_1 = 50$ mm, die des Nennspannungskonzepts nicht so eindeutig wiedergeben wie bei $t_1 = 25$ mm. Diese driften voneinander ab (vgl. als Beispiel Tabelle 20 und Tabelle 17 - $t_2/t_1=2$).

Die rot hinterlegten Ausnutzungsgrade nach dem Kerbspannungskonzept dürfen nicht zur weiteren Berechnung herangezogen werden und fallen weg, da hier, wie schon beschrieben, die Ermüdungstragfähigkeit überschätzt werden könnte.

$\Delta\sigma_{nenn} = 97.44 \frac{N}{mm^2}$		$t_2/t_1=1.2; 1:x=1:4$									
		Nennspannung			Strukturspannung			Kerbspannung			
		$\frac{r_i}{t_1}$	$AG_{nenn,m=0}$	k_F	AG_{nenn}	k_f	AG_{hs}	$AG_{hs,1}$	k_t	AG_{Kerb}	
		$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	$(1 + \frac{3 * (\frac{t_2}{t_1} - 1)}{1 + (\frac{t_2}{t_1})^{1.50}})$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$		
$t_1=50$mm	$k_s = (\frac{25}{t_1})^{0.20} = 0.87; k_{s,\alpha} = (\frac{25}{t_1})^{0.10} = 0.93$	20	1.00	1.26	1.26	1.23	1.07	1.15	2.23	0.97	
		200	1.00	1.26	1.26	1.26	1.10	1.17	2.26	0.98	
		500	1.00	1.26	1.26	1.26	1.10	1.17	2.25	0.97	
		$t_2/t_1=1.2; 1:x=1:5.5$									
		20	1.00	1.26	1.26	1.22	1.06	1.14	1.96	0.85	
		200	1.00	1.26	1.26	1.25	1.09	1.17	2.02	0.87	
		500	1.00	1.26	1.26	1.25	1.09	1.17	2.02	0.87	
		$t_2/t_1=1.2; 1:x=1:10$									
		20	1.00	1.26	1.26	1.19	1.04	1.11	1.63	0.71	
	200	1.00	1.26	1.26	1.24	1.08	1.16	1.70	0.74		
	500	1.00	1.26	1.26	1.24	1.09	1.17	1.70	0.74		

Tabelle 18: Spannungskonzentrationsfaktoren und Ausnutzungsgrade für $t_1 = 50$ mm für die Fälle $t_2/t_1 = 1.2$ und Fasen $1:x = 1:4, 1:5.5, 1:10$

$\Delta\sigma_{nenn} = 97.44 \frac{N}{mm^2}$		$t_2/t_1=1.5; 1:x=1:4$									
		Nennspannung			Strukturspannung			Kerbspannung			
		$\frac{r_i}{t_1}$	$AG_{nenn,m=0}$	k_F	AG_{nenn}	k_f	AG_{hs}	$AG_{hs,1}$	k_t	AG_{Kerb}	
		$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	$(1 + \frac{3 * (\frac{t_2}{t_1} - 1)}{1 + (\frac{t_2}{t_1})^{1.50}})$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$		
$t_1=50$mm	$k_s = (\frac{25}{t_1})^{0.20} = 0.87; k_{s,\alpha} = (\frac{25}{t_1})^{0.10} = 0.93$	20	1.00	1.53	1.53	1.40	1.22	1.31	2.56	1.11	
		200	1.00	1.53	1.53	1.50	1.31	1.40	2.71	1.17	
		500	1.00	1.53	1.53	1.51	1.31	1.41	2.72	1.18	
		$t_2/t_1=1.5; 1:x=1:5.5$									
		20	1.00	1.53	1.53	1.36	1.18	1.27	2.20	0.95	
		200	1.00	1.53	1.53	1.48	1.29	1.38	2.40	1.04	
		500	1.00	1.53	1.53	1.50	1.31	1.40	2.42	1.05	
		$t_2/t_1=1.5; 1:x=1:10$									
		20	1.00	1.53	1.53	1.25	1.09	1.17	1.73	0.75	
	200	1.00	1.53	1.53	1.43	1.24	1.33	1.98	0.86		
	500	1.00	1.53	1.53	1.47	1.28	1.37	2.01	0.87		

Tabelle 19: Spannungskonzentrationsfaktoren und Ausnutzungsgrade für $t_1 = 50$ mm für die Fälle $t_2/t_1 = 1.5$ und Fasen $1:x = 1:4, 1:5.5, 1:10$

$\Delta\sigma_{nenn} = 97,44 \frac{N}{mm^2}$		$t_2/t_1=2; 1:x=1:4$								
		Nennspannung			Strukturspannung			Kerbspannung		
		$\frac{r_i}{t_1}$ $\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	k_F $(1 + \frac{3 * (\frac{t_2}{t_1} - 1)}{(\frac{t_2}{t_1})^{1,50}})$	AG_{nenn} $\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_F}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	k_f -	AG_{hs} $\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$AG_{hs,1}$ $\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha}}$	k_t -	AG_{Kerb} $\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$	
$t_1=50mm$	$k_s = (\frac{25}{t_1})^{0,20} = 0,87; k_{s,\alpha} = (\frac{25}{t_1})^{0,10} = 0,93$	20	1.00	1.78	1.78	1.51	1.31	1.41	2.78	1.20
		200	1.00	1.78	1.78	1.73	1.51	1.61	3.13	1.36
		500	1.00	1.78	1.78	1.76	1.53	1.64	3.17	1.37
		$t_2/t_1=2; 1:x=1:5.5$								
		20	1.00	1.78	1.78	1.42	1.24	1.32	2.31	1.00
		200	1.00	1.78	1.78	1.69	1.47	1.58	2.74	1.19
		500	1.00	1.78	1.78	1.73	1.51	1.61	2.80	1.21
		$t_2/t_1=2; 1:x=1:10$								
		20	1.00	1.78	1.78	1.24	1.08	1.16	1.72	0.74
		200	1.00	1.78	1.78	1.58	1.37	1.47	2.18	0.94
		500	1.00	1.78	1.78	1.66	1.44	1.55	2.27	0.98

Tabelle 20: Spannungskonzentrationsfaktoren und Ausnutzungsgrade für $t_1 = 50$ mm für die Fälle $t_2/t_1 = 2$ und Fasen $1:x = 1:4, 1:5.5, 1:10$

5.2.4. Ergebnisse für Wanddicke $t_1 = 75$ mm

In Tabelle 21, Tabelle 22 und Tabelle 23 sind die Spannungskonzentrationsfaktoren (k_f und k_t) und Ausnutzungsgrade nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für die Wanddicke $t_1 = 75$ mm tabelliert. Die Geometrieverhältnisse bleiben die gleichen wie für $t_1 = 25$ und 50 mm. Hierbei wurde lediglich wieder die Wanddicke t_1 verändert bzw. die vorherigen Modelle von $t_1 = 50$ mm mit dem Faktor 1.5 skaliert.

Auch hier wurde $\Delta\sigma_{nenn}$ so gewählt, dass sich beim Nennspannungskonzept $AG_{nenn,m=0}$ ein Ausnutzungsgrad von 1.00 ergibt, um so das Struktur- und Kerbspannungskonzept besser mit dem Nennspannungskonzept vergleichen zu können. $\Delta\sigma_{nenn}$ beträgt in diesem Fall 89.60 N/mm². $\Delta\sigma_{R,nenn} = \Delta\sigma_{R,hs} = 112$ N/mm² und $\Delta\sigma_{R,Kerb} = 225$ N/mm² sind für alle Fälle des Details Wanddickensprung gleich.

Betrachtet man die Ausnutzungsgrade AG_{hs} und $AG_{hs,1}$ nach dem Strukturspannungskonzept, lässt sich erkennen, dass durch Berücksichtigung des Blechdickeneffektes $k_{s,\alpha}$, die Ermüdungstragfähigkeiten sinken bzw. die Ausnutzungsgrade höher werden (vgl. Tabelle 21, Tabelle 22 und Tabelle 23), wie schon bei $t_1=50$ mm festgestellt wurde.

Wie schon erwähnt, verändern sich die Strukturspannungsfaktoren bei unterschiedlicher Rohrwanddicke auch für den Fall $t_1 = 75$ mm nicht, die Kerbspannungen sind jedoch für diesen Fall am größten.

Aufgrund des Blechdicken- bzw. Größeneffekts verringern sich die Ausnutzungsgrade der Strukturspannungen im Vergleich zu $t_1 = 50$ mm nur minimal. Vergleicht man beispielsweise $AG_{hs,1}$ aus Tabelle 18 ($t_1 = 50$ mm) mit $AG_{hs,1}$ aus Tabelle 21 ($t_1 = 75$ mm), also für die Fälle $t_2/t_1 = 1.2$, sinkt dieser bei einem r_i/t -Verhältnis = 20 von 1.15 auf 1.10, bei $r_i/t_1 = 200, 500$ von 1.17 auf 1.13. Für die Fälle $t_2/t_1 = 1.5$ und 2 ist das gleiche Muster zu erkennen. Die Ausnutzungsgrade nach dem Kerbspannungskonzept für $t_1 = 75$ mm sind annähernd die gleichen wie für $t_1 = 50$ mm (vgl. als Beispiel Tabelle 21 mit Tabelle 18 – $t_2/t_1 = 1.2$).

$\Delta\sigma_{nenn} = 89,60 \frac{N}{mm^2}$		$t_2/t_1=1.2; 1:x=1:4$								
		Nennspannung			Strukturspannung			Kerbspannung		
		$\frac{r_i}{t_1}$	$AG_{nenn,m=0}$	k_F	AG_{nenn}	k_f	AG_{hs}	$AG_{hs,1}$	k_t	AG_{Kerb}
		$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	$(1 + \frac{3 * (\frac{t_2}{t_1} - 1)}{1 + (\frac{t_2}{t_1})^{1.50}})$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_F}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$	
$t_1=75mm$	$k_s = (\frac{25}{t_1})^{0,20} = 0,80 ; k_{s,\alpha} = (\frac{25}{t_1})^{0,10} = 0,90$	20	1.00	1.26	1.26	1.23	0.98	1.10	2.35	0.94
		200	1.00	1.26	1.26	1.26	1.01	1.13	2.38	0.95
		500	1.00	1.26	1.26	1.26	1.01	1.13	2.41	0.96
		$t_2/t_1=1.2; 1:x=1:5.5$								
		20	1.00	1.26	1.26	1.22	0.98	1.09	2.07	0.82
		200	1.00	1.26	1.26	1.25	1.00	1.12	2.11	0.84
		500	1.00	1.26	1.26	1.25	1.00	1.12	2.14	0.85
		$t_2/t_1=1.2; 1:x=1:10$								
		20	1.00	1.26	1.26	1.18	0.94	1.05	1.68	0.67
	200	1.00	1.26	1.26	1.24	0.99	1.11	1.75	0.70	
	500	1.00	1.26	1.26	1.24	0.99	1.11	1.77	0.70	

Tabelle 21: Spannungskonzentrationsfaktoren und Ausnutzungsgrade für $t_1 = 75$ mm für die Fälle $t_2/t_1 = 1.2$ und Fasen $1:x = 1:4, 1:5.5, 1:10$

$\Delta\sigma_{nenn} = 89,60 \frac{N}{mm^2}$		$t_2/t_1=1.5; 1:x=1:4$								
		Nennspannung			Strukturspannung			Kerbspannung		
		$\frac{r_i}{t_1}$	$AG_{nenn,m=0}$	k_F	AG_{nenn}	k_f	AG_{hs}	$AG_{hs,1}$	k_t	AG_{Kerb}
		$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	$(1 + \frac{3 * (\frac{t_2}{t_1} - 1)}{1 + (\frac{t_2}{t_1})^{1.50}})$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_F}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$	
$t_1=75mm$	$k_s = (\frac{25}{t_1})^{0,20} = 0,80 ; k_{s,\alpha} = (\frac{25}{t_1})^{0,10} = 0,90$	20	1.00	1.53	1.53	1.40	1.12	1.25	2.70	1.08
		200	1.00	1.53	1.53	1.50	1.20	1.34	2.87	1.14
		500	1.00	1.53	1.53	1.51	1.21	1.35	2.90	1.15
		$t_2/t_1=1.5; 1:x=1:5.5$								
		20	1.00	1.53	1.53	1.36	1.09	1.21	2.33	0.93
		200	1.00	1.53	1.53	1.48	1.18	1.32	2.51	1.00
		500	1.00	1.53	1.53	1.50	1.20	1.34	2.56	1.02
		$t_2/t_1=1.5; 1:x=1:10$								
		20	1.00	1.53	1.53	1.25	1.00	1.12	1.77	0.70
	200	1.00	1.53	1.53	1.43	1.14	1.28	2.01	0.80	
	500	1.00	1.53	1.53	1.46	1.17	1.30	2.07	0.82	

Tabelle 22: Spannungskonzentrationsfaktoren und Ausnutzungsgrade für $t_1 = 75$ mm für die Fälle $t_2/t_1 = 1.5$ und Fasen $1:x = 1:4, 1:5.5, 1:10$

$\Delta\sigma_{nenn} = 89,60 \frac{N}{mm^2}$		$t_2/t_1=2; 1:x=1:4$									
		Nennspannung			Strukturspannung			Kerbspannung			
		$\frac{r_i}{t_1}$	$AG_{nenn,m=0}$	k_F	AG_{nenn}	k_f	AG_{hs}	$AG_{hs,1}$	k_t	AG_{Kerb}	
	$\frac{\Delta\sigma_{nenn}}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	$(1 + \frac{3 * (\frac{t_2}{t_1} - 1)}{1 + (\frac{t_2}{t_1})^{1,50}})$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_F}{\Delta\sigma_{R,nenn} * k_s}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs}}$	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_f}{\Delta\sigma_{R,hs} * k_{s,\alpha}}$	-	$\frac{\Delta\sigma_{nenn} * k_t}{\Delta\sigma_{R,Kerb}}$			
$t_1=75mm$	$k_s = (\frac{25}{t_1})^{0,20} = 0,80; k_{s,\alpha} = (\frac{25}{t_1})^{0,10} = 0,90$	20	1.00	1.78	1.78	1.51	1.21	1.35	2.93	1.17	
		200	1.00	1.78	1.78	1.73	1.38	1.54	3.31	1.32	
		500	1.00	1.78	1.78	1.76	1.41	1.57	3.39	1.35	
		$t_2/t_1=2; 1:x=1:5.5$									
		20	1.00	1.78	1.78	1.42	1.14	1.27	2.45	0.98	
		200	1.00	1.78	1.78	1.69	1.35	1.51	2.86	1.14	
		500	1.00	1.78	1.78	1.73	1.38	1.54	2.96	1.18	
		$t_2/t_1=2; 1:x=1:10$									
		20	1.00	1.78	1.78	1.24	0.99	1.11	1.76	0.70	
		200	1.00	1.78	1.78	1.57	1.26	1.40	2.21	0.88	
		500	1.00	1.78	1.78	1.65	1.32	1.47	2.34	0.93	

Tabelle 23: Spannungskonzentrationsfaktoren und Ausnutzungsgrade für $t_1 = 75$ mm für die Fälle $t_2/t_1 = 2$ und Fasen $1:x = 1:4, 1:5.5, 1:10$

5.2.5. Graphische Darstellung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden einige von den zuvor tabellierten Ausnutzungsgraden in Form von Diagrammen gezeigt, um so mit einem Blick zu sehen, in welchem Bereich die einzelnen Ermüdungsnachweise liegen und wie die Geometrieparameter die Ergebnisse beeinflussen. Die schwarze horizontale strichlierte Linie stellt dabei das modifizierte Nennspannungskonzept dar; die blauen Linien mit kreisförmigen Icons das Strukturspannungskonzept und die roten Linien mit dreiecksförmigen Icons das Kerbspannungskonzept.

In Diagramm 39 sind die Ausnutzungsgrade nach dem Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept für $t_1 = 25$ mm und eine Fase von 1:4 in Abhängigkeit von den t_2/t_1 -Verhältnissen = 1.2, 1.5 und 2 und den r_i/t_1 -Verhältnissen dargestellt. Die vollen Linien stellen das t_2/t_1 -Verhältnis = 1.2 dar; die punktierten Linien das t_2/t_1 -Verhältnis = 1.5 und die strich-punktierten Linien das t_2/t_1 -Verhältnis = 2. Vergleicht man beispielweise die Ermüdungskonzepte für den Fall $t_2/t_1 = 1.2$ (volle Linien), sieht man, dass die AG des Strukturspannungskonzepts um einiges höher sind als die vom Kerbspannungskonzept. Das Strukturspannungskonzept liefert beim ebenen Fall ($r_i/t_1 = 500$) fast exakt dieselben Ergebnisse wie das Nennspannungskonzept.

Der Ausnutzungsgradverlauf bzw. Spannungsverlauf in Abhängigkeit der r_i/t_1 -Verhältnisse für den Fall $t_2/t_1 = 1.2$ ist nahezu horizontal und wird sozusagen nicht von den r_i/t_1 -Verhältnissen beeinflusst. Erst bei größeren Wanddickenverhältnissen ($t_2/t_1 = 1.5$) haben die r_i/t_1 -Verhältnisse in einem Bereich von $r_i/t_1 = 20$ bis $r_i/t_1 = 200$ Einfluss auf die lokalen Spannungen.

In Diagramm 40 sind die Ausnutzungsgrade für $t_2/t_1=1.2$ und eine Fase von 1:4 in Abhängigkeit von den Wanddicken $t_1 = 25, 50$ und 75 mm und den r_i/t_1 -Verhältnissen gezeigt. Die vollen Linien stellen die Wanddicke $t_1 = 25$ mm dar; die punktierten Linien $t_1 = 50$ mm und die strich-punktierten Linien $t_1 = 75$ mm. Hierbei ist zu erkennen, dass mit zunehmender Wanddicke t_1 die Ausnutzungsgrade kleiner werden. Die Ausnutzungsgrade vom Kerbspannungskonzept fallen dabei kleiner aus als die vom Strukturspannungskonzept. Der Sprung von $t_1 = 25$ mm auf $t_1 = 50$ mm ist sichtbar größer als der Sprung von $t_1 = 50$ mm auf $t_1 = 75$ mm. Weiters zu erkennen ist, wie schon erwähnt, dass die

Ausnutzungsgrade des Strukturspannungskonzepts bei größerer Wanddicke ($t_1 = 50$ und 75 mm) immer mehr vom Nennspannungskonzept abweichen.

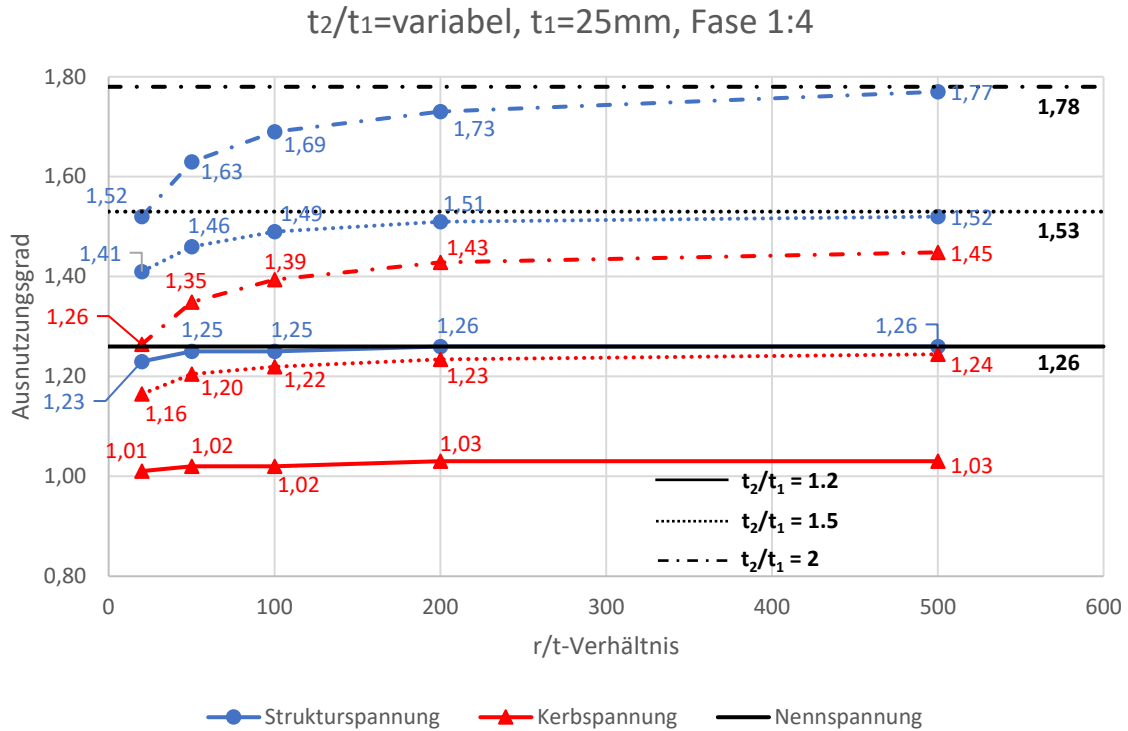


Diagramm 39: Vergleich Ermüdungskonzepte für $t_2/t_1 = 1.2, 1.5, 2$ mit $t_1 = 25$ mm und Fase 1:4 (Darstellung der Ausnutzungsgrade)

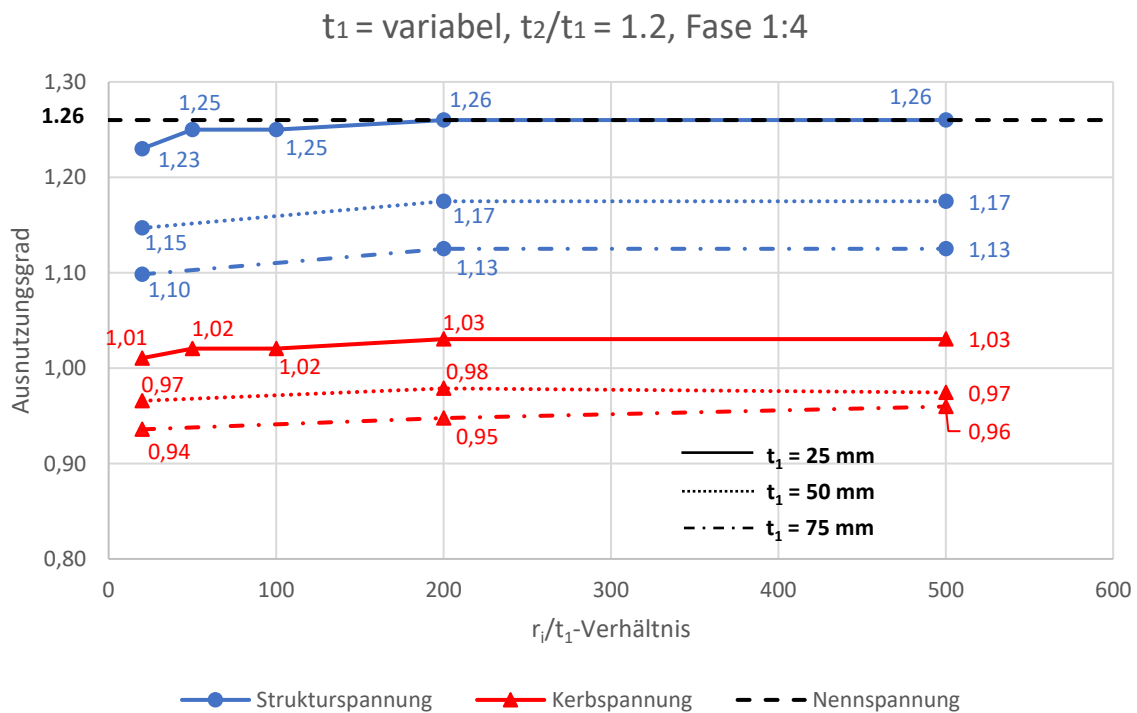


Diagramm 40: Vergleich Ermüdungskonzepte für $t_2/t_1 = 1.2$ mit $t_1 = 25, 50$ und 75 mm und Fase 1:4 (Darstellung der Ausnutzungsgrade)

6. Zusammenfassung und Erkenntnisse dieser Arbeit

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden, anhand einer Parameterstudie, zwei oft in der Praxis vorkommende Details, der Ringsteifenanschluss und der Wanddickensprung, numerisch mithilfe des Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzepts näher untersucht und bewertet. Das Ziel dieser Arbeit war, den Einfluss vom Radius/Wanddicken-Verhältnis, den Rohrwanddicken sowie anderer variabler Geometrieparameter, wie die Fasenneigung vom Wanddickensprung oder die Ringgeometrie (Steifendicke/Steifenhöhe) vom Ringsteifenanschluss, auf die lokale Struktur- bzw. Kerbspannungen zu untersuchen. Im weiteren Verlauf wurden die Ausnutzungsgrade der einzelnen Ermüdungskonzepte anhand dieser Details nach dem Eurocode 1993-1-9:2020 (zweiter Entwurf) [4] berechnet und verglichen. Die detaillierten Ergebnisse zu allen numerischen Berechnungen in dieser Arbeit finden sich im Anhang A Ringsteifenanschluss bzw. Anhang B Wanddickensprung.

Erkenntnisse

Folgende Erkenntnisse konnten aus den Berechnungen in dieser Arbeit gewonnen werden:

- i. Vorab ist zu sagen, dass die verschiedenen Ermüdungskonzepte zu keiner kontinuierlichen Antwort der Ermüdungstragfähigkeit bzw. Lebensdauer führten. Im Gegenteil traten hierbei doch größere Unterschiede in der Lebensdauer auf. Es ist schwer zu sagen, welches Ermüdungskonzept nun am besten für die Berechnung der Ermüdungstragfähigkeit heranzuziehen werden sollte. Grundsätzlich lieferte das Nenn- bzw. Strukturspannungskonzept relativ ähnliche Ausnutzungsgrade. Das Kerbspannungskonzept, welches aufgrund der sehr detaillierten numerischen Berechnung das aufwendigste Verfahren ist, ergab die kleinsten Ausnutzungsgrade. Meiner Meinung nach könnte dies zu fehlenden Sicherheiten führen bzw. auf der unsicheren Seite liegen. Es bedarf hier noch einiges an Forschung, um die ganzen Effekte festzustellen und Klarheit zu schaffen. Welches Konzept nun herangezogen wird, ist frei dem Anwender überlassen. Das Strukturspannungskonzept, welches aufgrund der einfachen Modellierung schnell durchgeführt werden kann, ergab in einigen Fällen ähnliche Ergebnisse wie das Nennspannungskonzept, ansonsten ergab das Strukturspannungskonzept die größten Ausnutzungsgrade und somit die größten Sicherheiten.
- ii. Weiters konnte in dieser Arbeit festgestellt werden, dass die Wanddicke t (Ringsteifenanschluss) bzw. t_1 (Wanddickensprung) keinen Einfluss auf die Strukturspannungen hat. Hierbei waren die Werte der Strukturspannungen für die Wanddicken 25, 50 und 75 mm exakt die gleichen. Allein die Kerbspannungen stiegen mit zunehmender Wanddicke an. Dieser Effekt ist zum Teil mit den berücksichtigten Spannungskonzentrationsfaktoren nach dem Strukturspannungskonzept und dem Blechdickeneffekt, der die Ermüdungstragfähigkeit abmindert, abgesichert. Dabei wird der Faktor $k_s = (25/t_{\text{eff}})^{0.2}$ empfohlen, wie der Vergleich mit dem Nennspannungskonzept gezeigt hat. Es ist dabei anzumerken, dass die Effekte von unvermeidbaren Kantenversätzen und Exzentrizitäten (in Englisch: misalignment effects) in den Kerbfällen nach dem Strukturspannungskonzept (Tabelle B.1 im Eurocode 1993-1-9 [1] [4]) nicht berücksichtigt werden. Diese müssten explizit bei der Spannungsermittlung erfasst werden.
- iii. RINGSTEIFENANSCHLUSS: Die lokalen Spannungen nahmen allesamt mit Zunahme des r_i/t -Verhältnisses ab. Die Geometrie der Ringsteife hatte den größten Einfluss auf die lokalen Spannungen. Mit zunehmender Steifendicke t_s sowie zunehmender Steifenhöhe h_s nahmen parallel auch die Spannungen konstant zu, wobei den größeren Einfluss von den beiden die Ringdicke hatte. Weiters konnte festgestellt werden, dass die Modellierung der Schweißnaht im FE-Modell für das Strukturspannungskonzept irrelevant ist. Die Strukturspannungen bei der Modellierung mit und ohne Nahtaufweitung ergaben vernachlässigbar kleine Unterschiede. Im Kerbspannungskonzept ist jedoch eine genaue Modellierung der Schweißnaht erforderlich.

- Dort hat sich gezeigt, dass die Modellierung der Schweißnaht einen relativ großen Einfluss auf die Kerbspannung hat.
- iv. WANDDICKENSPRUNG: Die lokalen Spannungen nahmen allesamt mit Zunahme des r_i/t_1 -Verhältnisses minimal zu. Den größeren Einfluss der r_i/t_1 -Verhältnisse auf die Ergebnisse hatten diese bei größeren Wanddickenverhältnissen t_2/t_1 . Während bei einem kleinem $t_2/t_1 = 1.2$ die Spannungen über die r_i/t_1 -Verhältnisse nahezu konstant verliefen, stiegen diese in Abhängigkeit des Radius/Wanddickenverhältnisses bei großem $t_2/t_1 = 2.0$ an. Weiters konnte festgestellt werden, dass die Fasenneigung bei einem kleinen t_2/t_1 -Verhältniss von 1.2 nahezu keinen Einfluss auf die Strukturspannungen hatte. Da es ziemlich aufwendig ist die Schweißnaht bei einer flachen Fase zu schleifen, empfiehlt es sich deshalb bei einem t_2/t_1 -Verhältniss von 1.2 die Fase mit einer Neigung von 1:4 auszubilden.
 - v. Abschließend ist zu erwähnen, dass die lineare und quadratische Spannungsextrapolation nach dem Strukturspannungskonzept nahezu die gleichen Ergebnisse lieferte, und es deshalb keinen Unterschied macht, welche Variante herangezogen wird.

7. Literatur

- [1] Eurocode 1993-1-9, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-9: Ermüdung, 2013
- [2] A. Hobbacher, Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, International Institute of Welding (IIW), "IIW-Richtlinie" 2016.
- [3] H. Unterweger, A. Ecker, Zutreffende Ermüdungsachweise von Rohrleitungen – insbesondere Anwendung neuer numerischer Methoden, Forschungsbericht, FFG Forschungsprojekt Nr. 867117 und 874667, 409 Seiten, 2020
- [4] Eurocode 1993-1-9, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil: 1-9 Ermüdung, 2020 (zweiter Entwurf)
- [5] ABAQUS v6.14 and ABAQUS v6.14 Documentation, © Dassault Systèmes, 2014
- [6] H. Unterweger, P. Kugler, Wirtschaftliche Prognose der Restlebensdauer von stählernen Eisenbahnbrücken mit offener Fahrbahn, Forschungsbericht, FFG Forschungsprojekt Nr. 845668, 114 Seiten, 2016

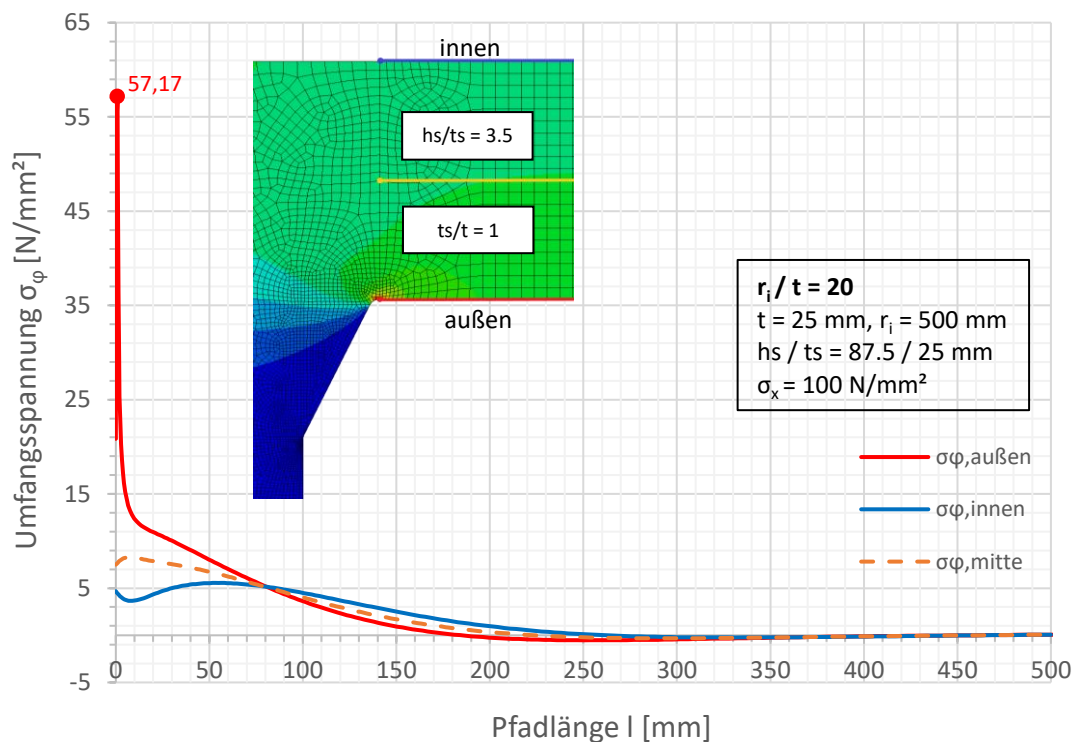
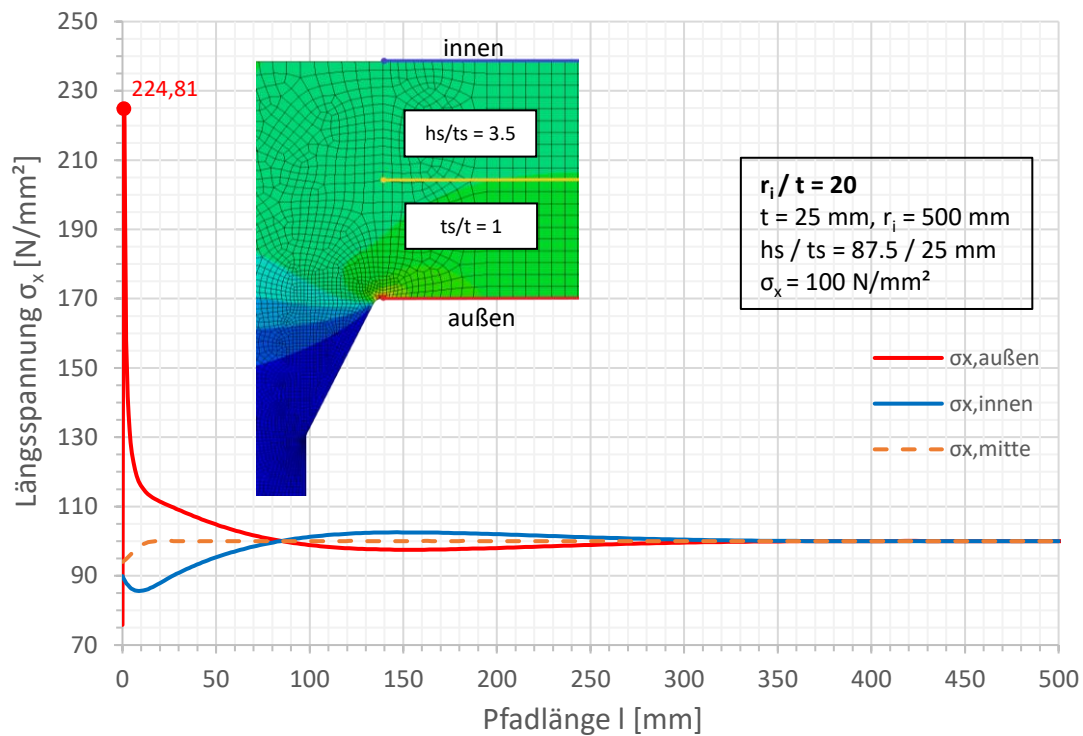
Inhaltsverzeichnis

Anhang A. FE-Berechnungen - Ringsteifenanschluss	A-1
A.1. Wanddicke $t = 25$ mm mit Nahtaufweitung	A-1
A.2. Wanddicke $t = 25$ mm ohne Nahtaufweitung	A-49
A.3. Wanddicke $t = 50$ mm	A-73
A.4. Wanddicke $t = 75$ mm	A-97
Anhang B. FE-Berechnungen - Wanddickensprung	B-1
B.1. Wanddicke $t_1 = 25$ mm	B-1
B.2. Wanddicke $t_1 = 50$ mm	B-79
B.3. Wanddicke $t_1 = 75$ mm	B-135

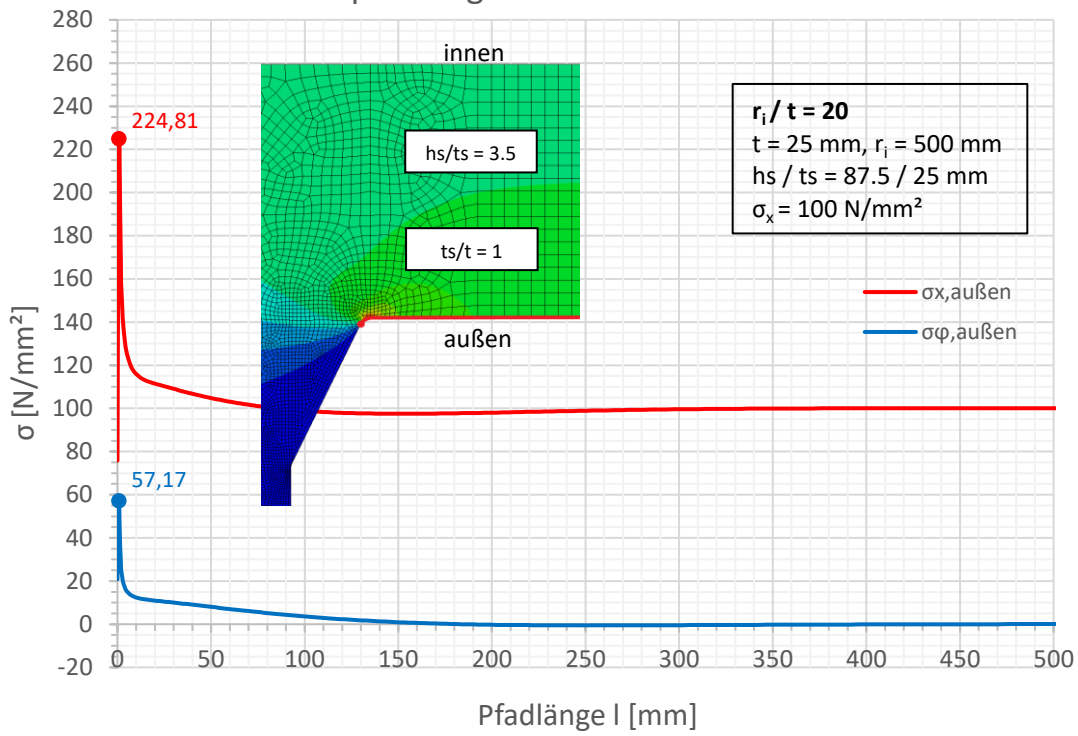
Anhang A. FE-Berechnungen - Ringsteifenanschluss

A.1. Wanddicke $t = 25$ mm mit Nahtaufweitung

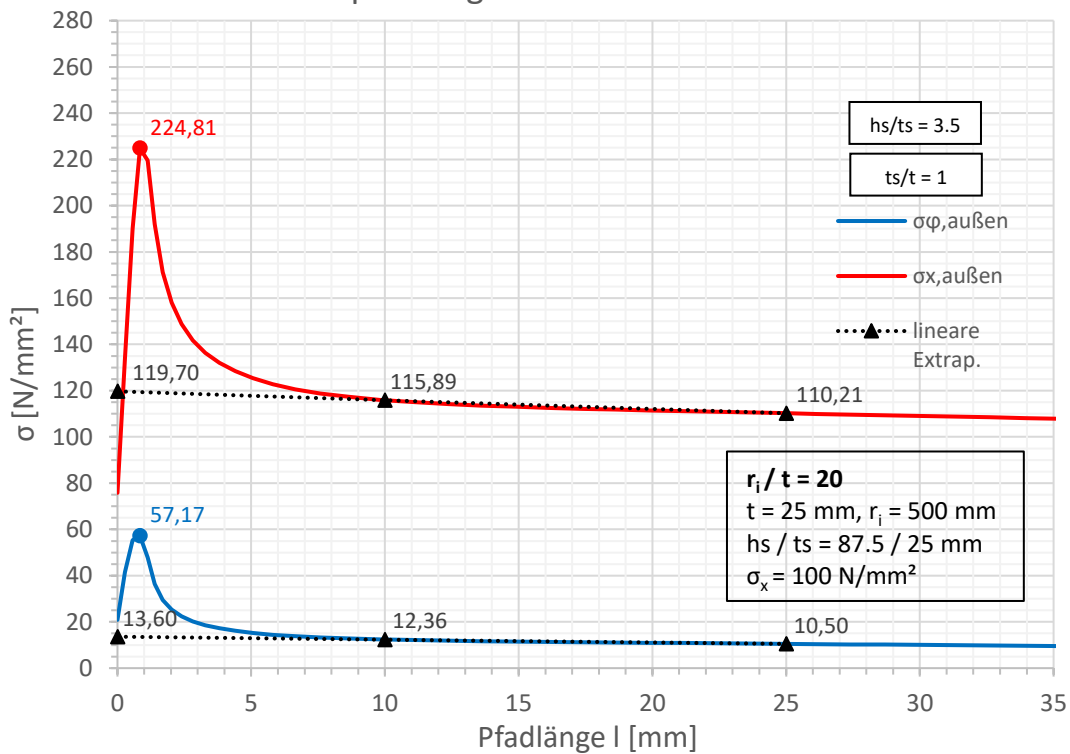
In den nachfolgenden Seiten A-1 bis A-48 sind die FE-Berechnungen vom **Ringsteifenanschluss mit Nahtaufweitung** abgebildet, die mithilfe von Abaqus durchgeführt und mit Excel bearbeitet wurden.

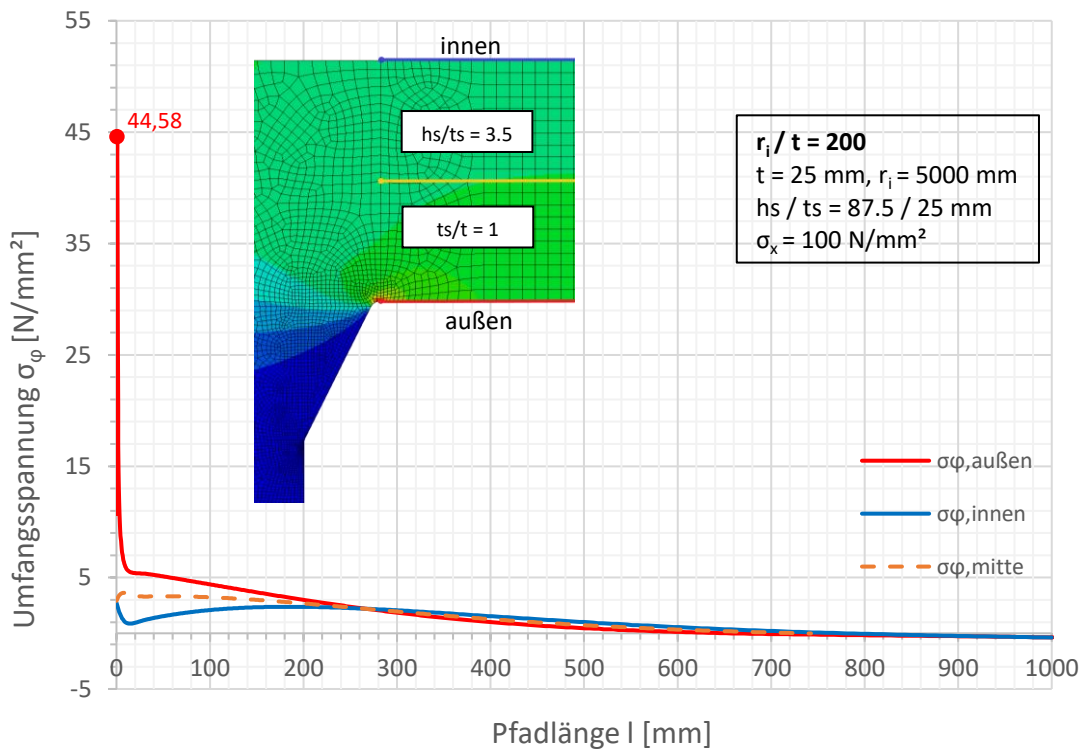
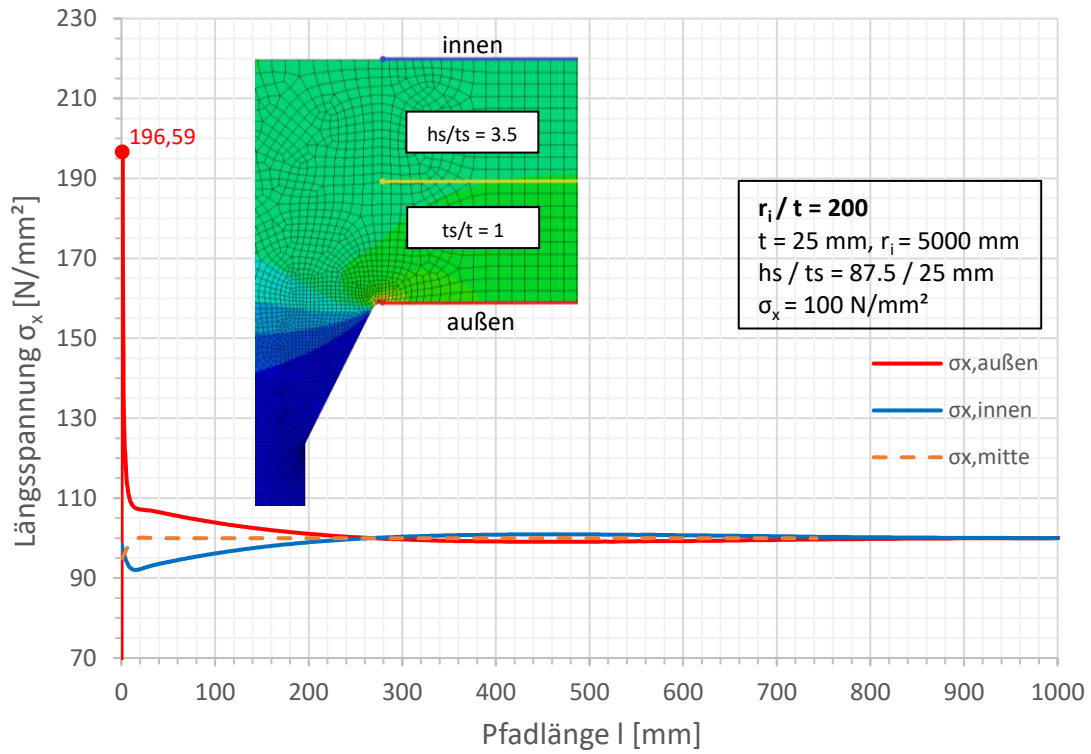


Spannungen an der Außenseite

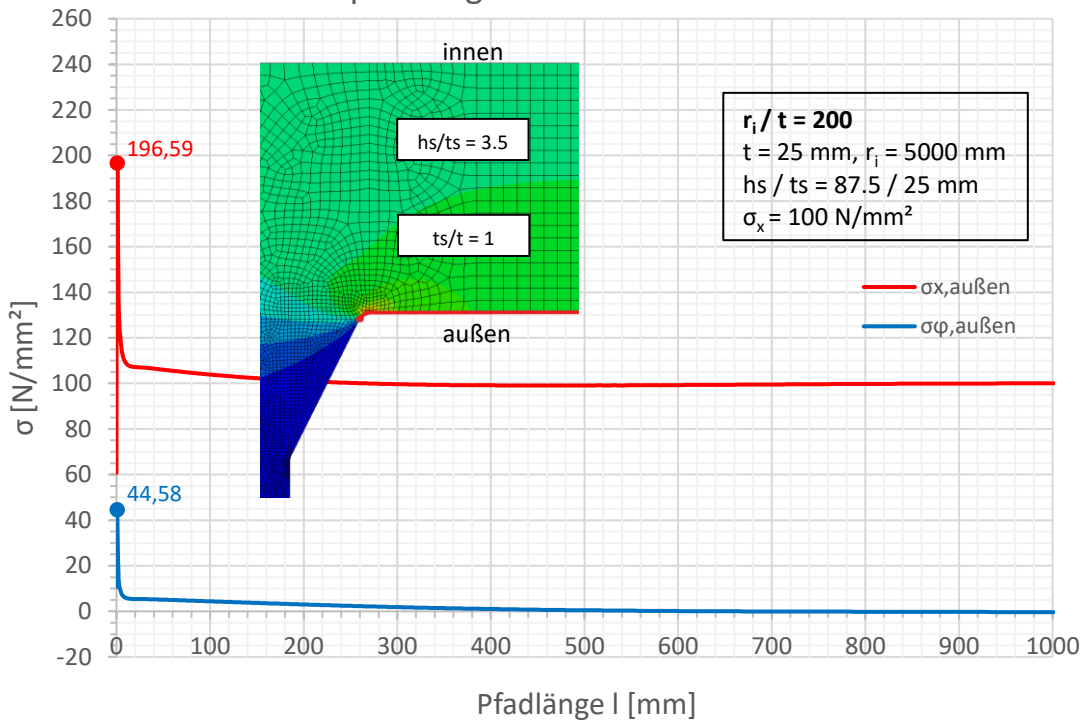


Spannungen an der Außenseite

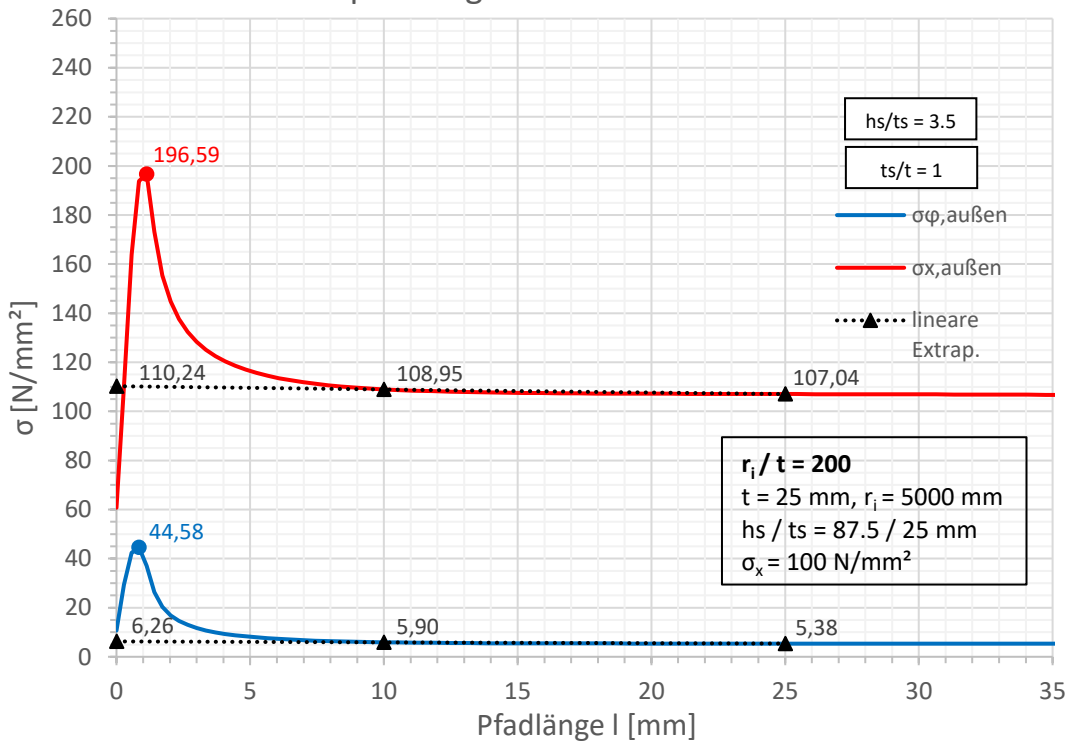


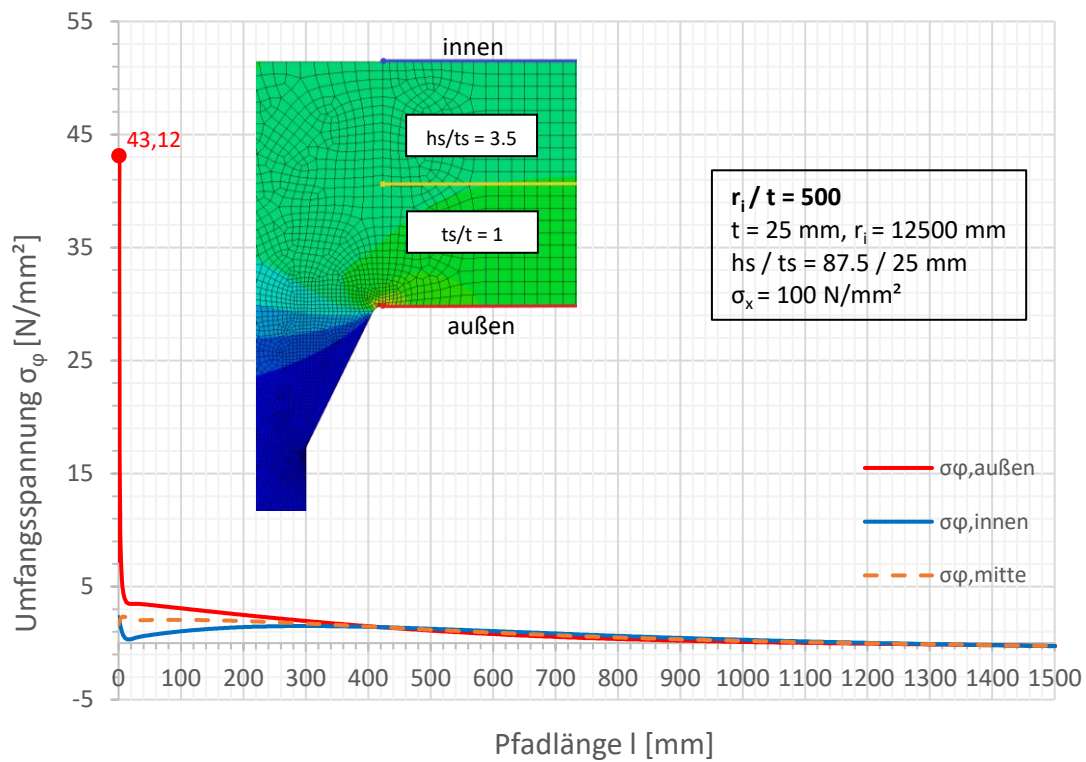
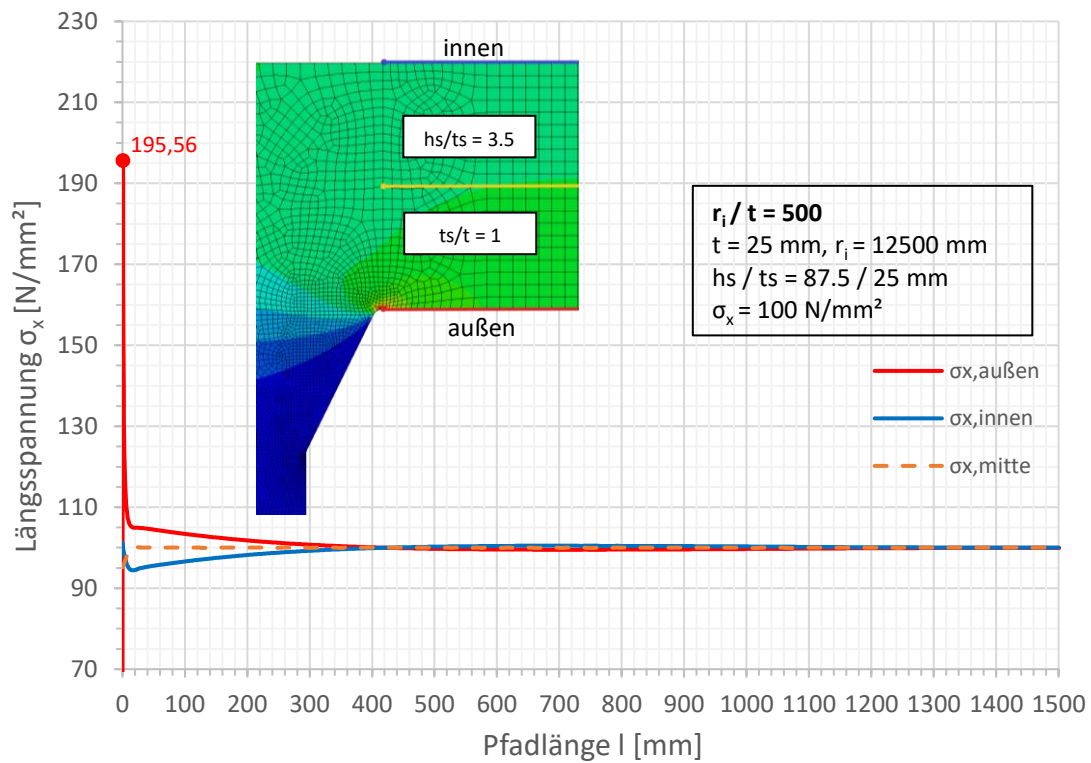


Spannungen an der Außenseite

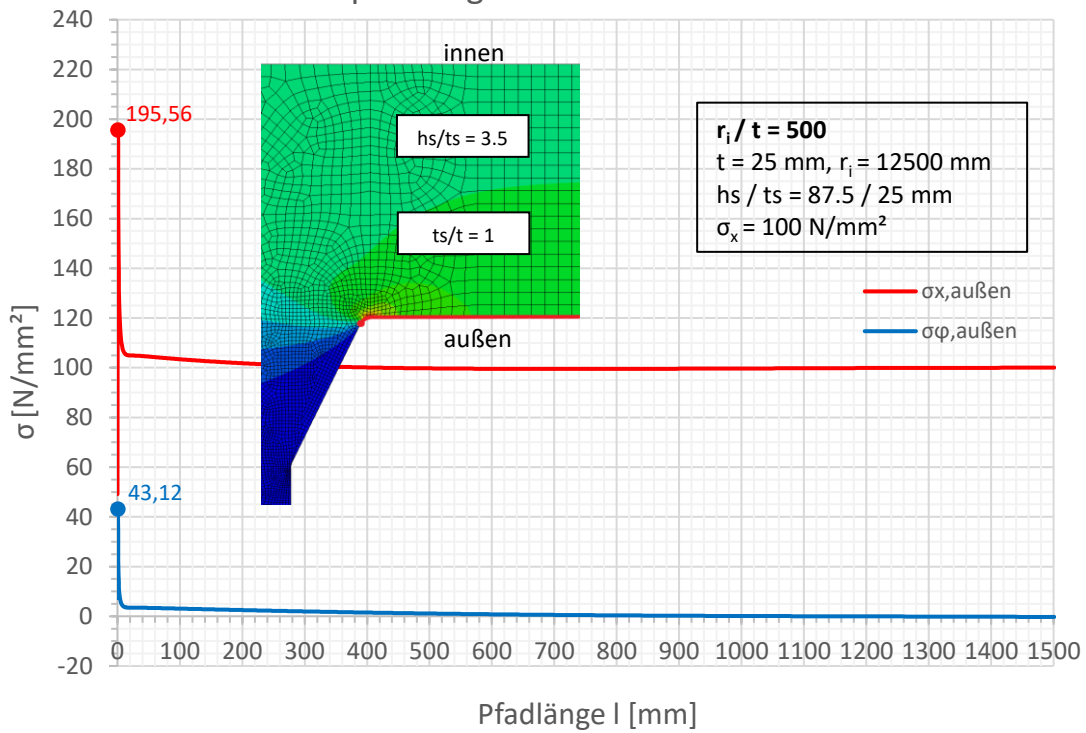


Spannungen an der Außenseite

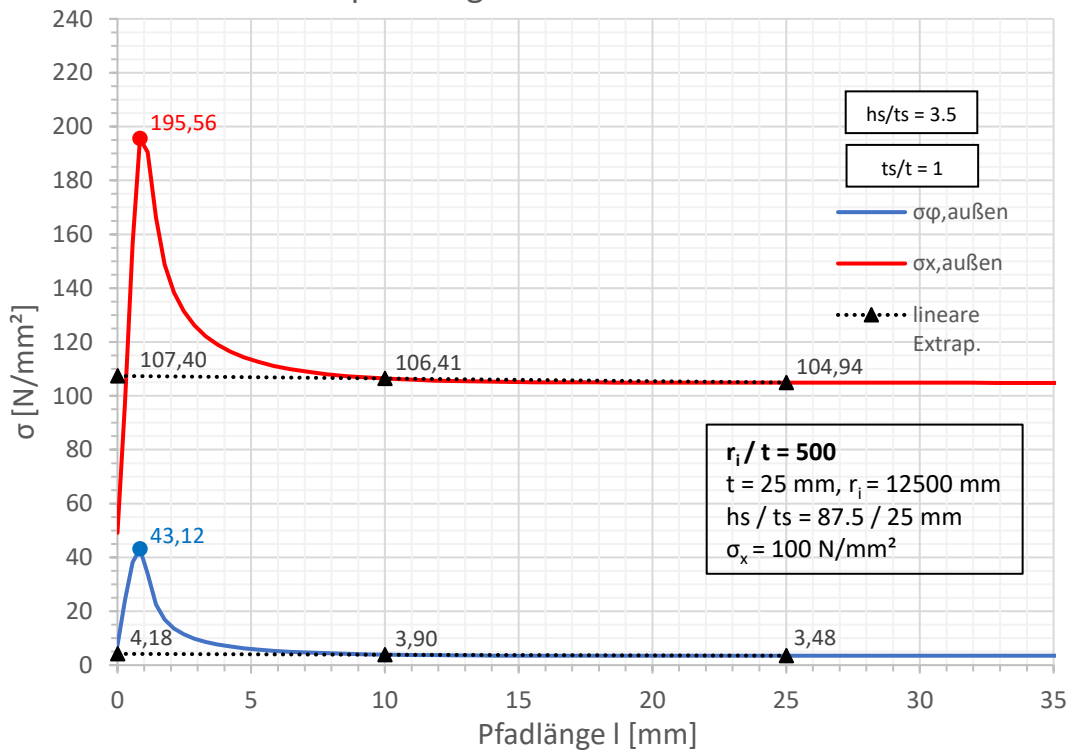


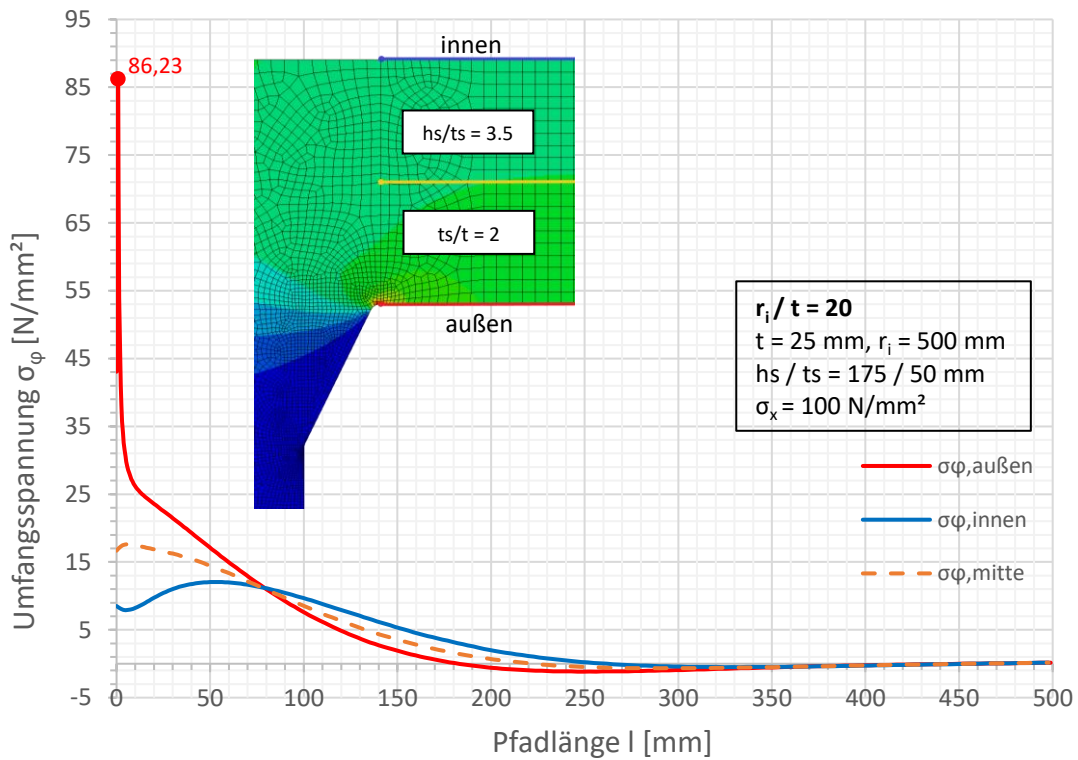
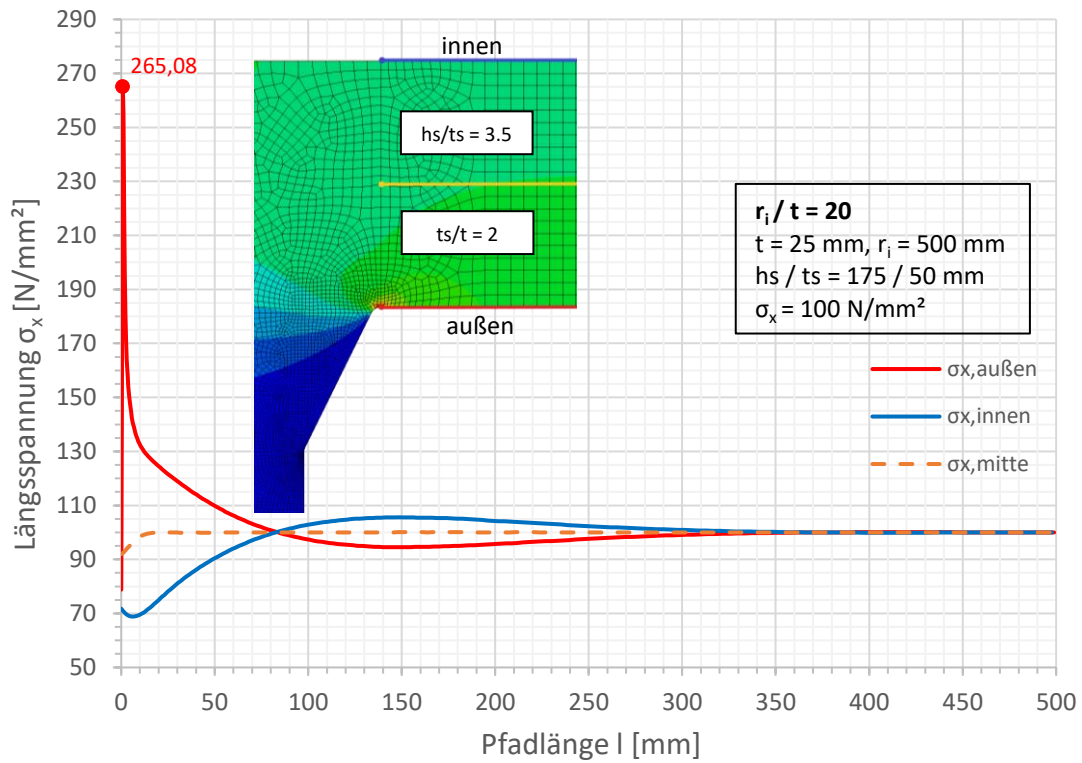


Spannungen an der Außenseite

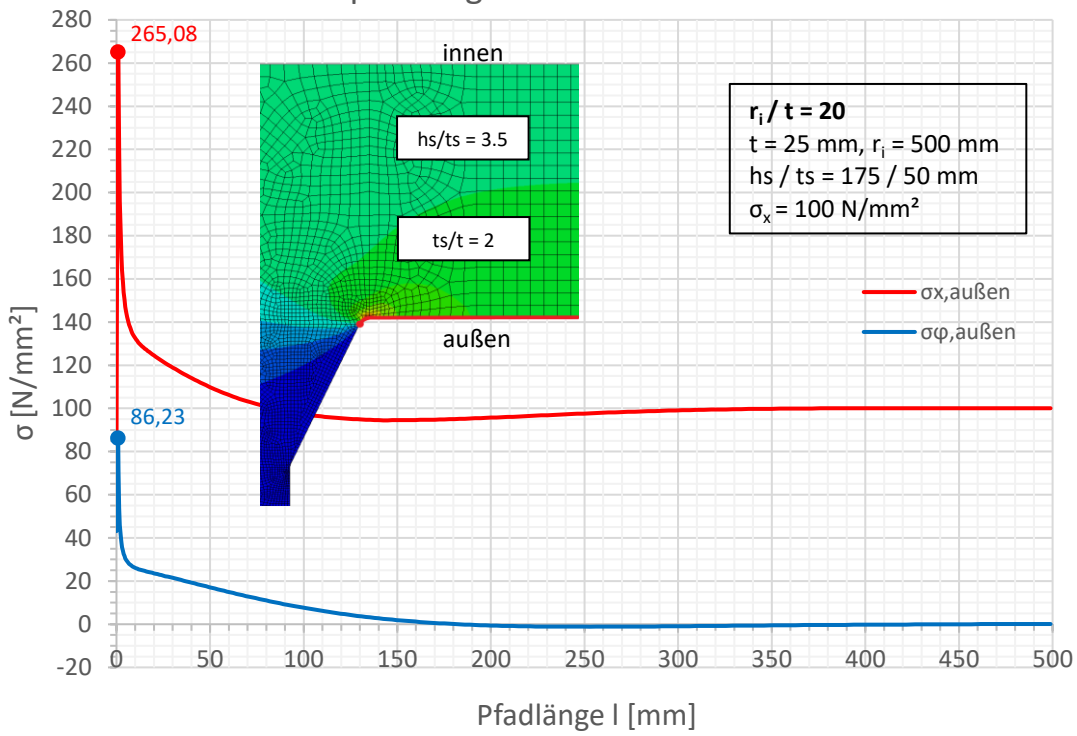


Spannungen an der Außenseite

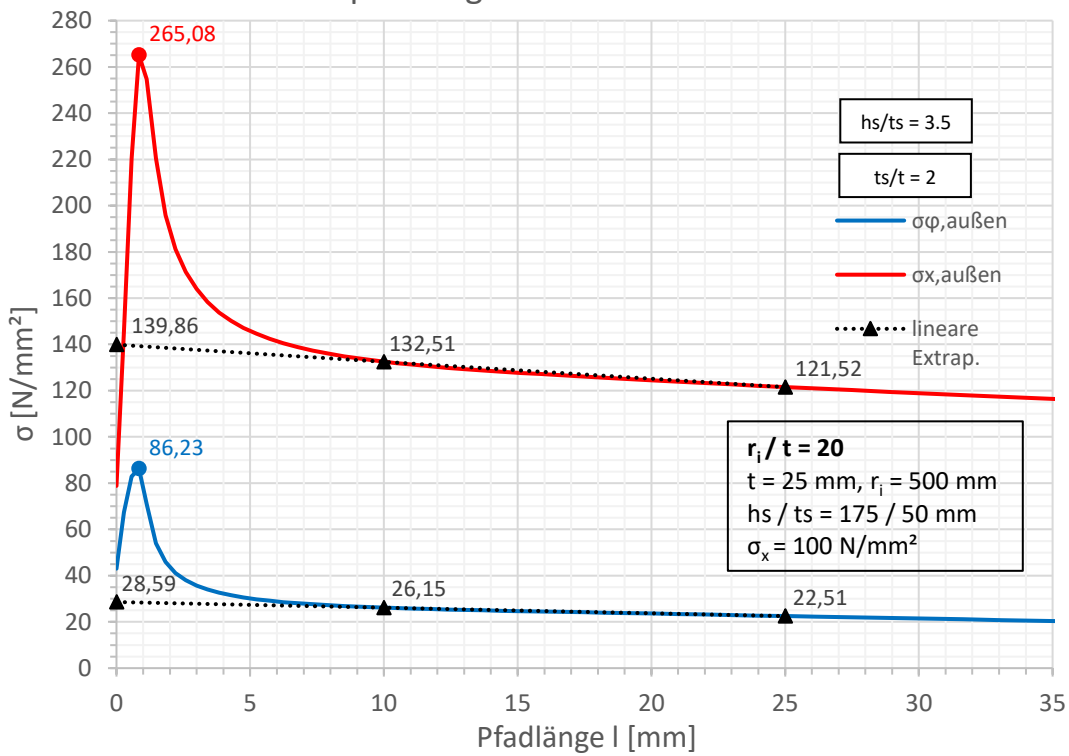


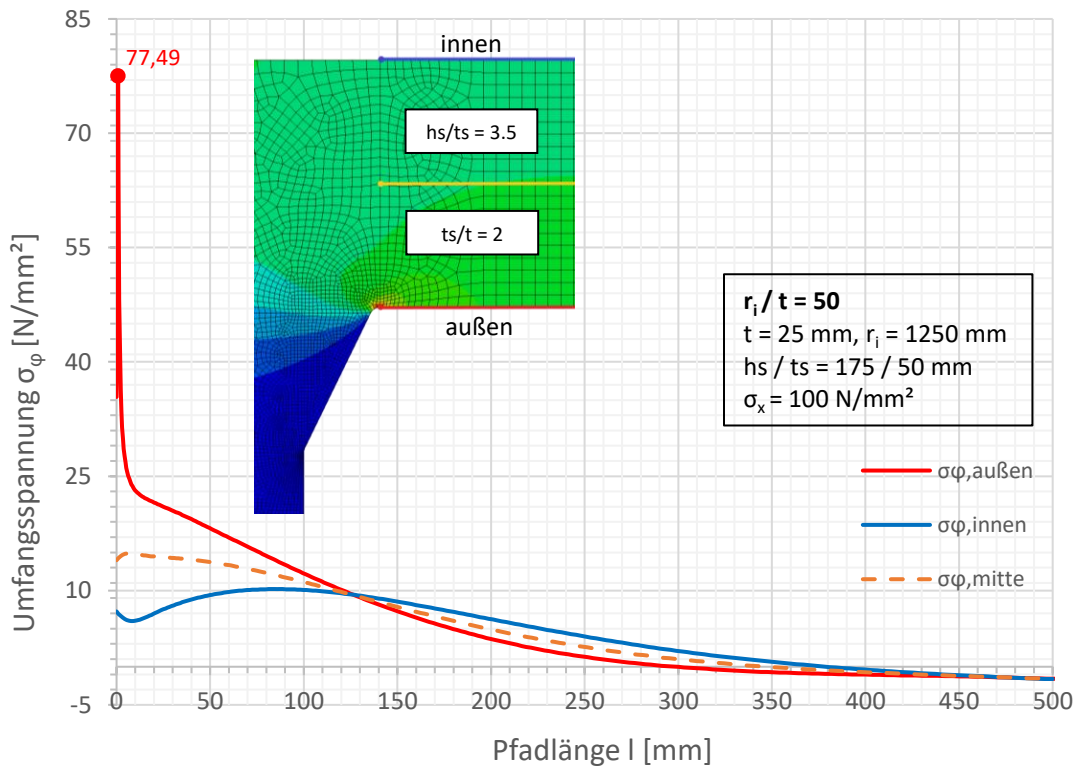
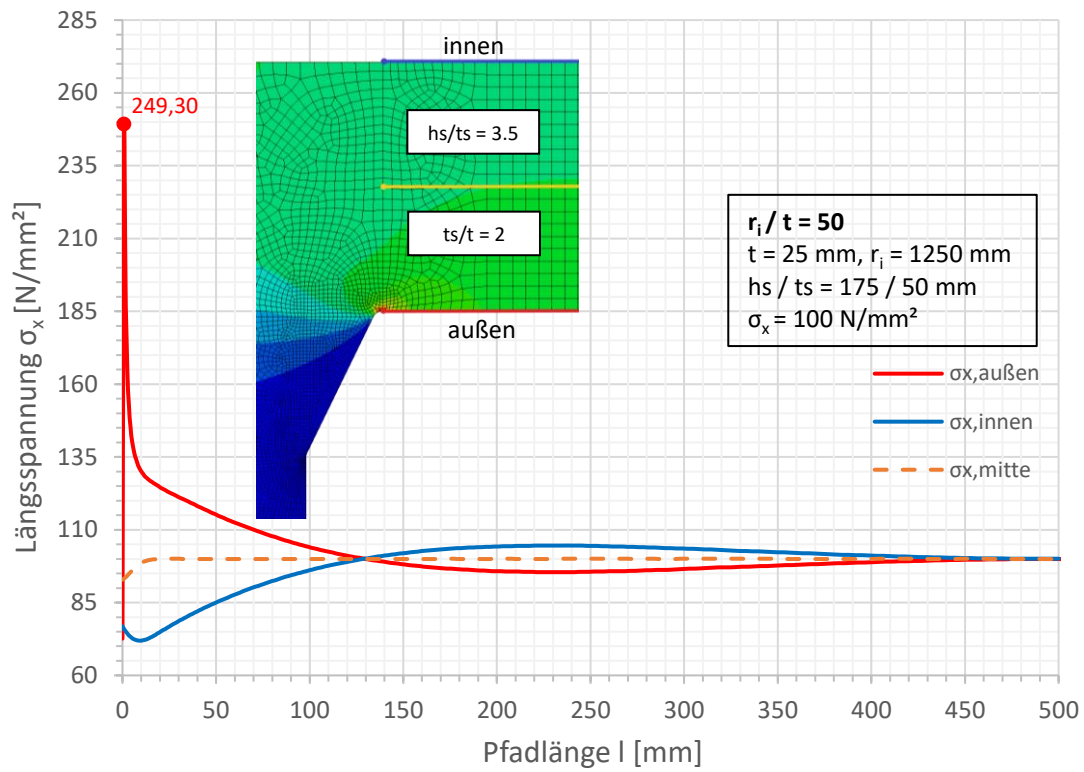


Spannungen an der Außenseite

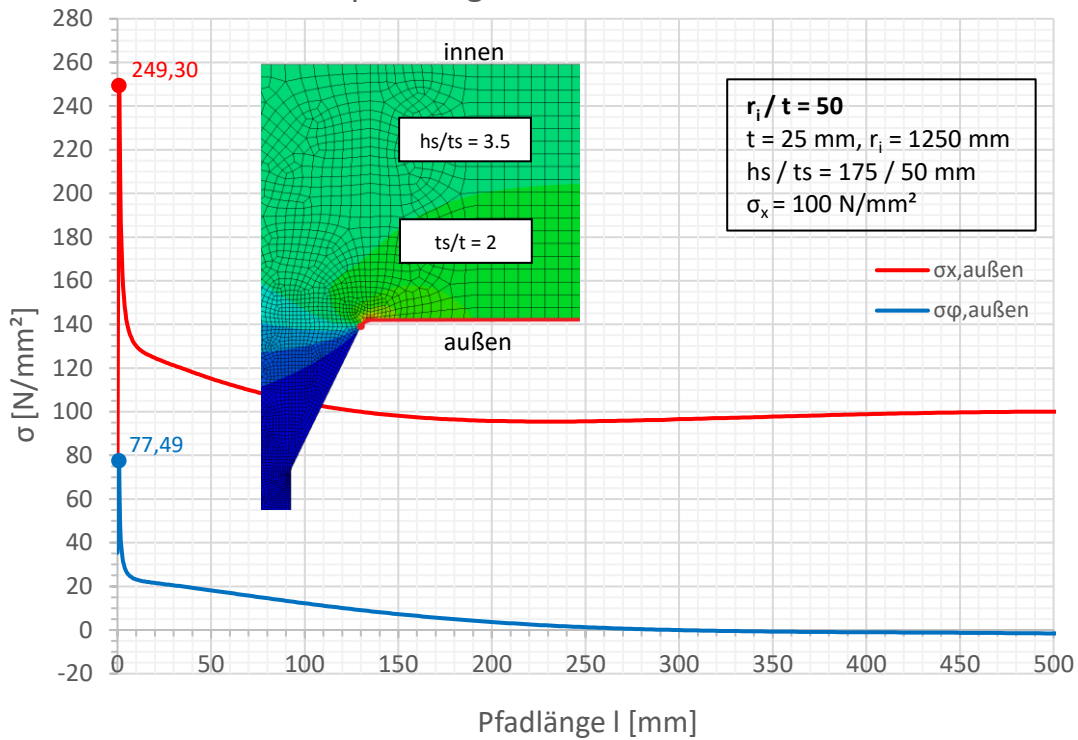


Spannungen an der Außenseite

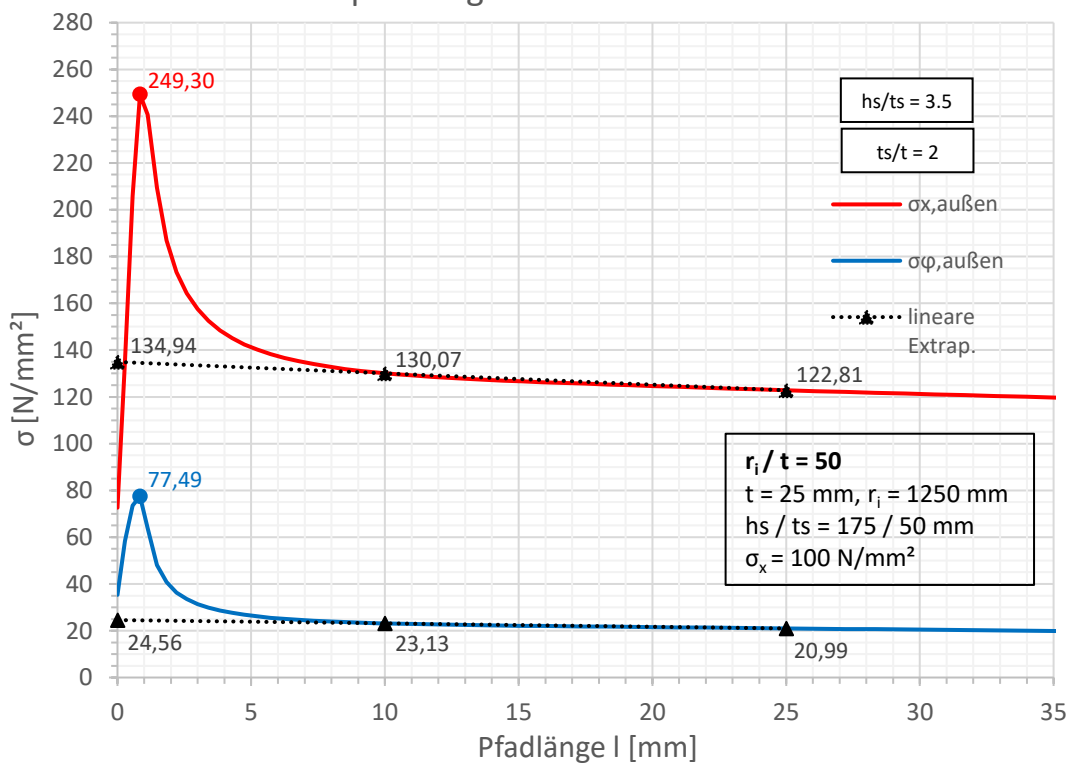


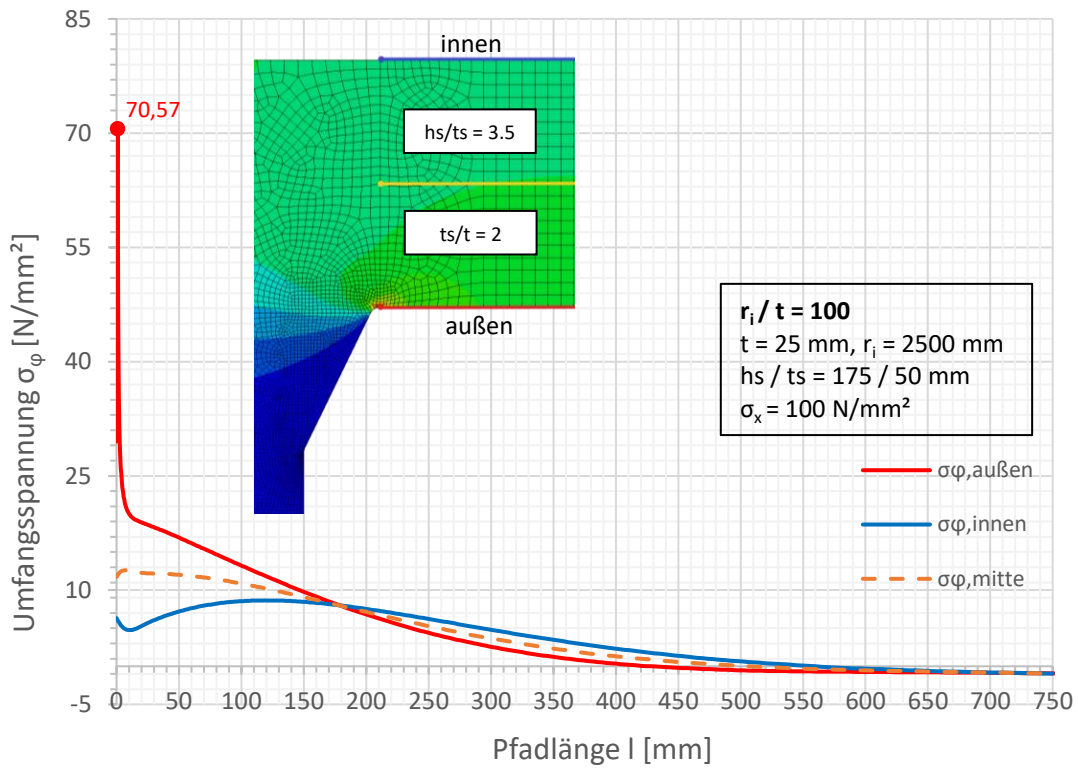
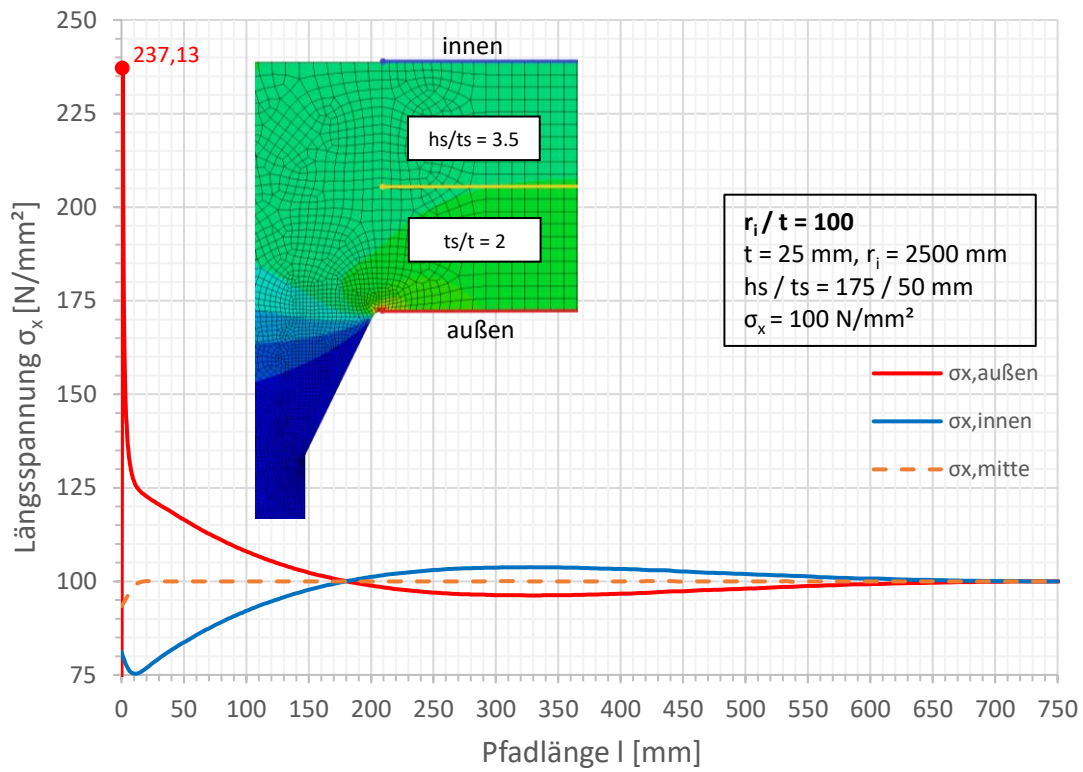


Spannungen an der Außenseite

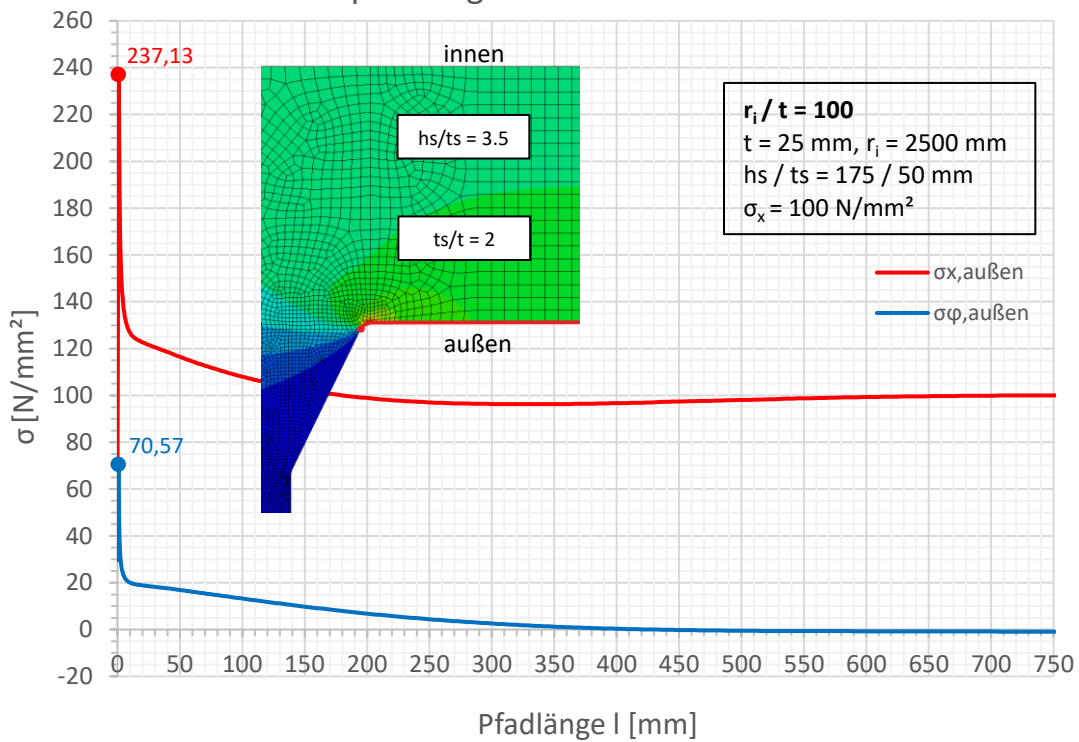


Spannungen an der Außenseite

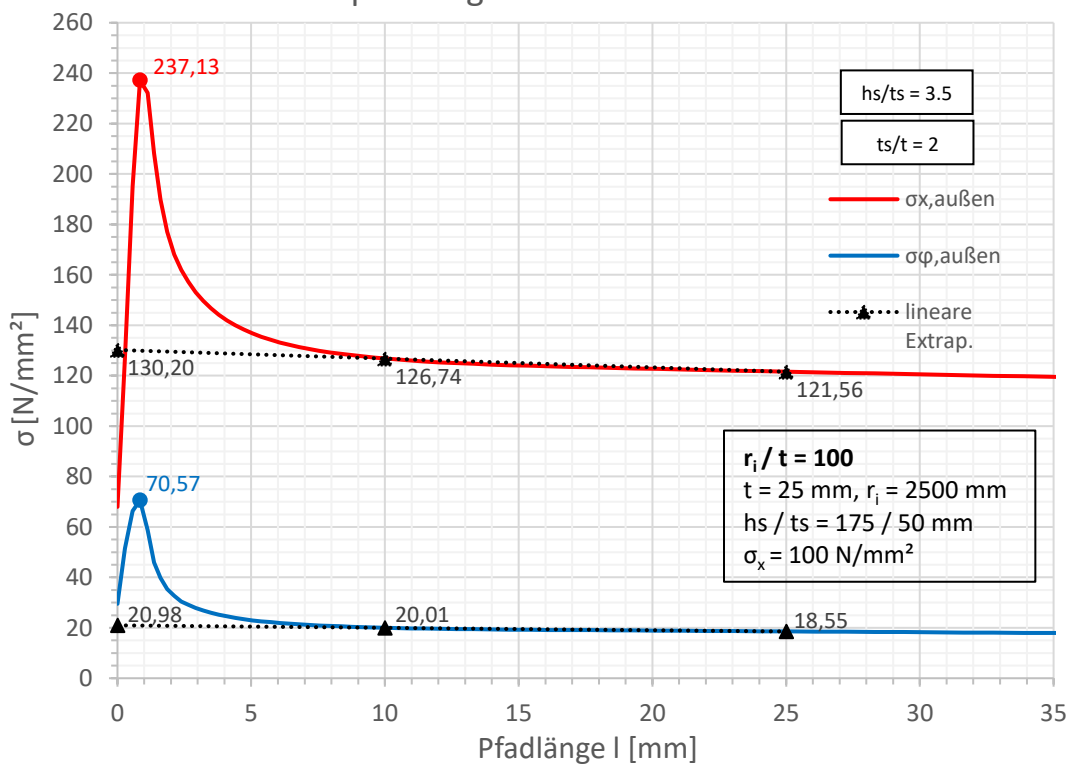


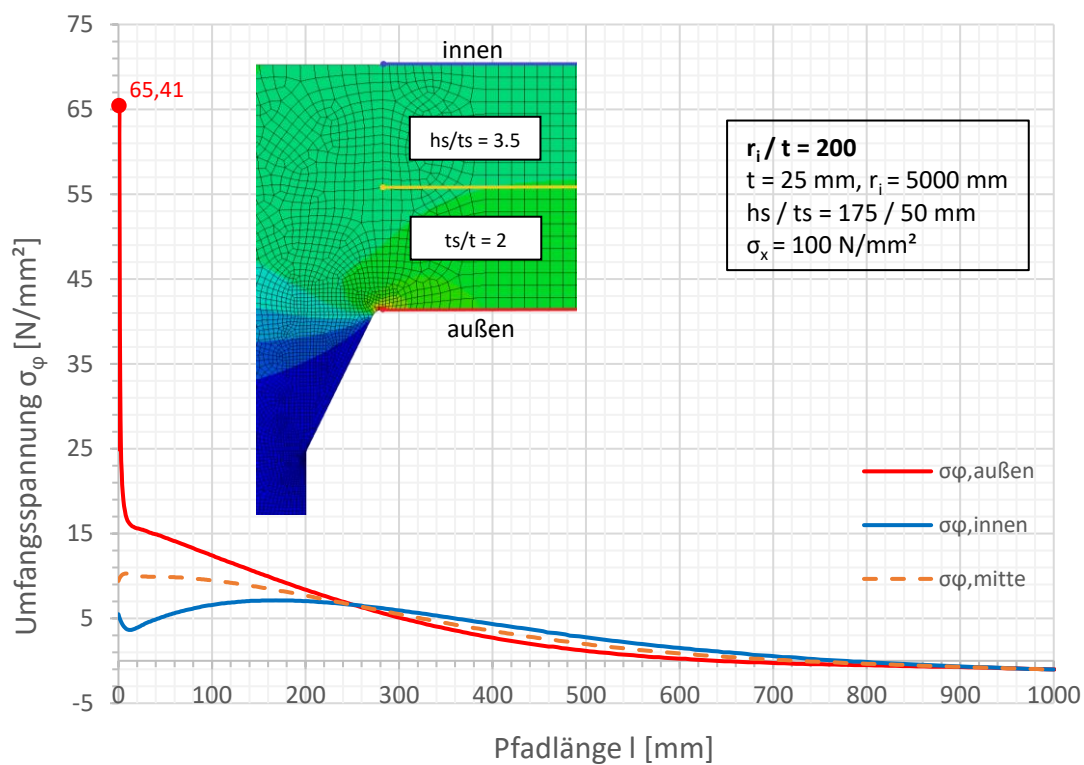
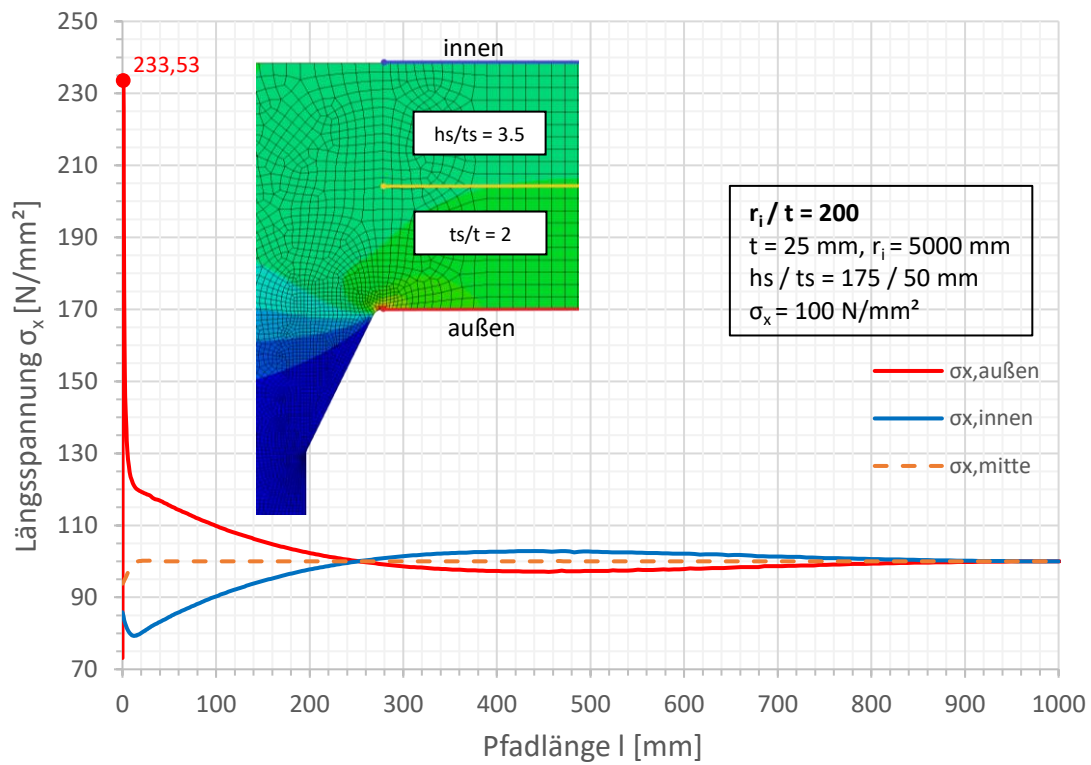


Spannungen an der Außenseite

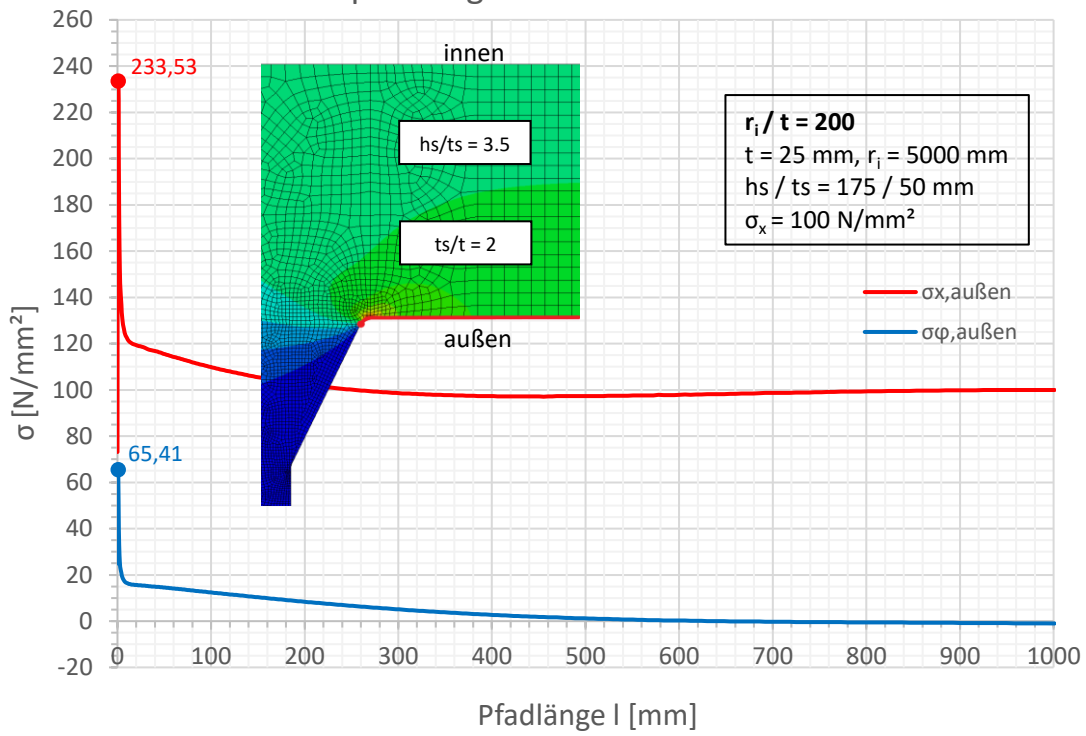


Spannungen an der Außenseite

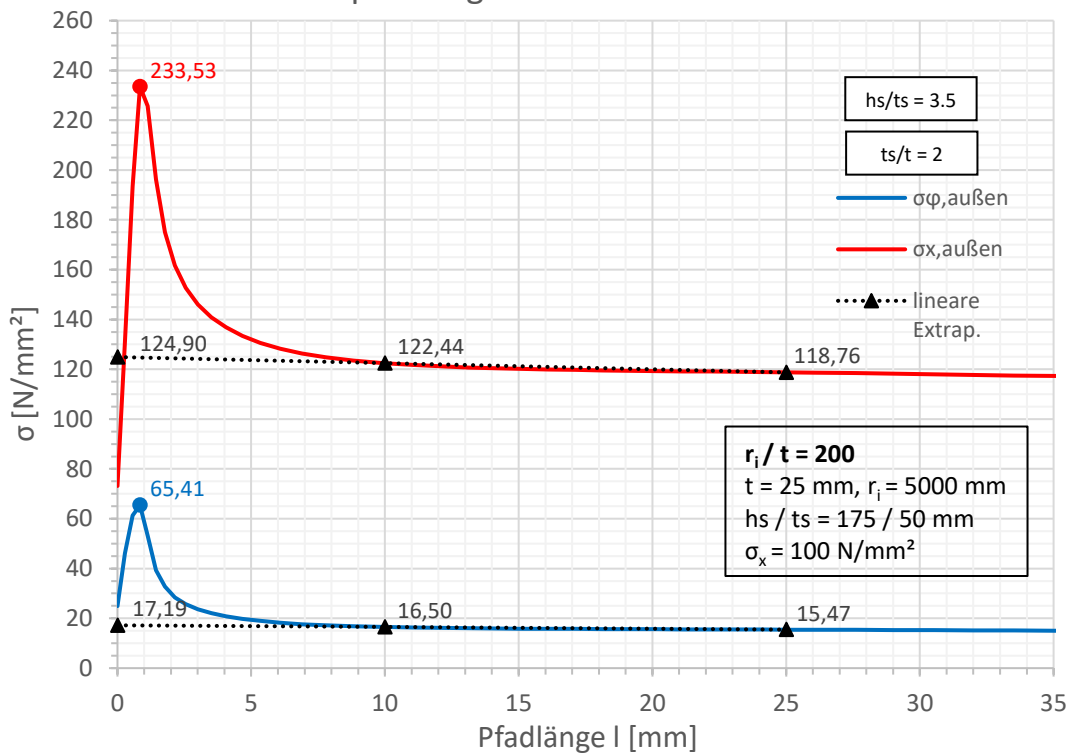


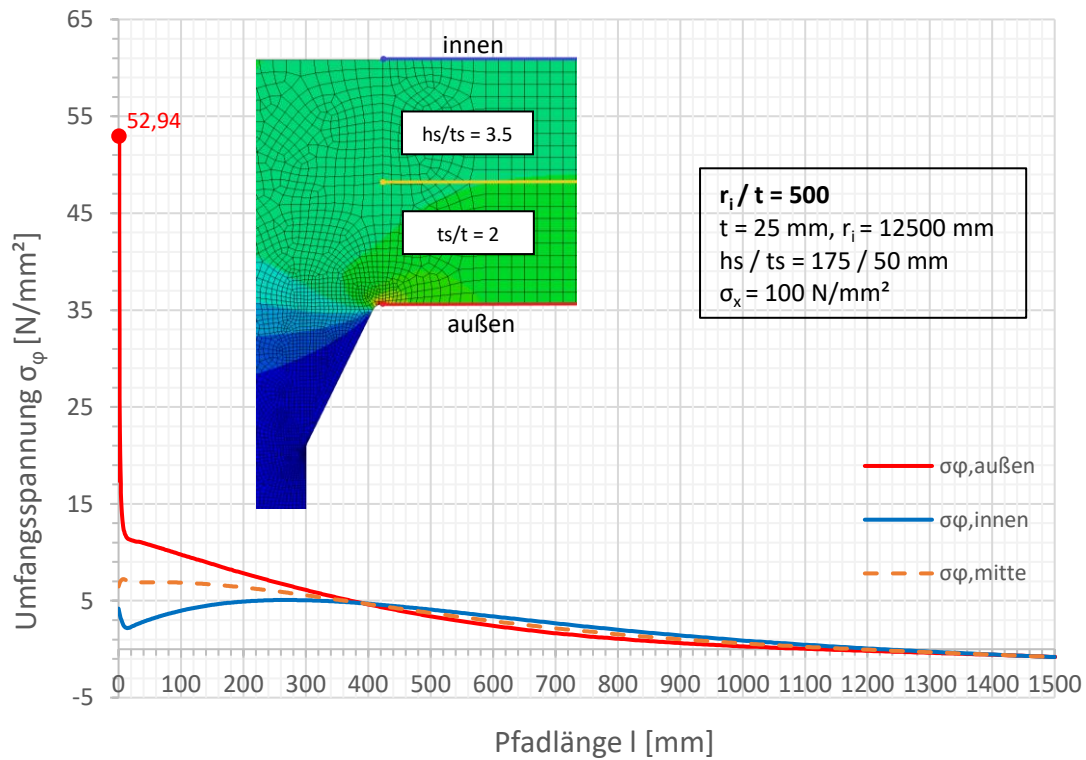
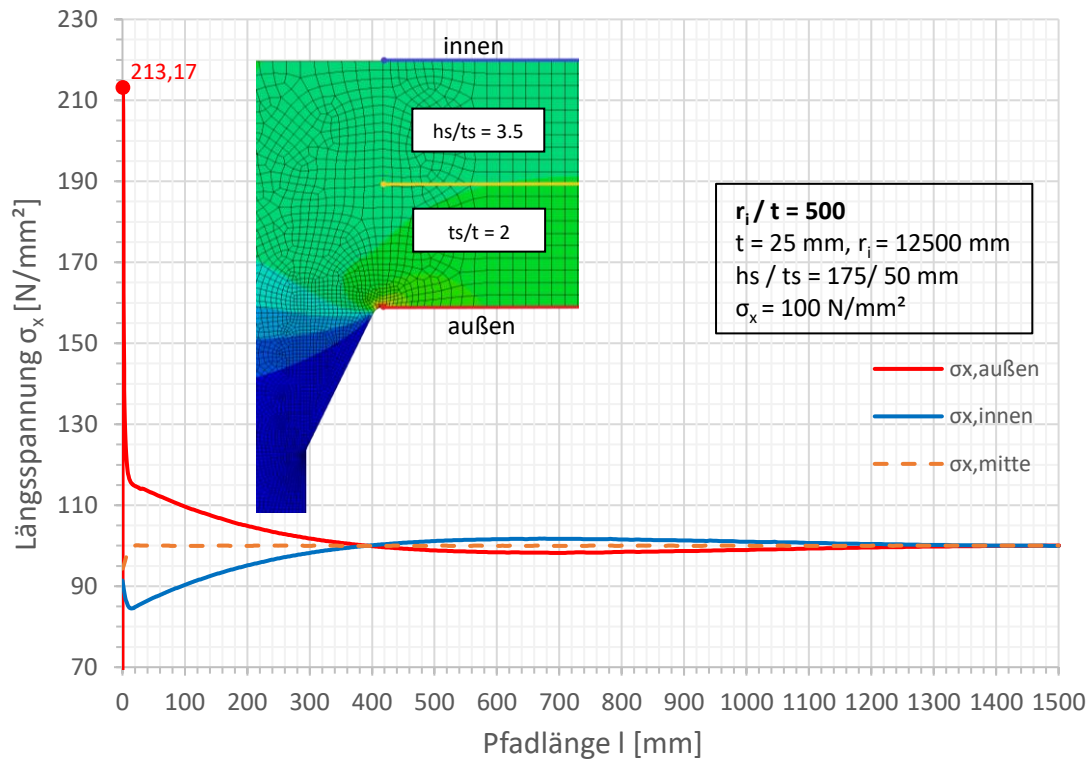


Spannungen an der Außenseite

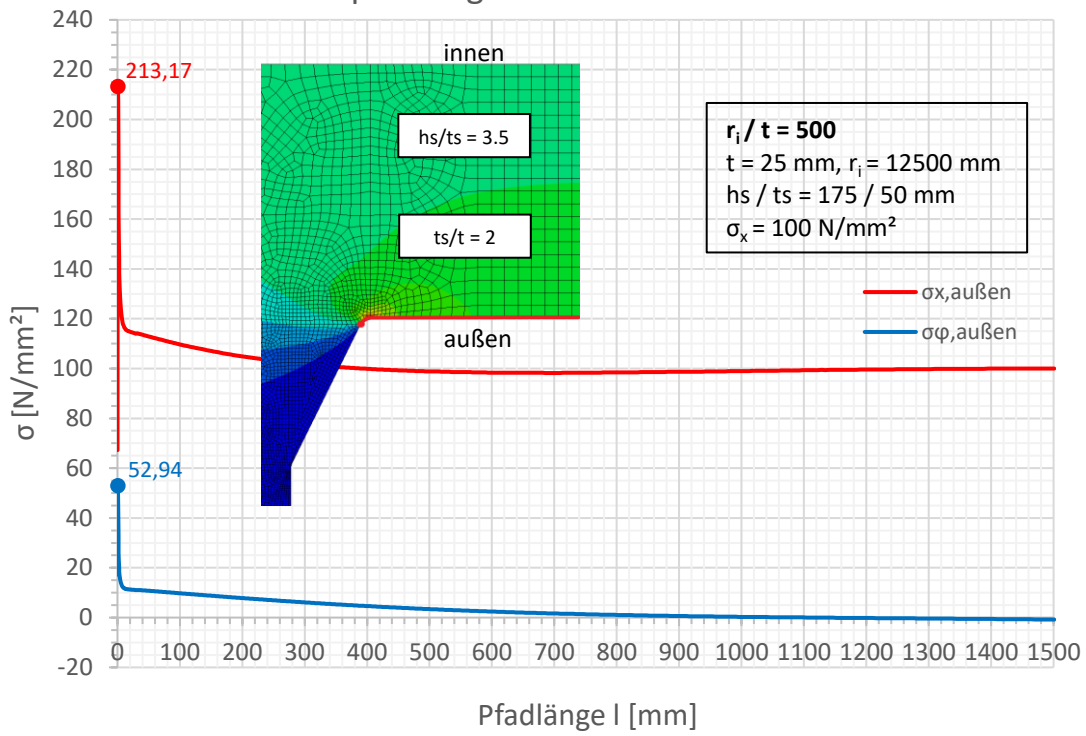


Spannungen an der Außenseite

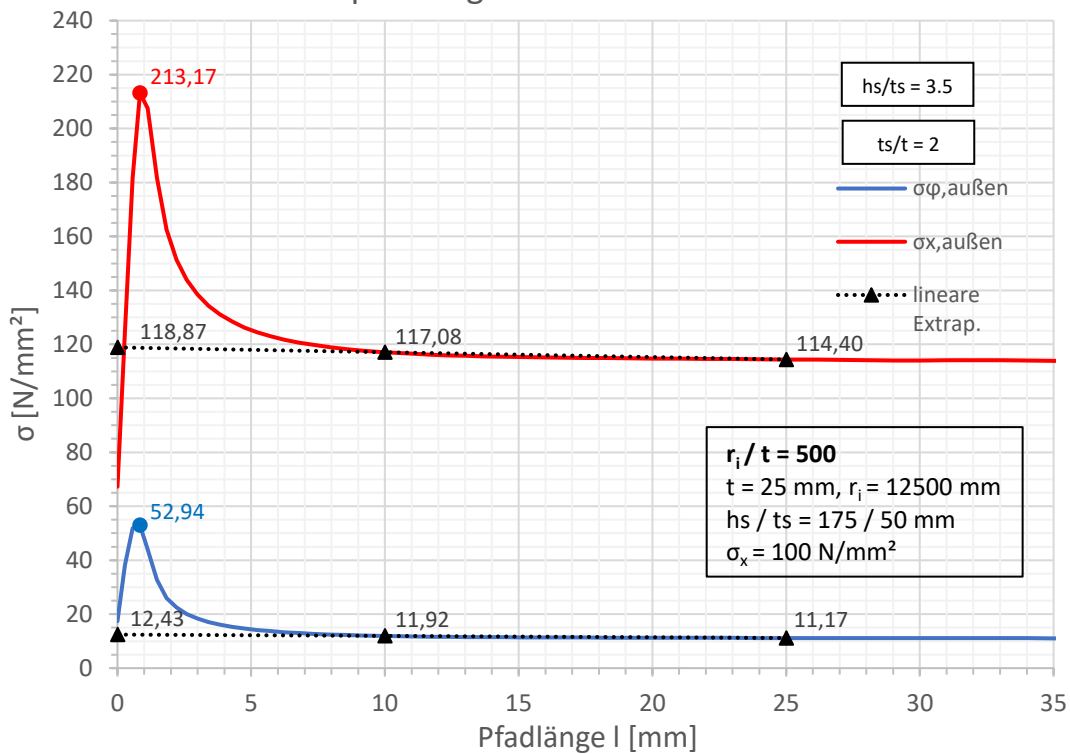


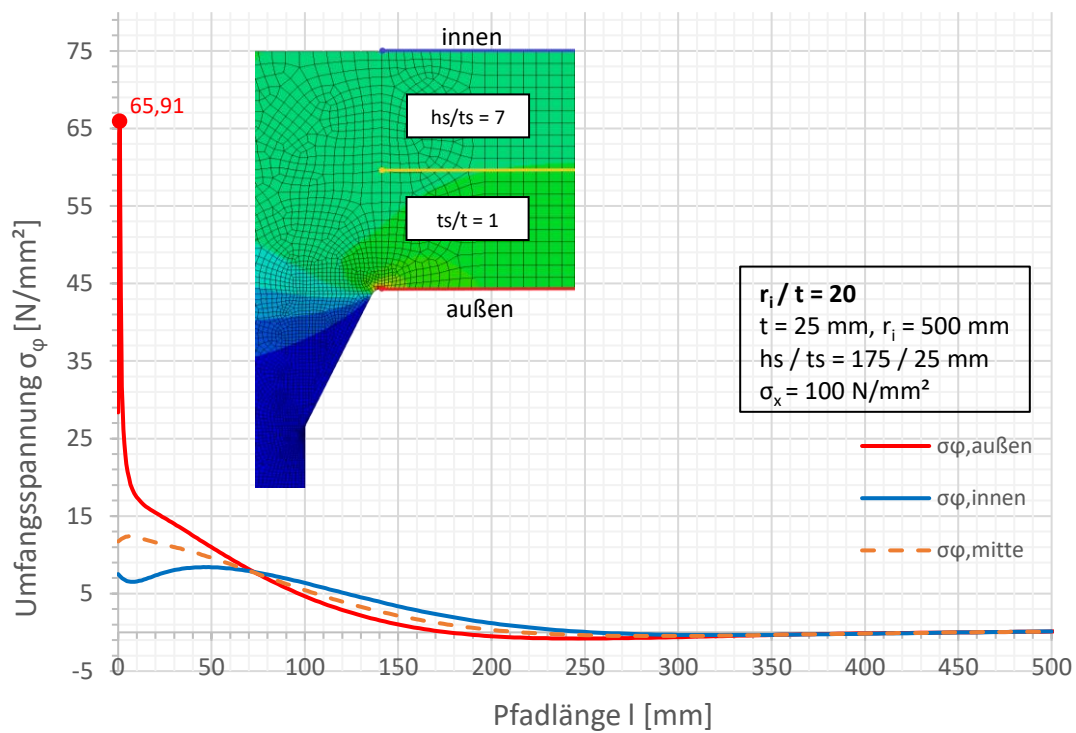
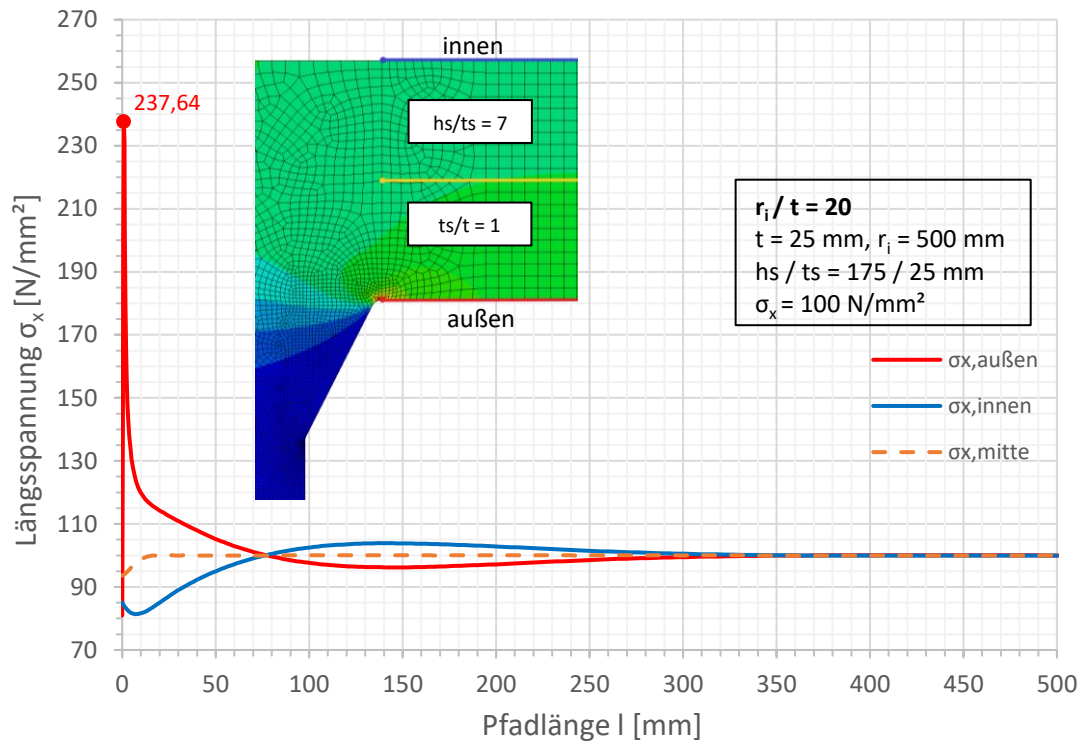


Spannungen an der Außenseite

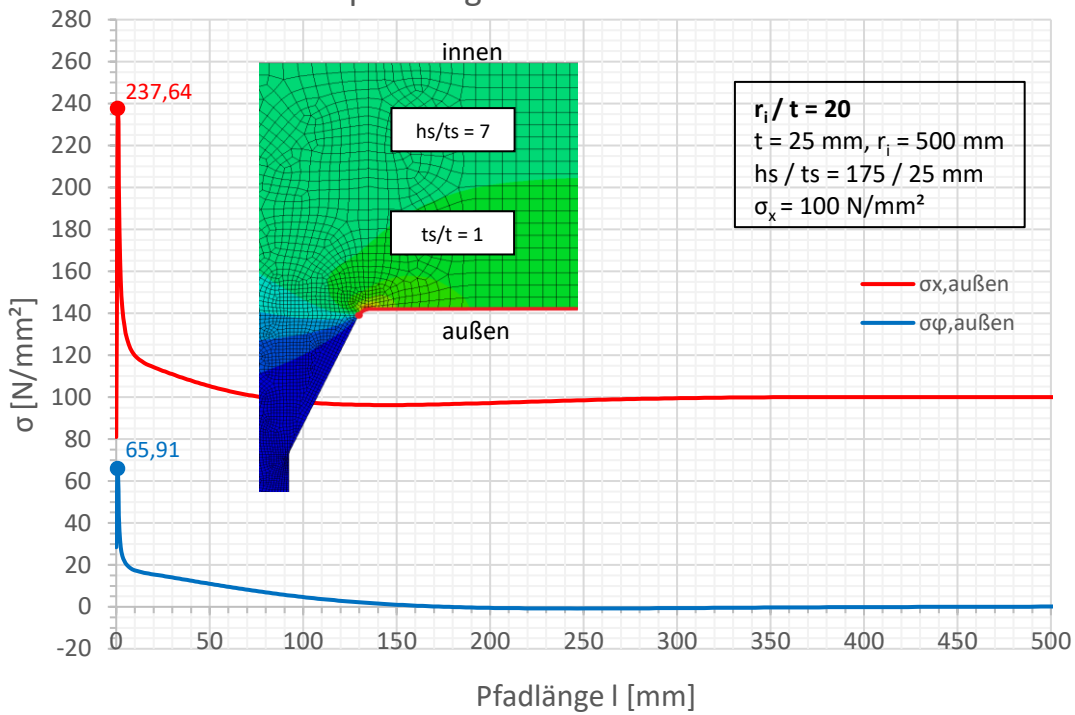


Spannungen an der Außenseite

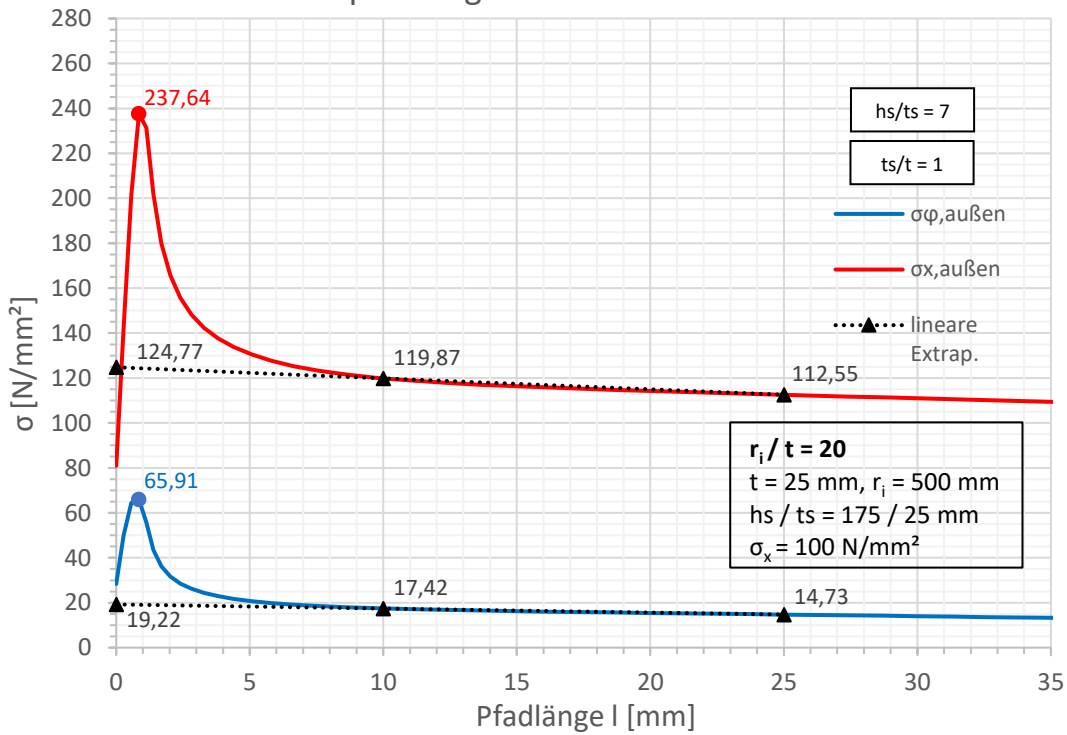


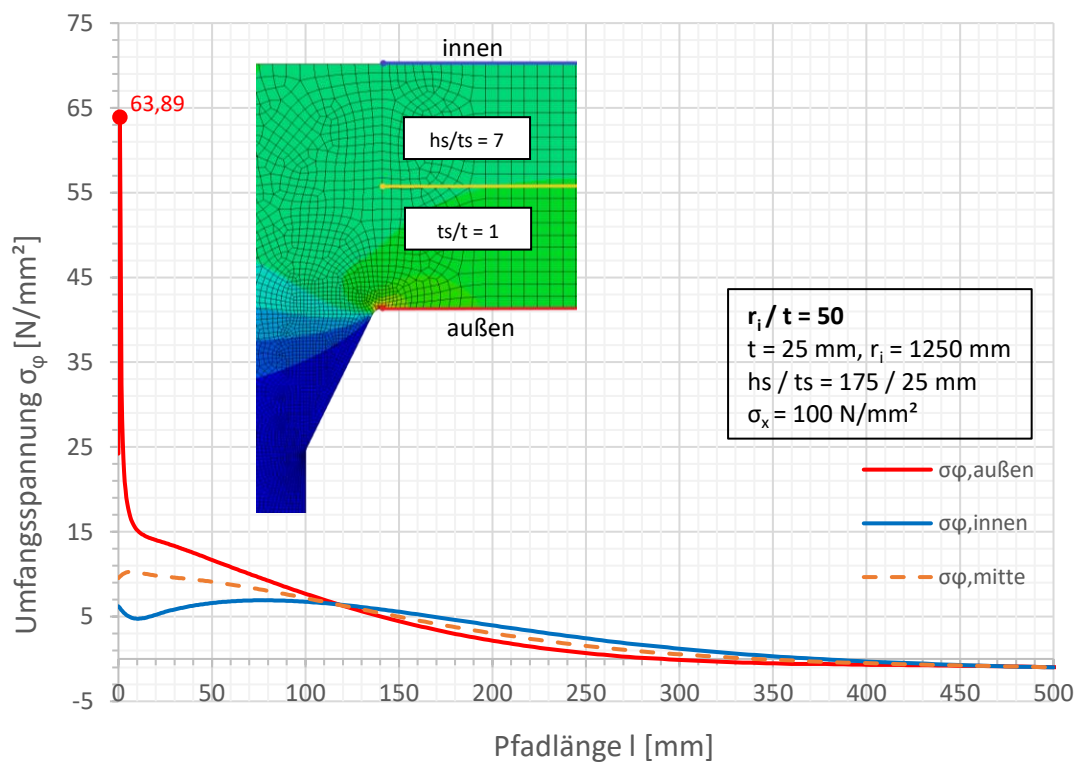
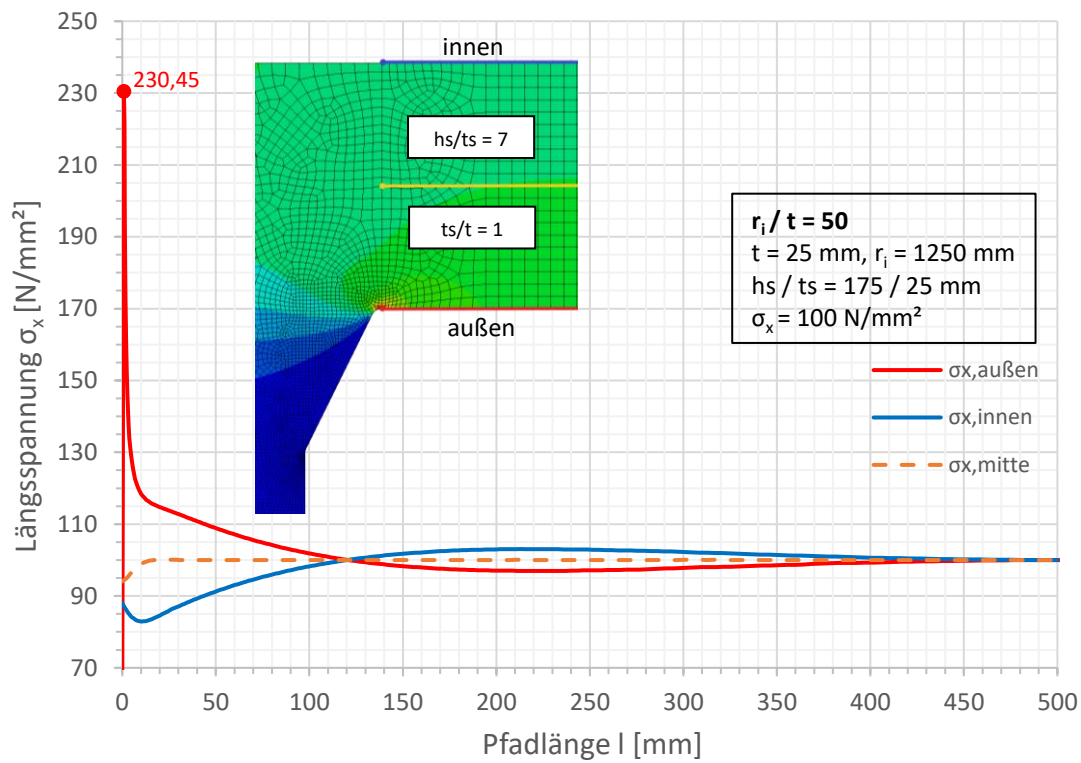


Spannungen an der Außenseite

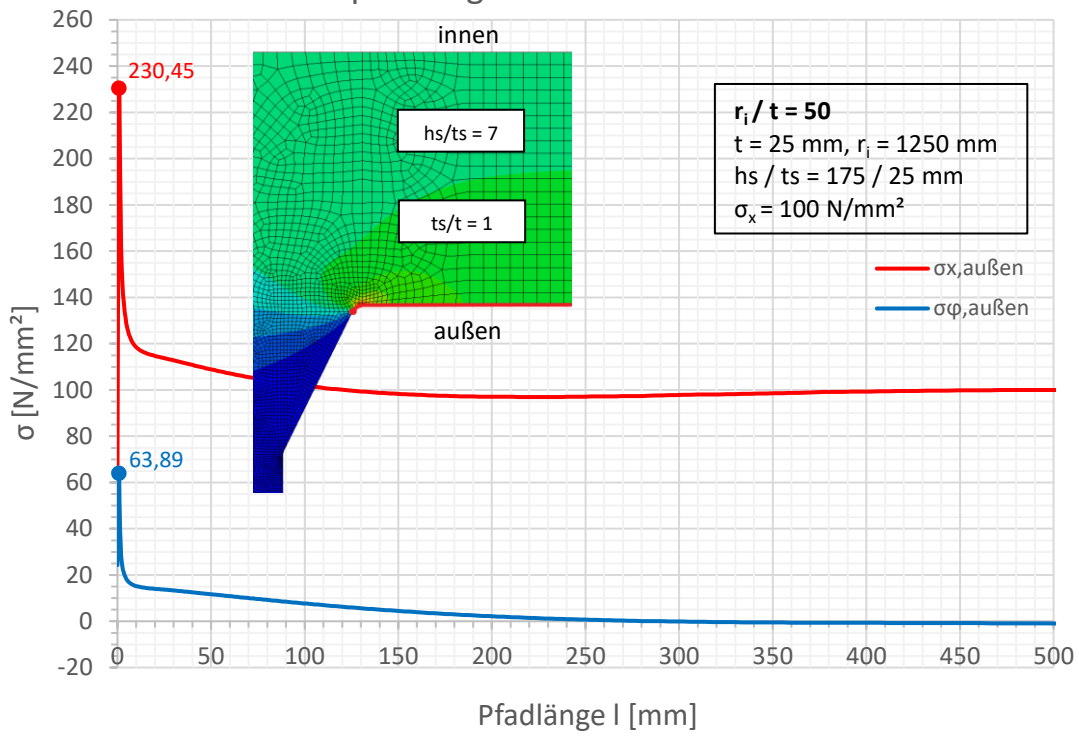


Spannungen an der Außenseite

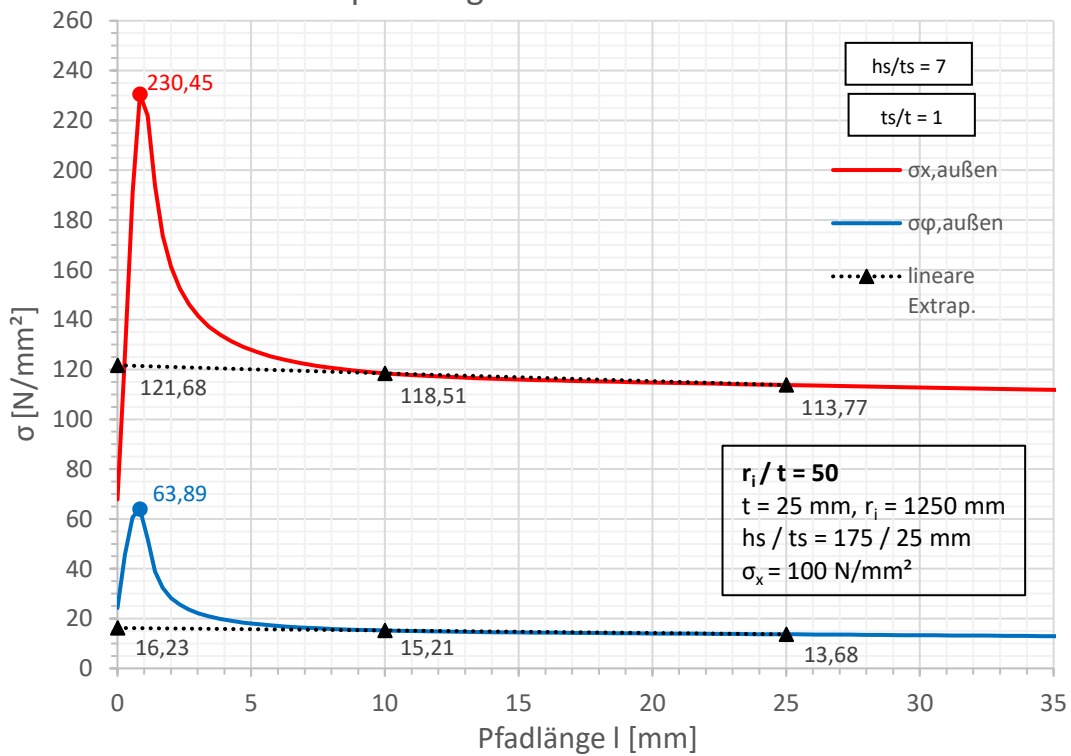


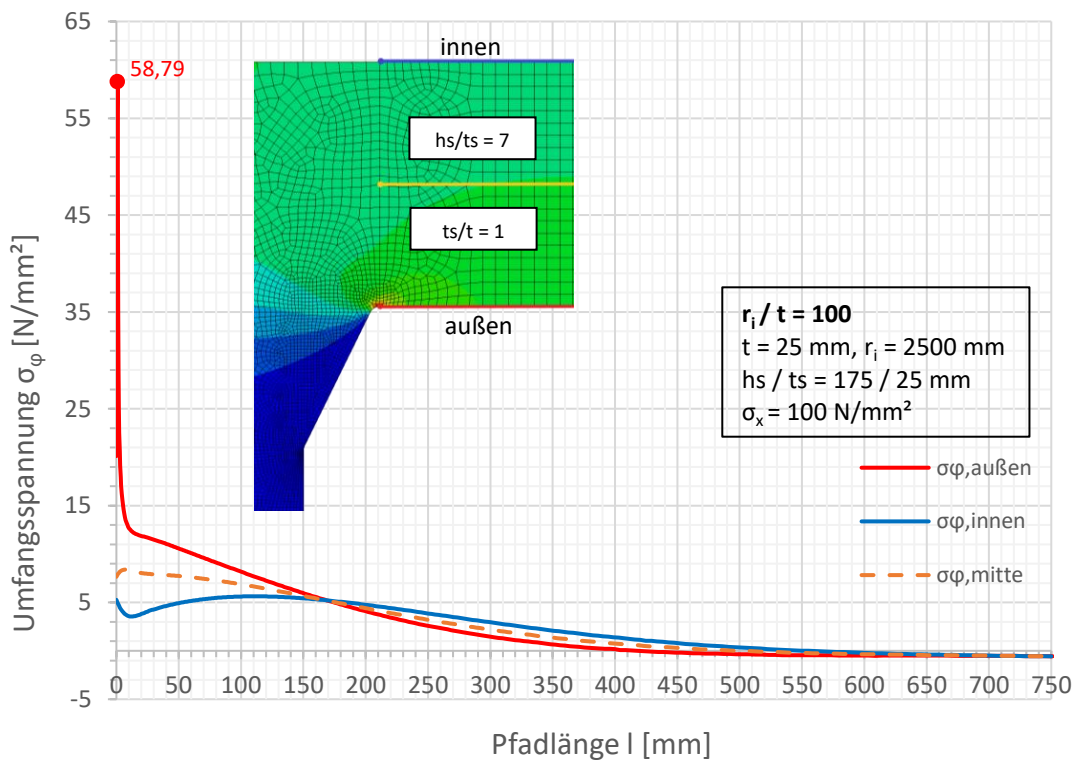
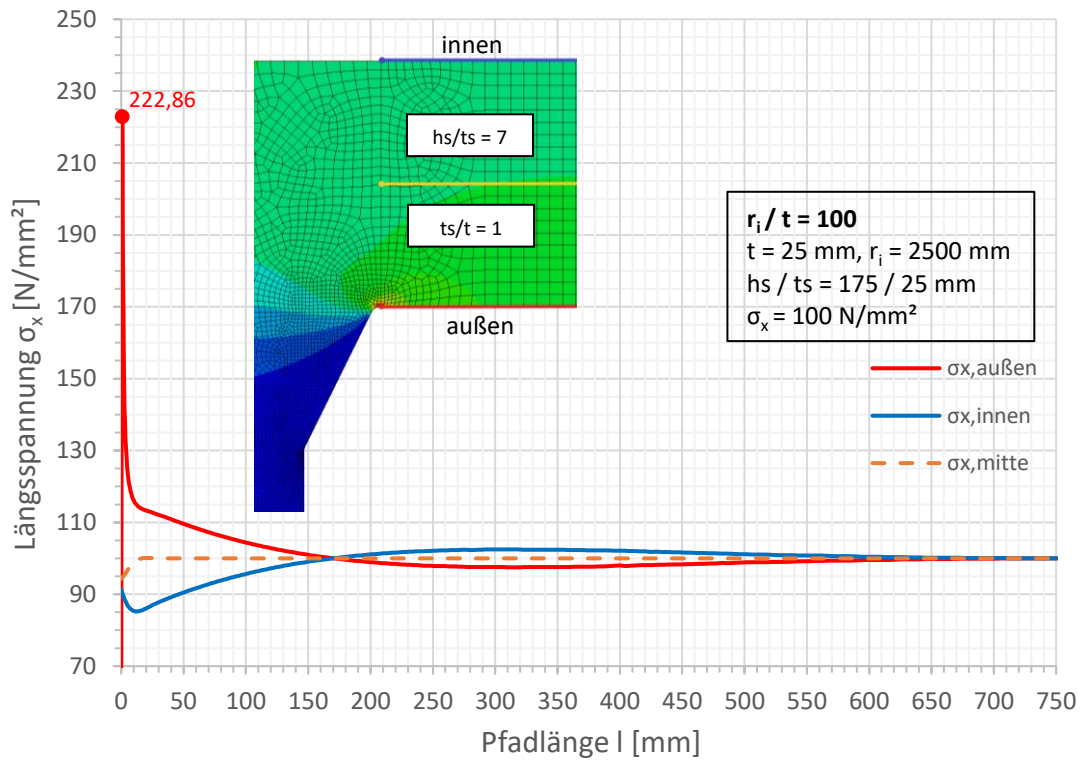


Spannungen an der Außenseite

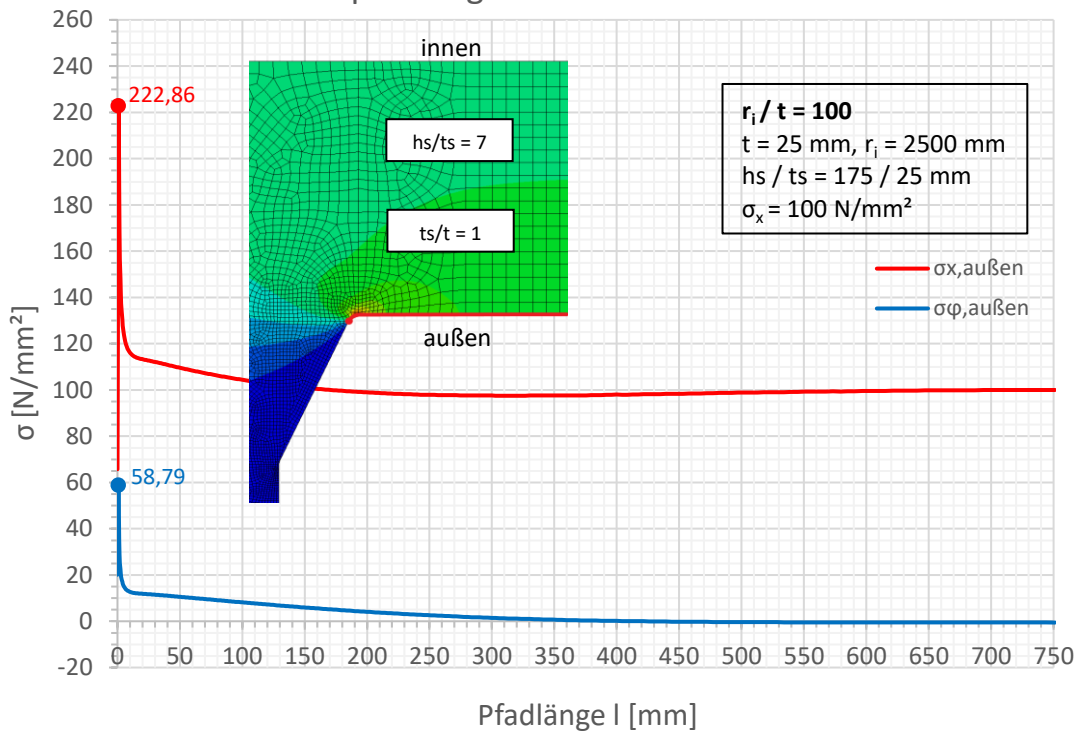


Spannungen an der Außenseite

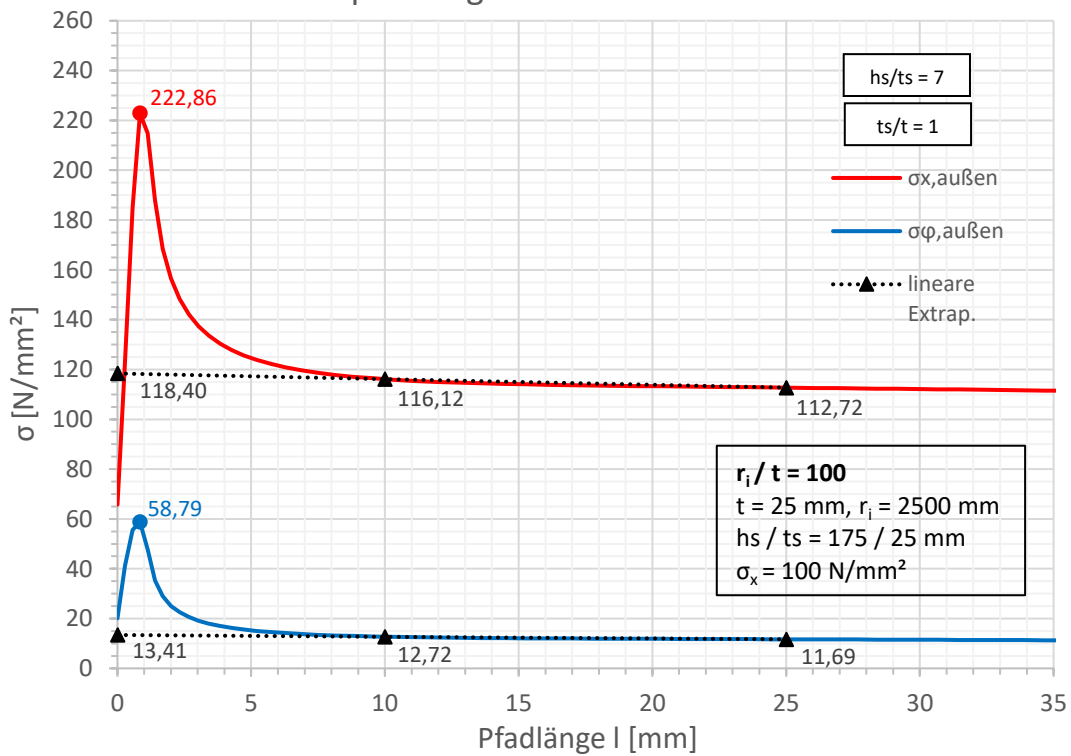


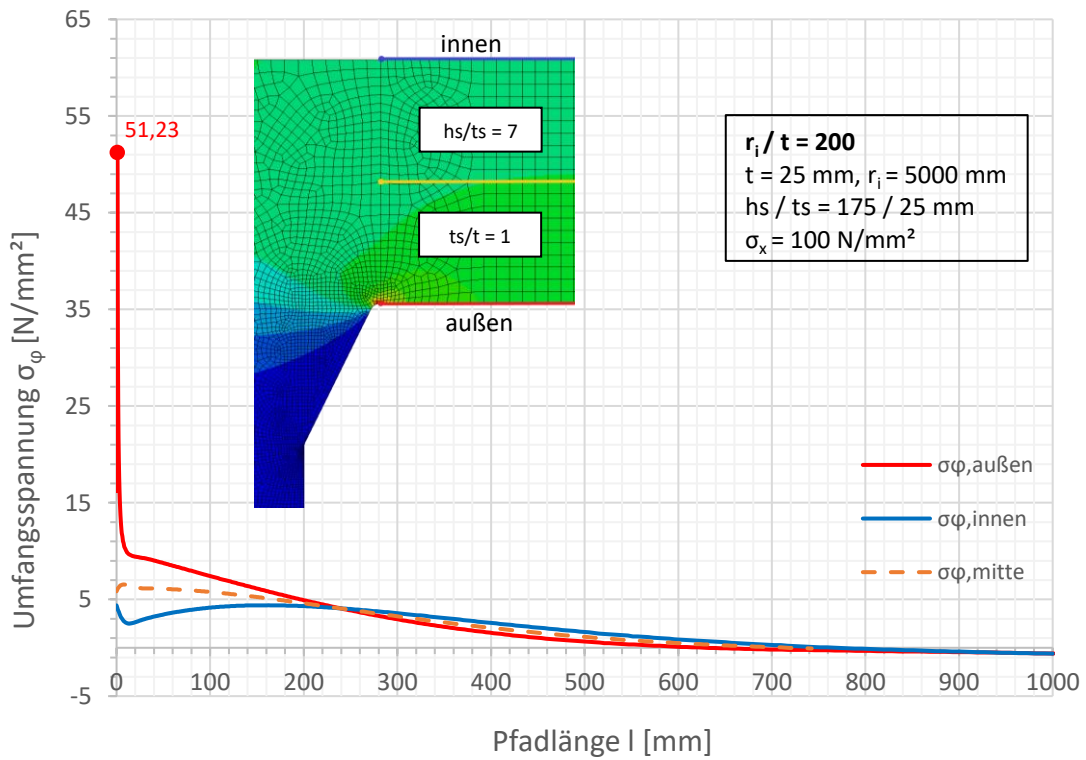
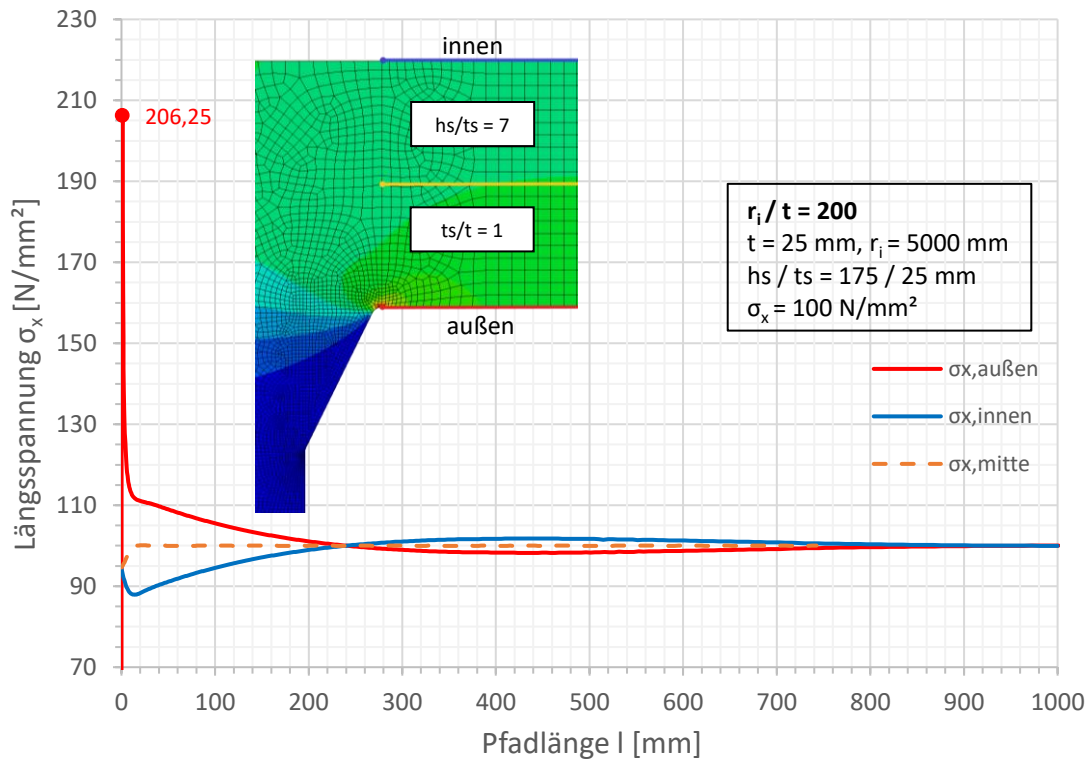


Spannungen an der Außenseite

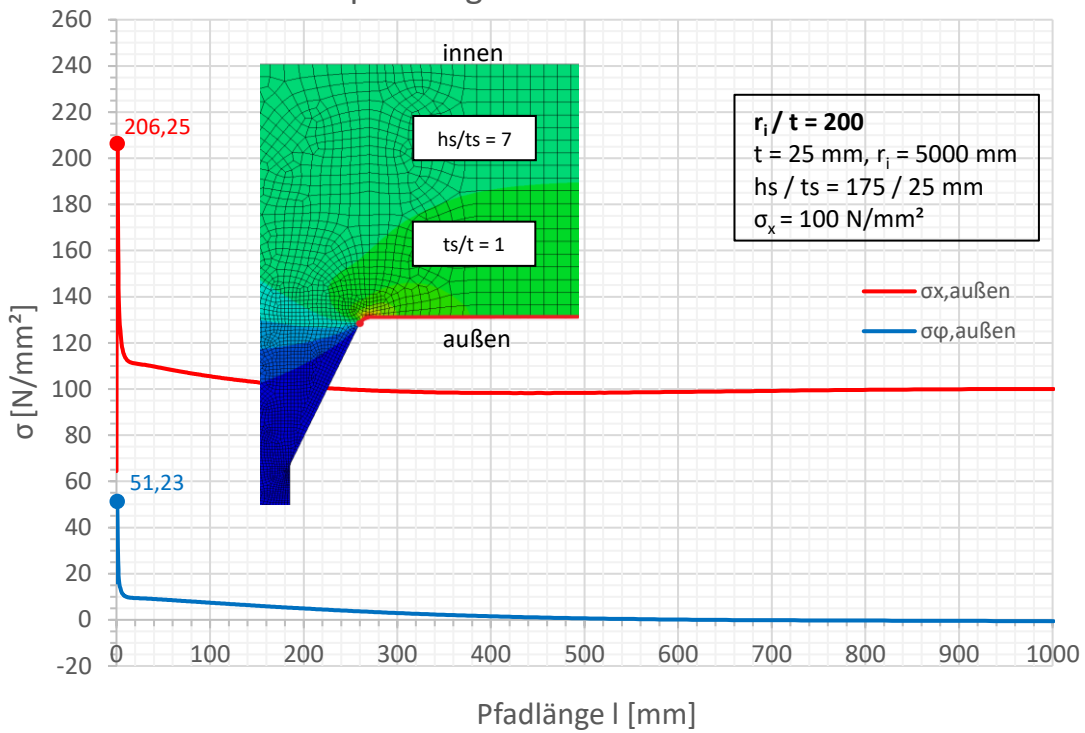


Spannungen an der Außenseite

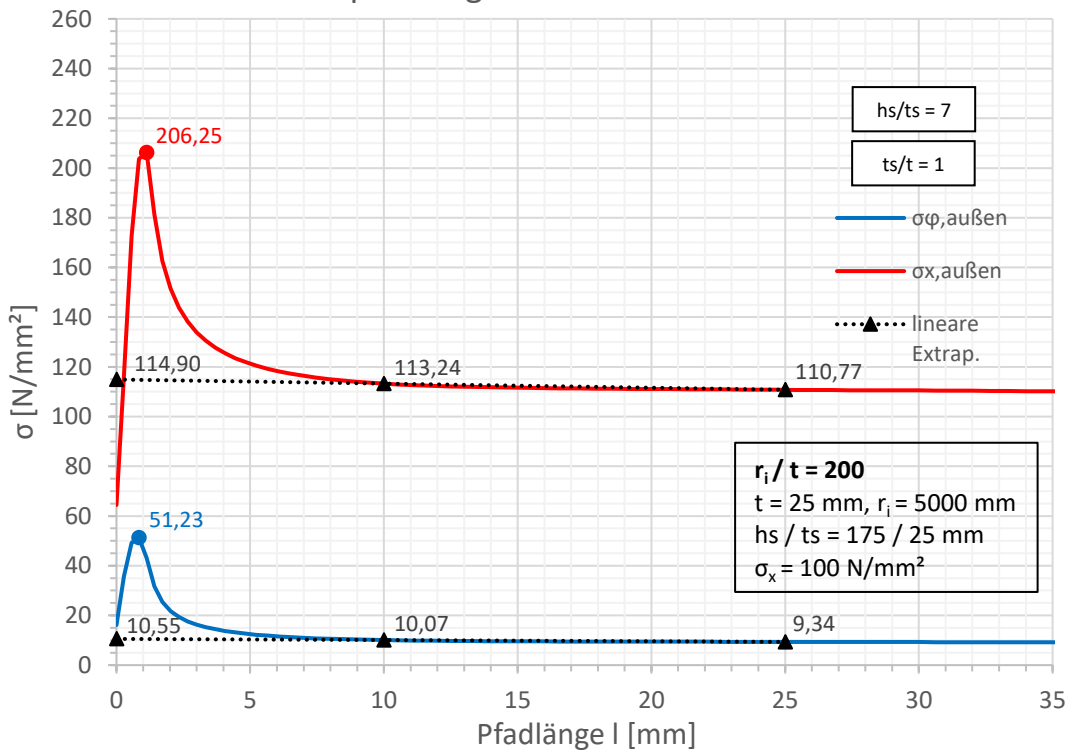


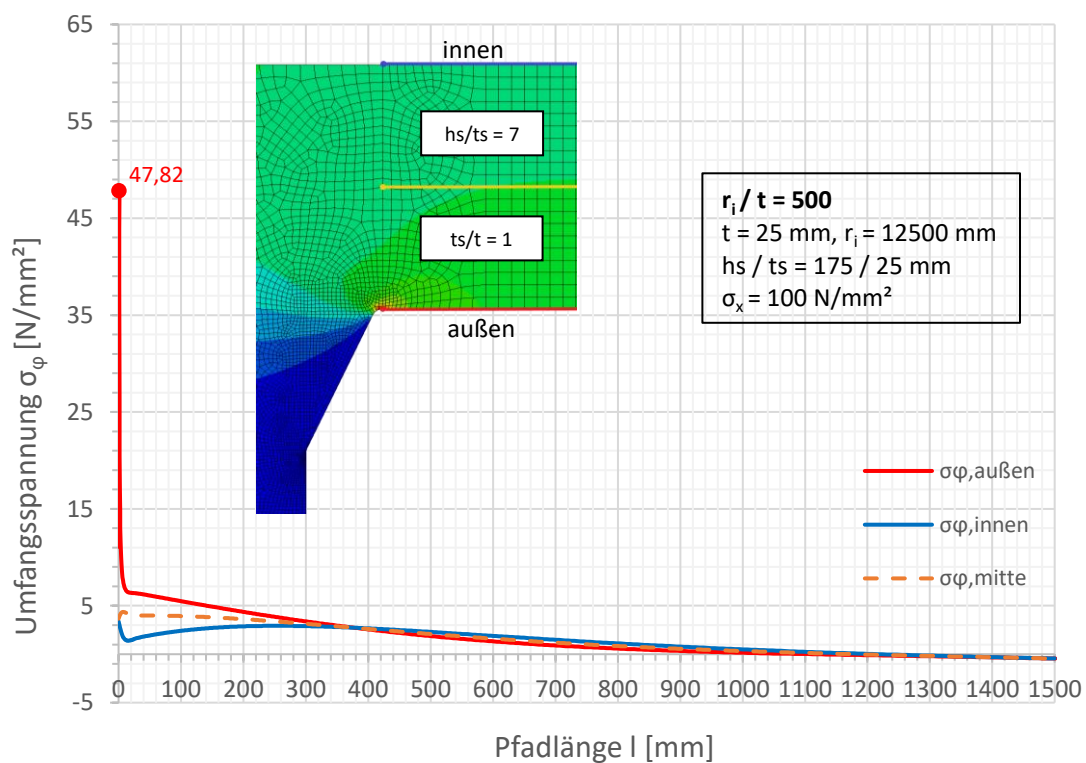
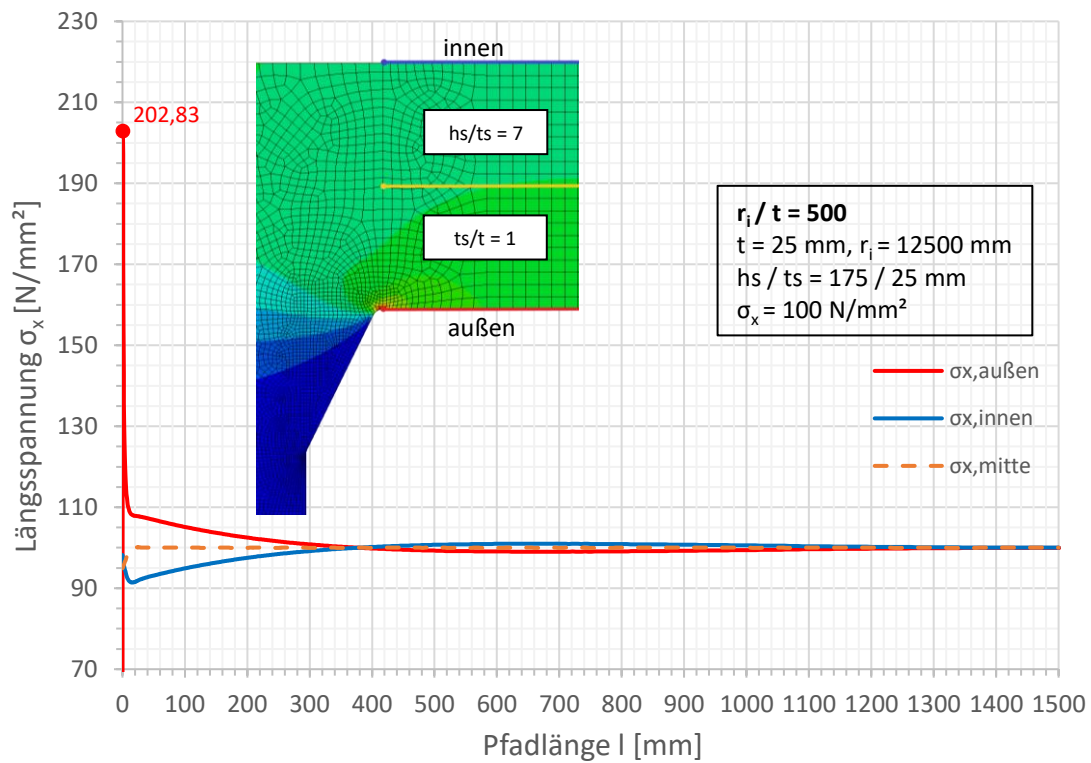


Spannungen an der Außenseite

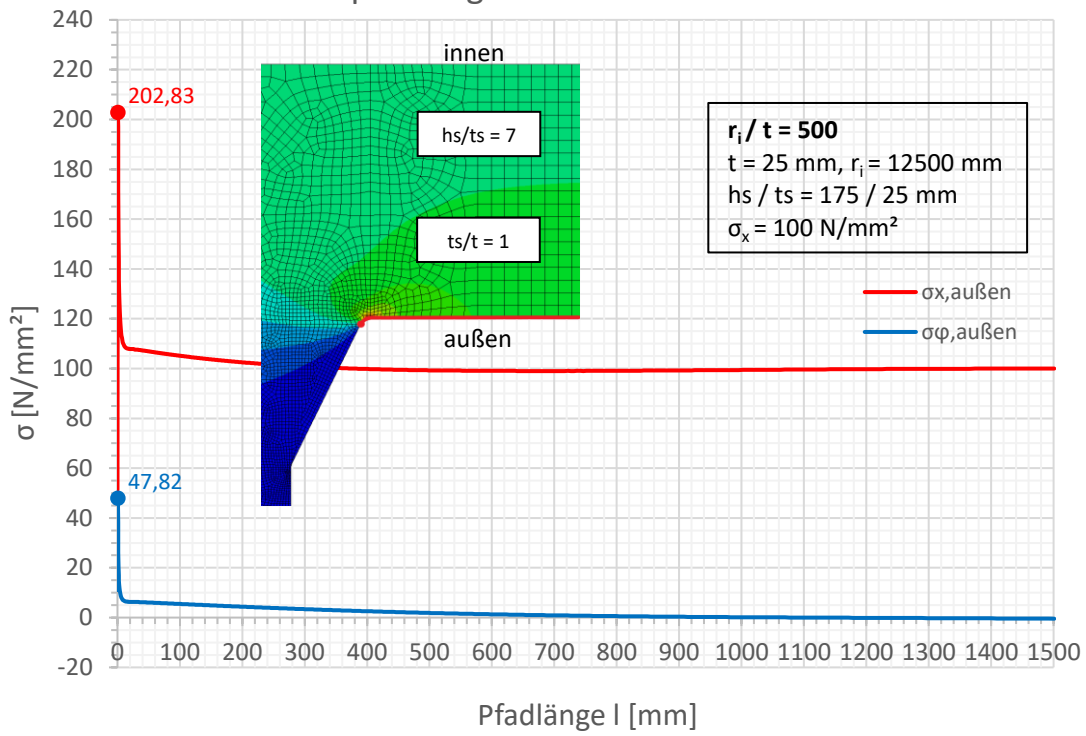


Spannungen an der Außenseite

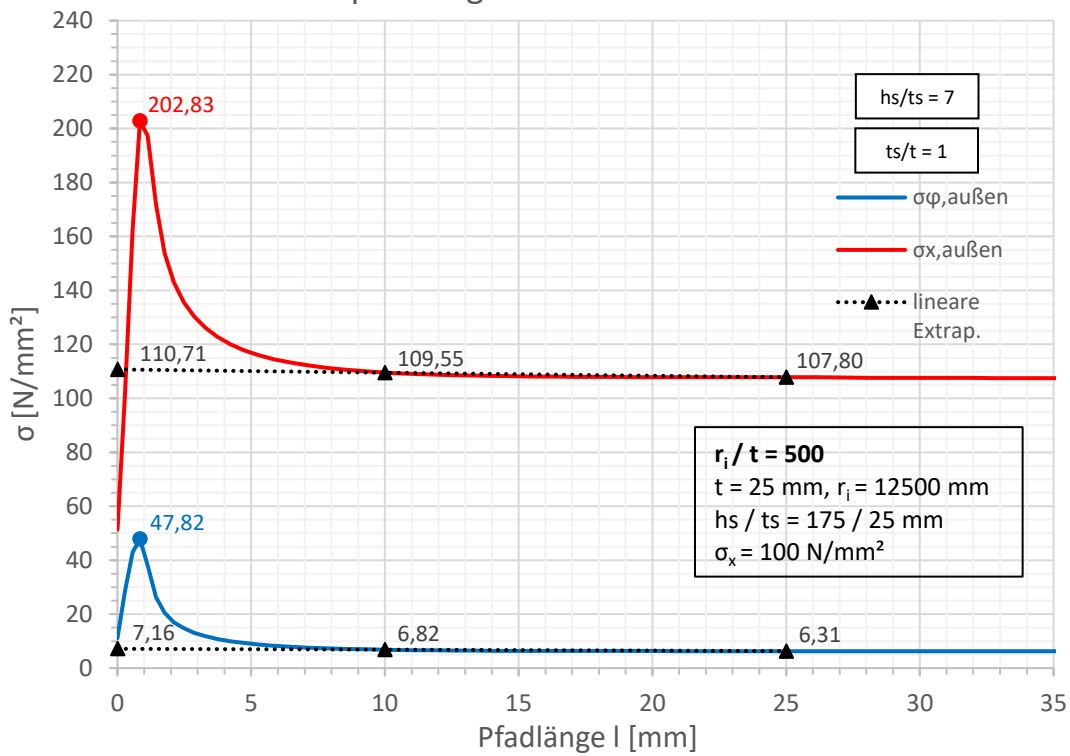


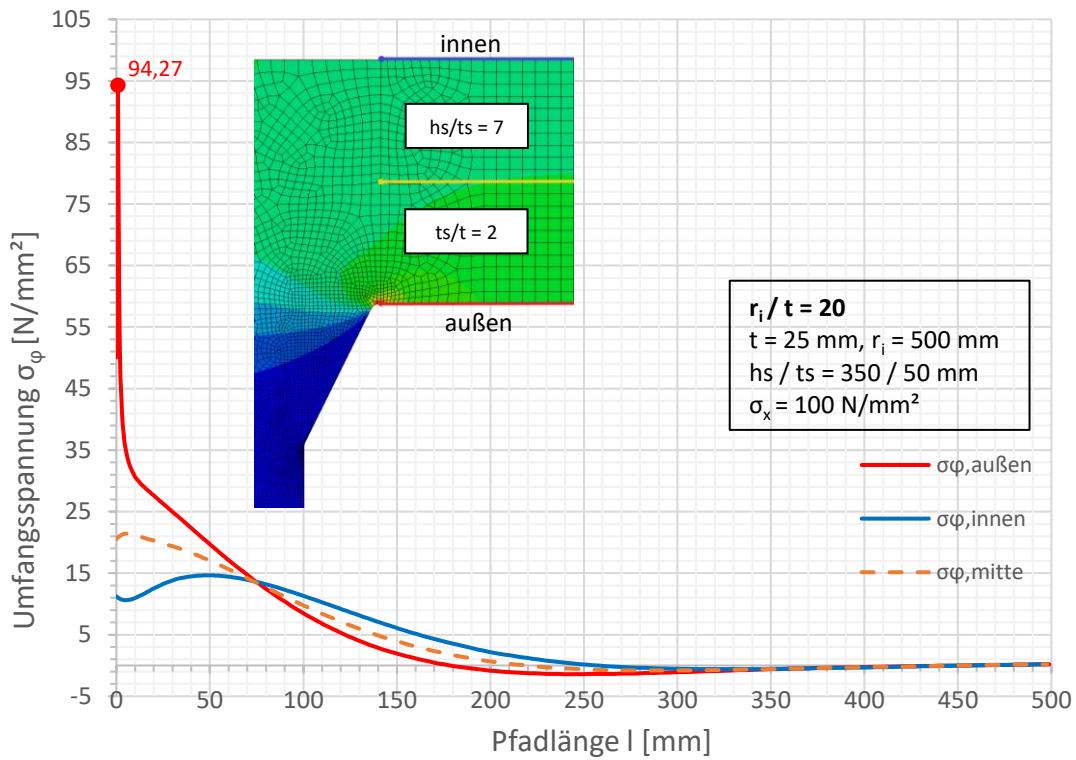
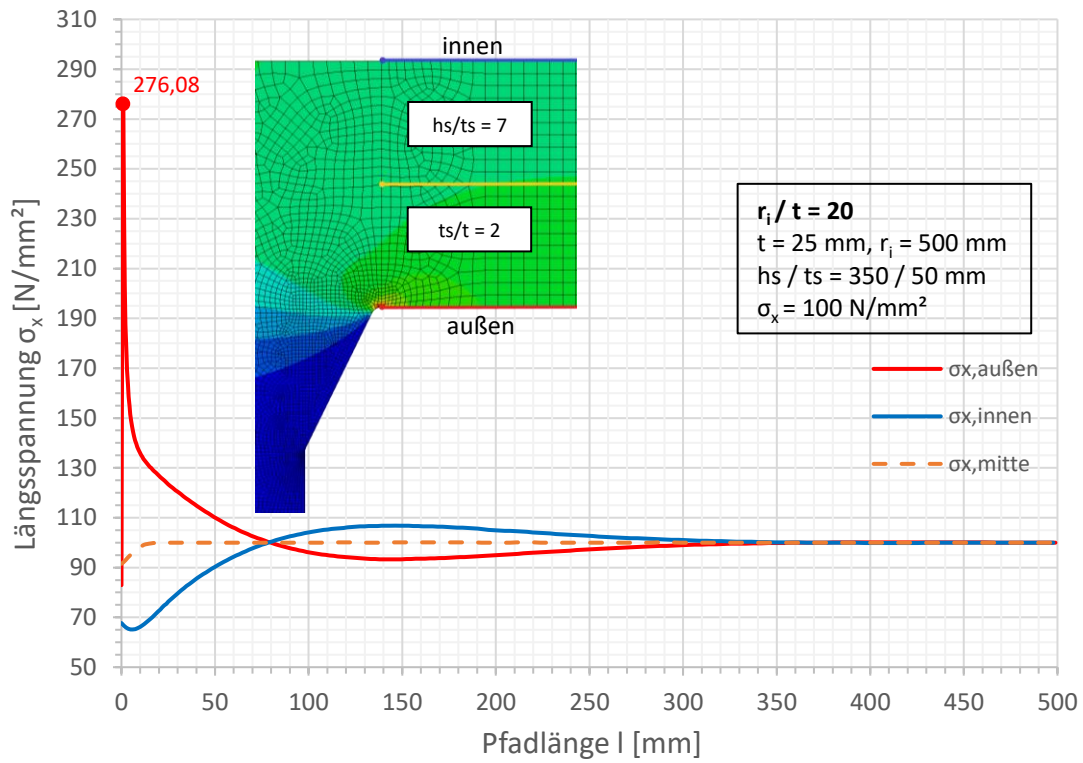


Spannungen an der Außenseite

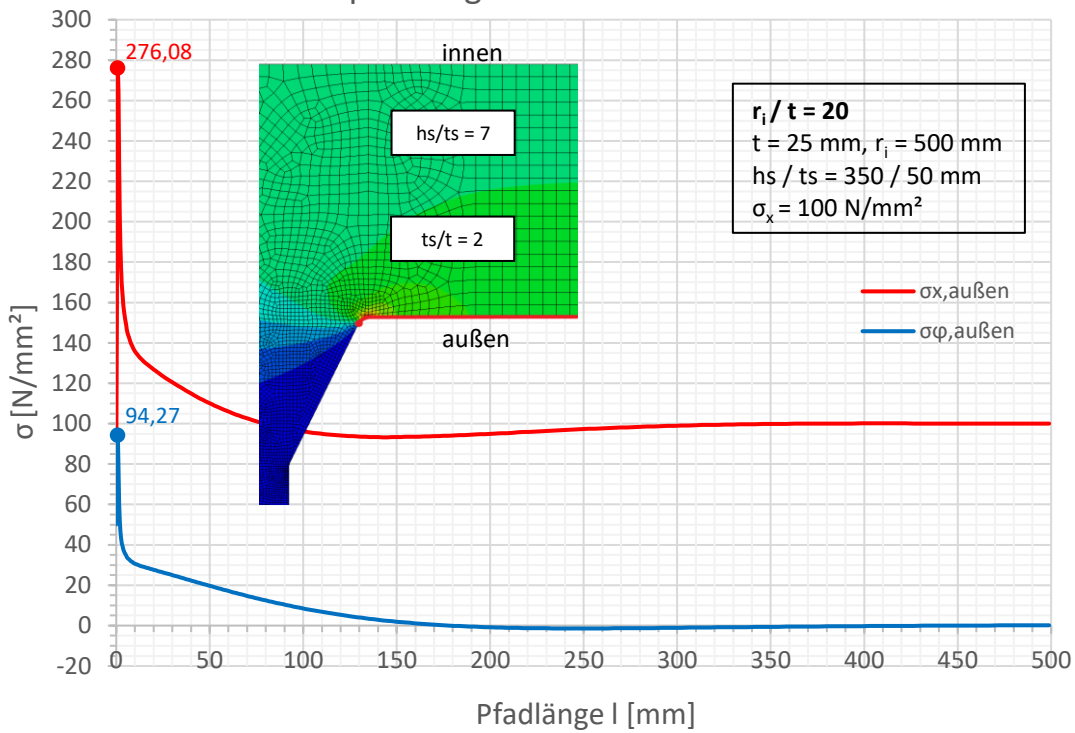


Spannungen an der Außenseite

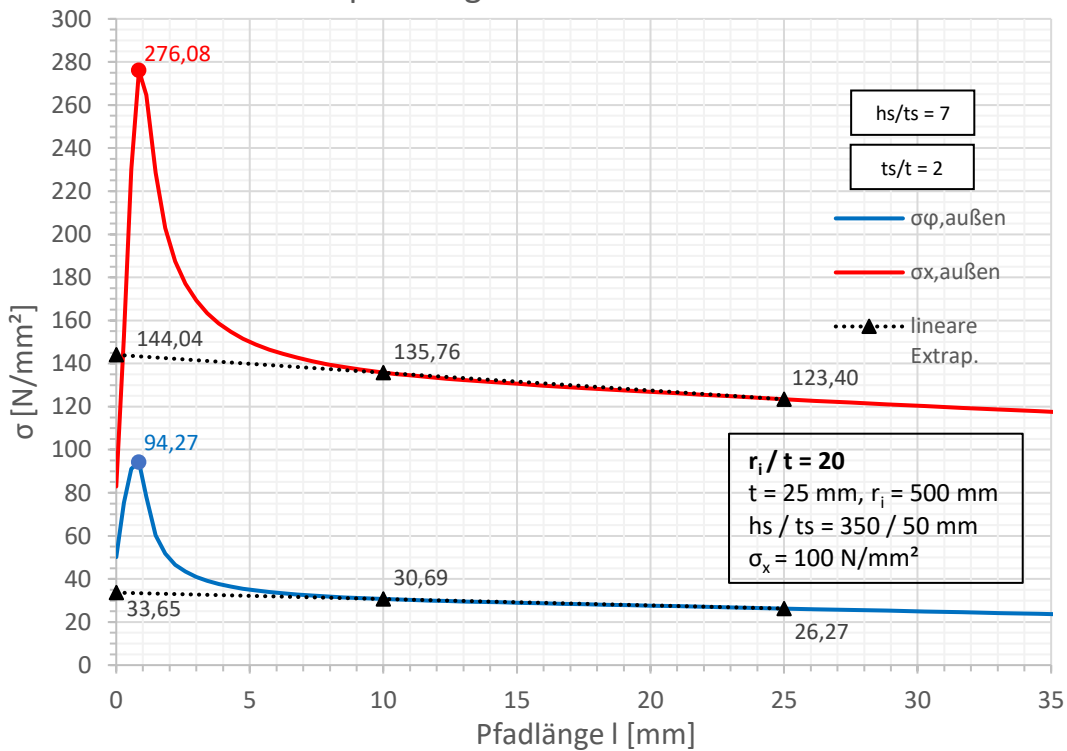


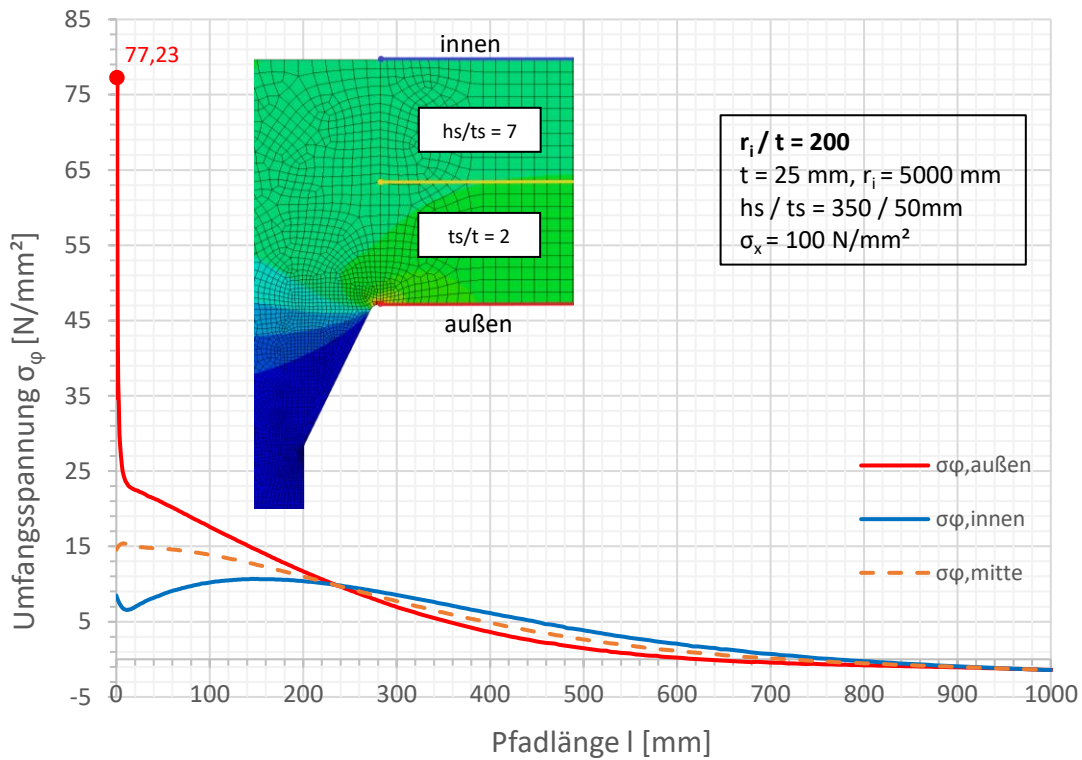
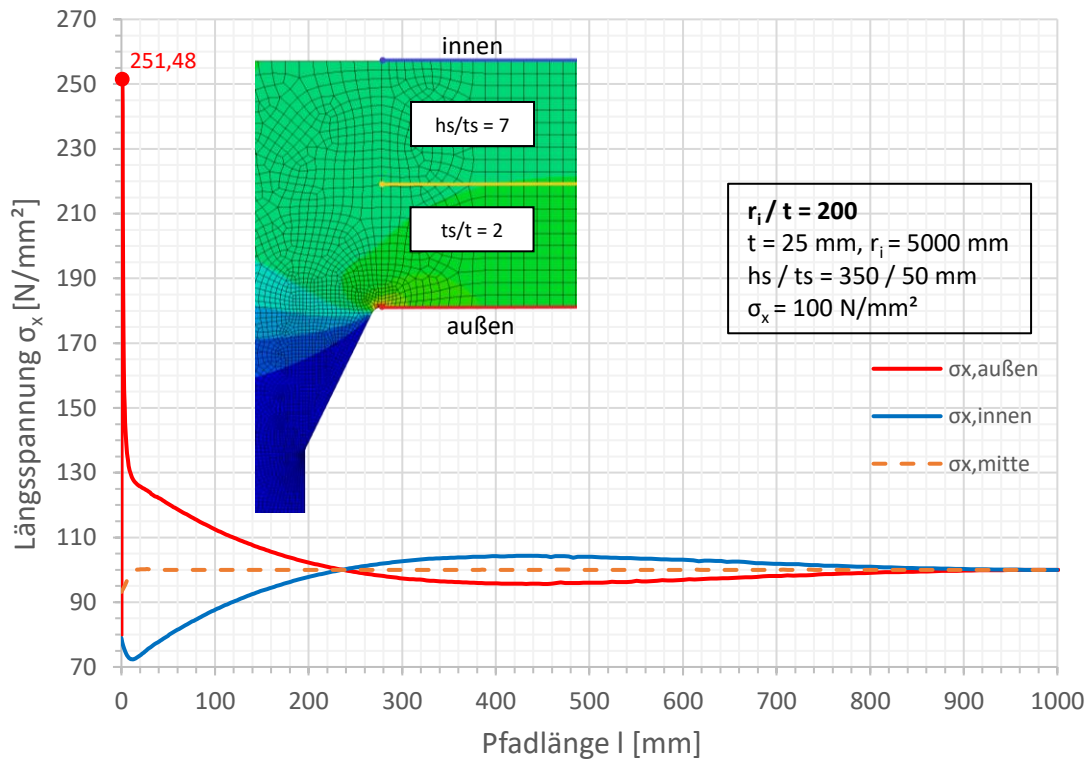


Spannungen an der Außenseite

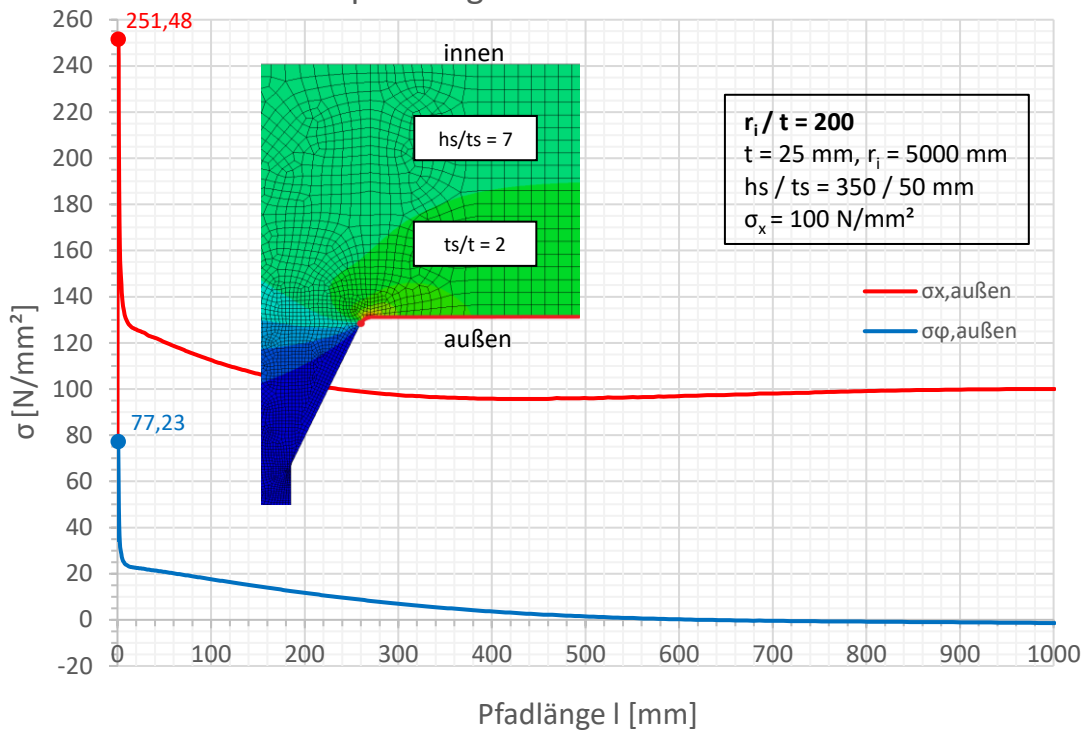


Spannungen an der Außenseite

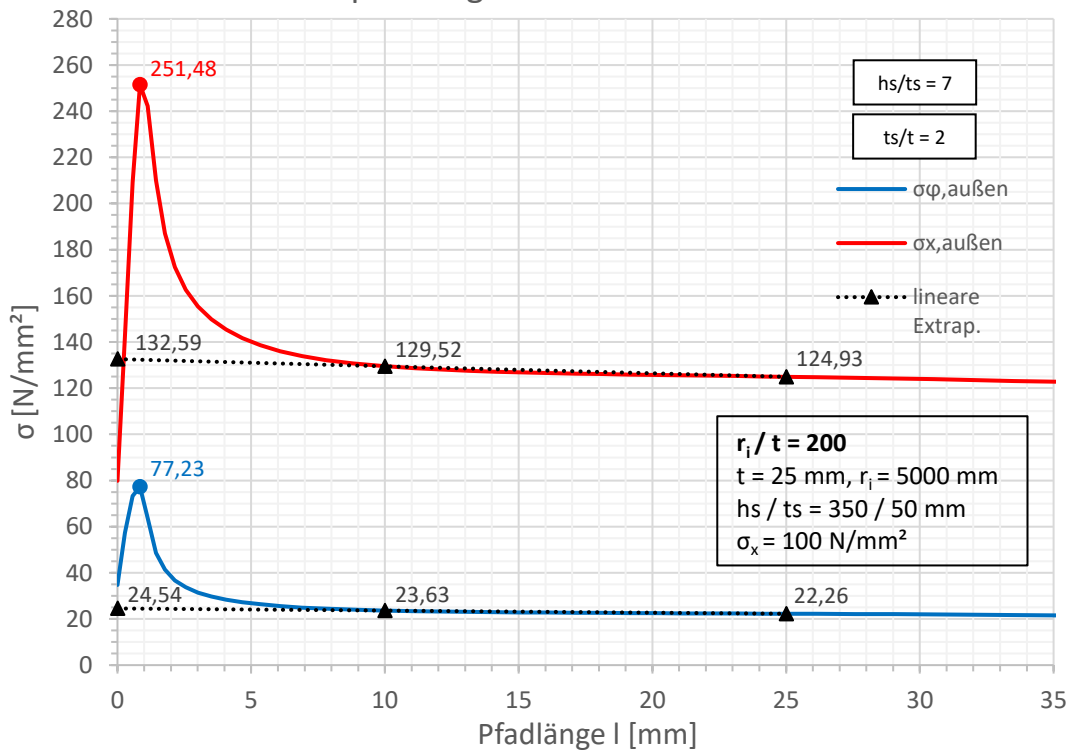


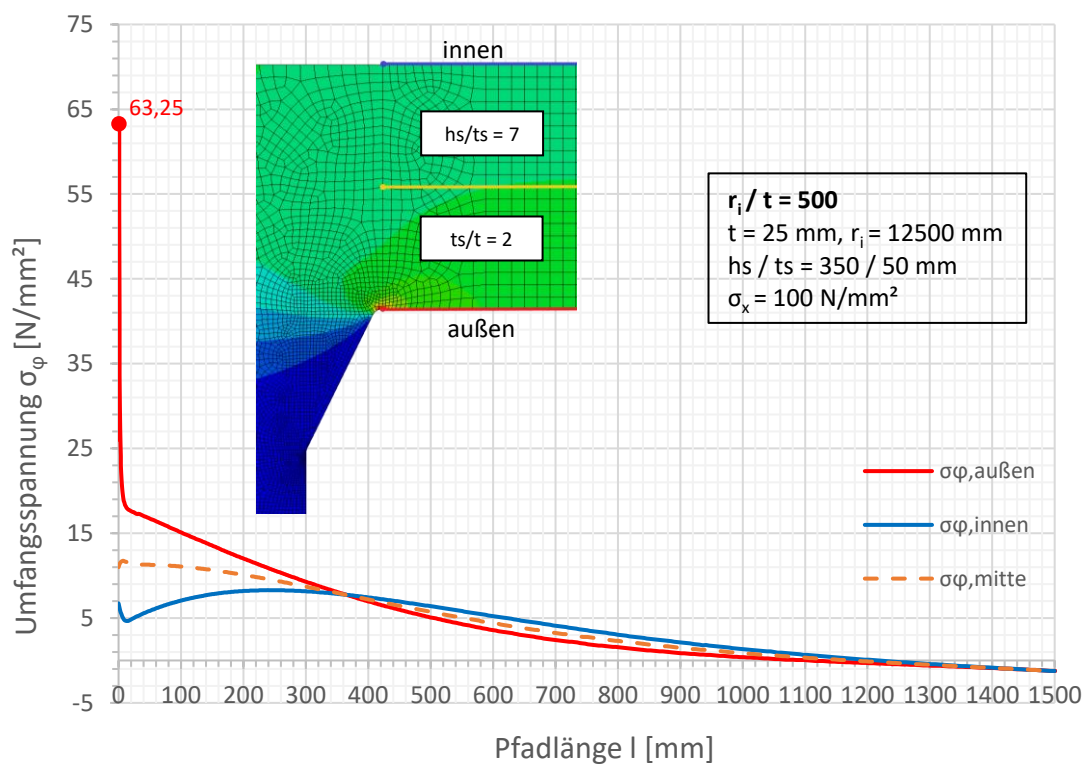
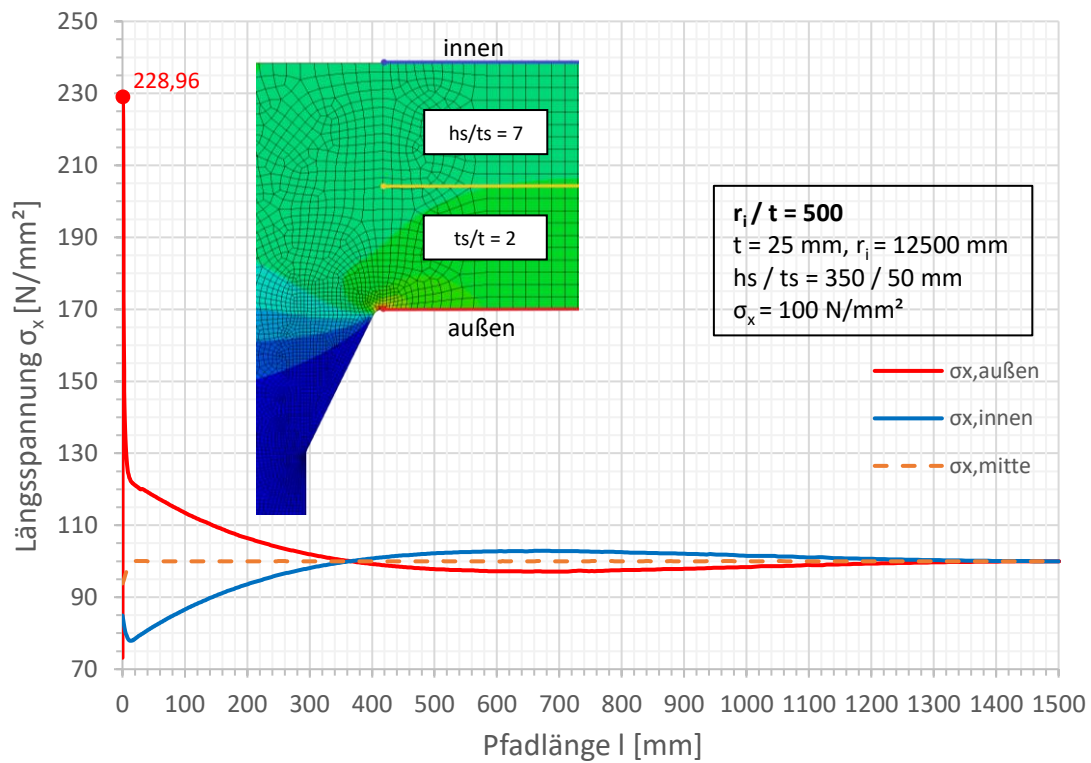


Spannungen an der Außenseite

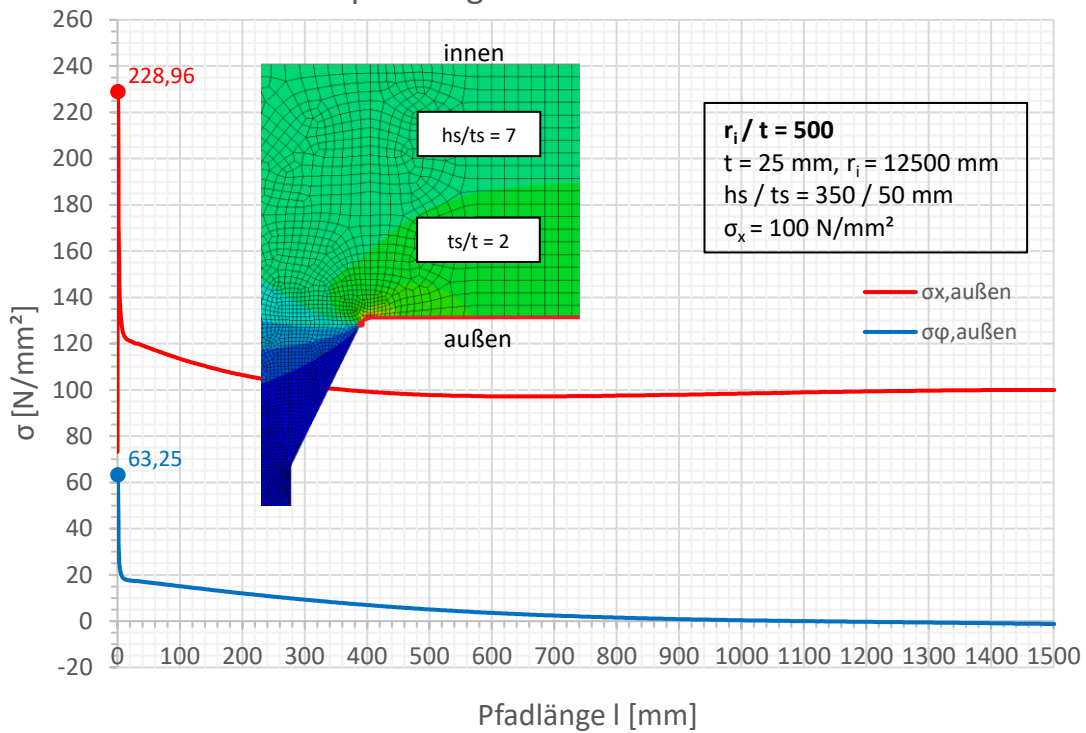


Spannungen an der Außenseite

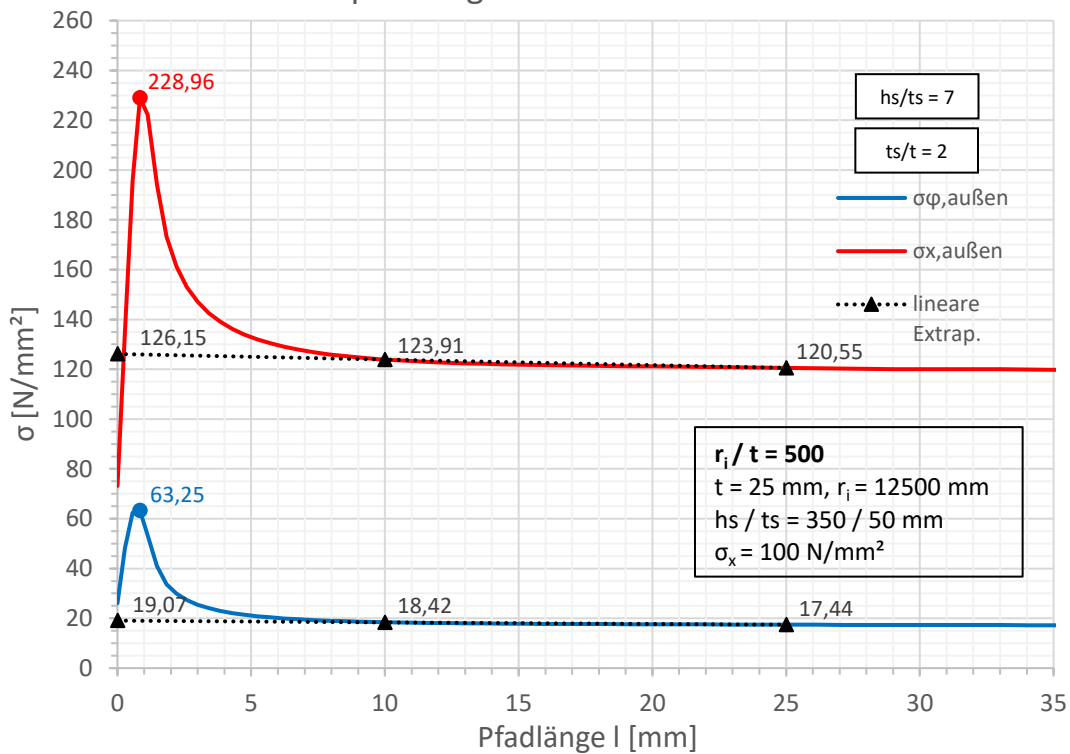


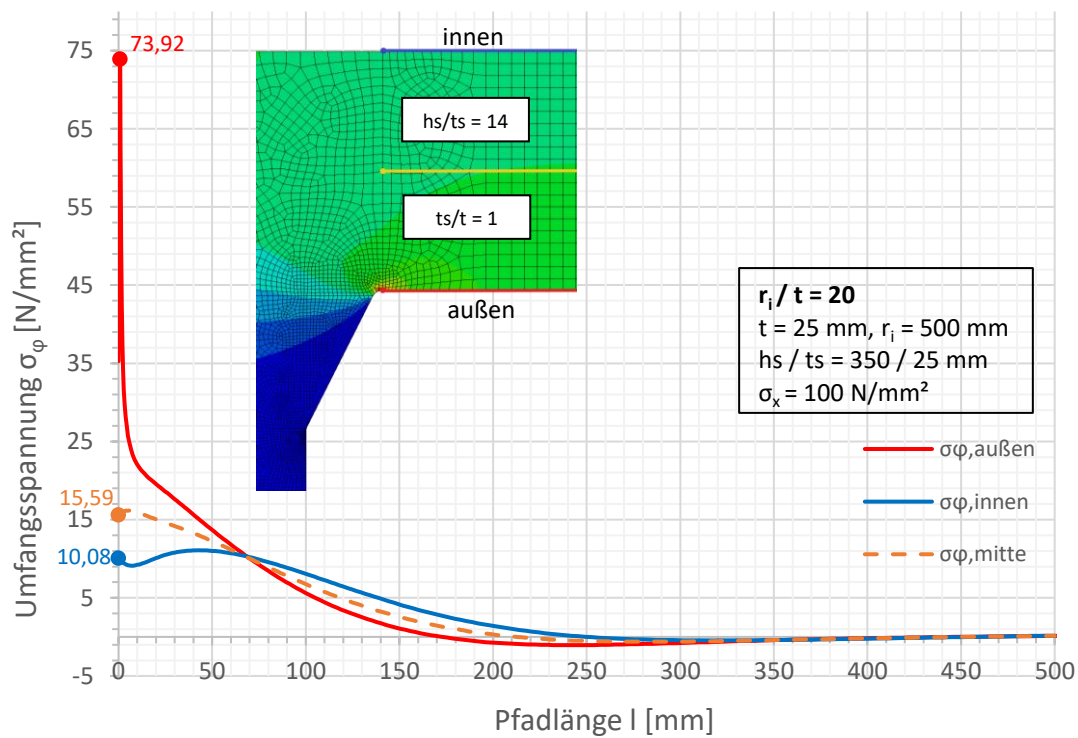
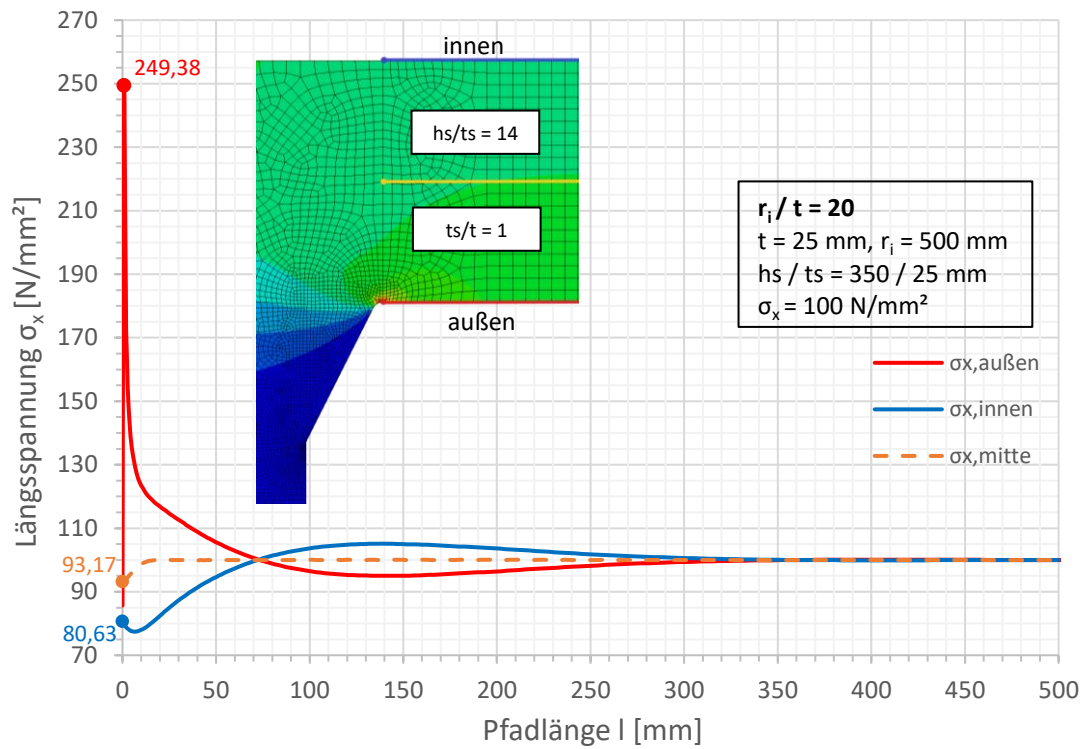


Spannungen an der Außenseite

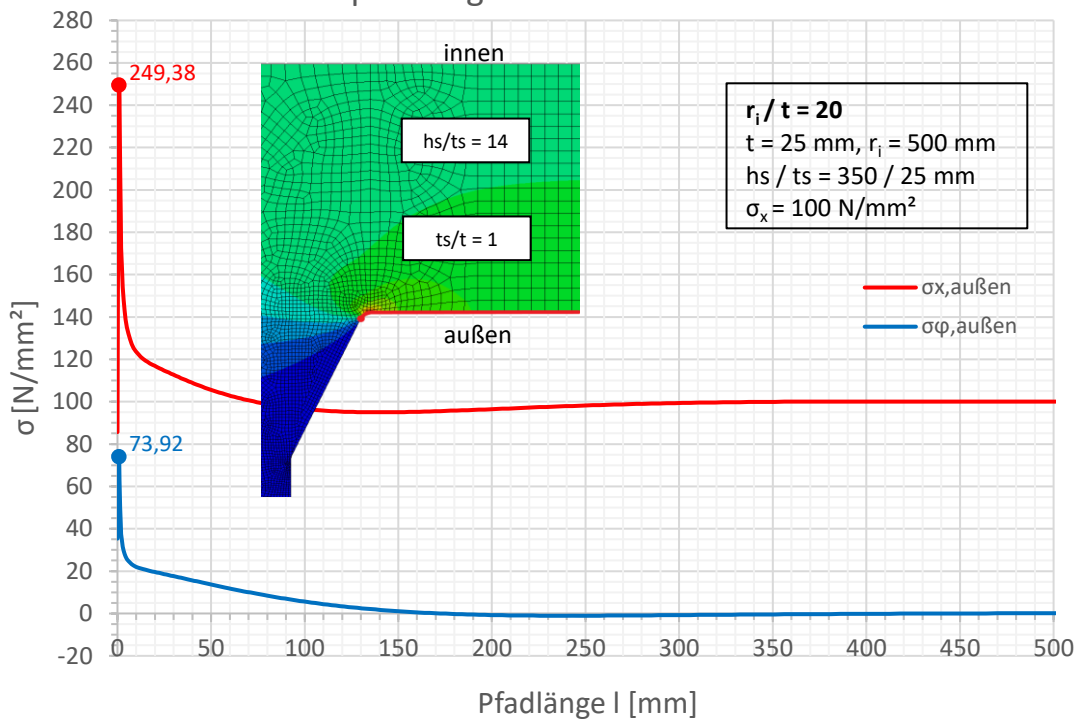


Spannungen an der Außenseite

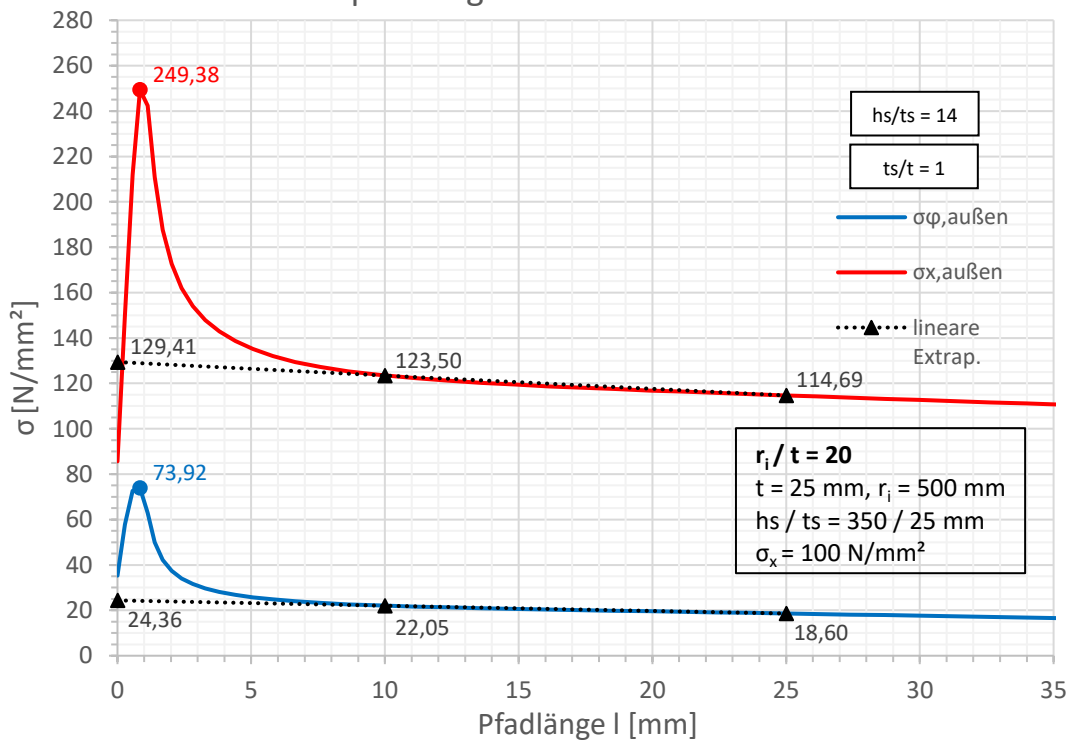


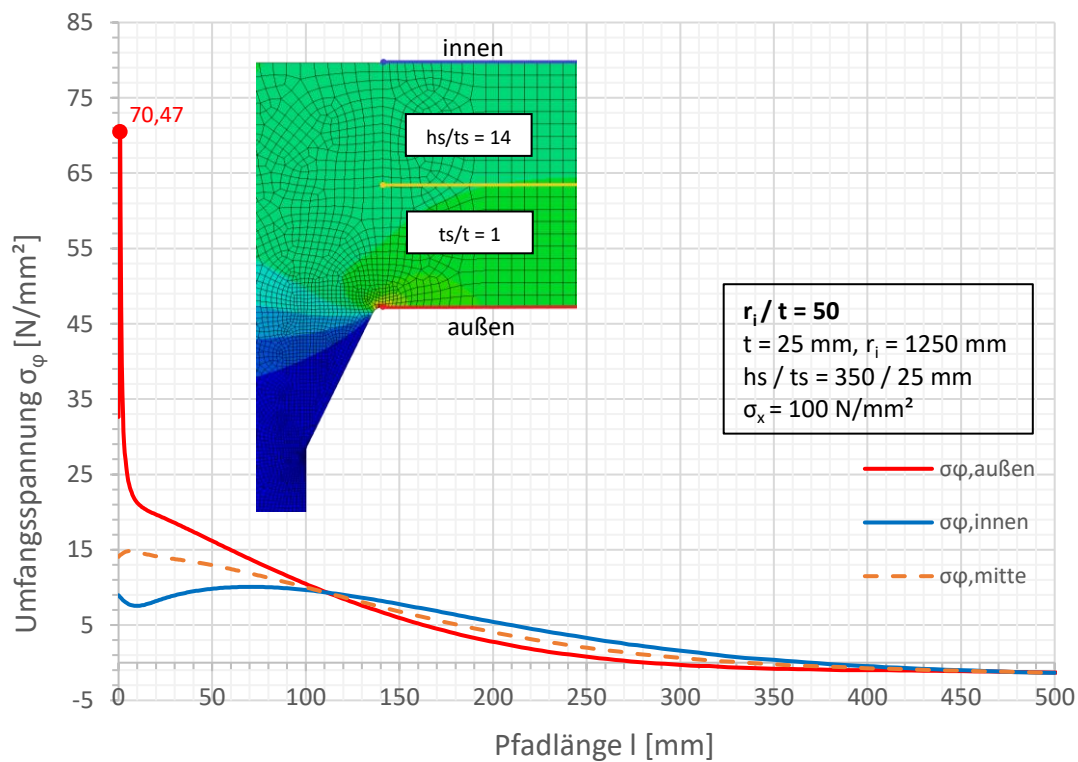
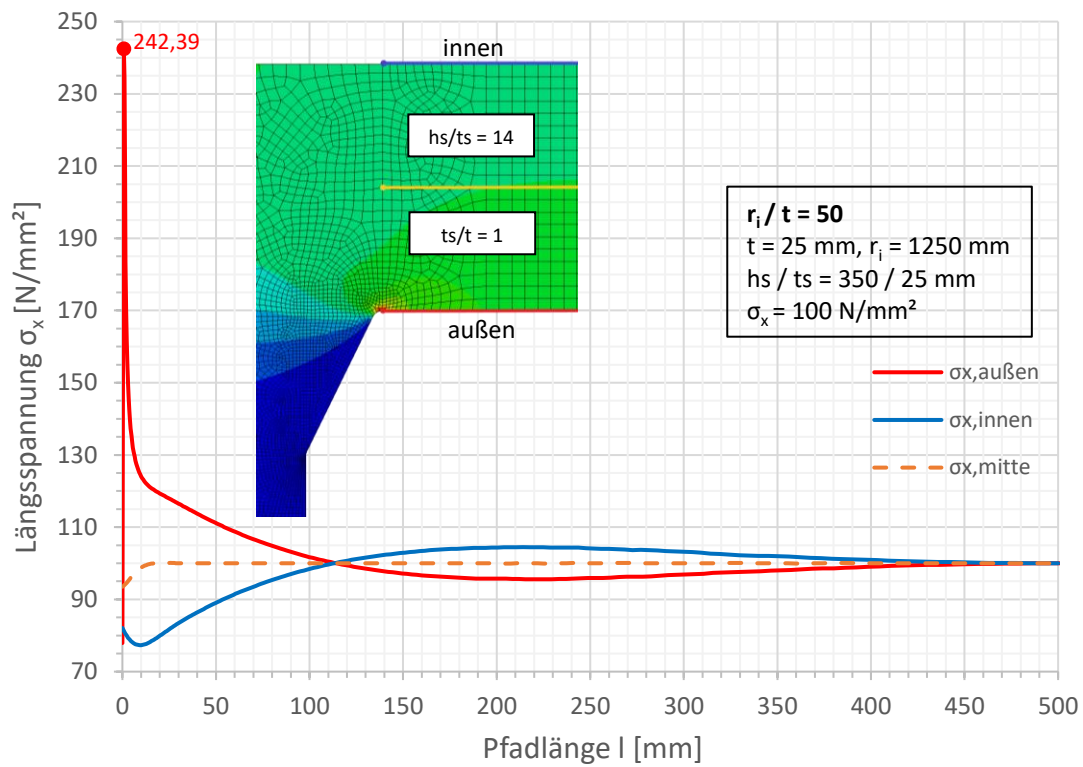


Spannungen an der Außenseite

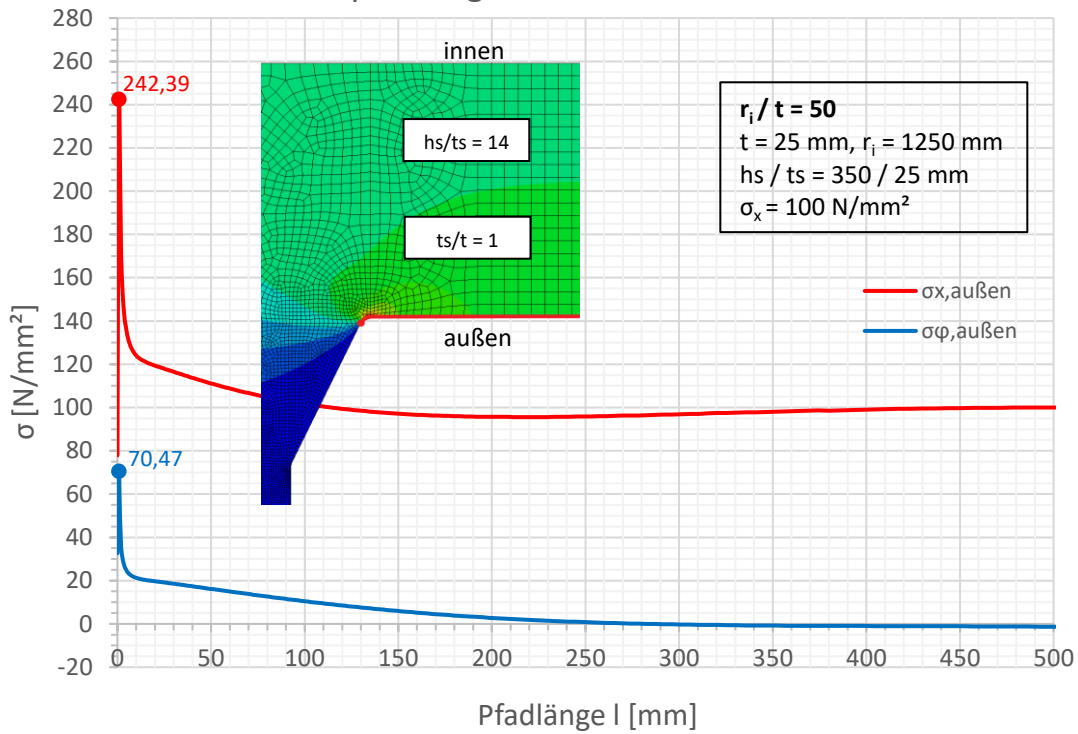


Spannungen an der Außenseite

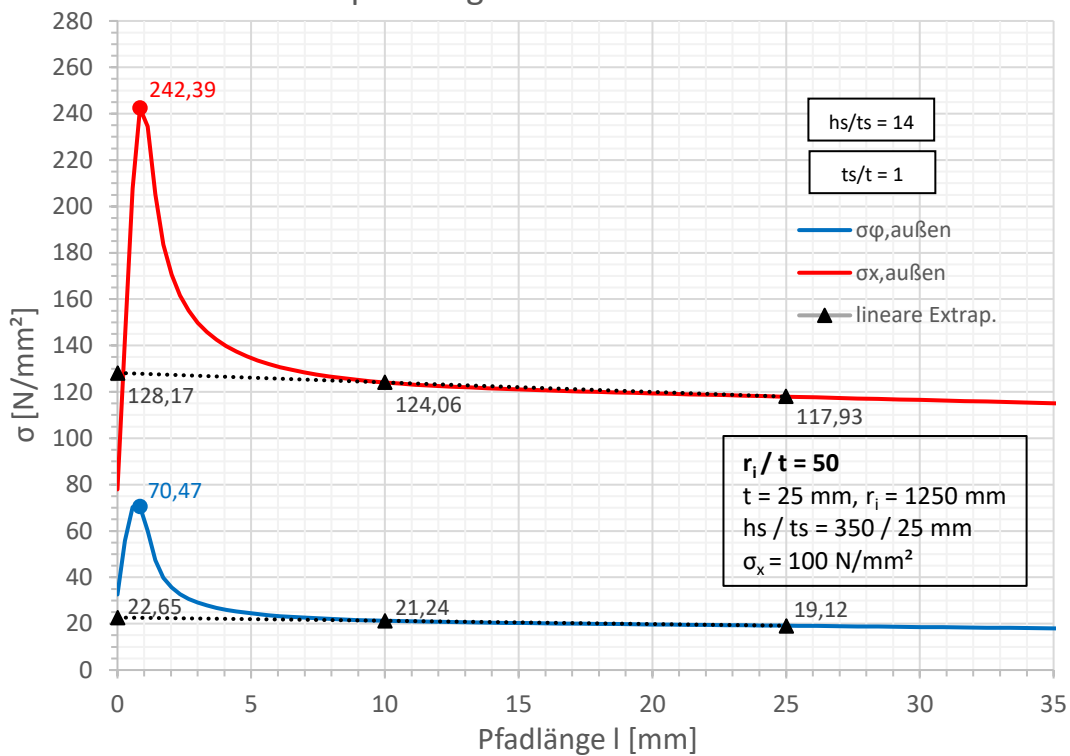


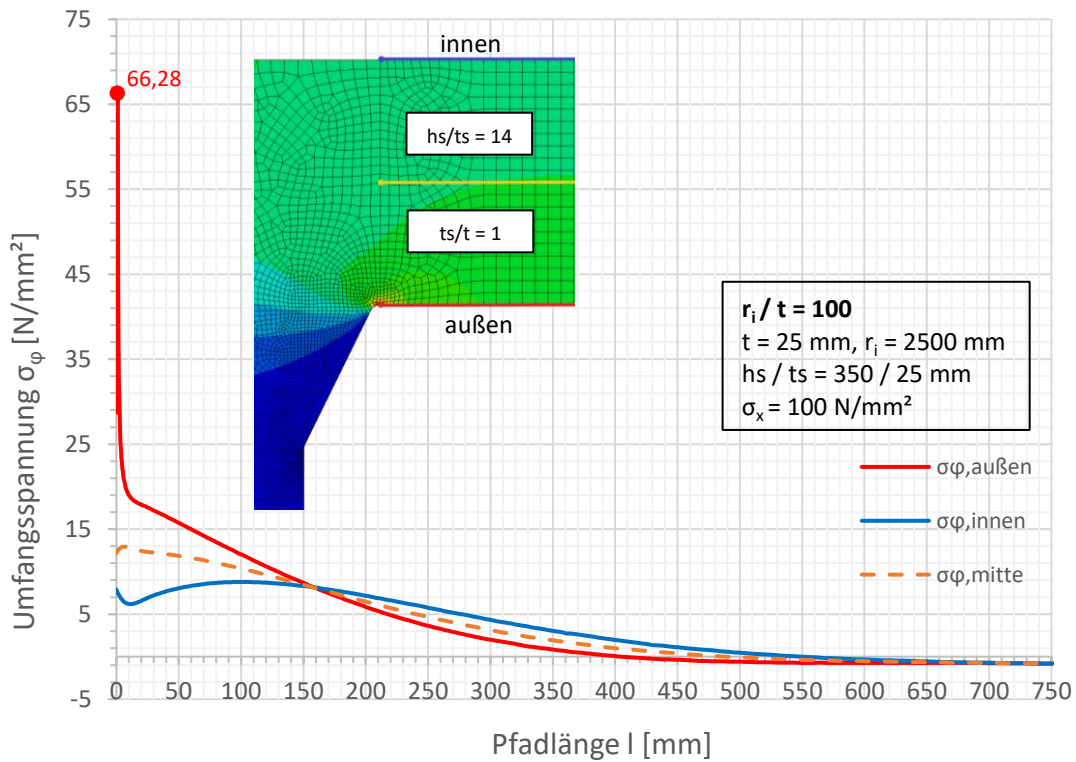
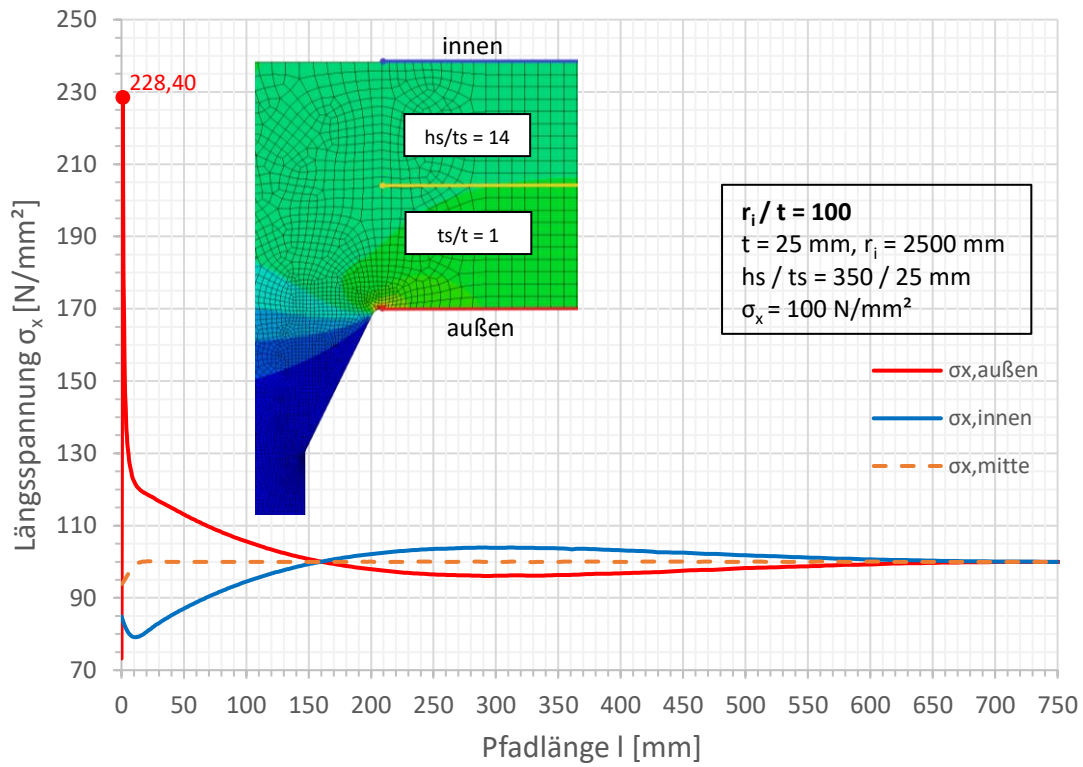


Spannungen an der Außenseite

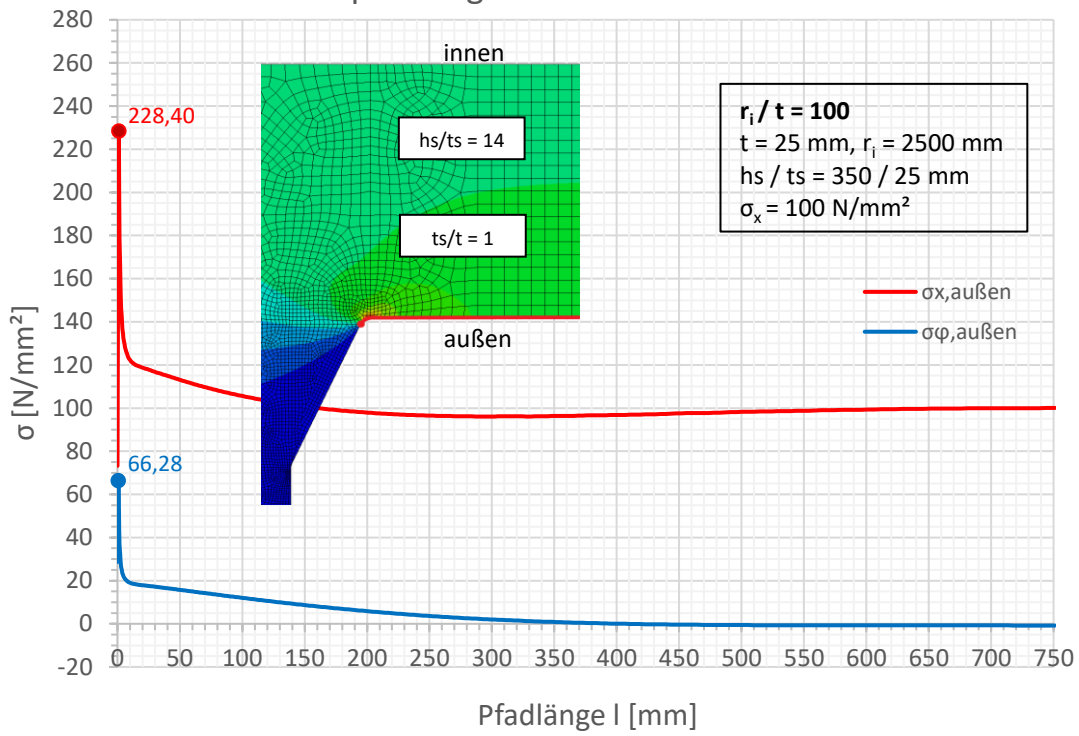


Spannungen an der Außenseite

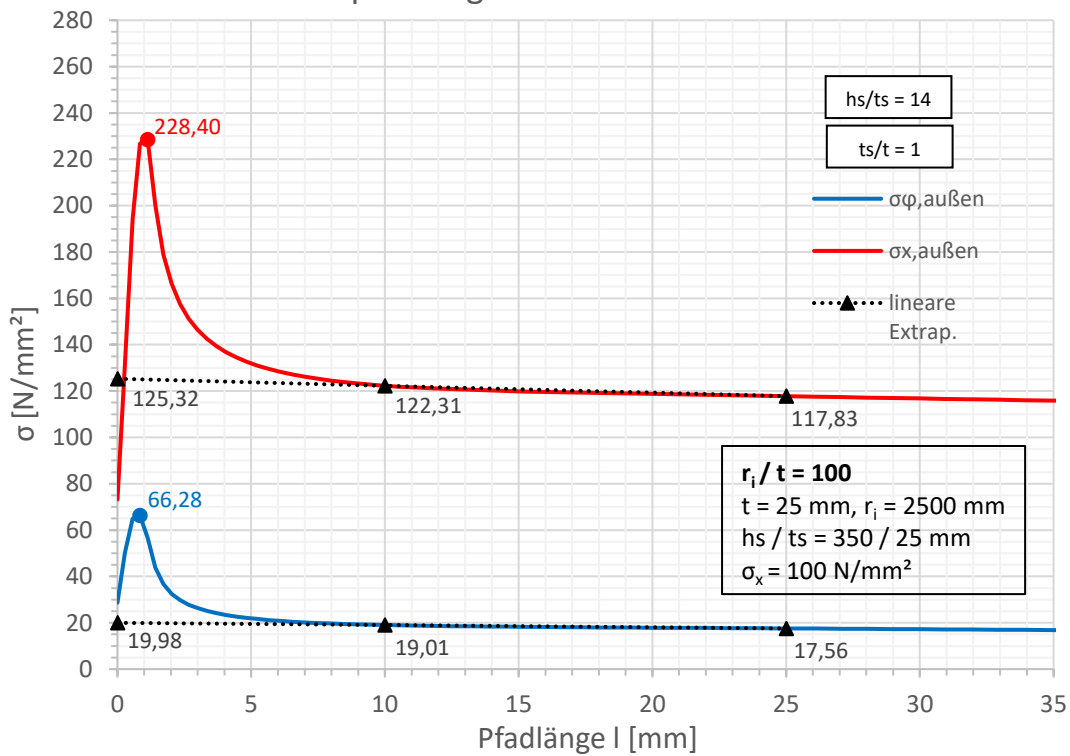


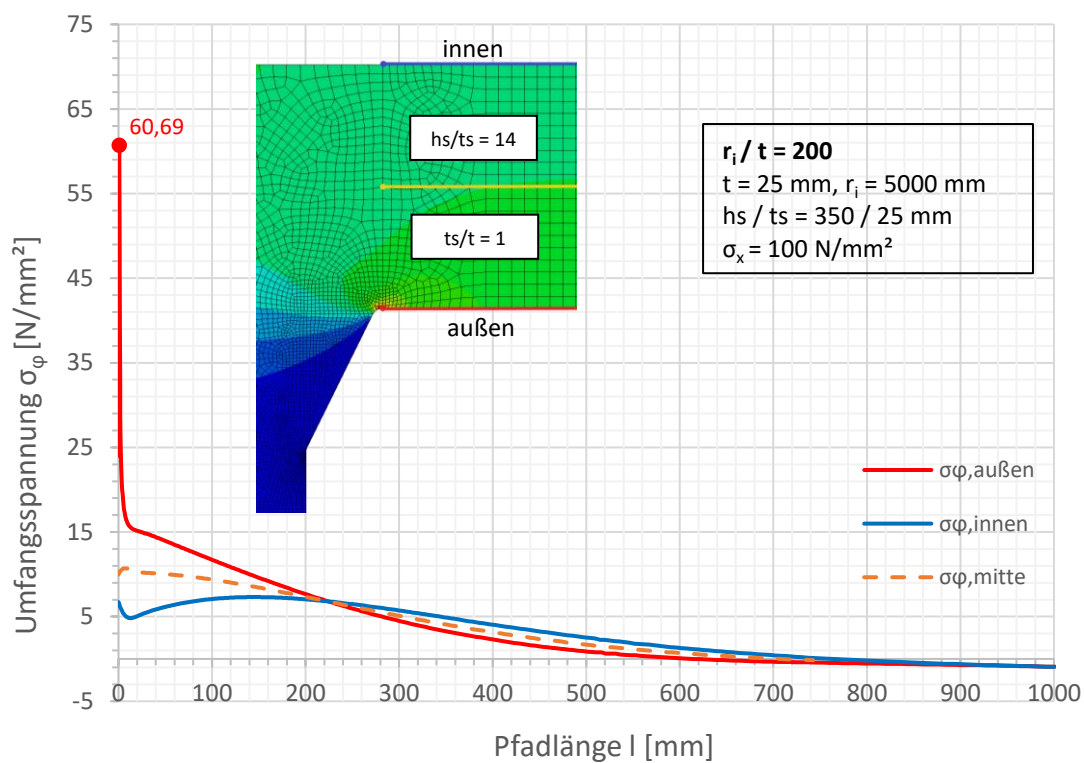
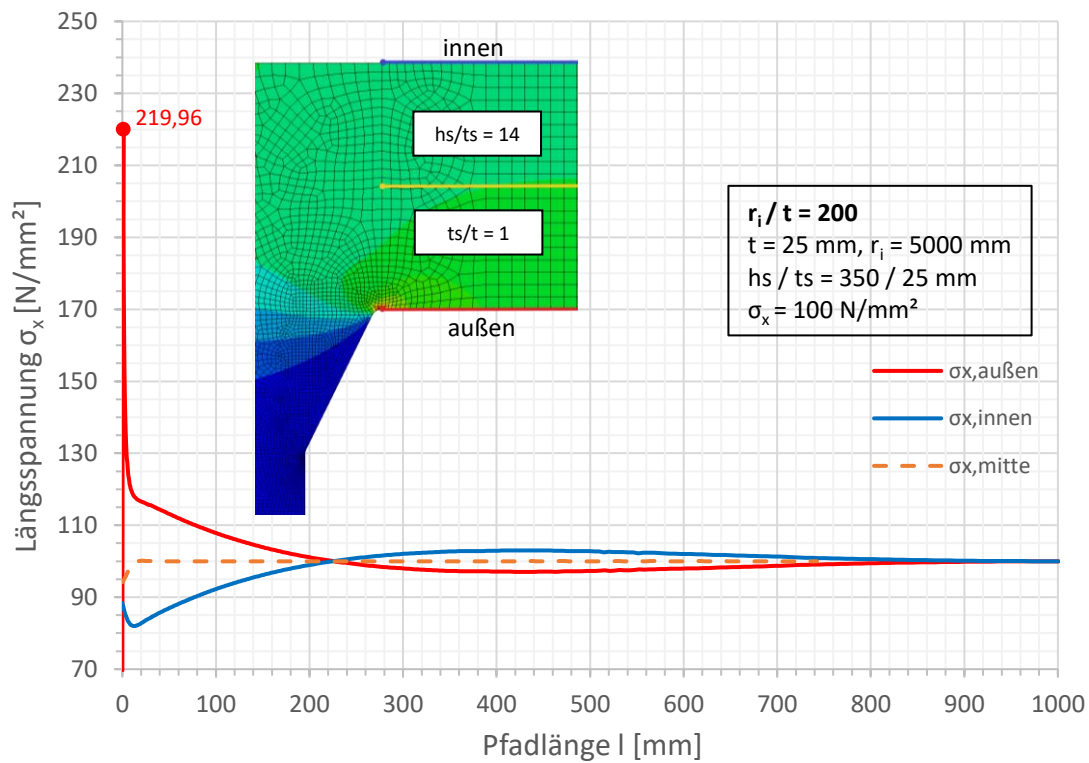


Spannungen an der Außenseite

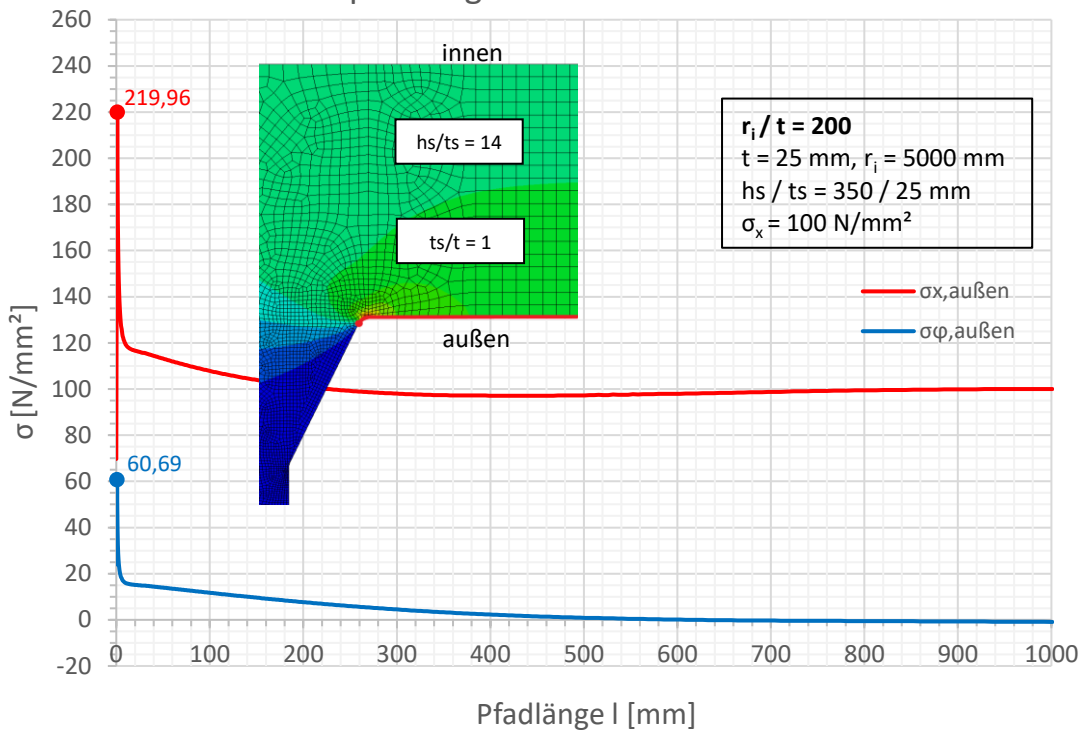


Spannungen an der Außenseite

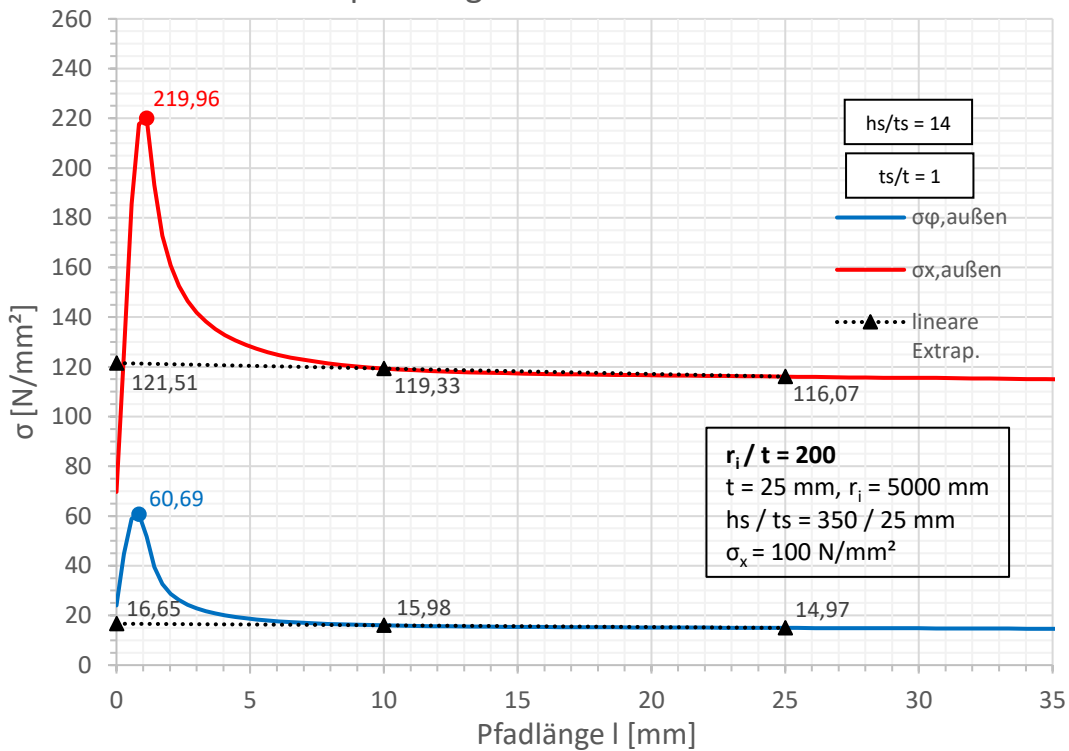


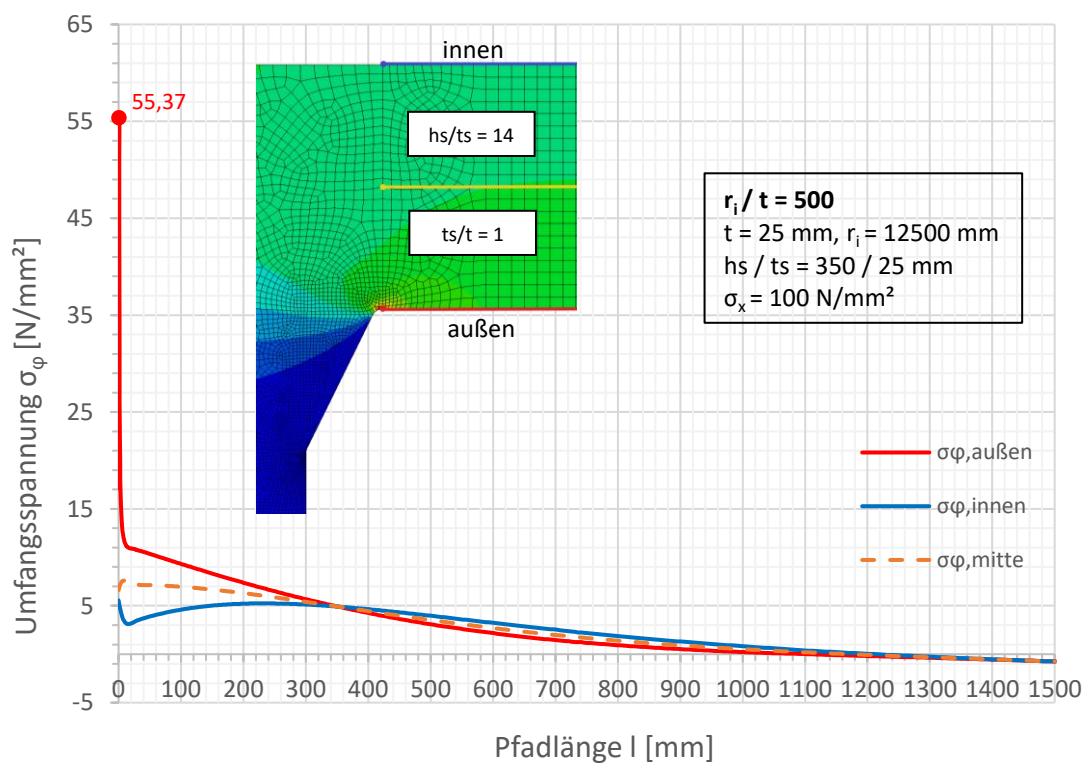
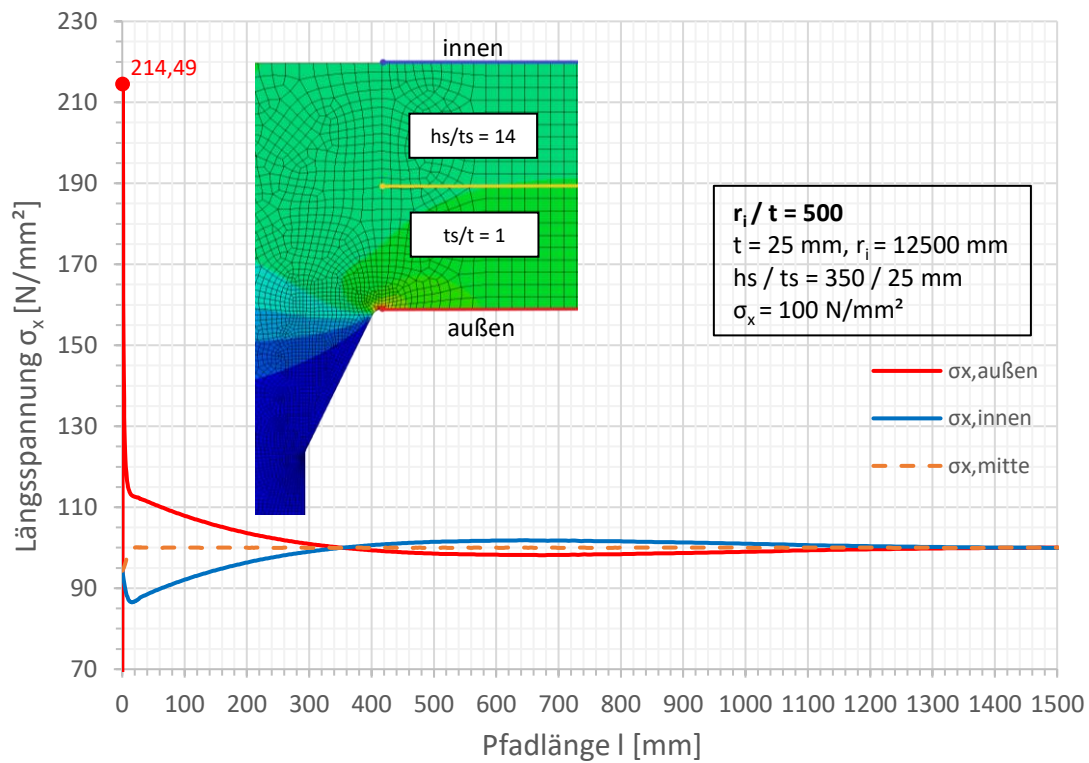


Spannungen an der Außenseite

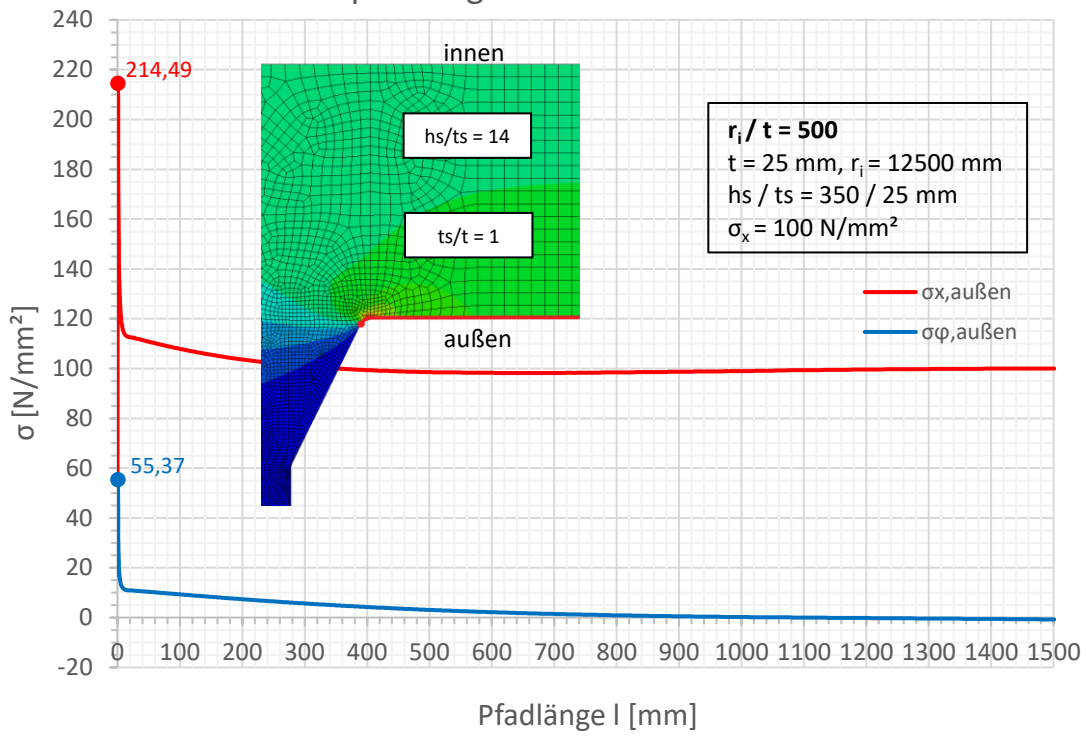


Spannungen an der Außenseite

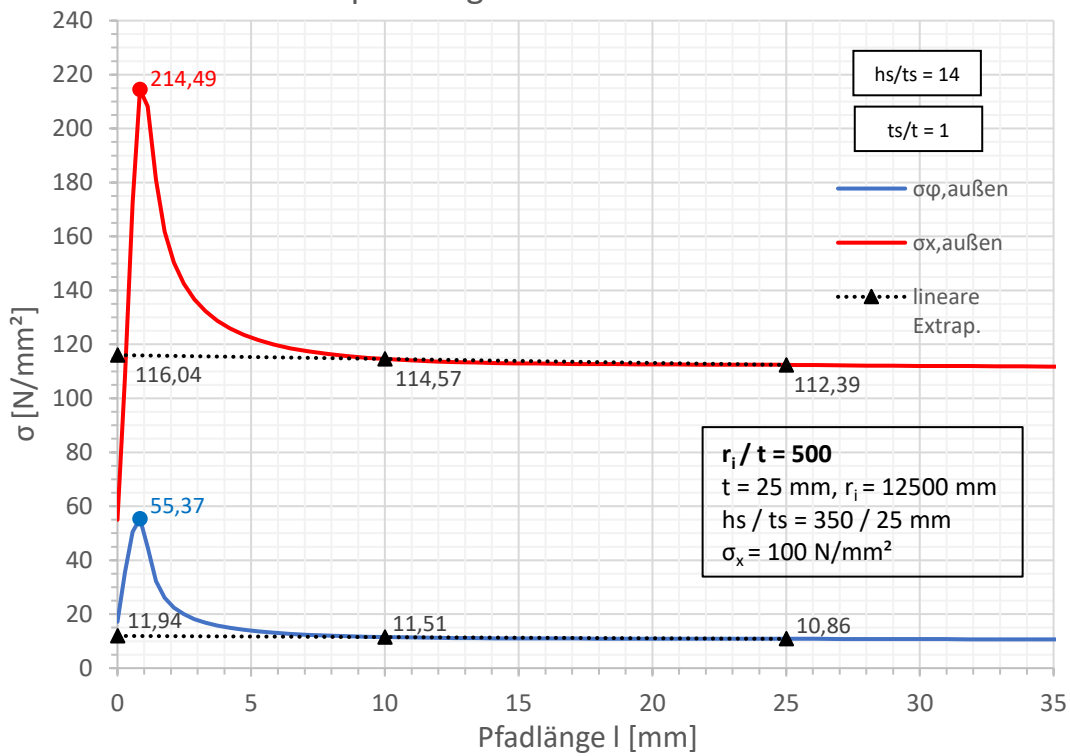


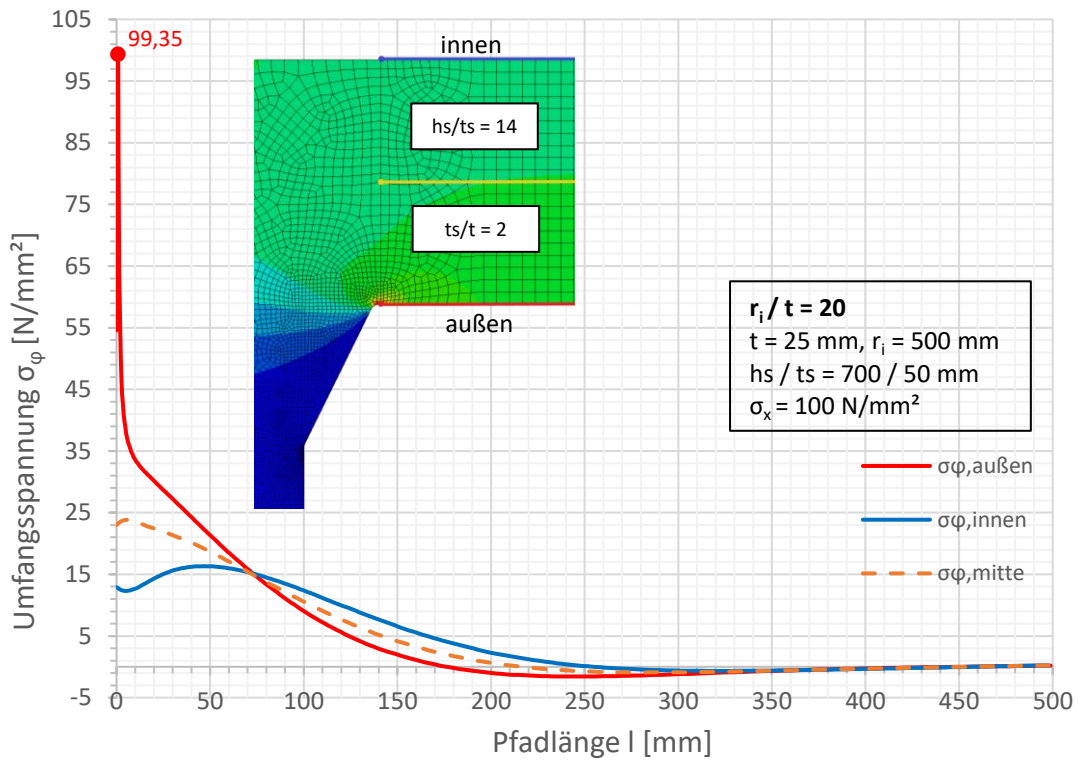
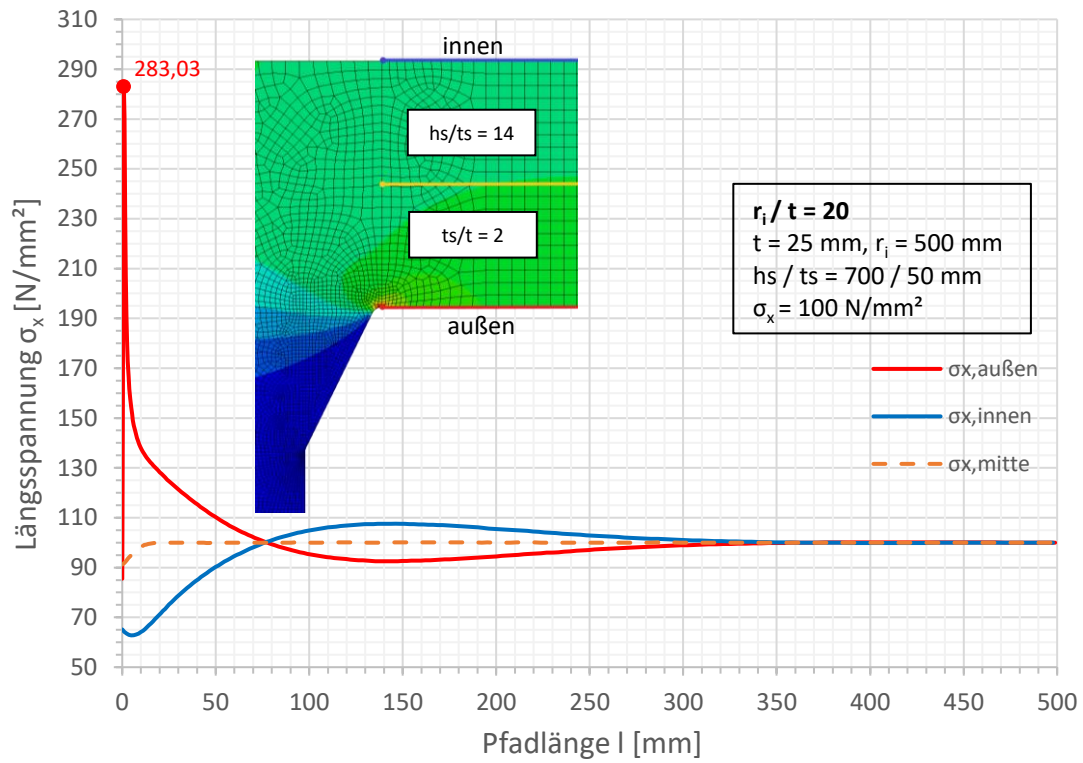


Spannungen an der Außenseite

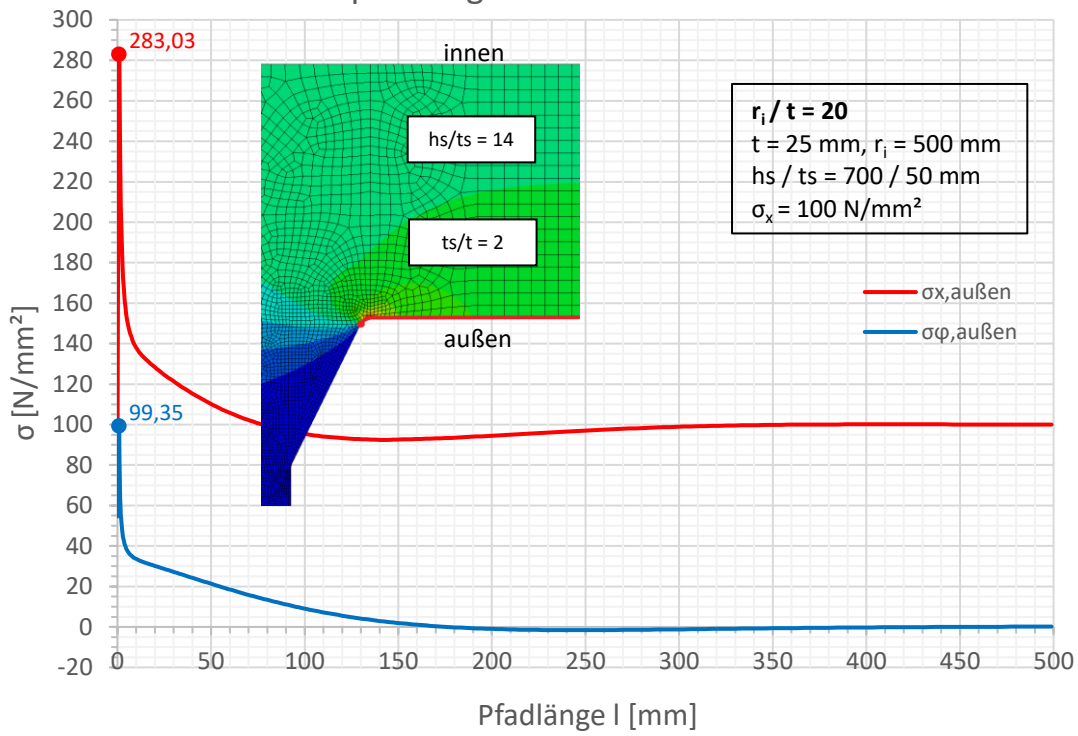


Spannungen an der Außenseite

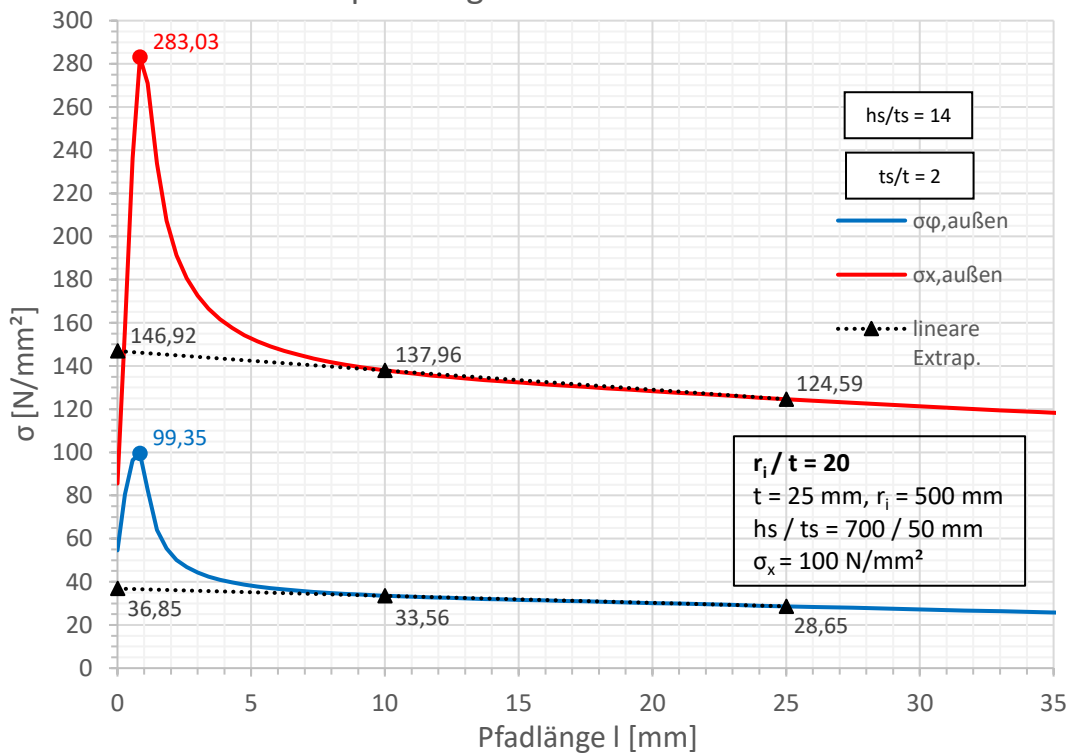


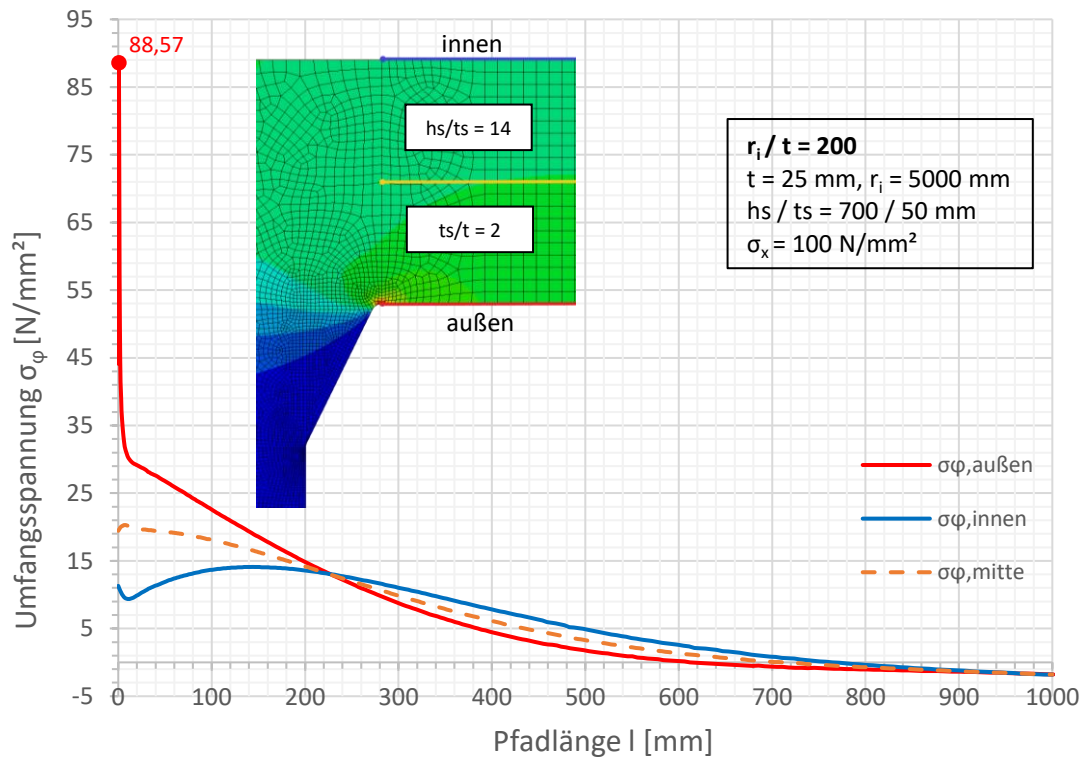
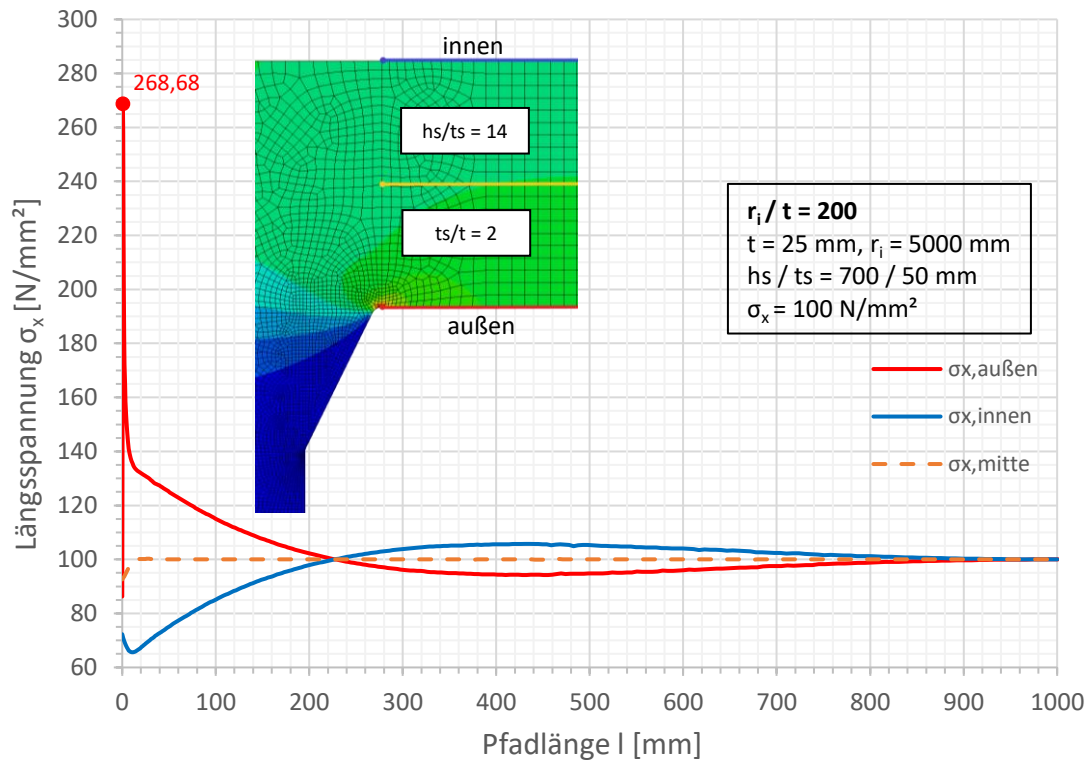


Spannungen an der Außenseite

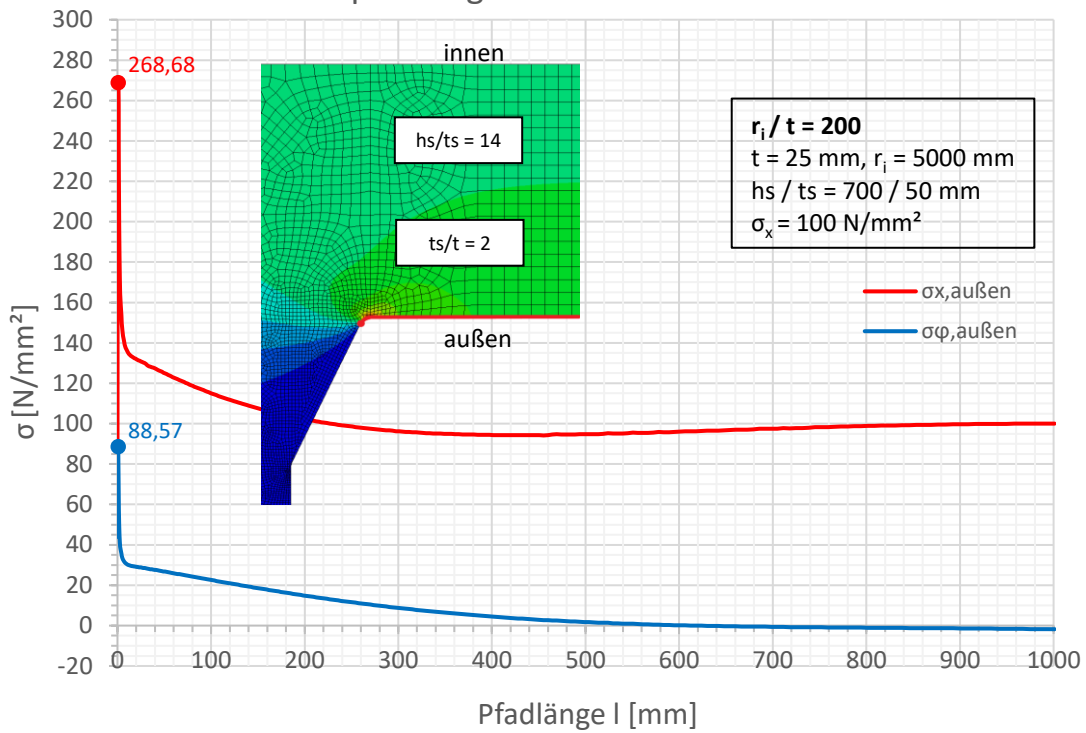


Spannungen an der Außenseite

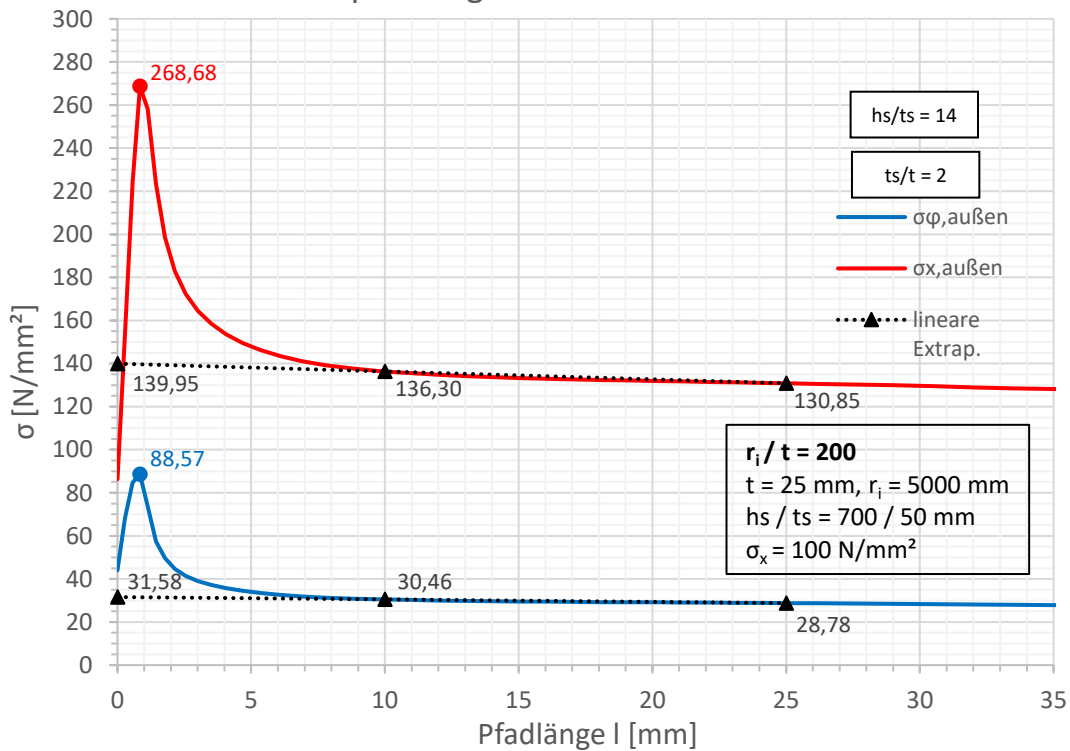


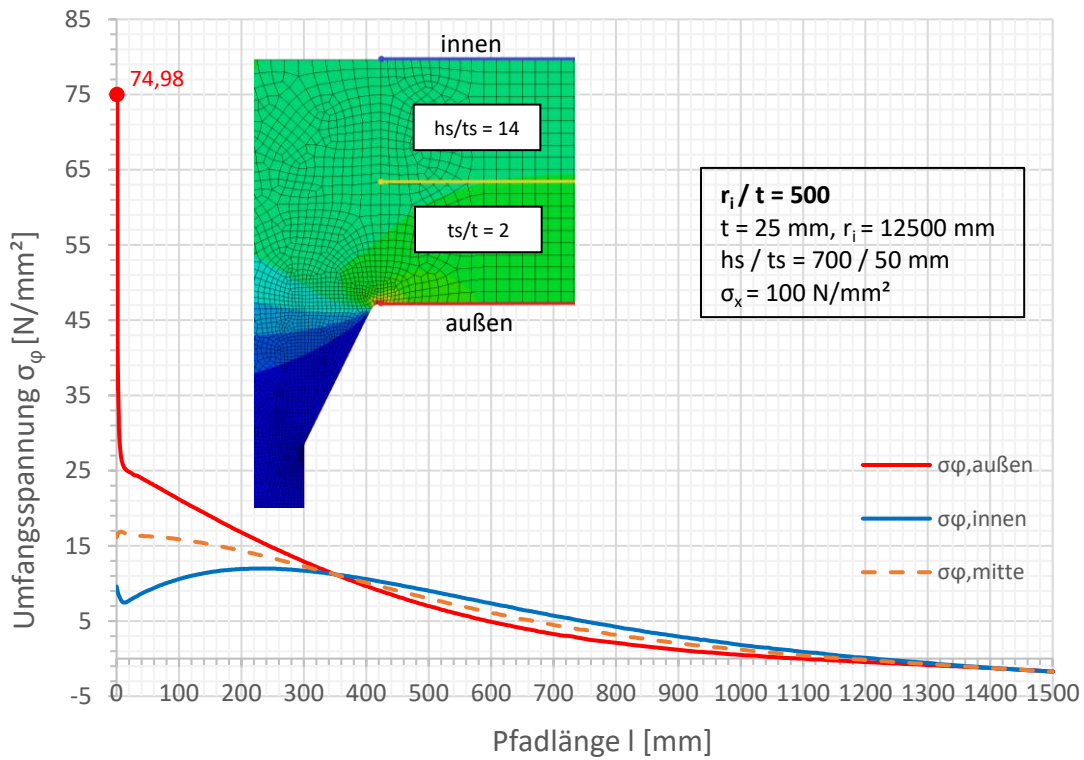
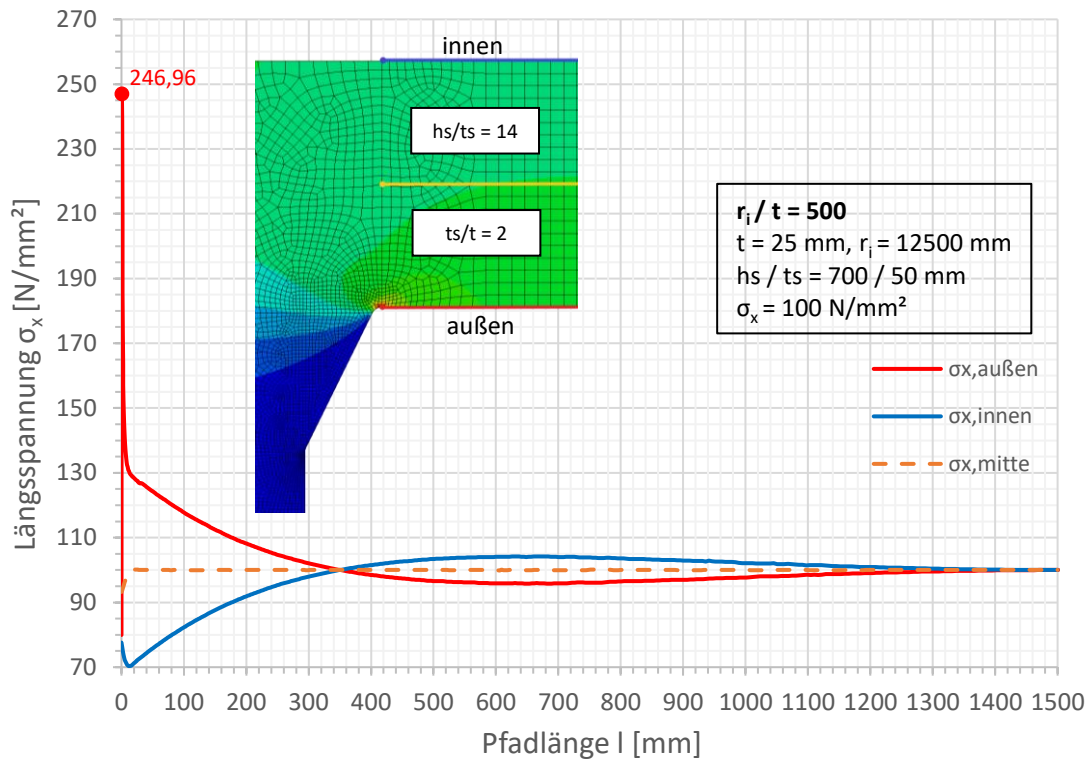


Spannungen an der Außenseite

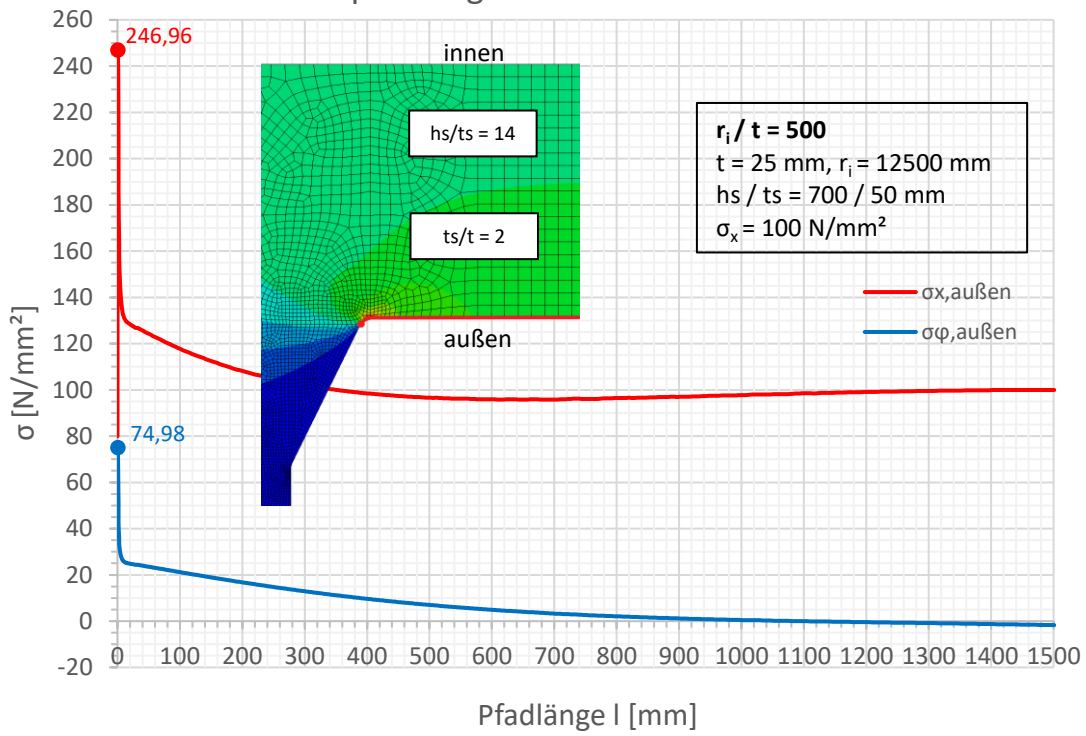


Spannungen an der Außenseite

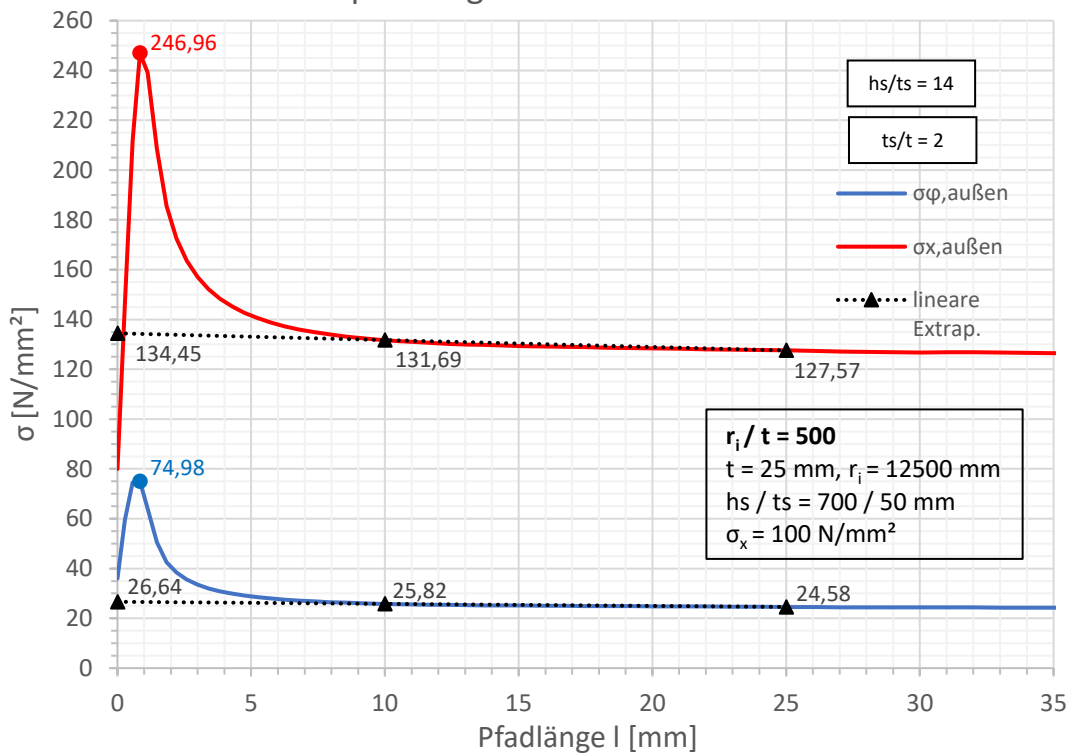




Spannungen an der Außenseite

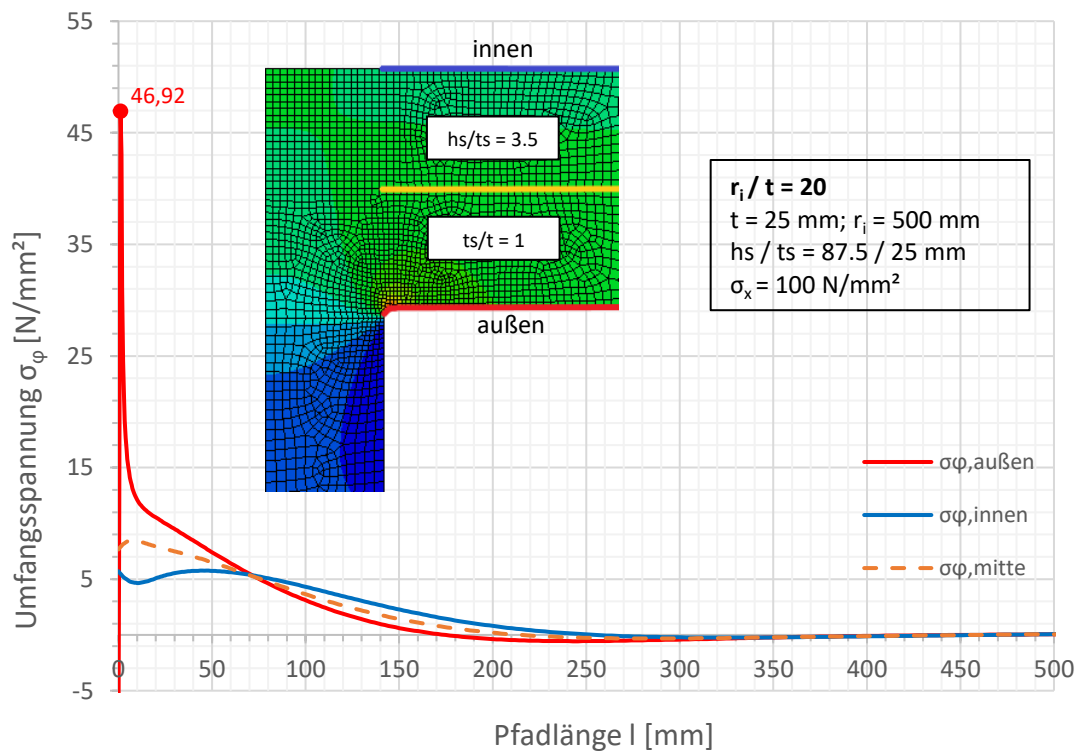
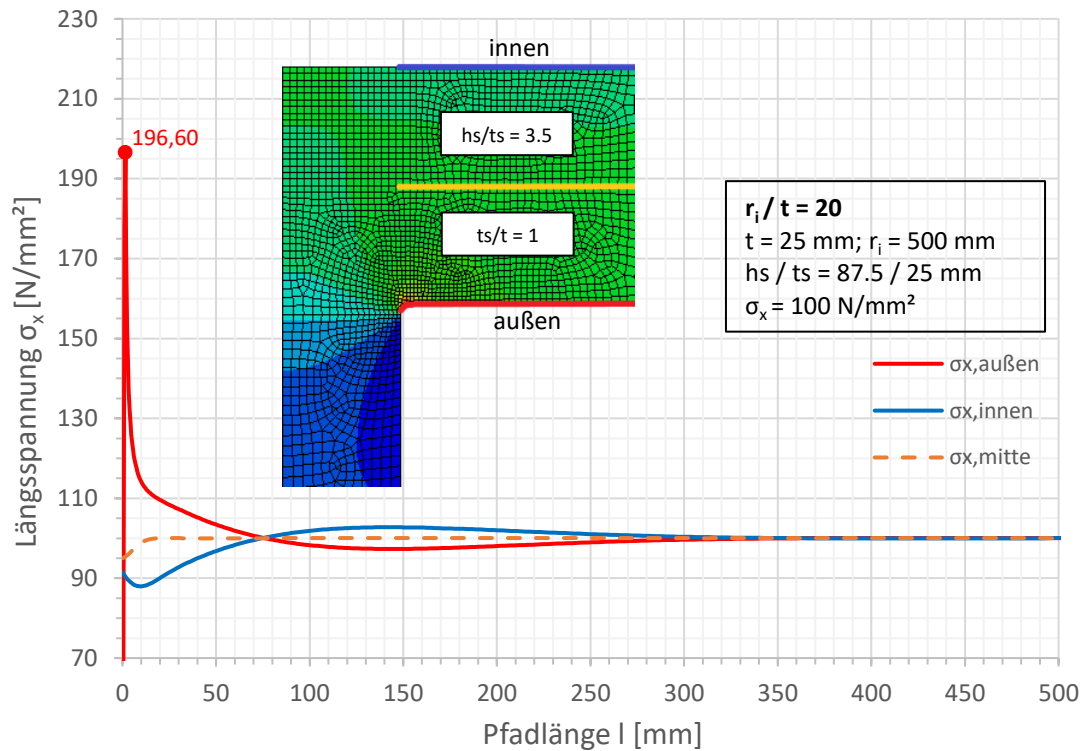


Spannungen an der Außenseite

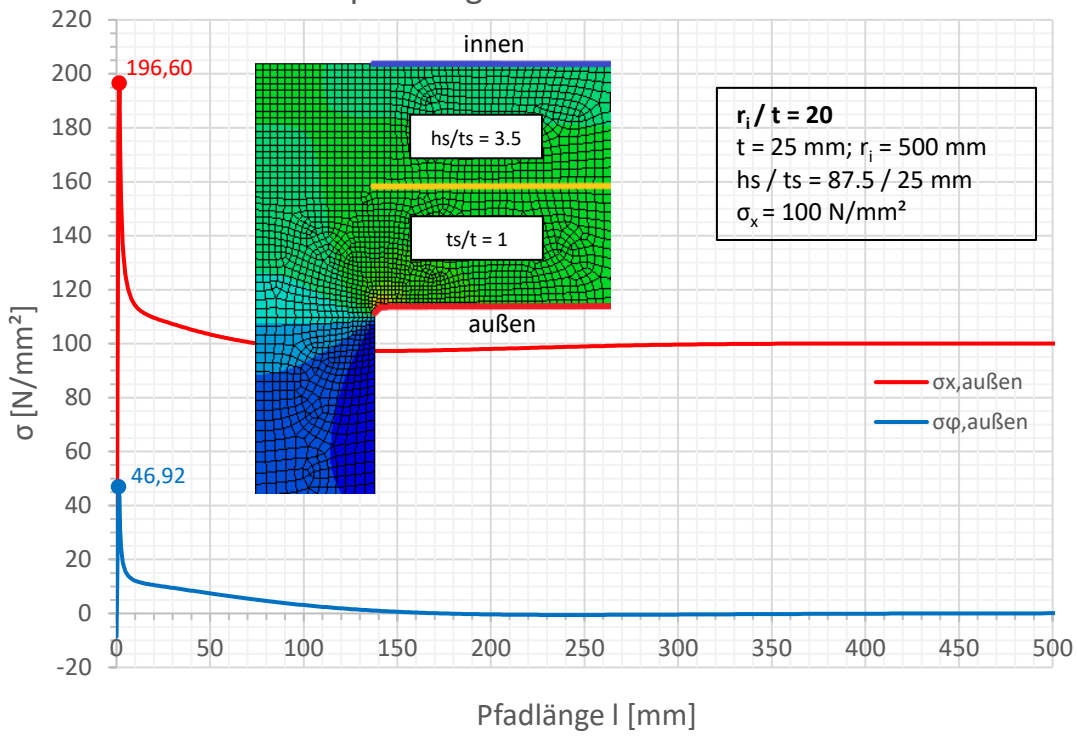


A.2. Wanddicke $t = 25$ mm ohne Nahtaufweitung

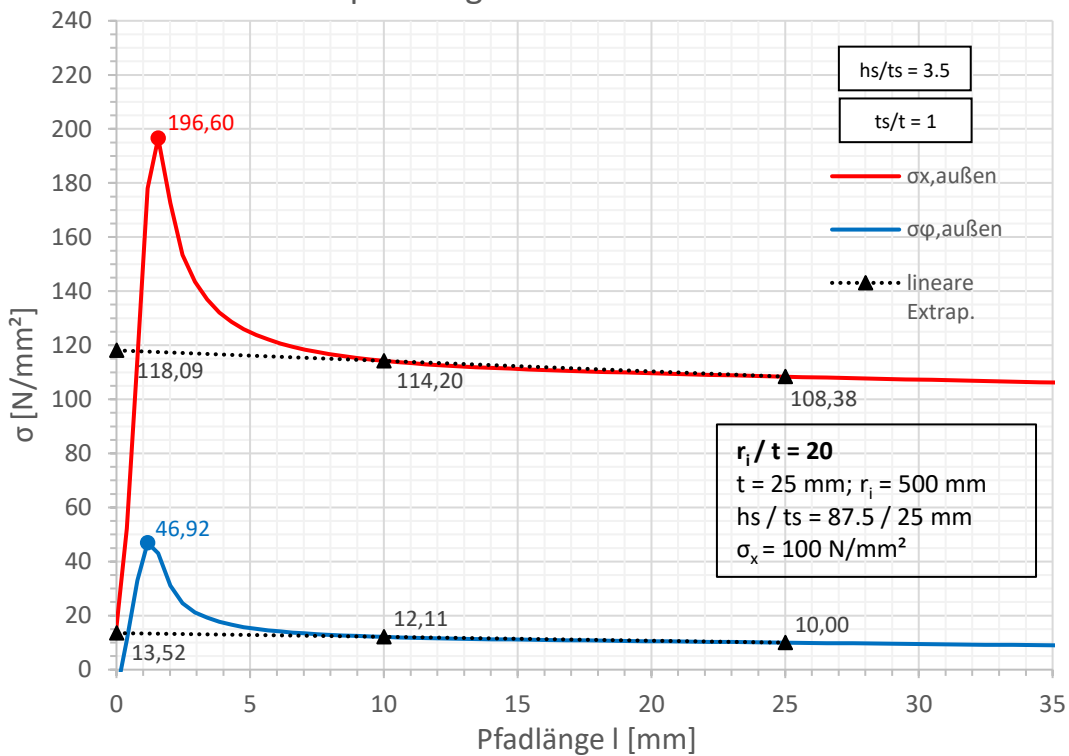
In den nächsten Seiten A-49 bis A-72 sind die Diagramme zum **Ringsteifenanschluss ohne Nahtaufweitung** für die Wanddicke $t = 25$ mm abgebildet. Die Diagramme wurden mithilfe von Excel bearbeitet; die Daten dazu lieferte das FE-Programm Abaqus.

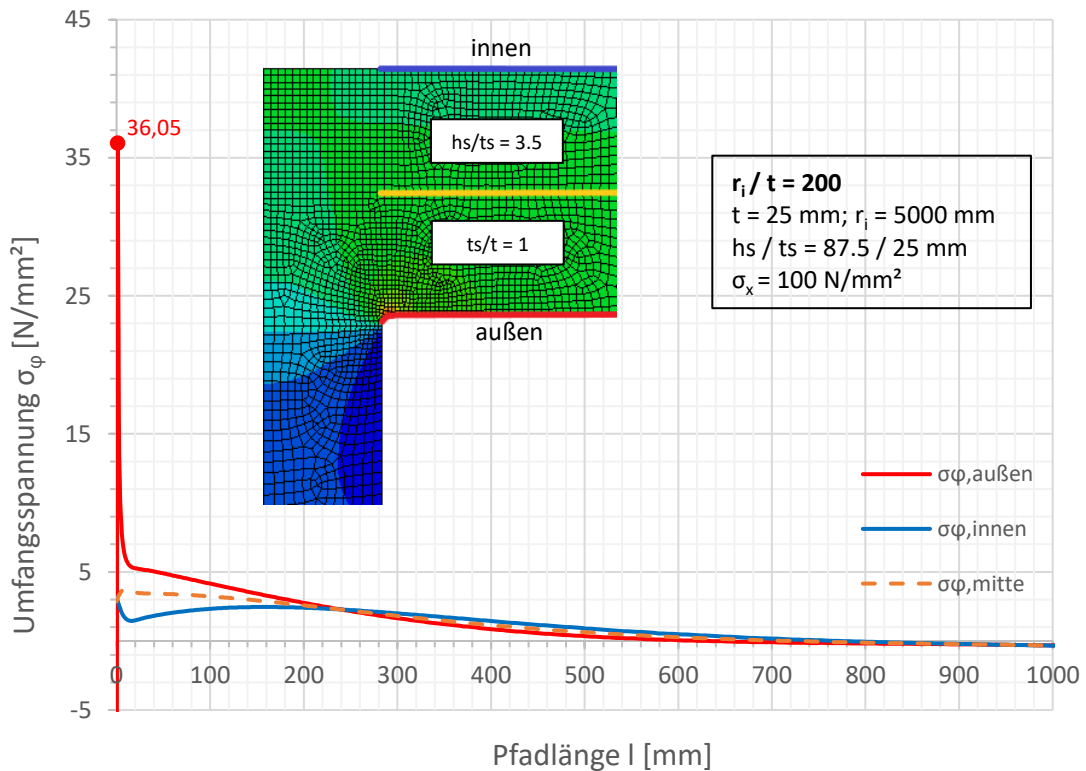
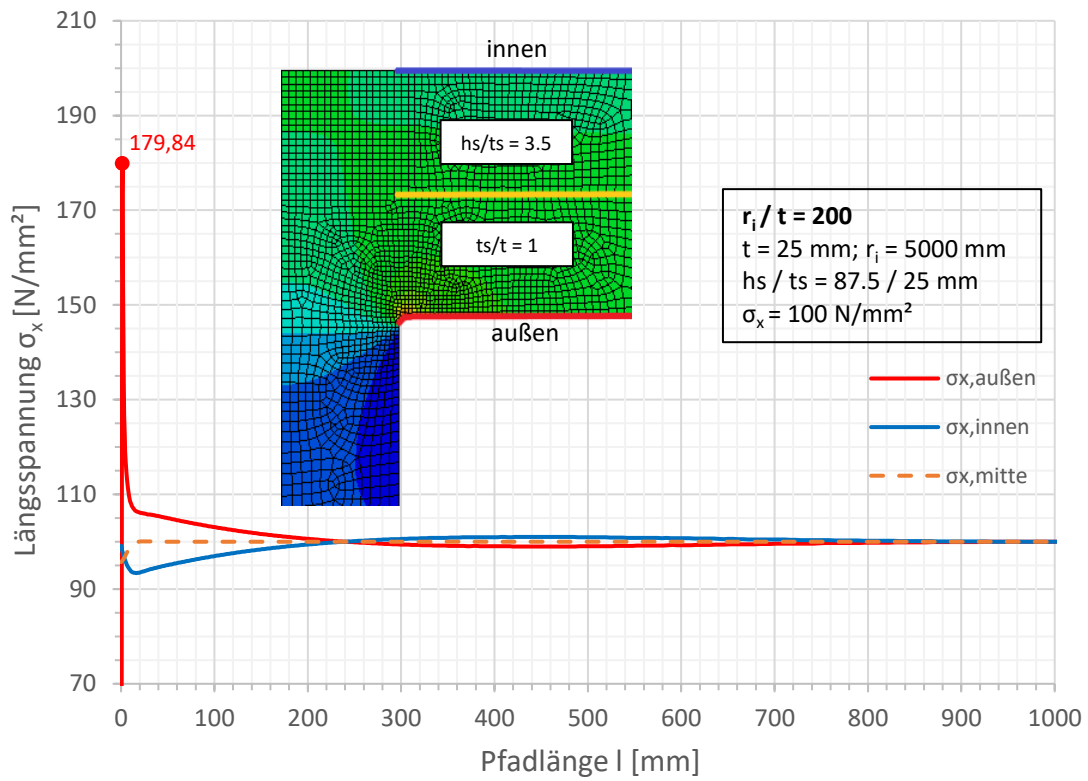


Spannungen an der Außenseite

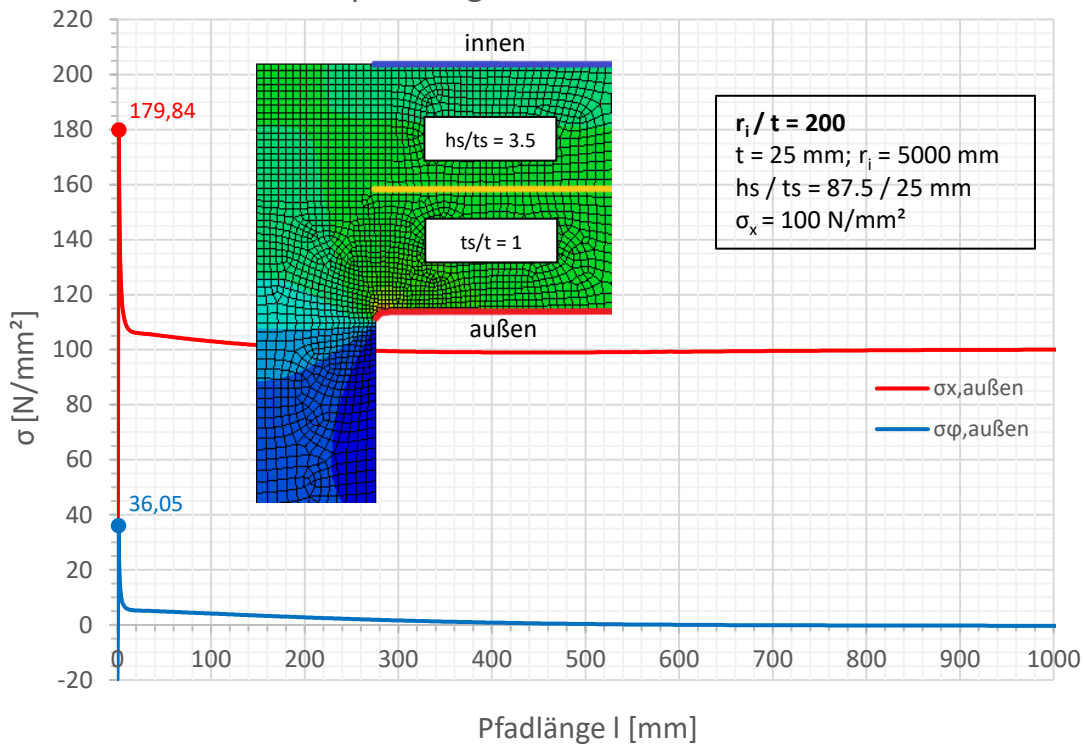


Spannungen an der Außenseite

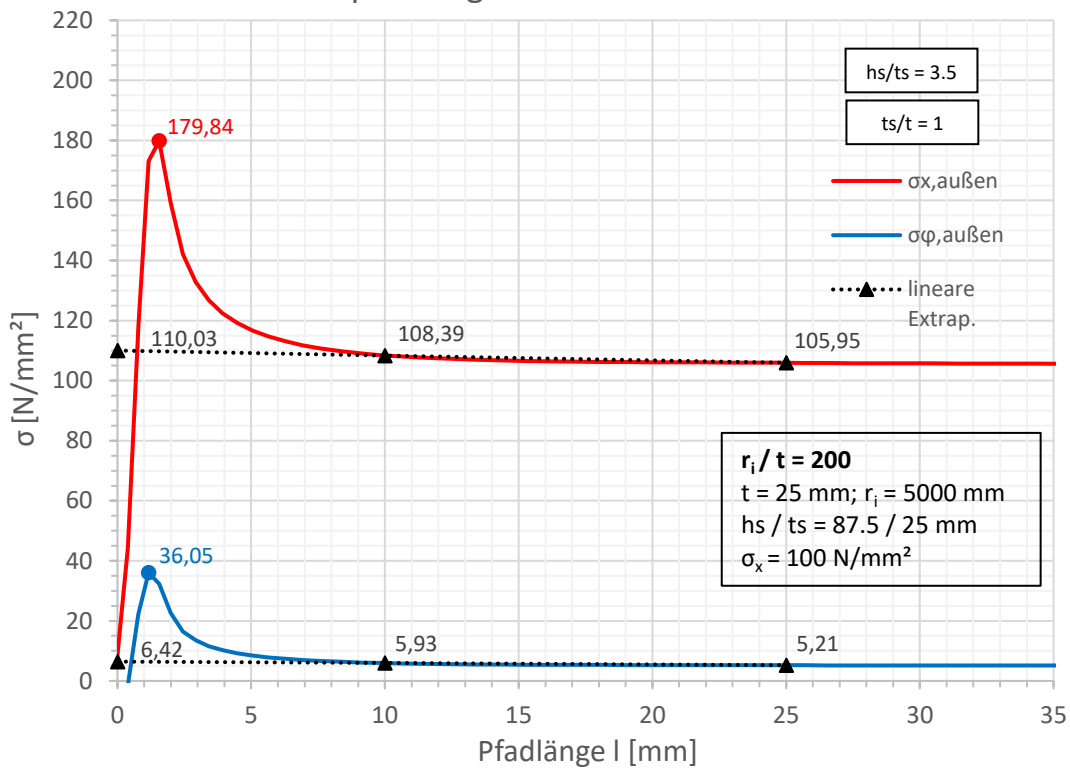


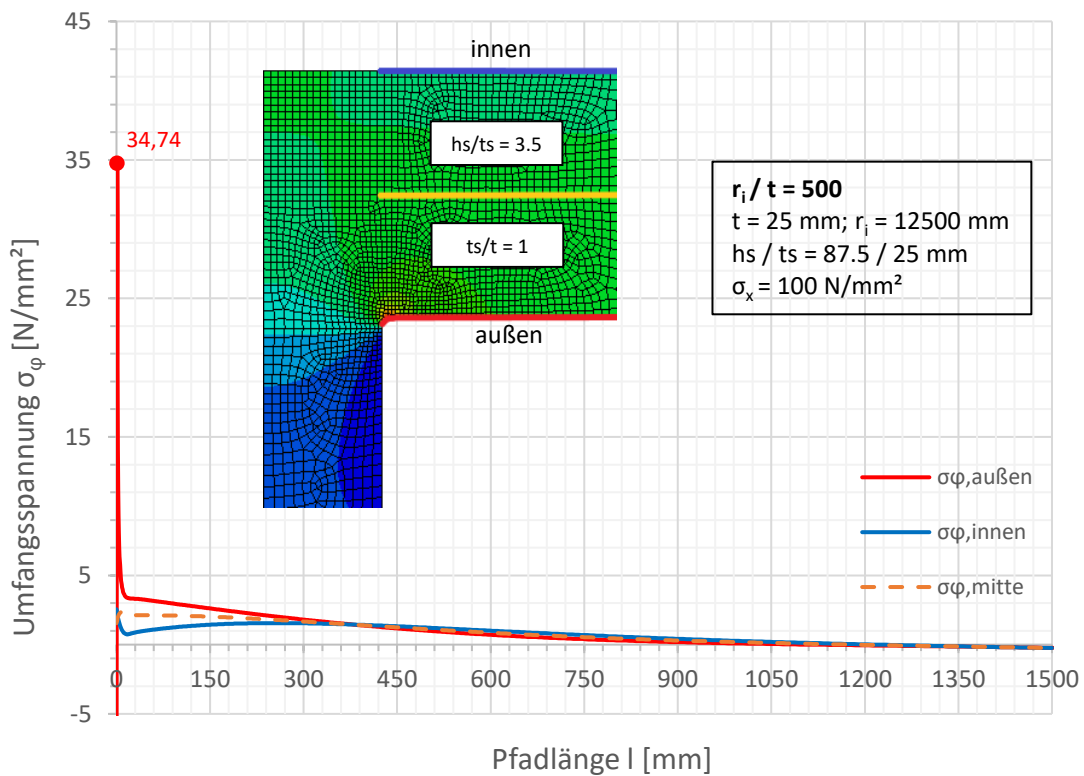
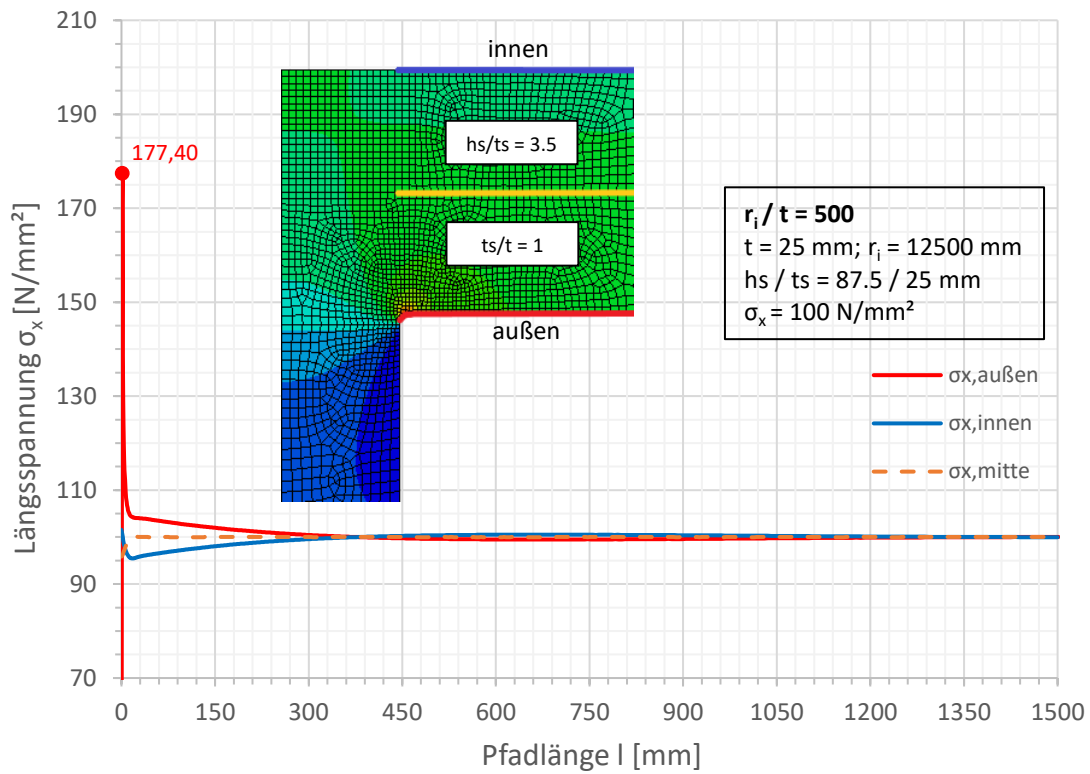


Spannungen an der Außenseite

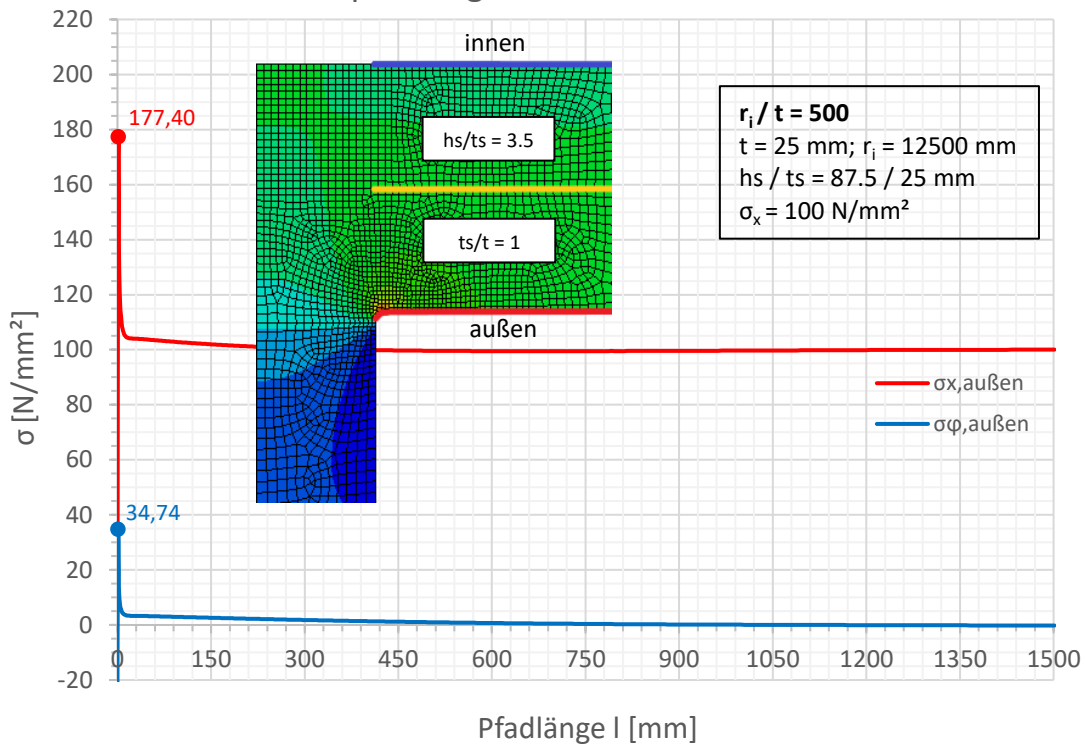


Spannungen an der Außenseite

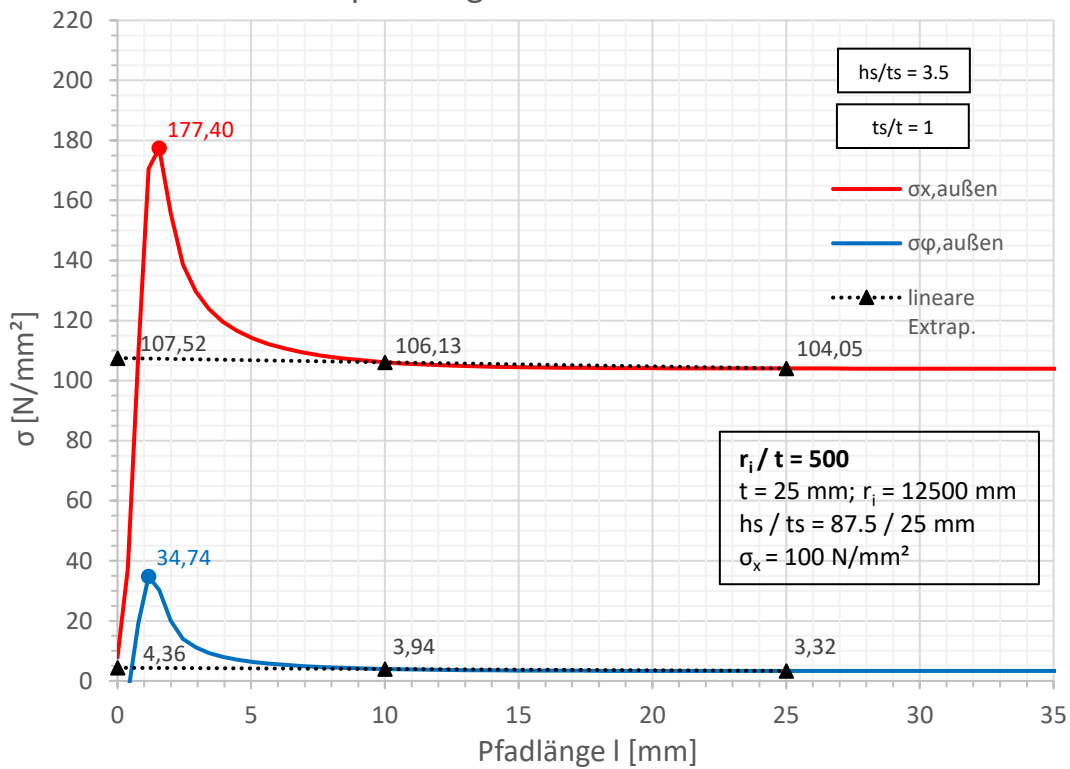


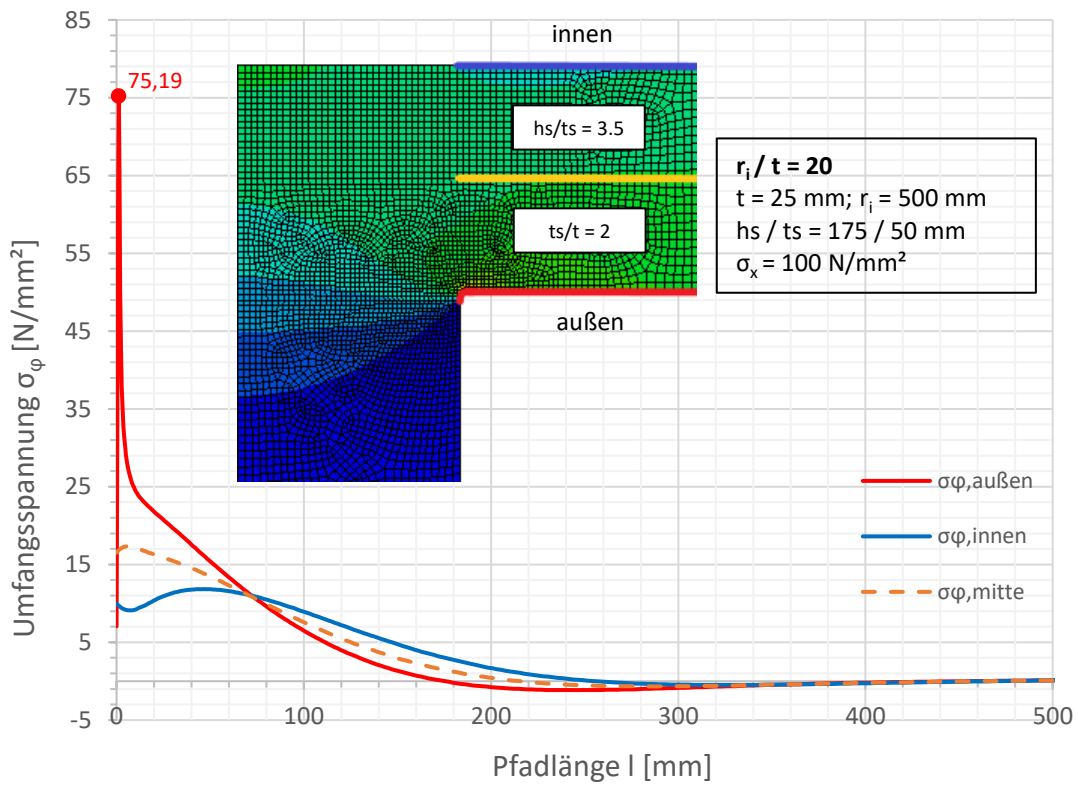
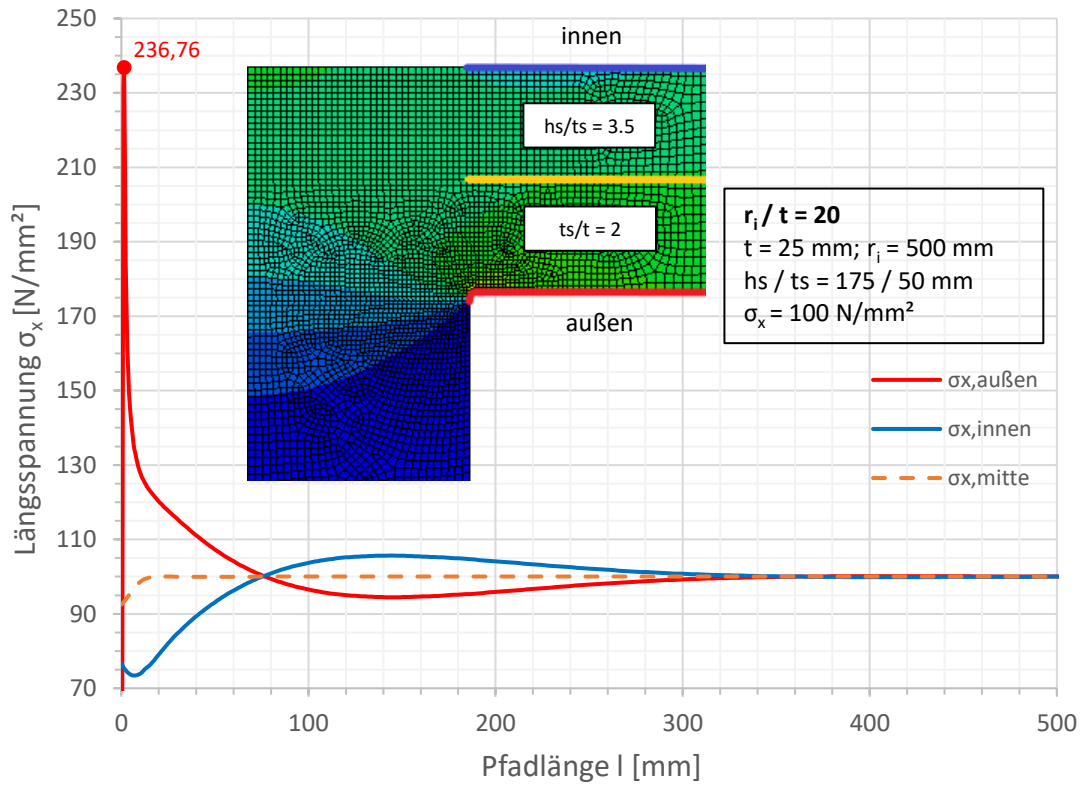


Spannungen an der Außenseite

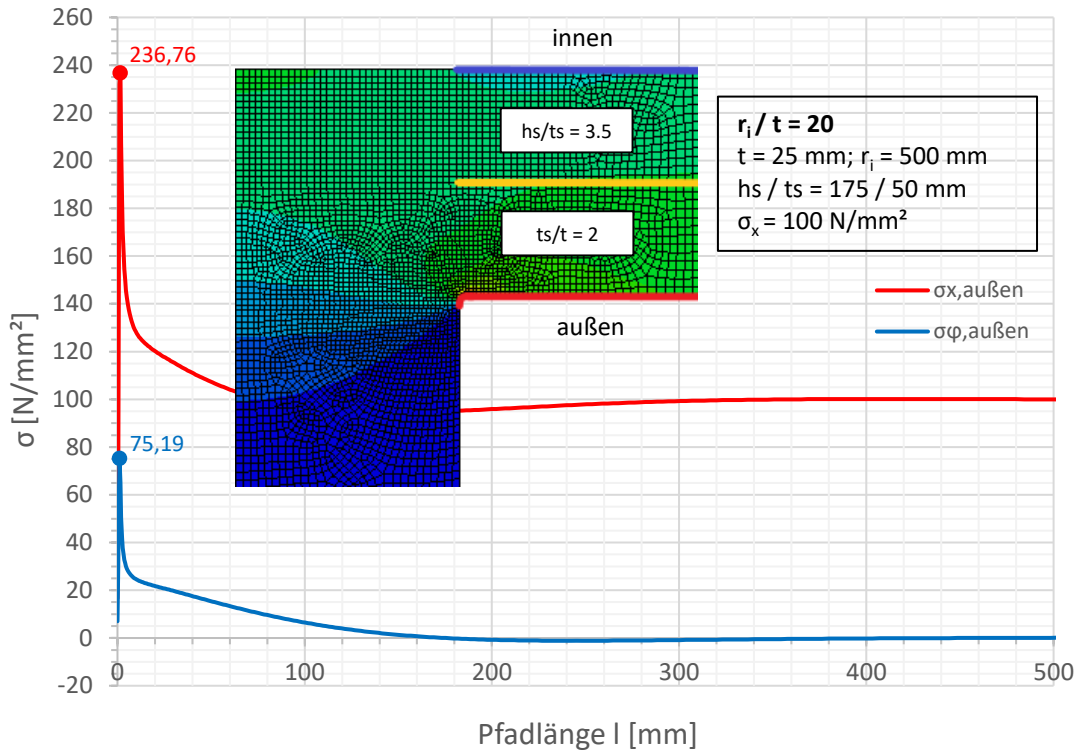


Spannungen an der Außenseite

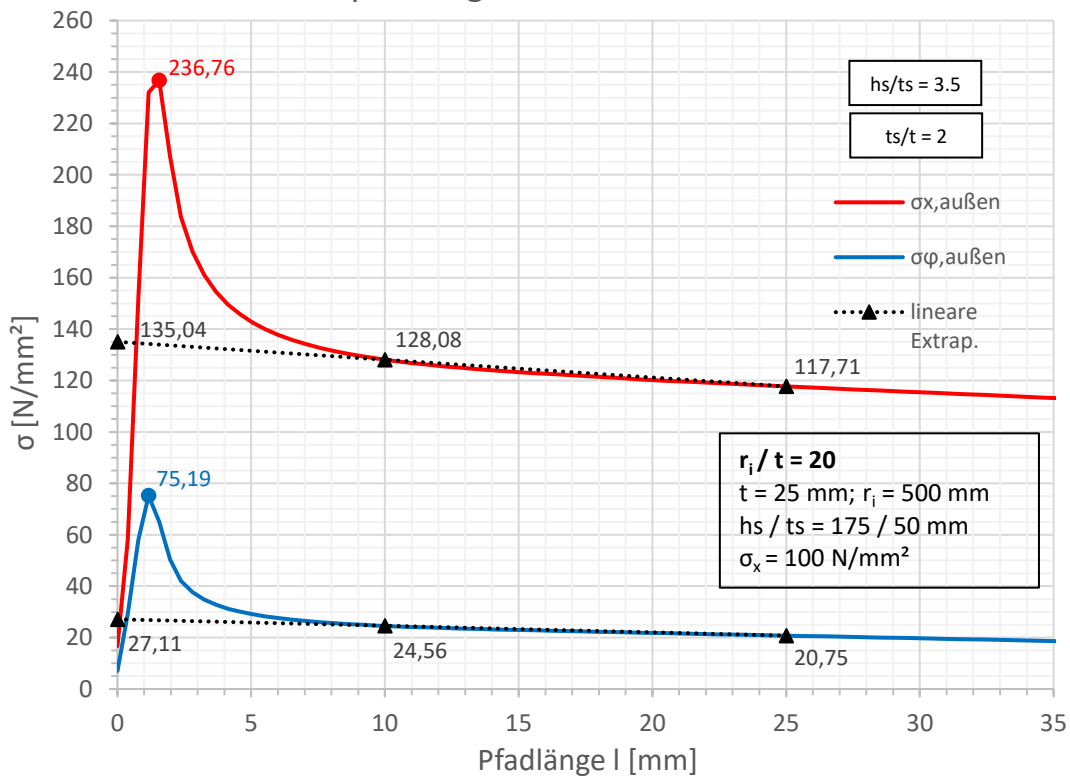


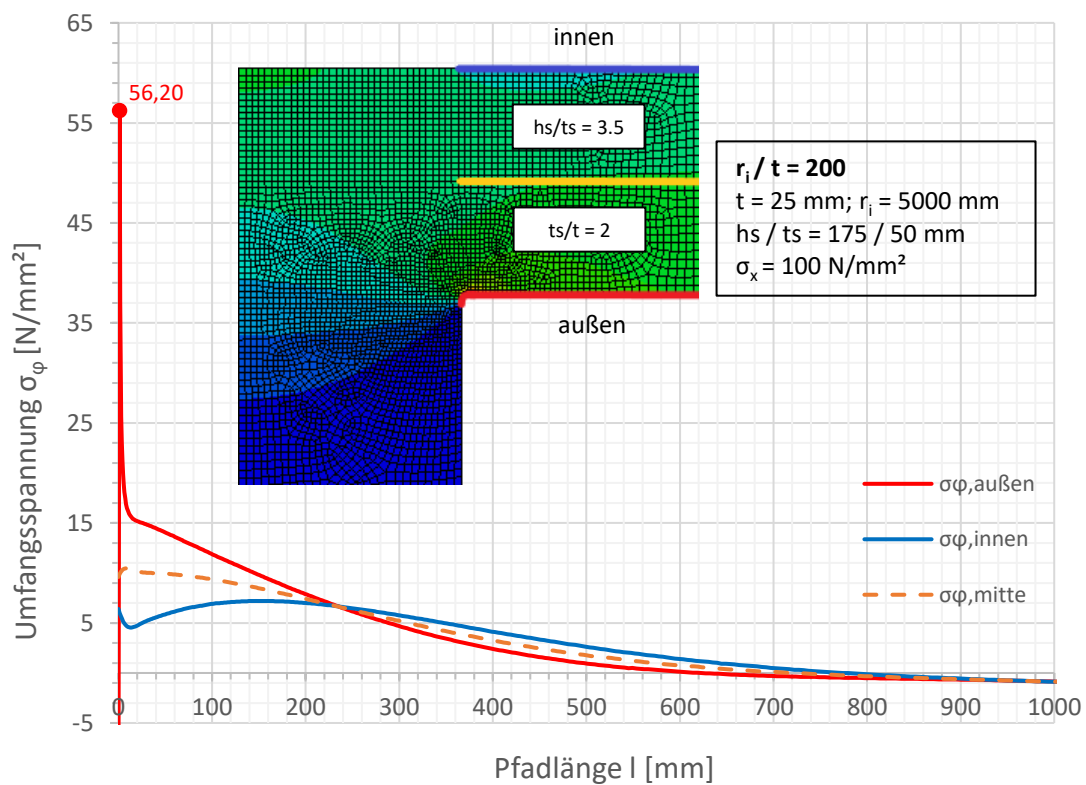
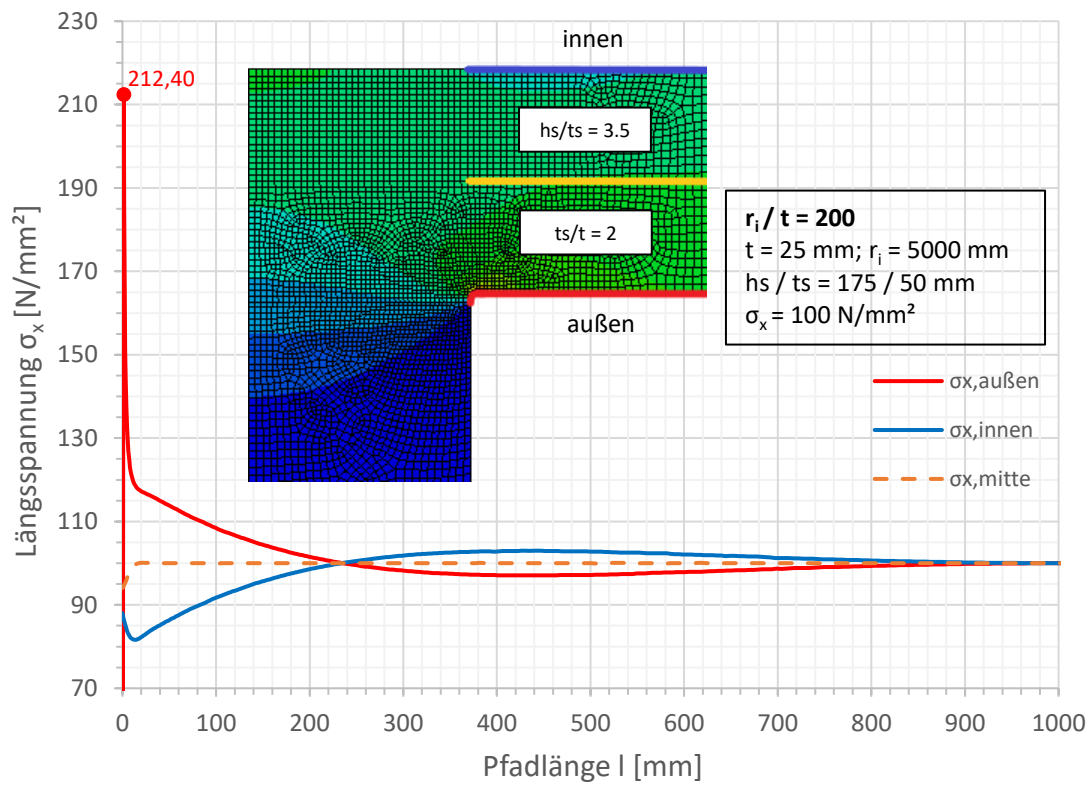


Spannungen an der Außenseite

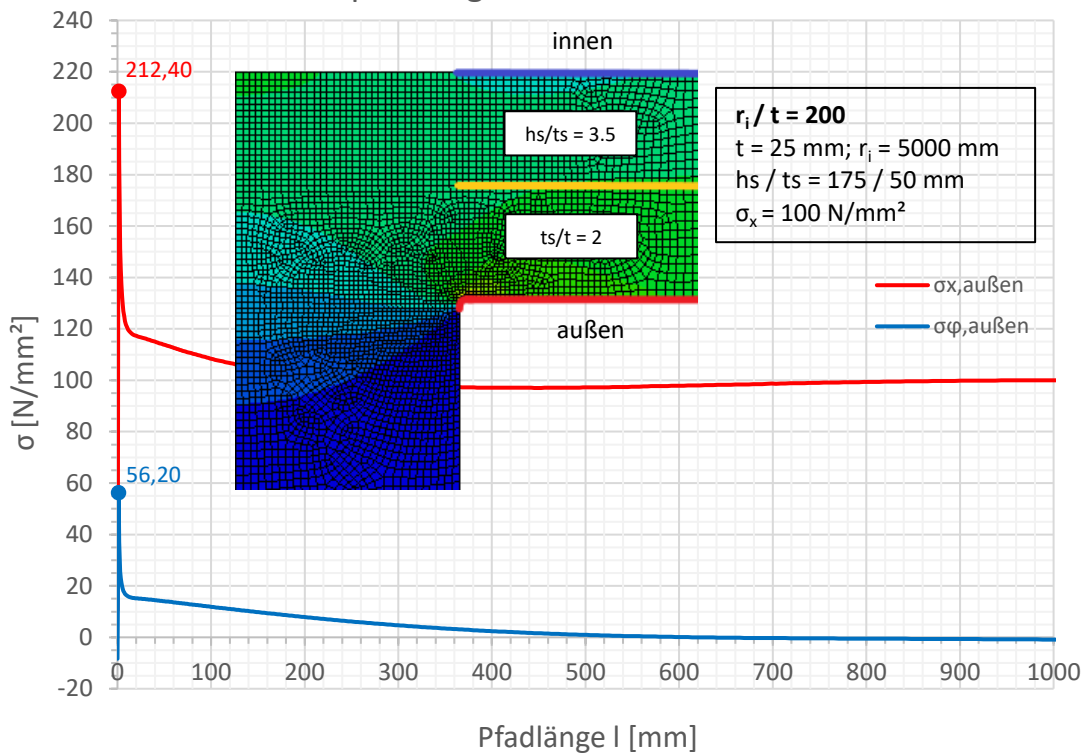


Spannungen an der Außenseite

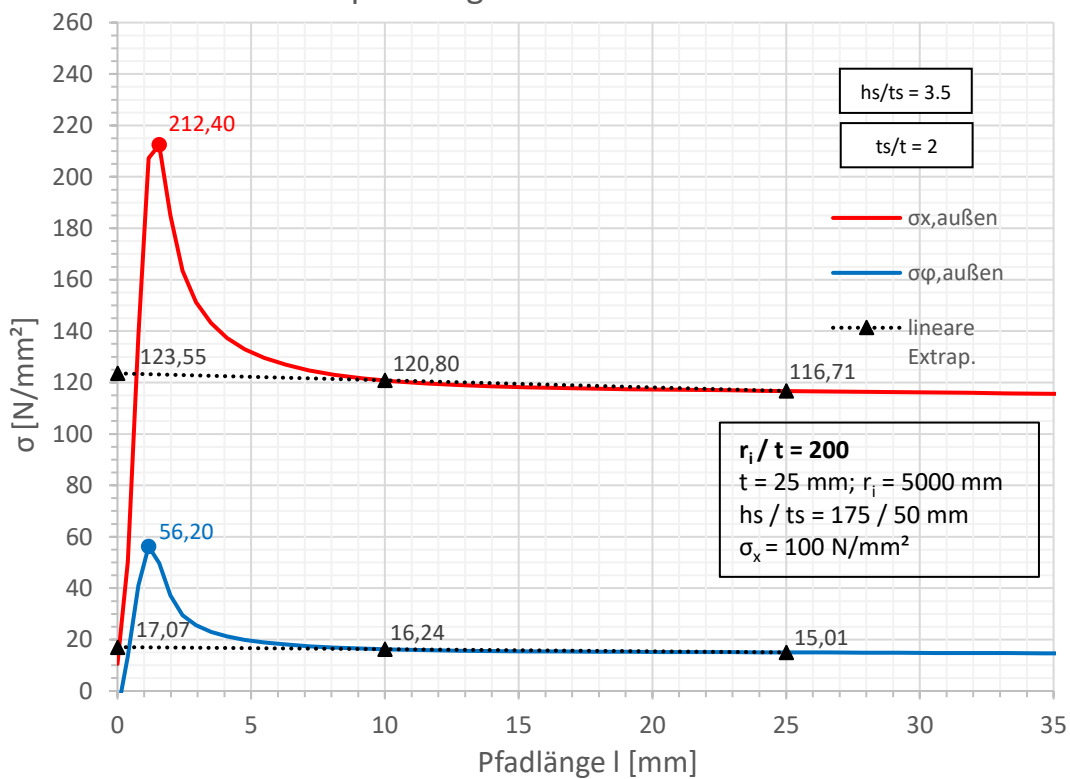


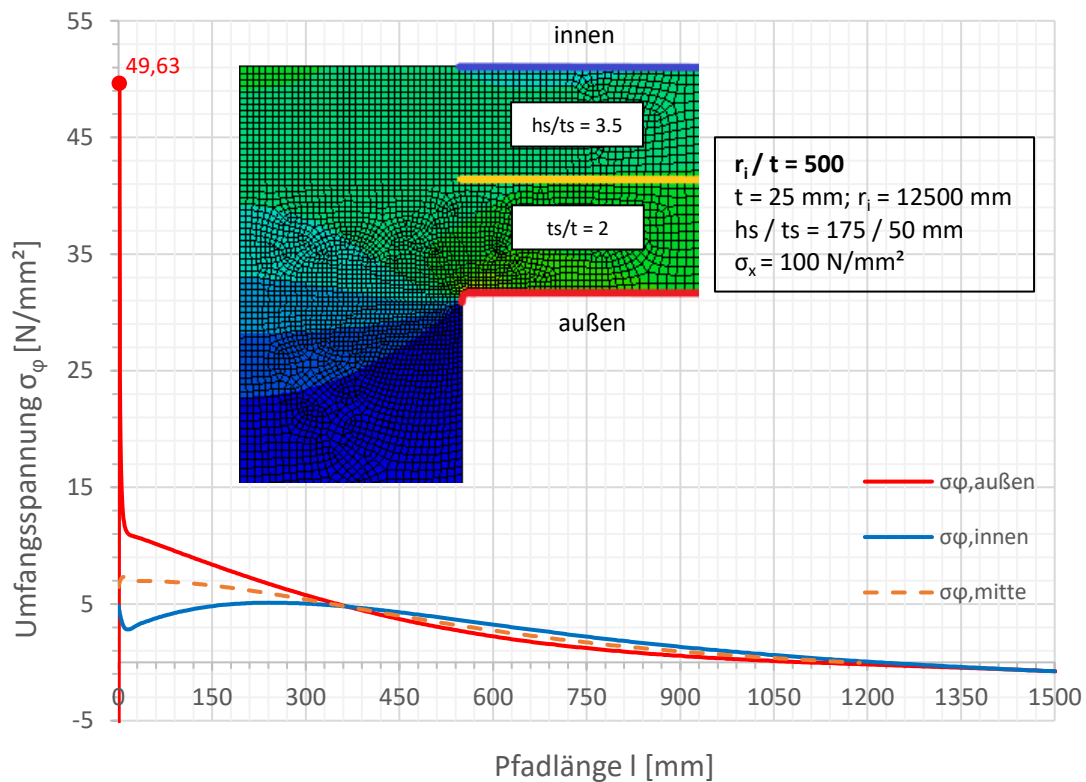
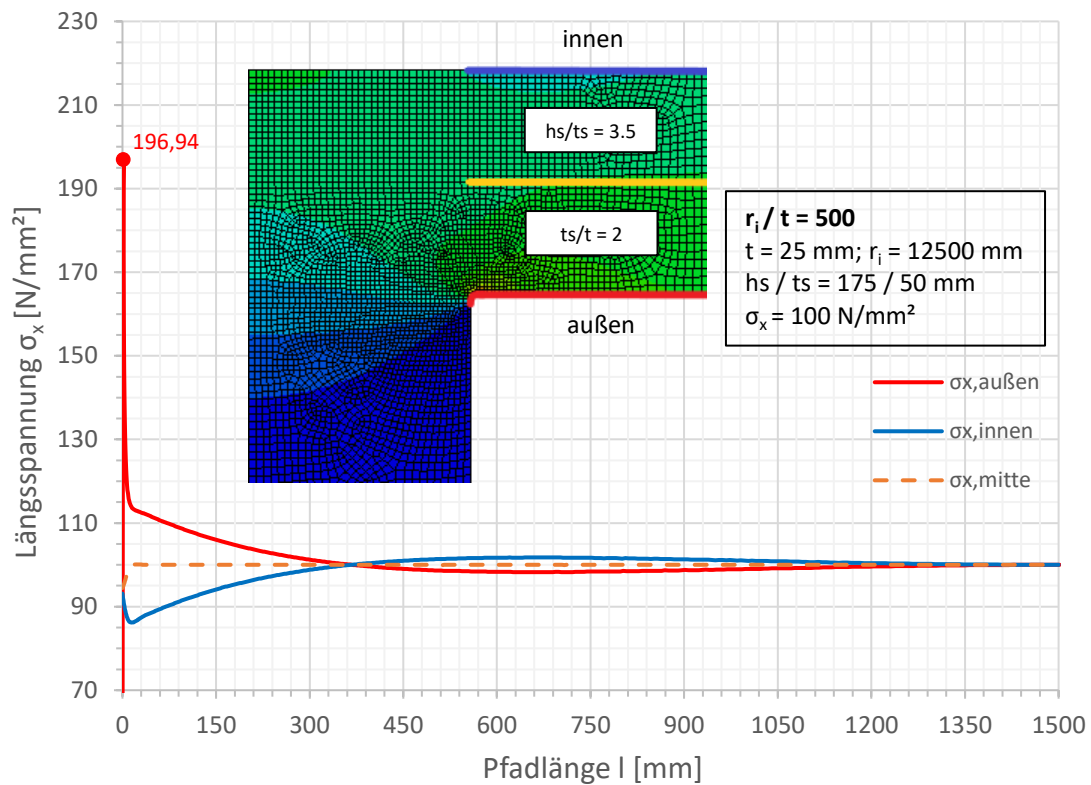


Spannungen an der Außenseite

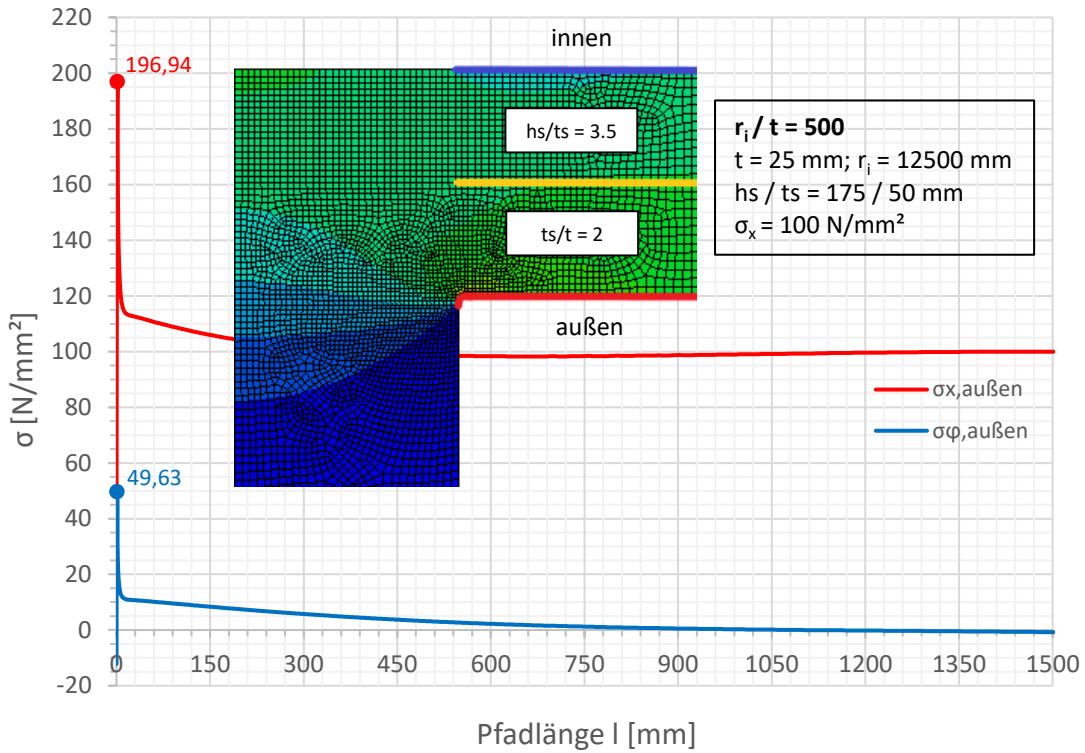


Spannungen an der Außenseite

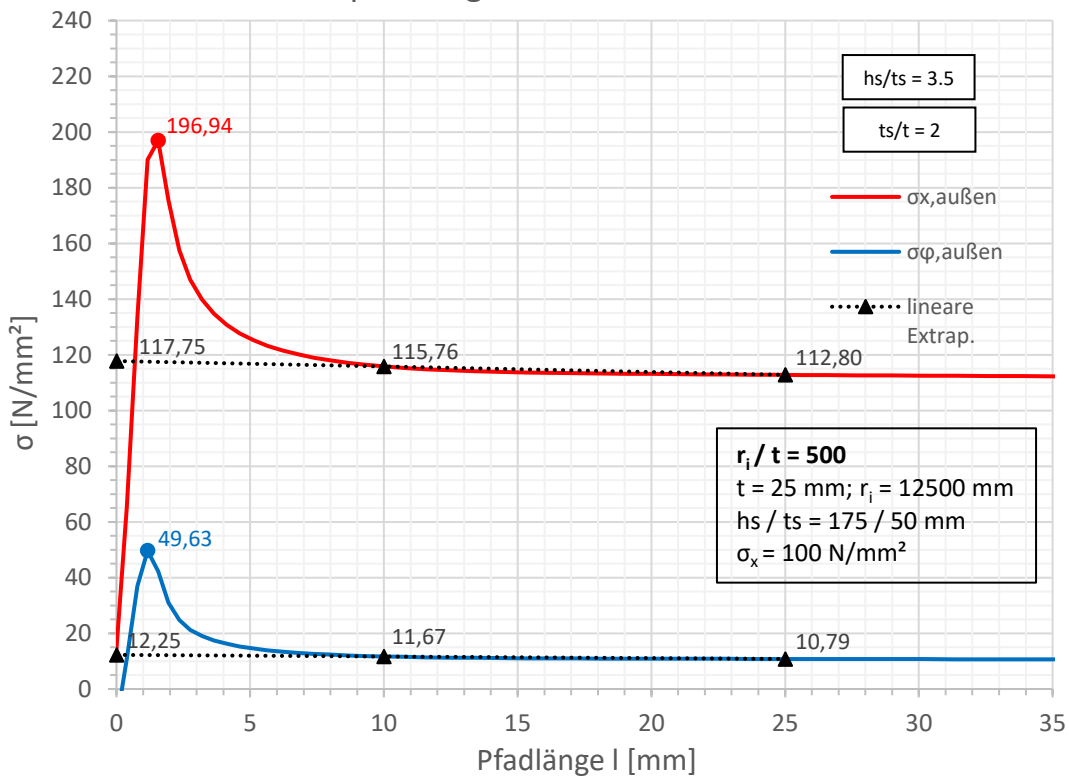


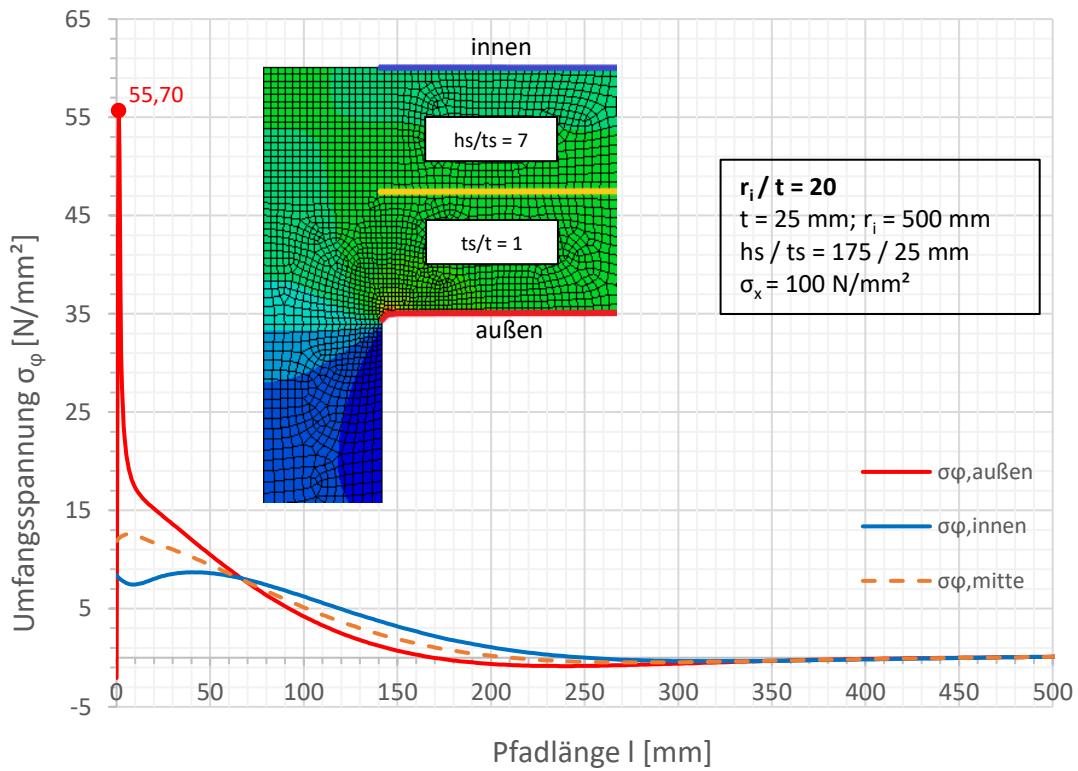
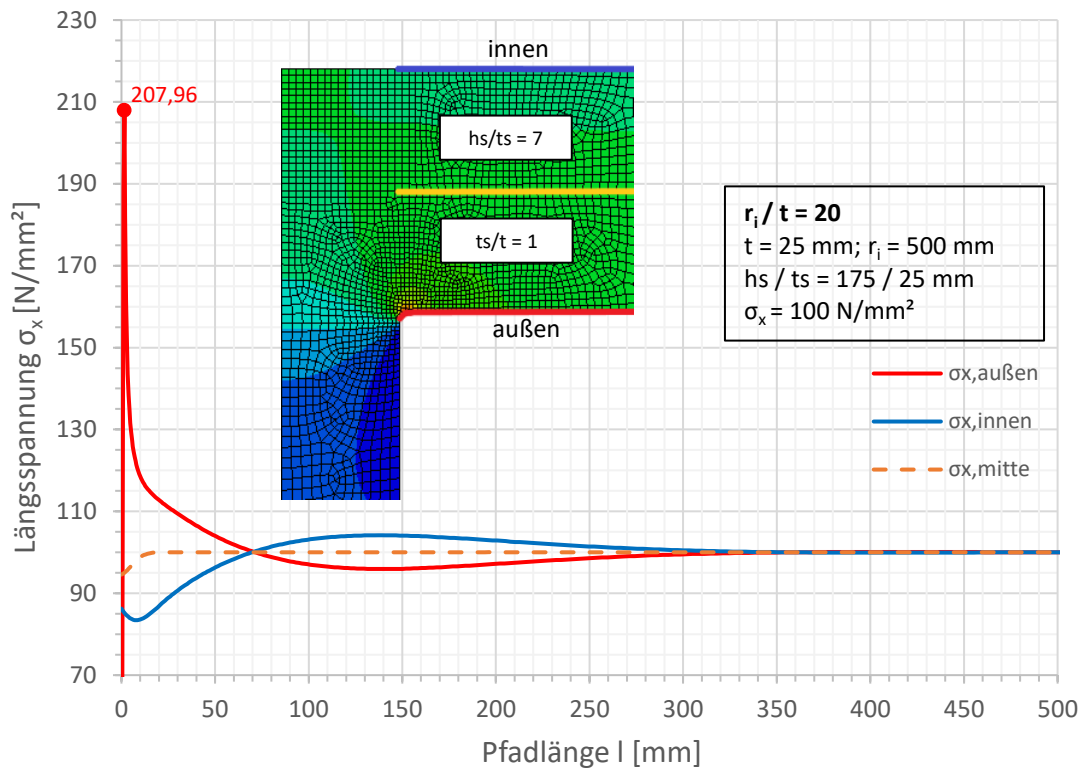


Spannungen an der Außenseite

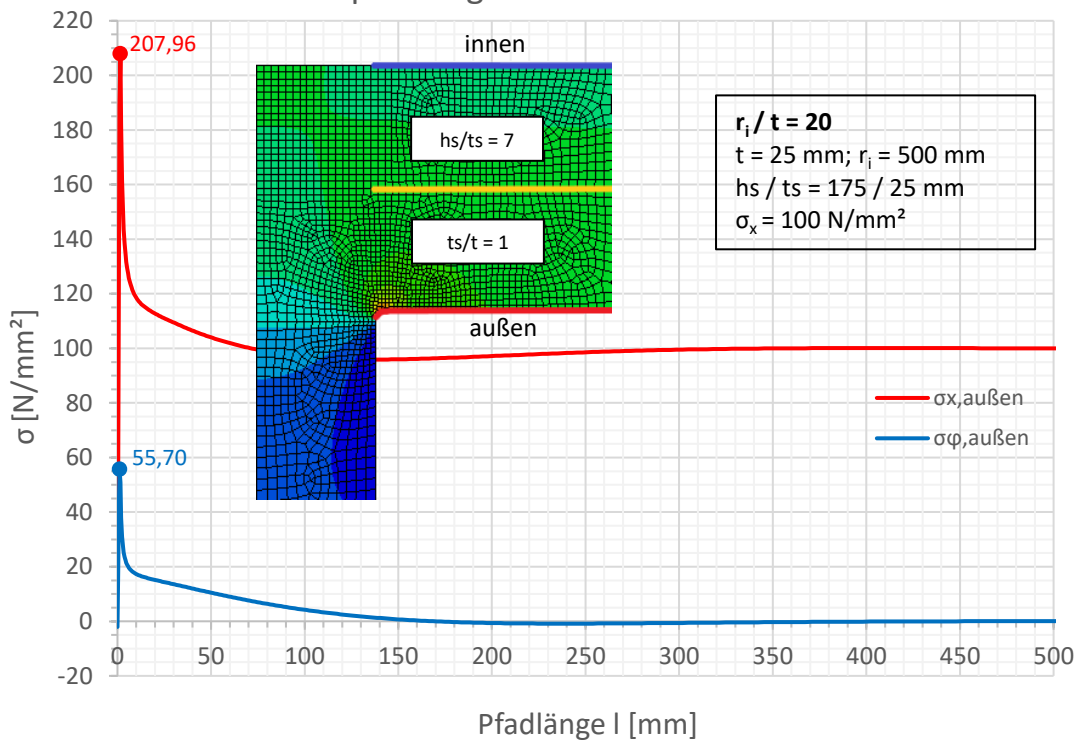


Spannungen an der Außenseite

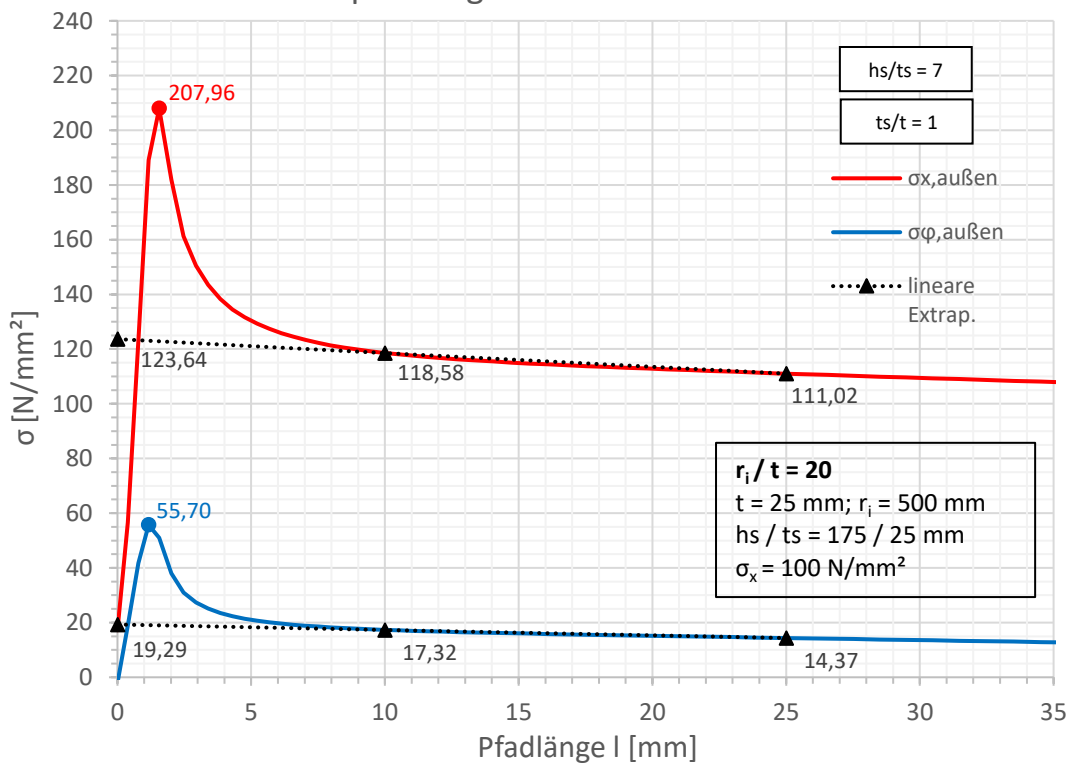


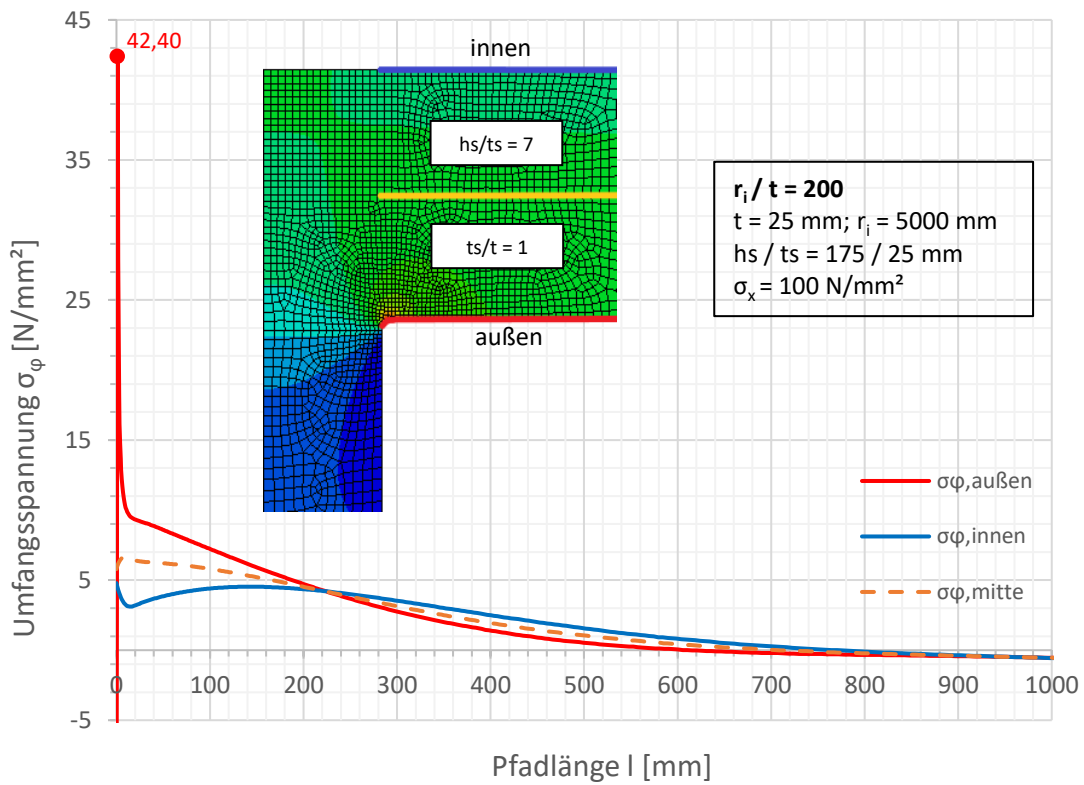
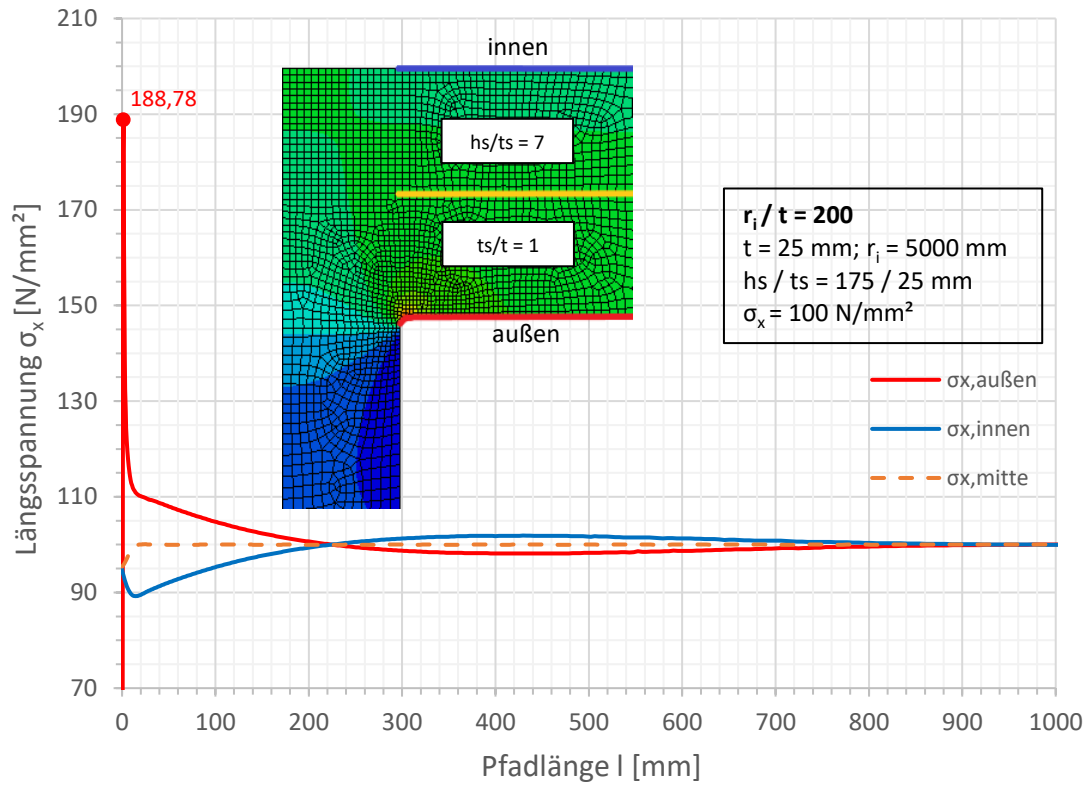


Spannungen an der Außenseite

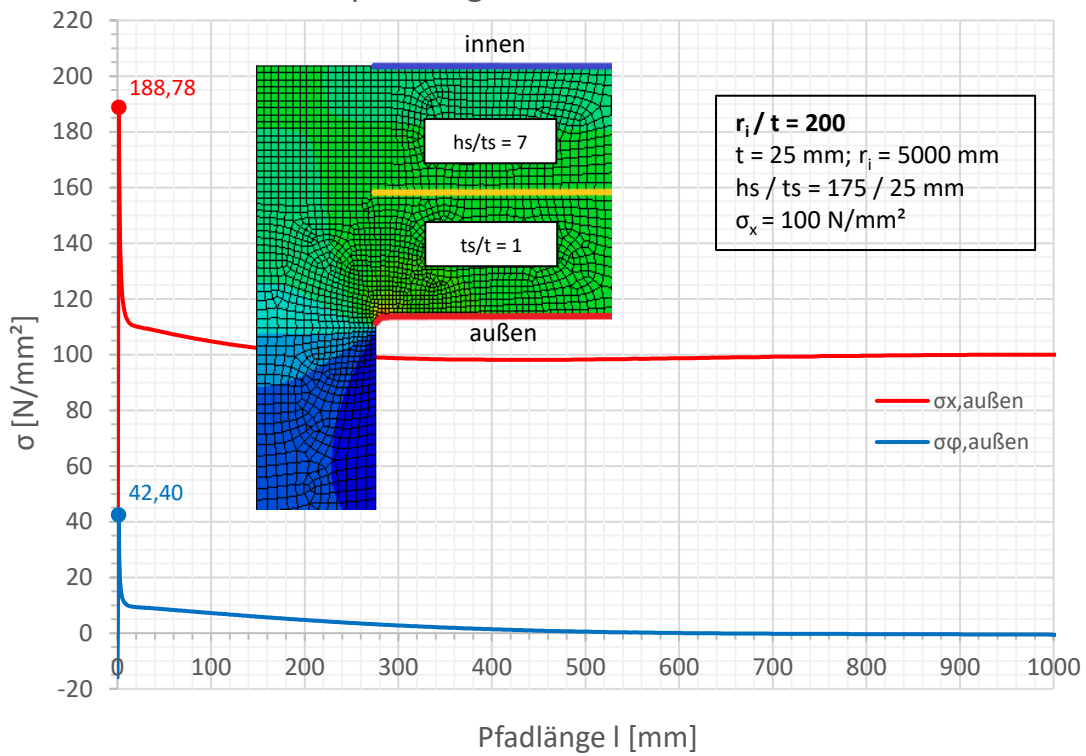


Spannungen an der Außenseite

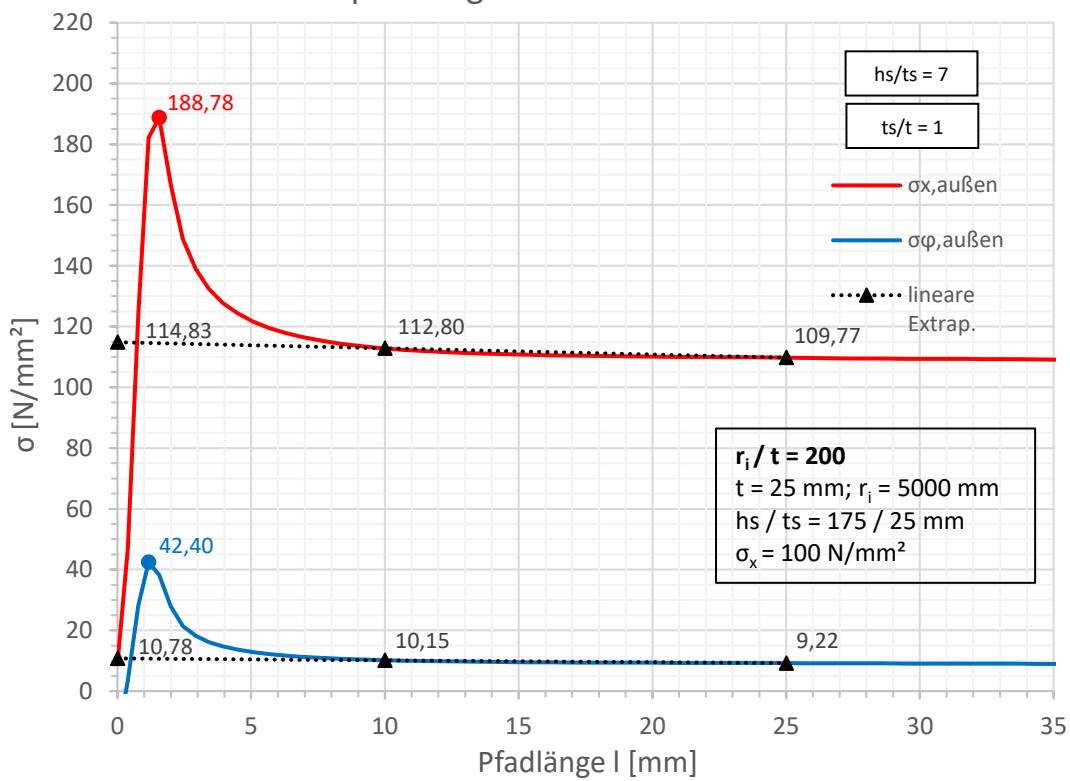


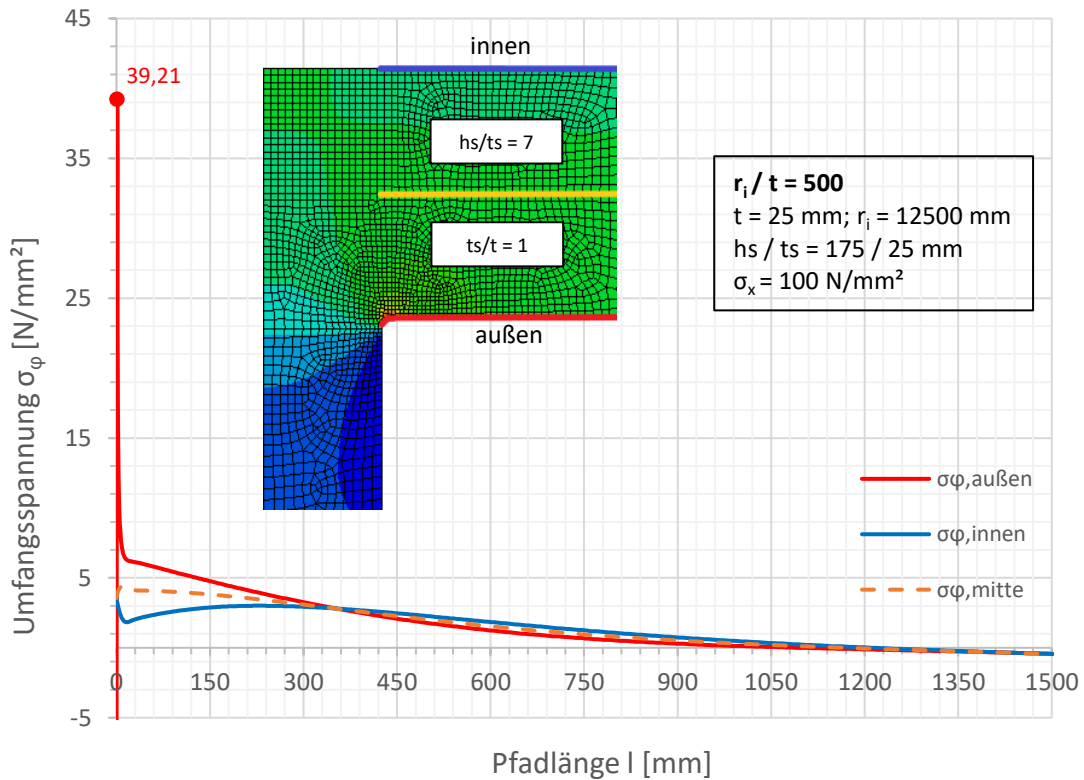
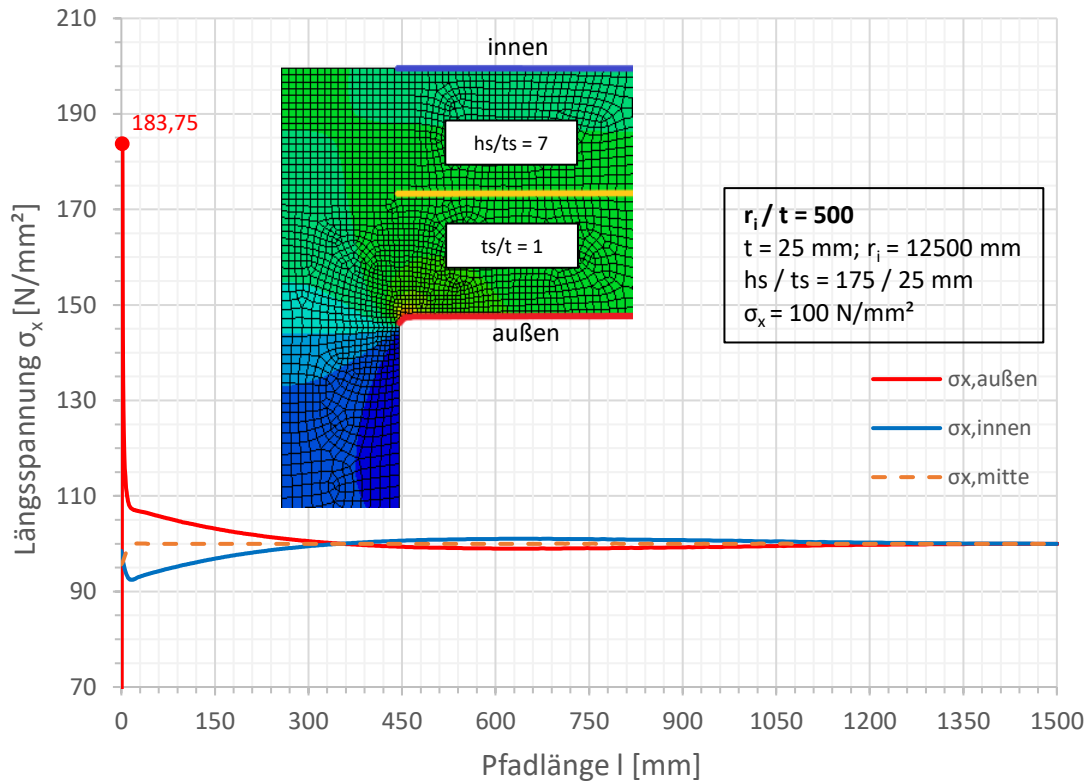


Spannungen an der Außenseite

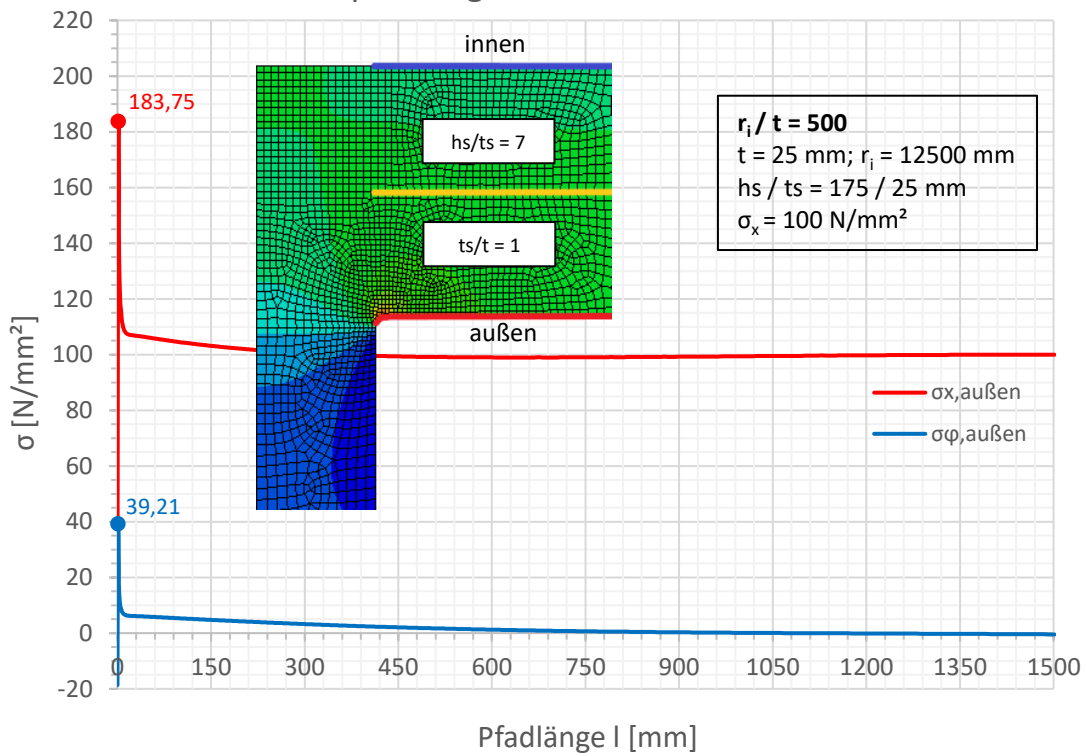


Spannungen an der Außenseite

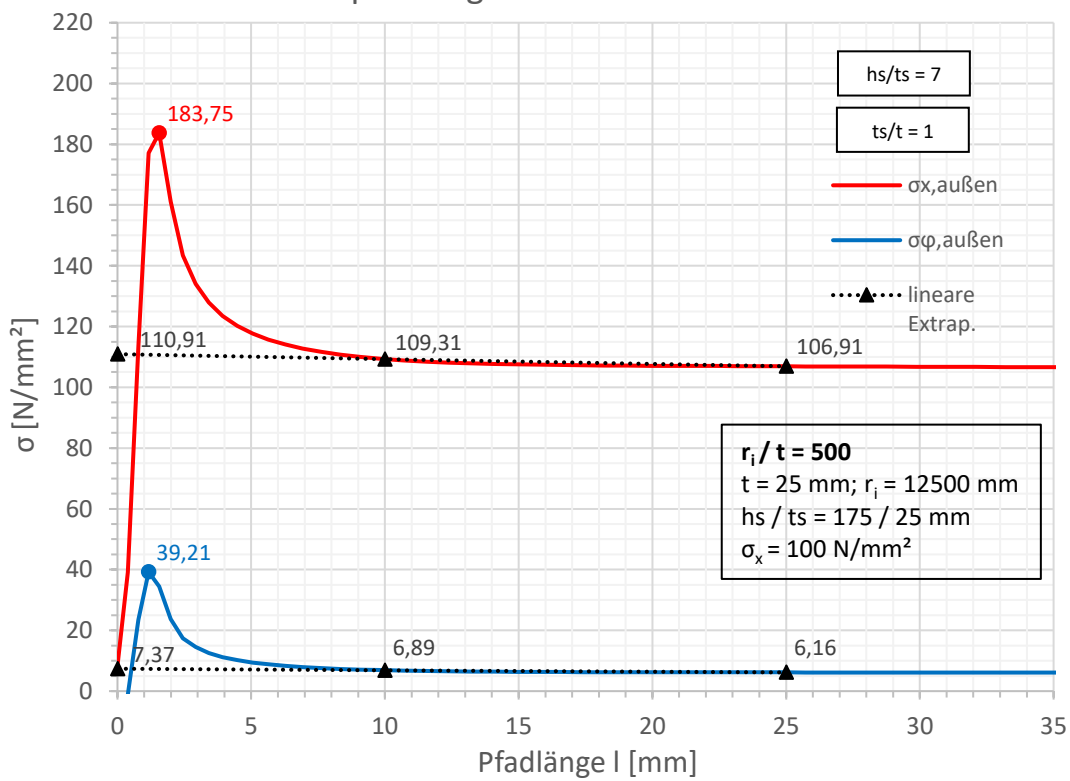


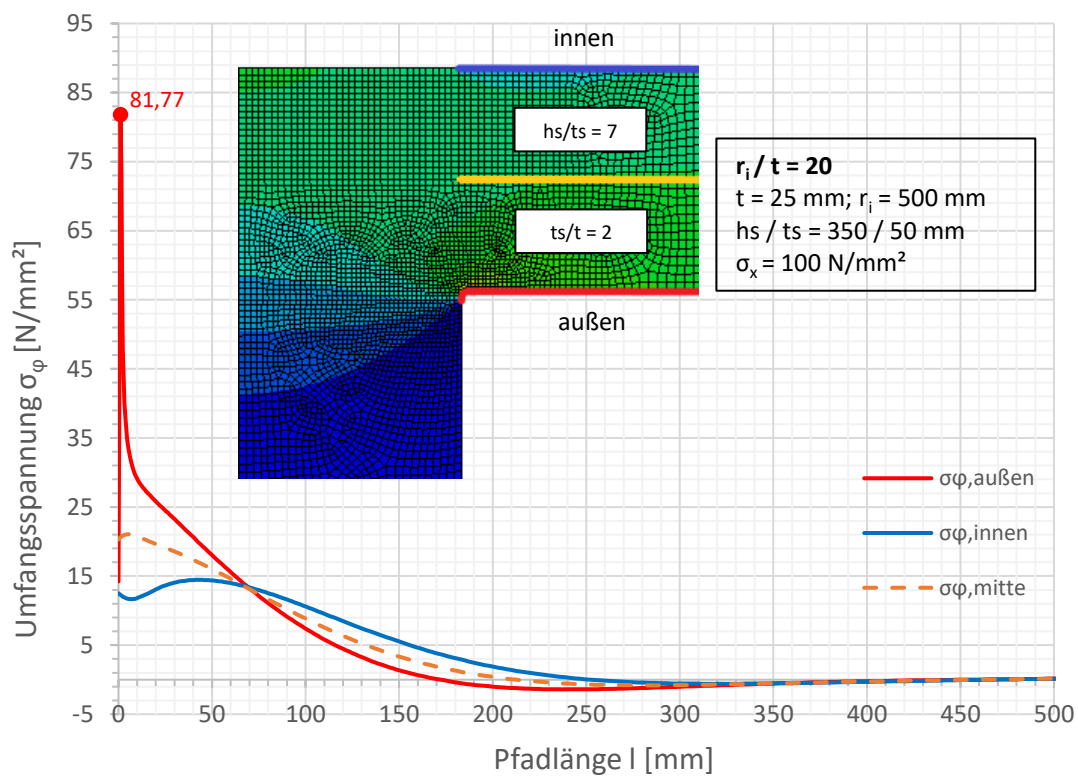
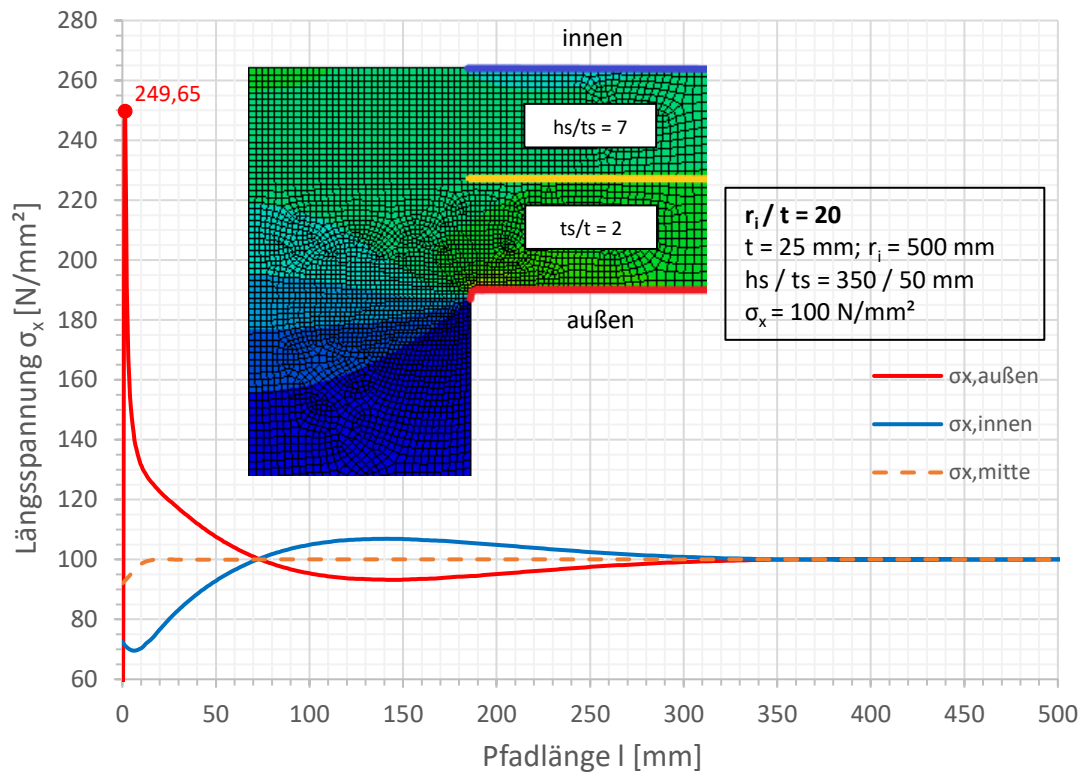


Spannungen an der Außenseite

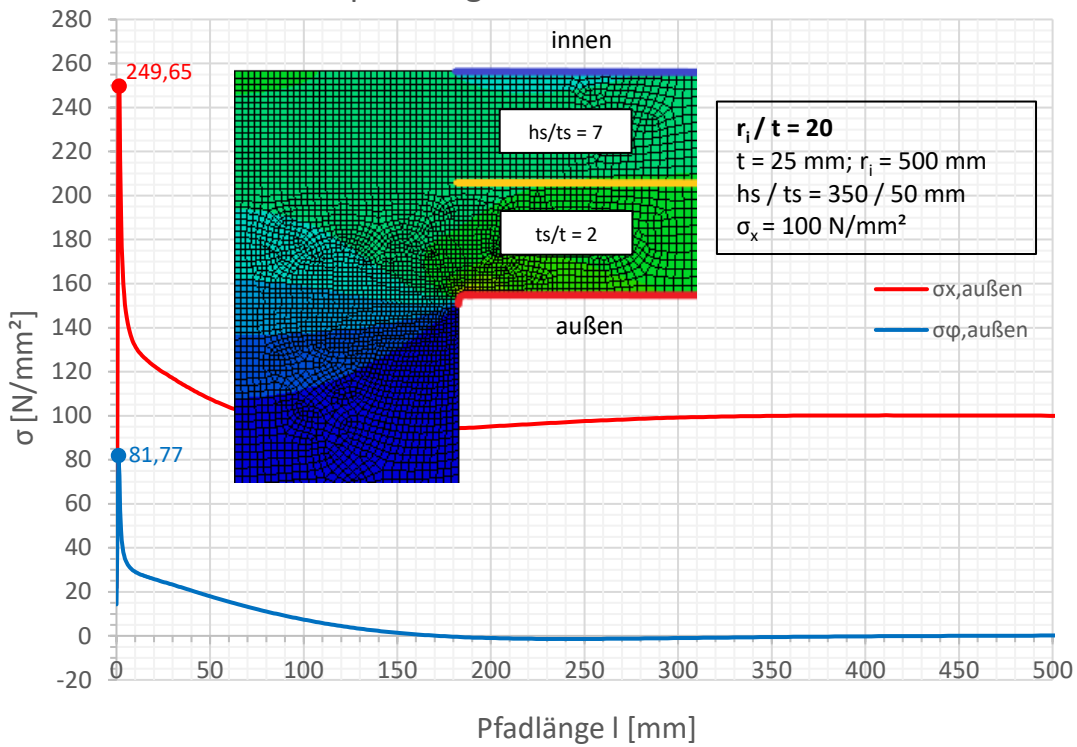


Spannungen an der Außenseite

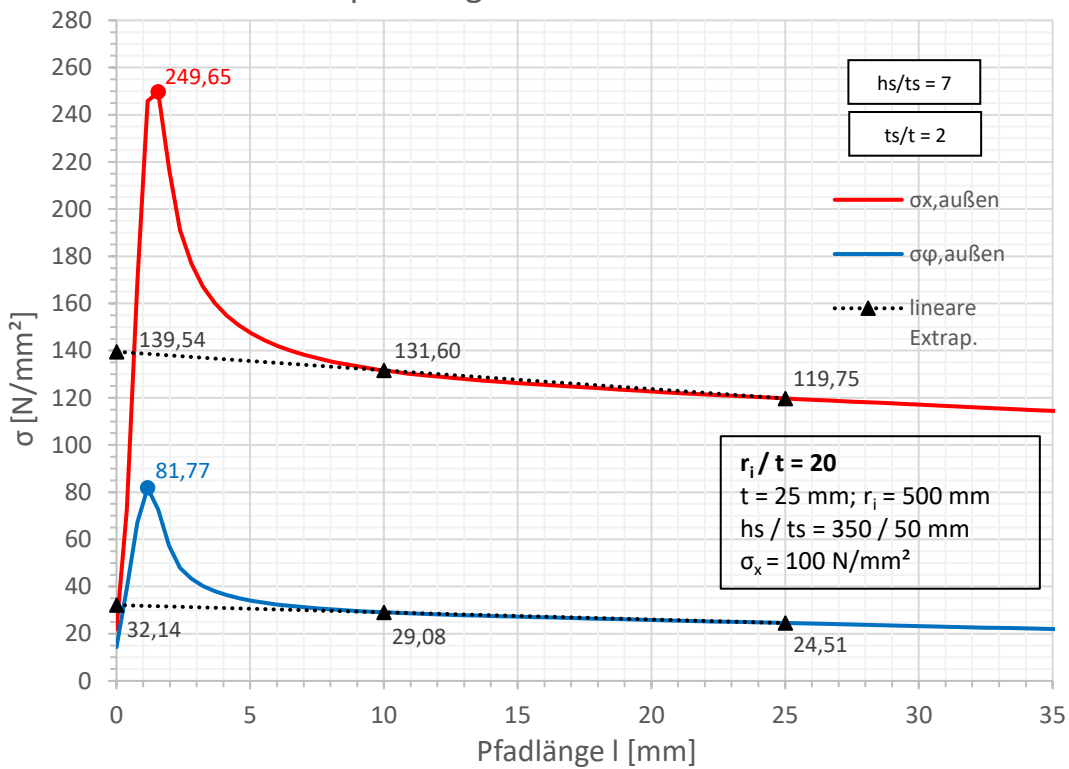


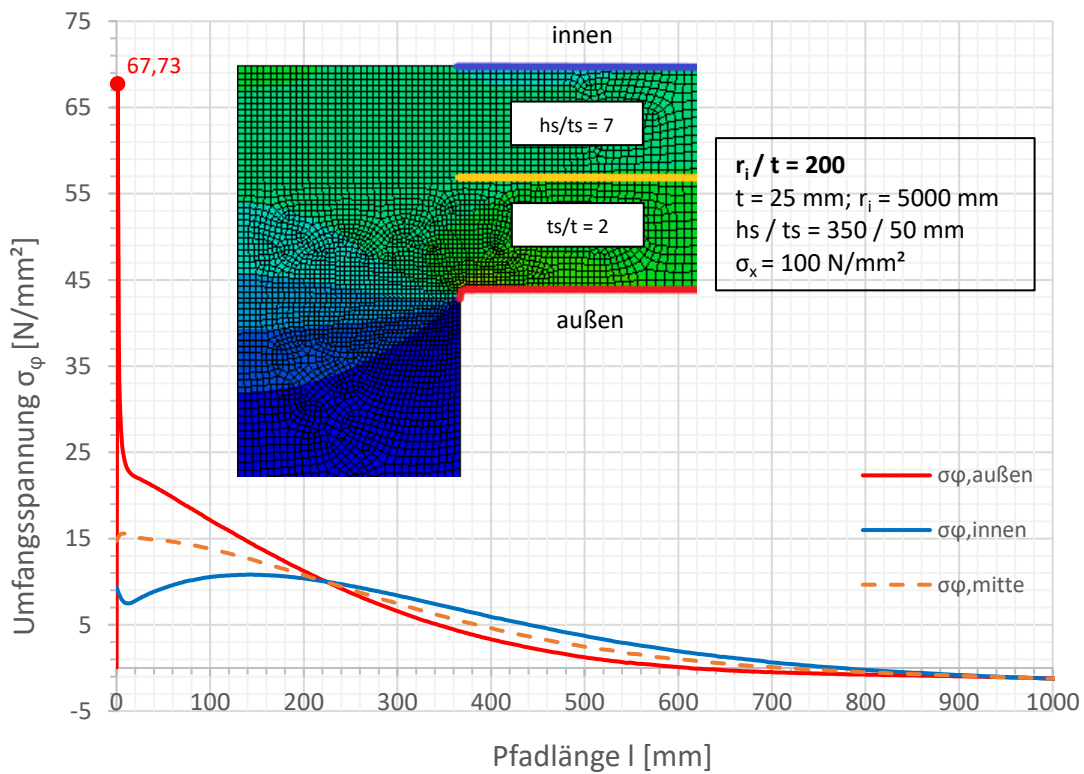
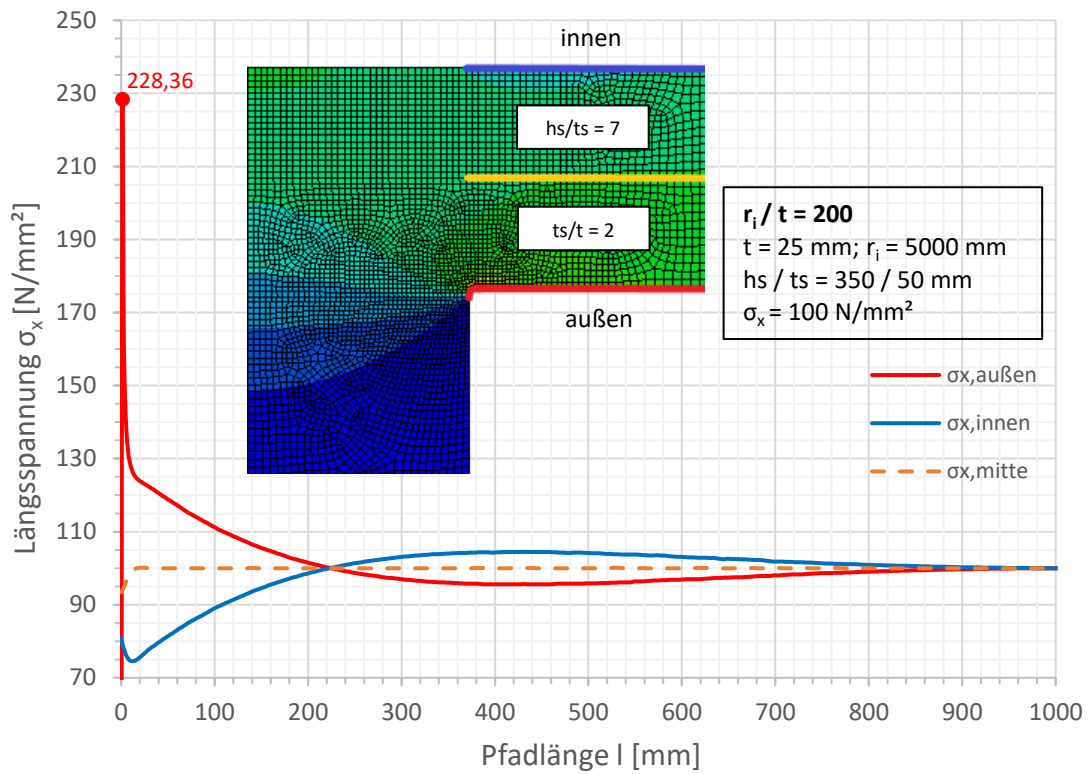


Spannungen an der Außenseite

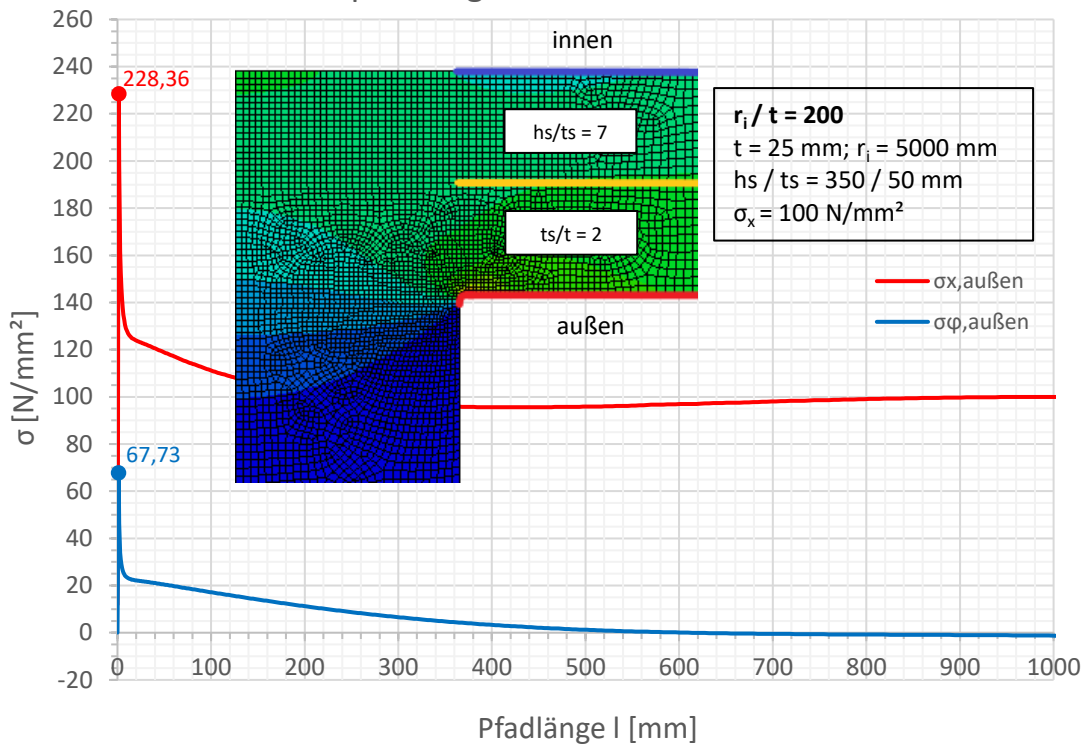


Spannungen an der Außenseite

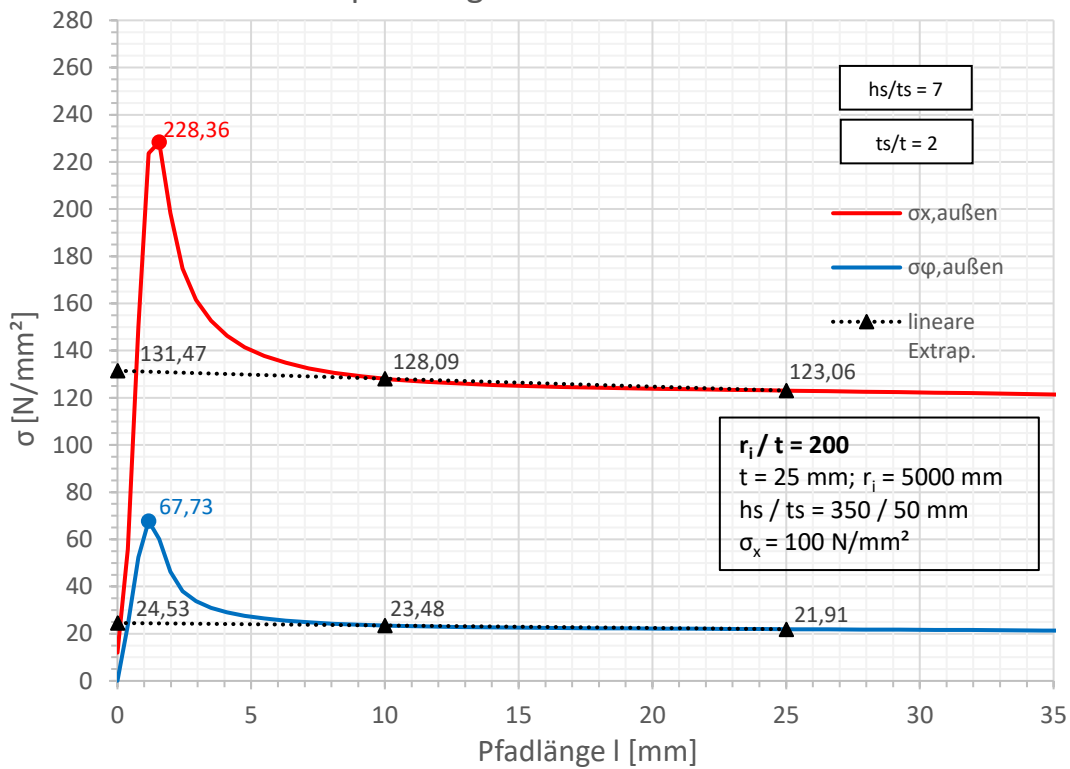


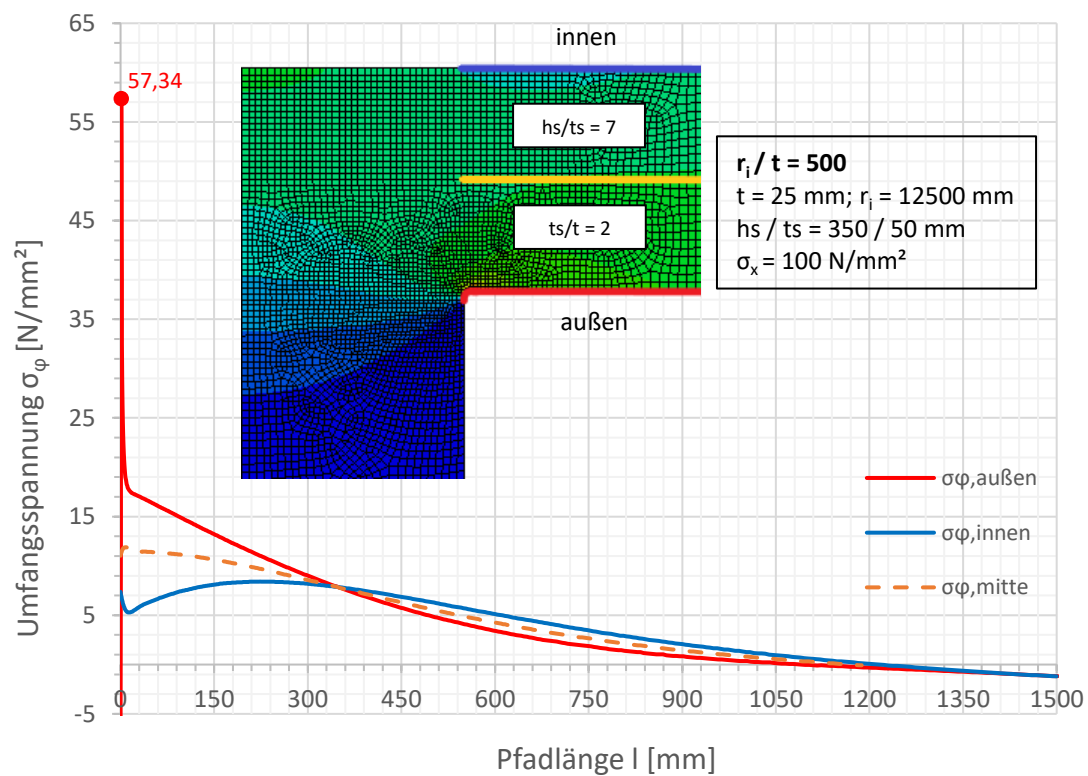
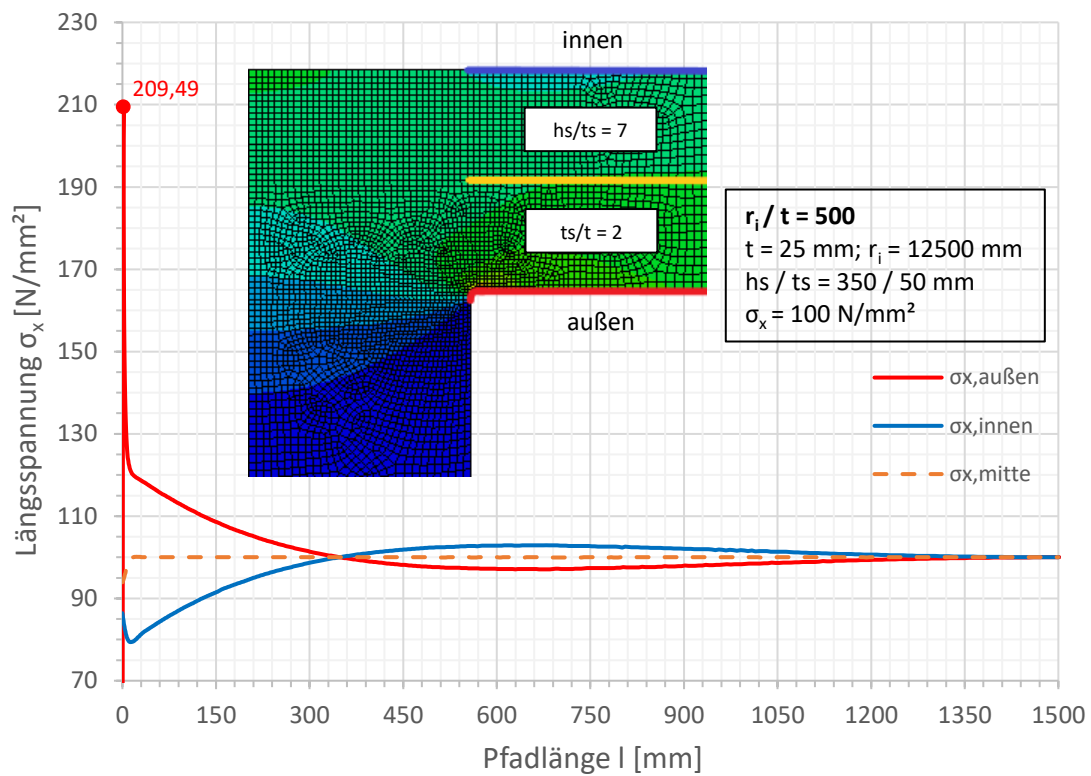


Spannungen an der Außenseite

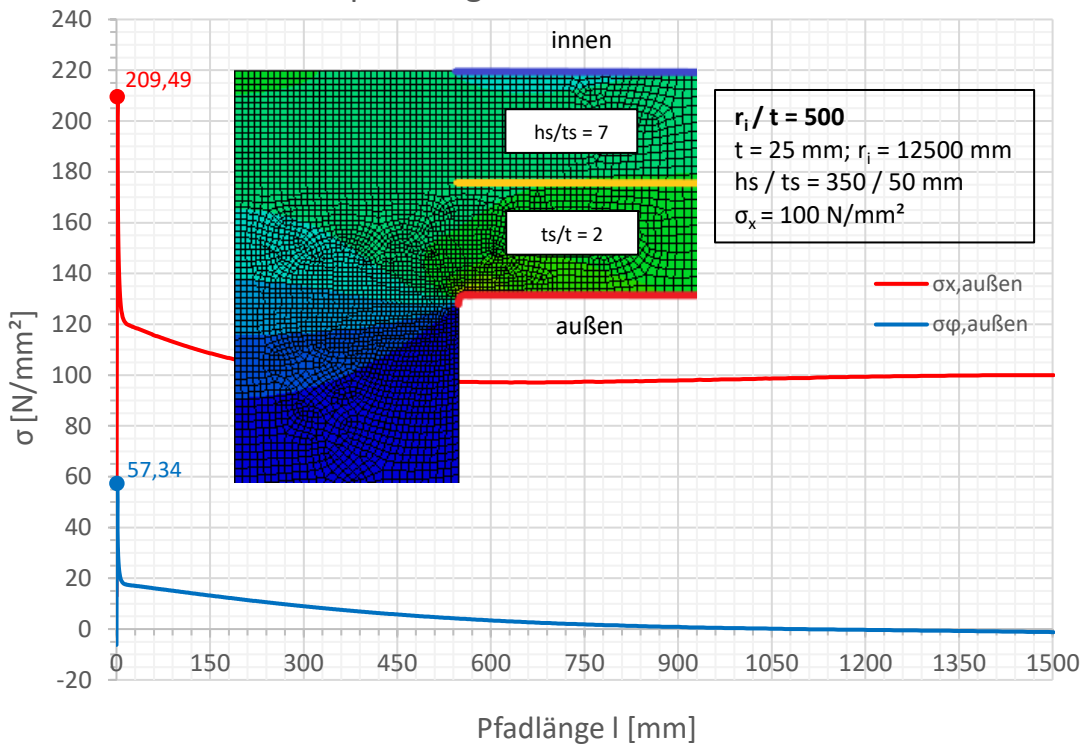


Spannungen an der Außenseite

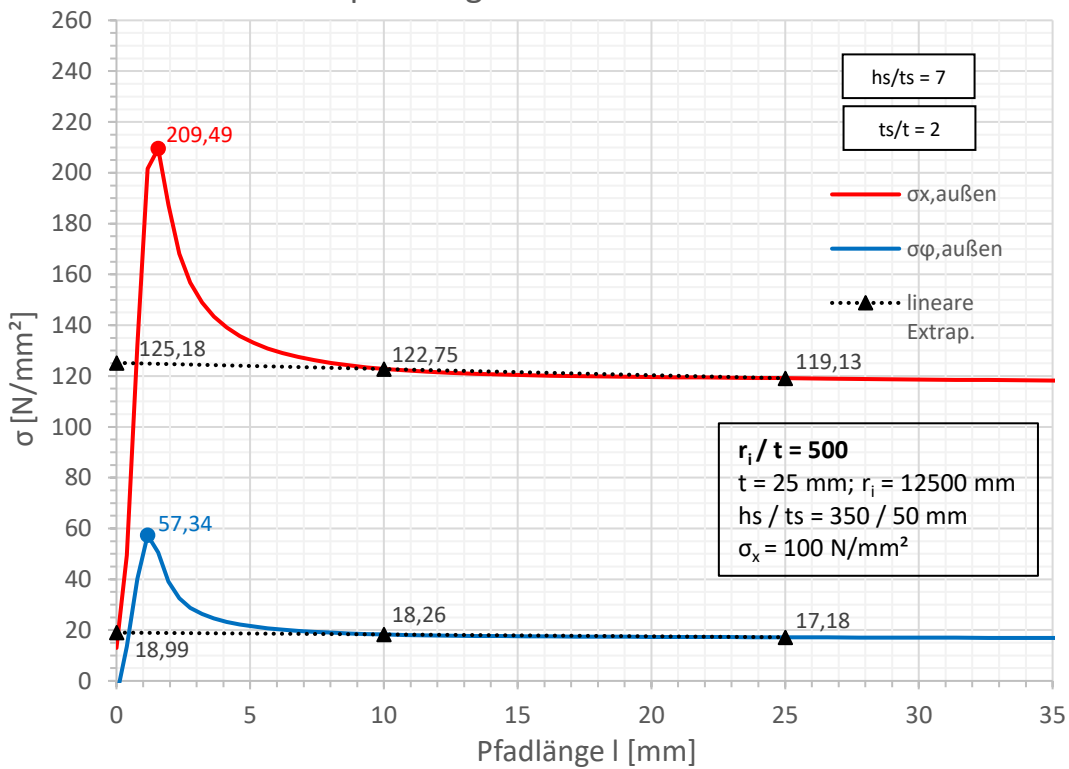




Spannungen an der Außenseite

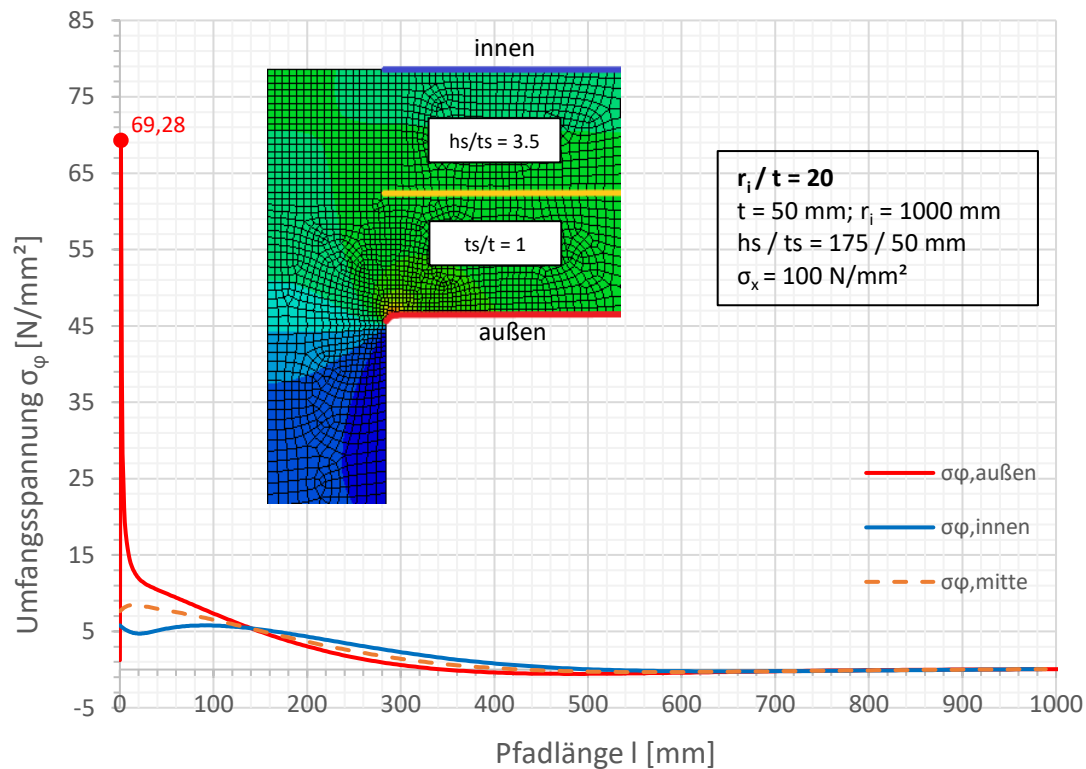
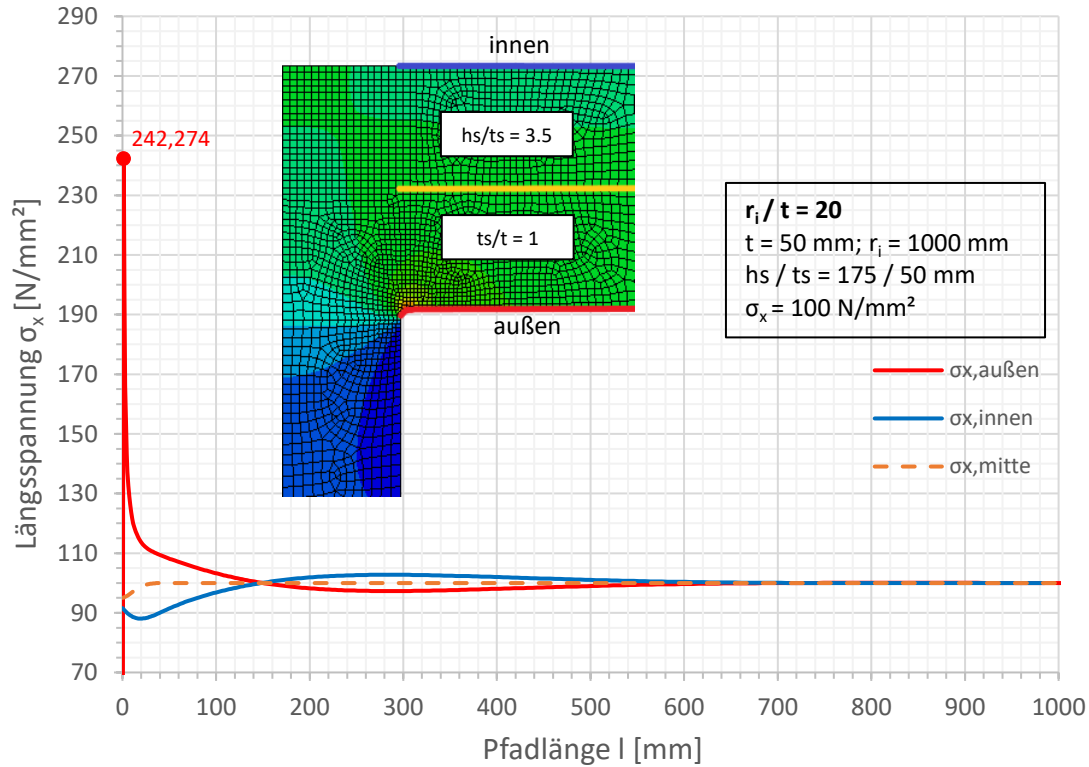


Spannungen an der Außenseite

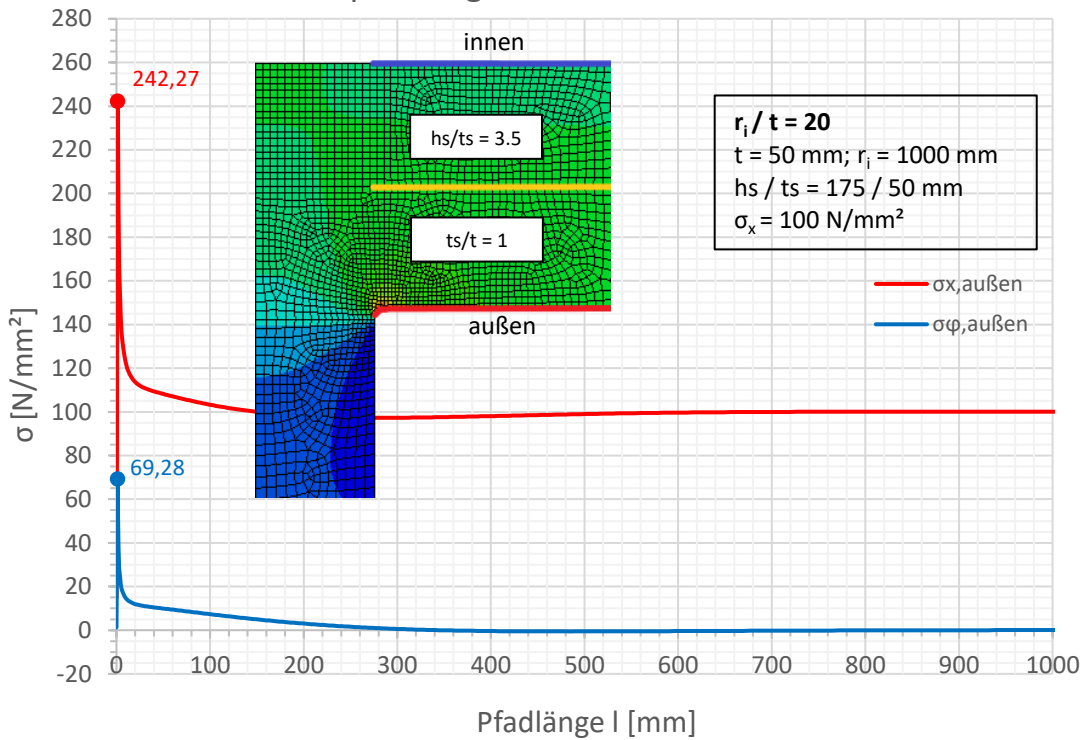


A.3. Wanddicke $t = 50 \text{ mm}$

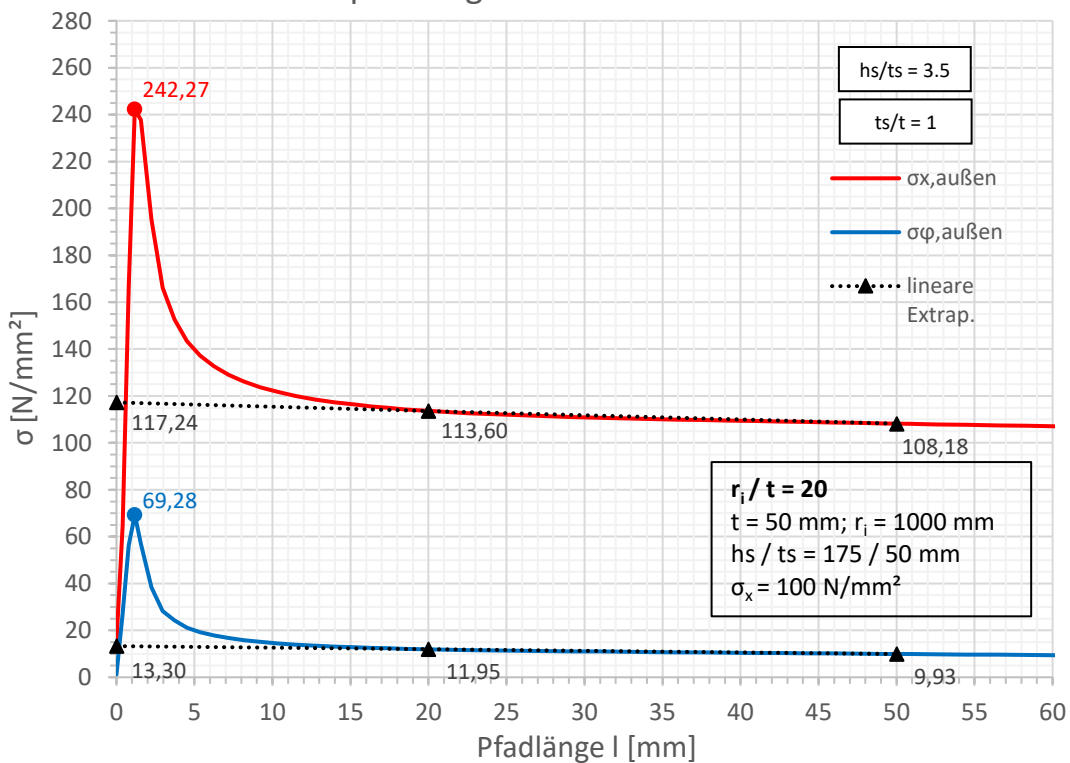
In den nächsten Seiten A-73 bis A-96 sind die Diagramme zum **Ringsteifenanschluss für die Wanddicke $t = 50 \text{ mm}$** abgebildet.

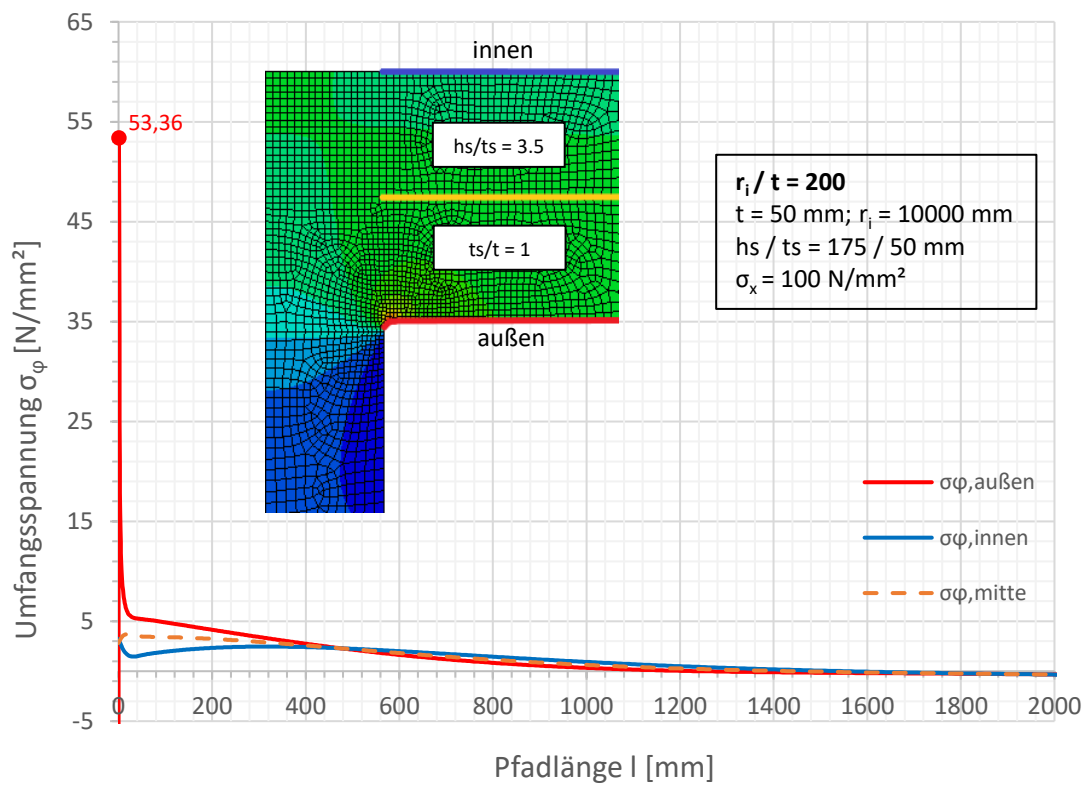
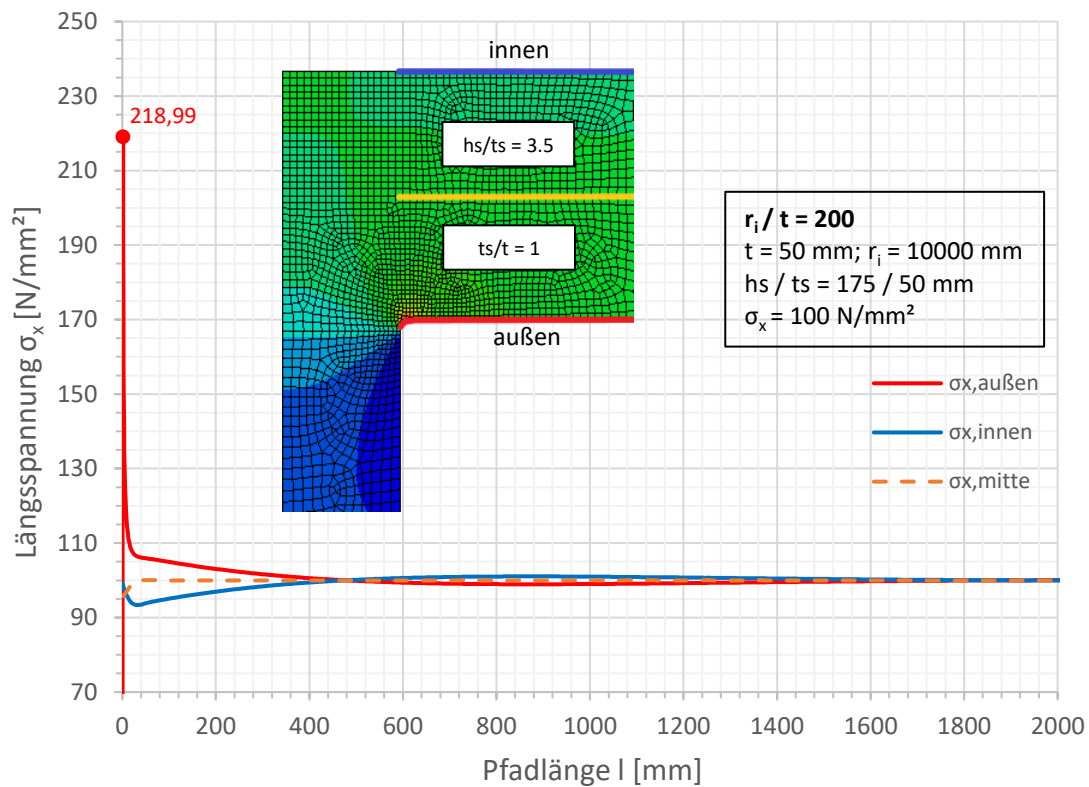


Spannungen an der Außenseite

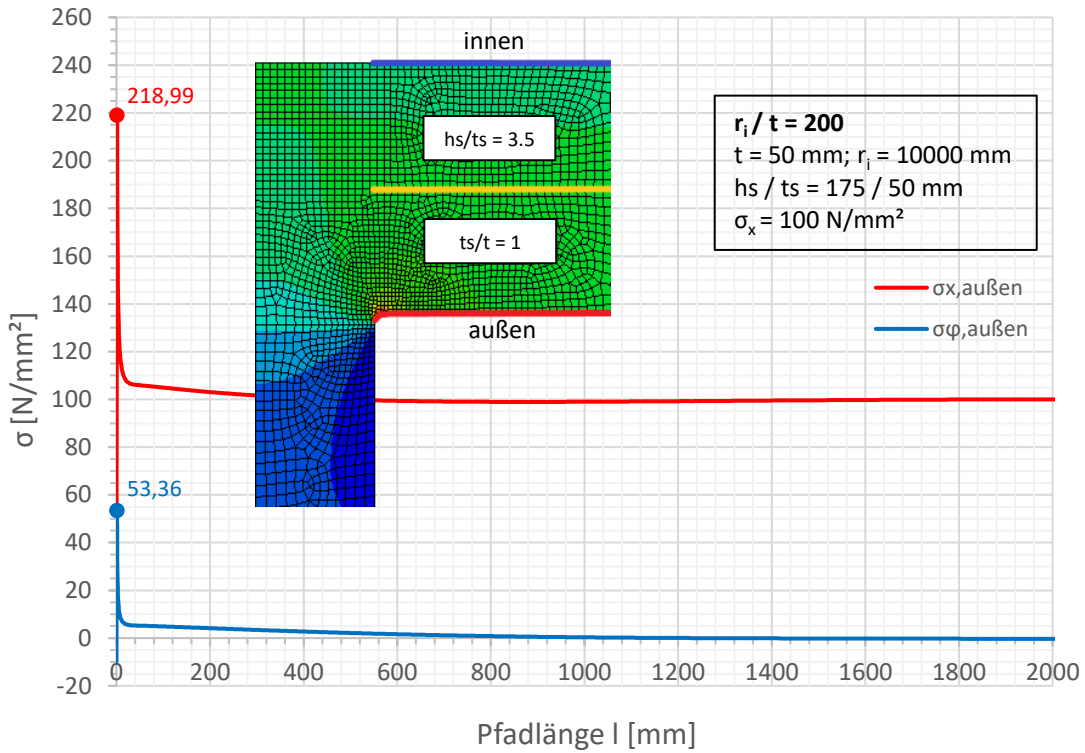


Spannungen an der Außenseite

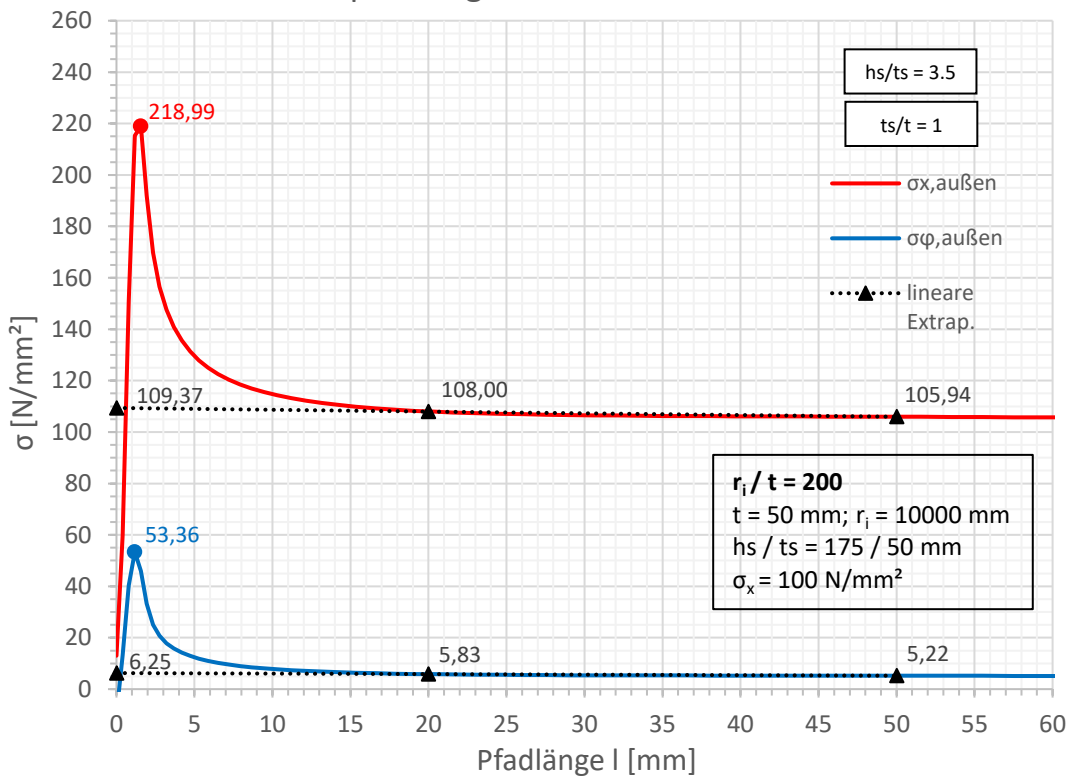


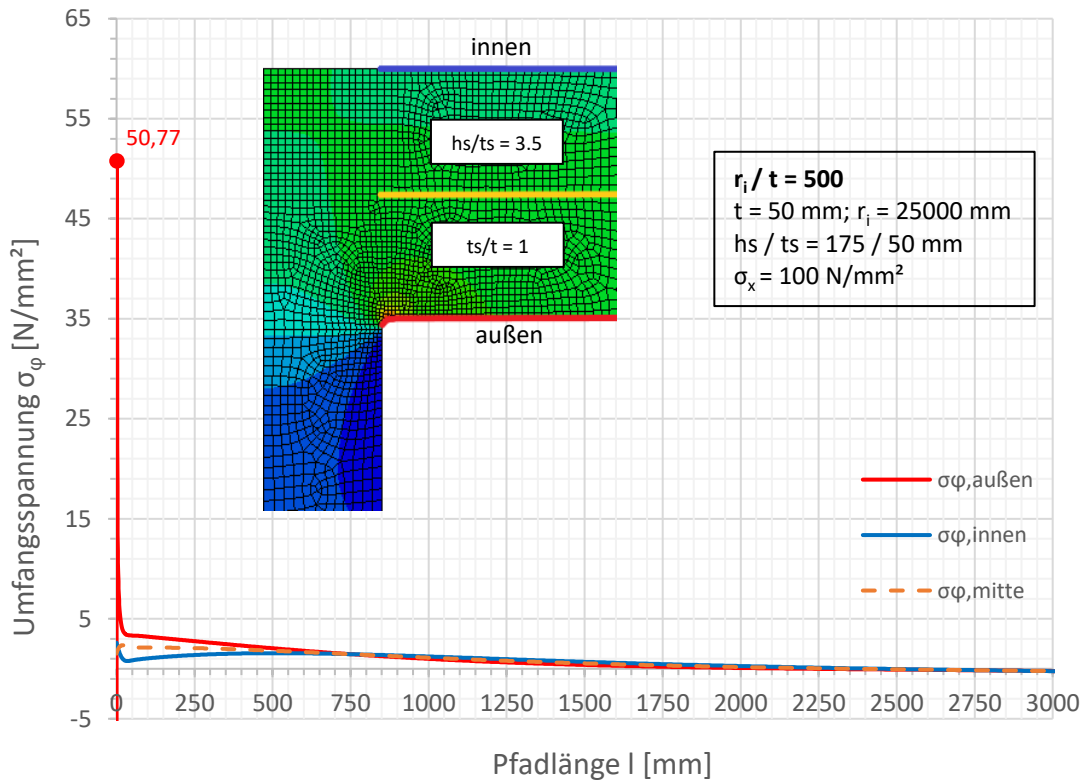
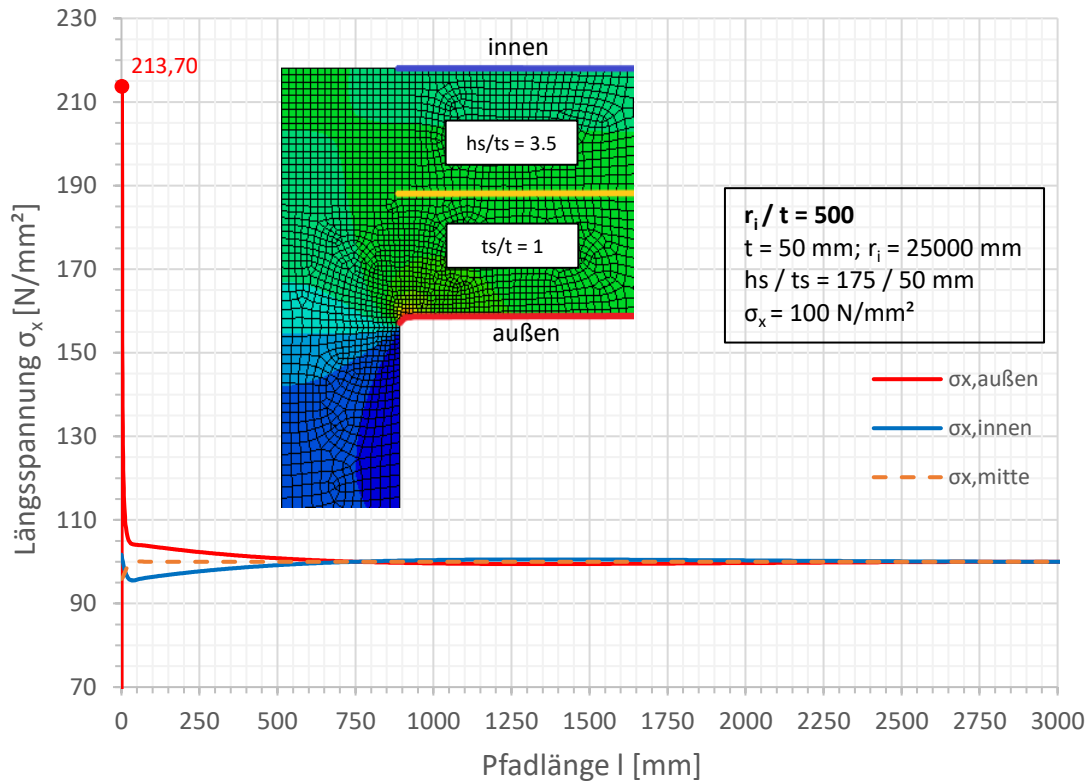


Spannungen an der Außenseite

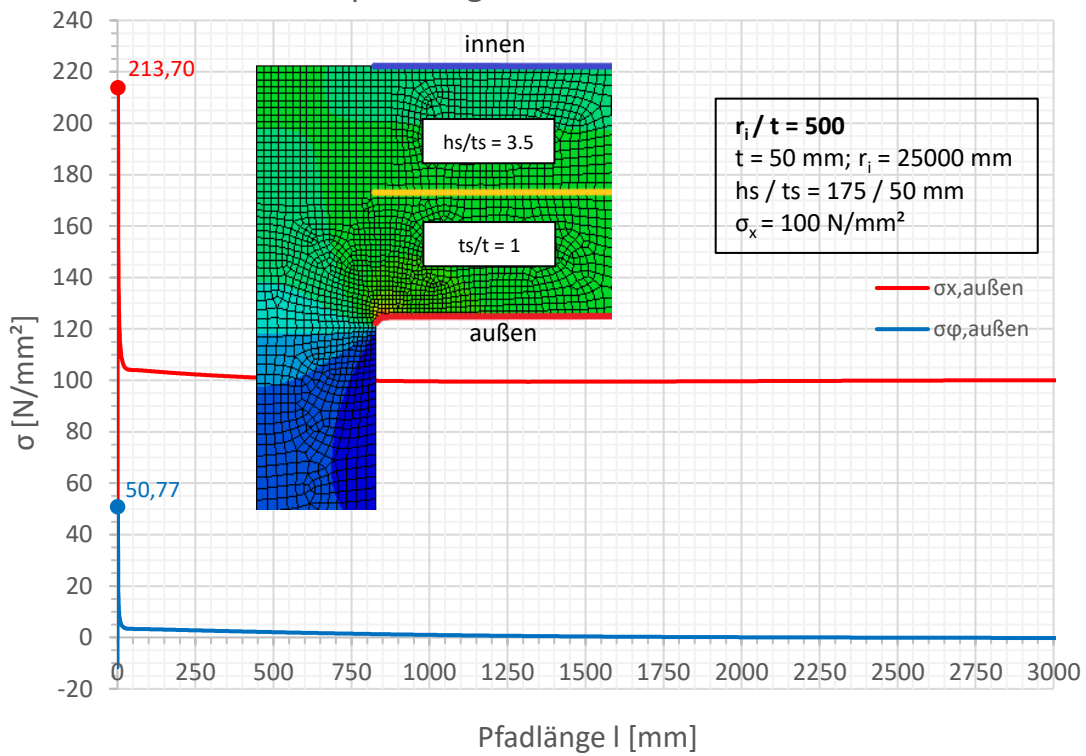


Spannungen an der Außenseite

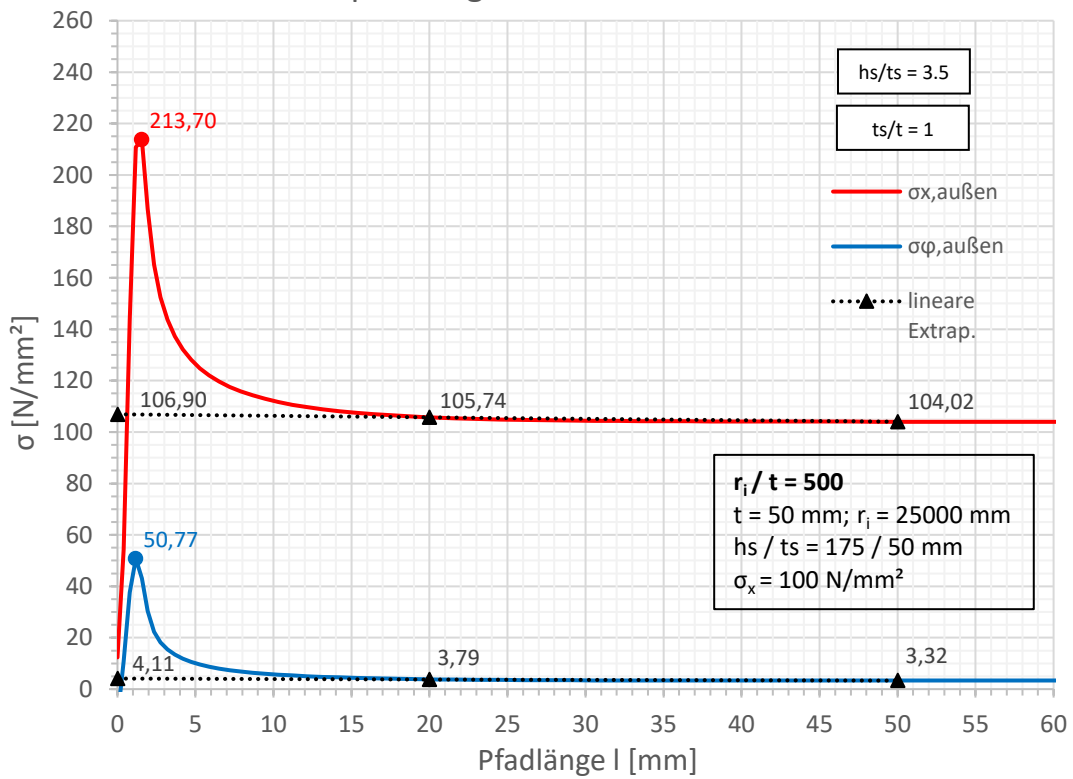


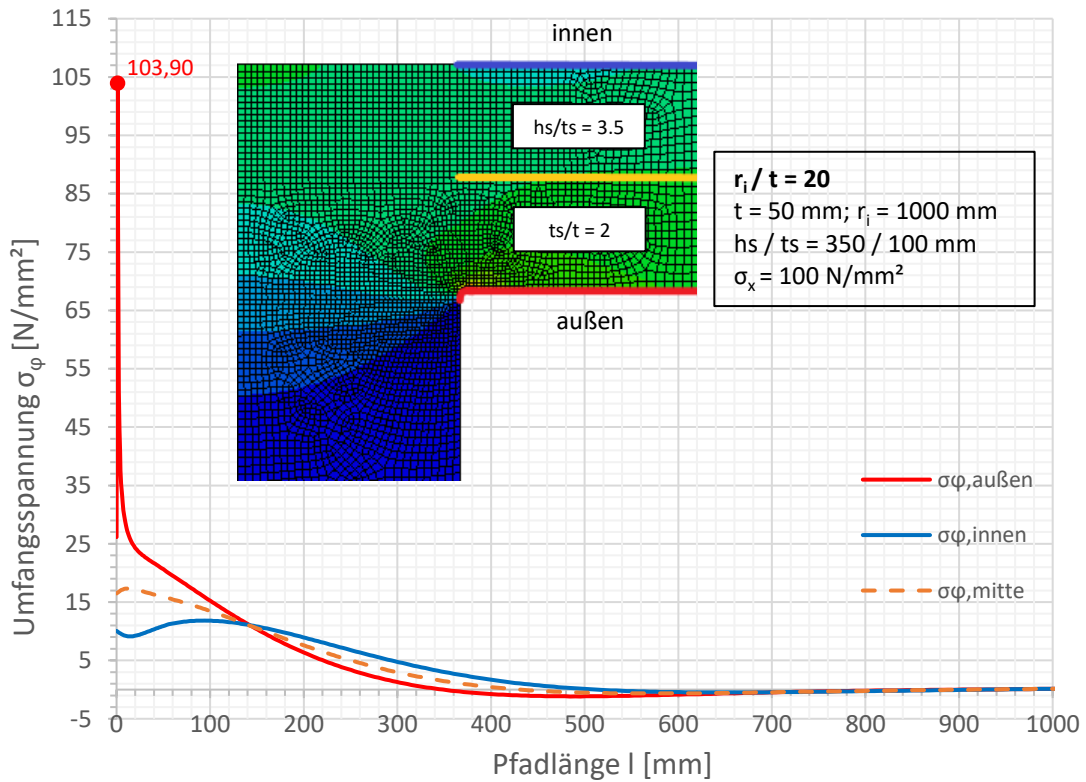
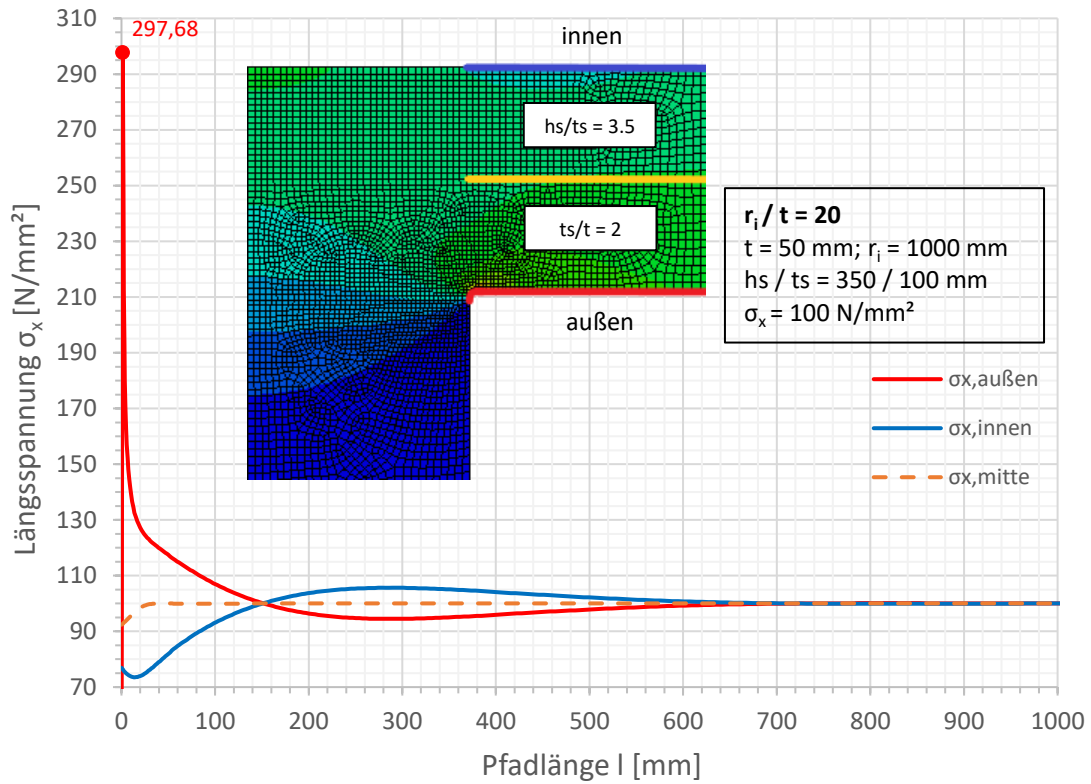


Spannungen an der Außenseite

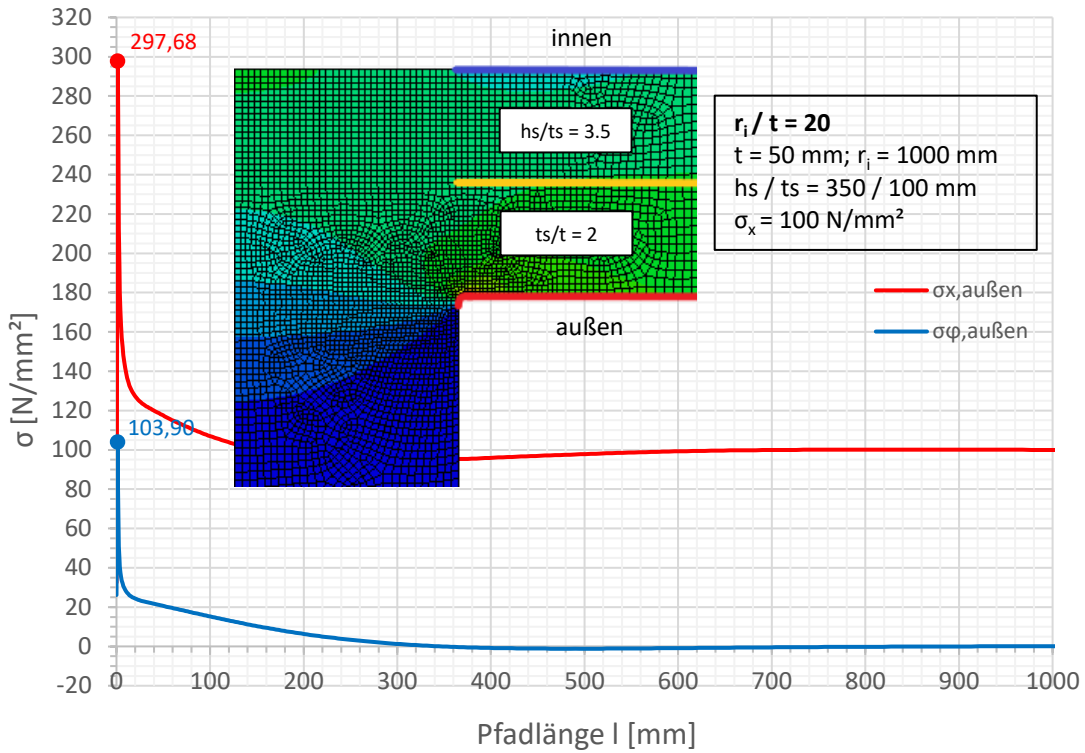


Spannungen an der Außenseite

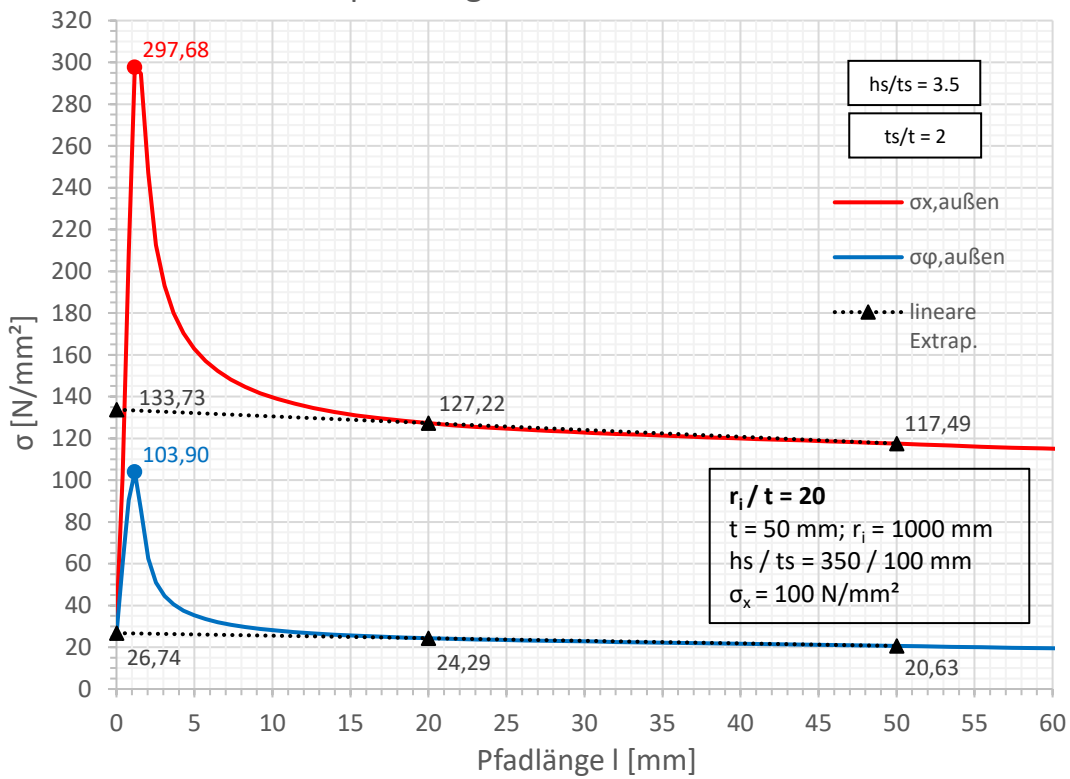


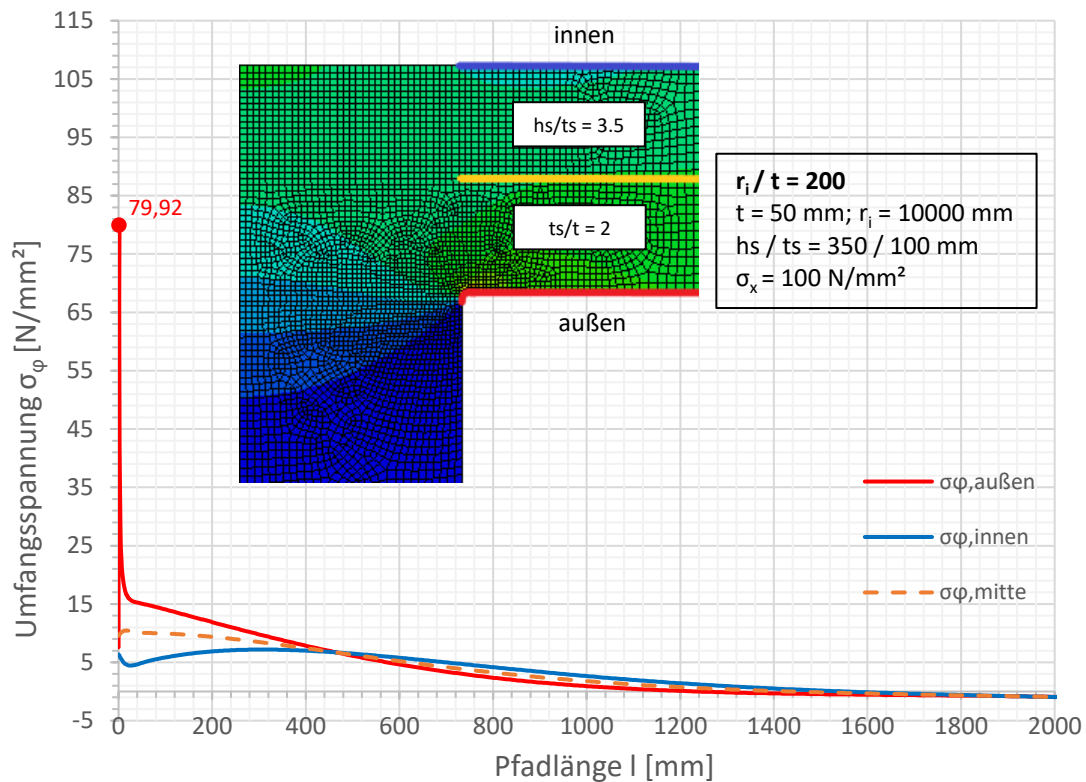
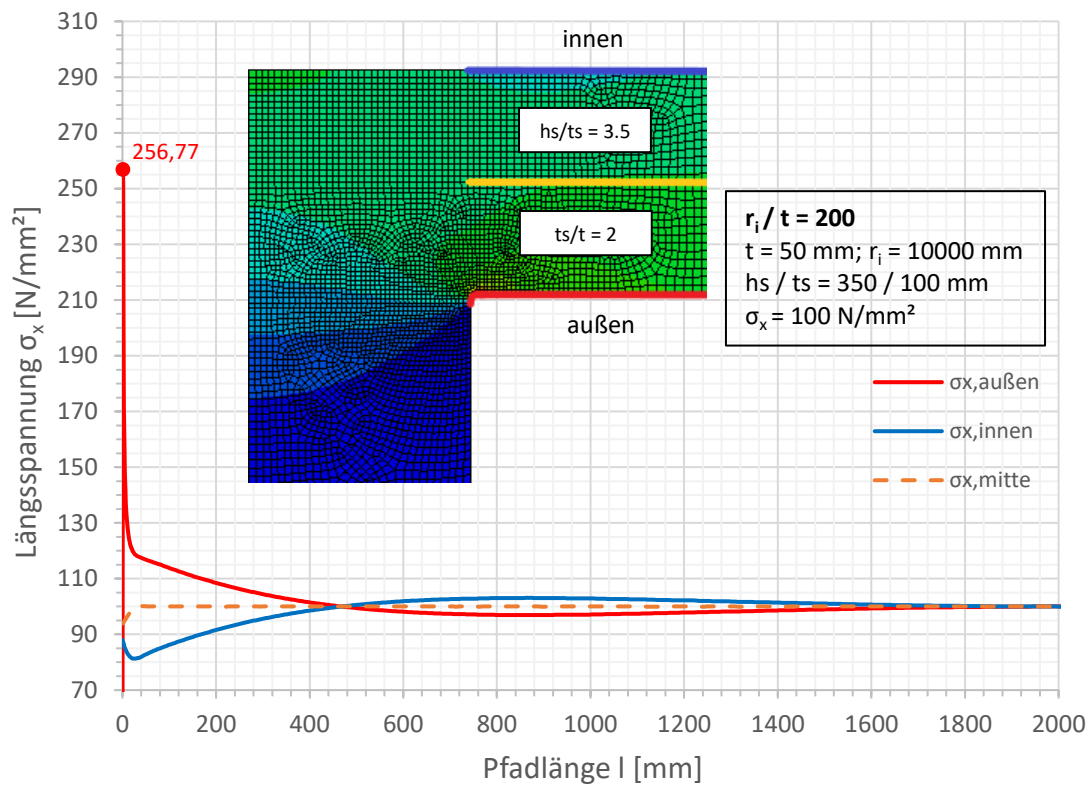


Spannungen an der Außenseite

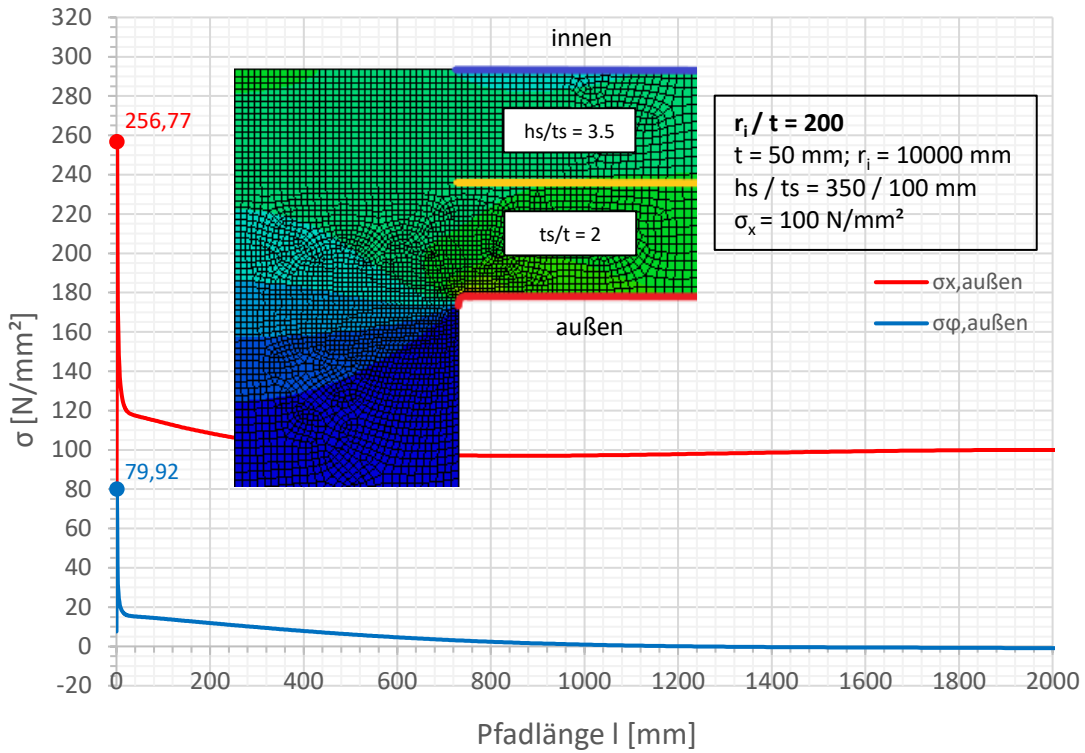


Spannungen an der Außenseite

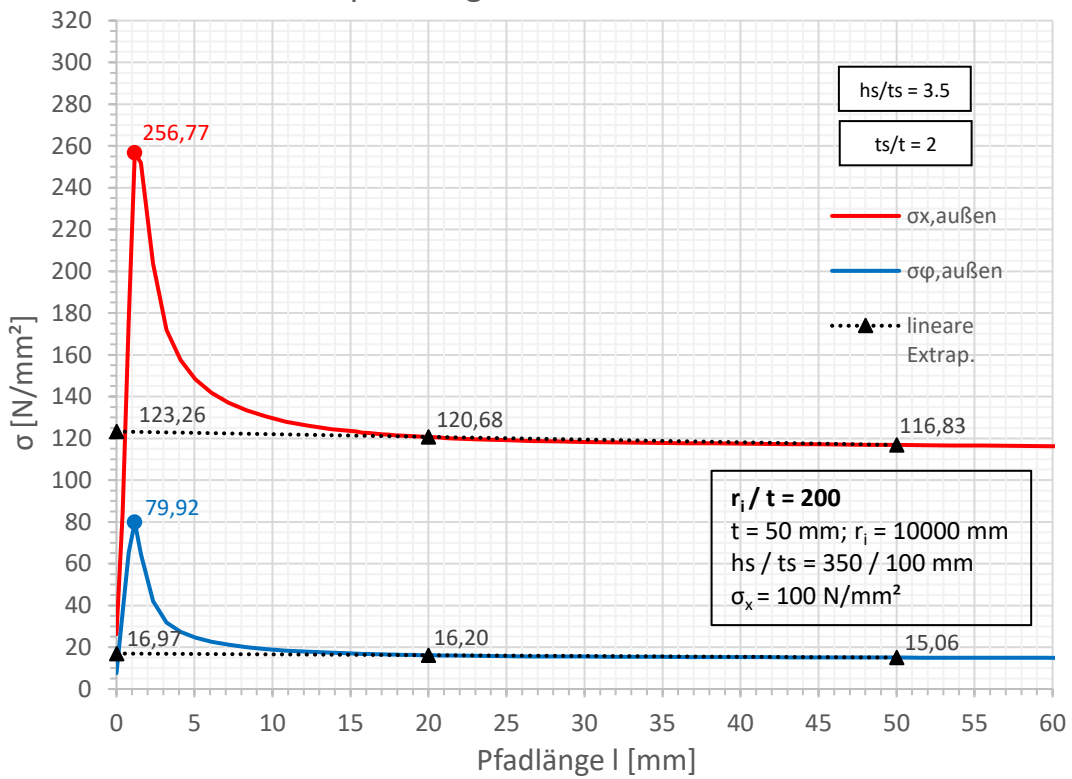


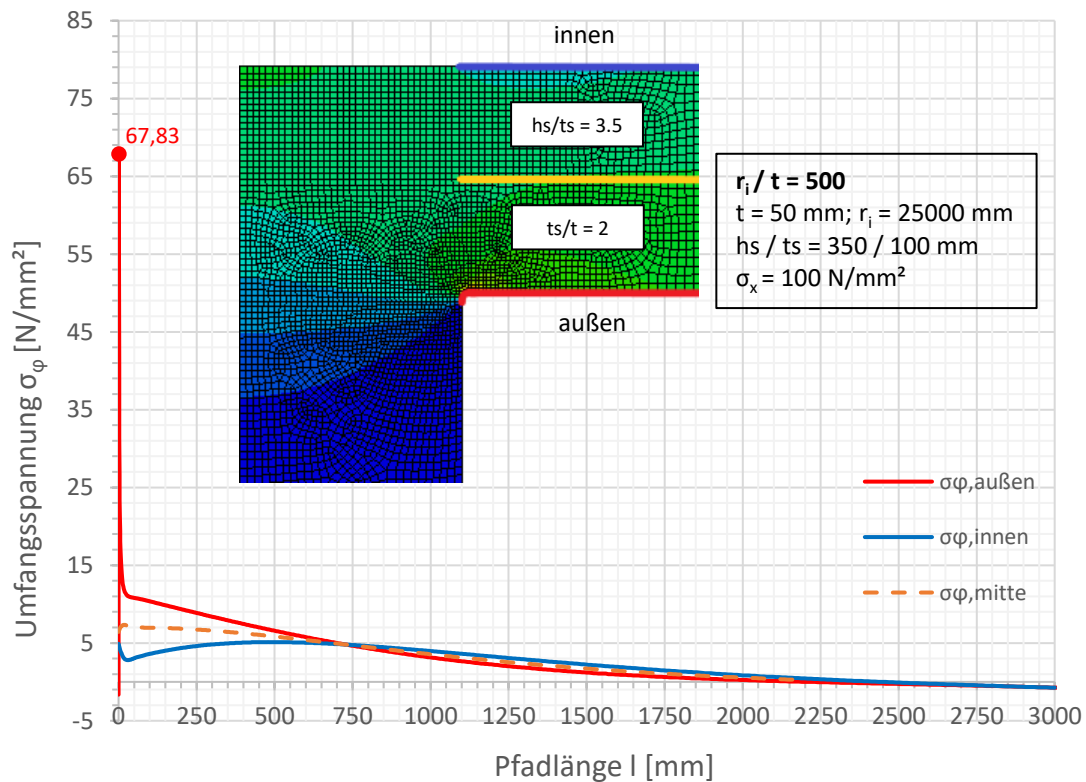
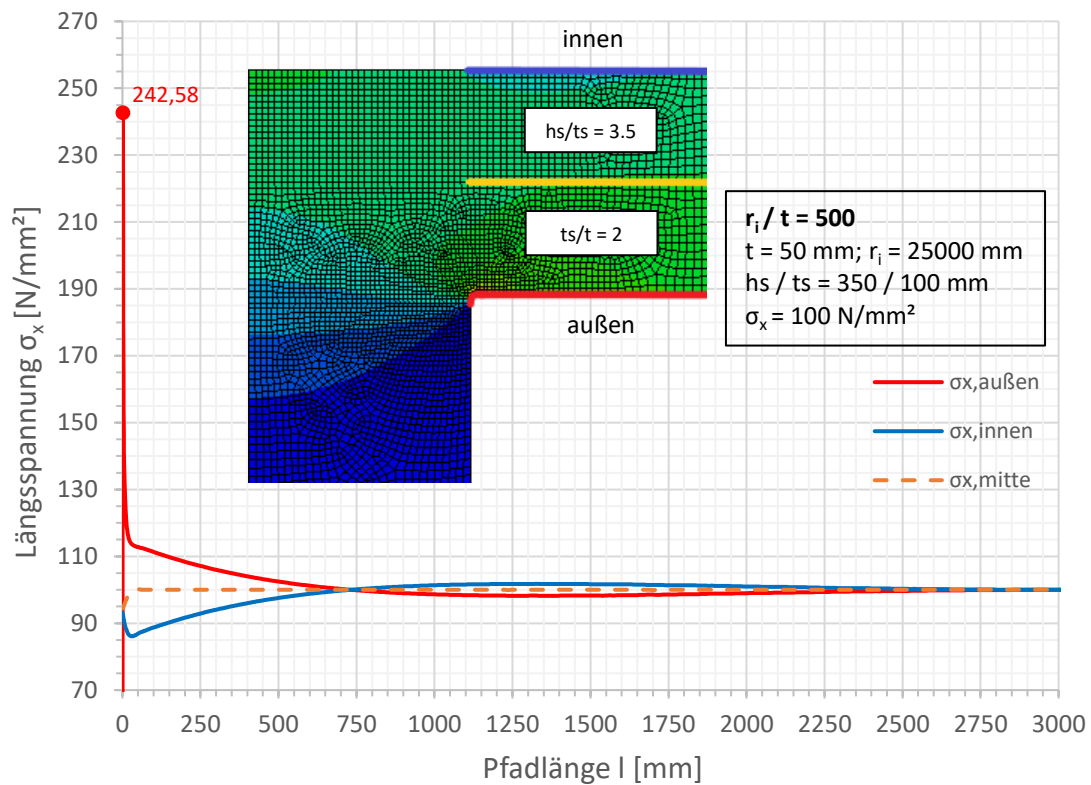


Spannungen an der Außenseite

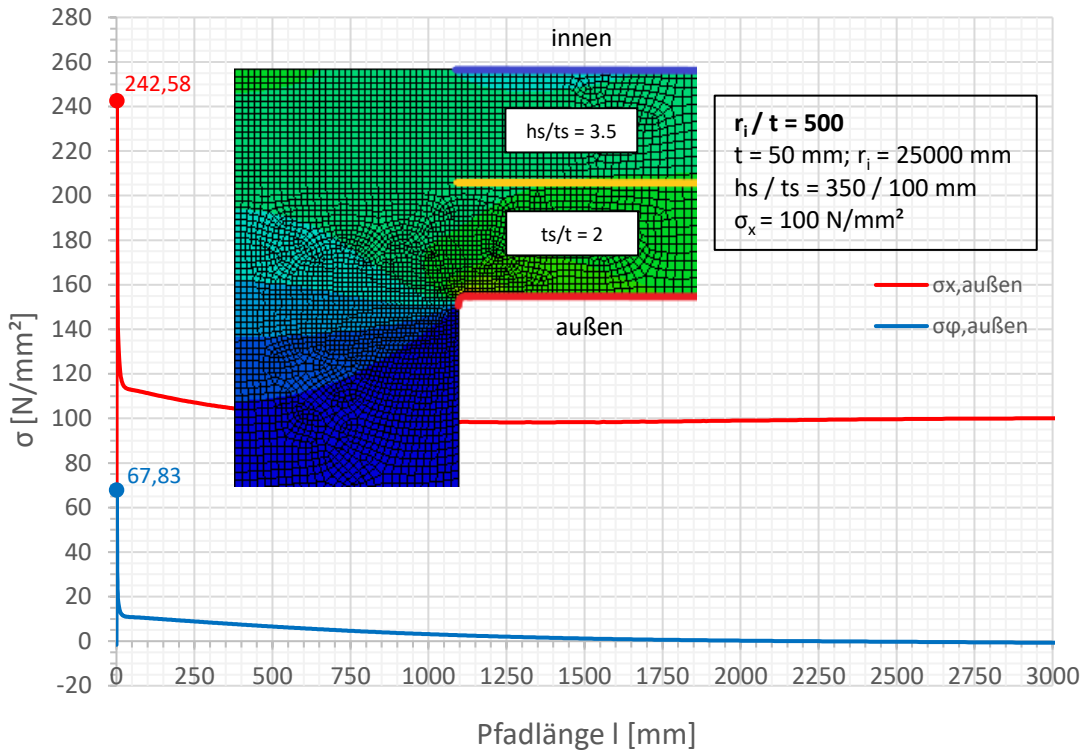


Spannungen an der Außenseite

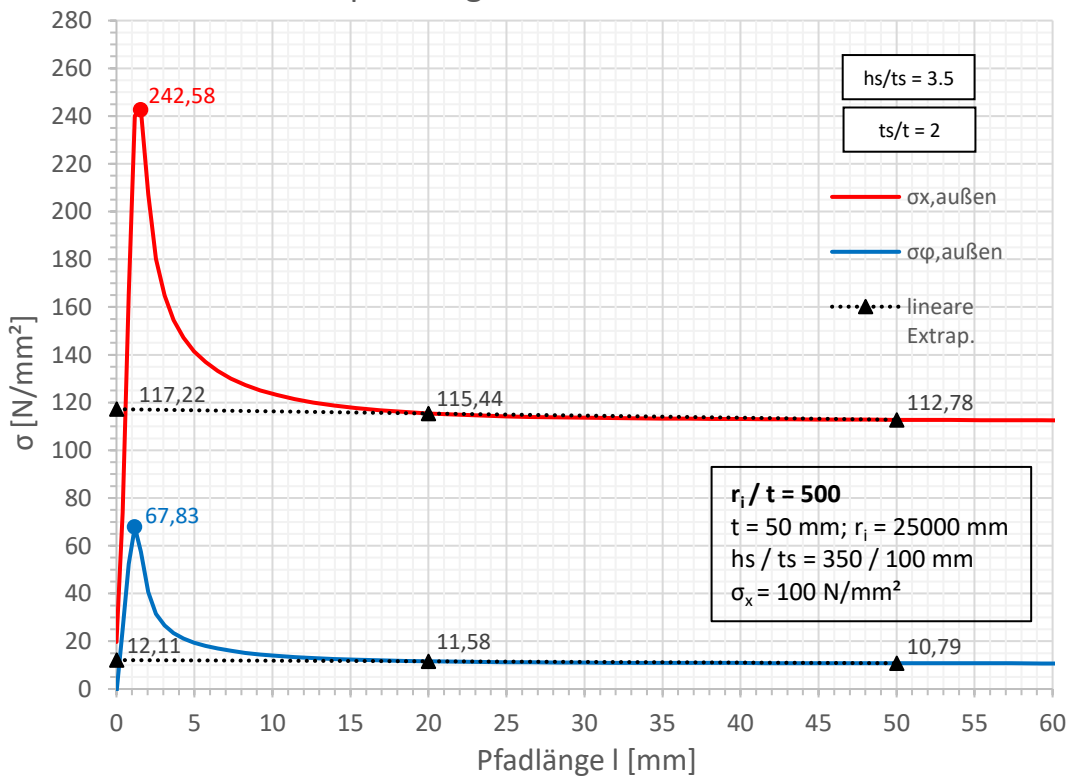


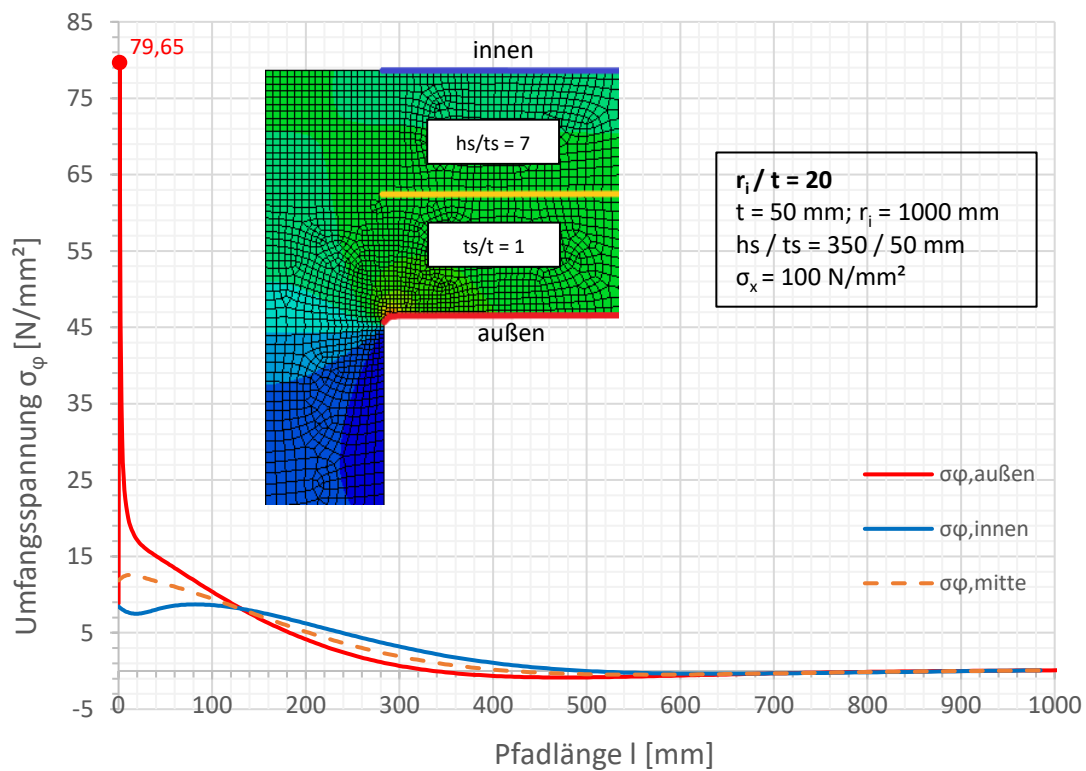
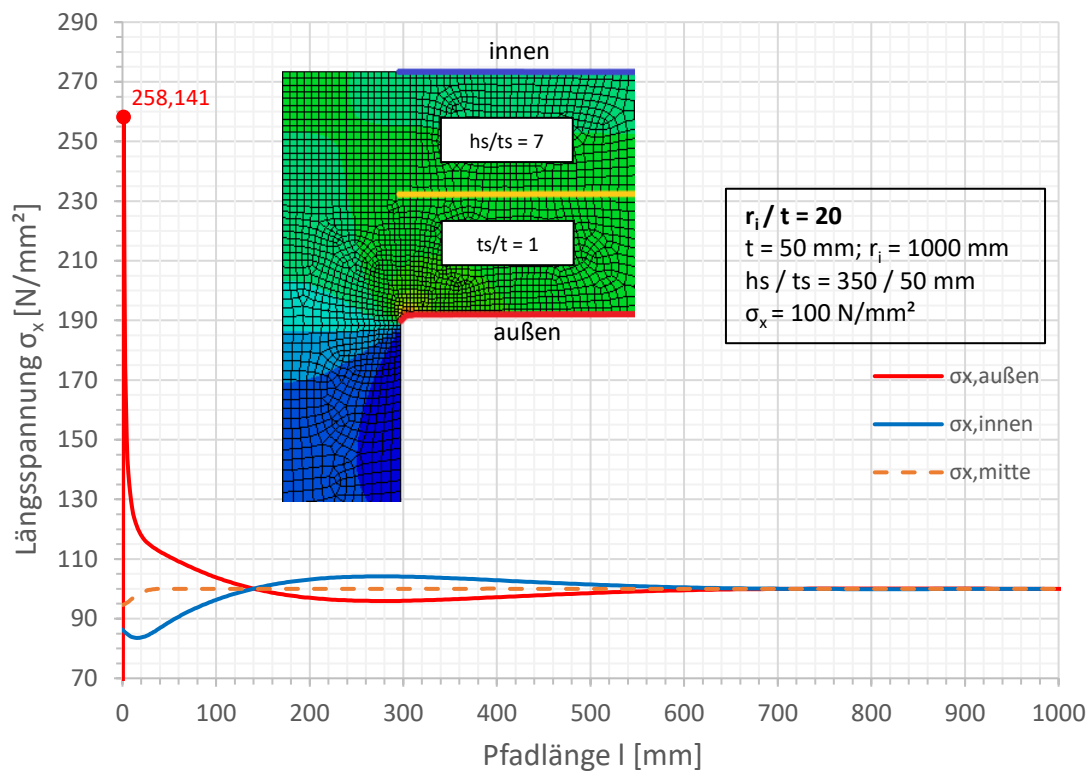


Spannungen an der Außenseite

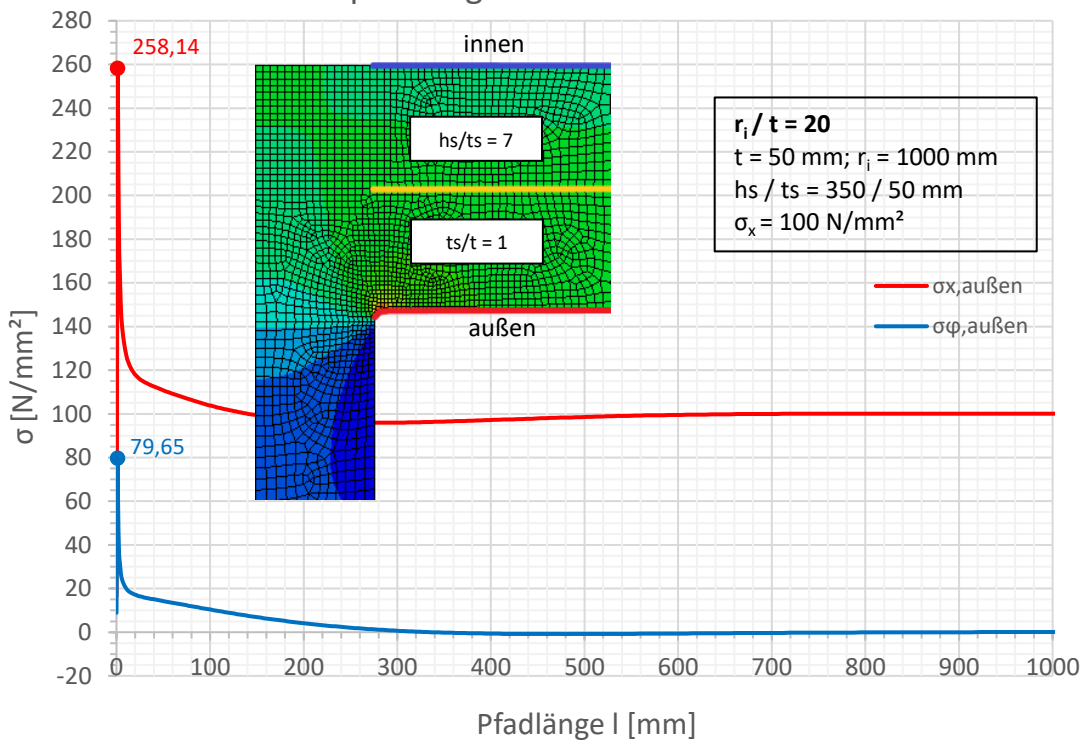


Spannungen an der Außenseite

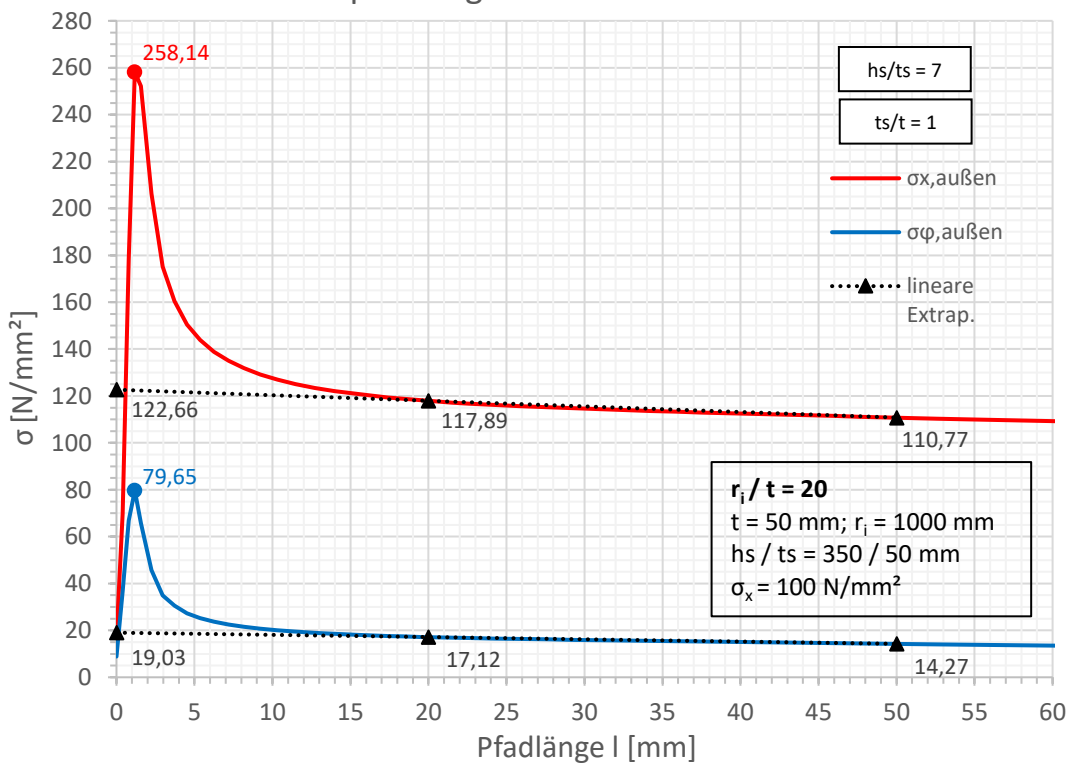


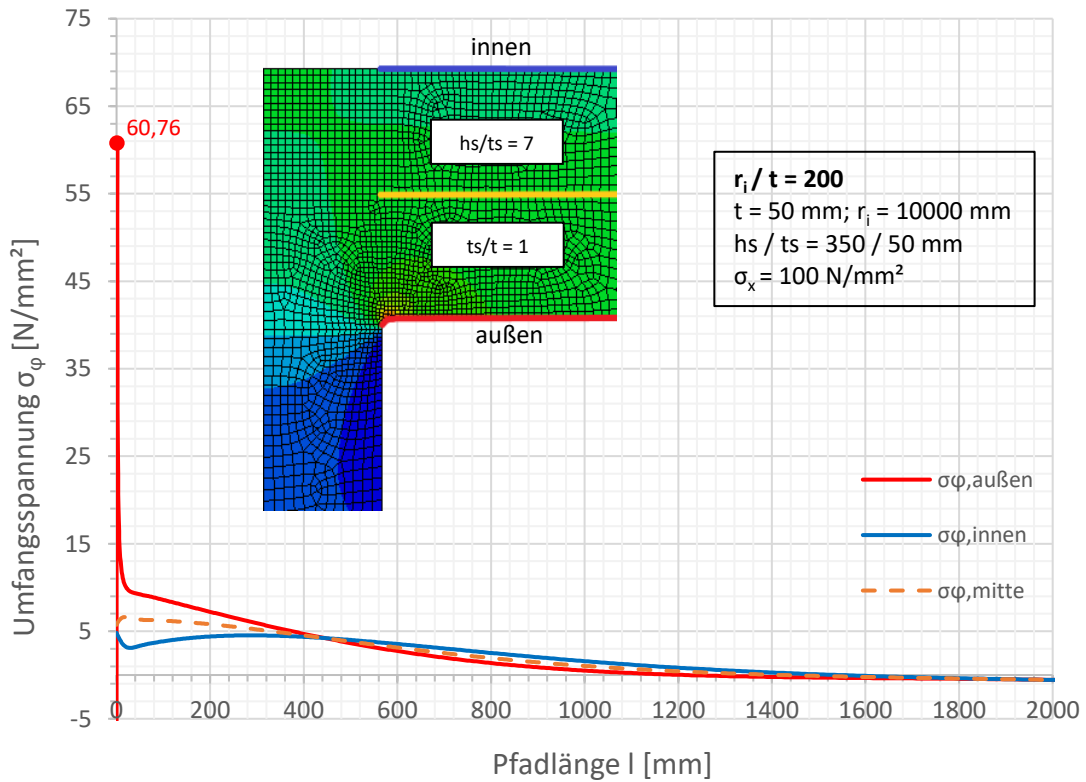
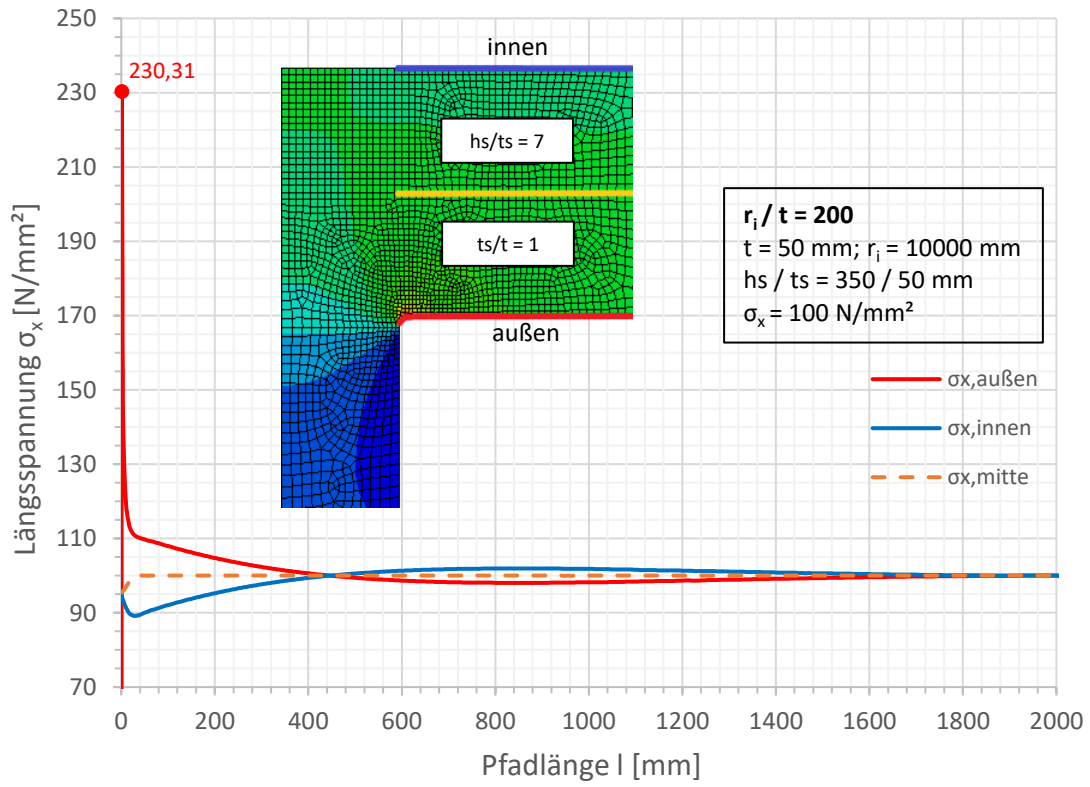


Spannungen an der Außenseite

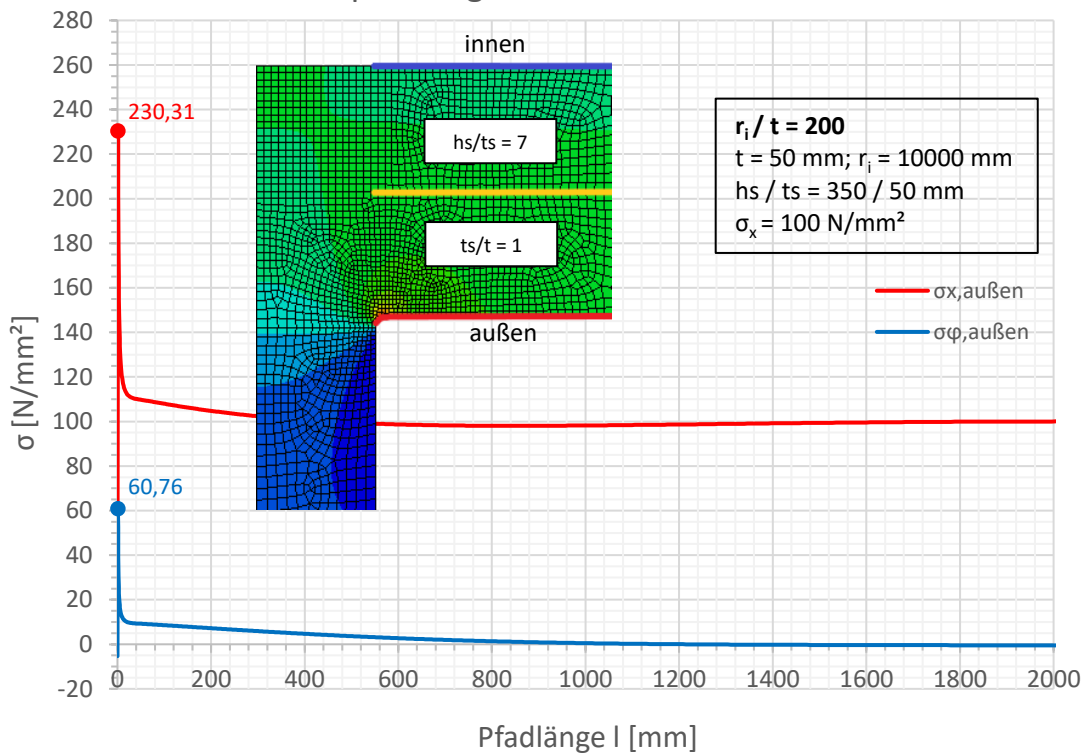


Spannungen an der Außenseite

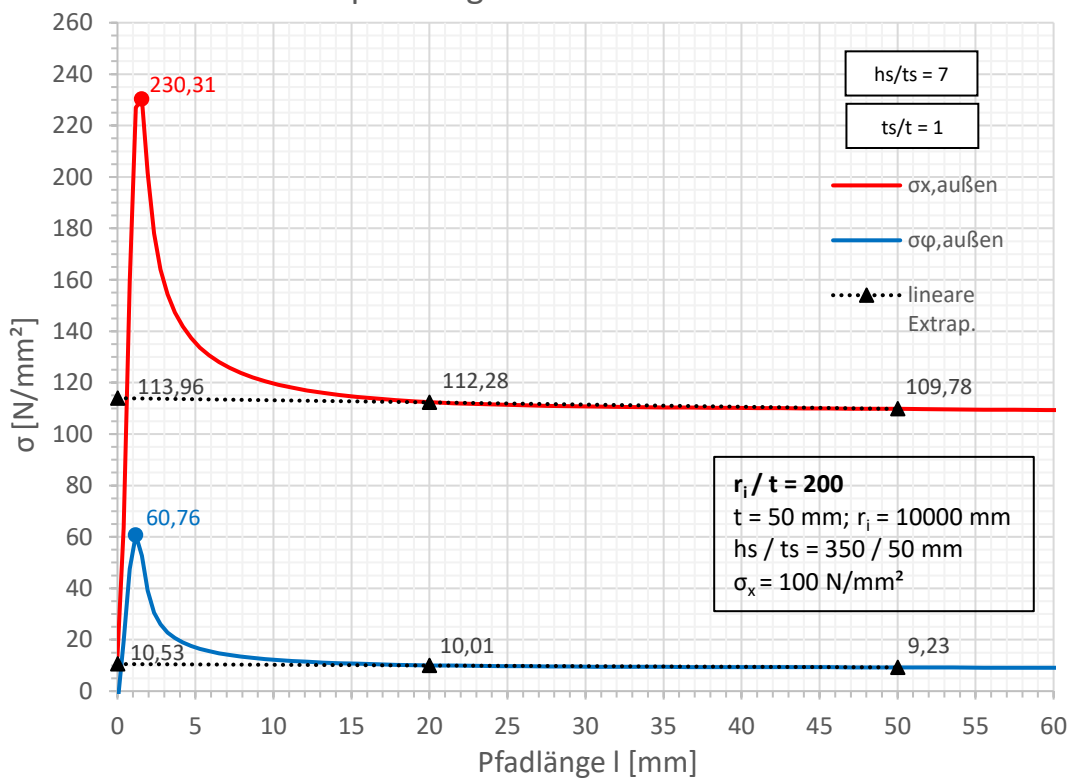


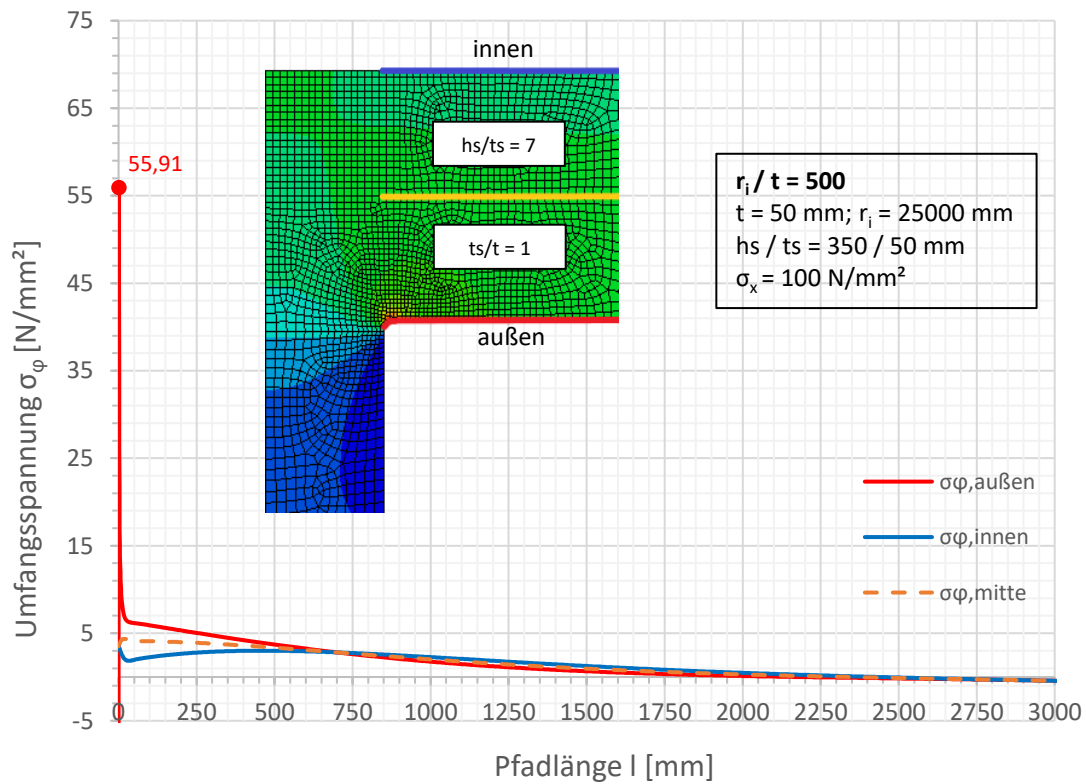
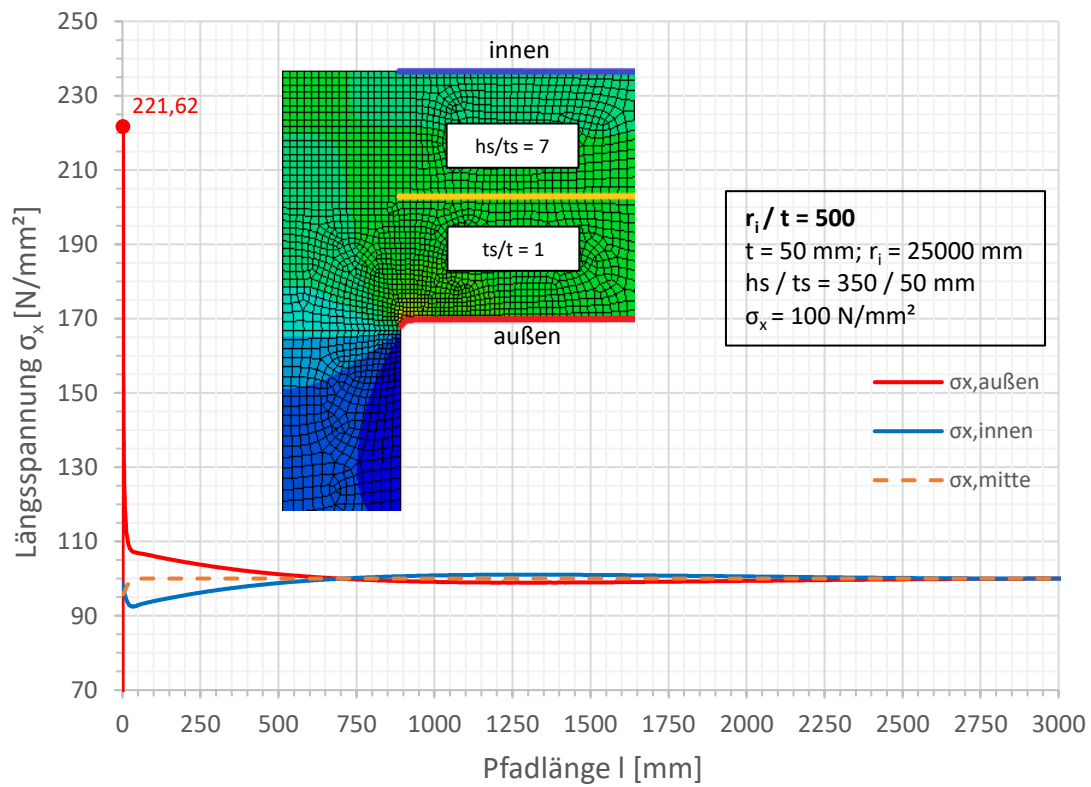


Spannungen an der Außenseite

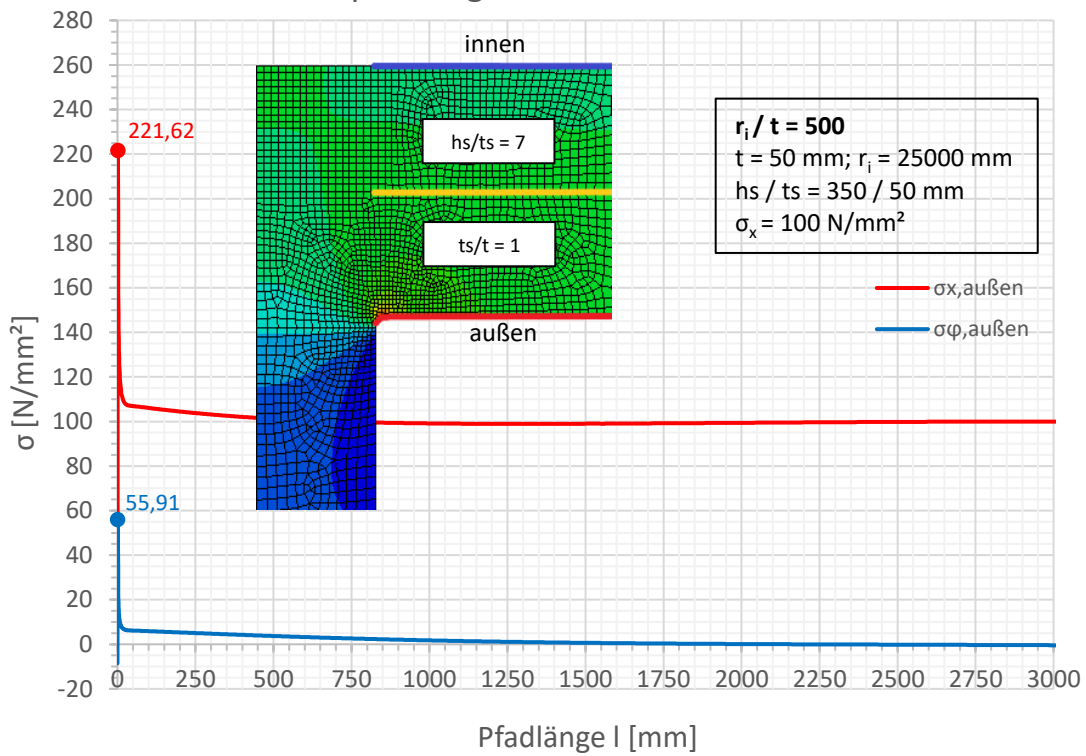


Spannungen an der Außenseite

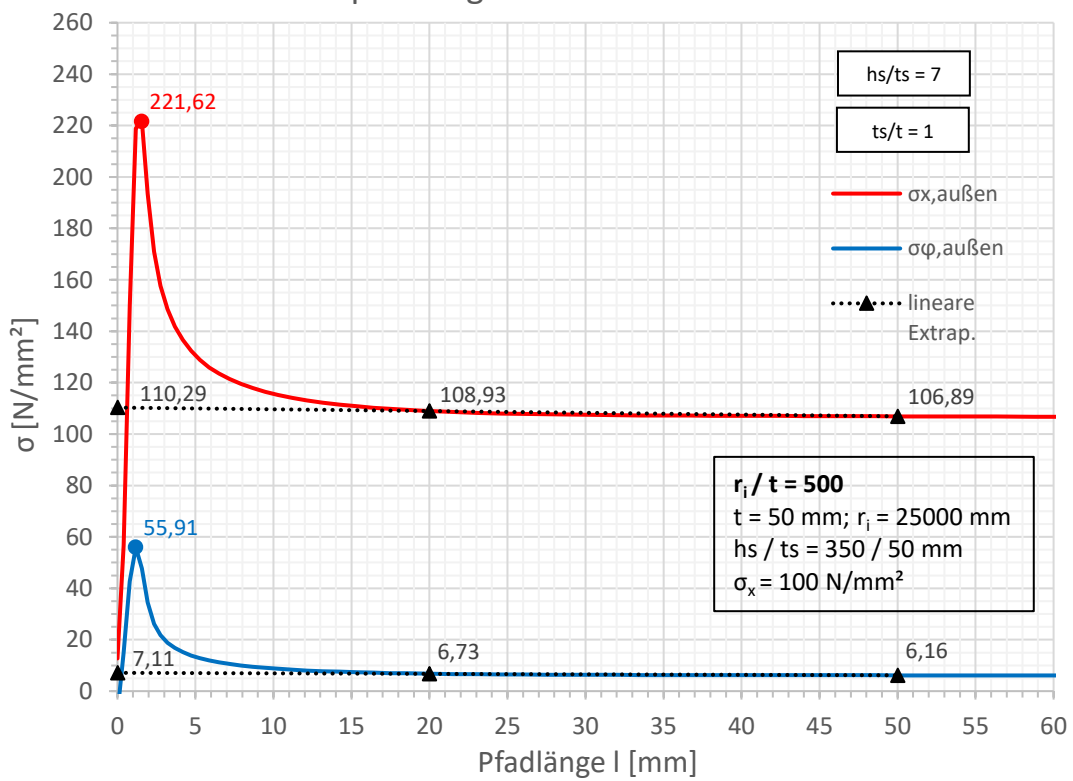


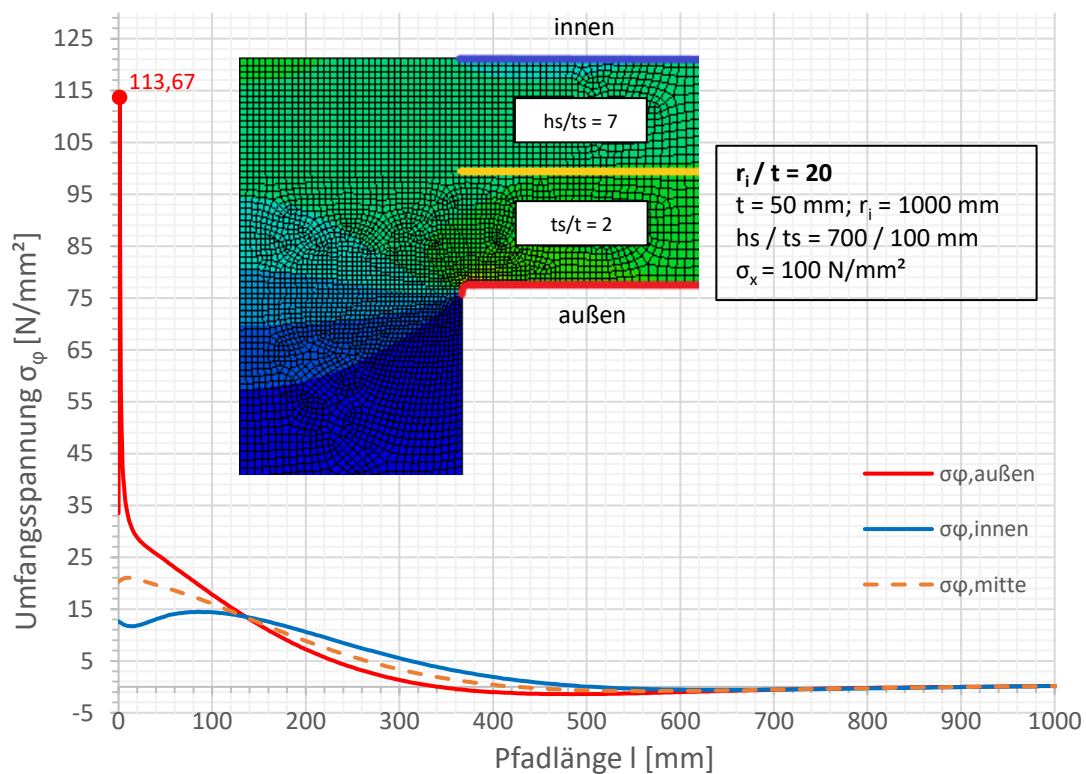
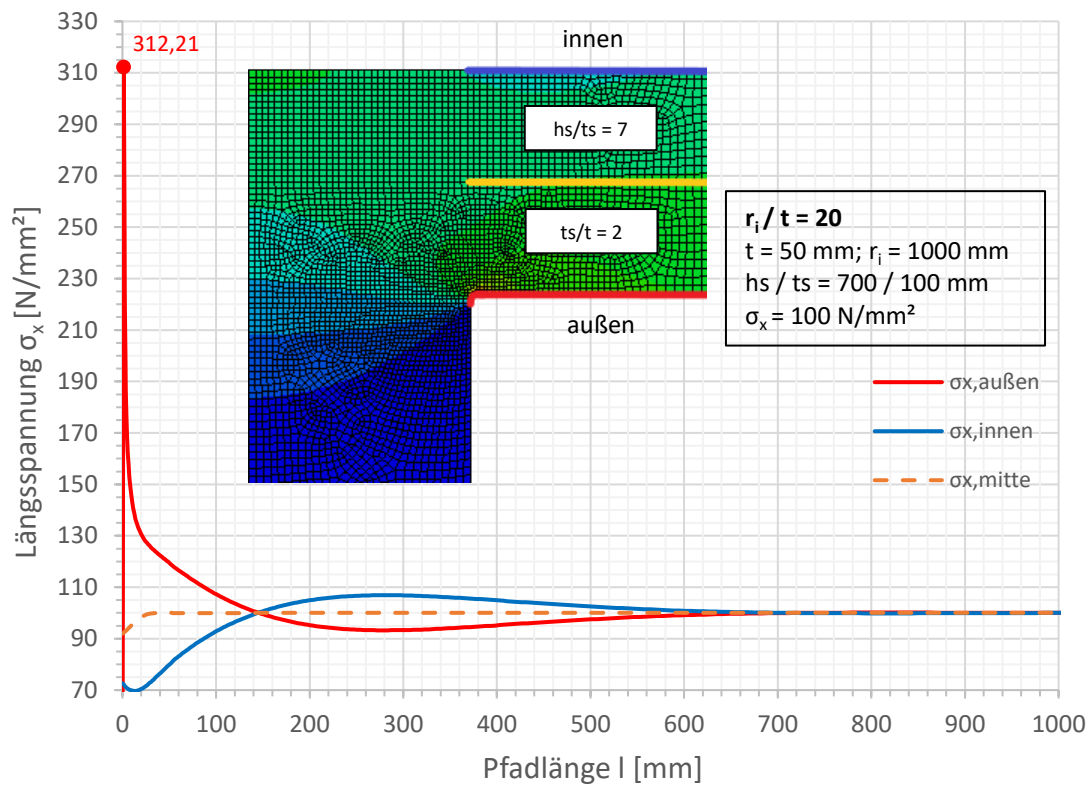


Spannungen an der Außenseite

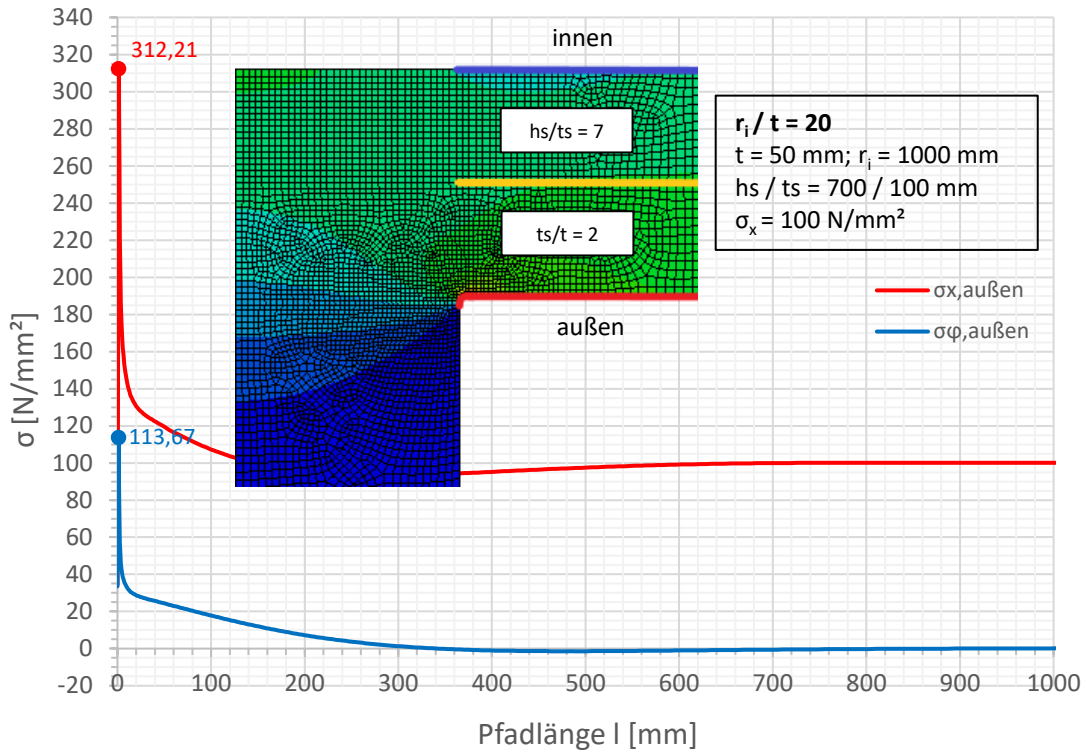


Spannungen an der Außenseite

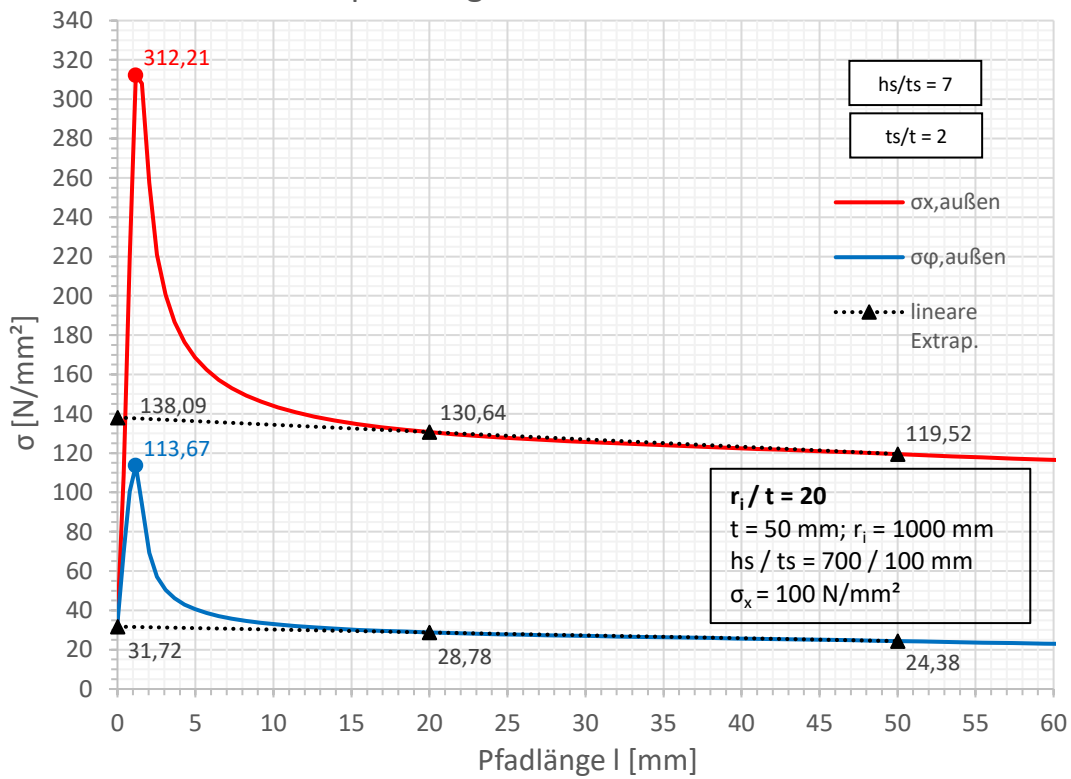


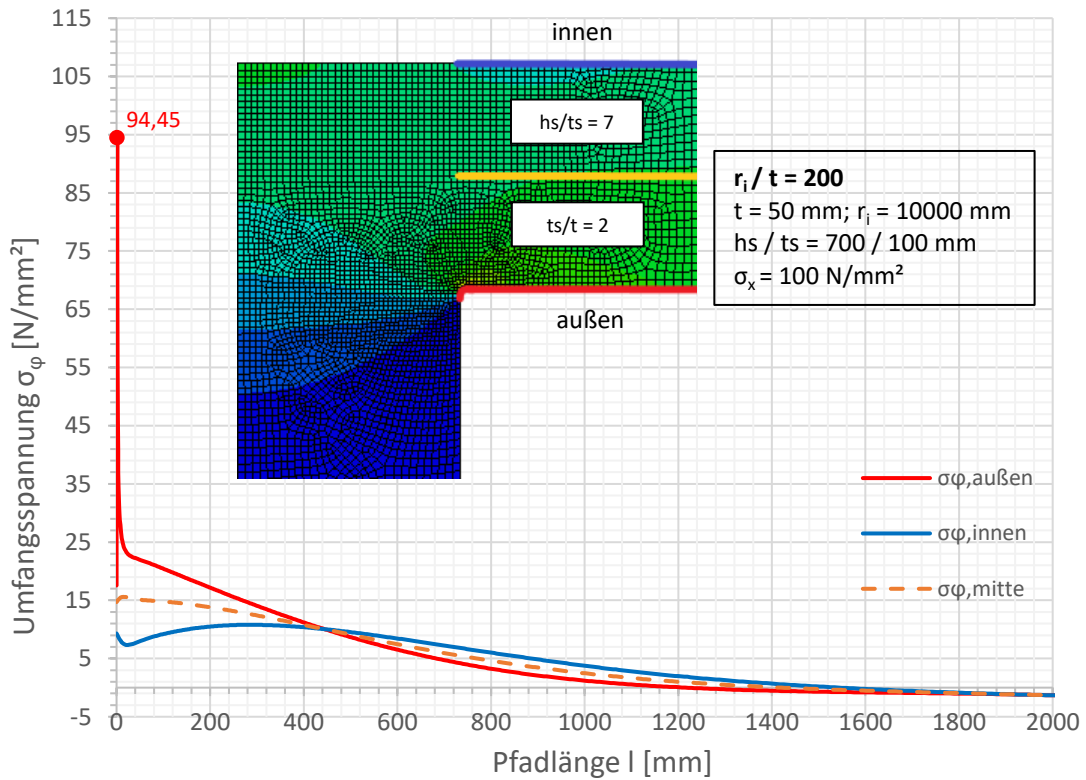
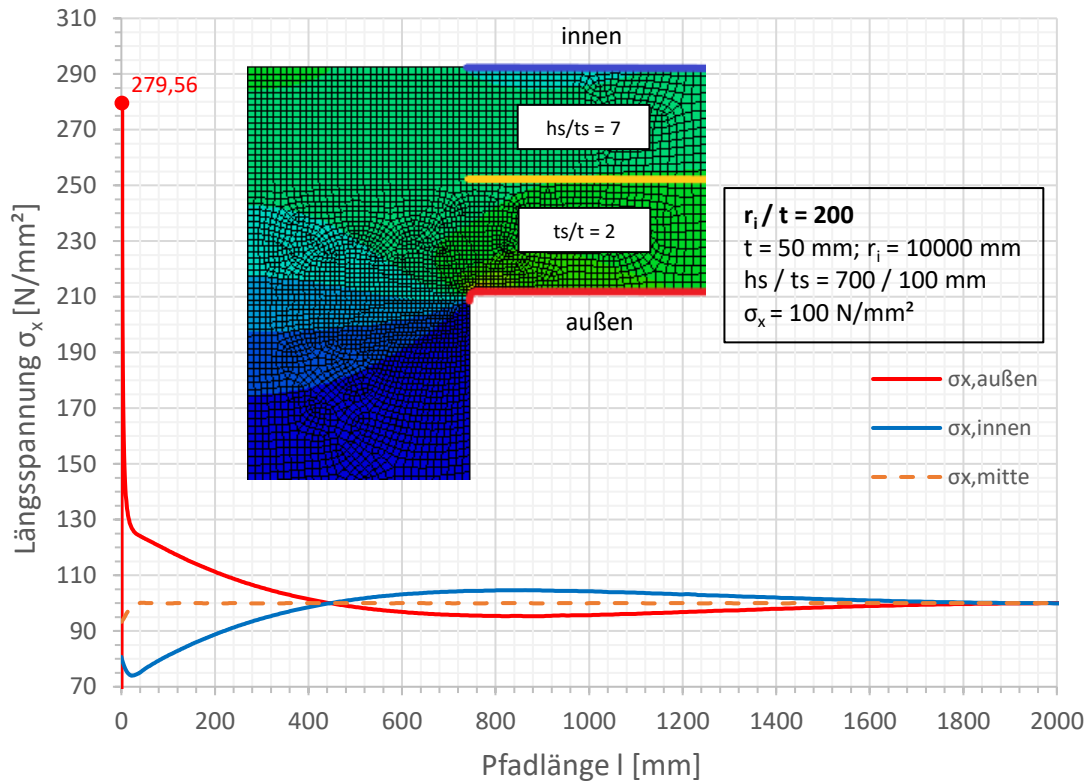


Spannungen an der Außenseite

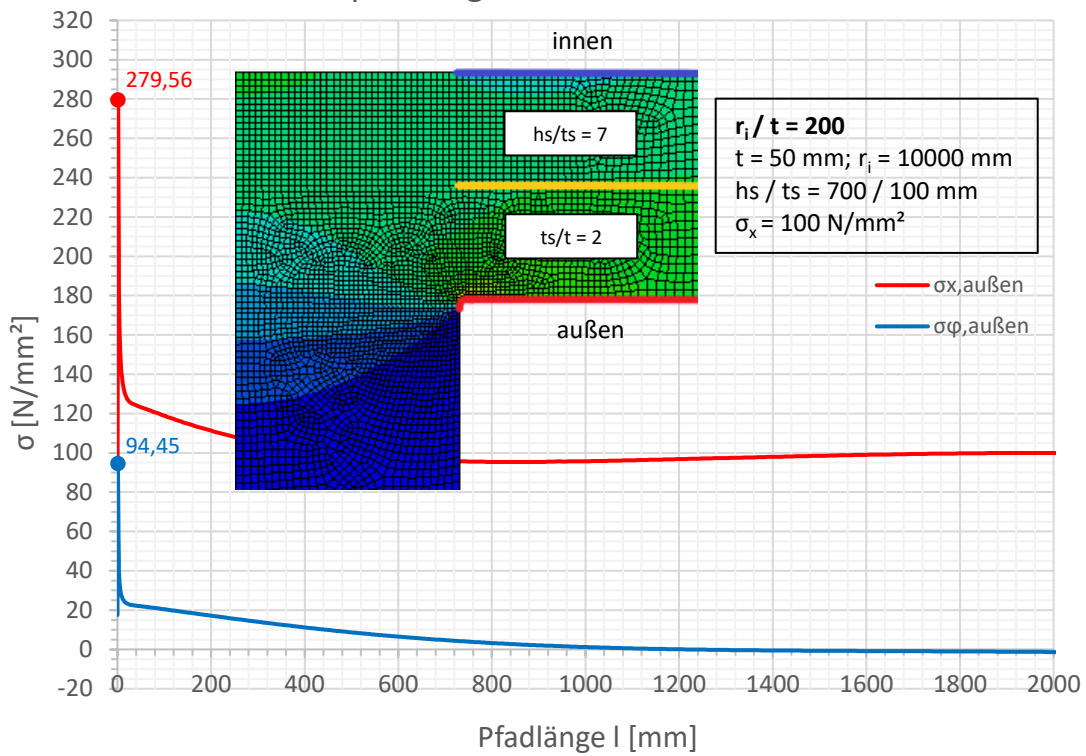


Spannungen an der Außenseite

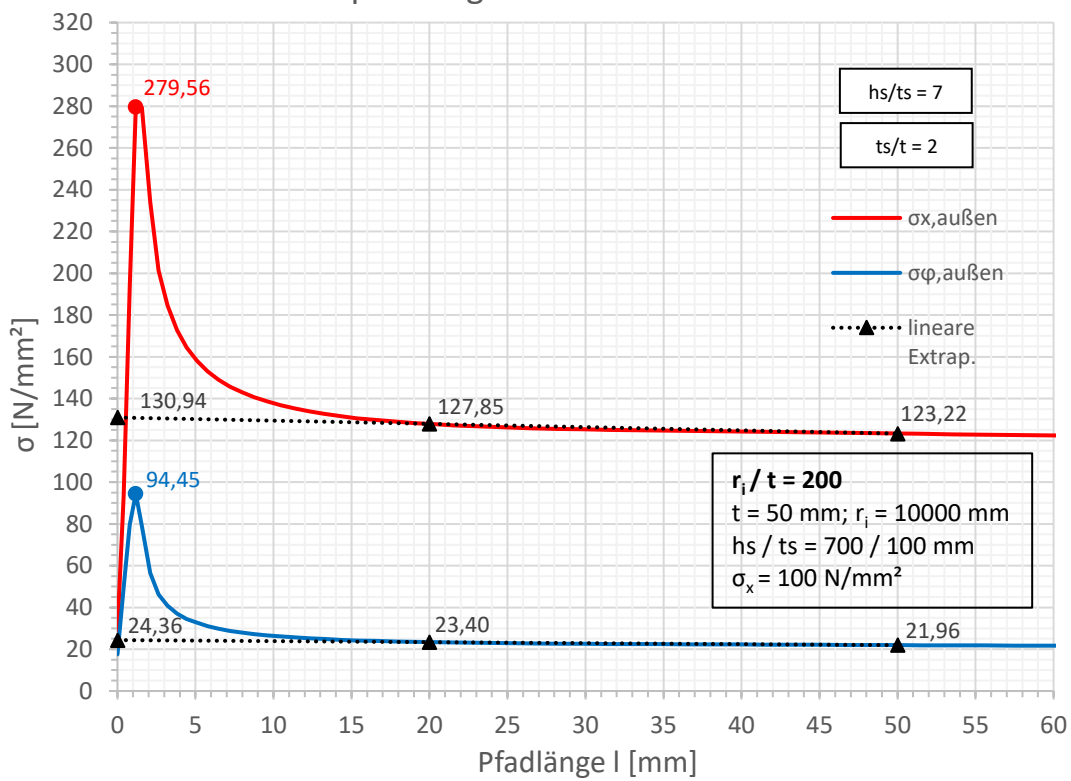


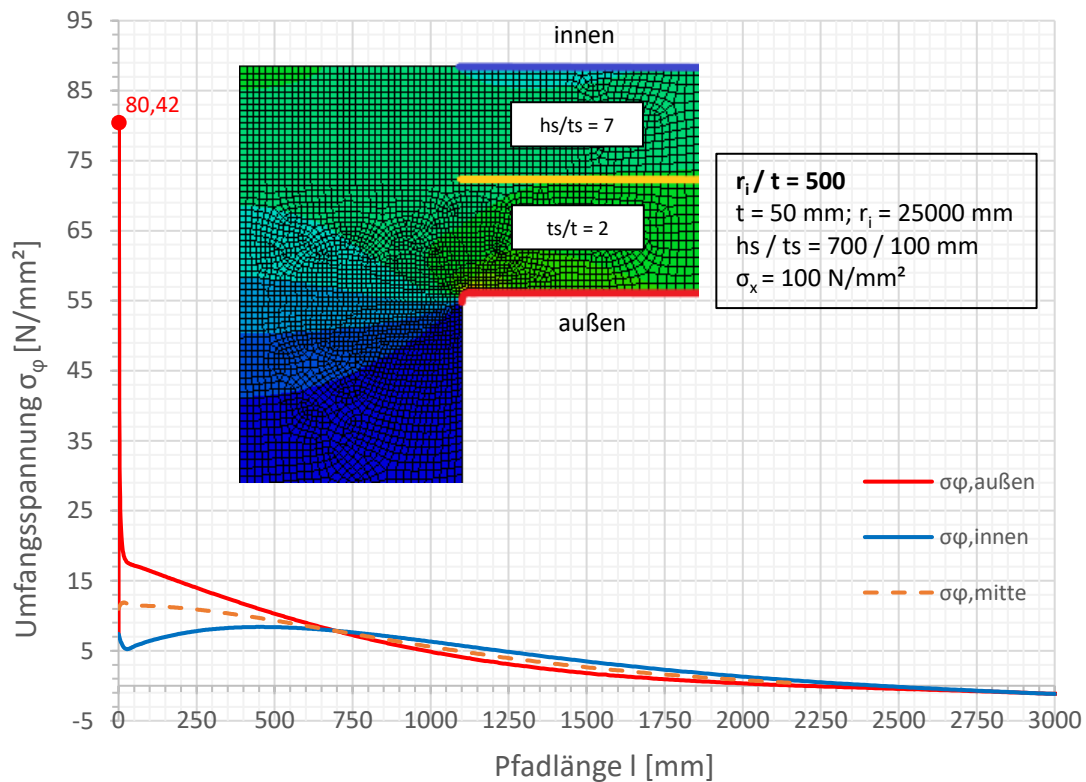
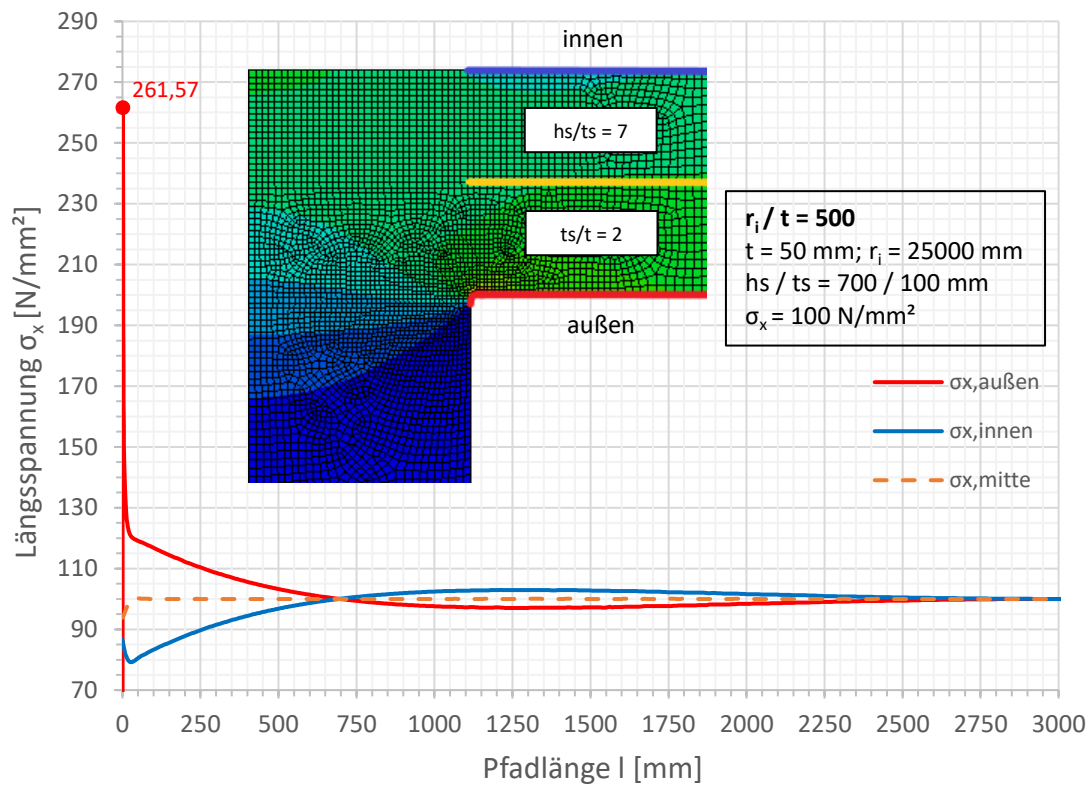


Spannungen an der Außenseite

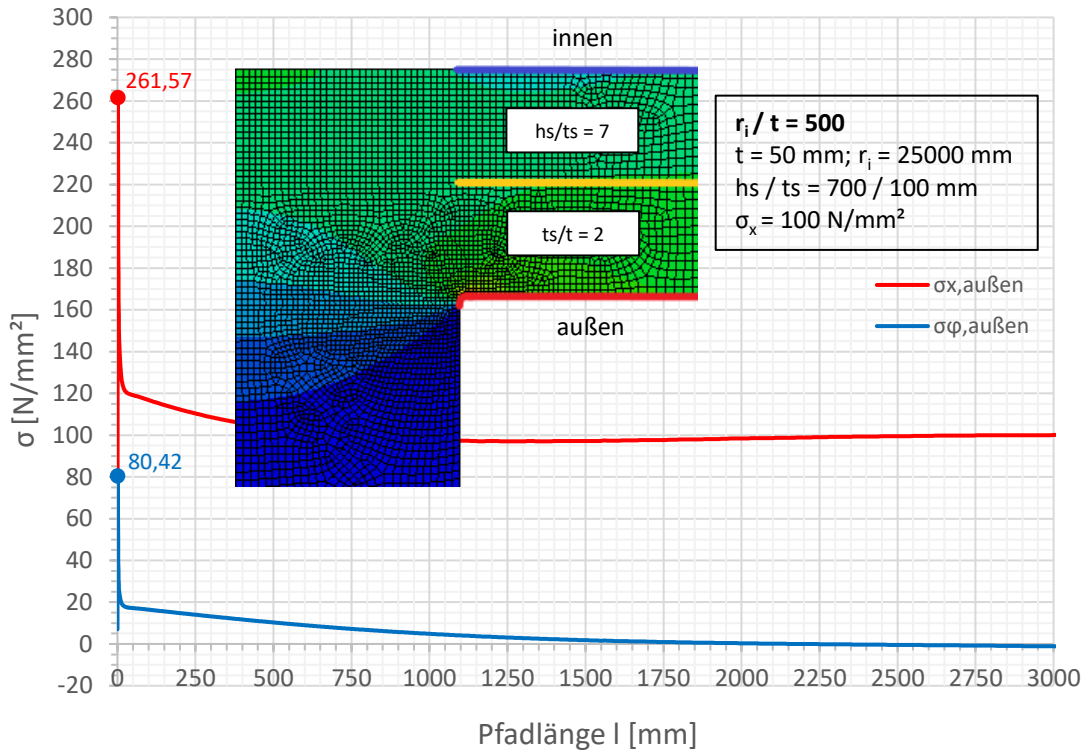


Spannungen an der Außenseite

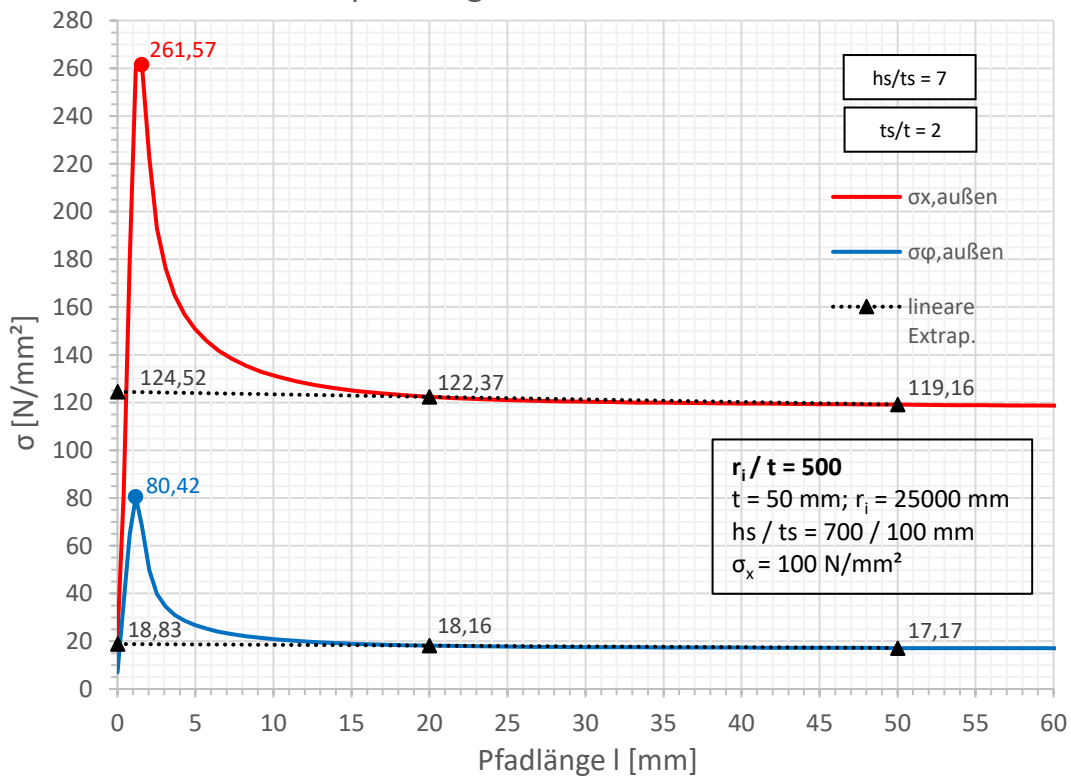




Spannungen an der Außenseite

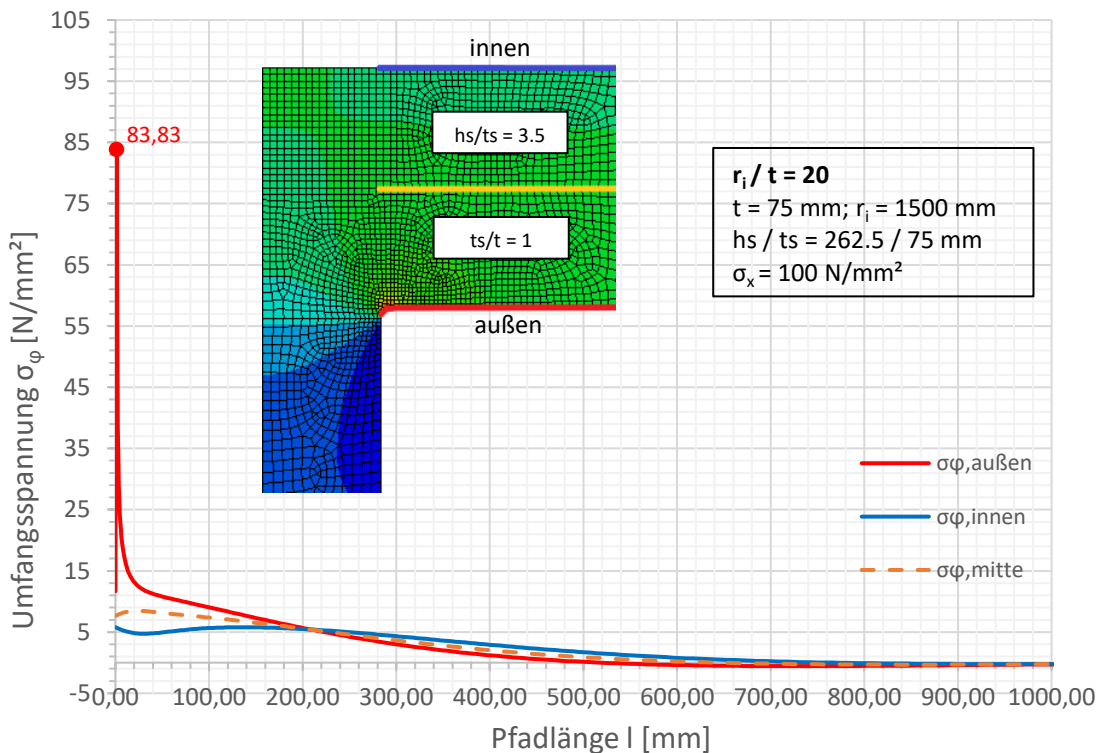
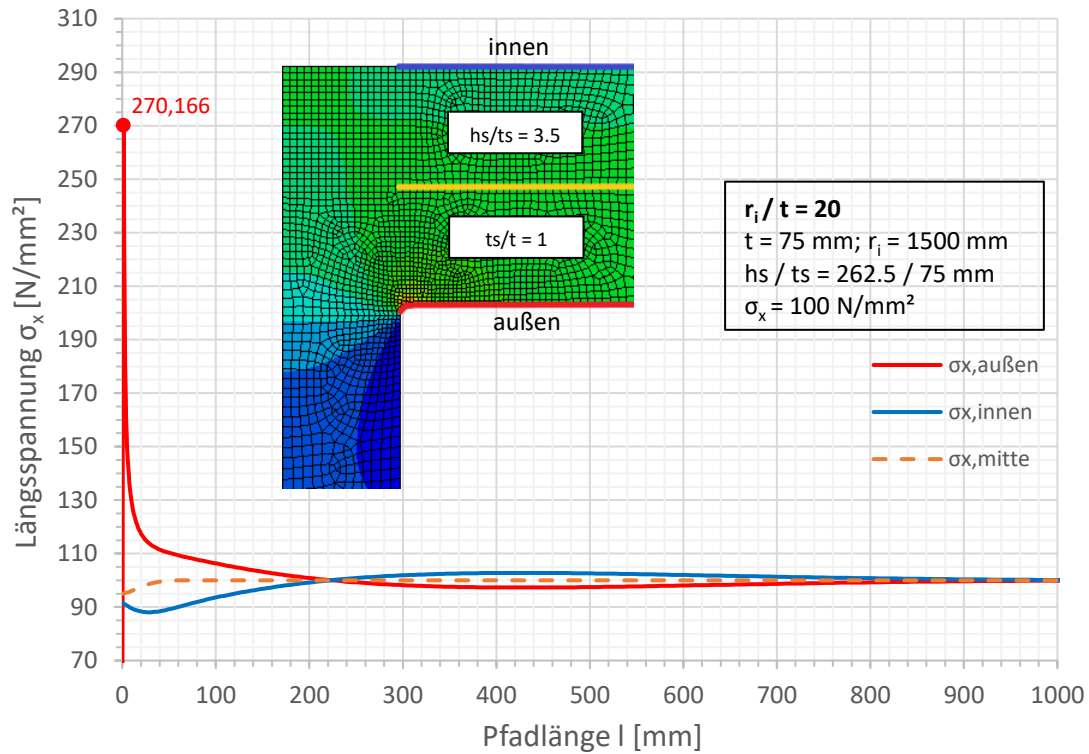


Spannungen an der Außenseite

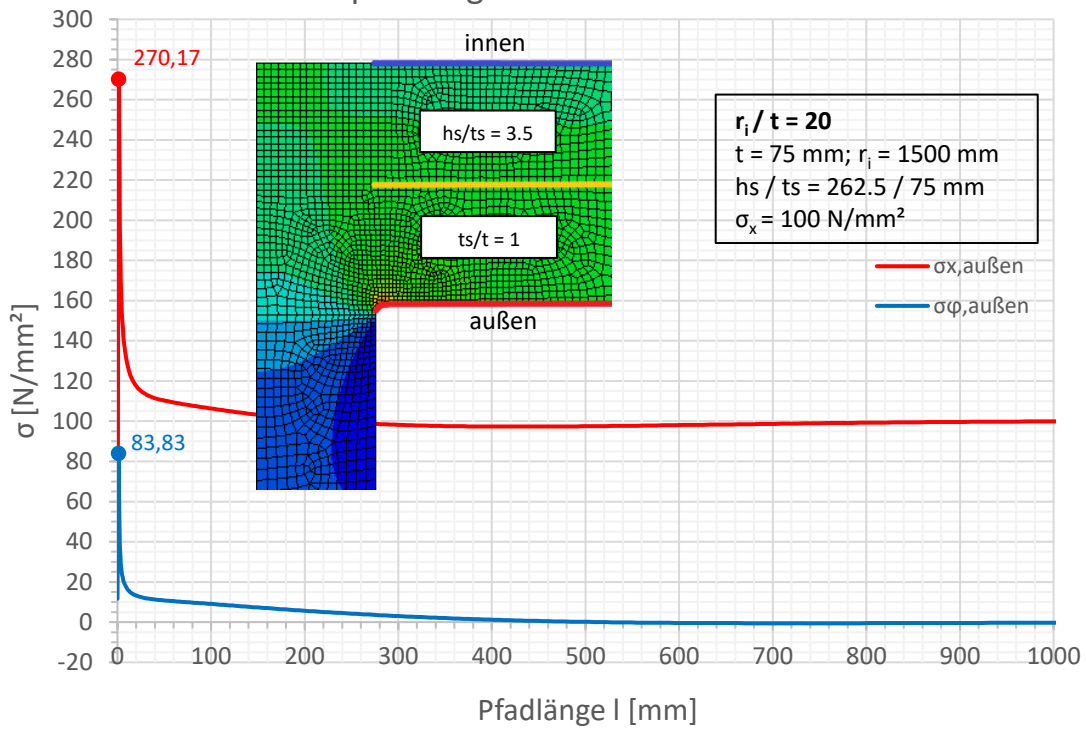


A.4. Wanddicke $t = 75 \text{ mm}$

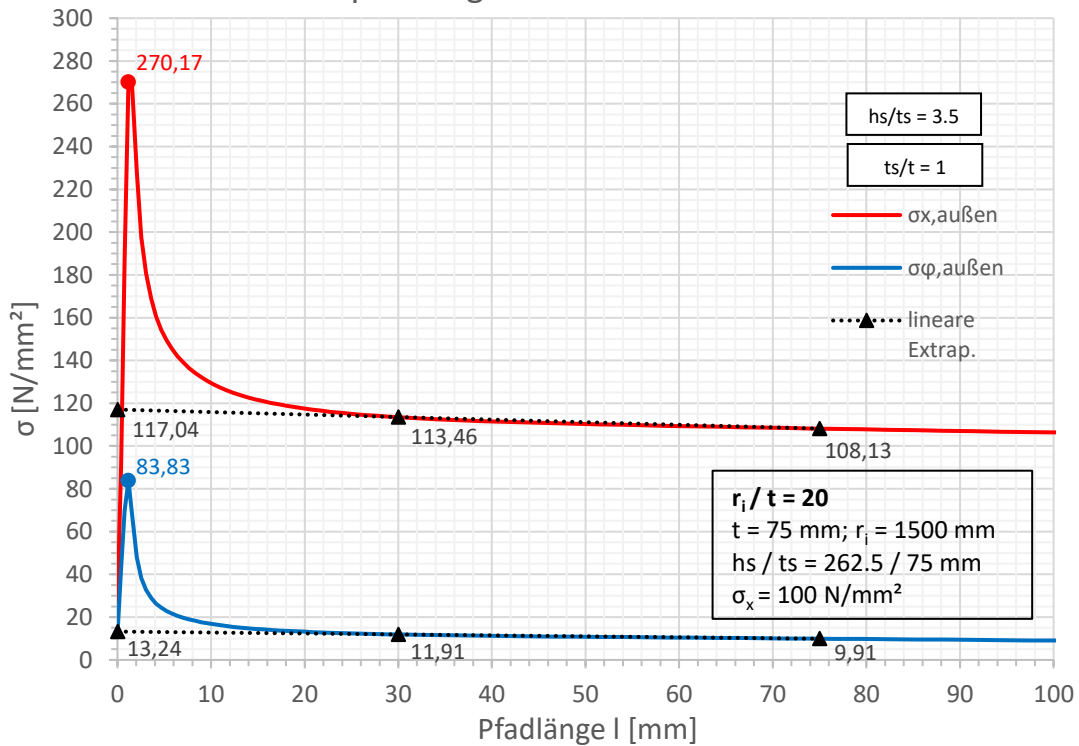
In den nächsten Seiten A-97 bis A-120 sind die Diagramme zum **Ringsteifenanschluss für die Wanddicke $t = 75 \text{ mm}$** abgebildet.

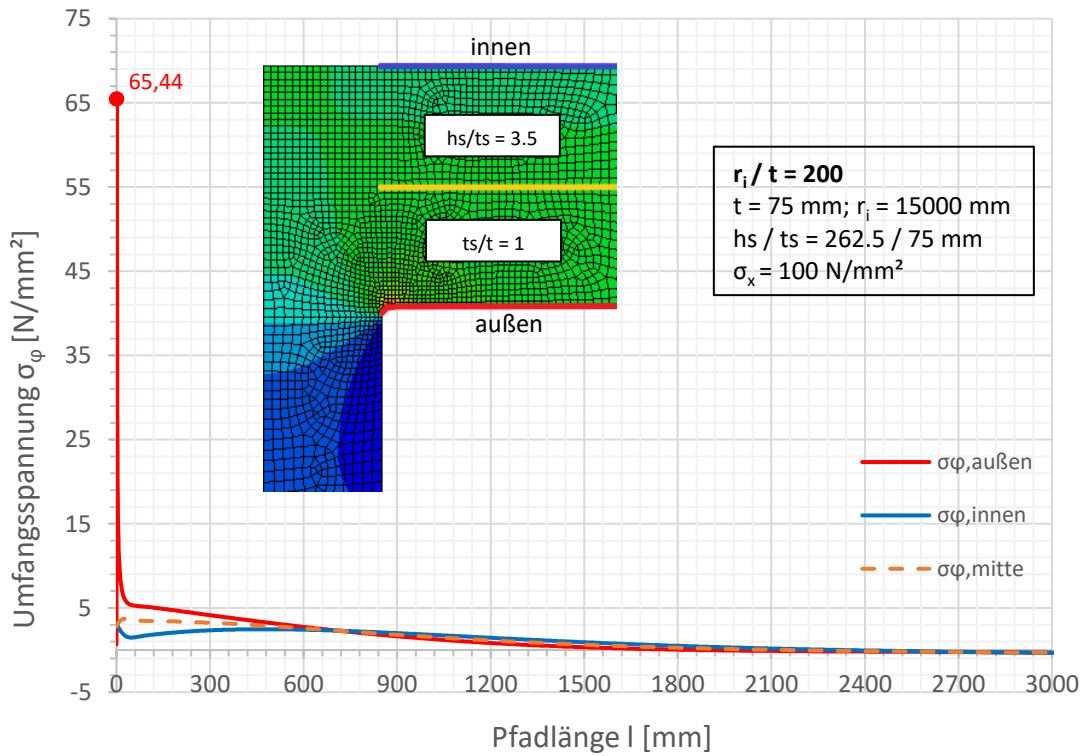
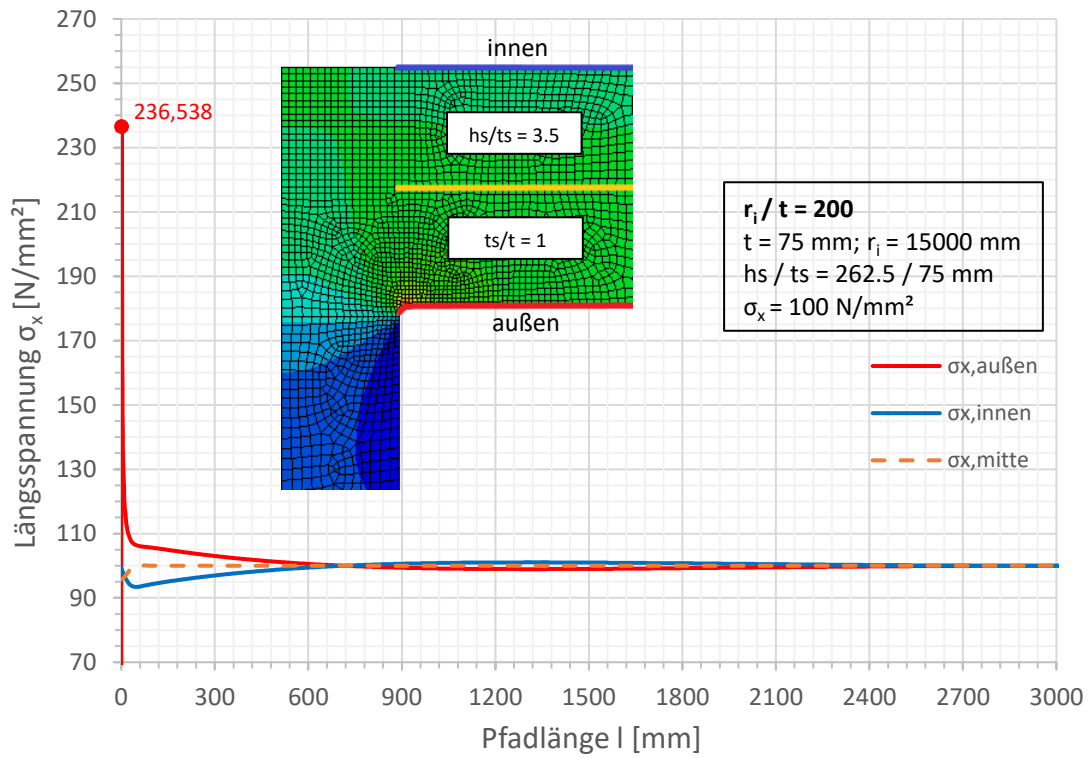


Spannungen an der Außenseite

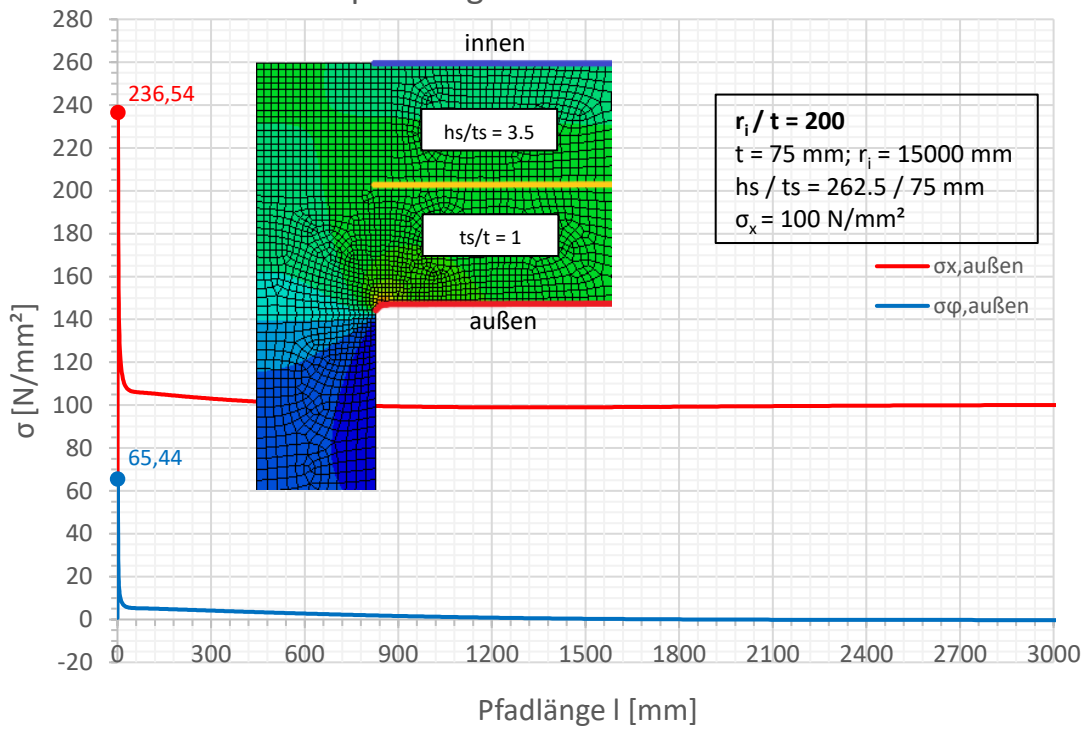


Spannungen an der Außenseite

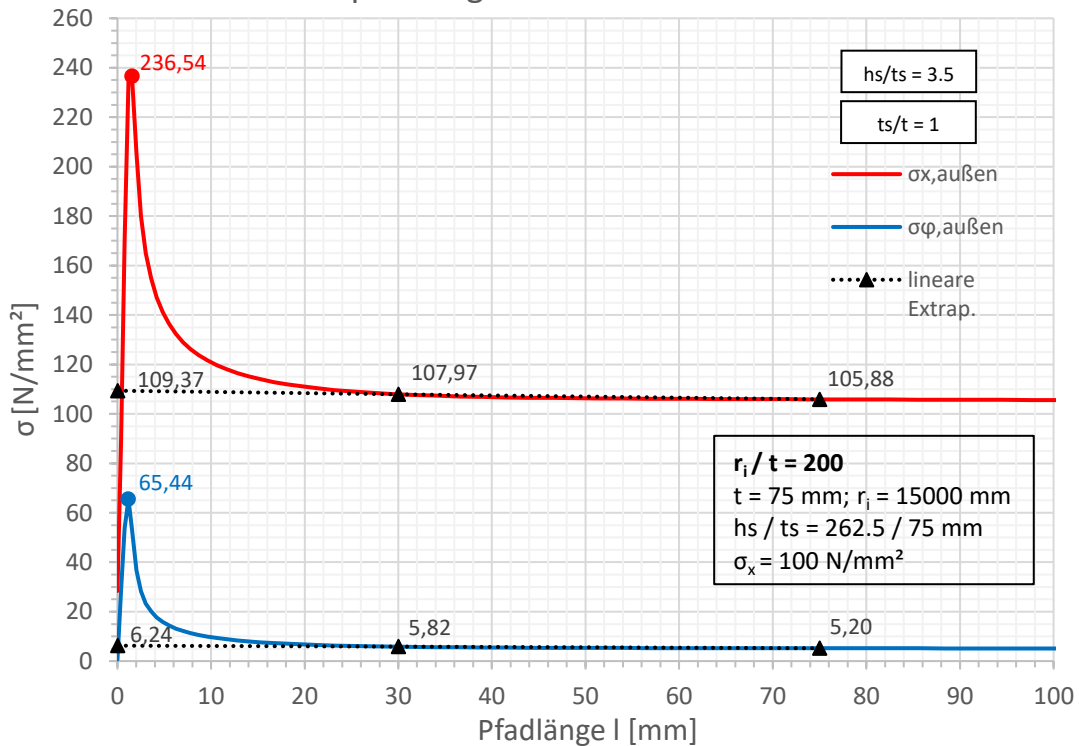


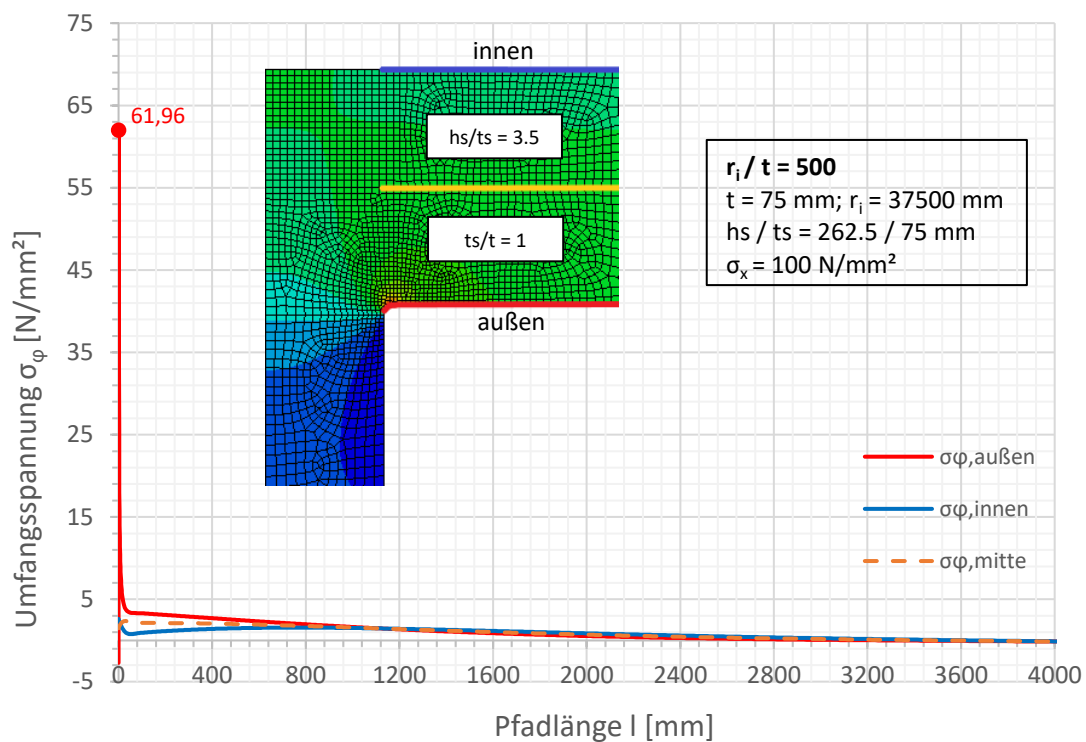
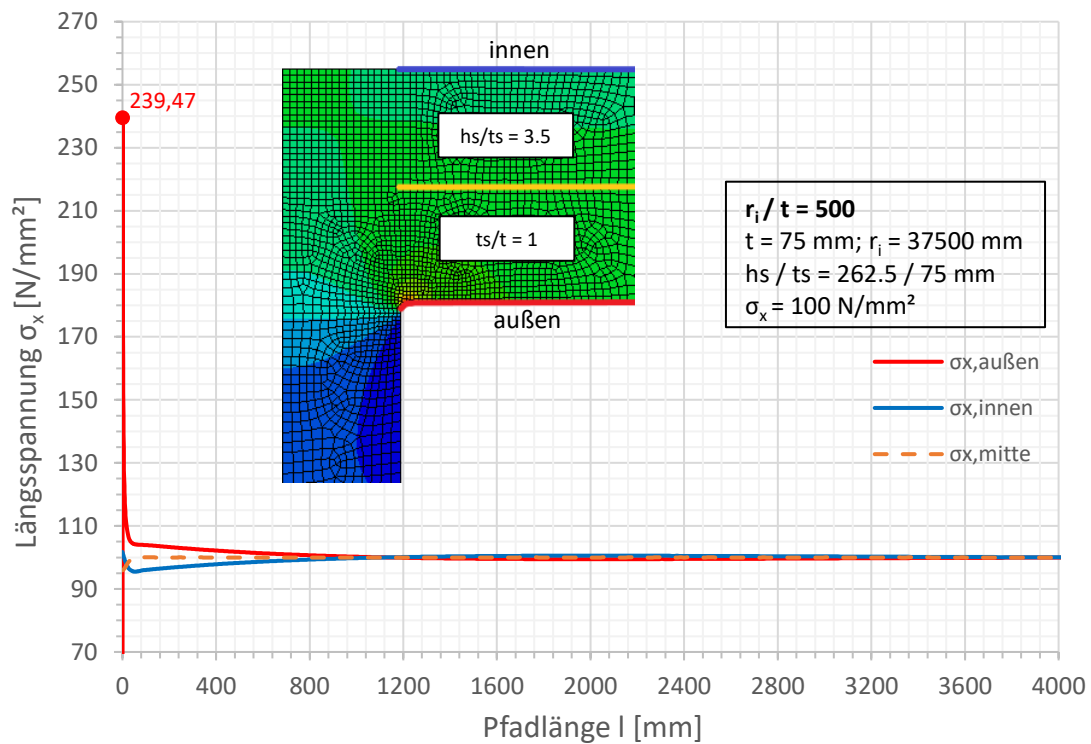


Spannungen an der Außenseite

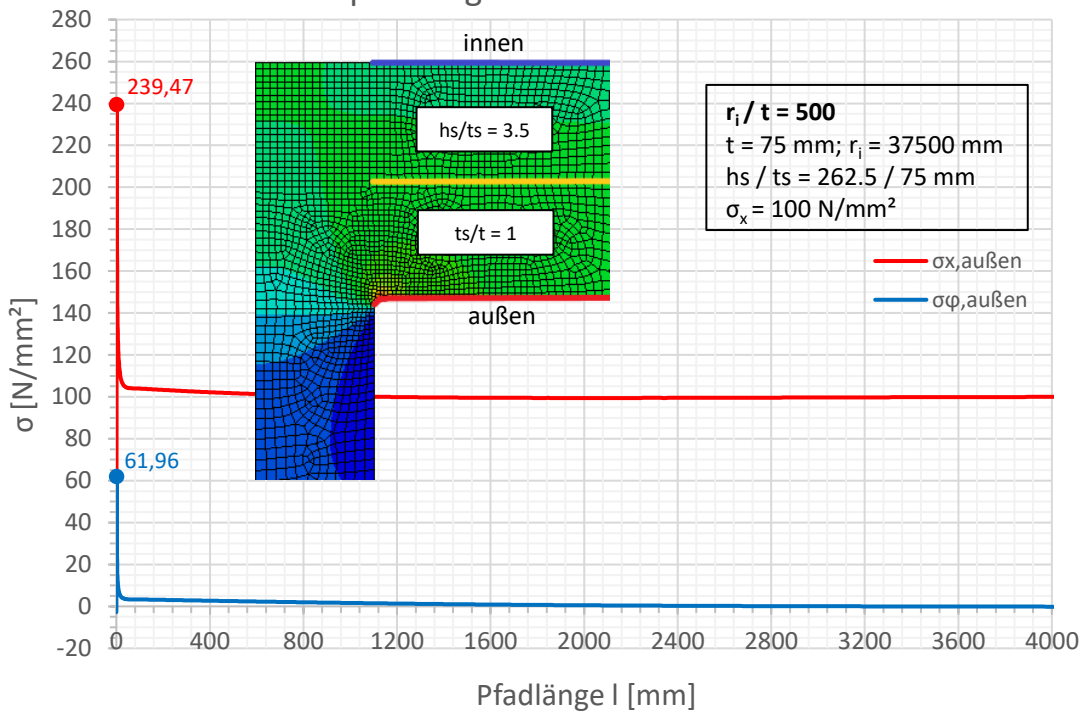


Spannungen an der Außenseite

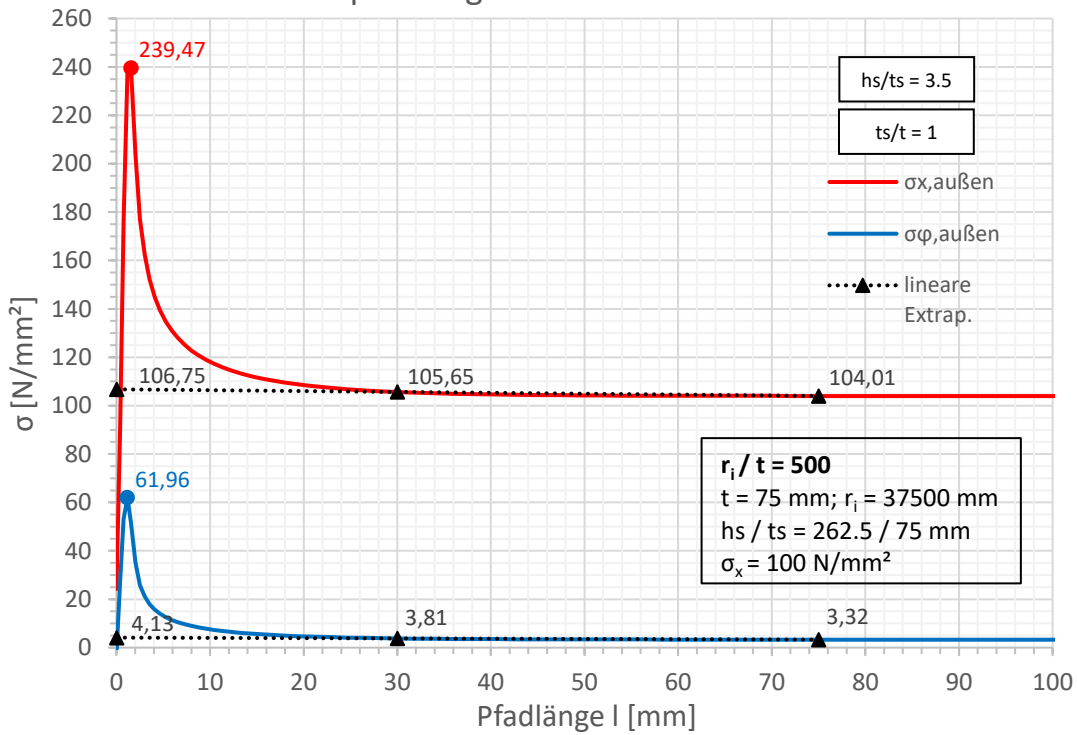


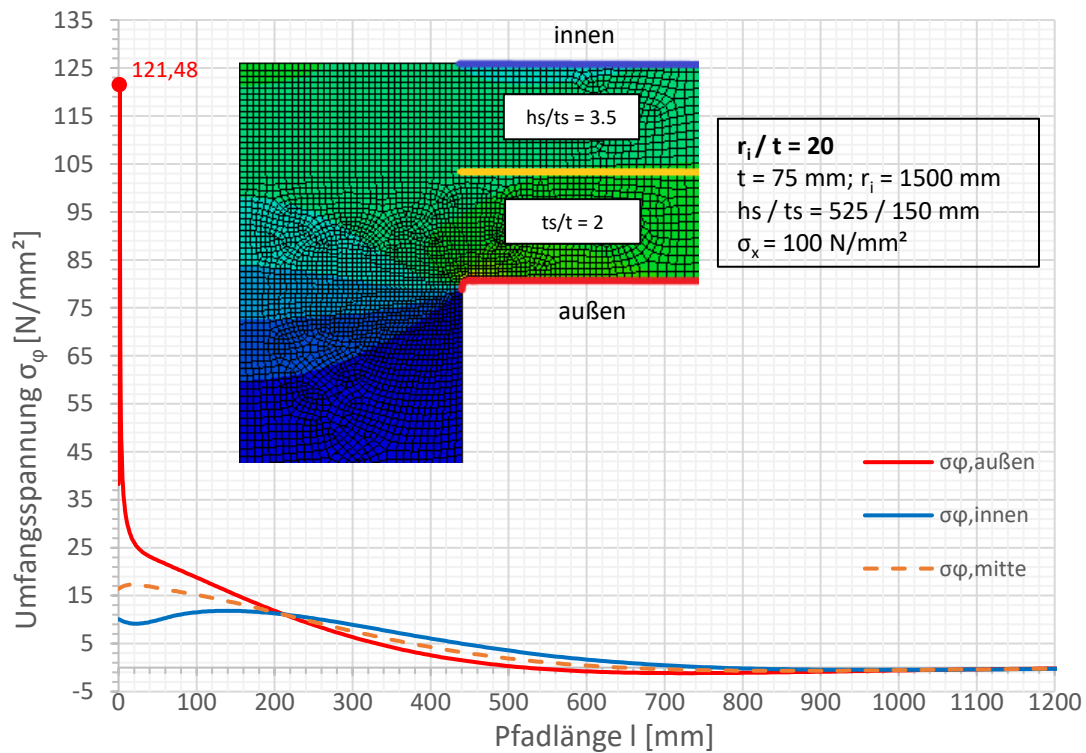
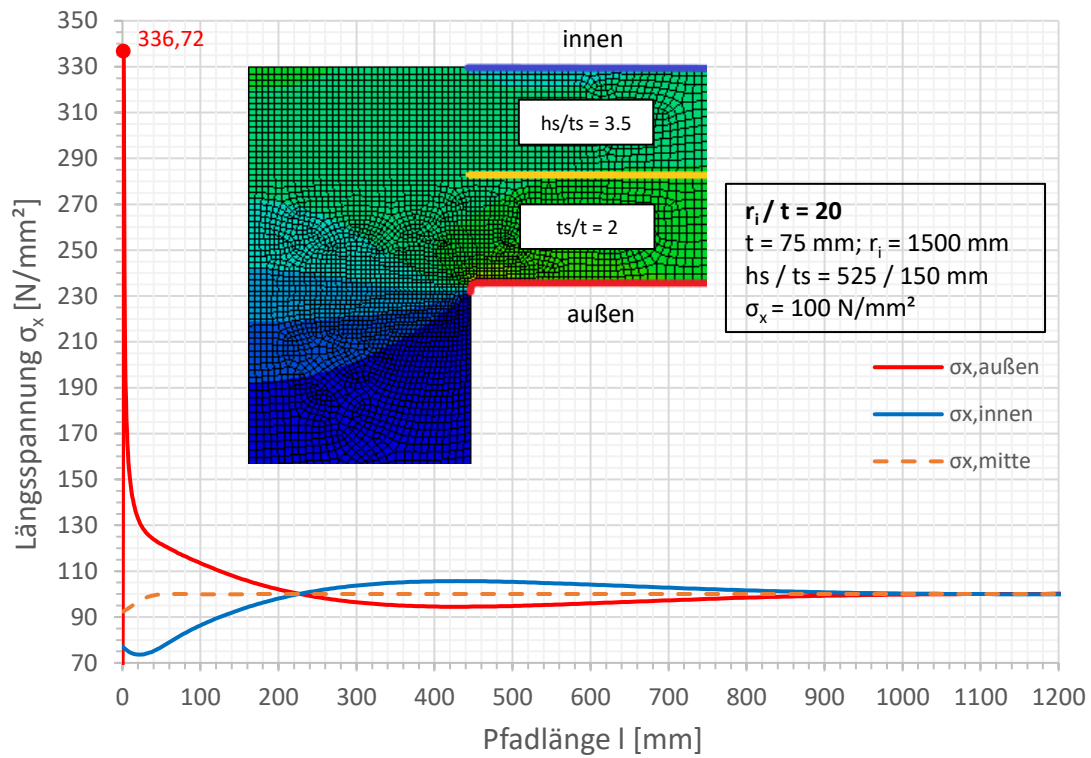


Spannungen an der Außenseite

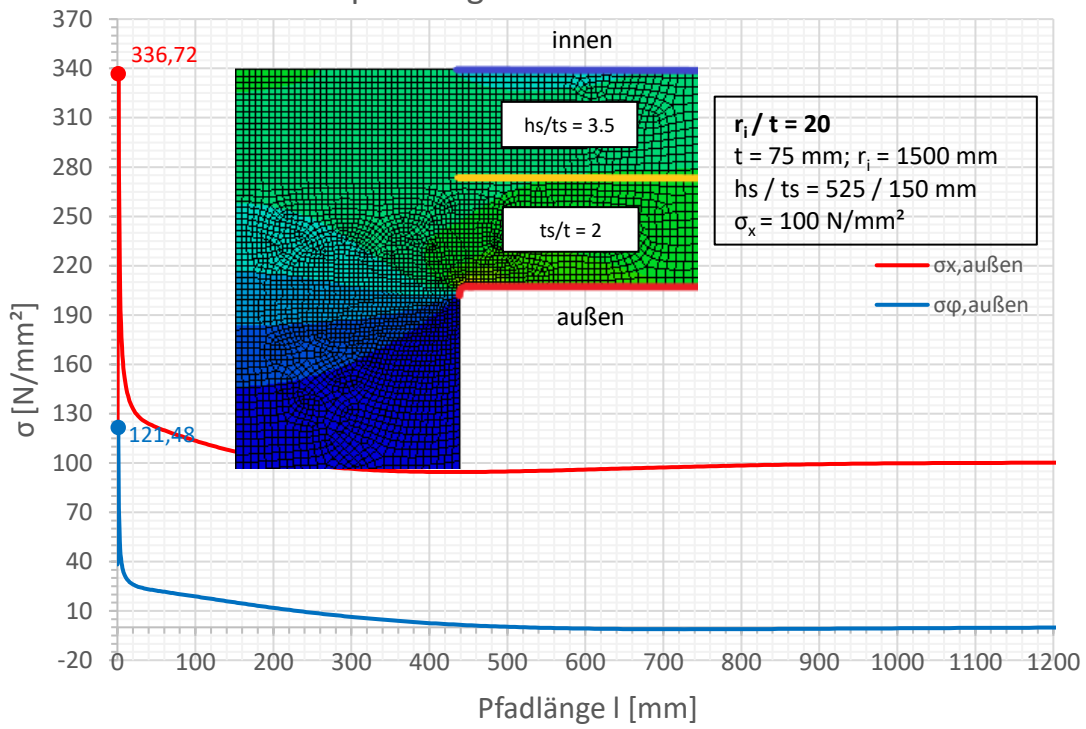


Spannungen an der Außenseite

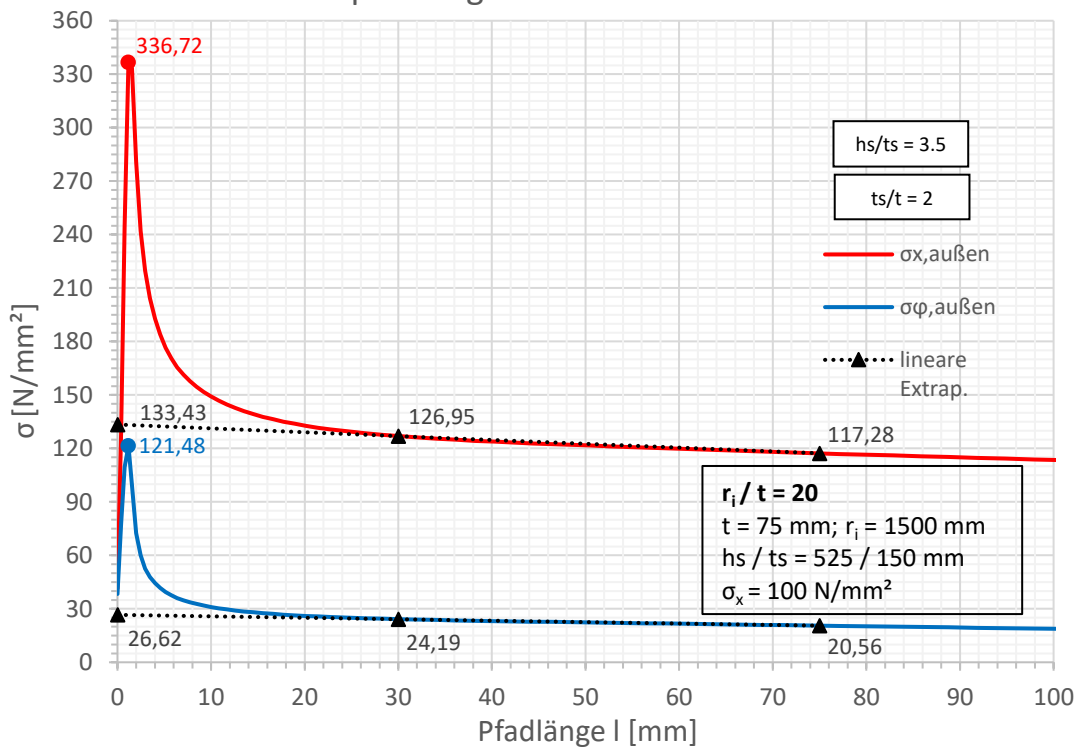


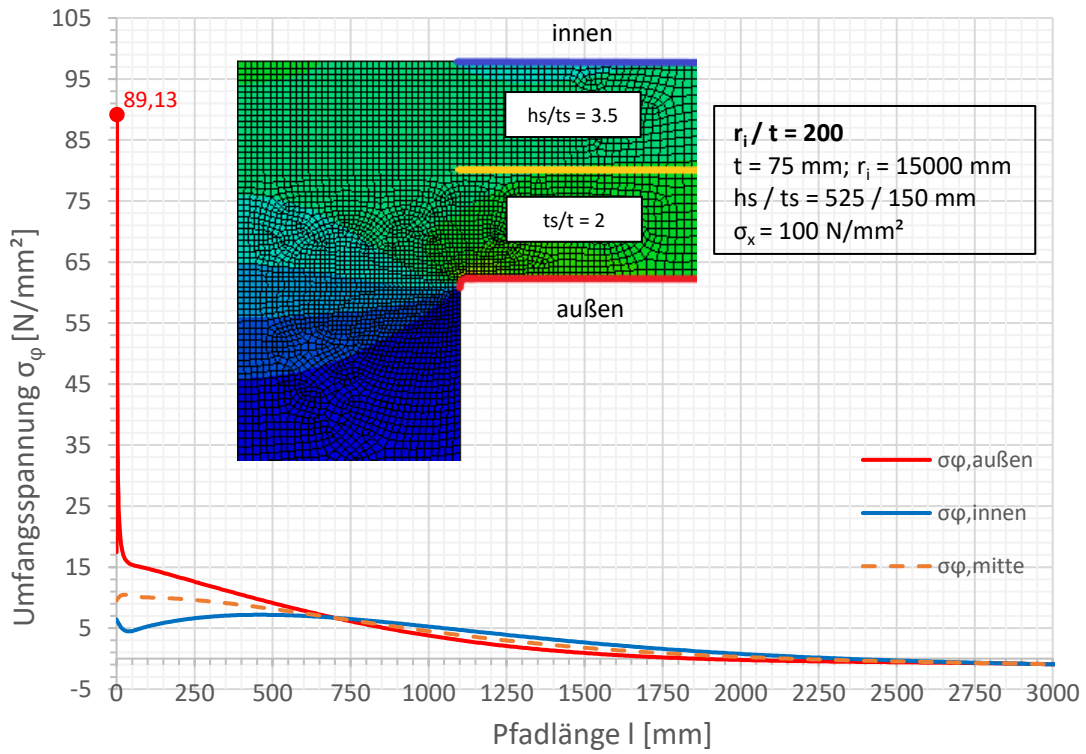
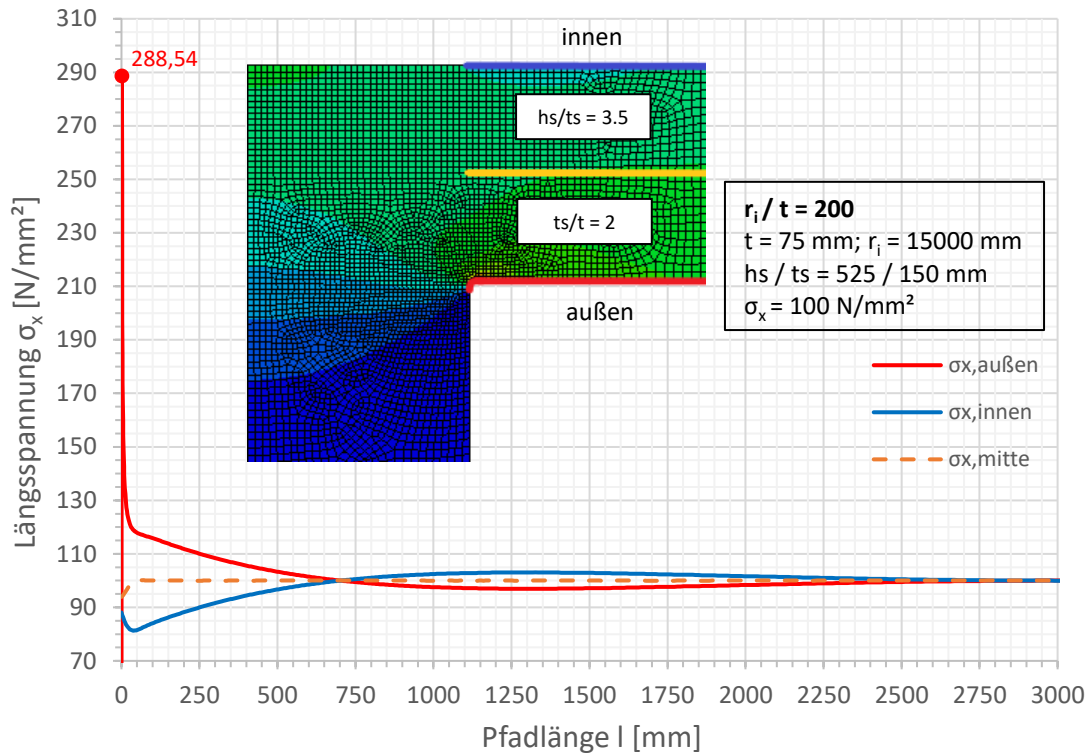


Spannungen an der Außenseite

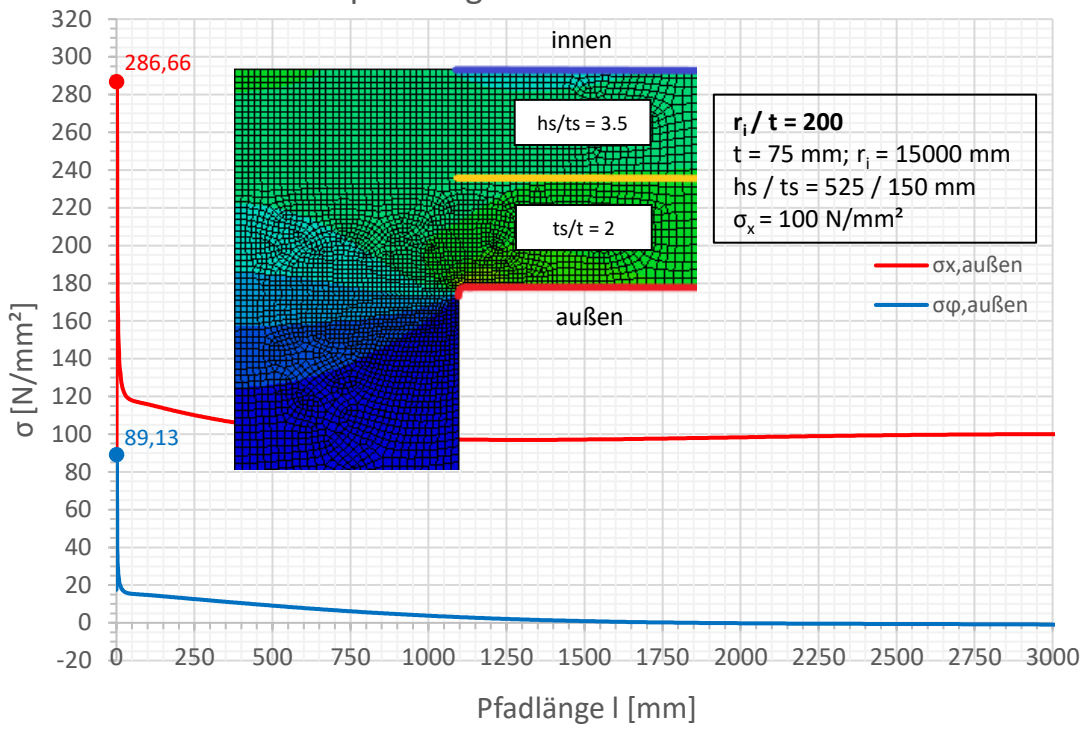


Spannungen an der Außenseite

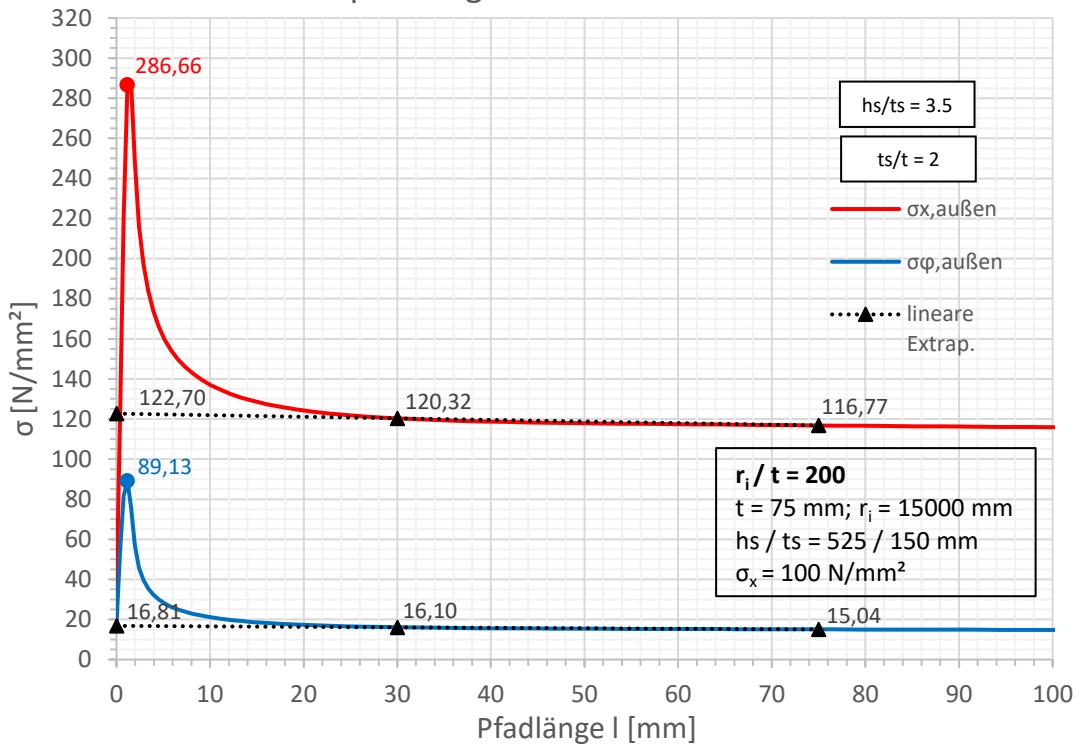


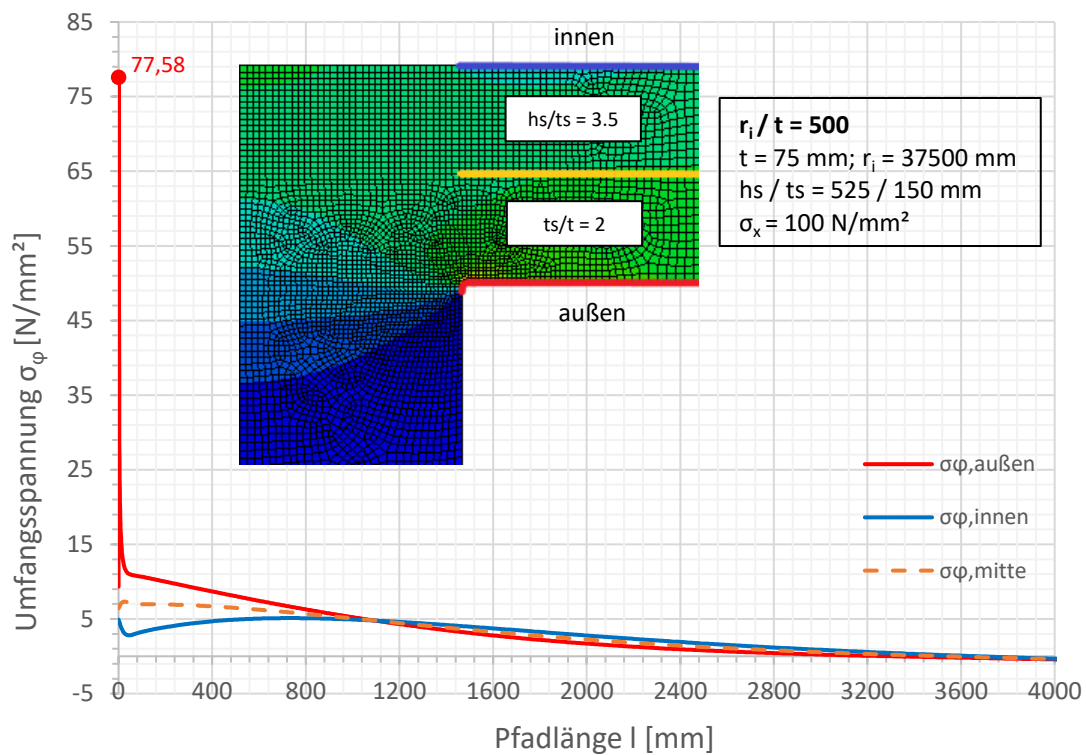
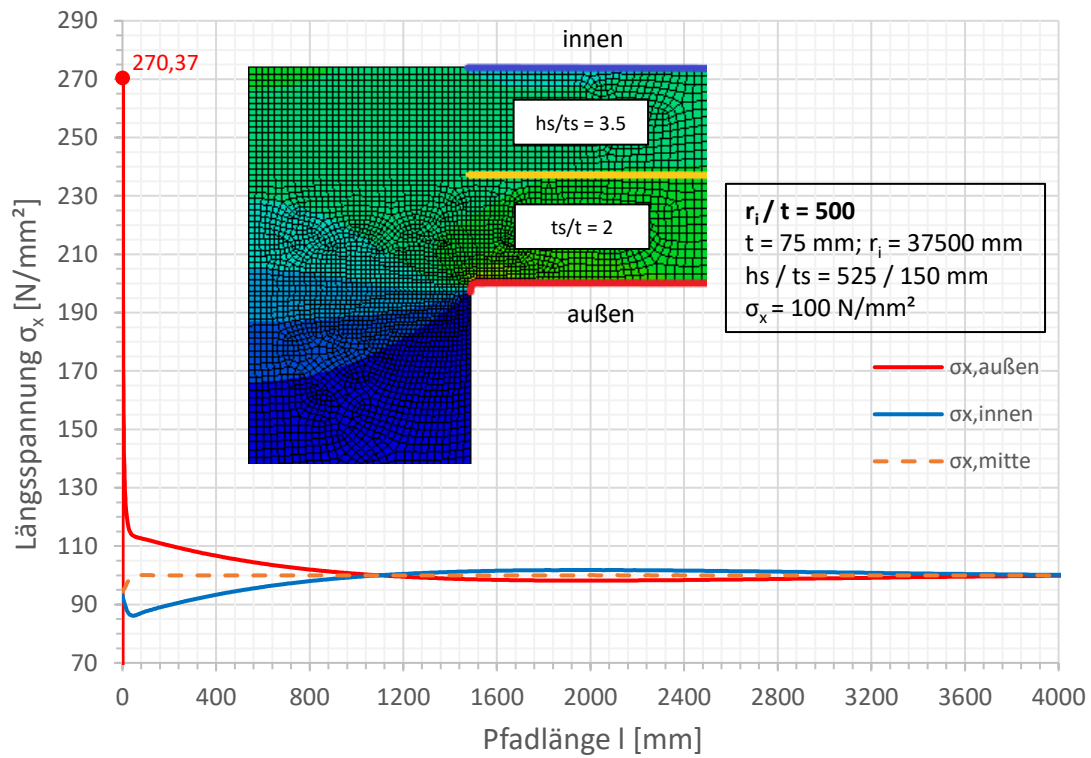


Spannungen an der Außenseite

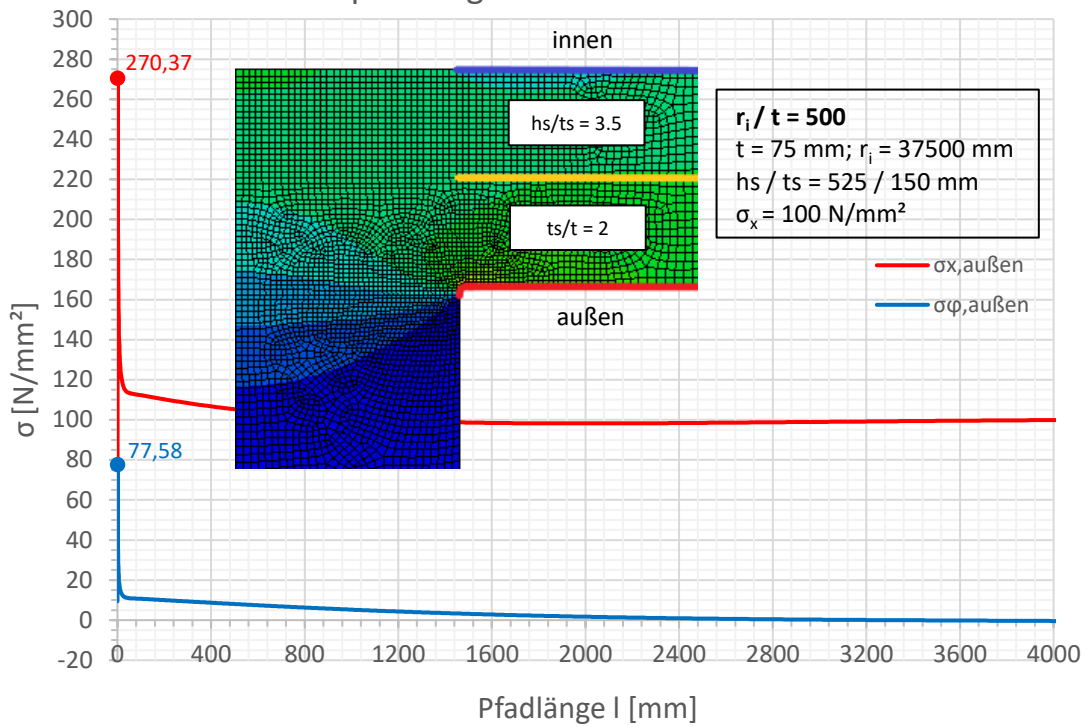


Spannungen an der Außenseite

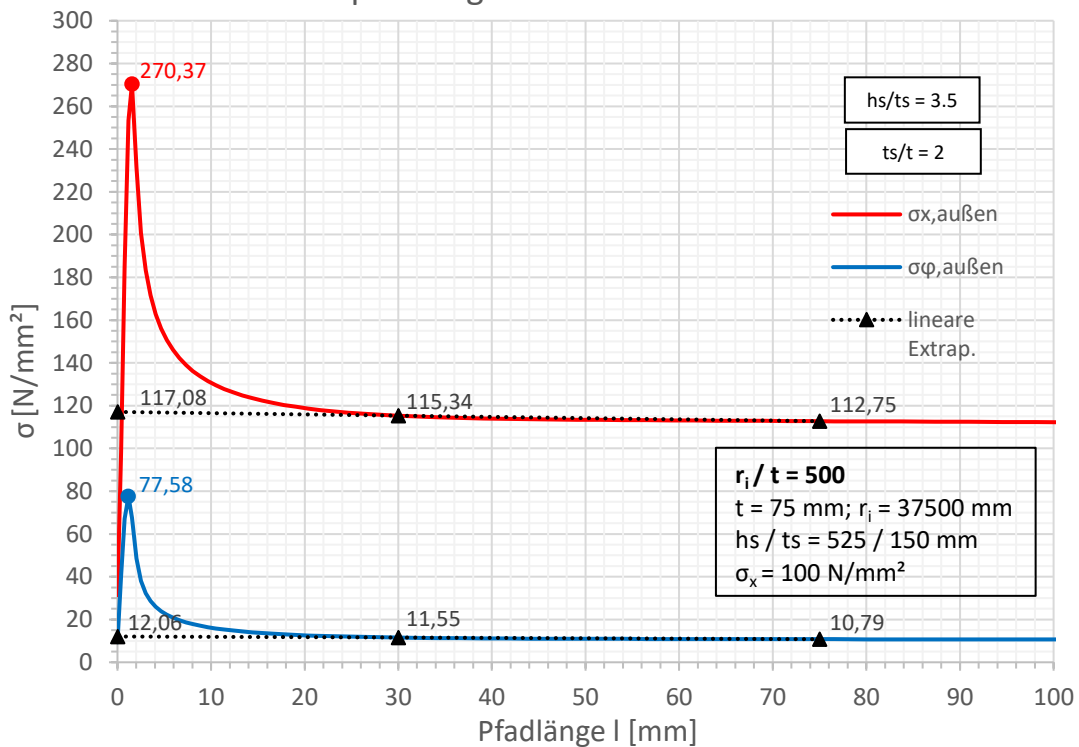


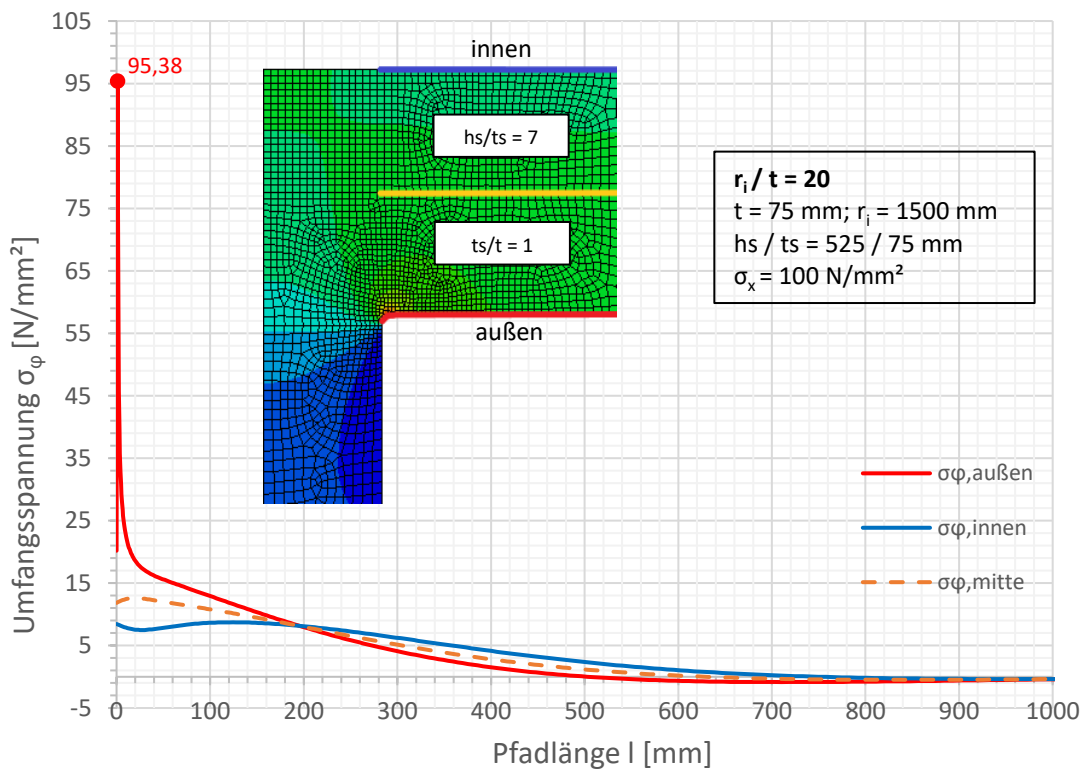
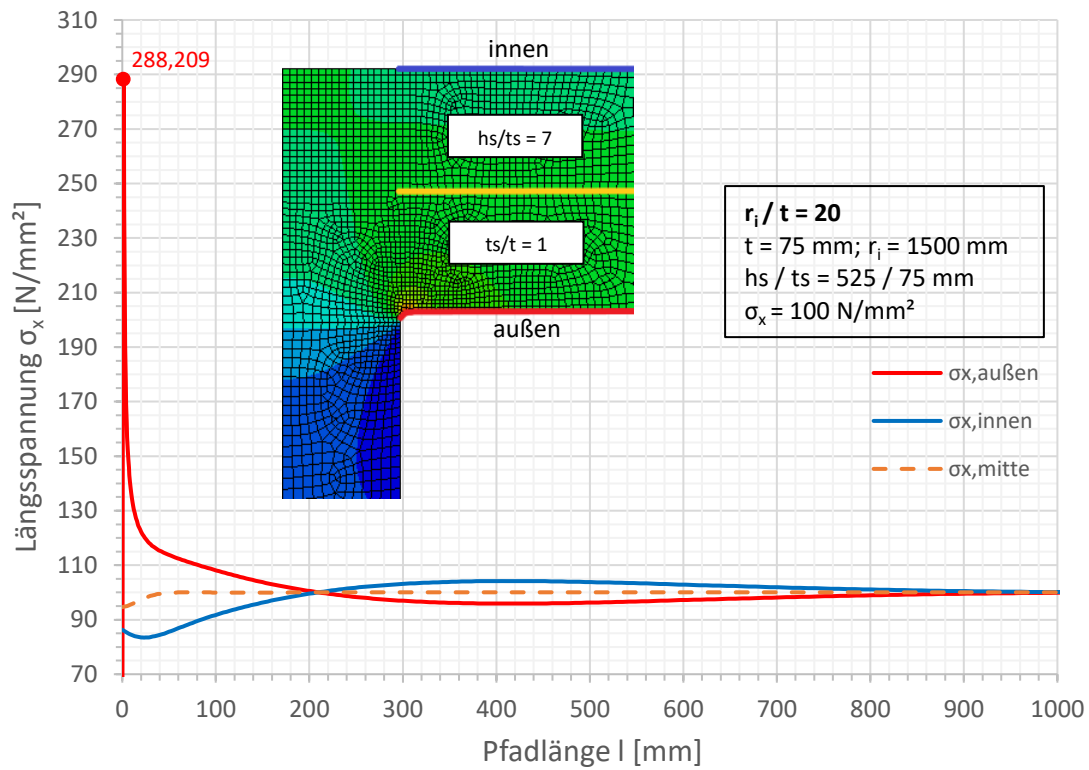


Spannungen an der Außenseite

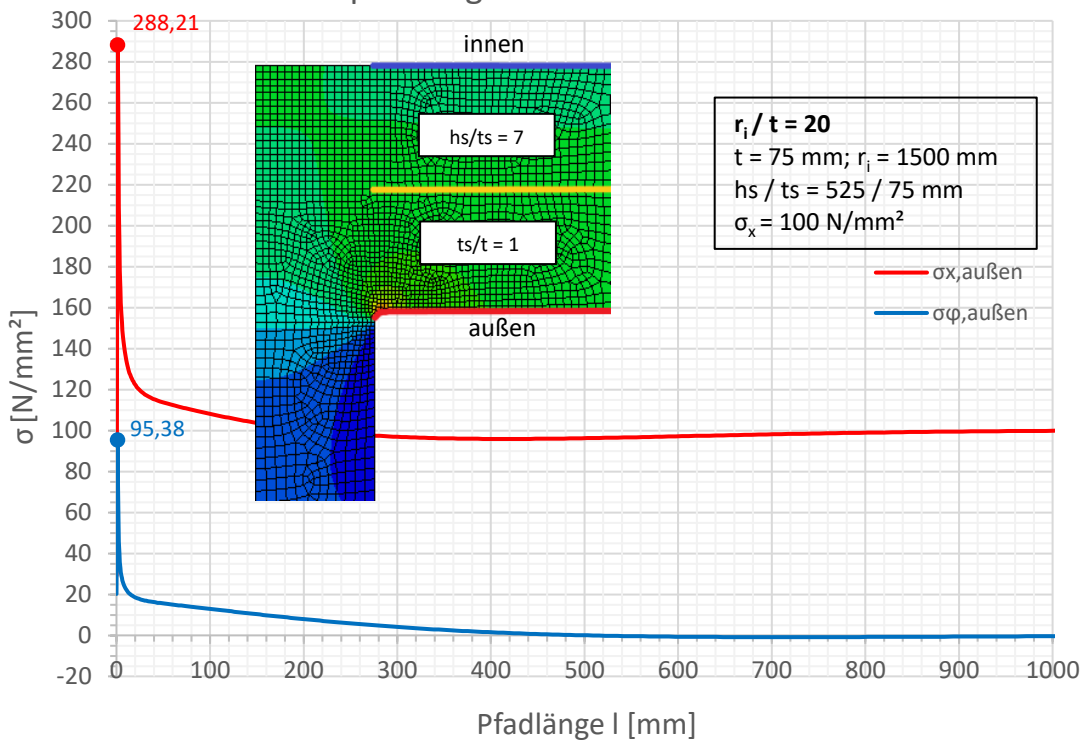


Spannungen an der Außenseite

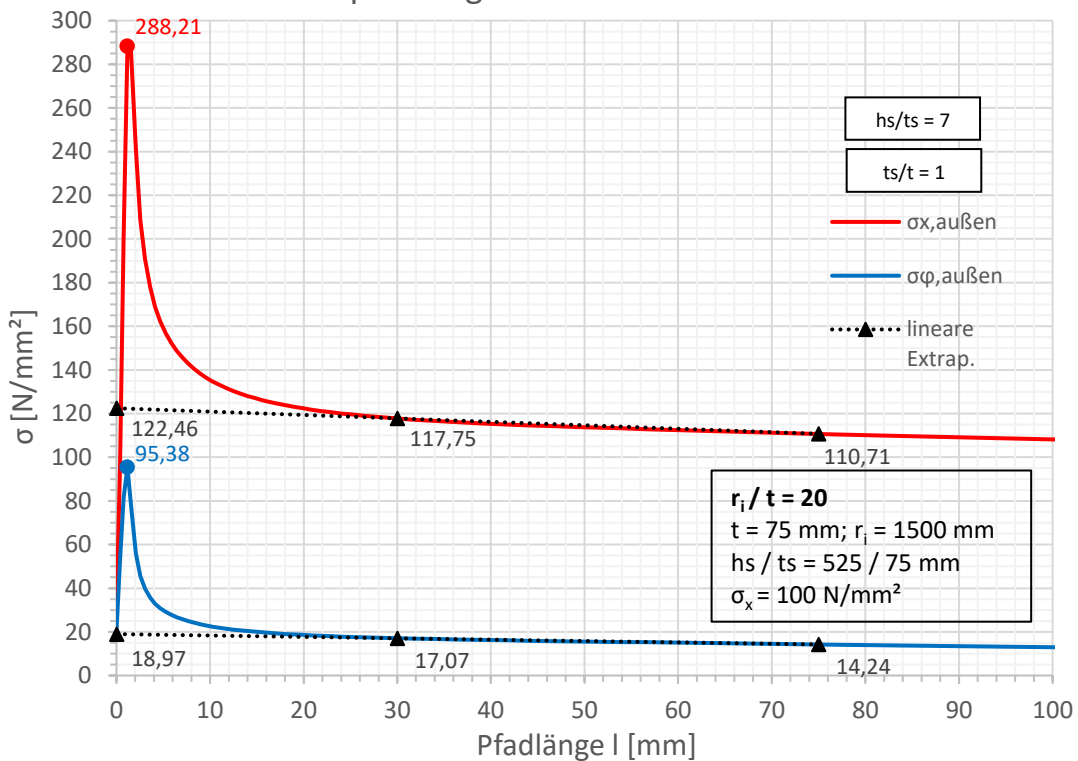


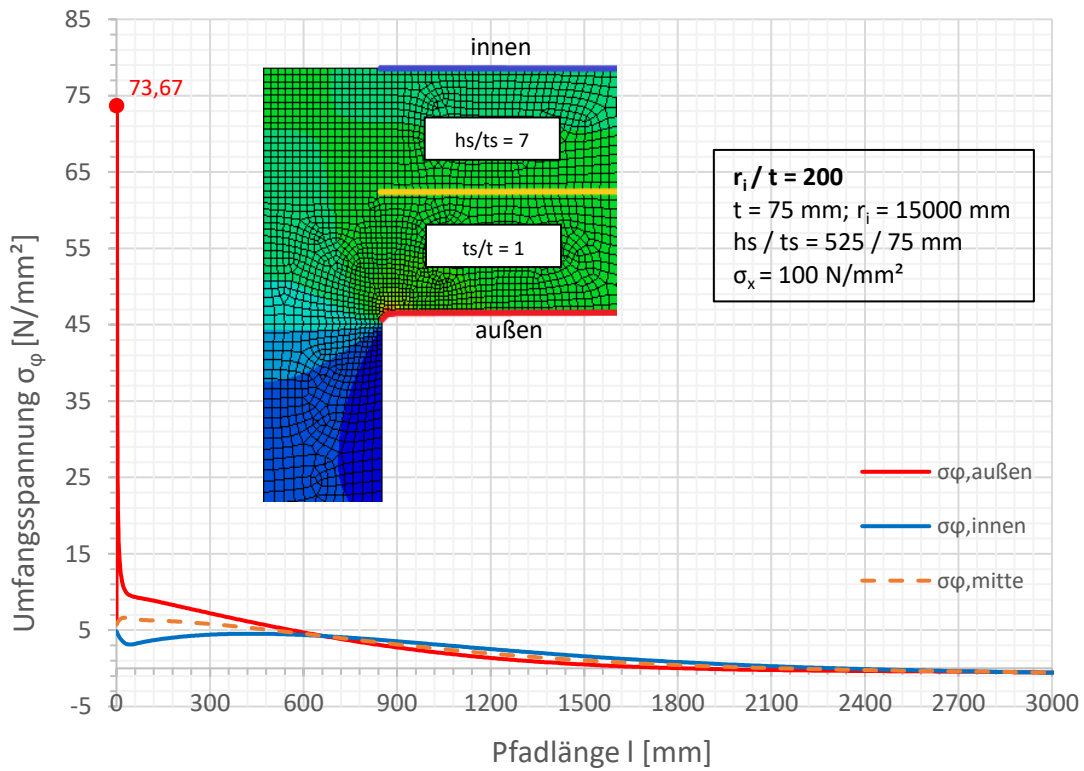
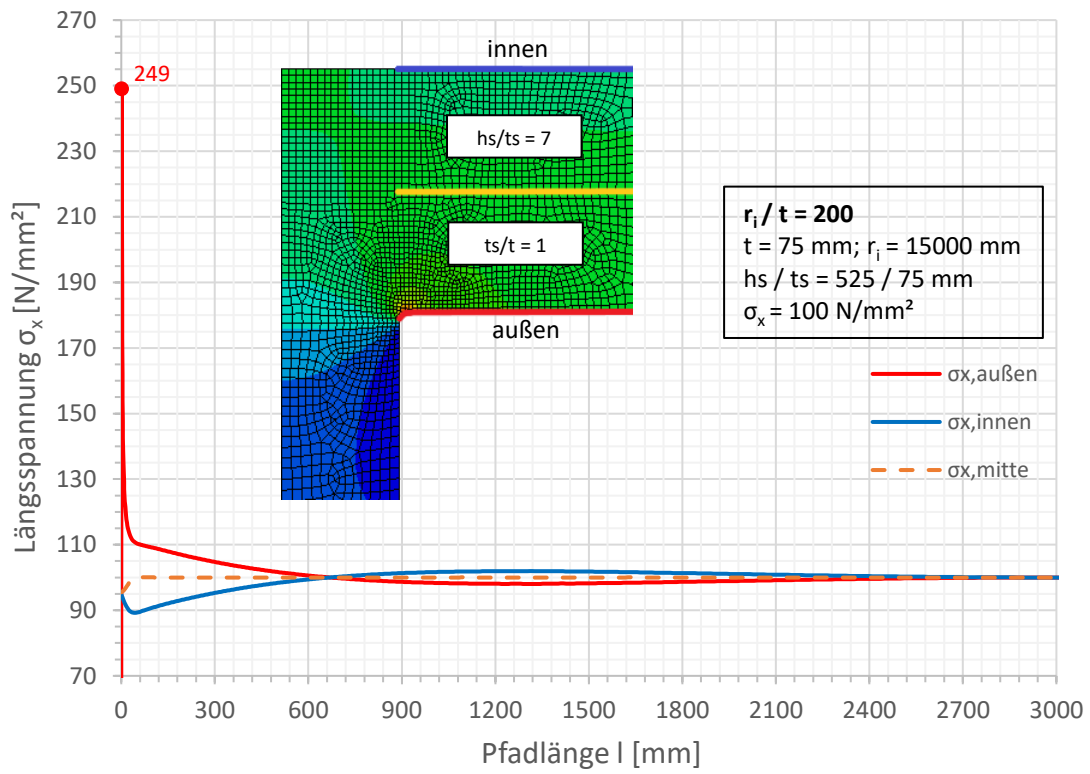


Spannungen an der Außenseite

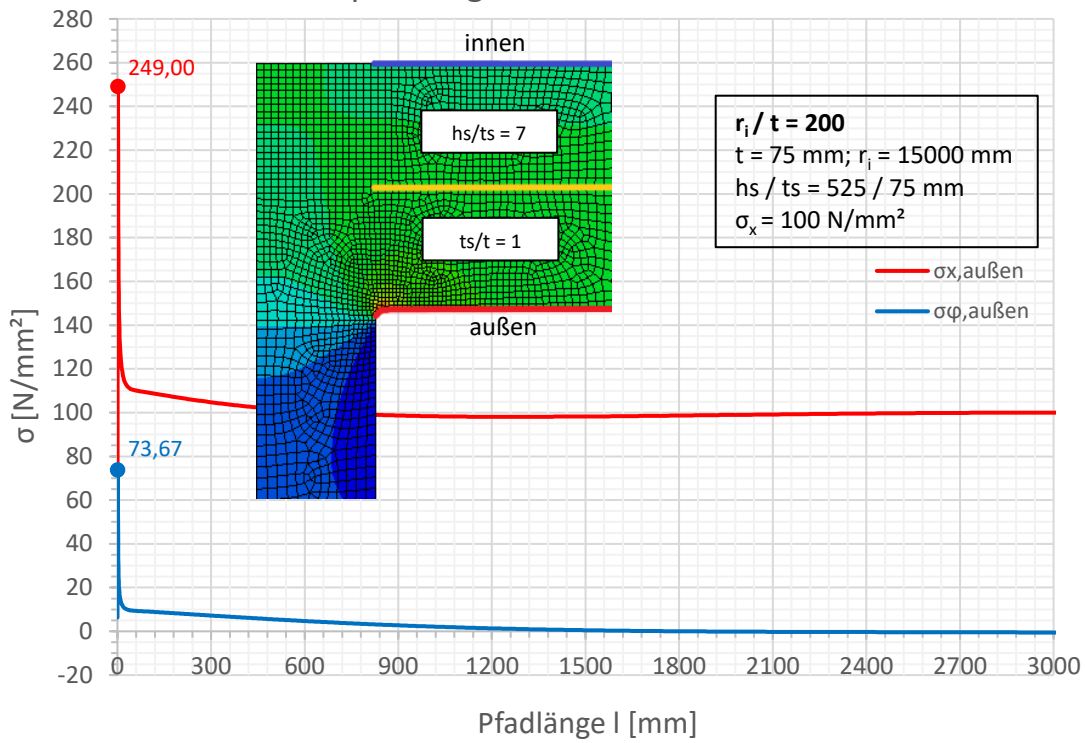


Spannungen an der Außenseite

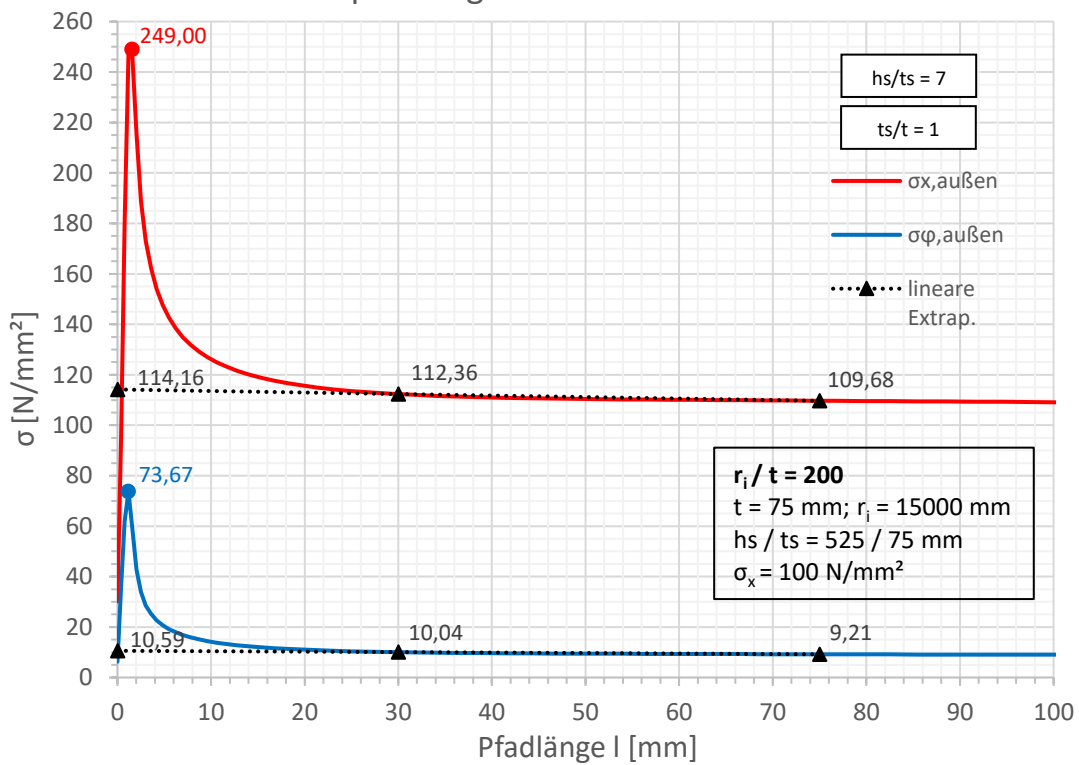


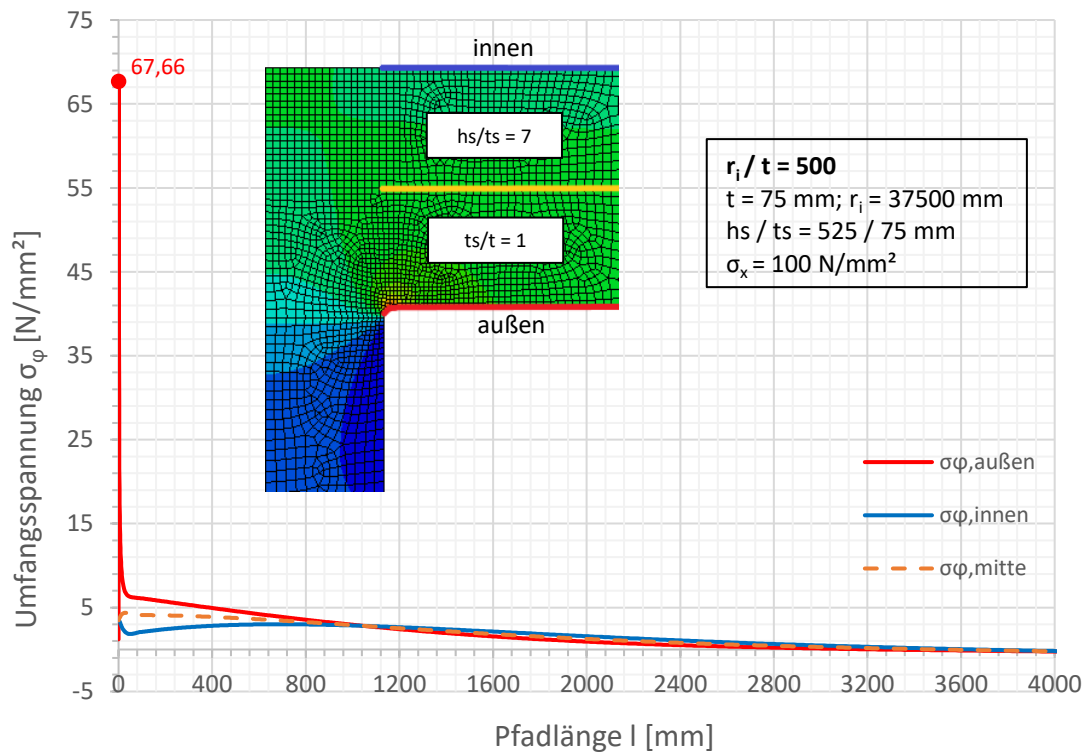
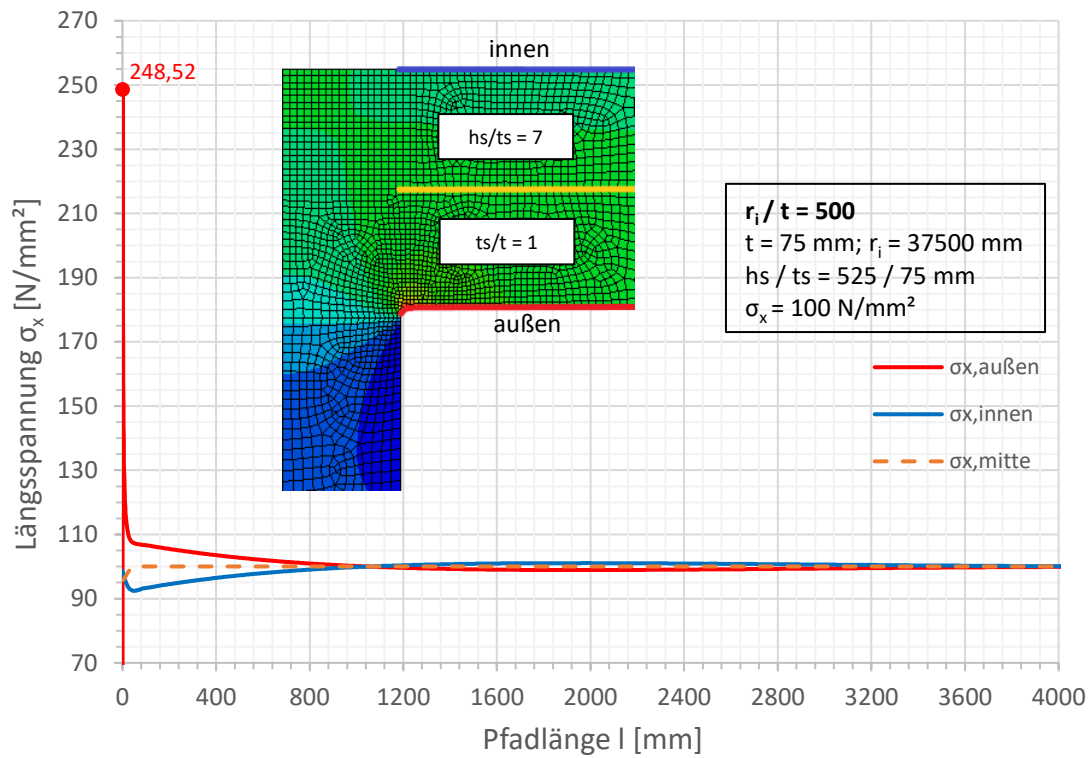


Spannungen an der Außenseite

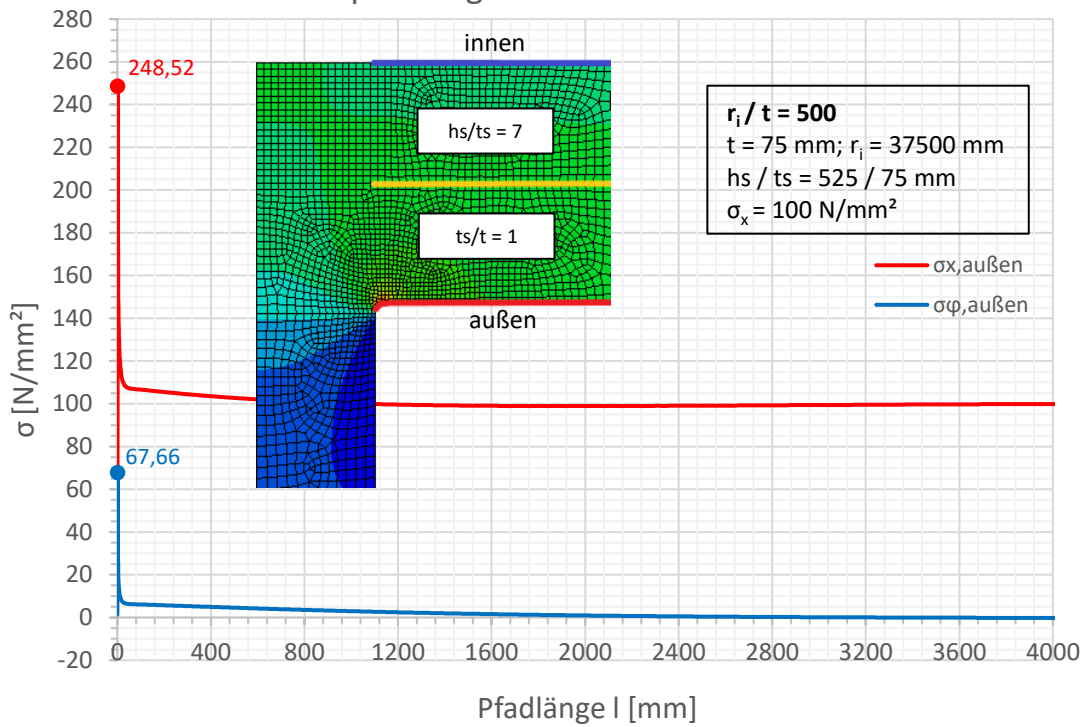


Spannungen an der Außenseite

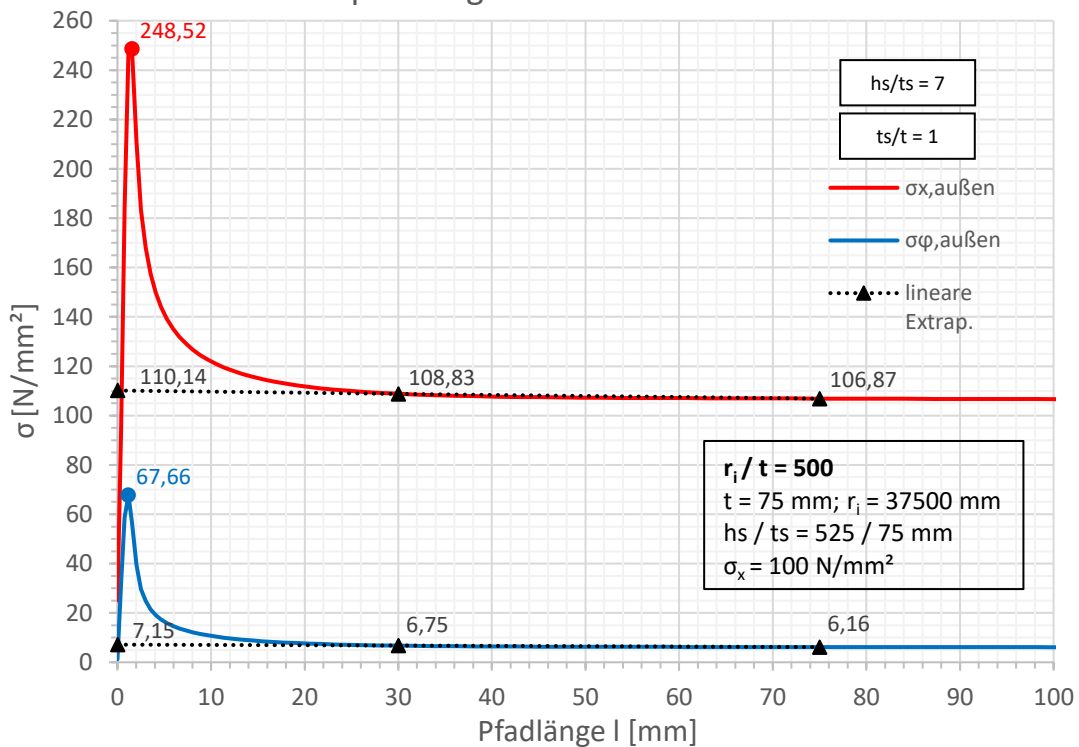


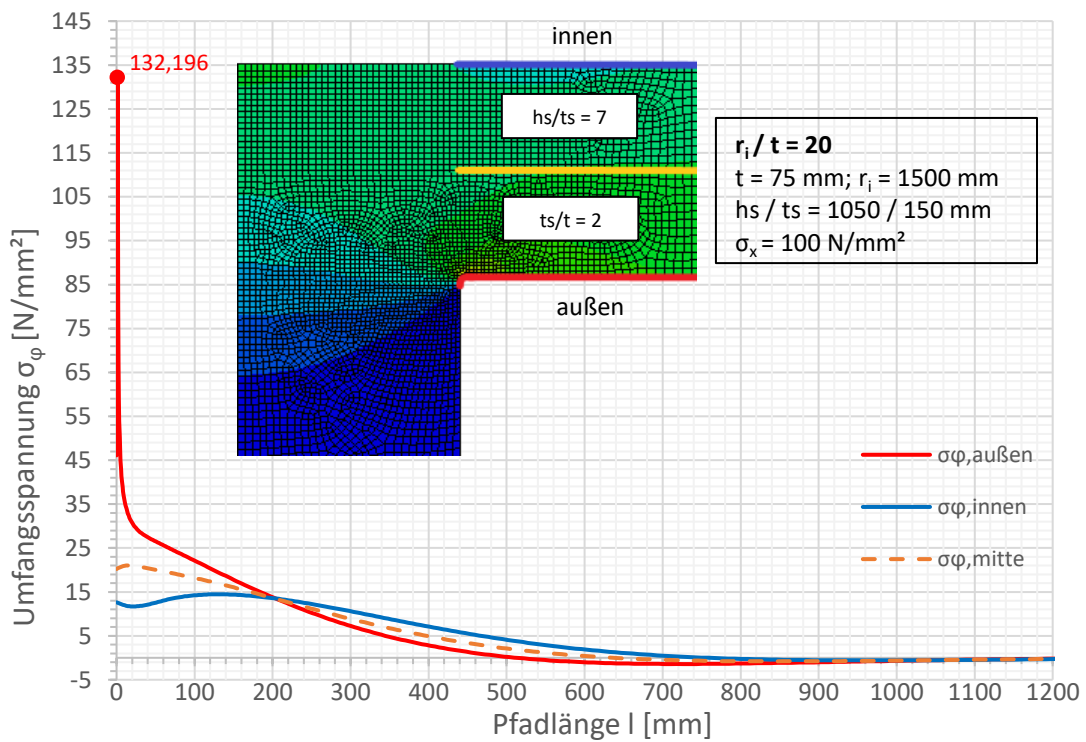
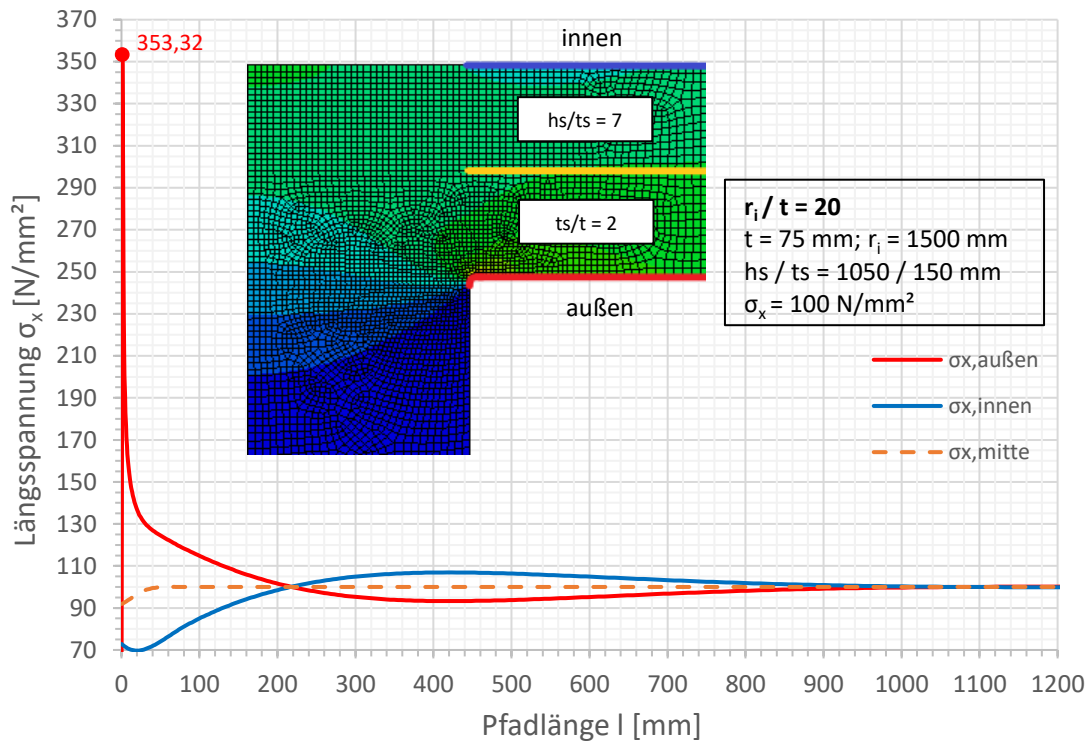


Spannungen an der Außenseite

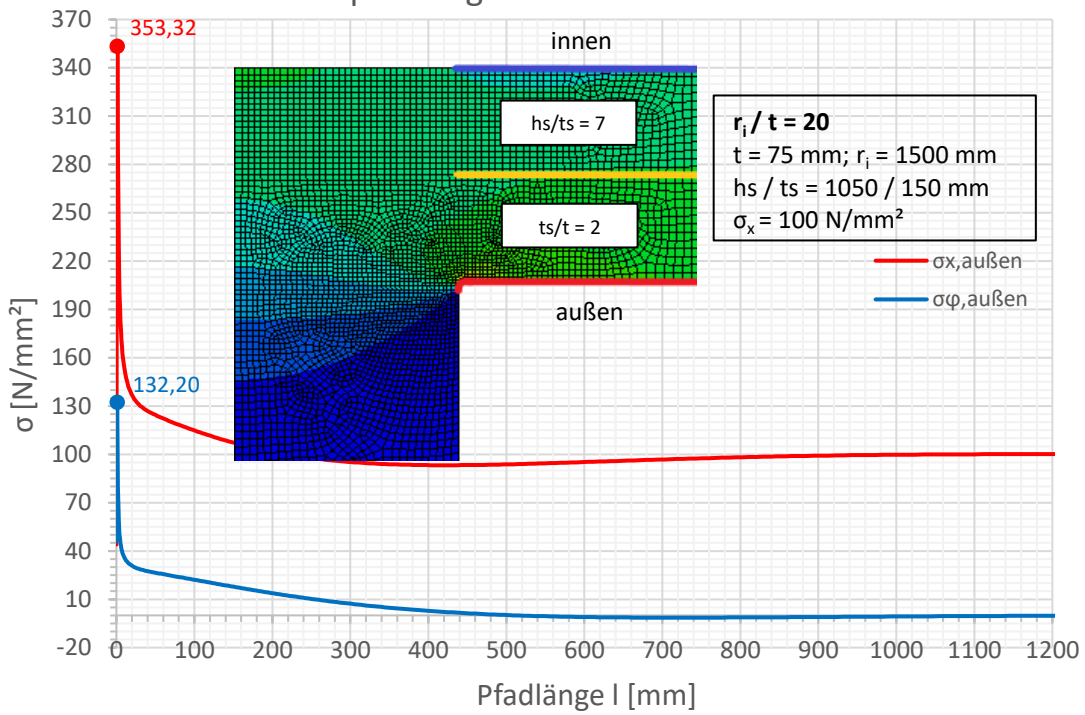


Spannungen an der Außenseite

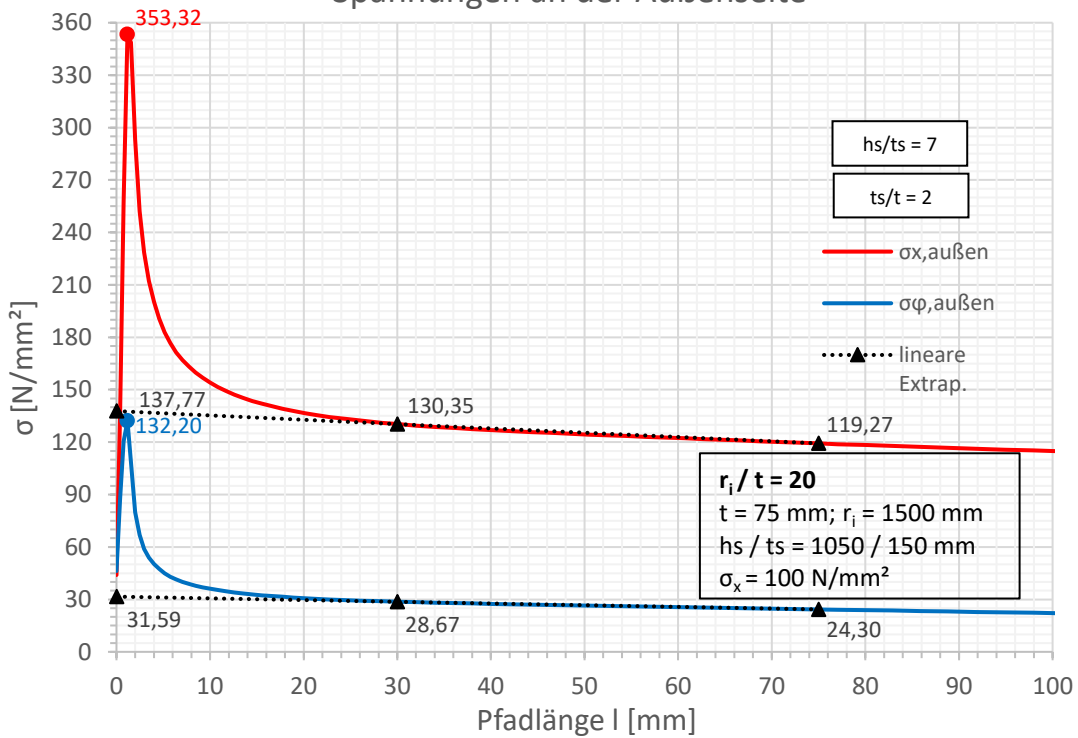


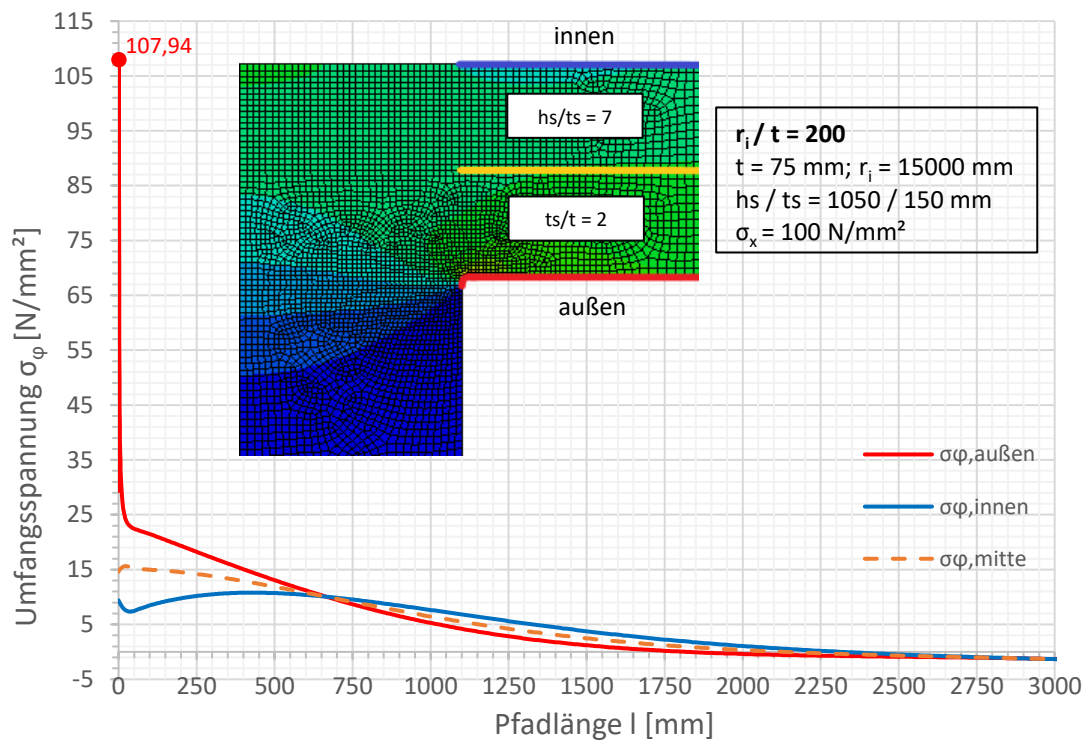
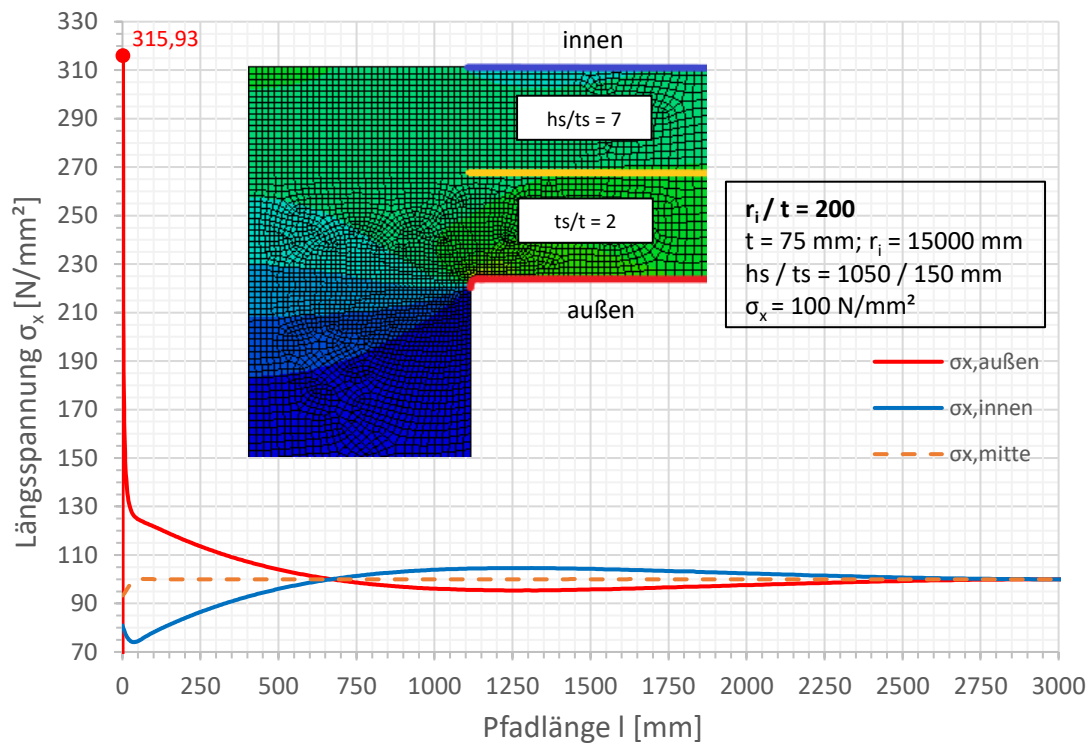


Spannungen an der Außenseite

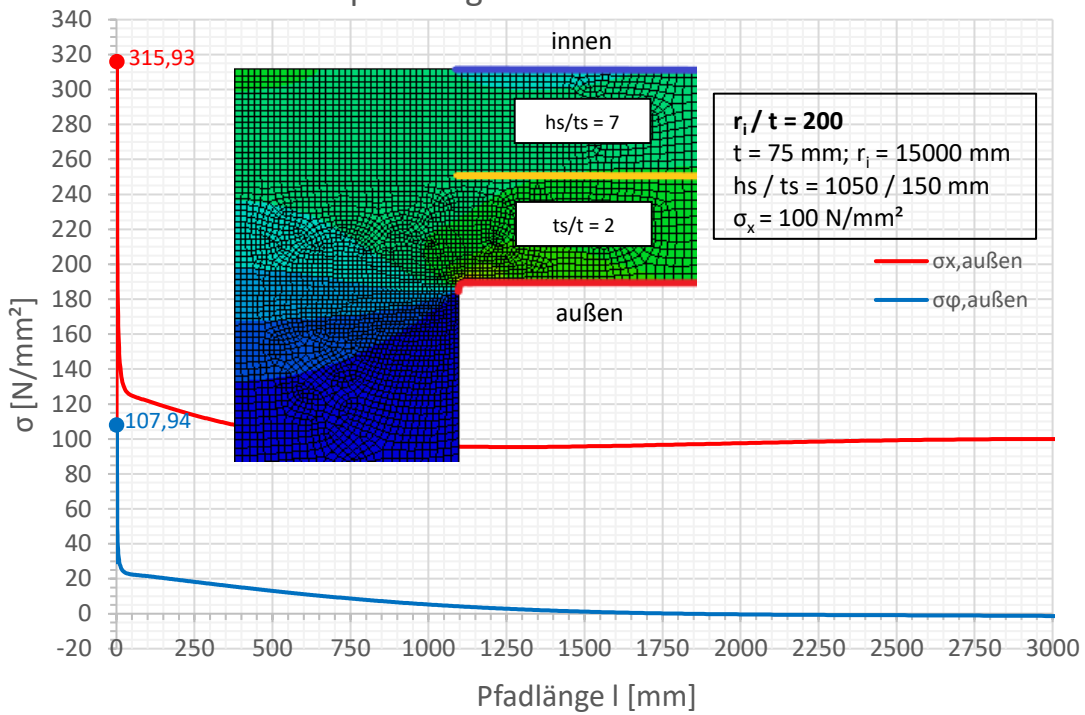


Spannungen an der Außenseite

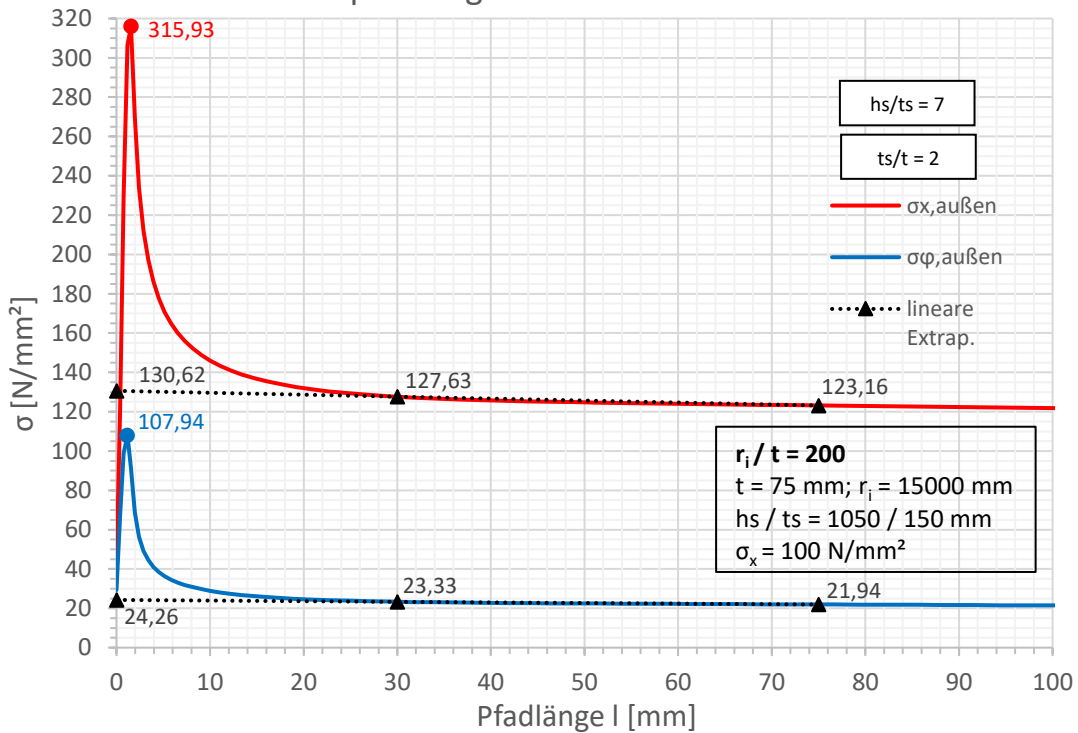


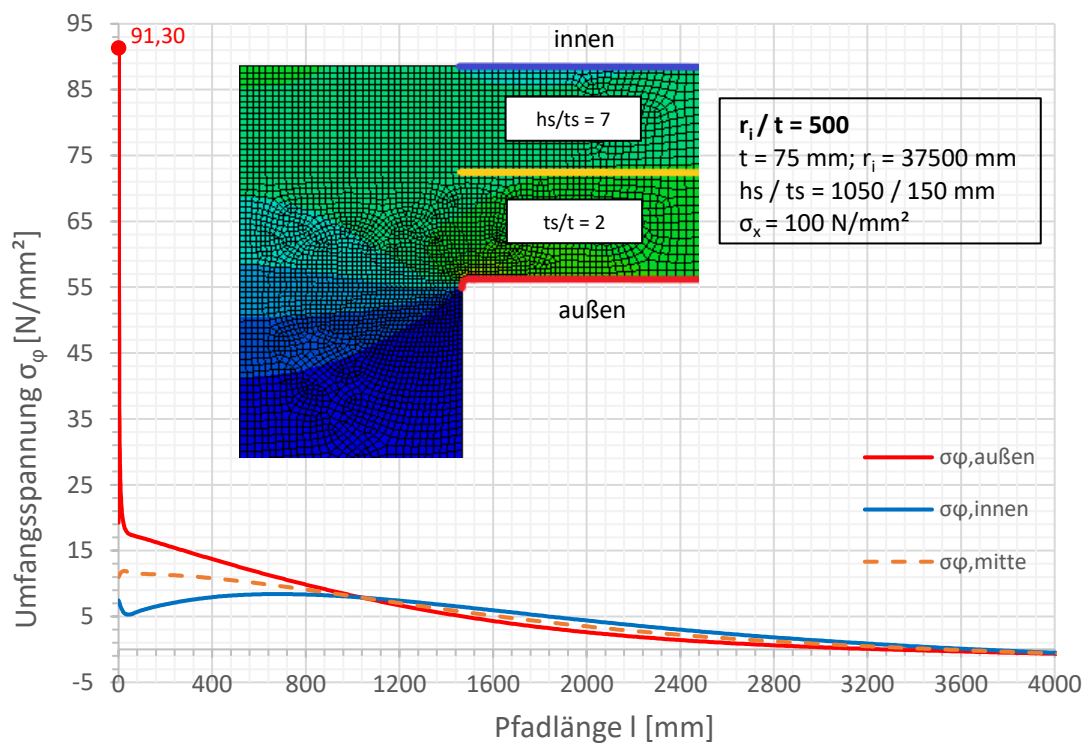
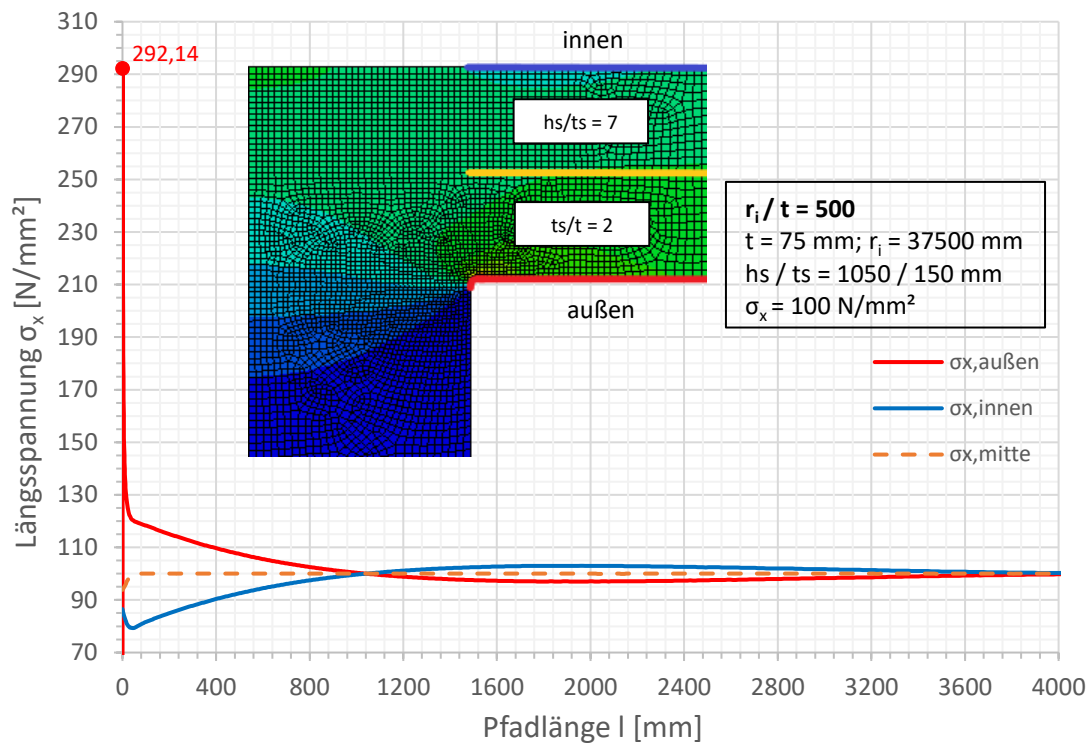


Spannungen an der Außenseite

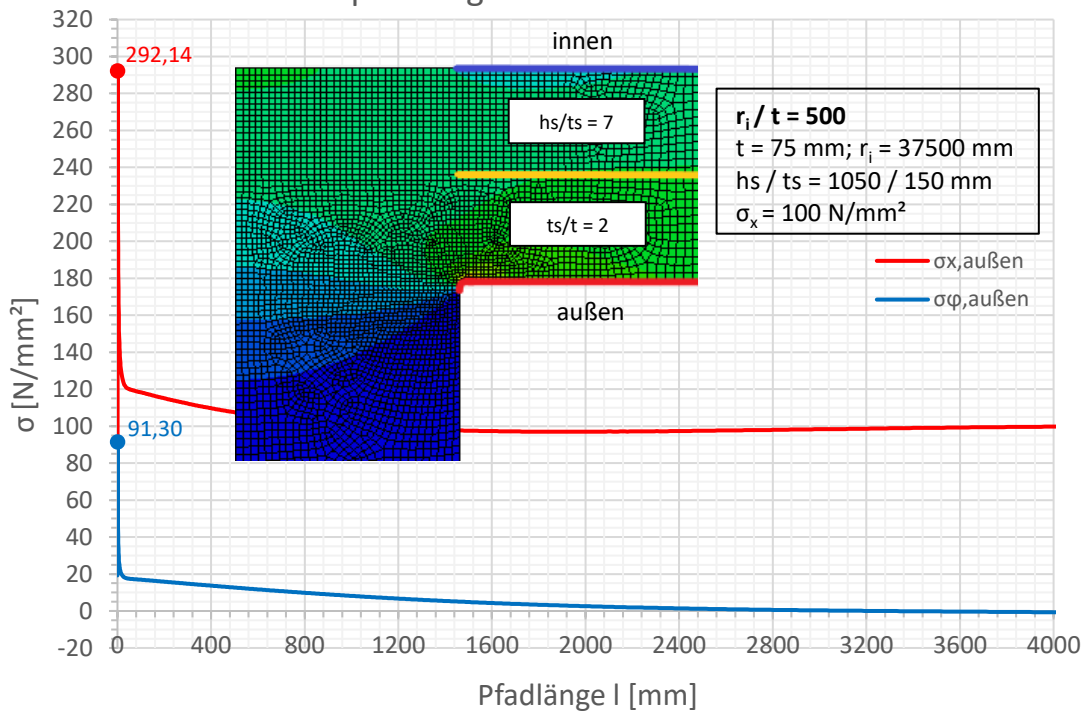


Spannungen an der Außenseite

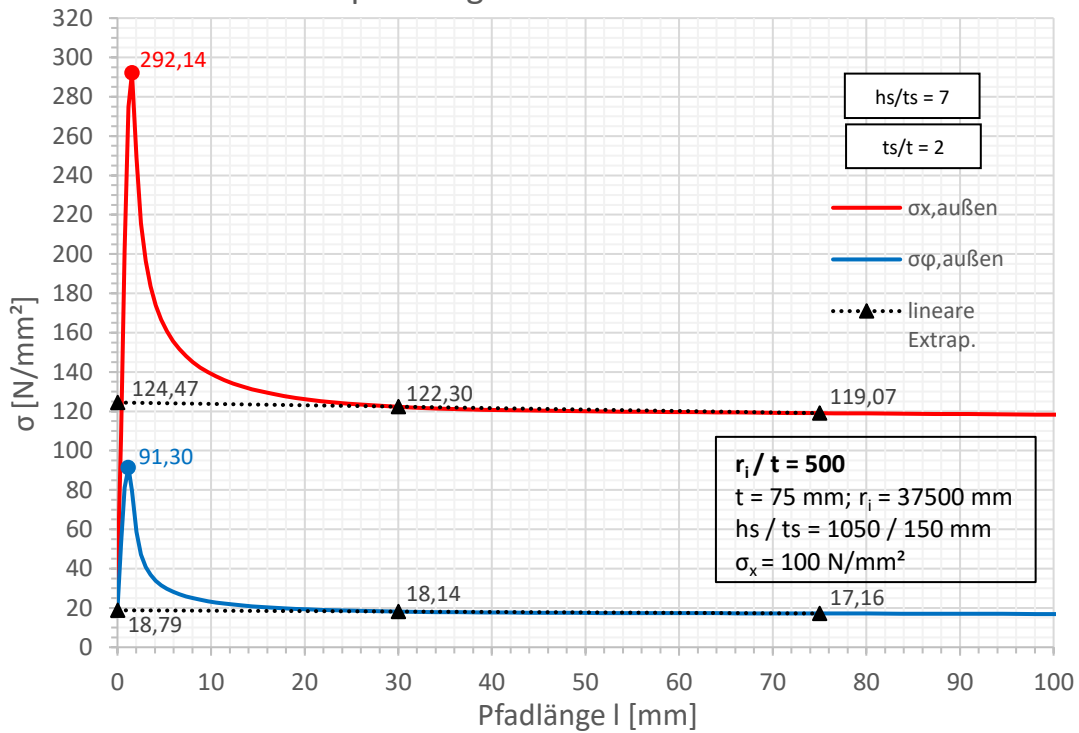




Spannungen an der Außenseite



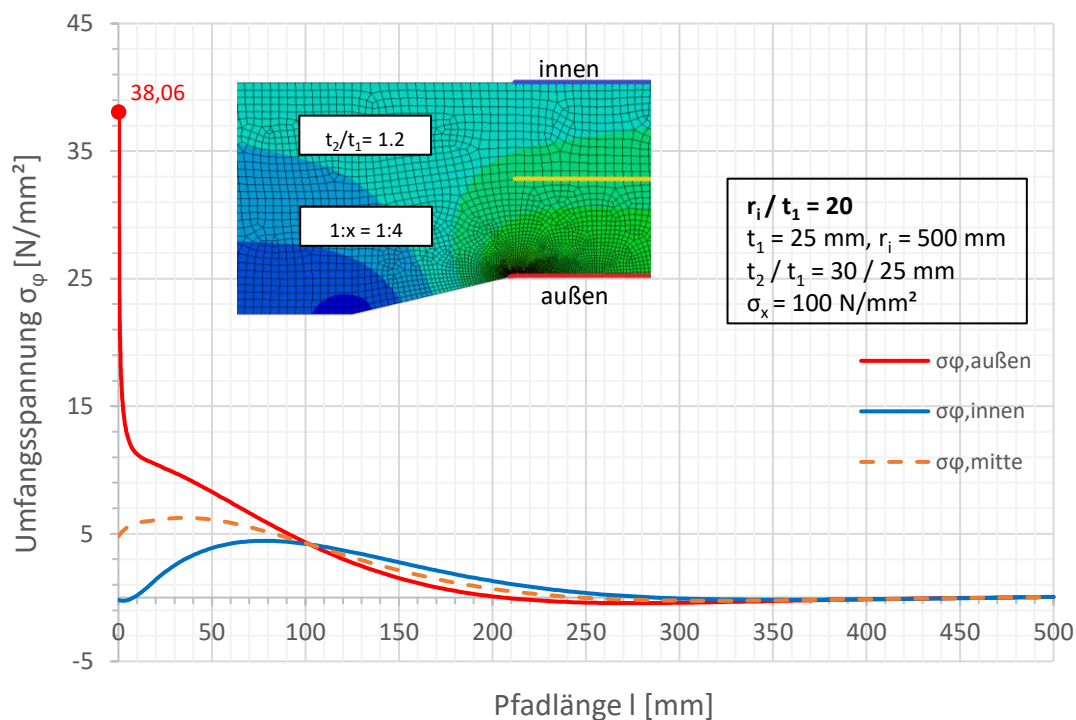
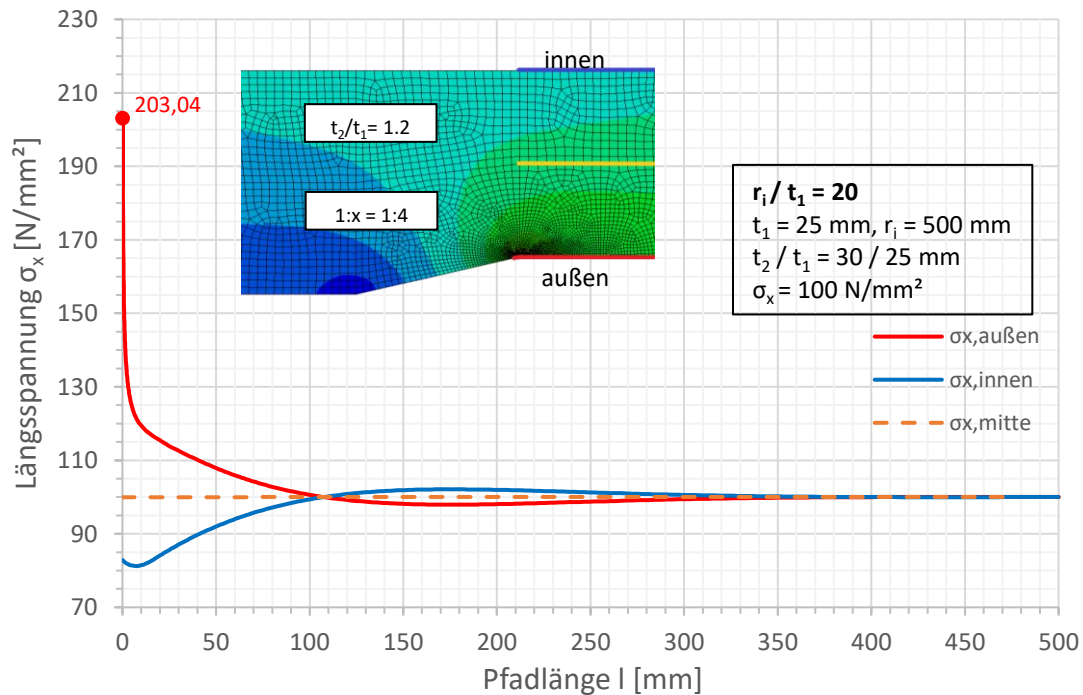
Spannungen an der Außenseite



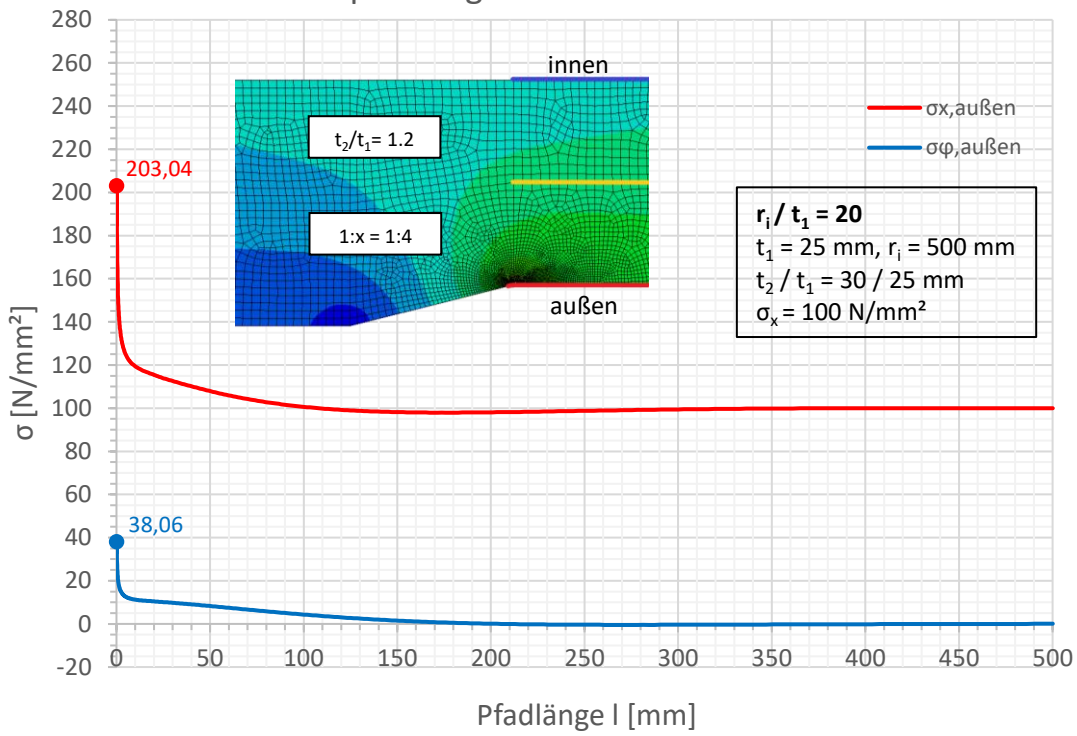
Anhang B. FE-Berechnungen - Wanddickensprung

B.1. Wanddicke $t_1 = 25$ mm

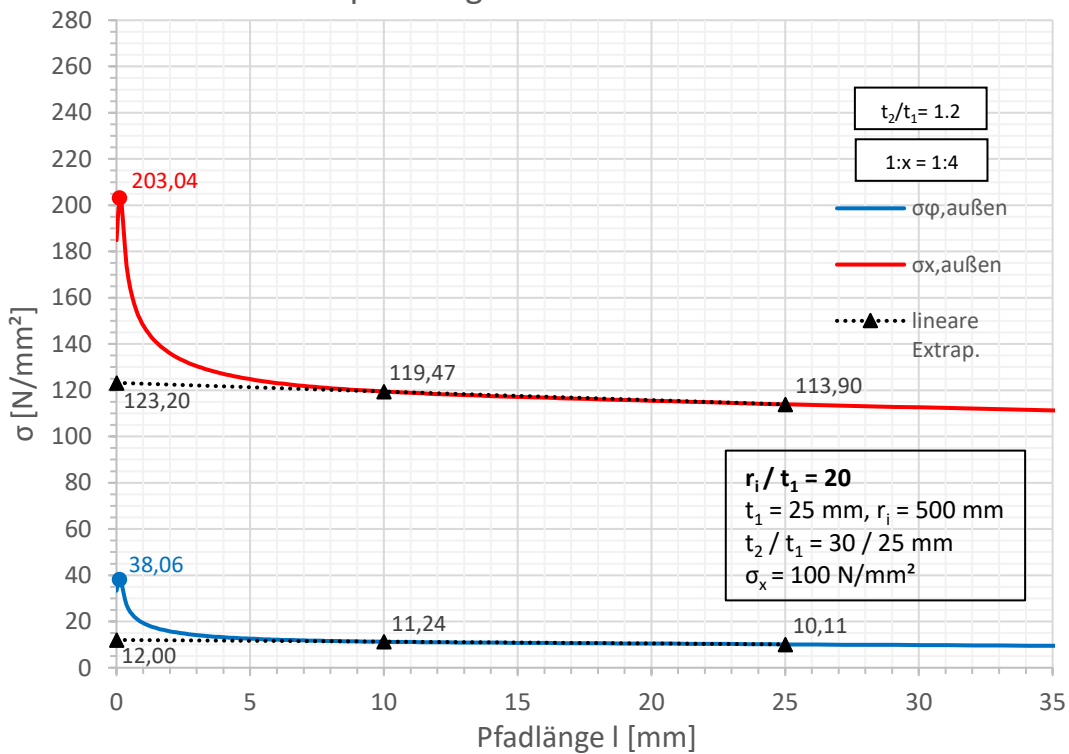
In den nachfolgenden Seiten B-1 bis B- sind die FE-Berechnungen vom **Wanddickensprung** abgebildet, die mithilfe von Abaqus durchgeführt und mit Excel bearbeitet wurden. Dabei sind die Längsspannungen sowie die Umfangsspannungen ausgegeben worden. Für einen besseren Überblick sind unten in der Fußzeile die Wanddicke t_1 anmerkt.

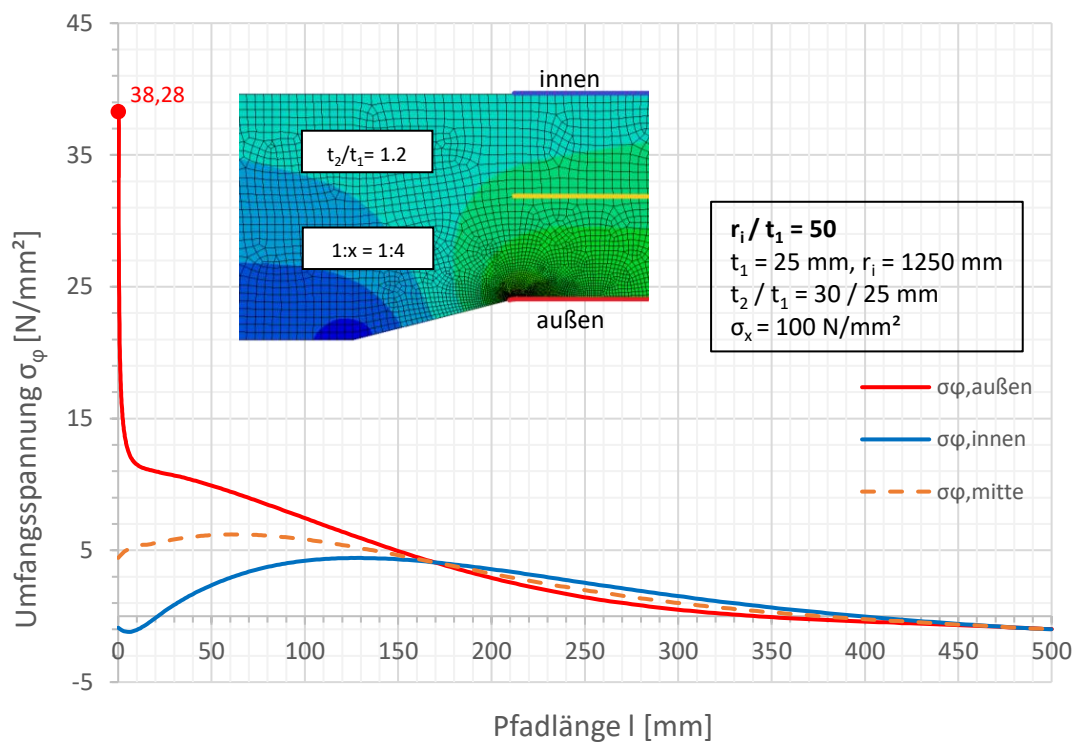
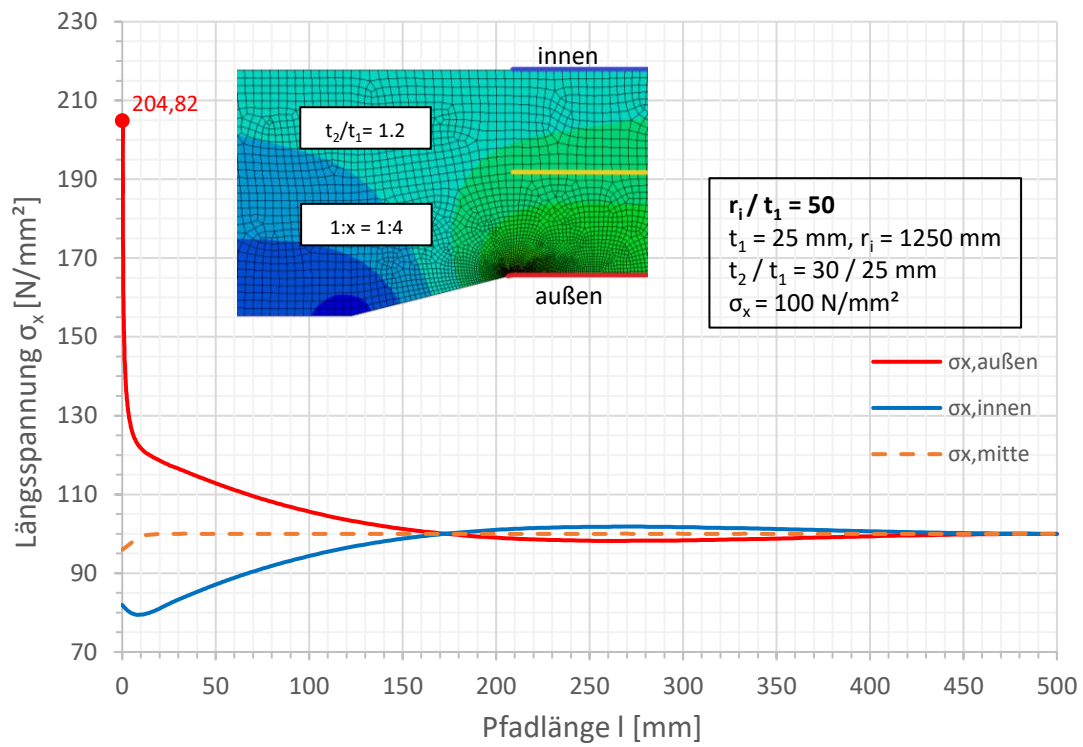


Spannungen an der Außenseite

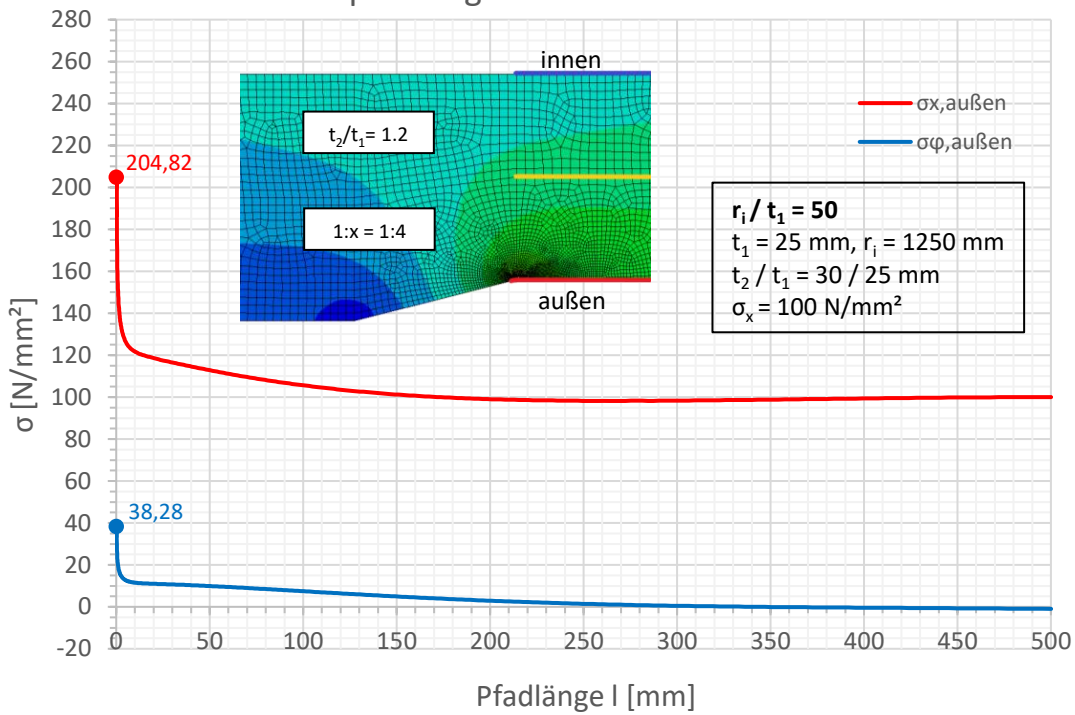


Spannungen an der Außenseite

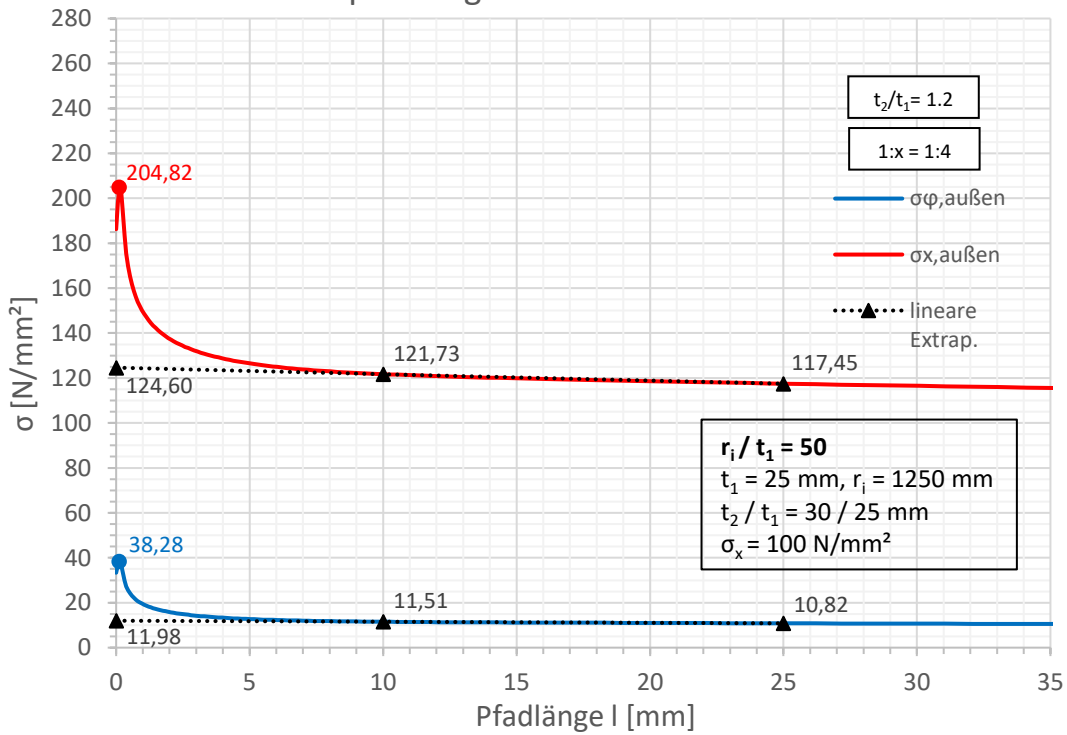


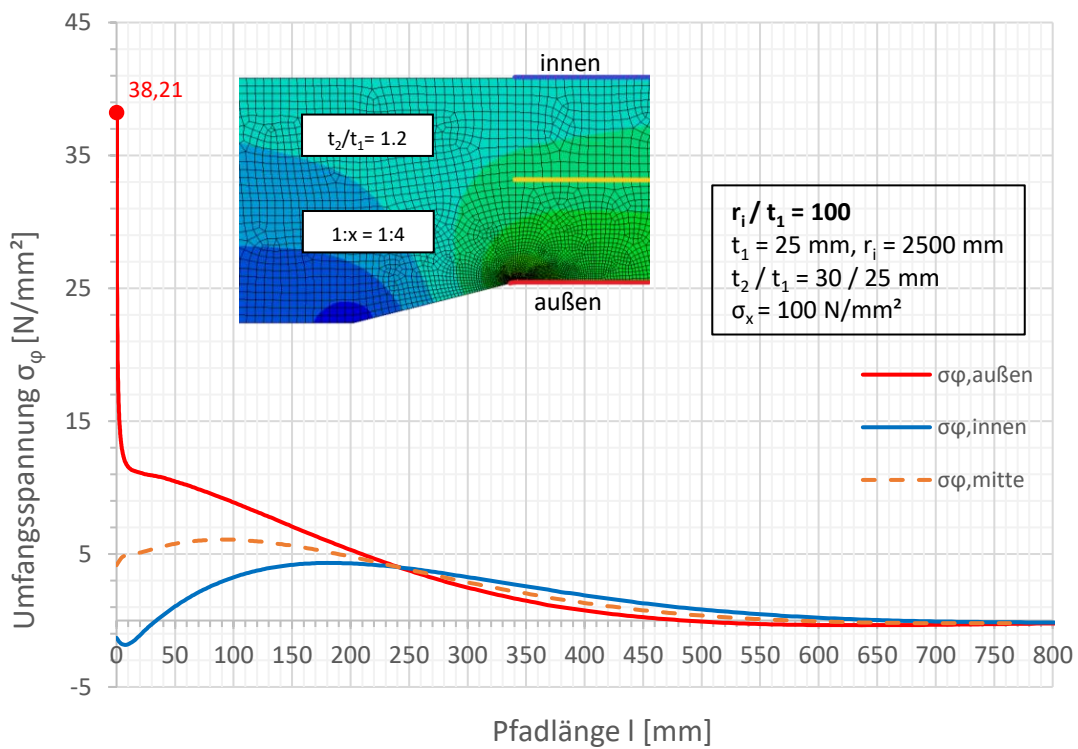
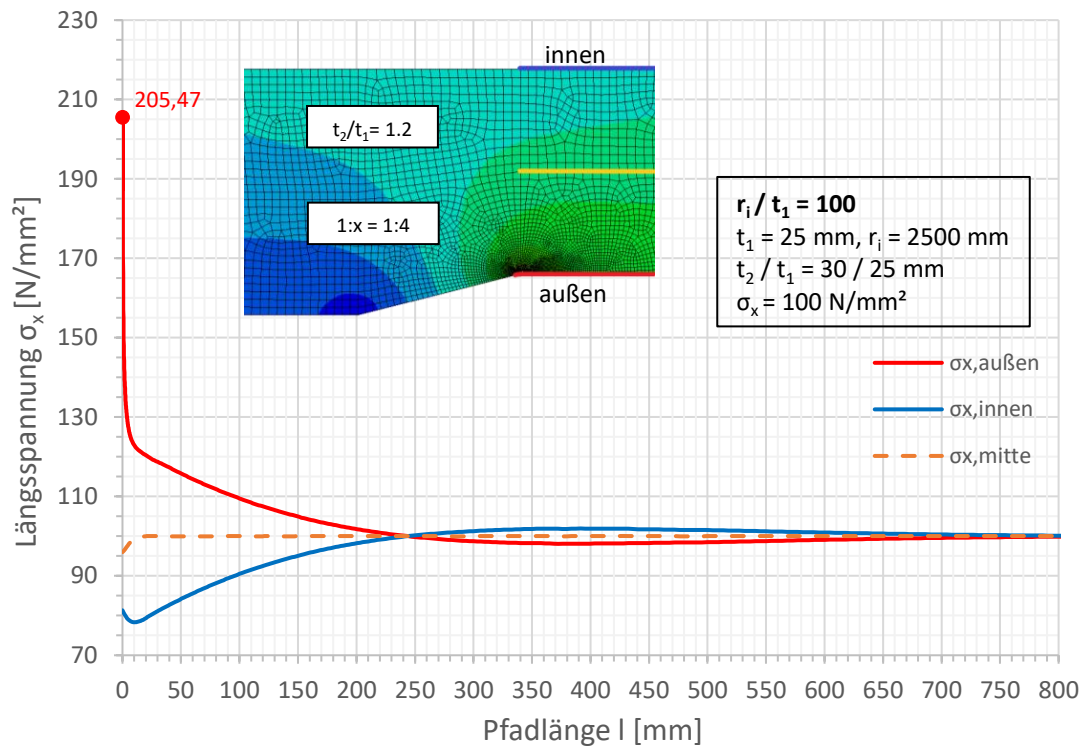


Spannungen an der Außenseite

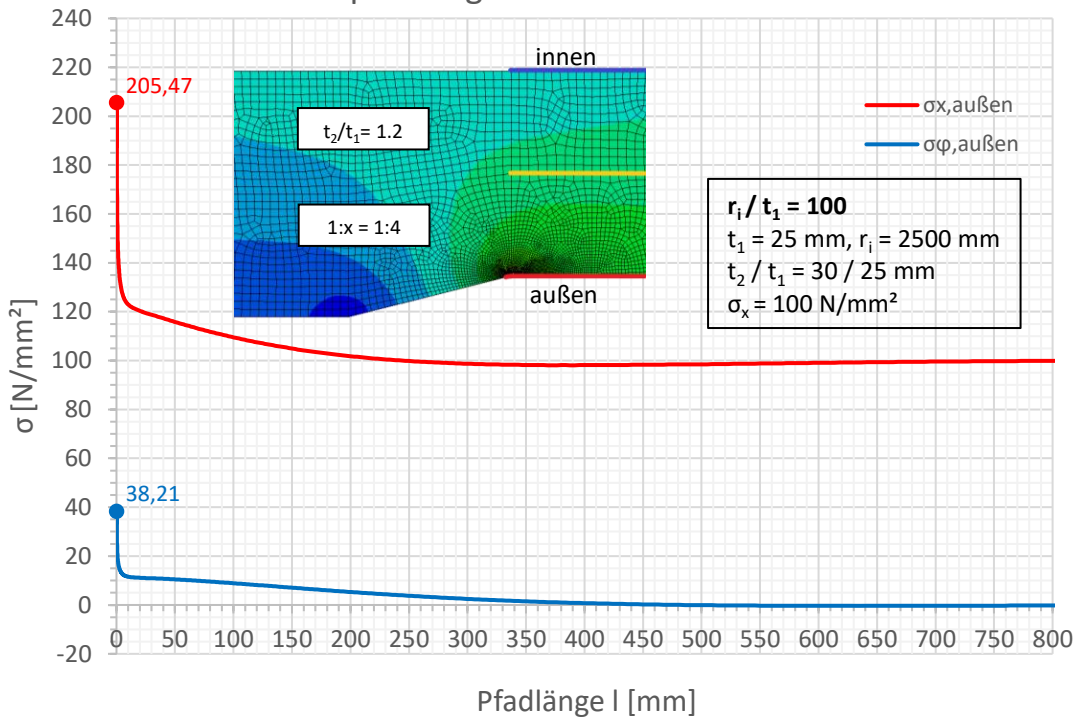


Spannungen an der Außenseite

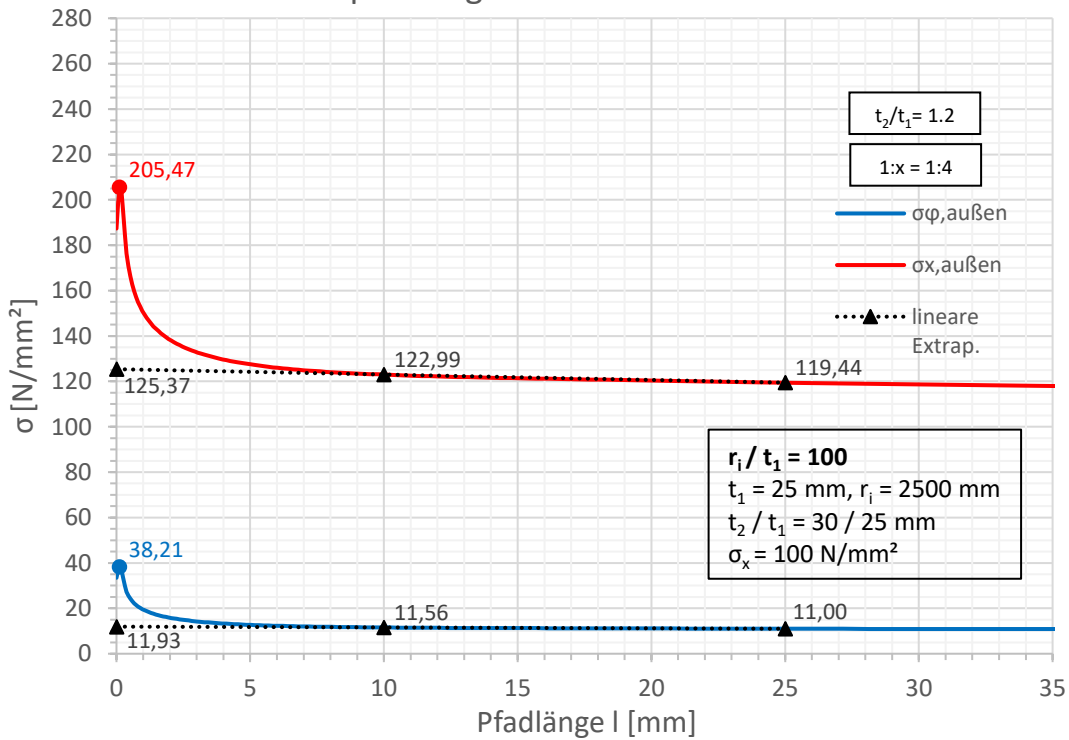


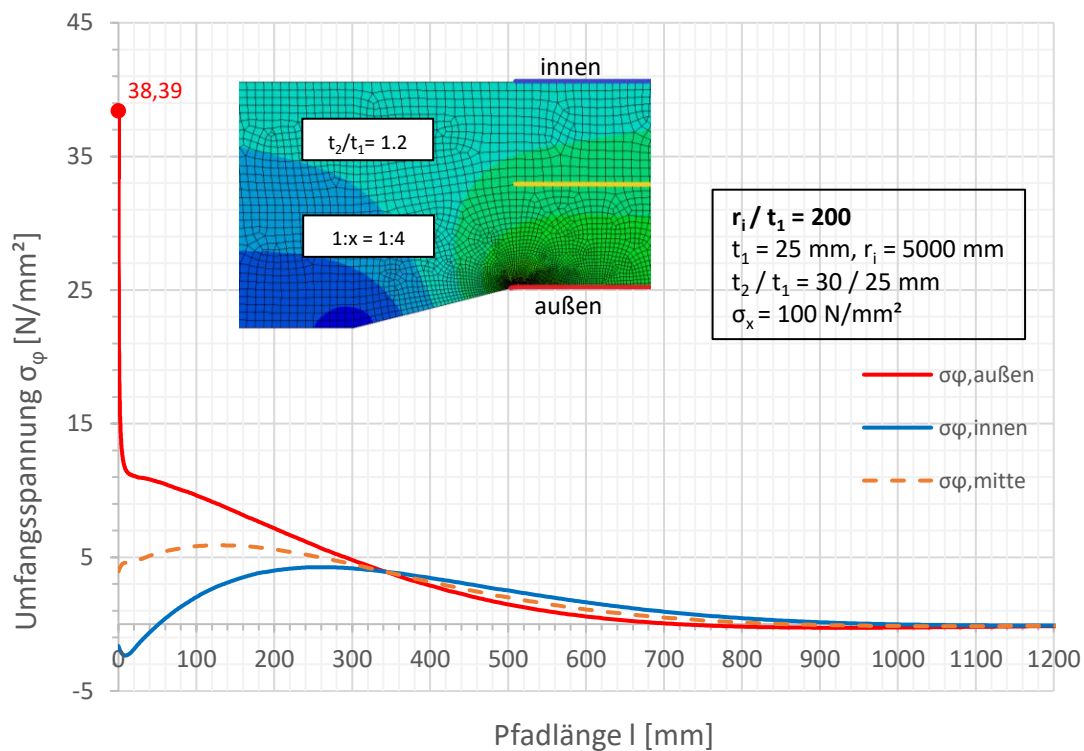
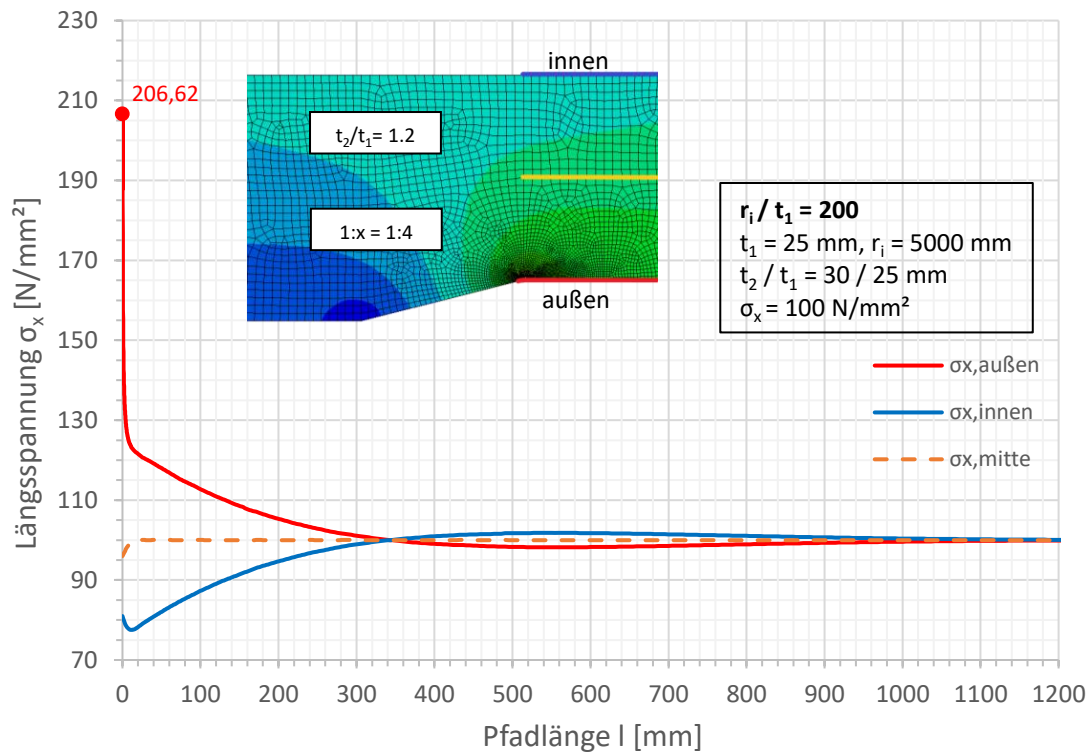


Spannungen an der Außenseite

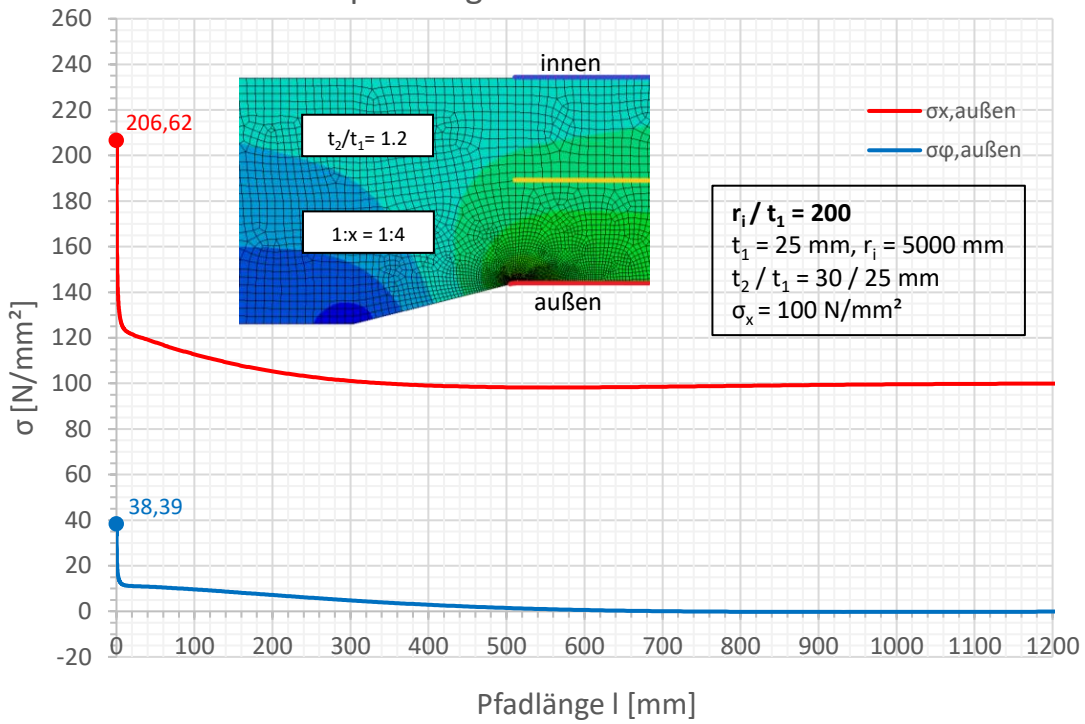


Spannungen an der Außenseite

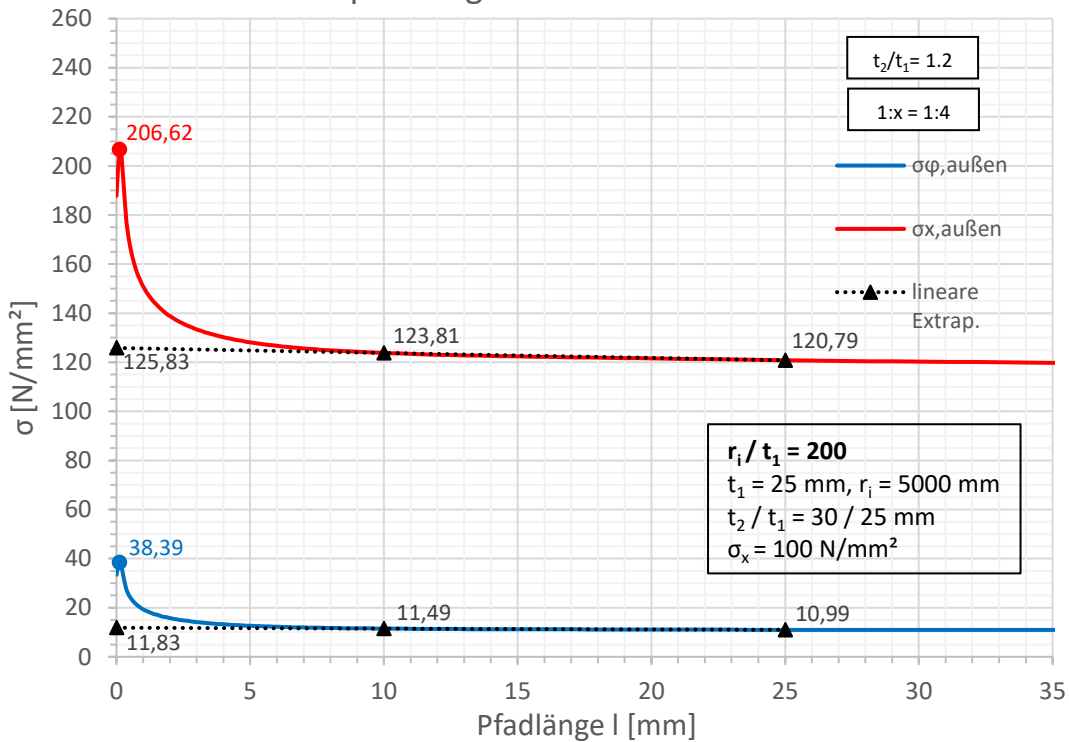


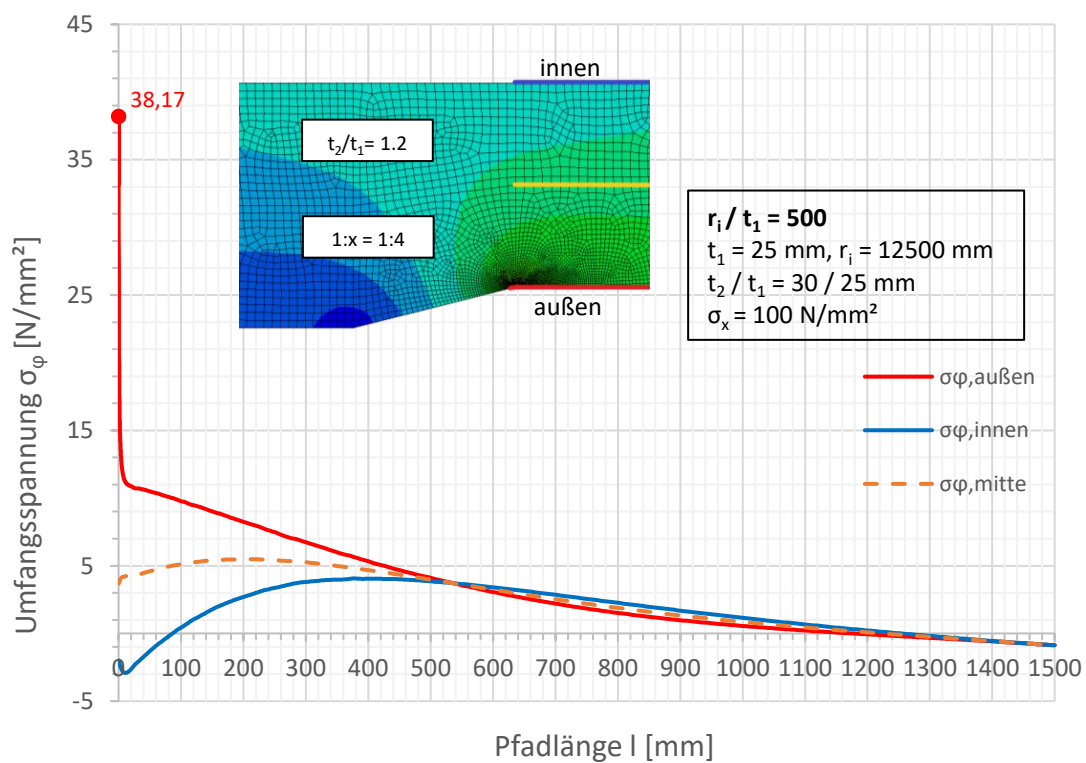
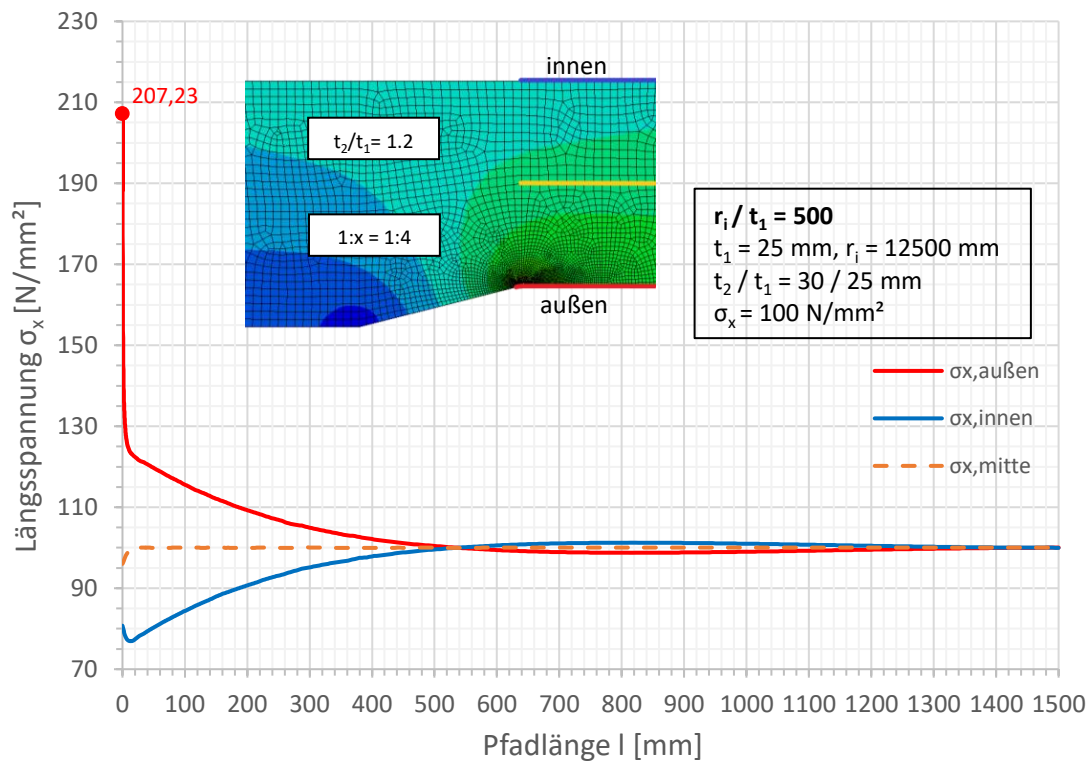


Spannungen an der Außenseite

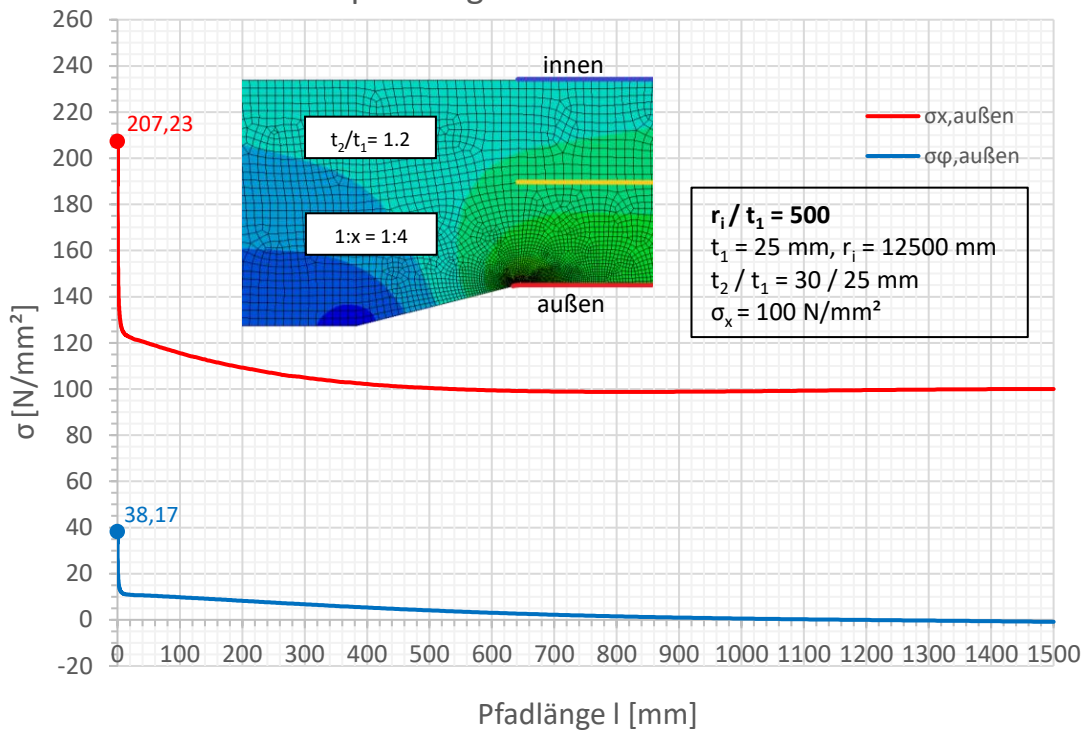


Spannungen an der Außenseite

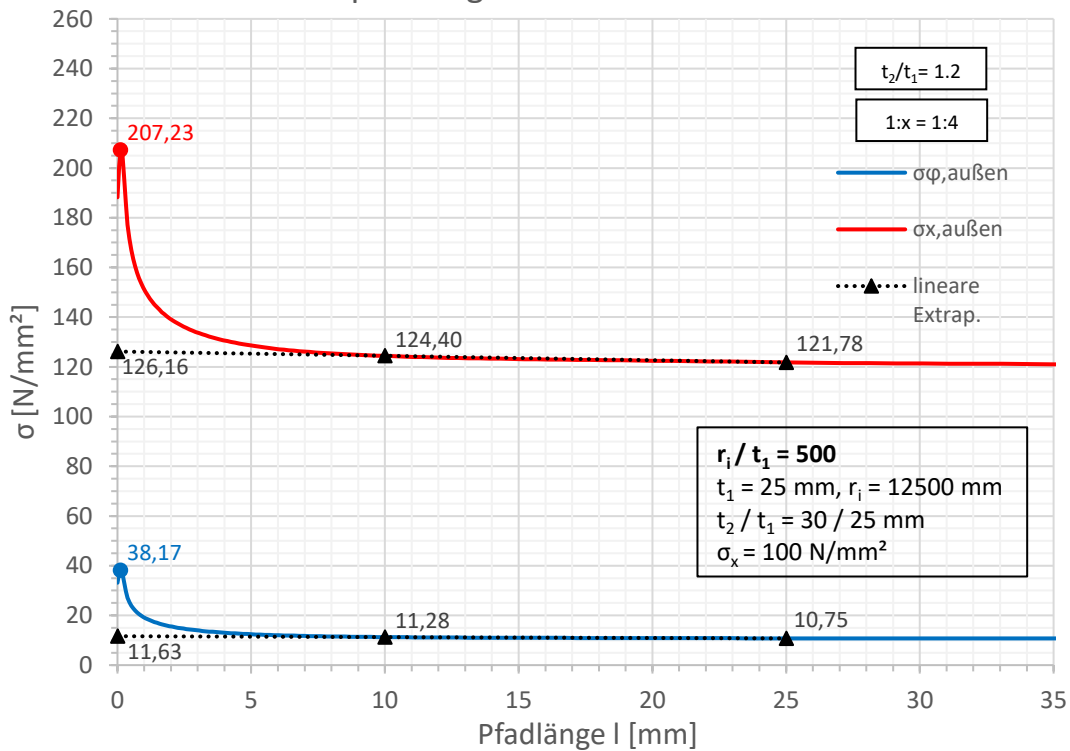


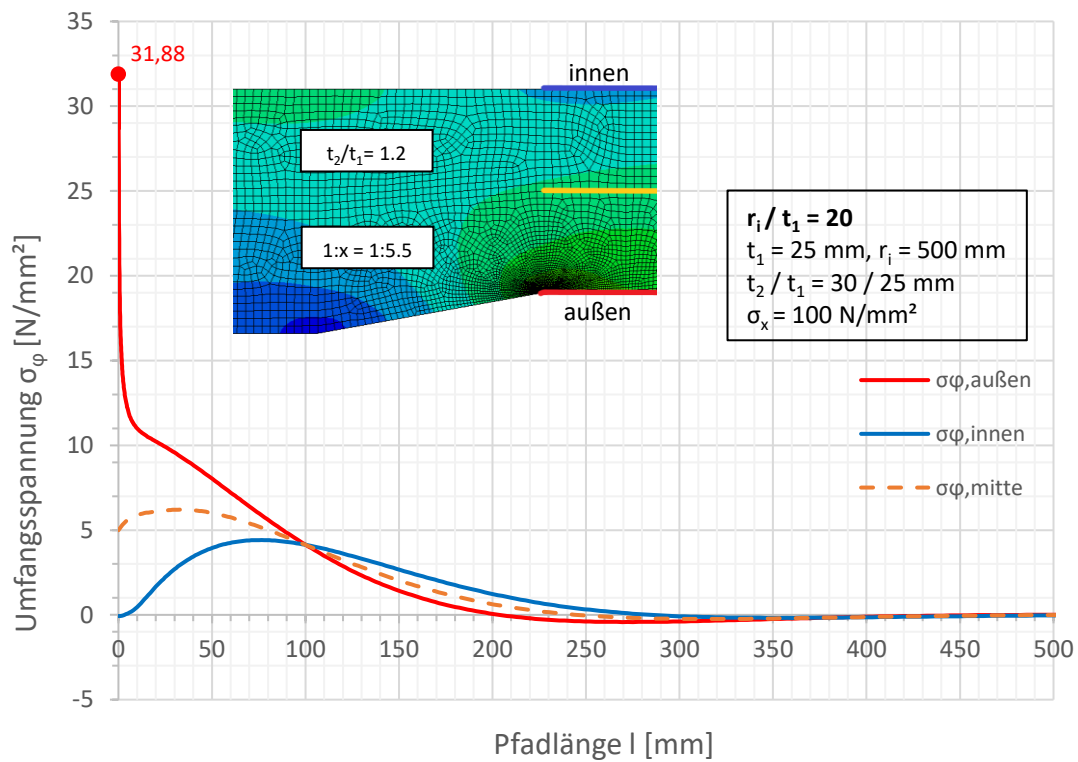
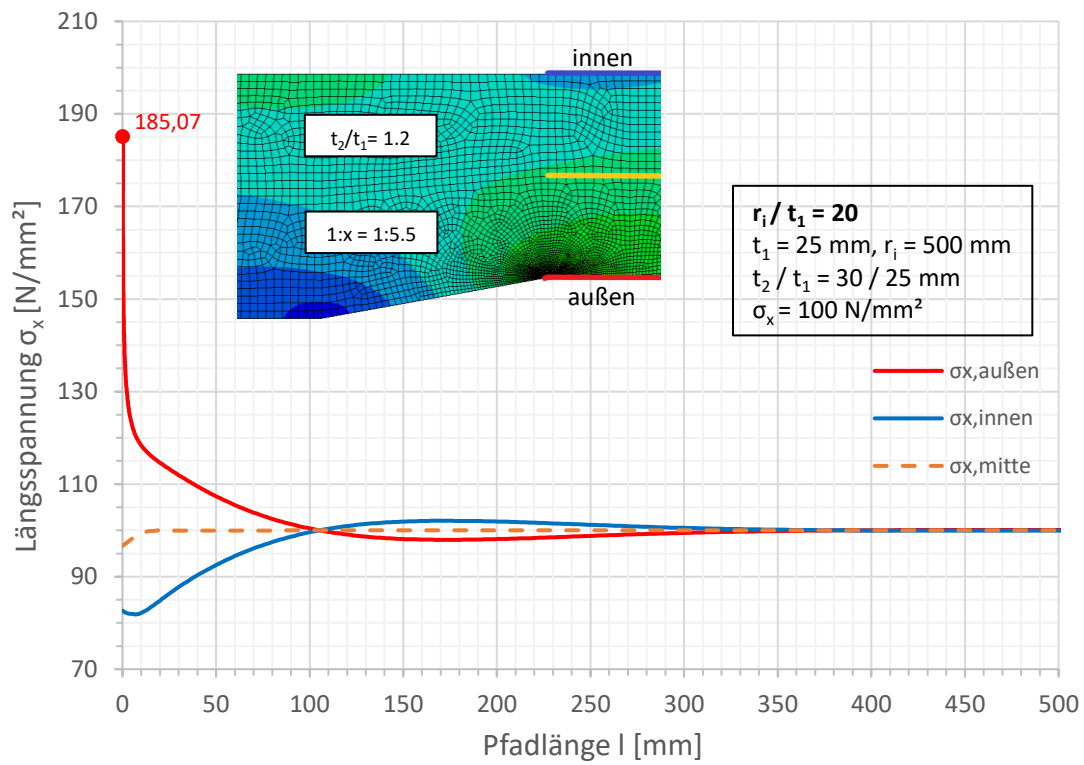


Spannungen an der Außenseite

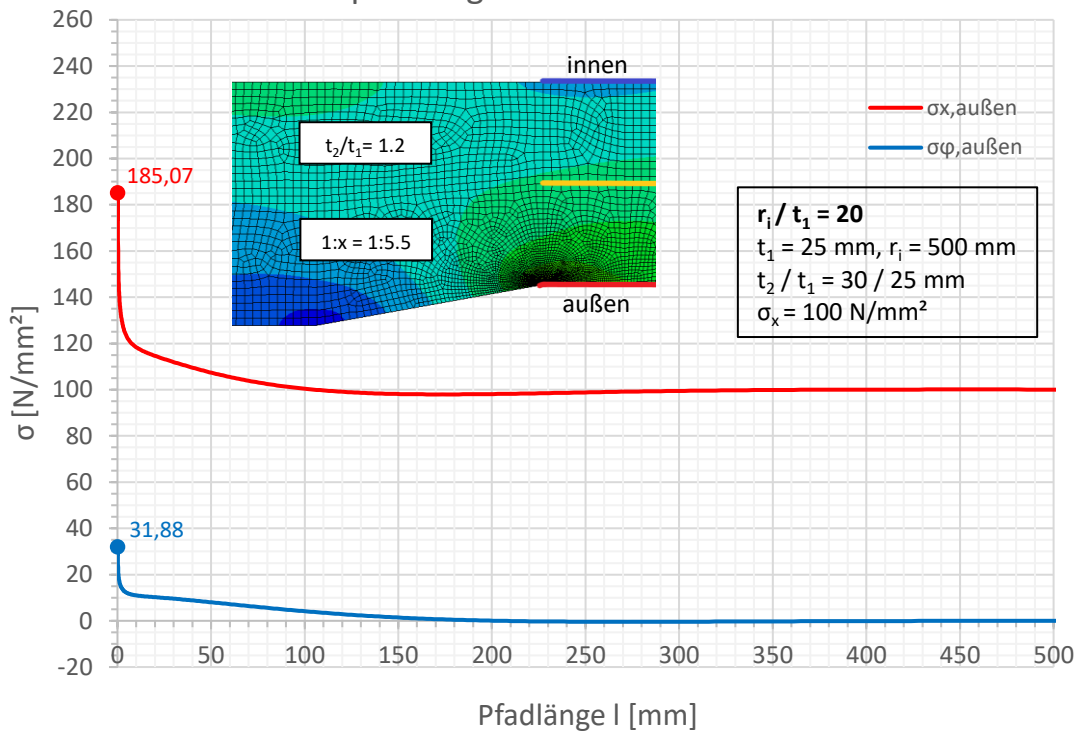


Spannungen an der Außenseite

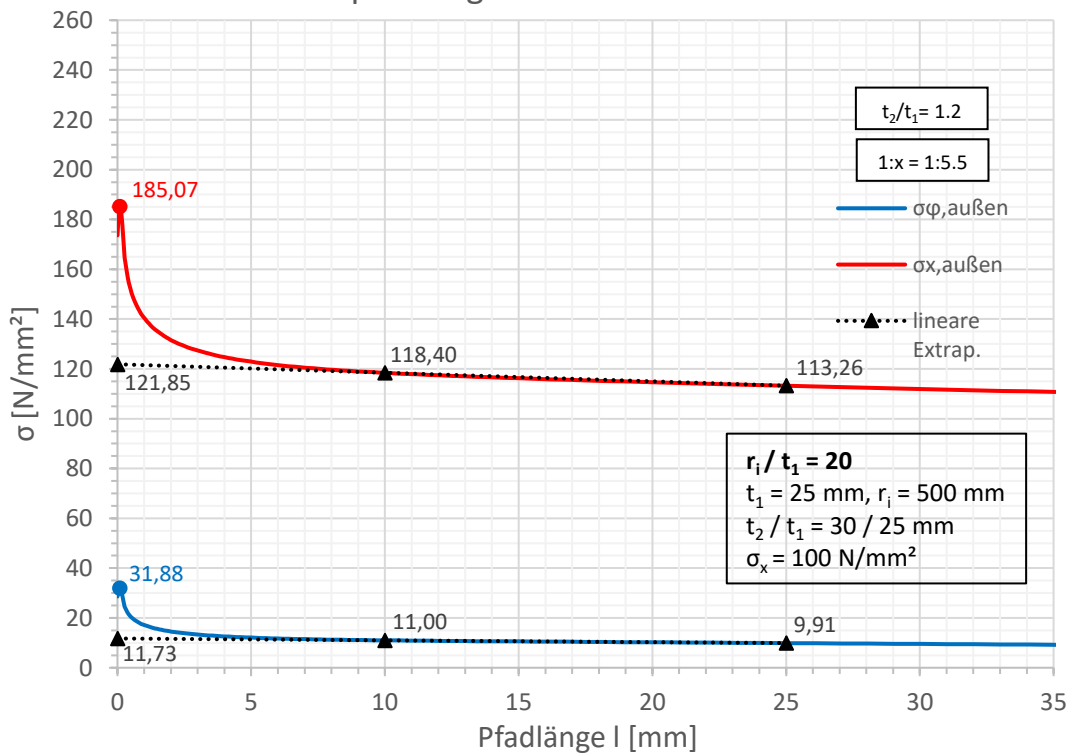


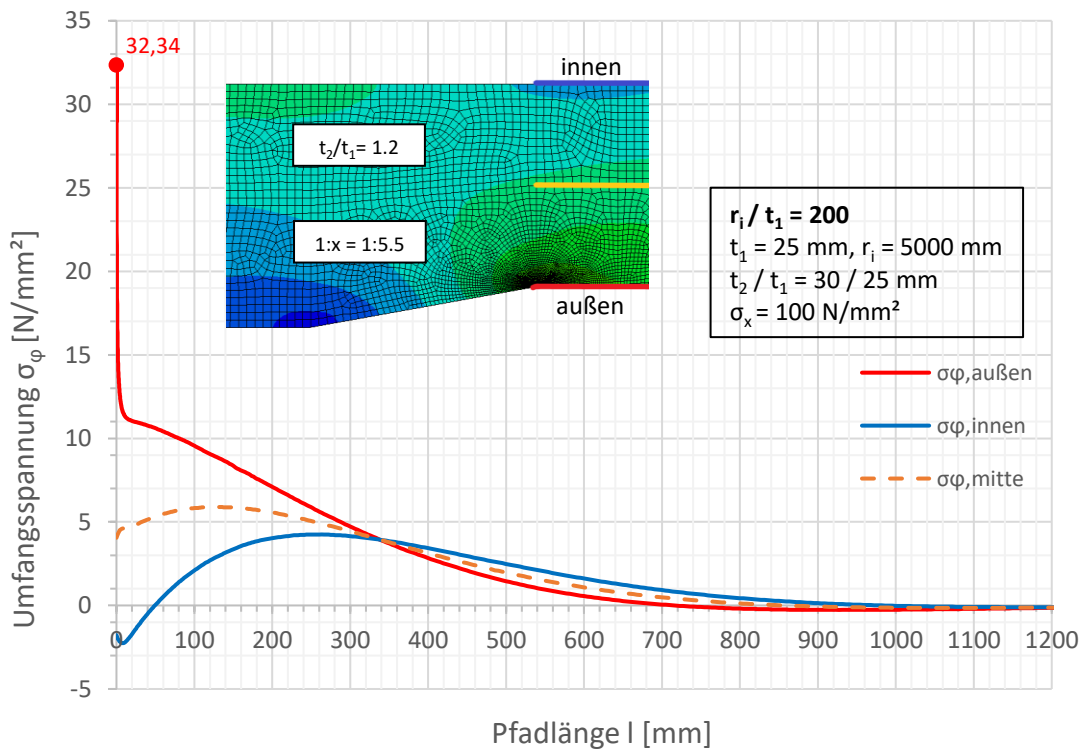
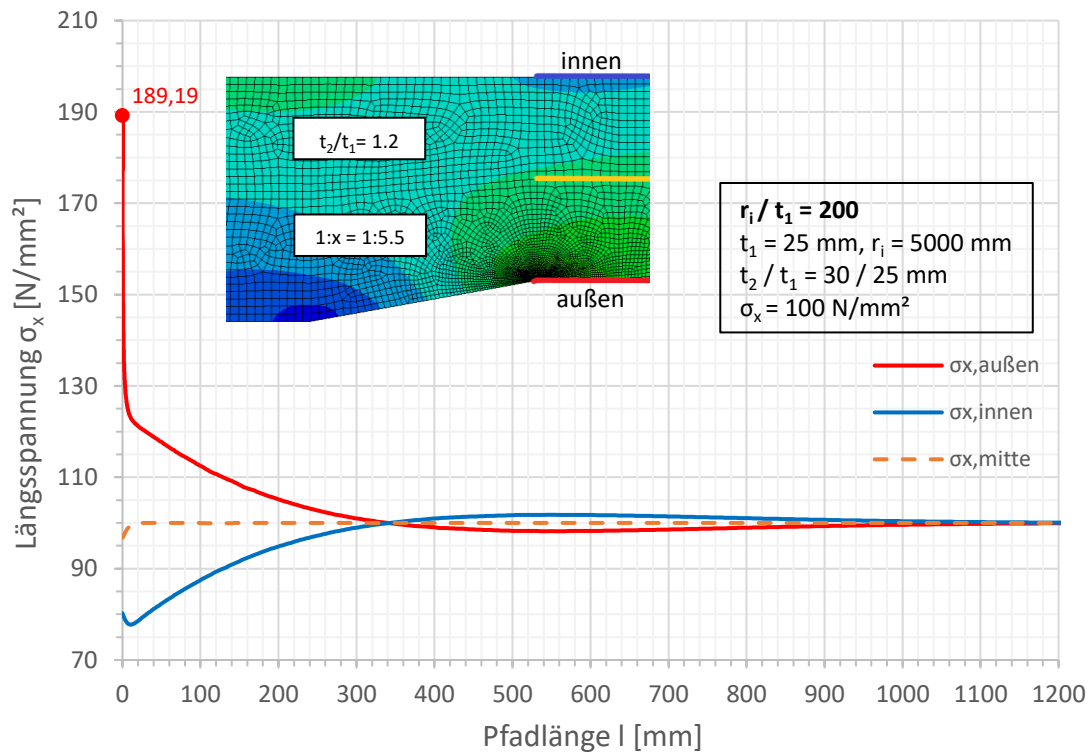


Spannungen an der Außenseite

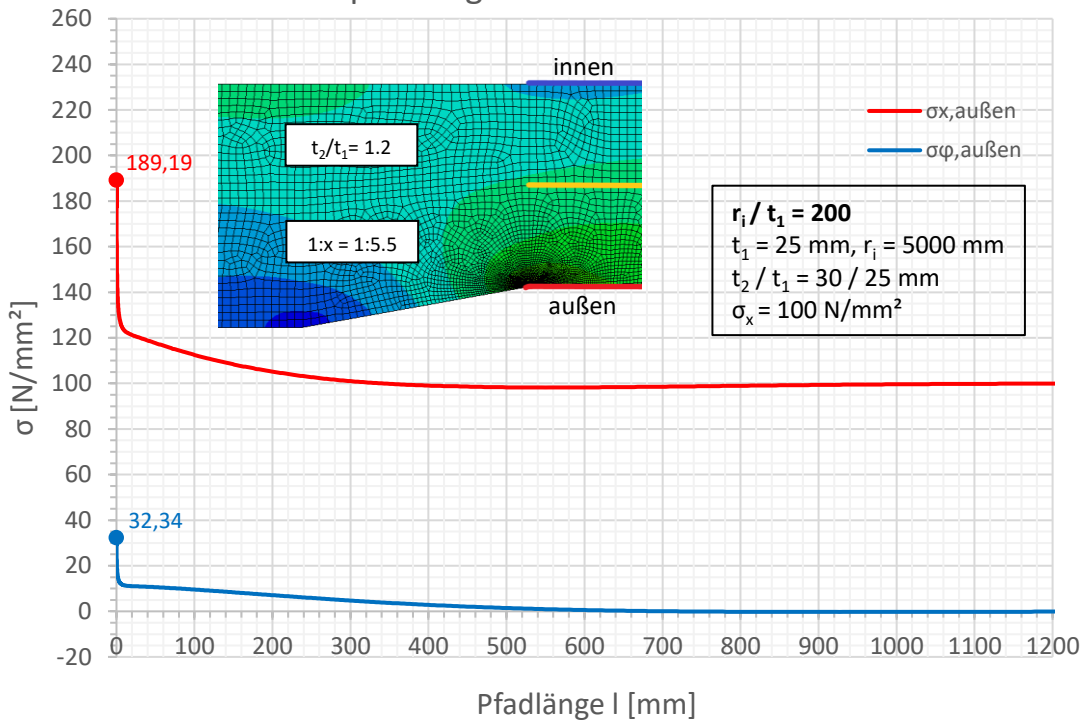


Spannungen an der Außenseite

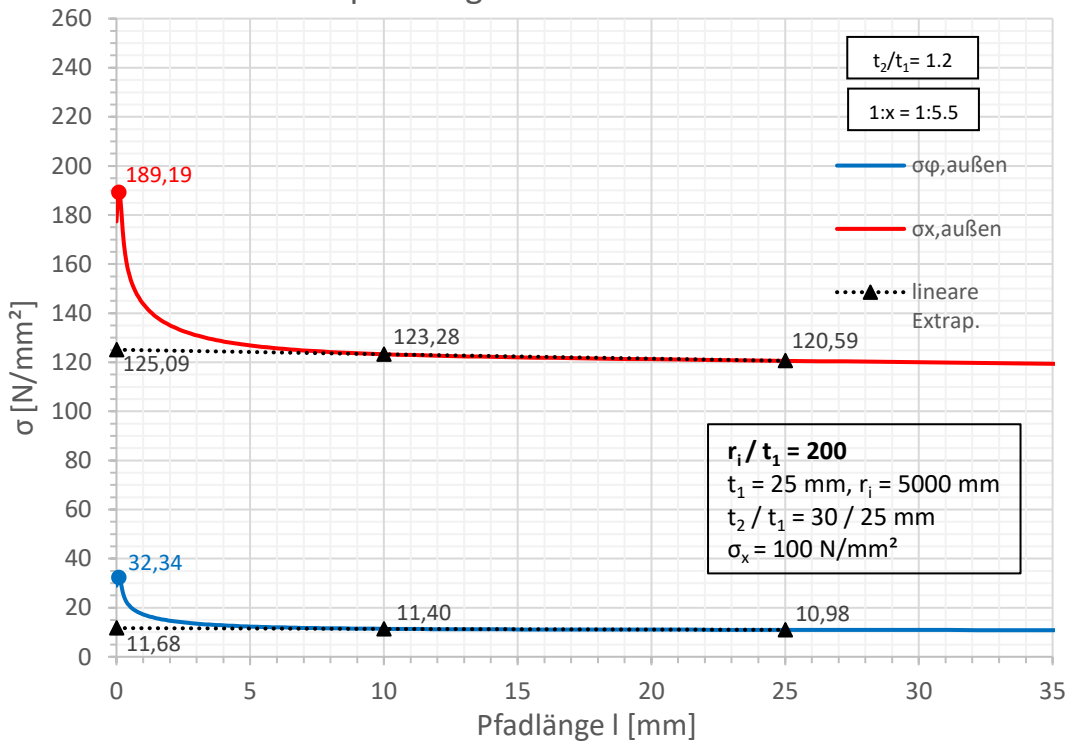


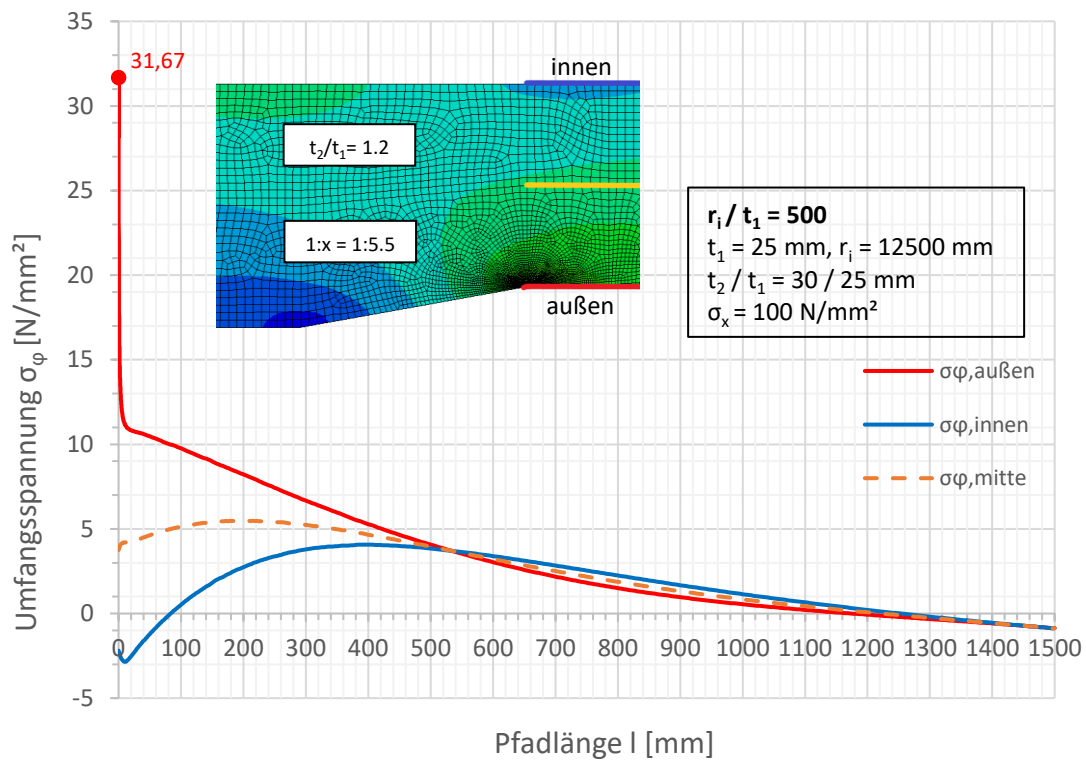
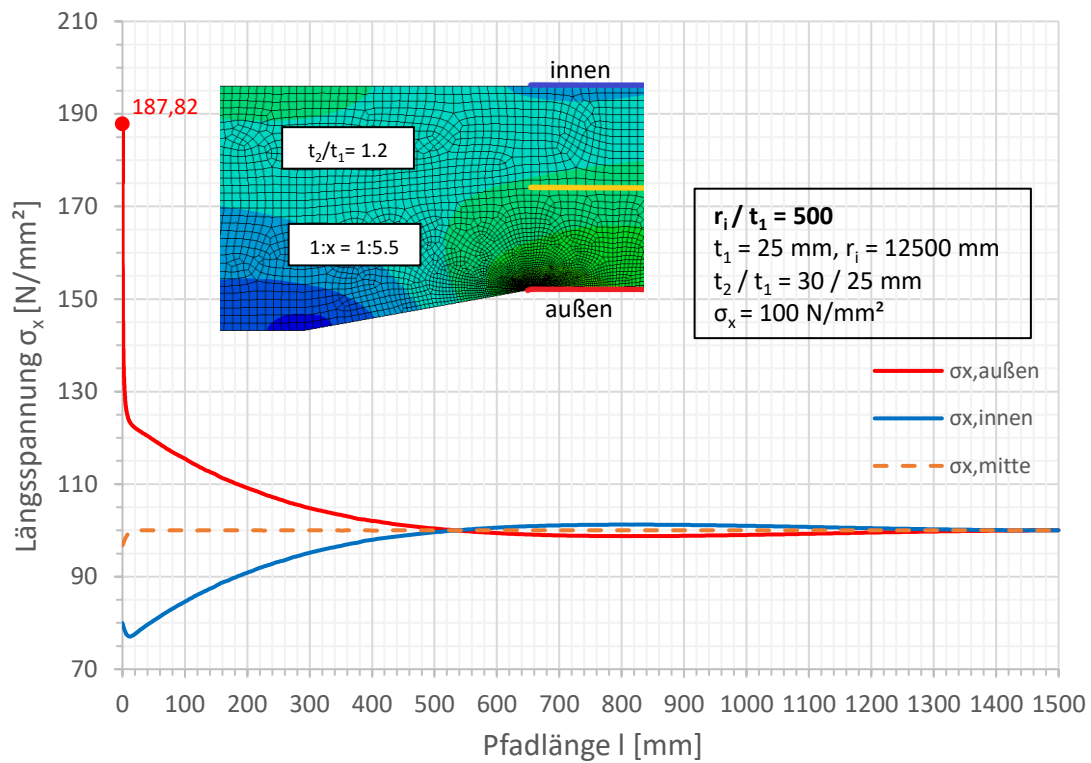


Spannungen an der Außenseite

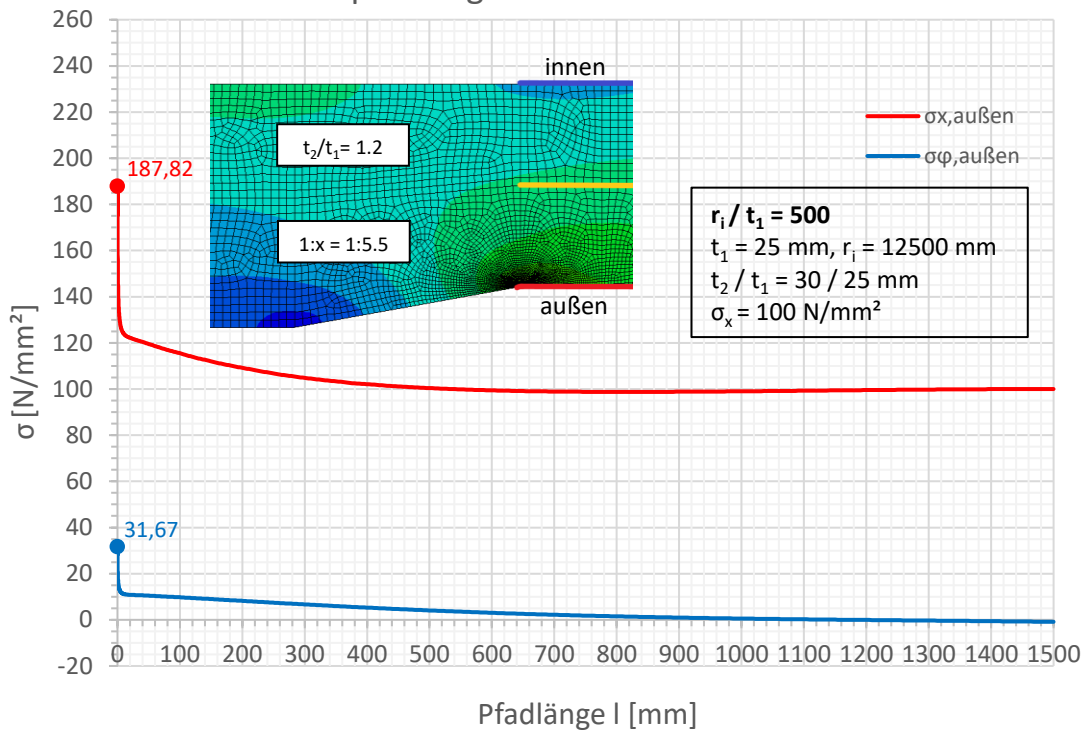


Spannungen an der Außenseite

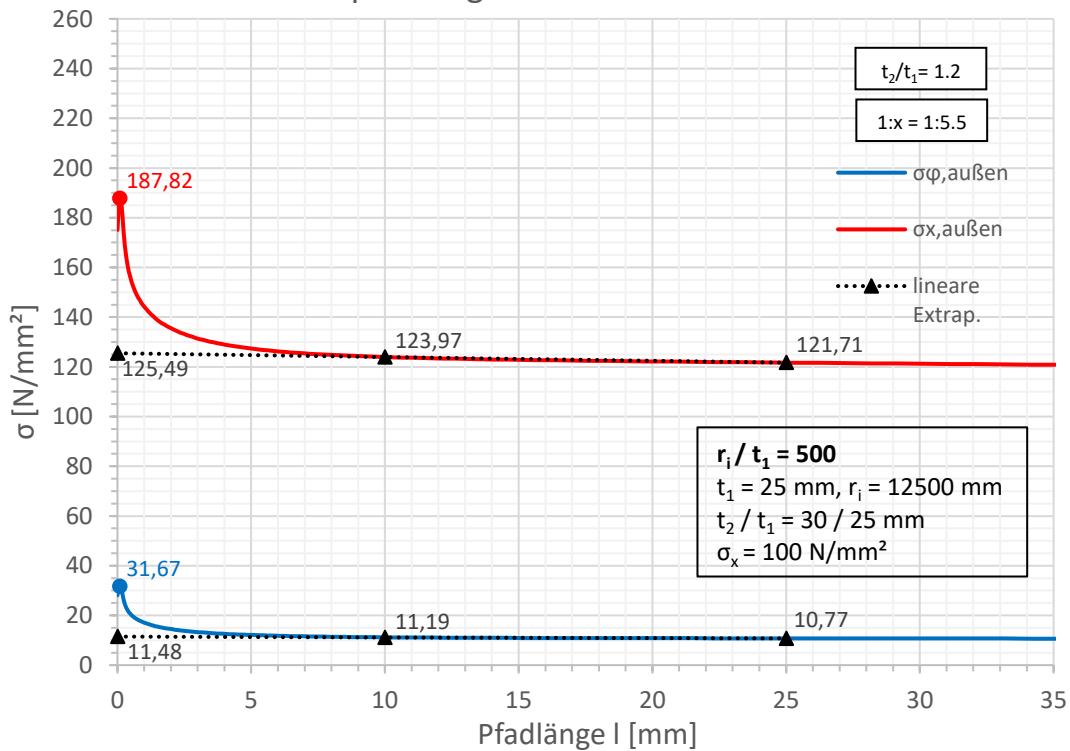


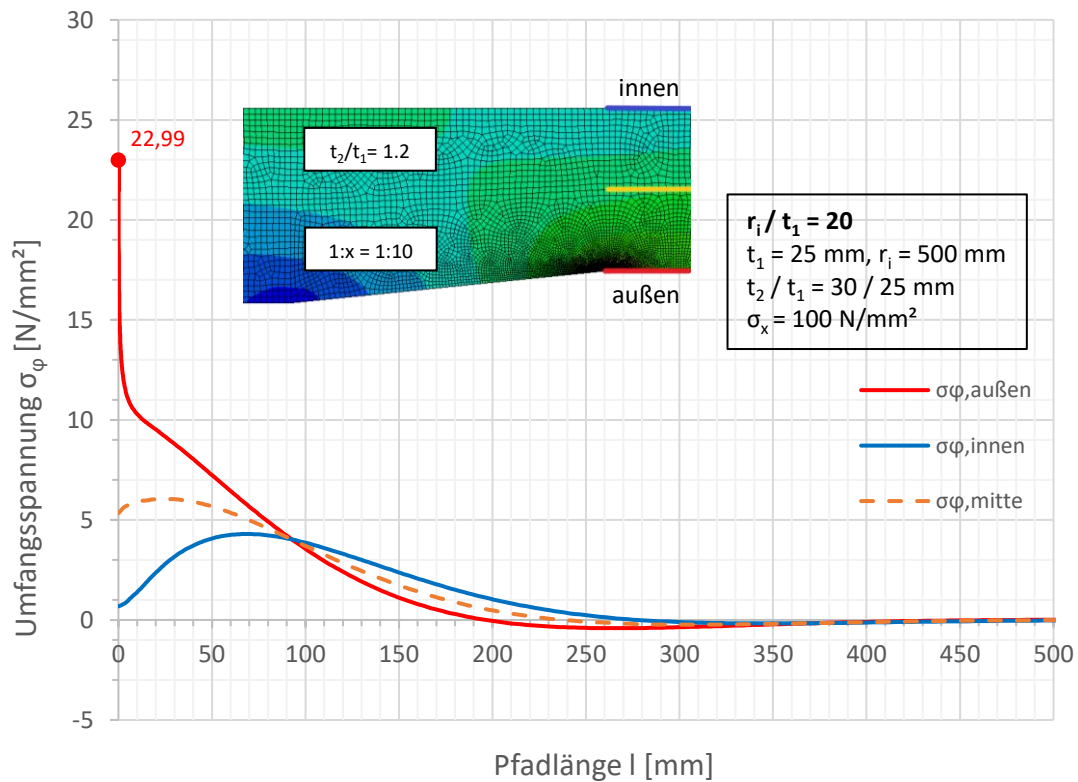
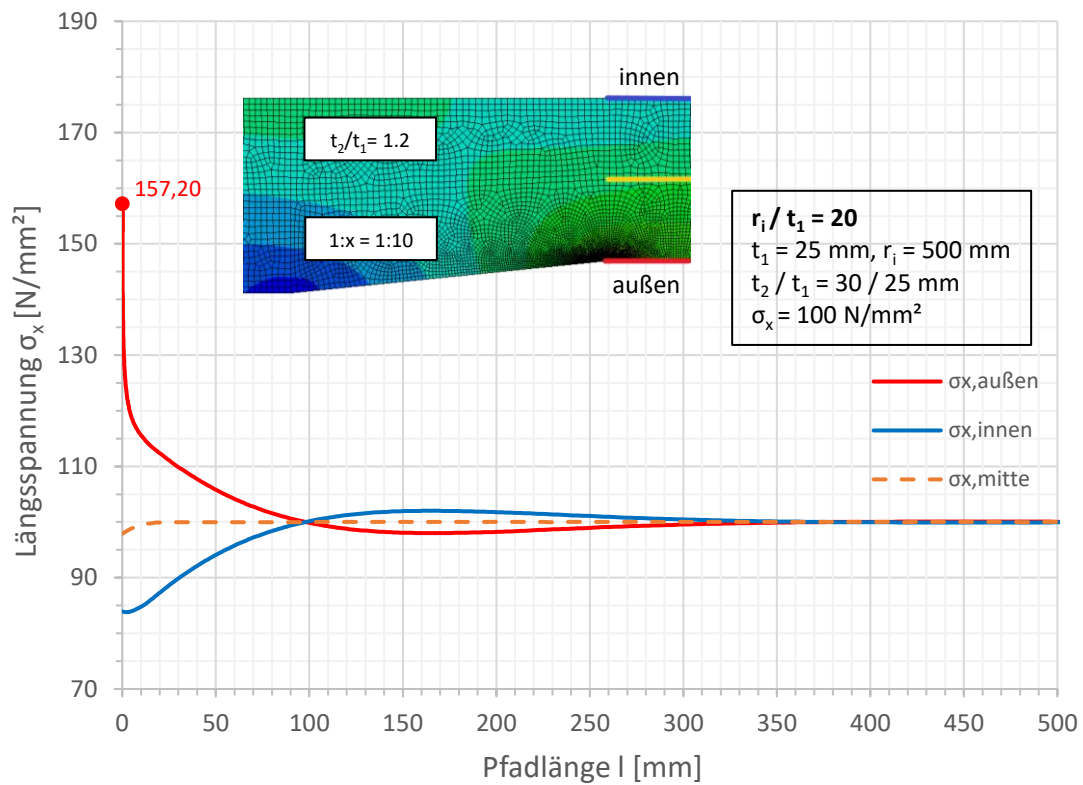


Spannungen an der Außenseite

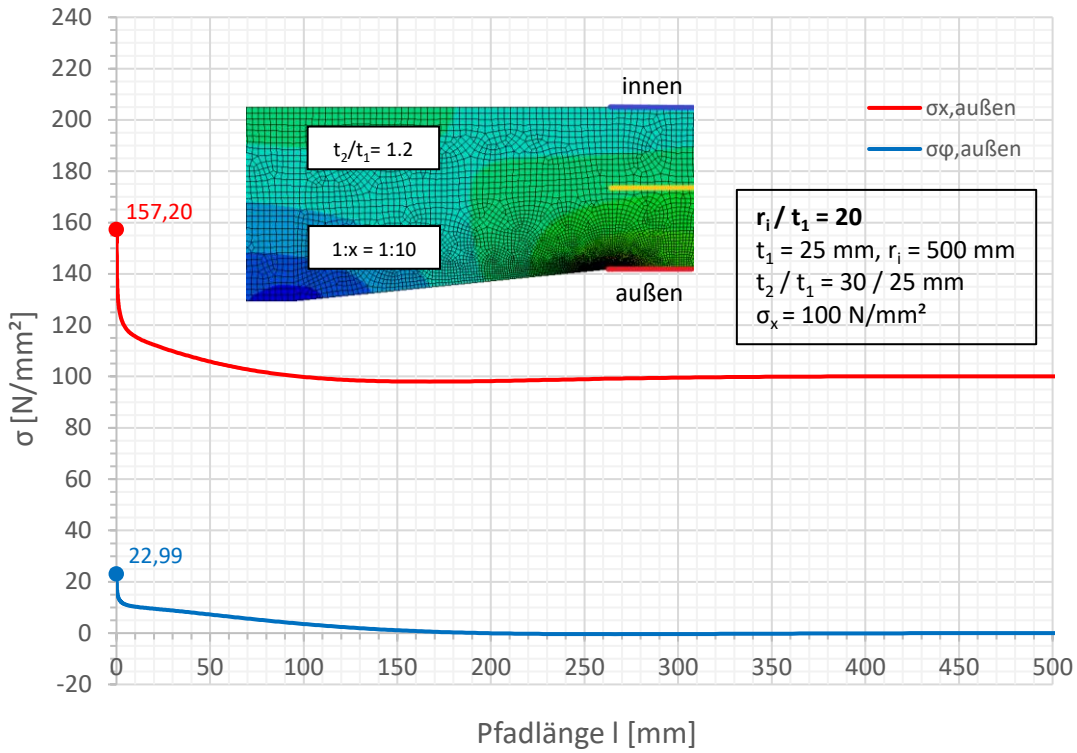


Spannungen an der Außenseite

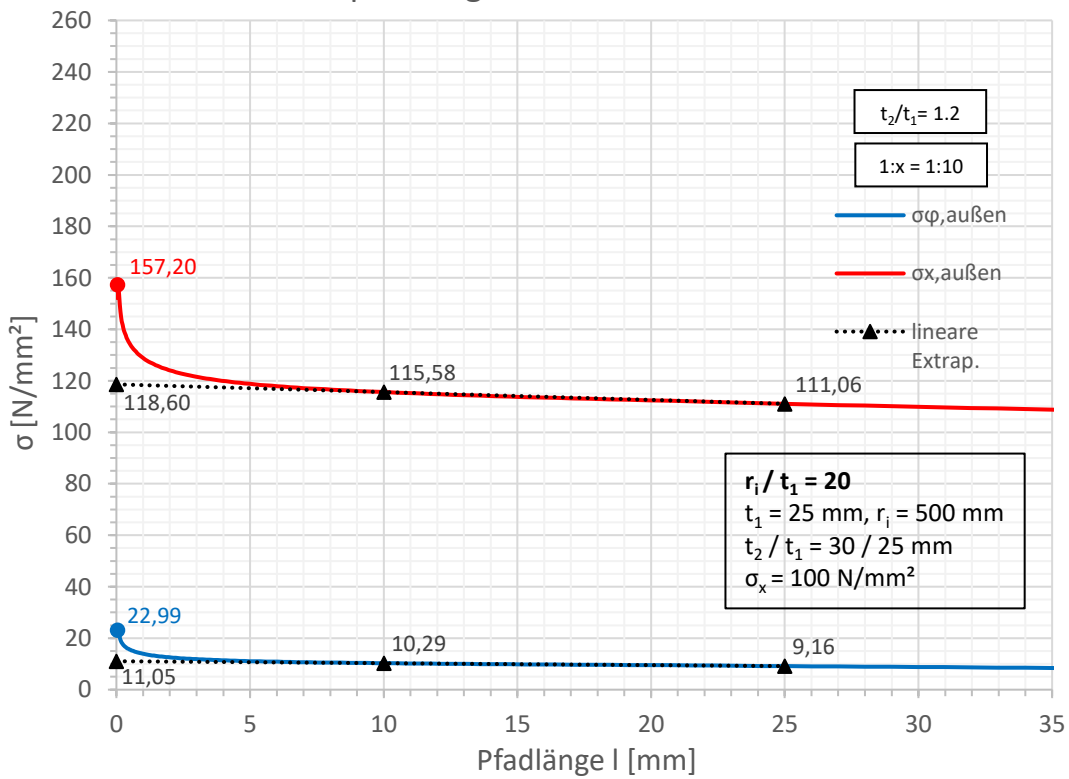


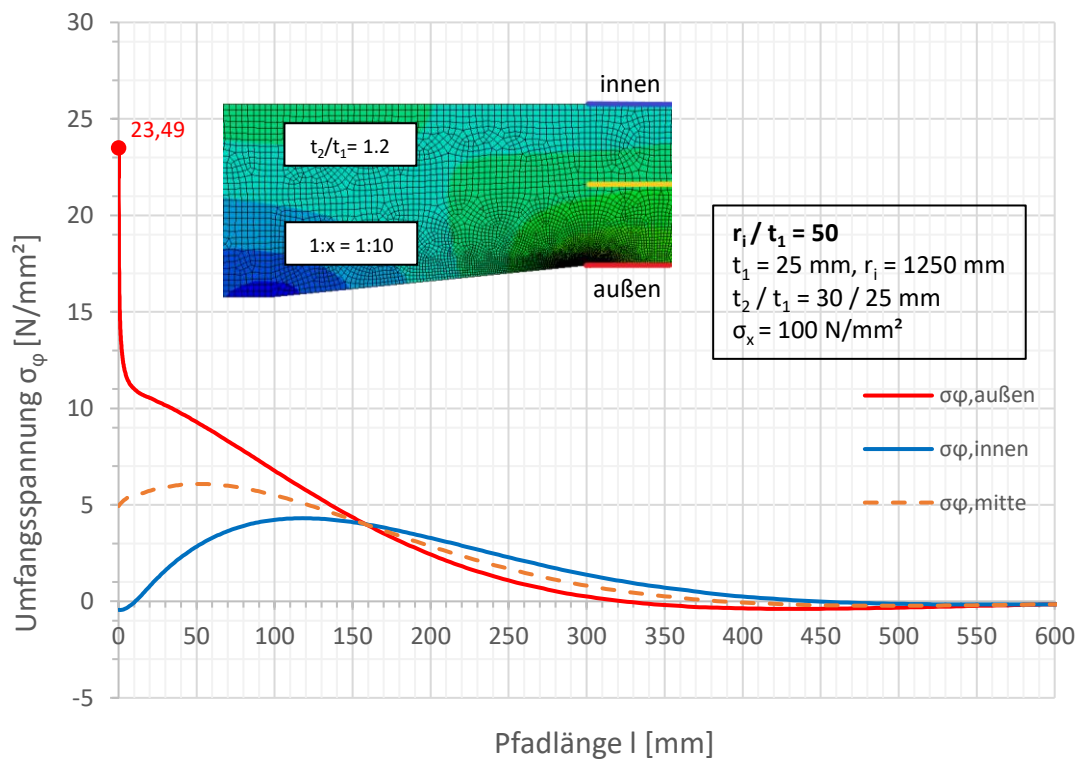
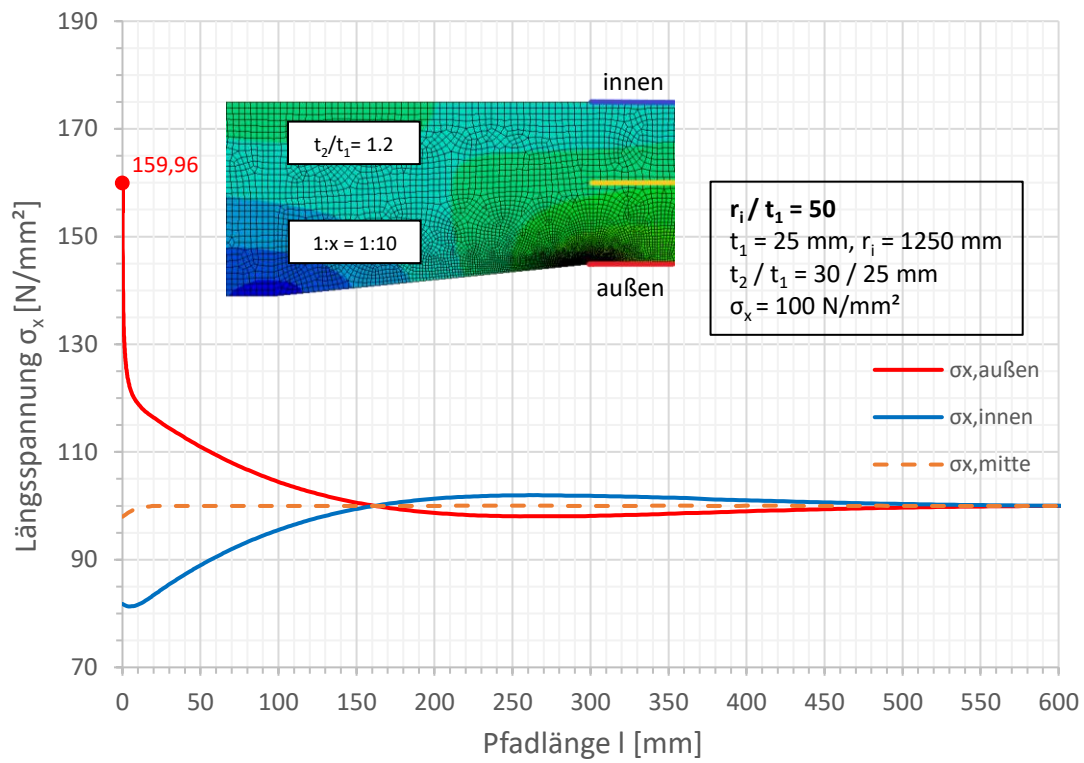


Spannungen an der Außenseite

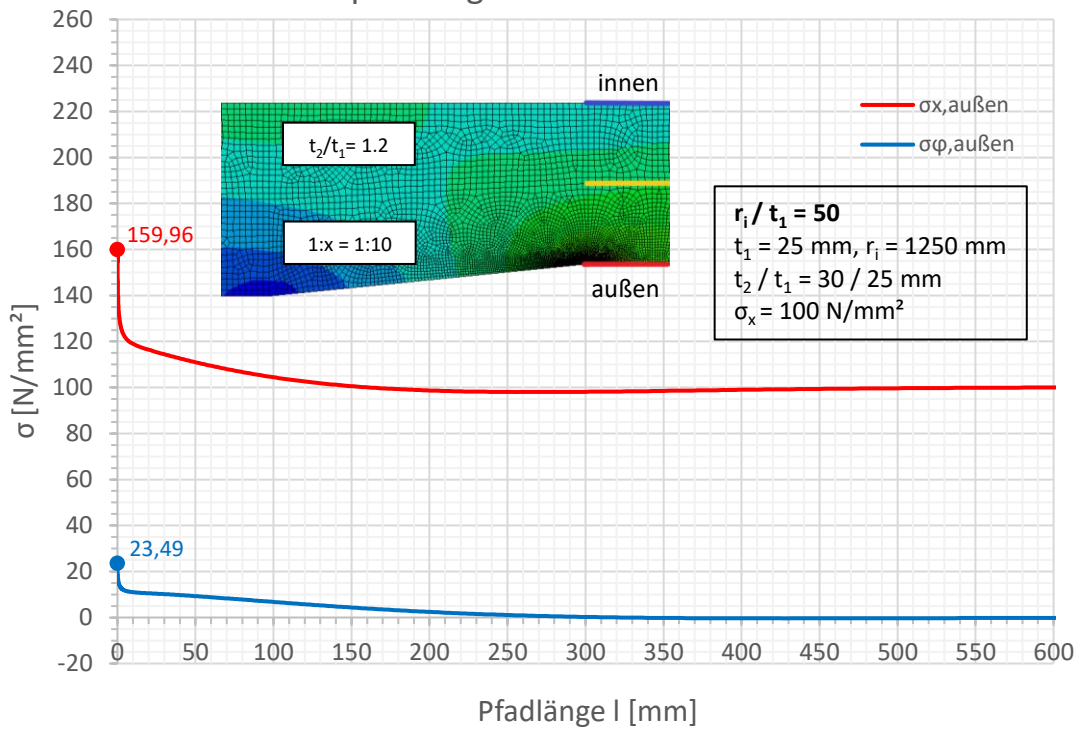


Spannungen an der Außenseite

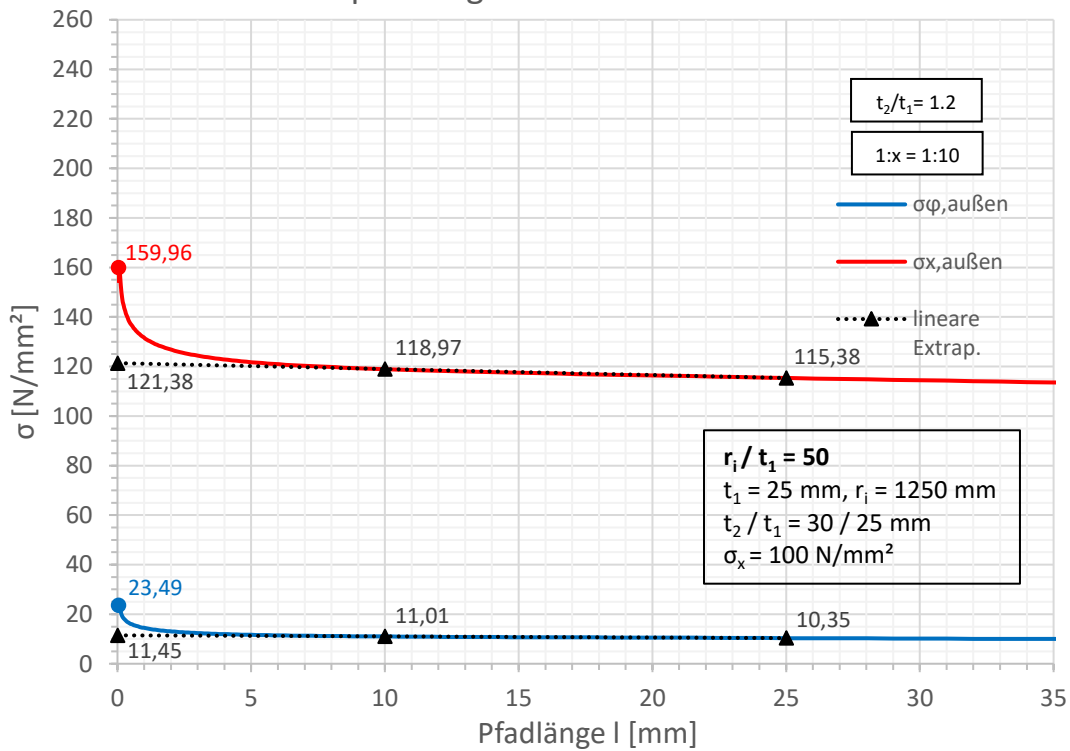


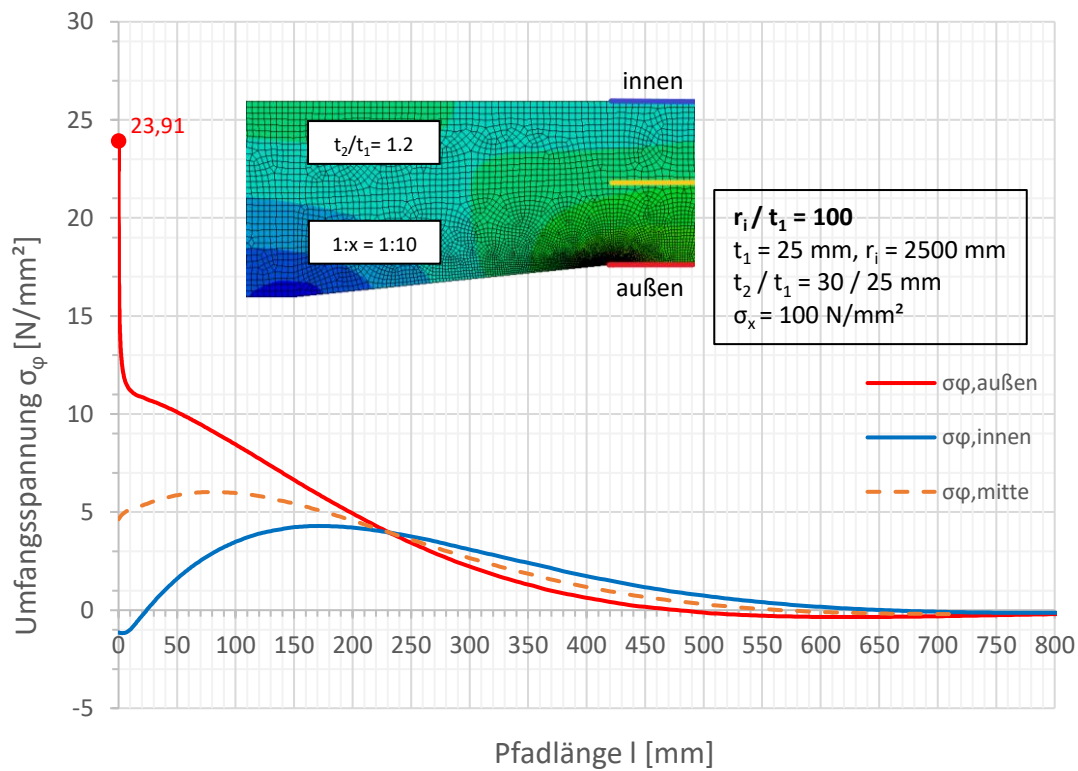
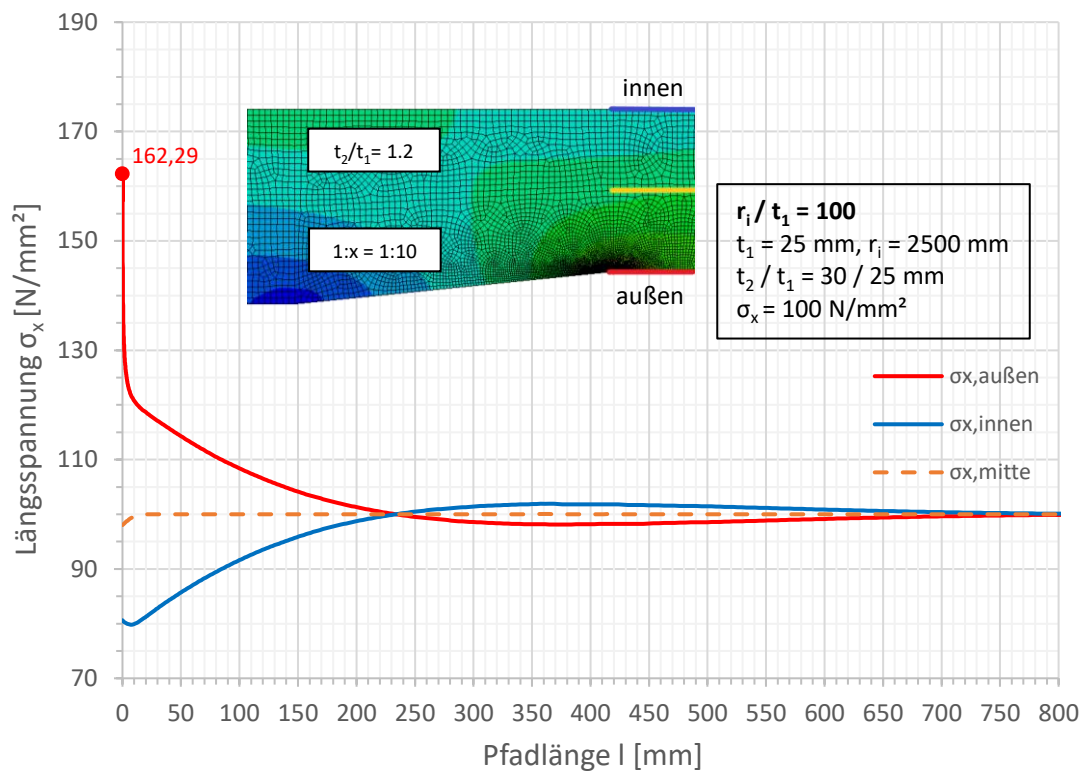


Spannungen an der Außenseite

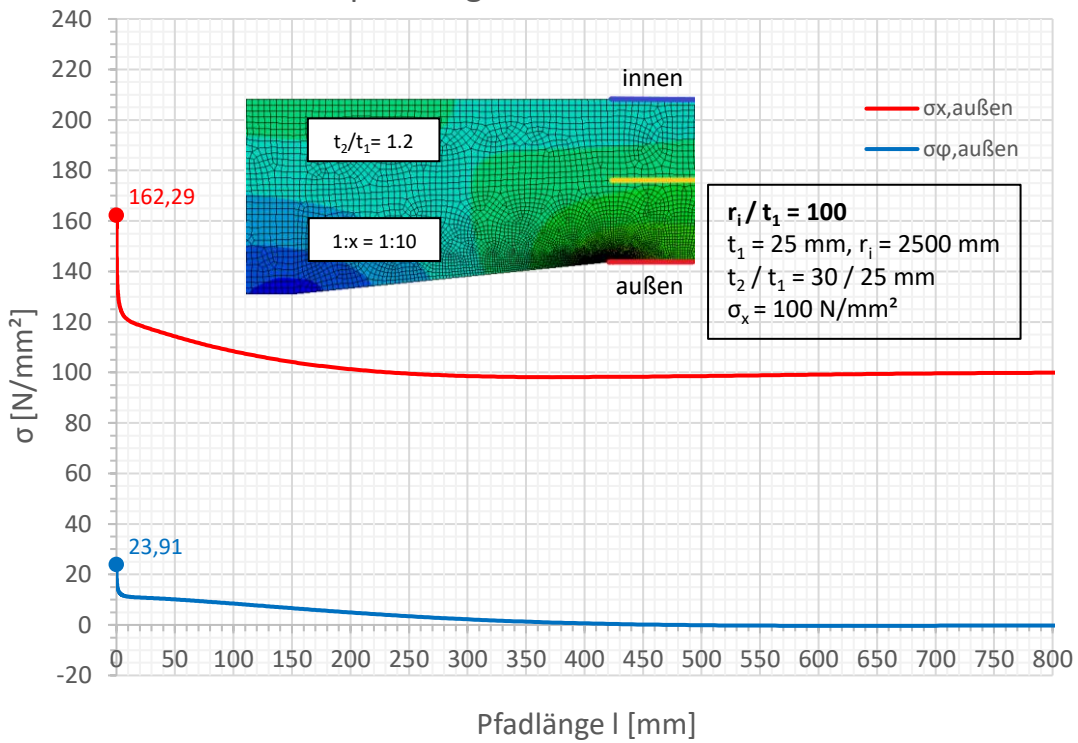


Spannungen an der Außenseite

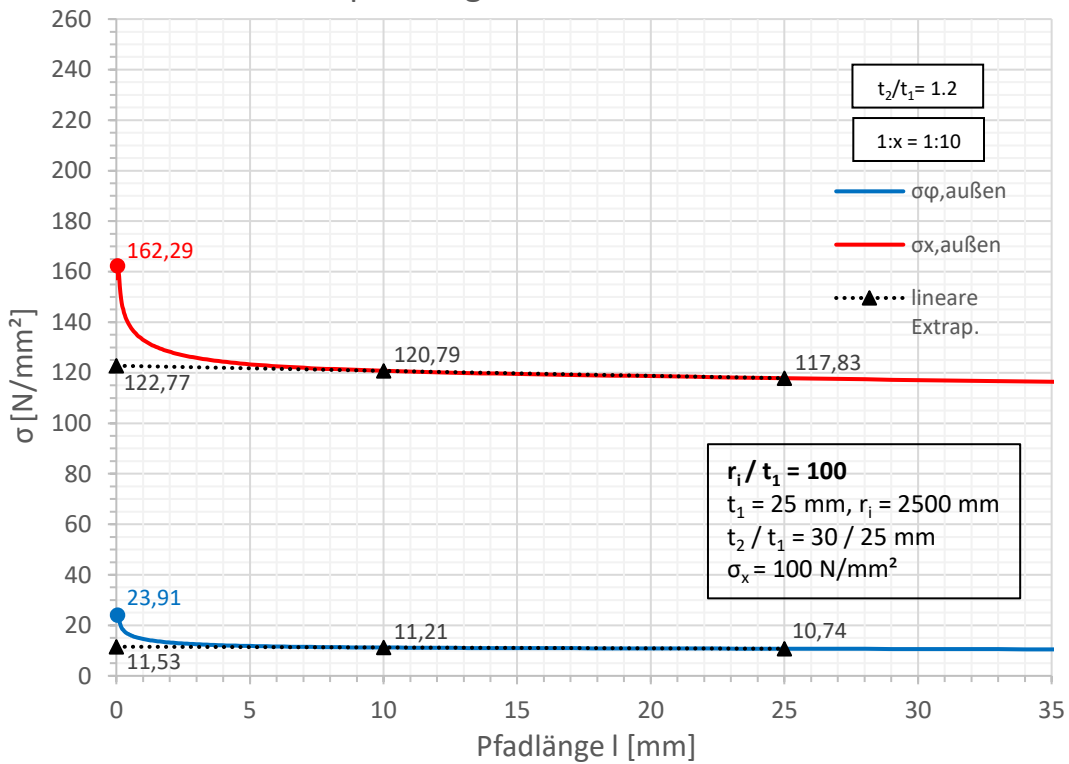


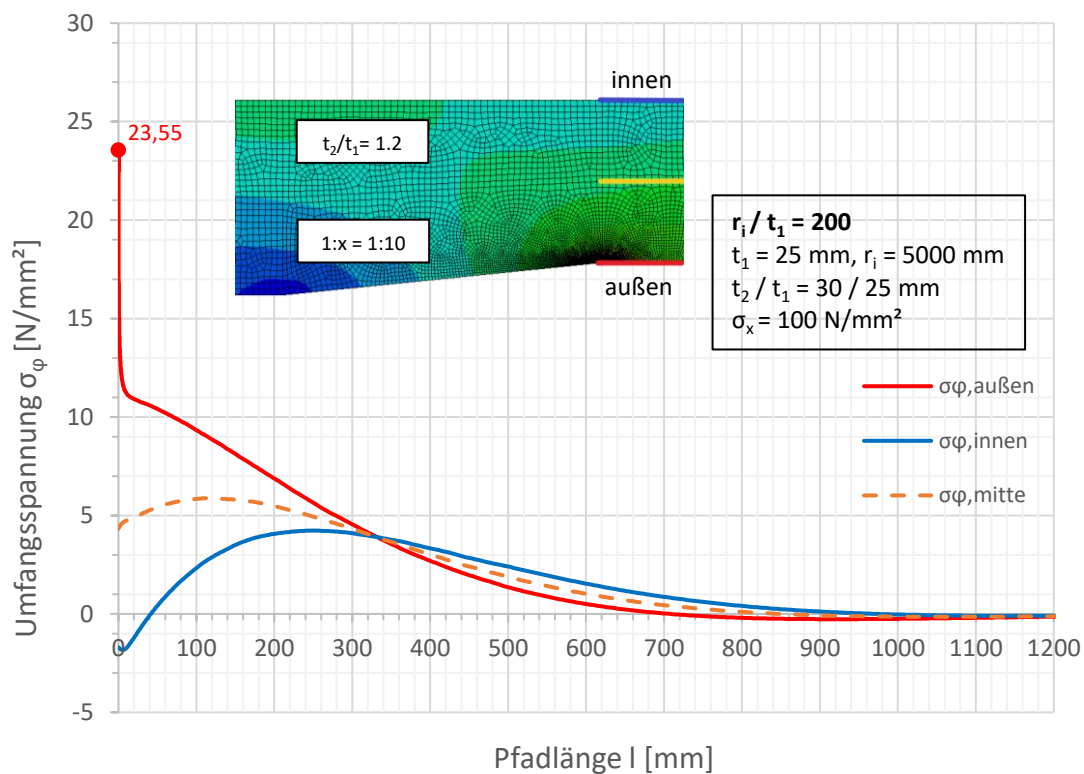
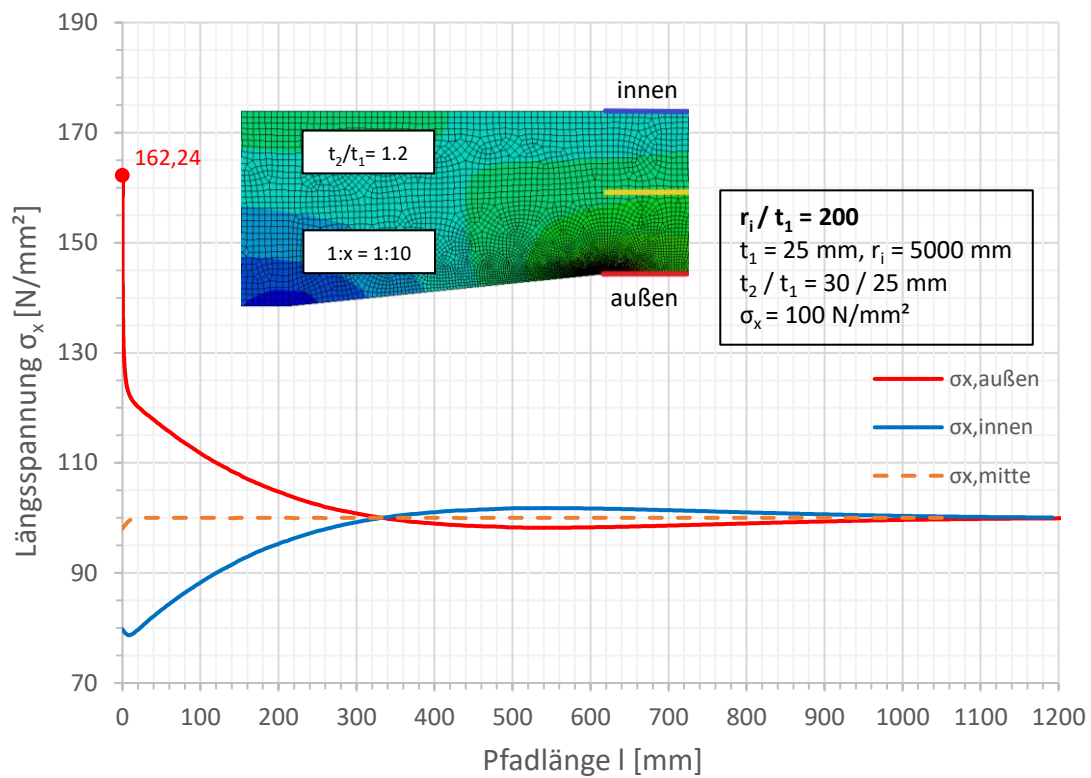


Spannungen an der Außenseite

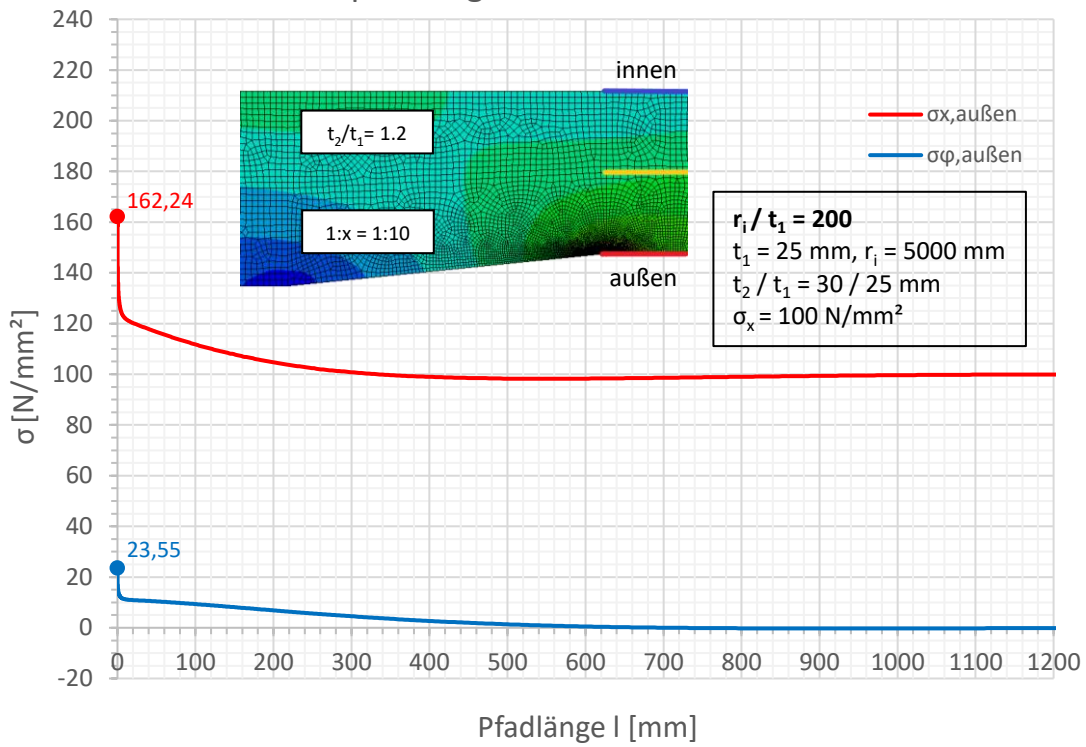


Spannungen an der Außenseite

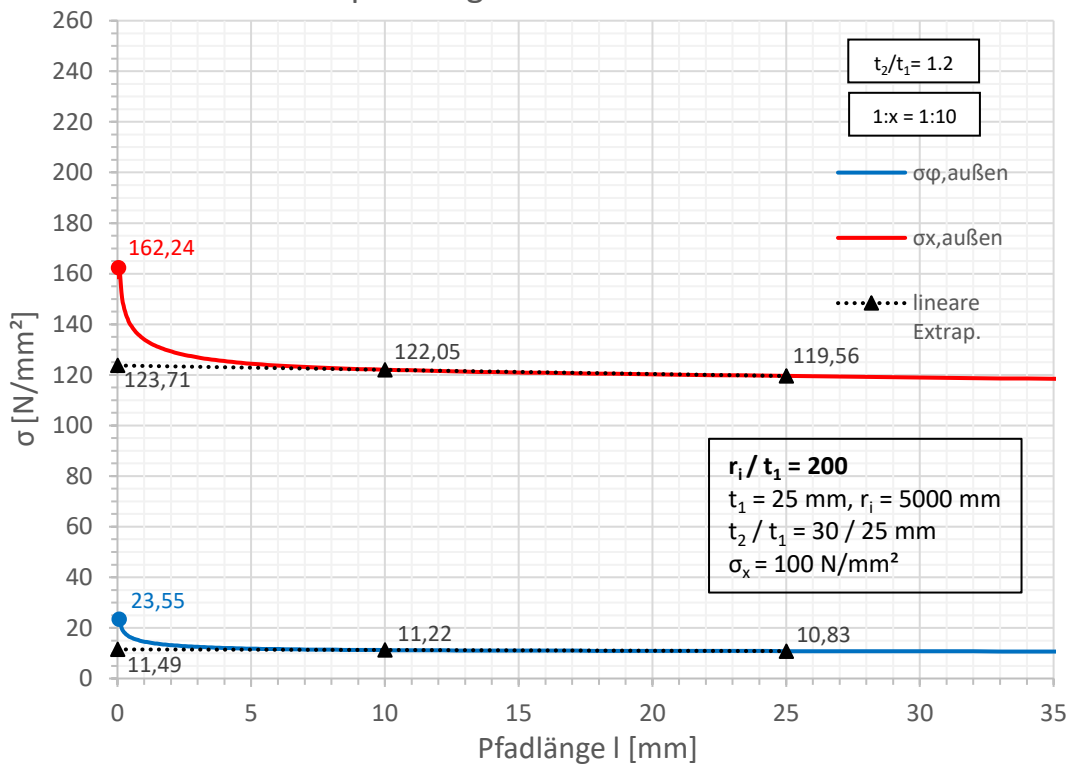


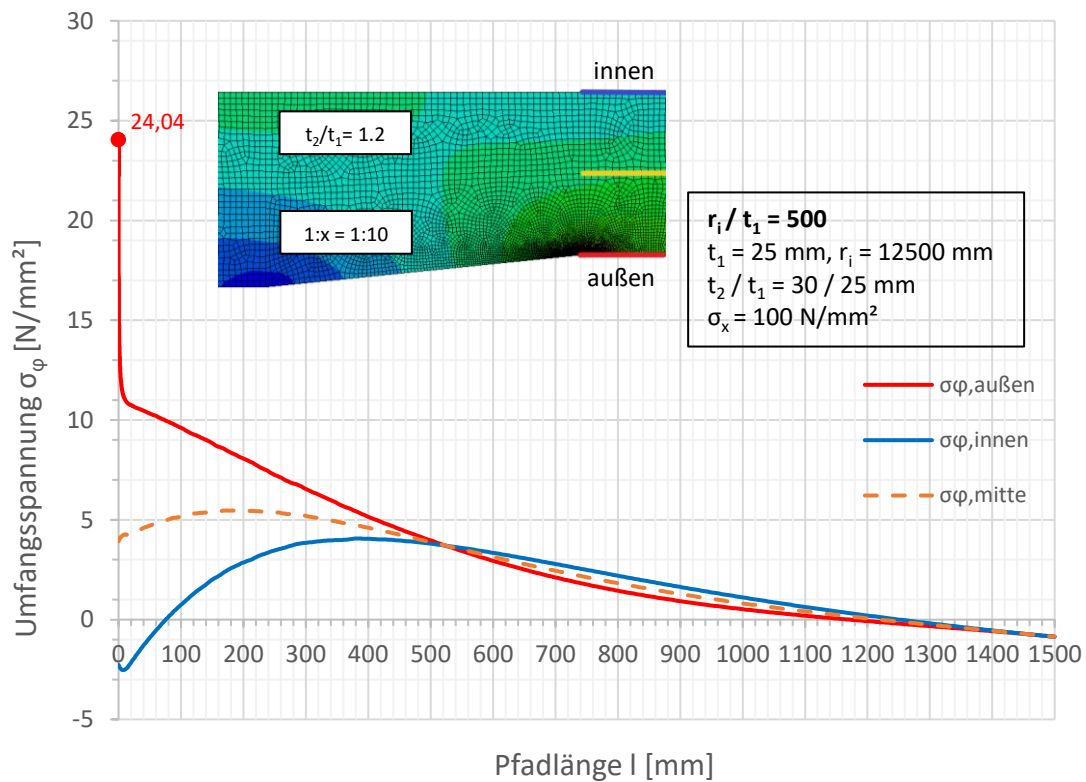
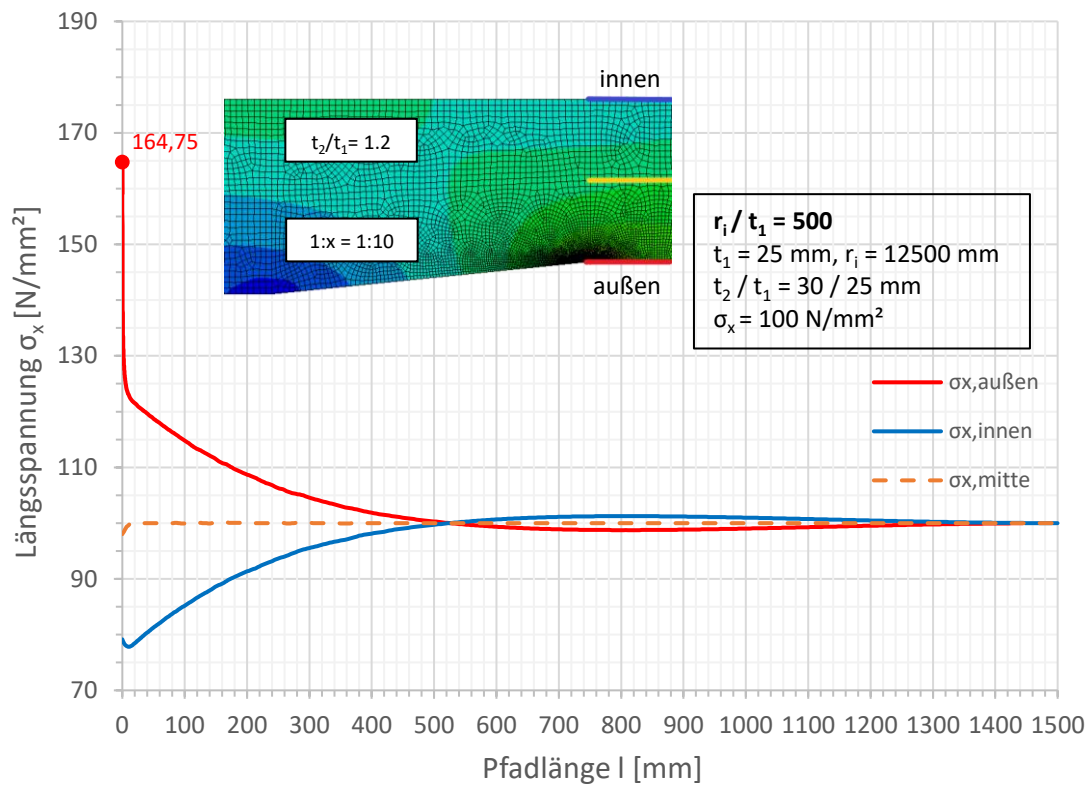


Spannungen an der Außenseite

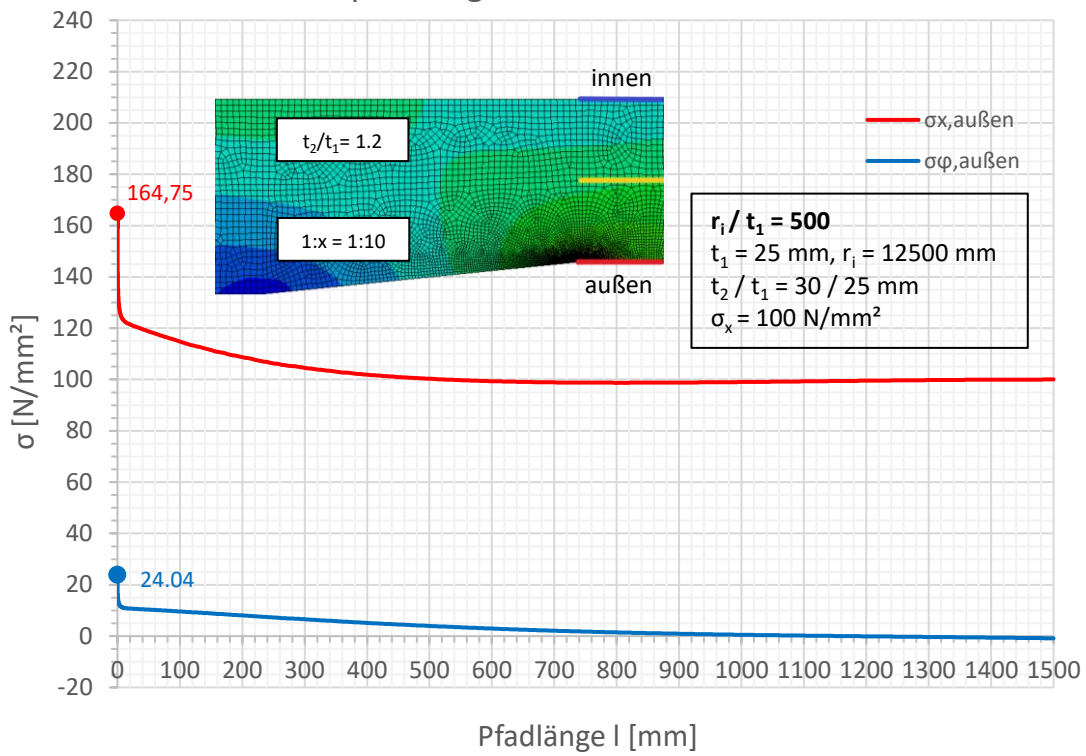


Spannungen an der Außenseite

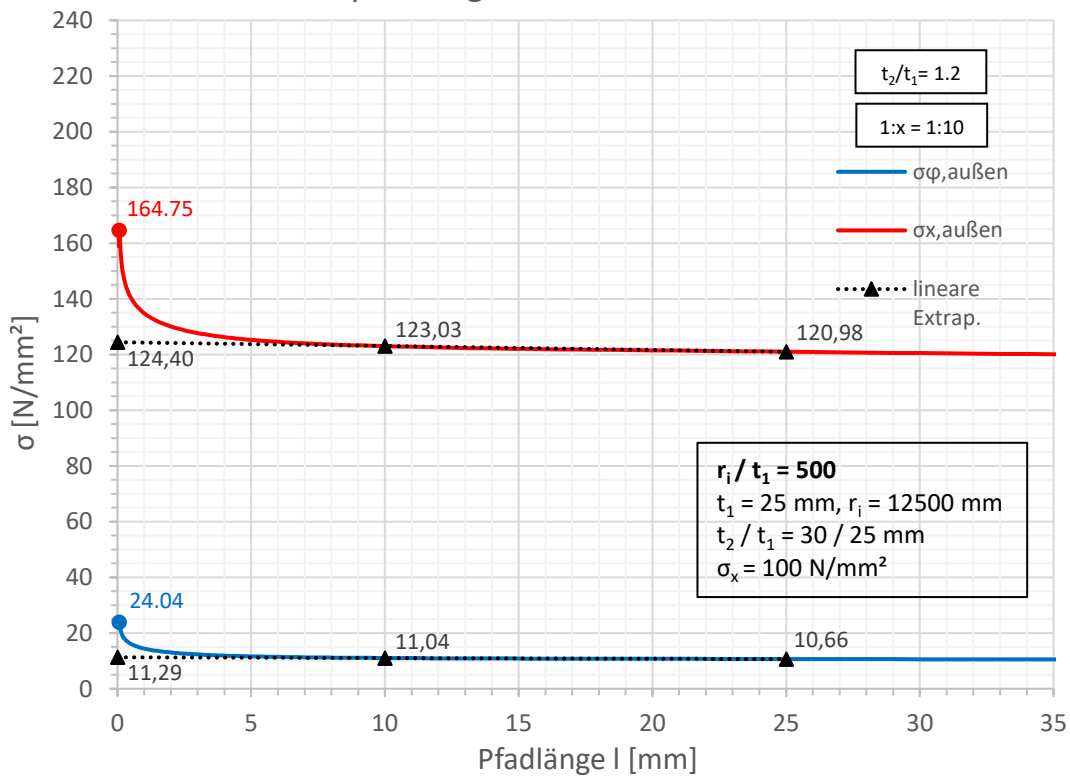


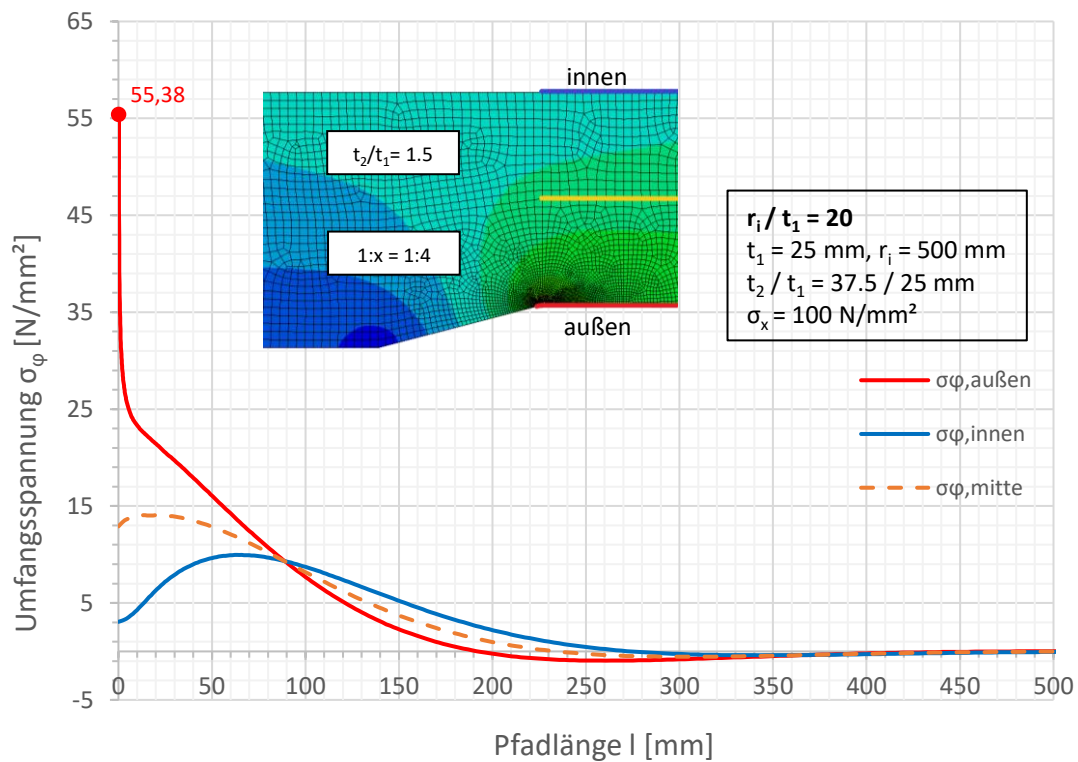
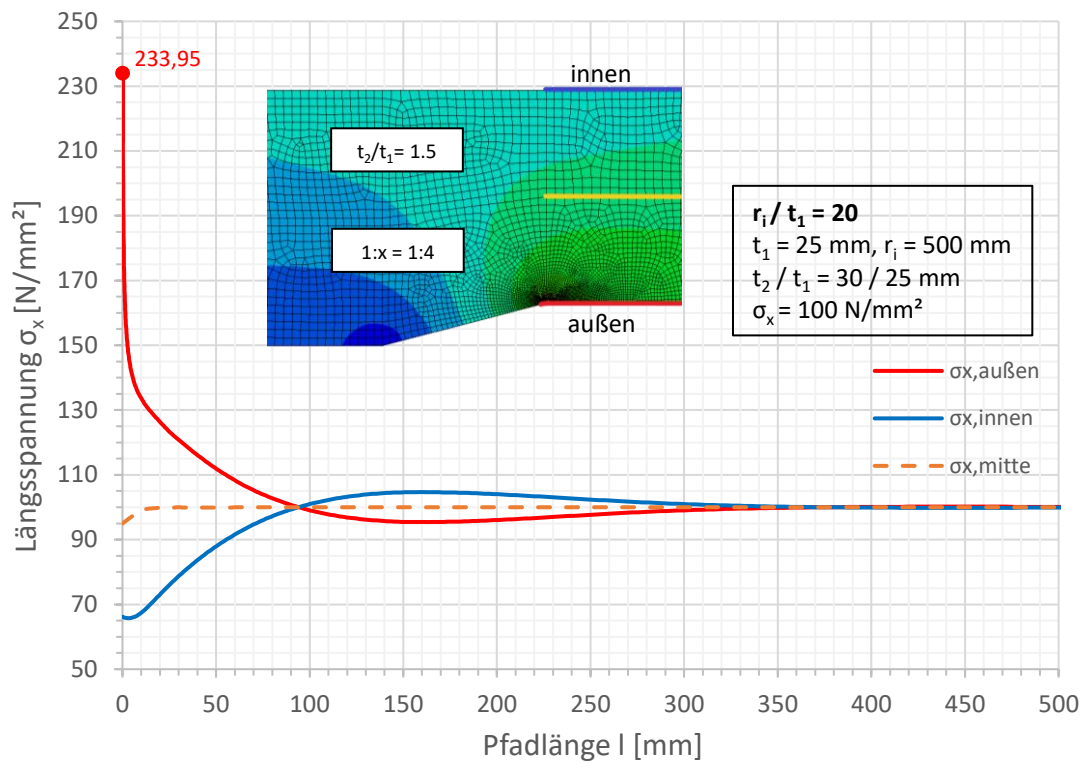


Spannungen an der Außenseite

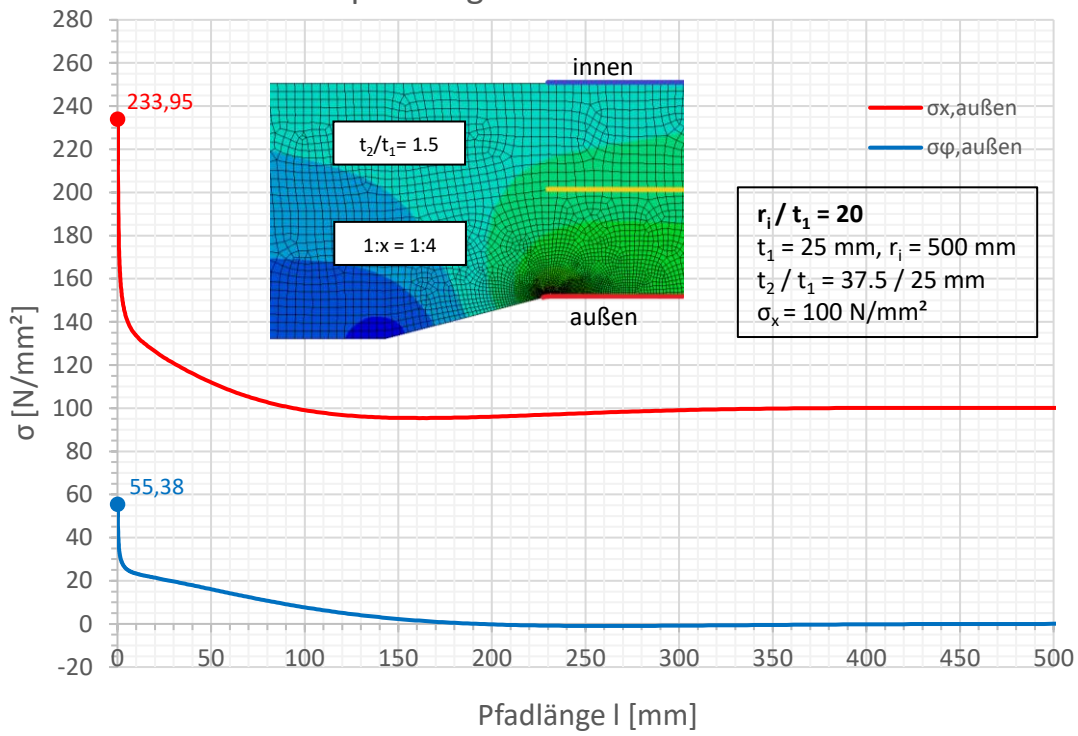


Spannungen an der Außenseite

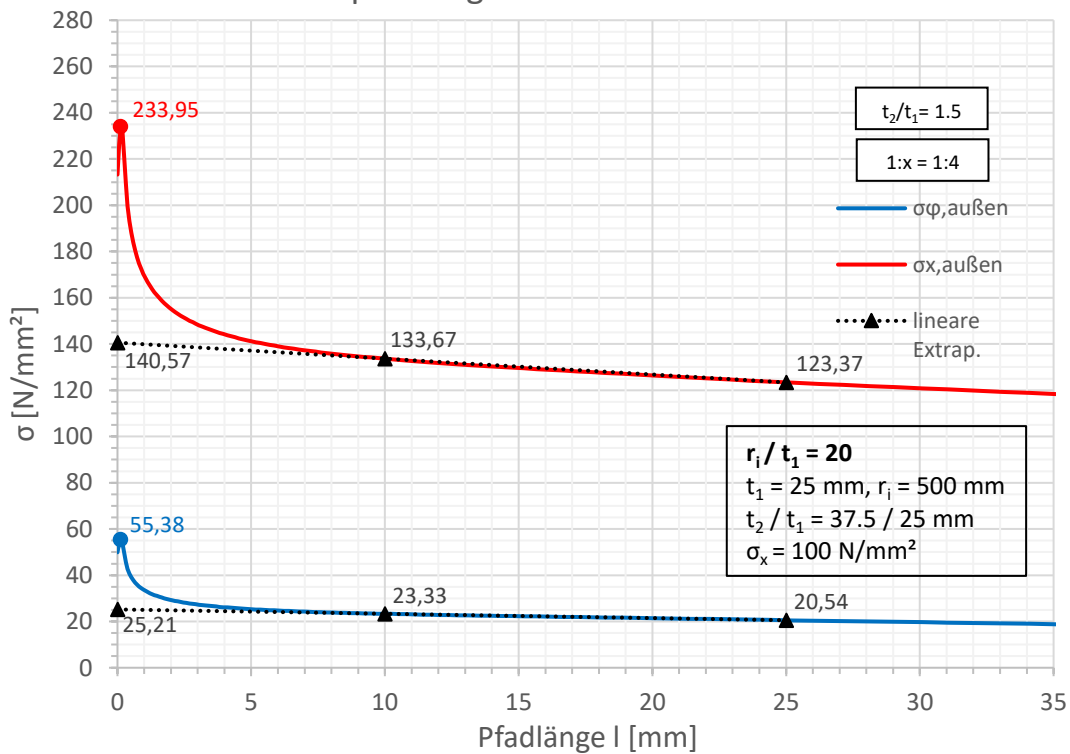


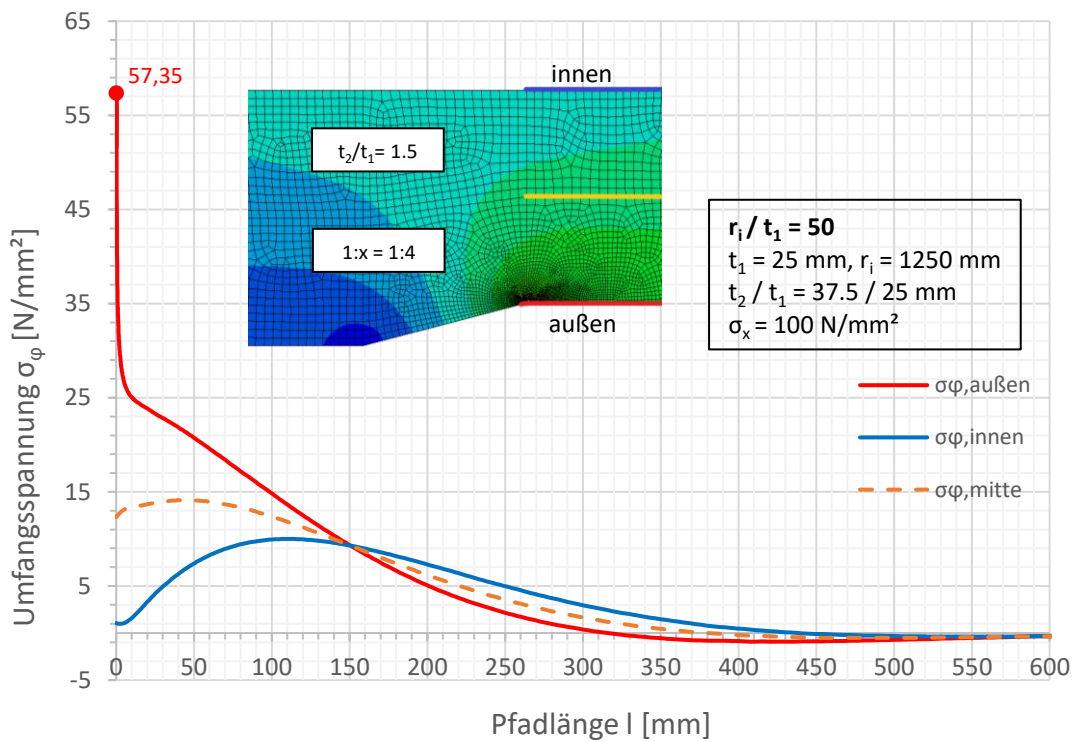
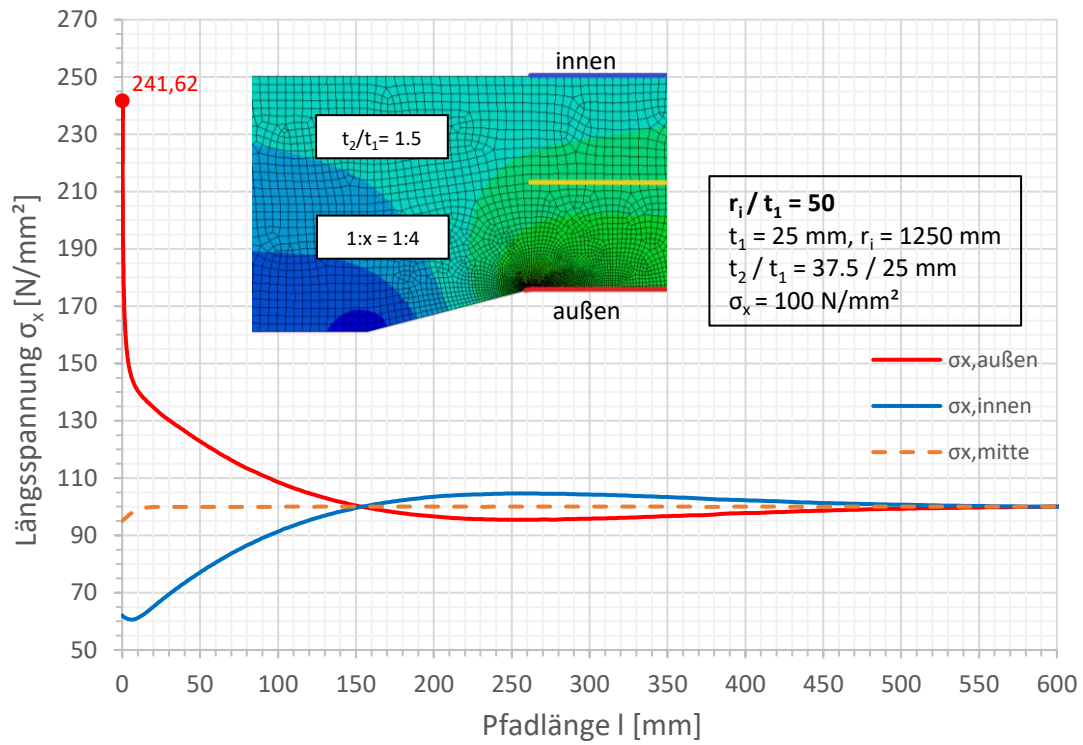


Spannungen an der Außenseite

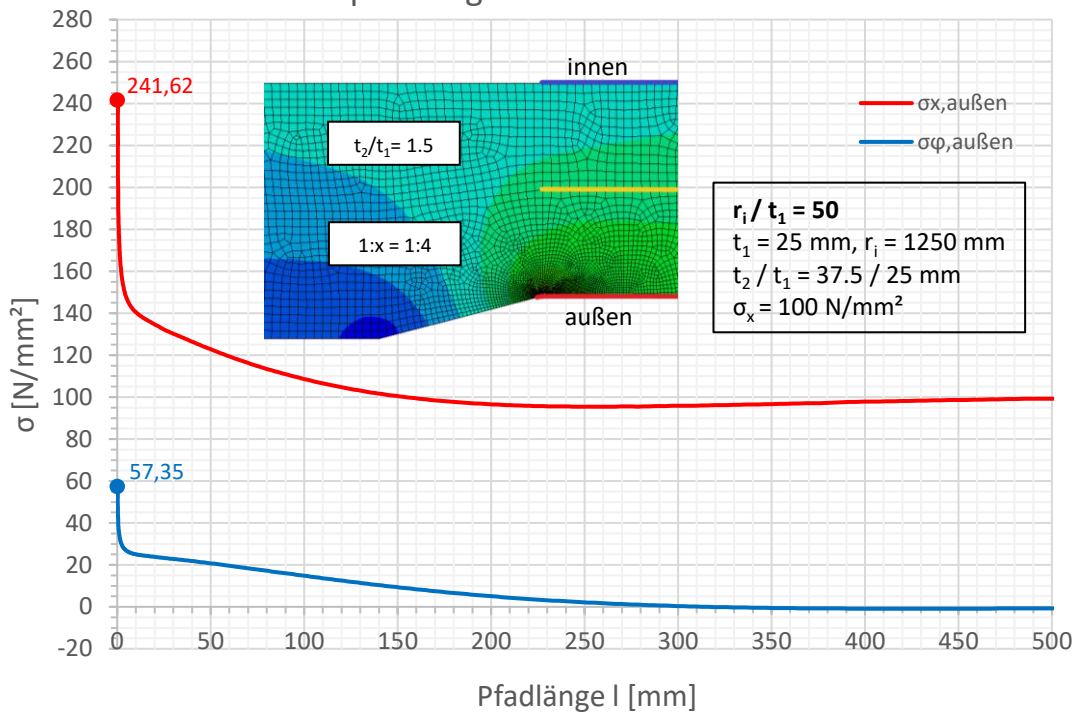


Spannungen an der Außenseite

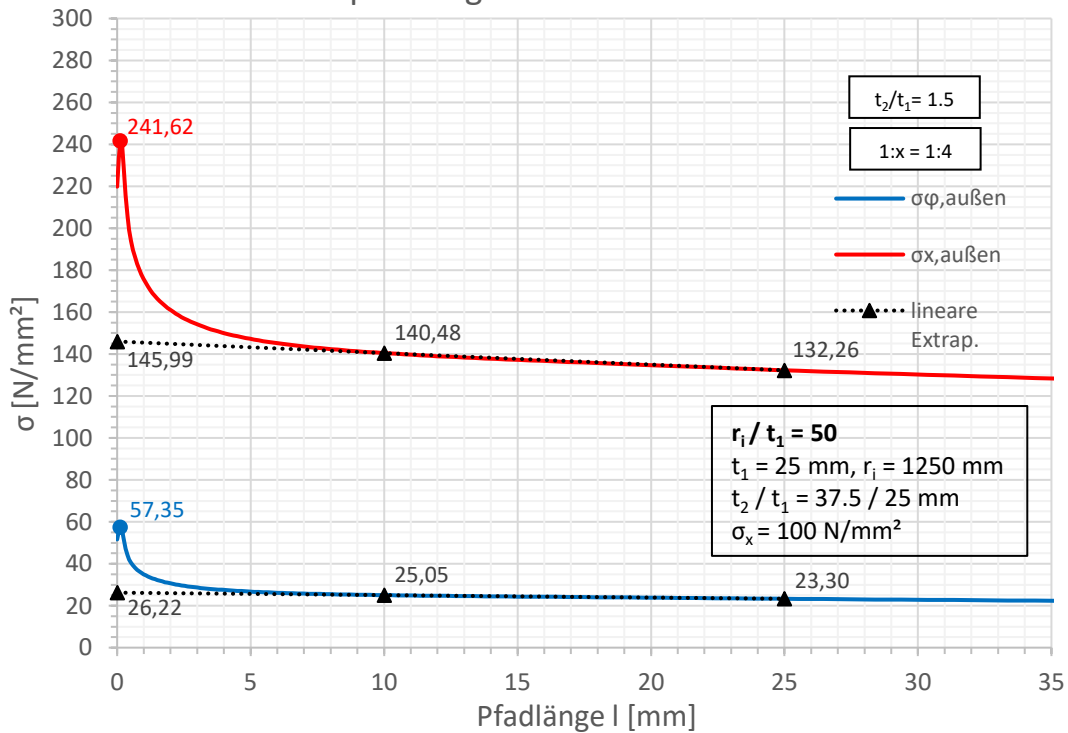


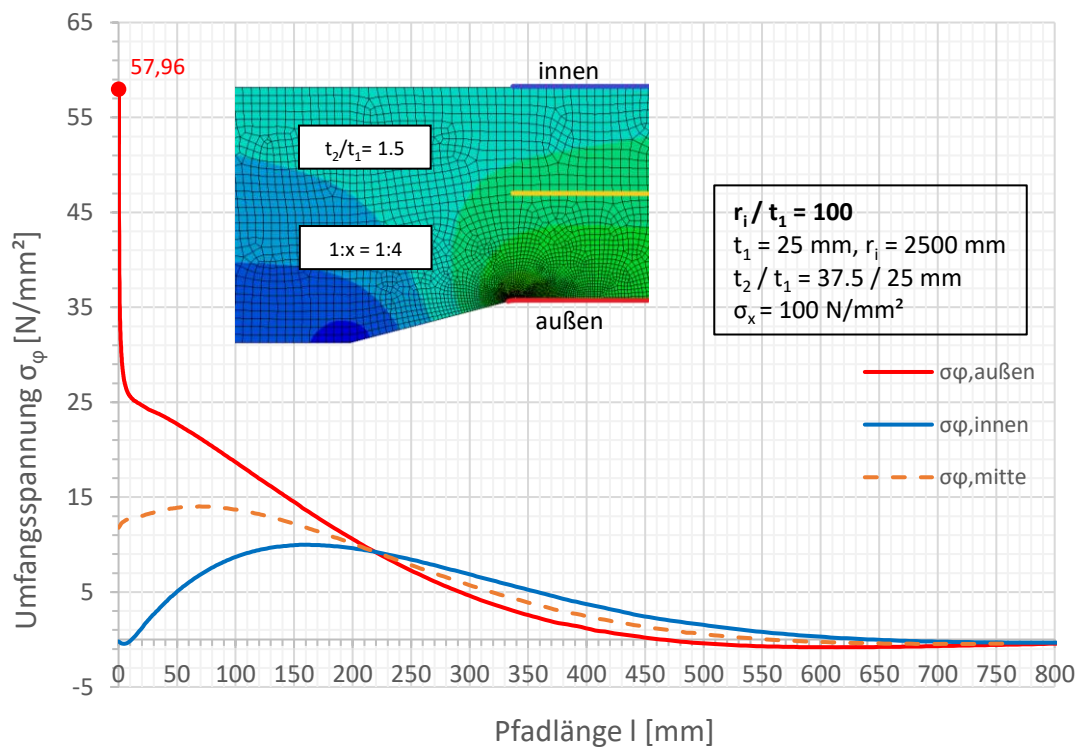
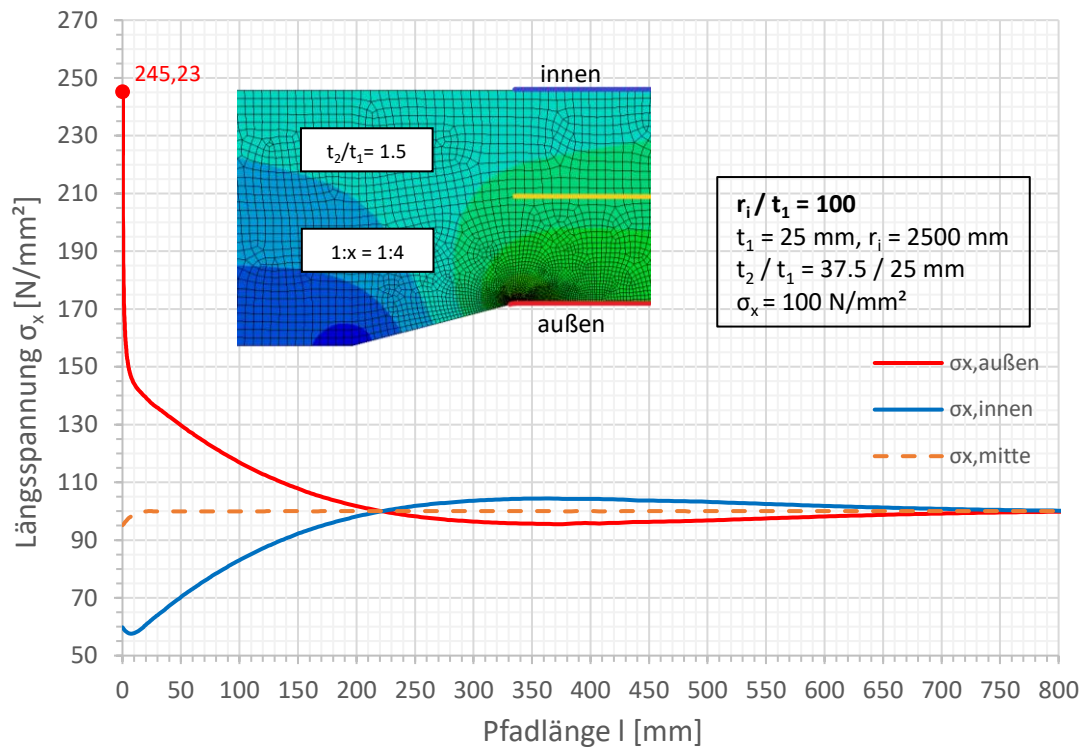


Spannungen an der Außenseite

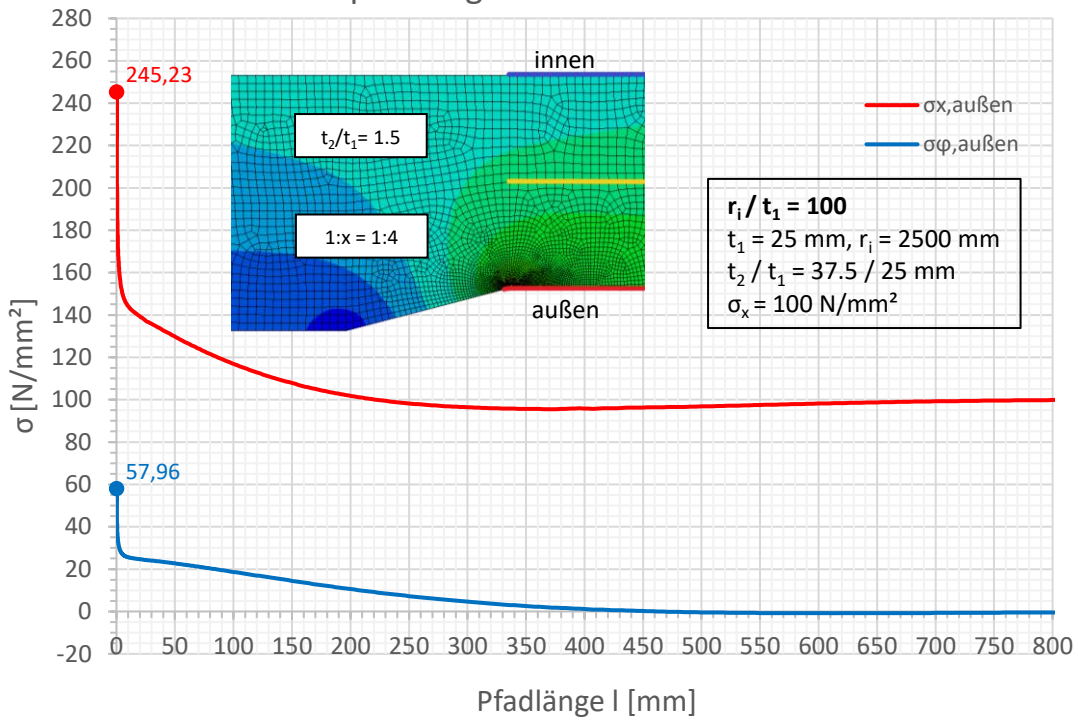


Spannungen an der Außenseite

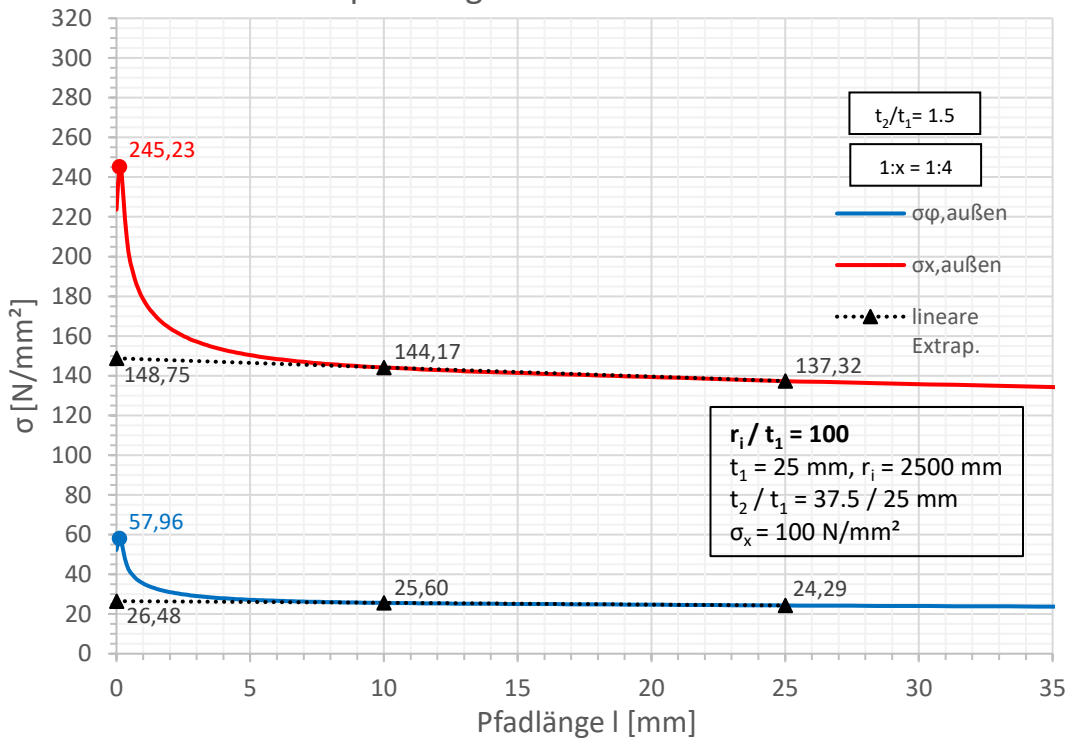


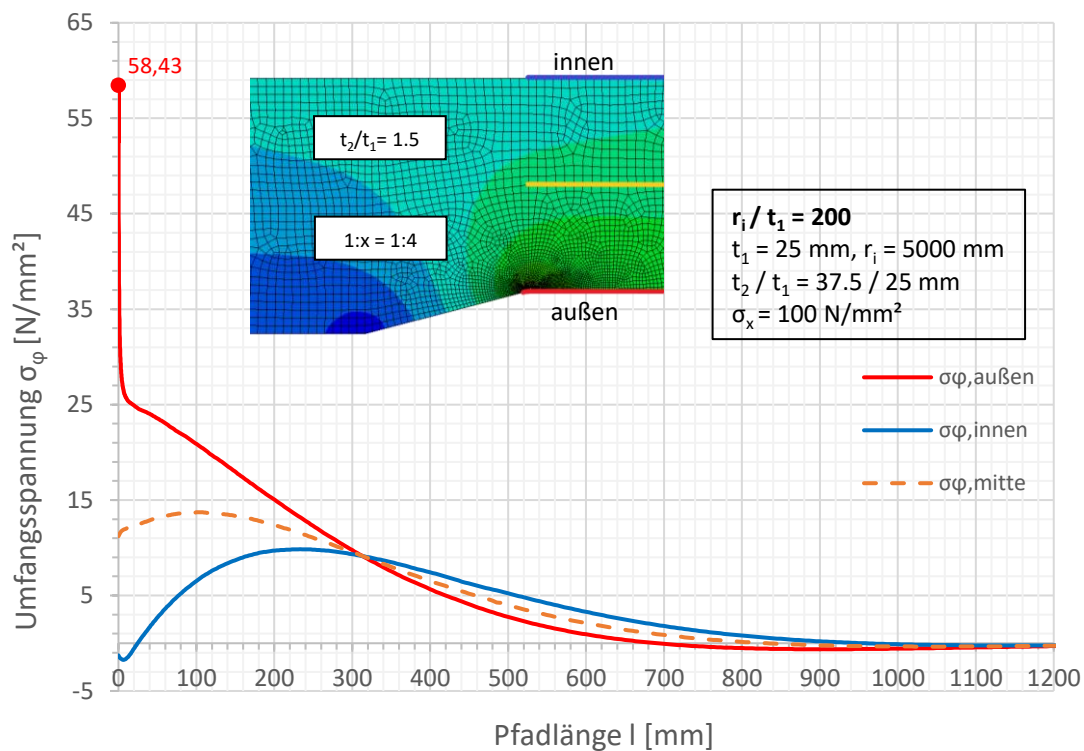
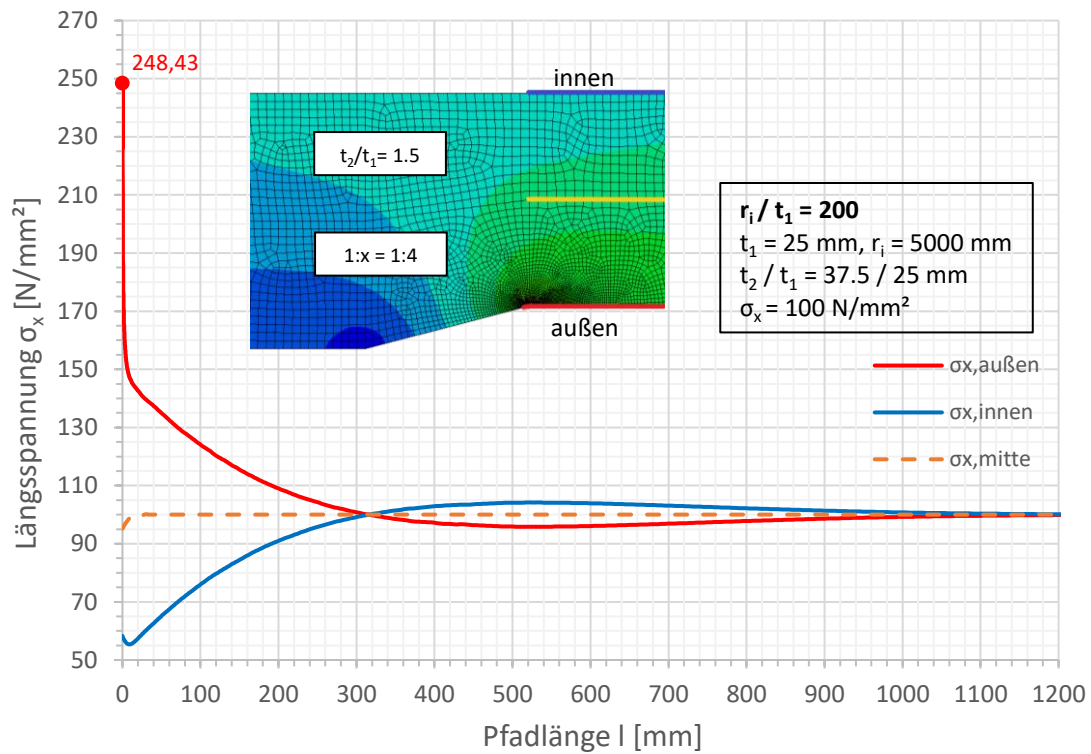


Spannungen an der Außenseite

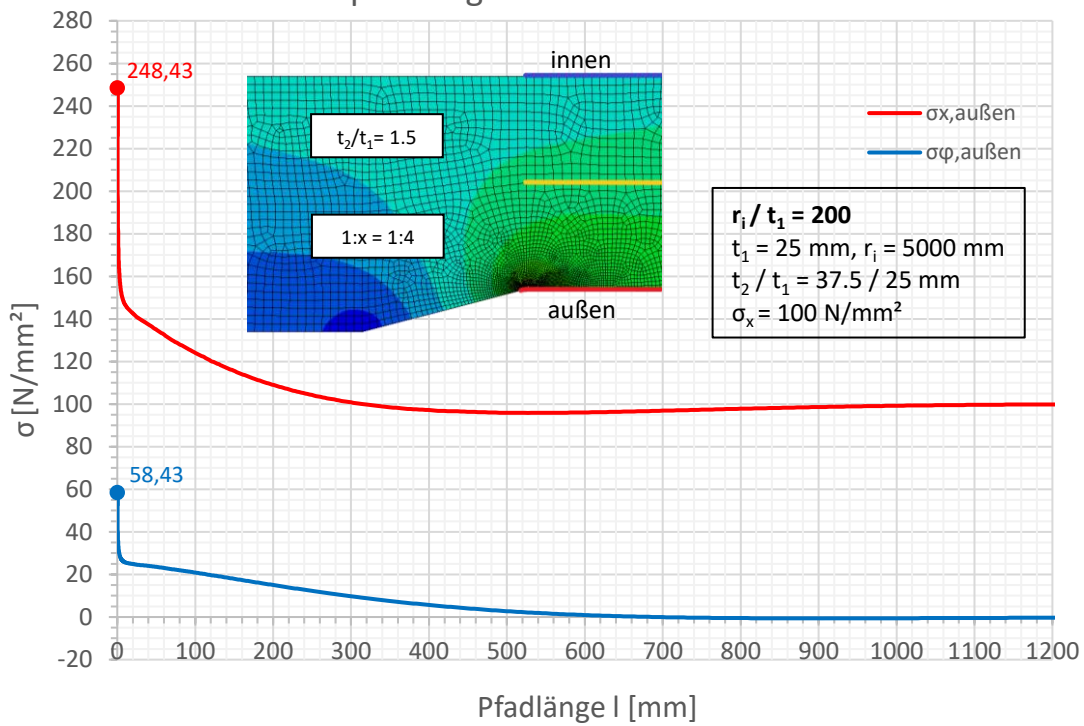


Spannungen an der Außenseite

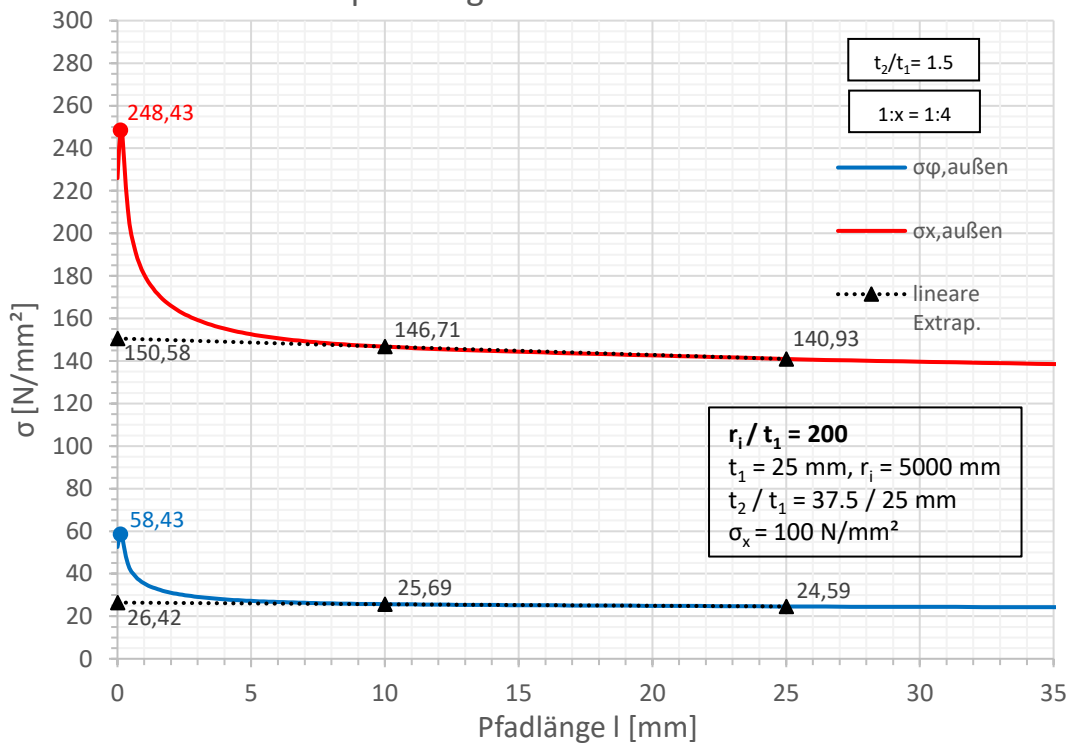


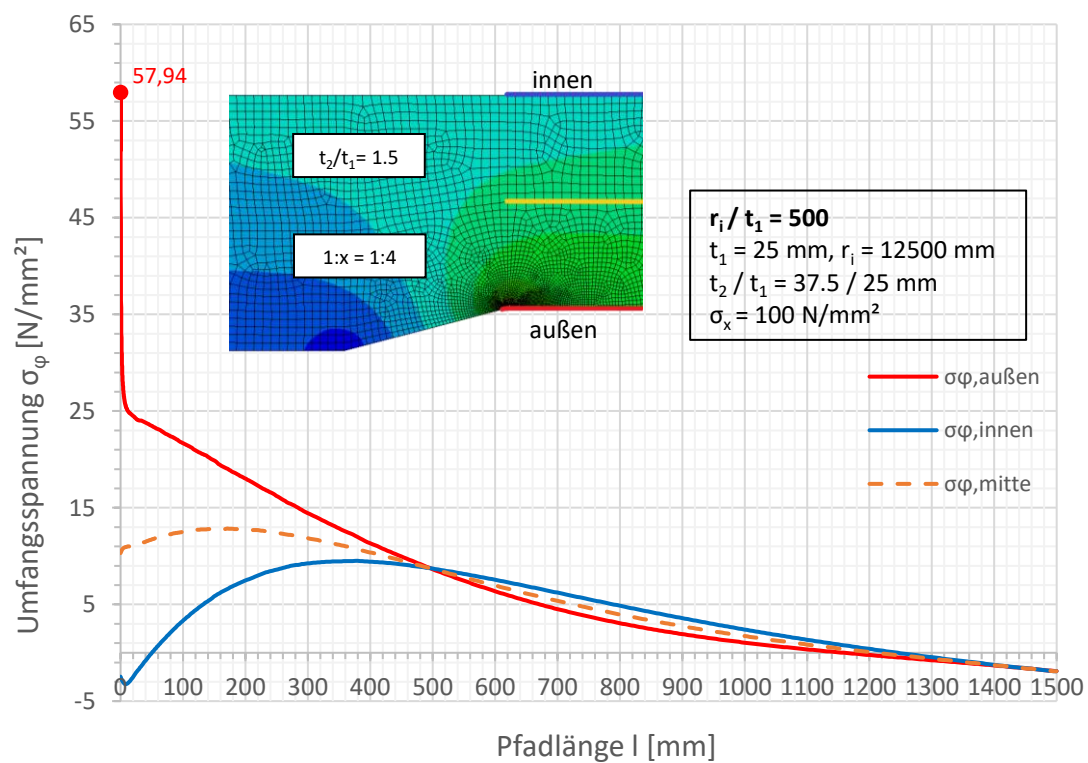
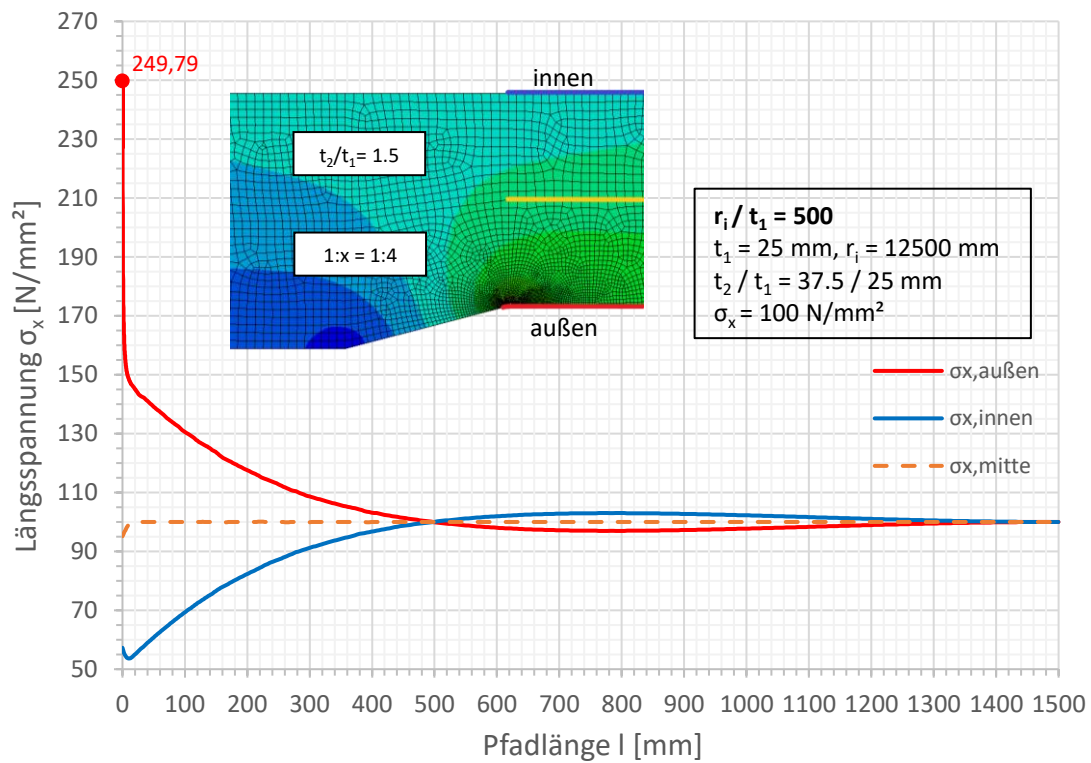


Spannungen an der Außenseite

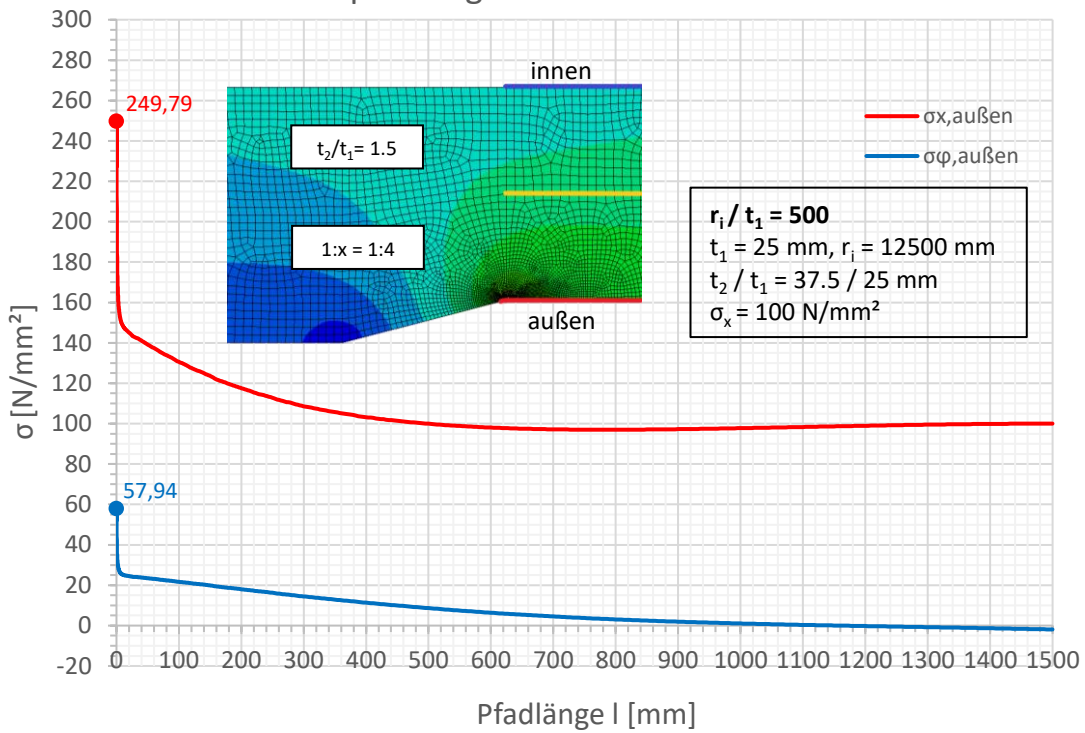


Spannungen an der Außenseite

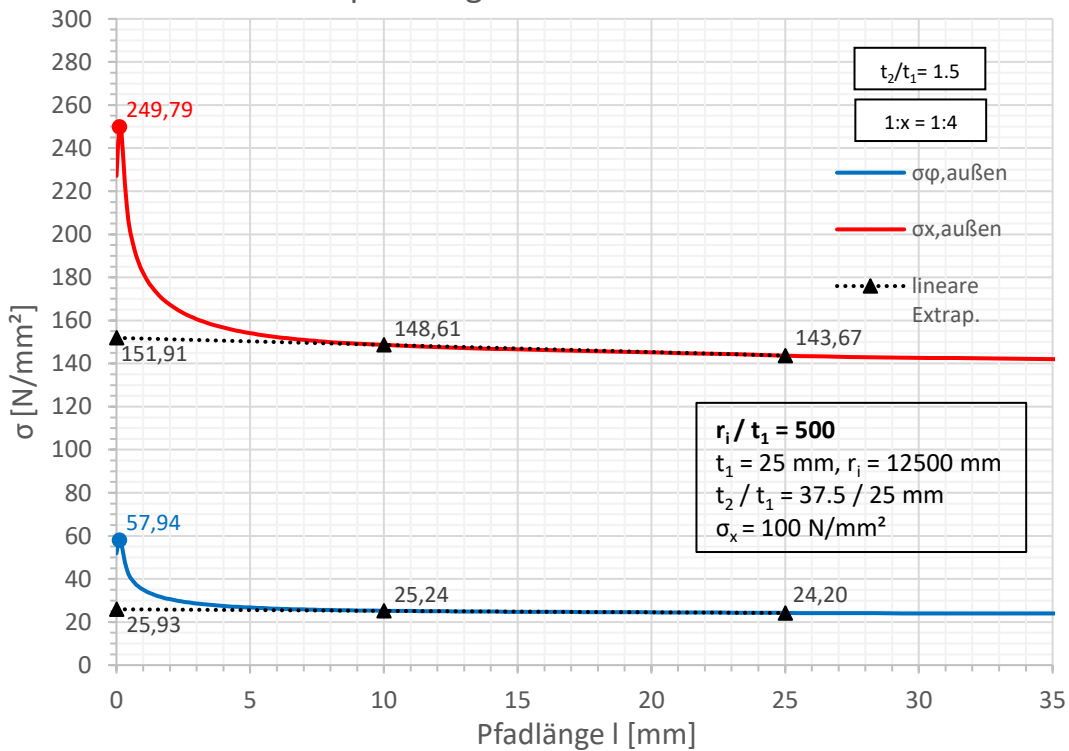


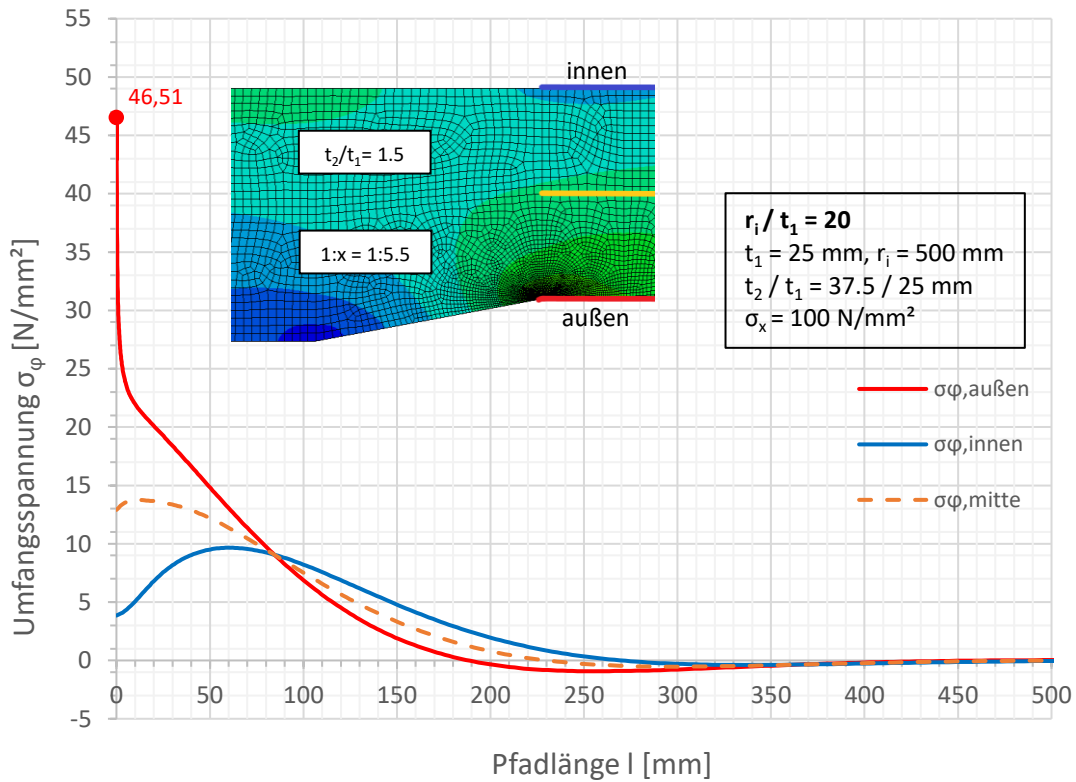
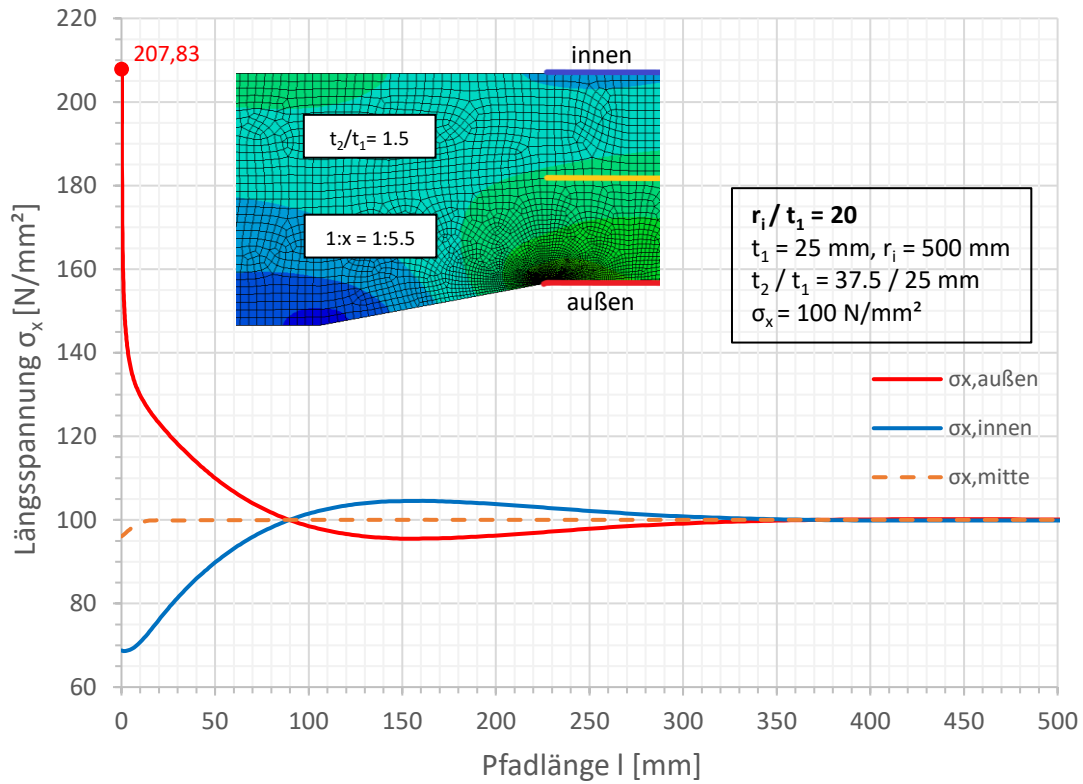


Spannungen an der Außenseite

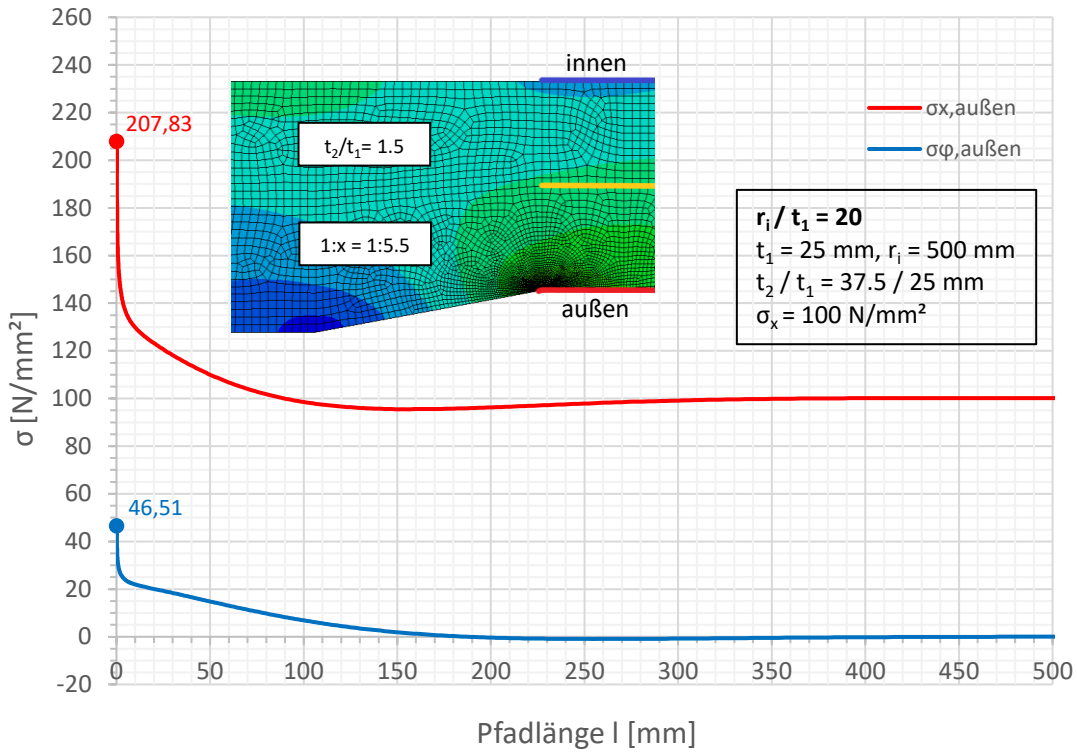


Spannungen an der Außenseite

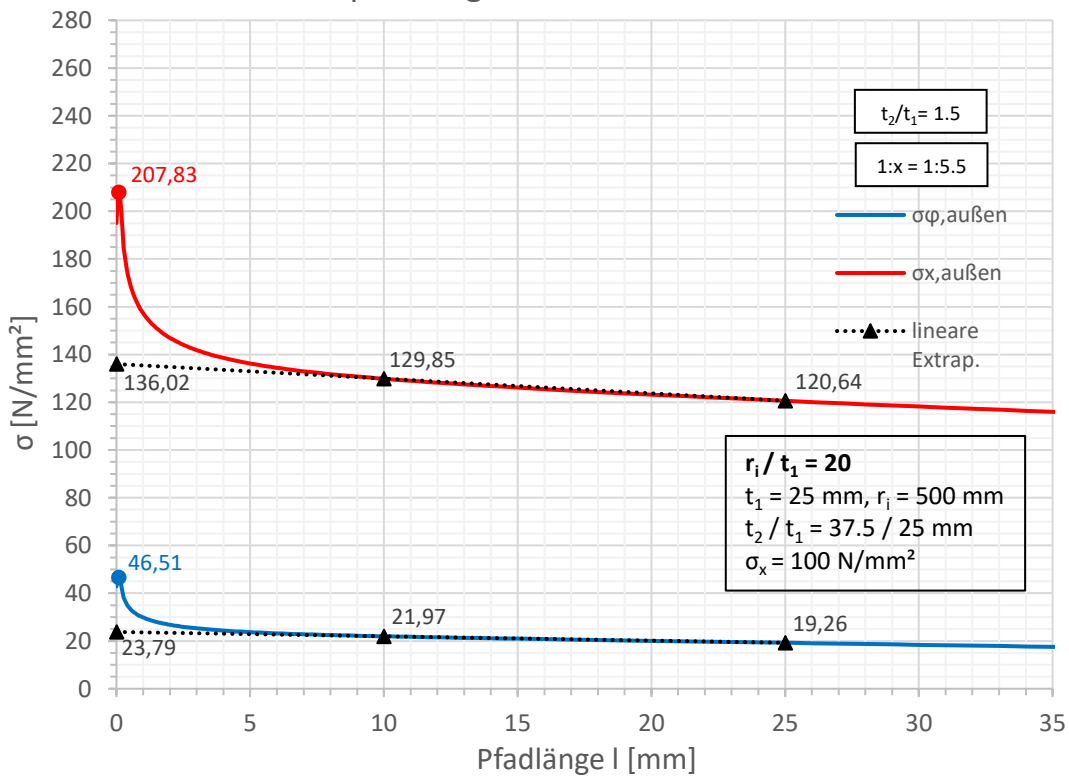


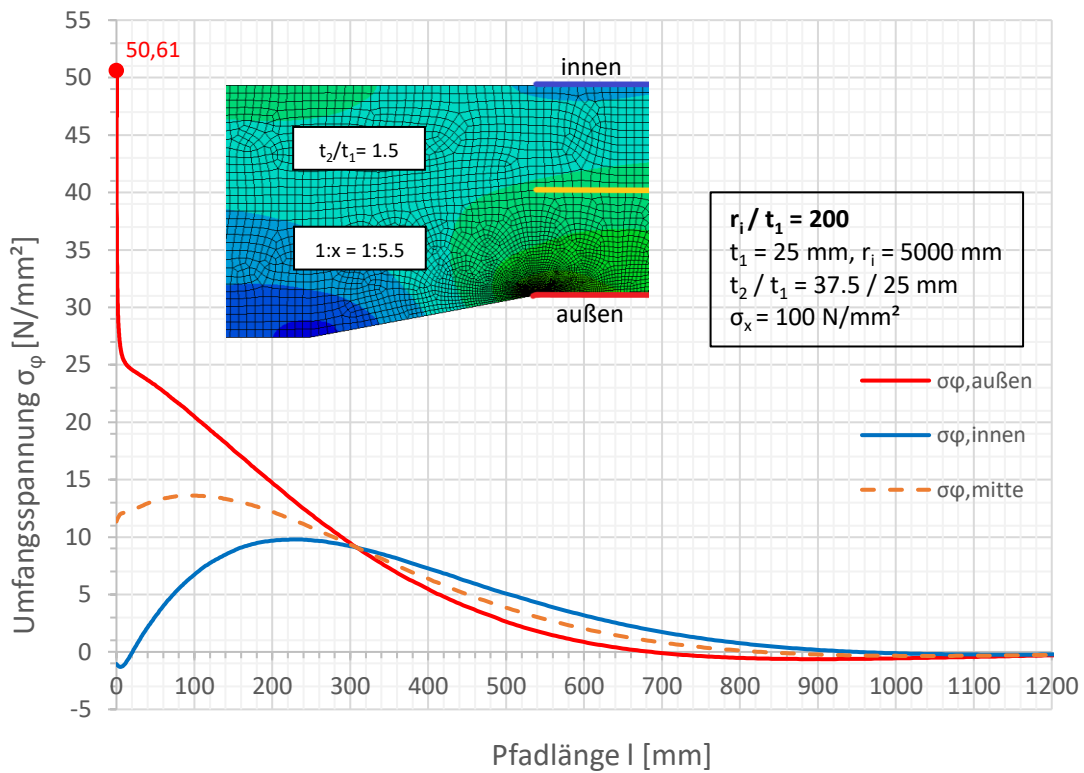
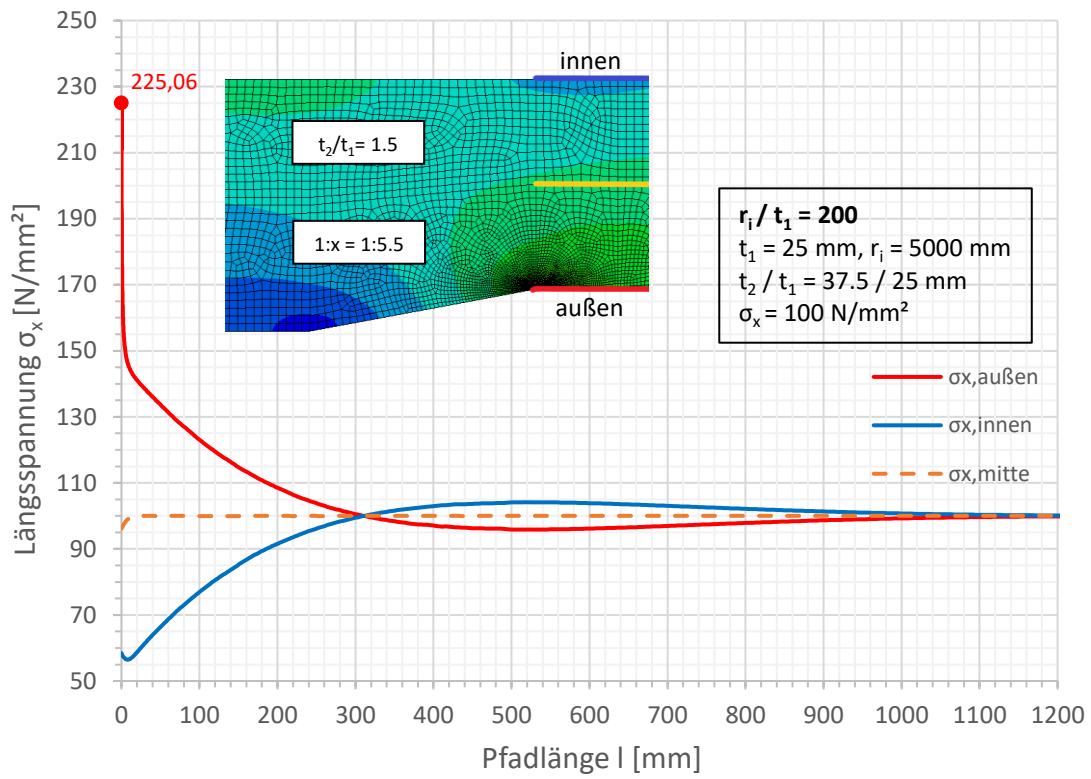


Spannungen an der Außenseite

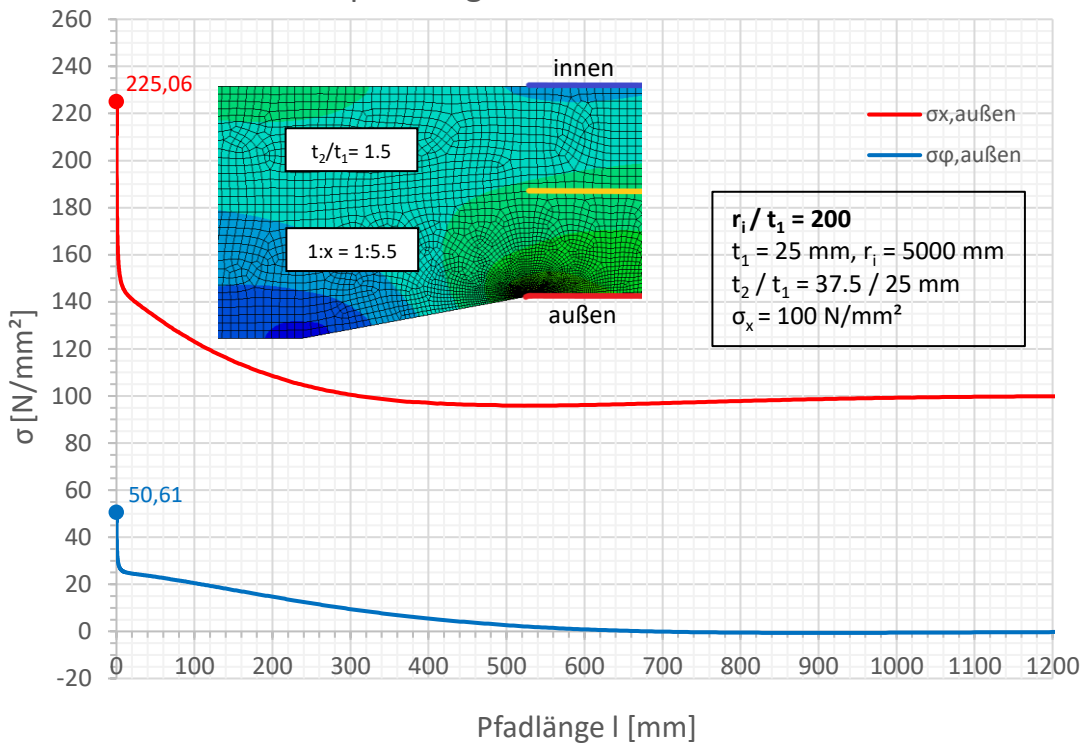


Spannungen an der Außenseite

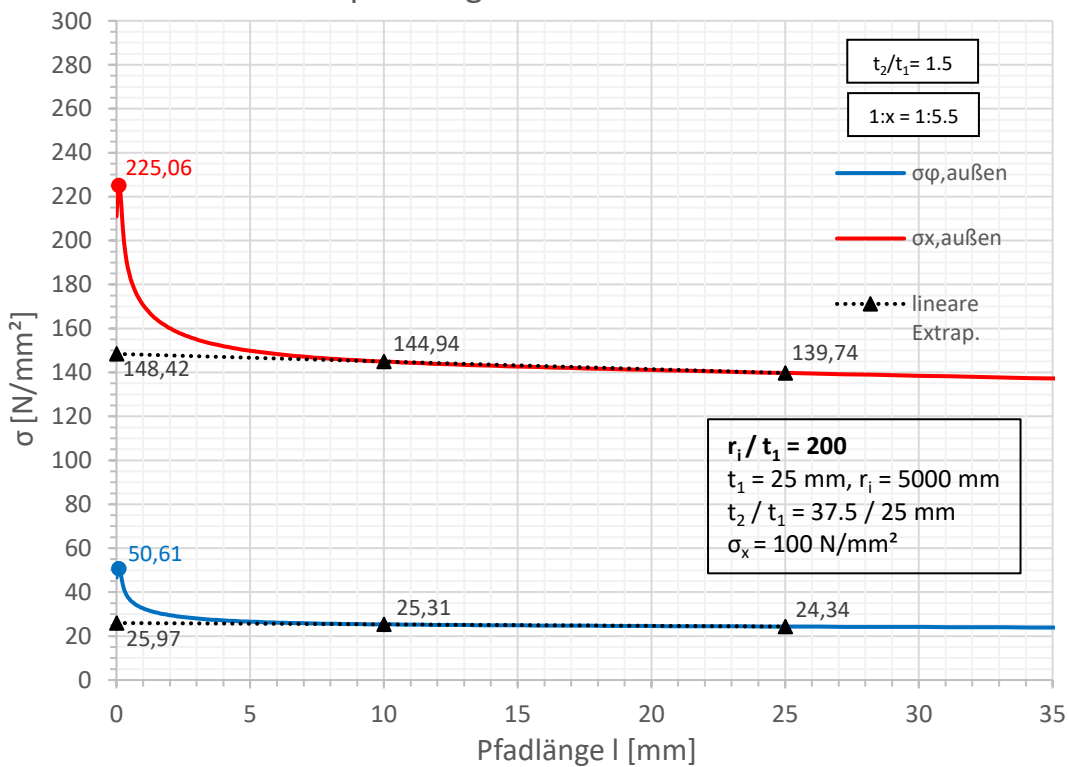


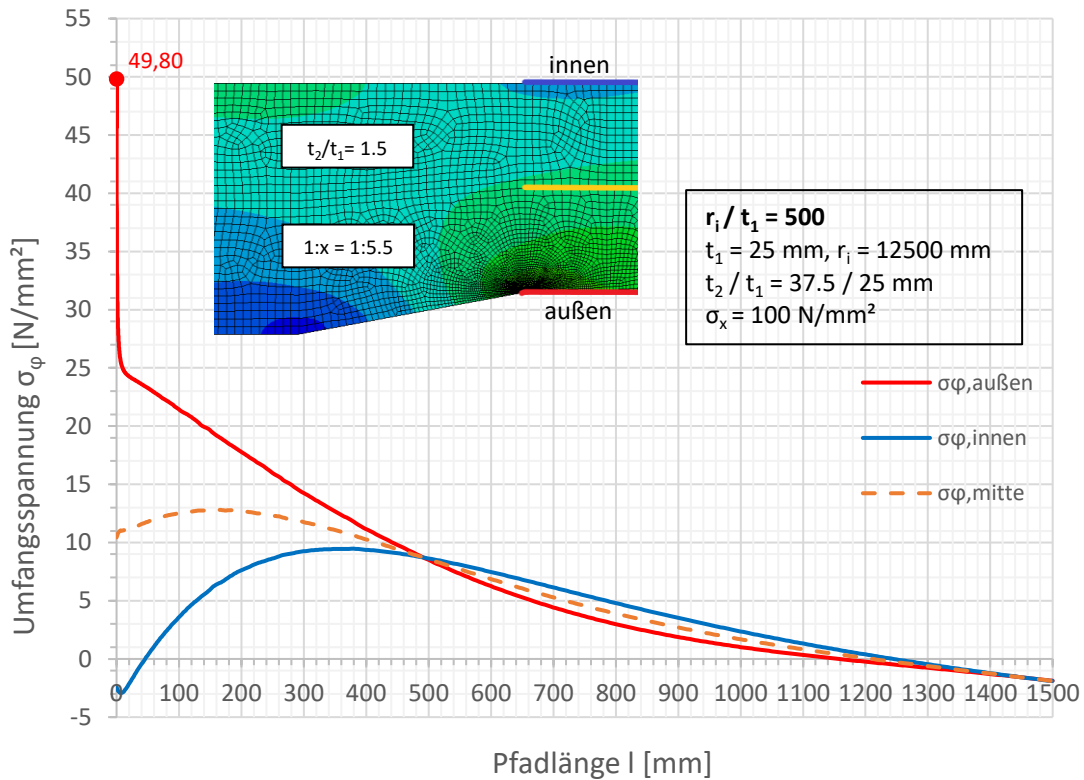
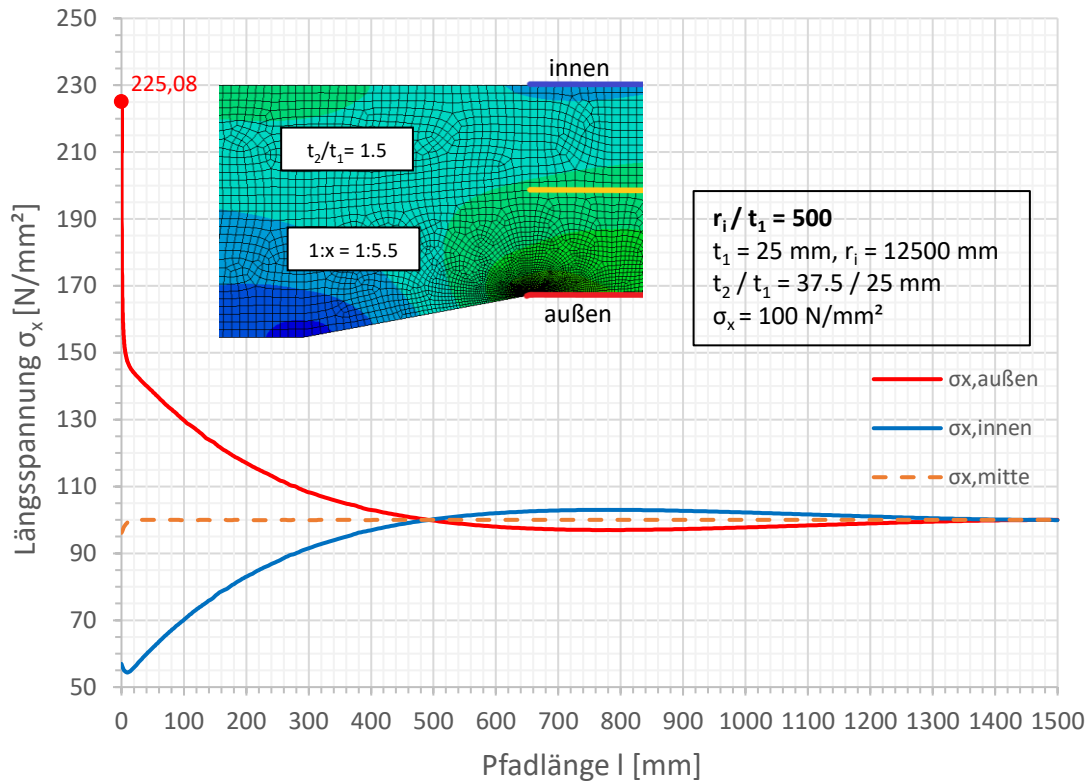


Spannungen an der Außenseite

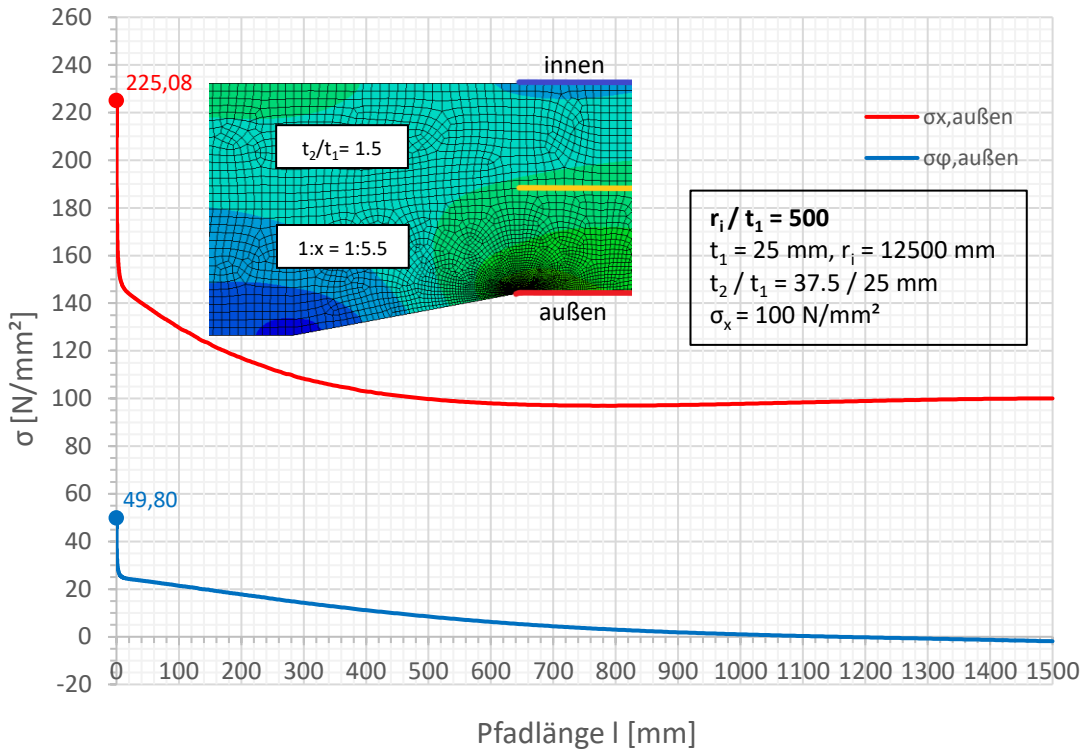


Spannungen an der Außenseite

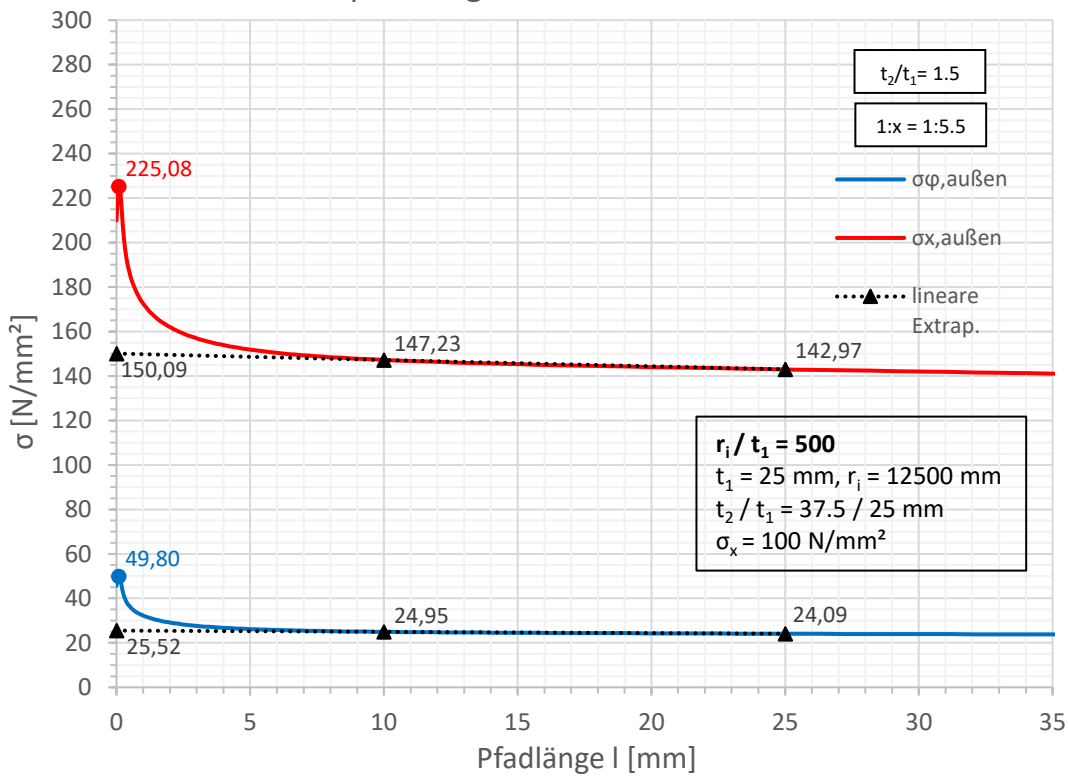


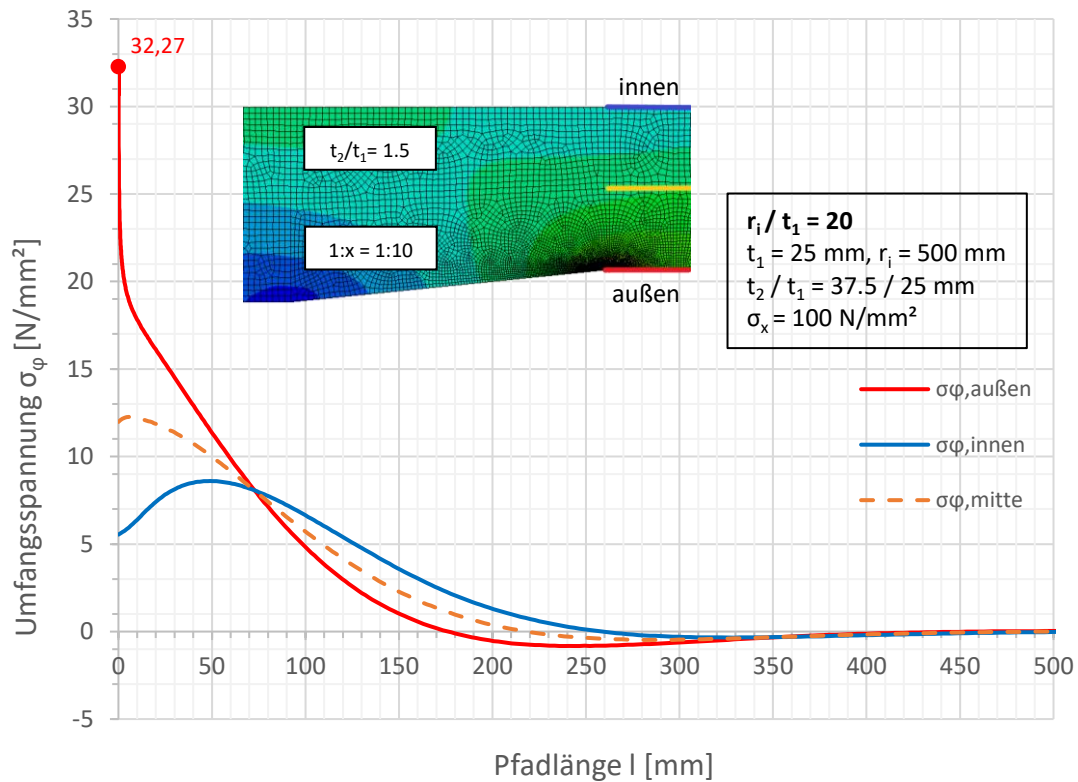
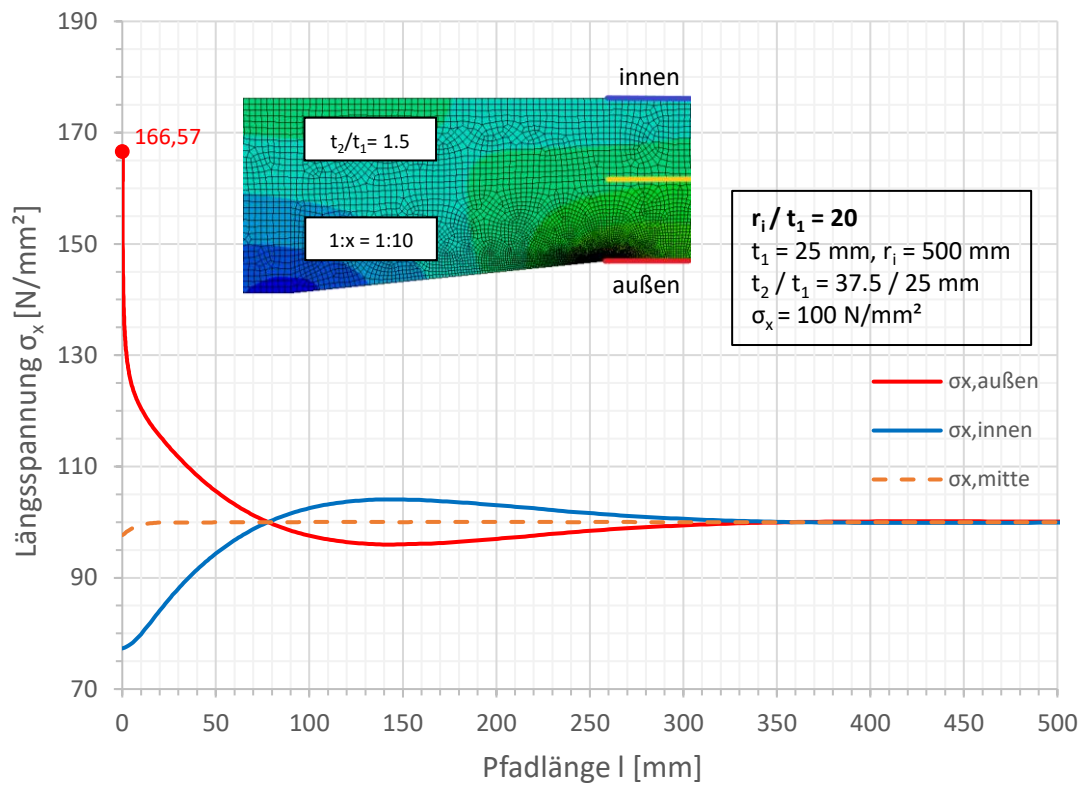


Spannungen an der Außenseite

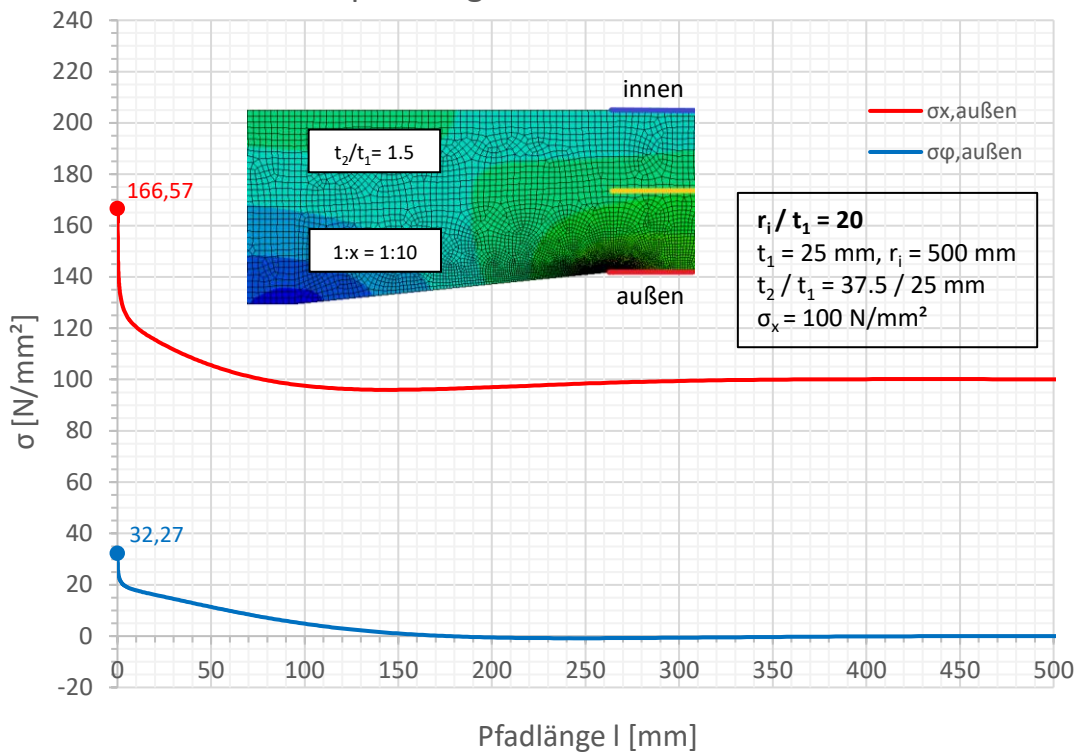


Spannungen an der Außenseite

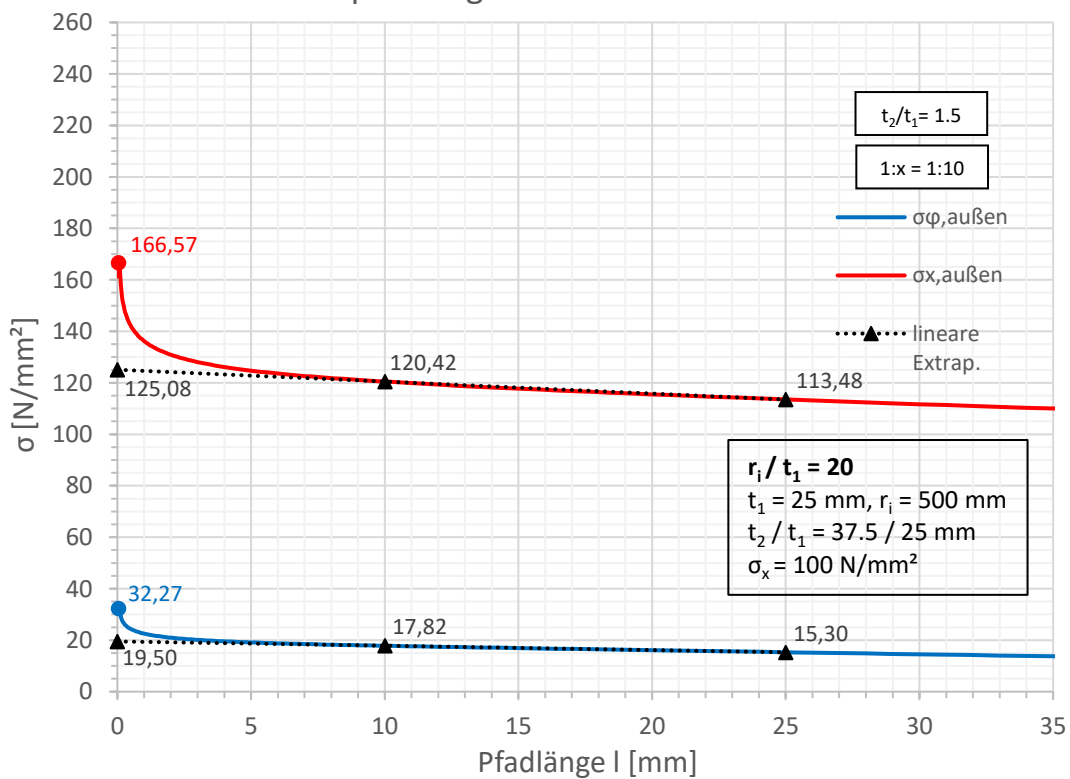


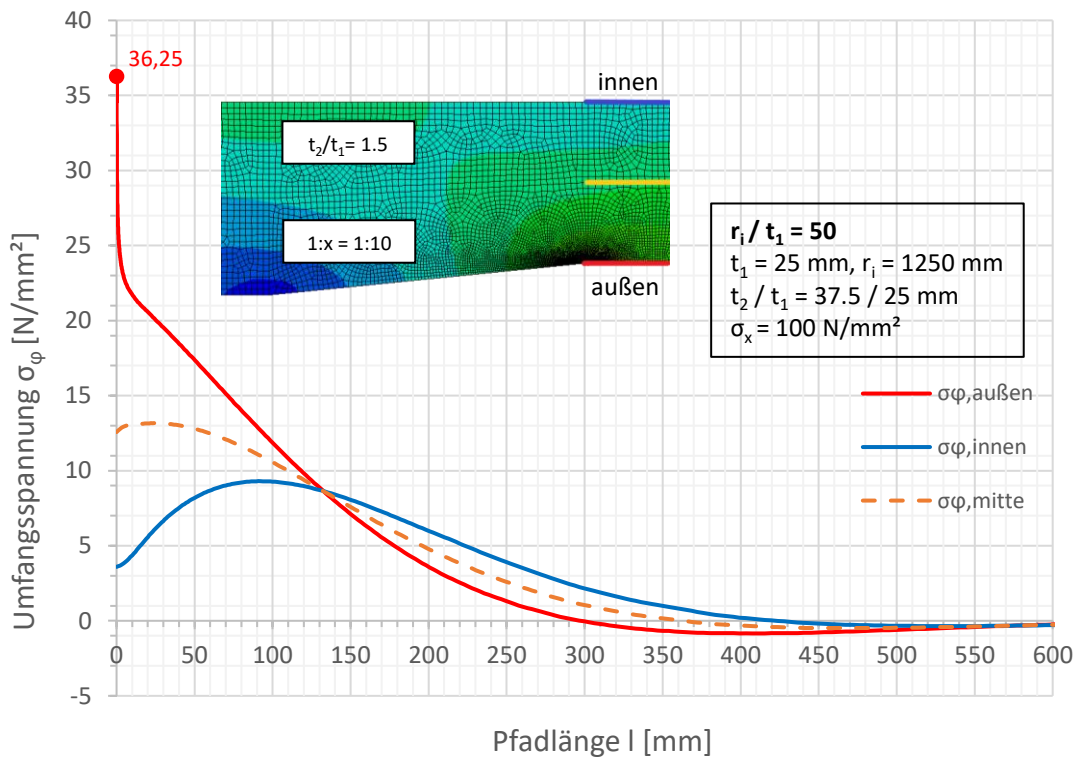
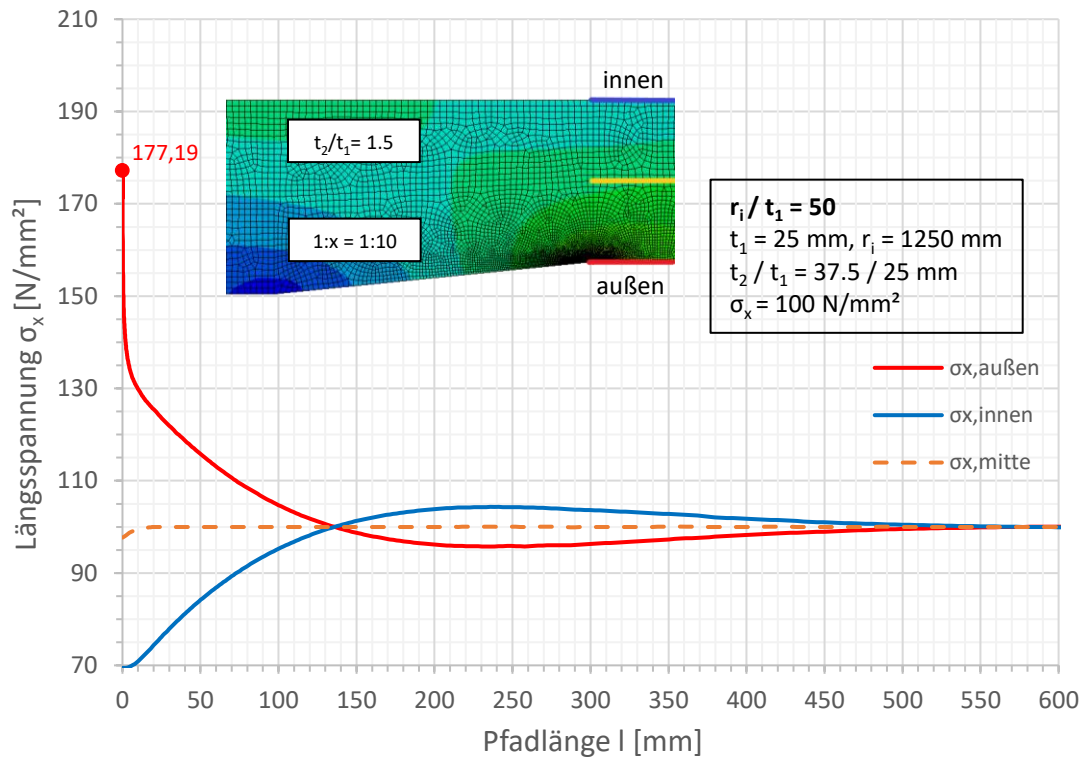


Spannungen an der Außenseite

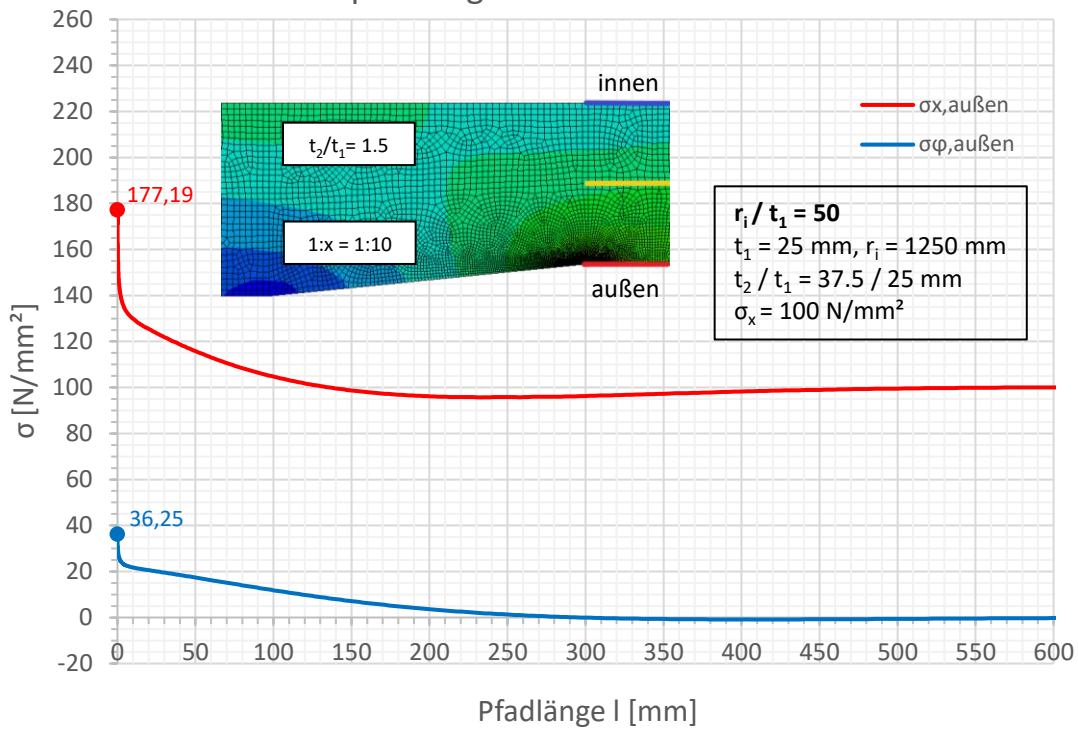


Spannungen an der Außenseite

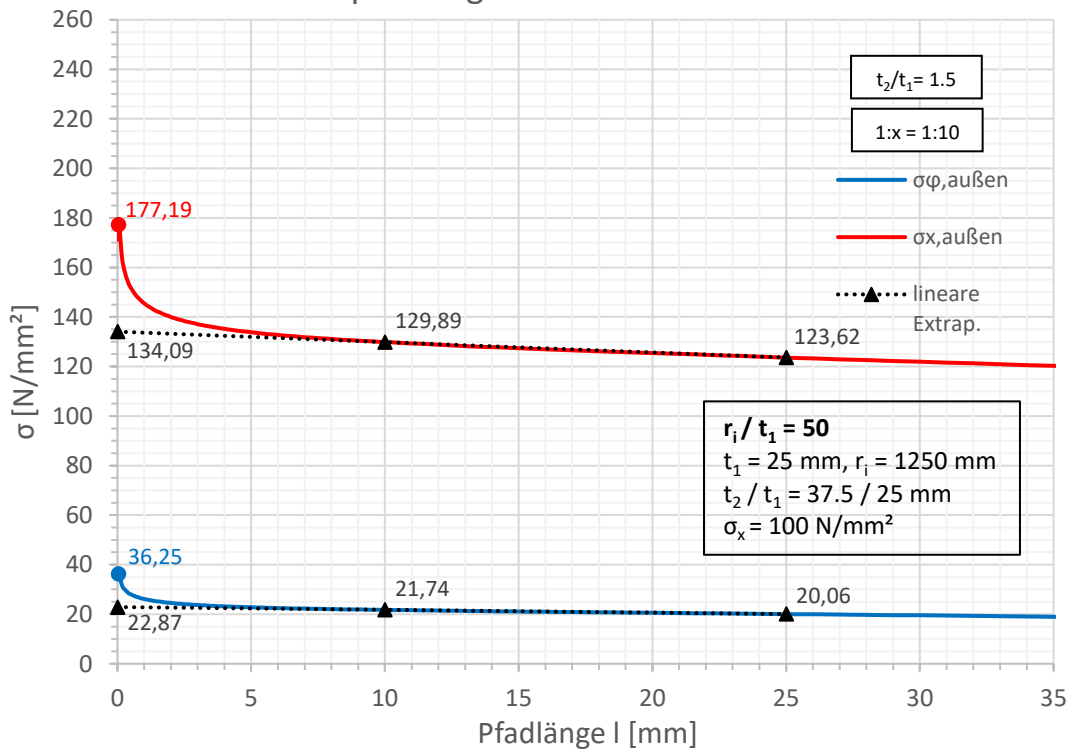


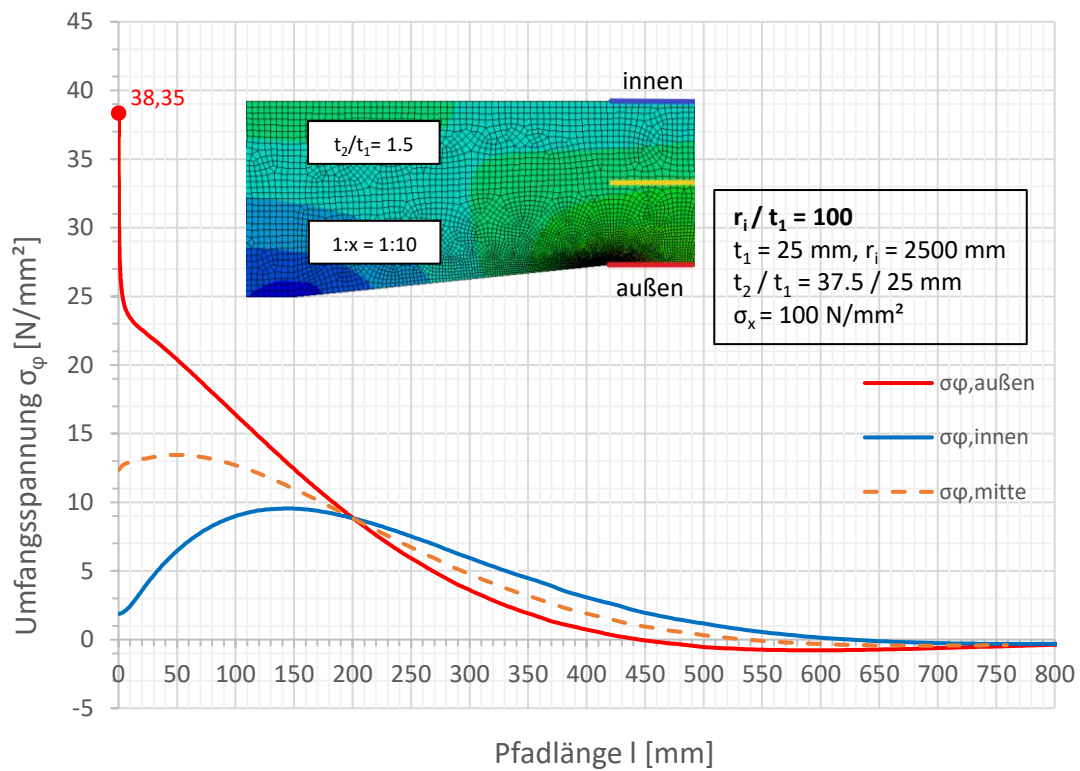
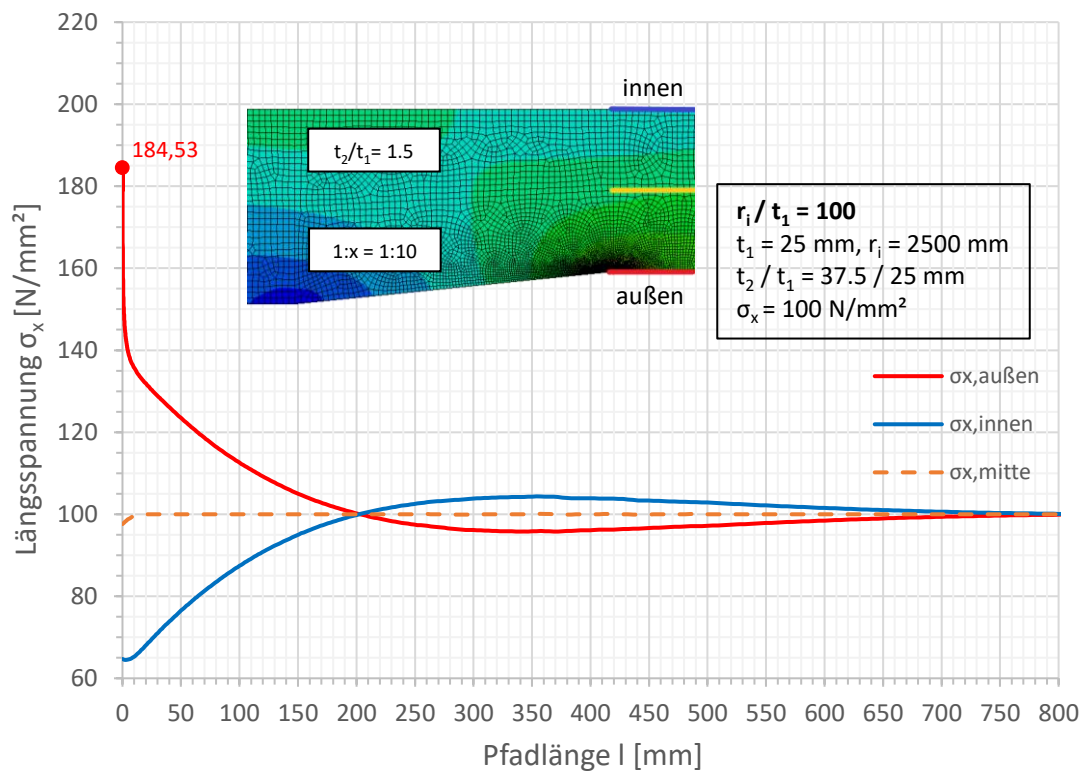


Spannungen an der Außenseite

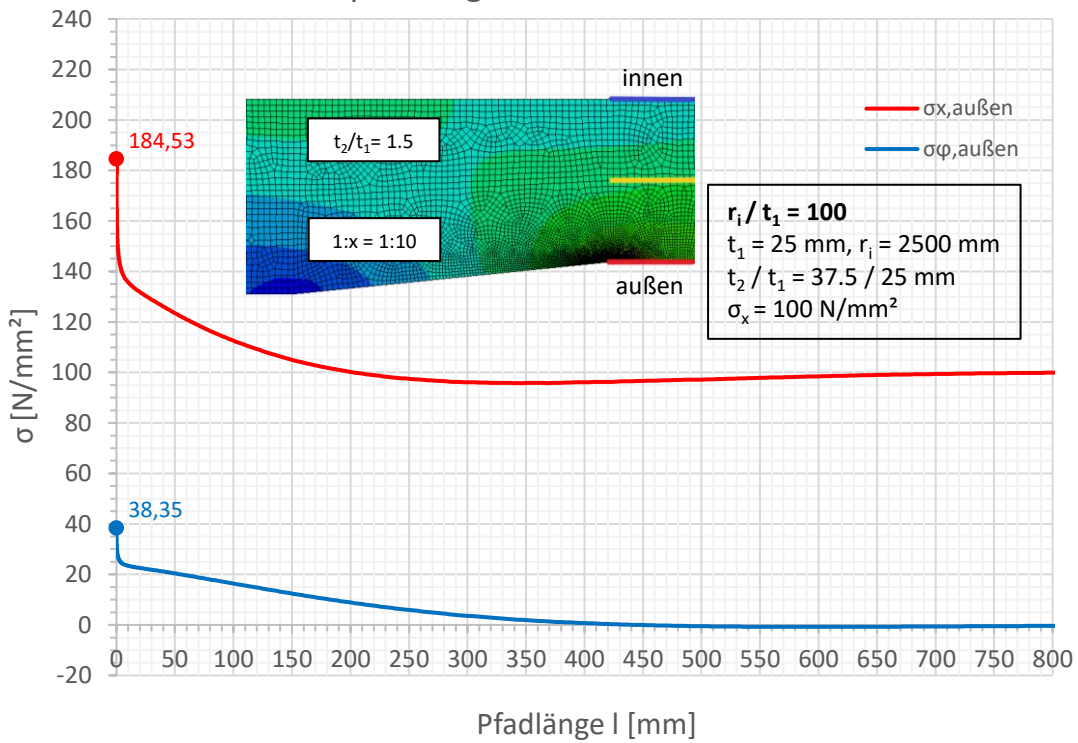


Spannungen an der Außenseite

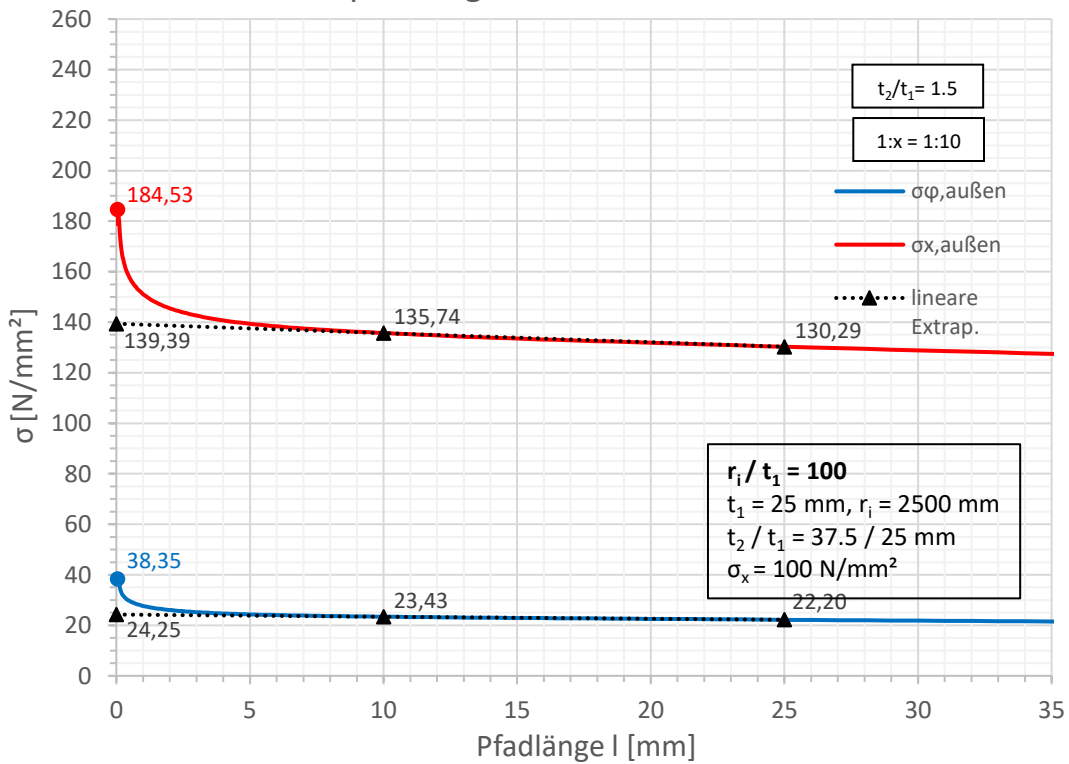


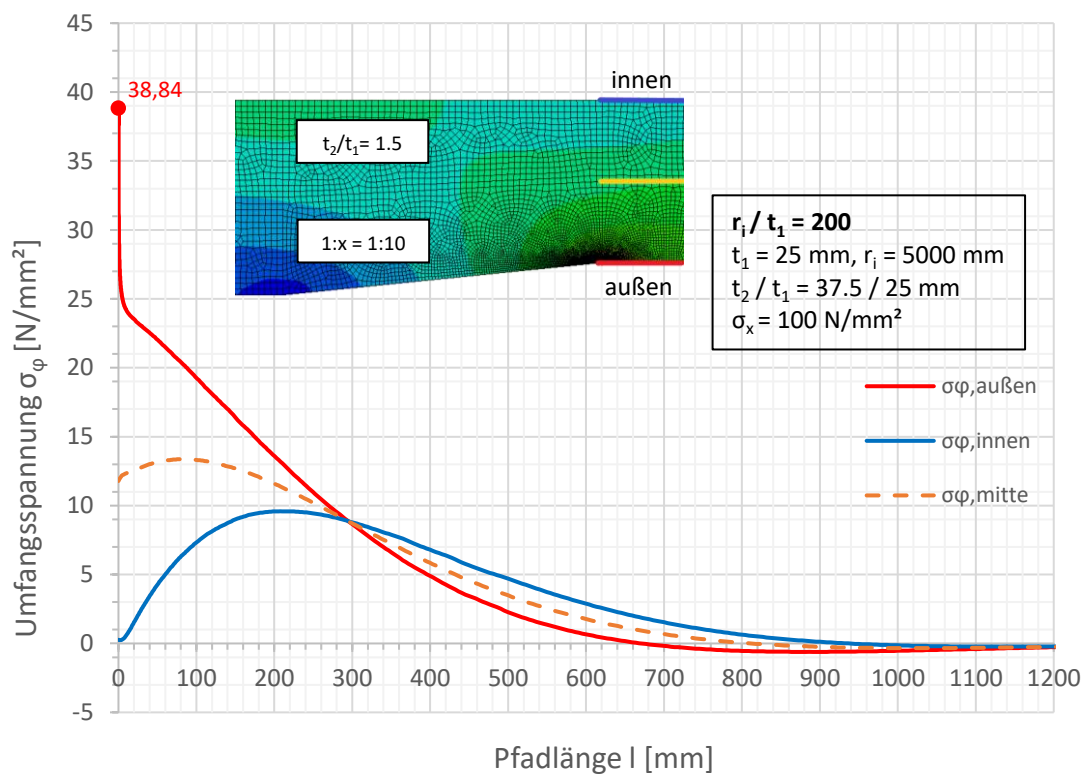
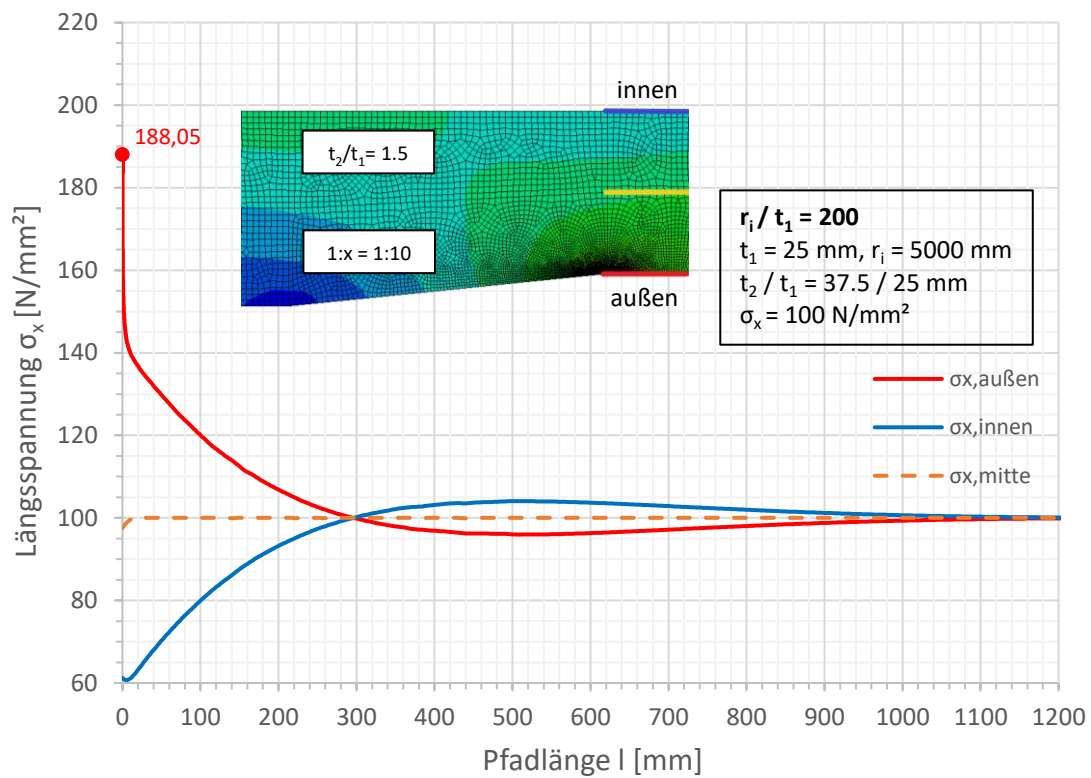


Spannungen an der Außenseite

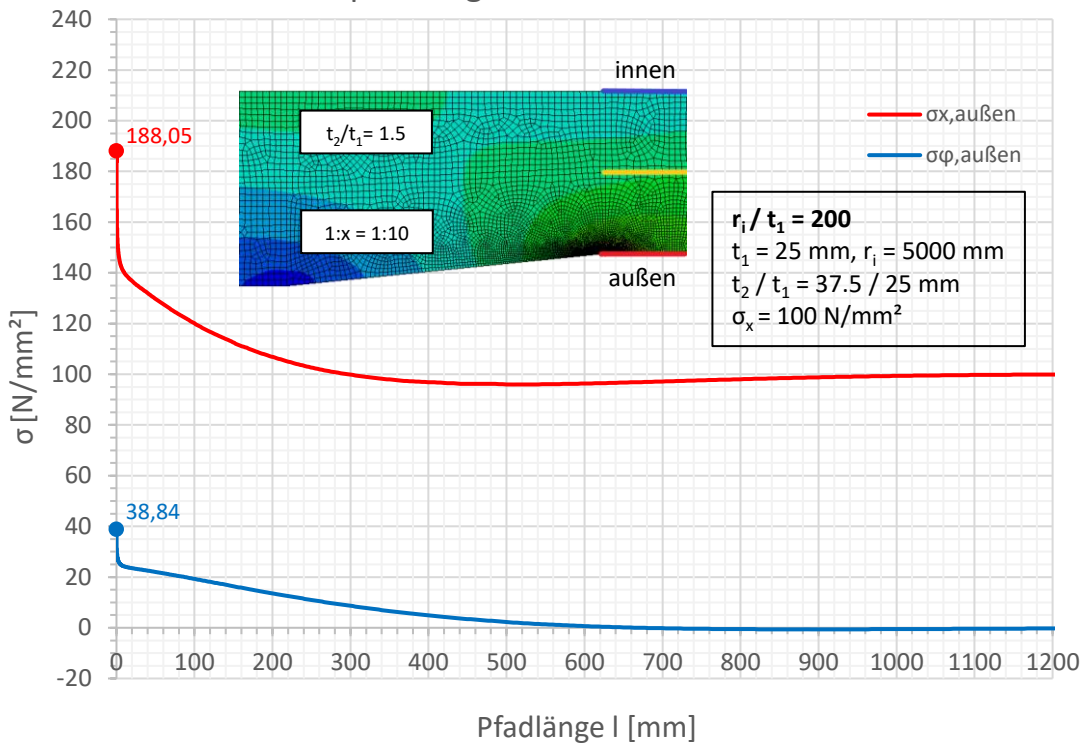


Spannungen an der Außenseite

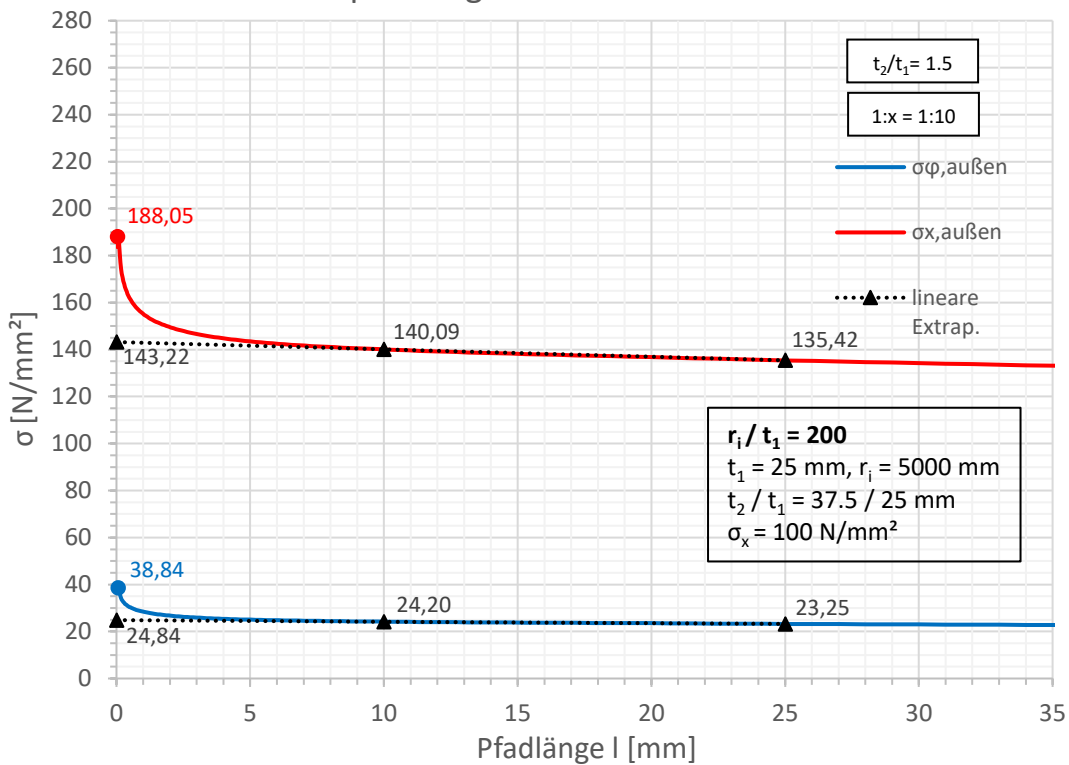


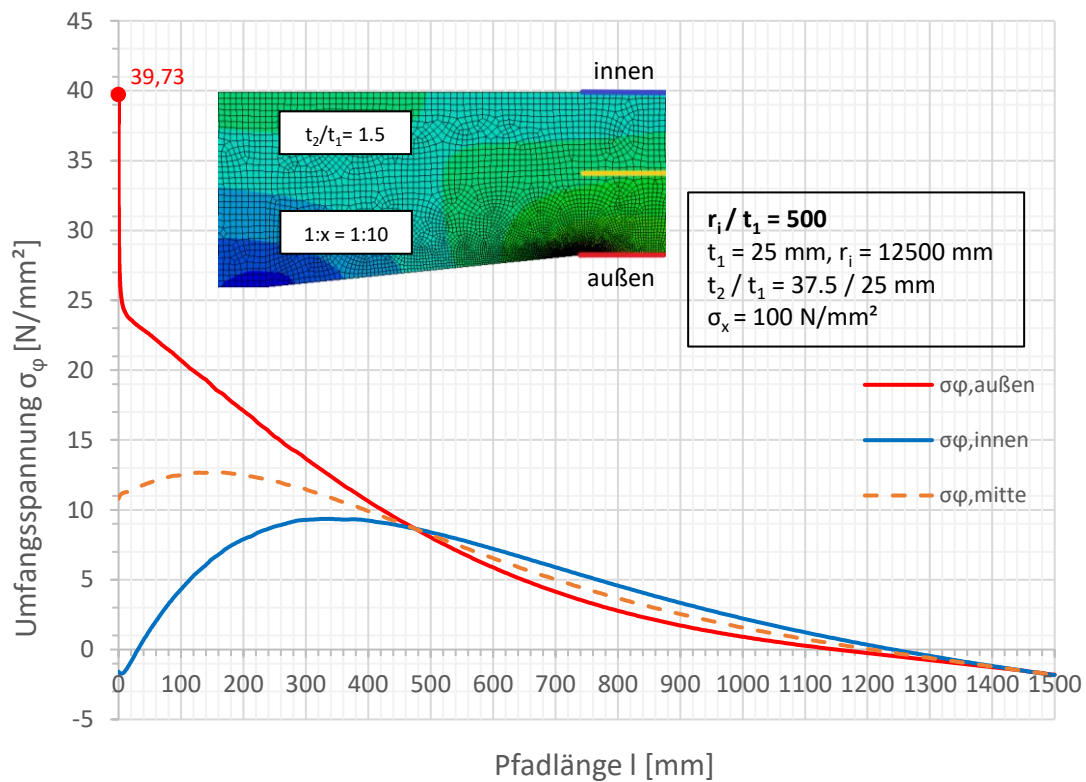
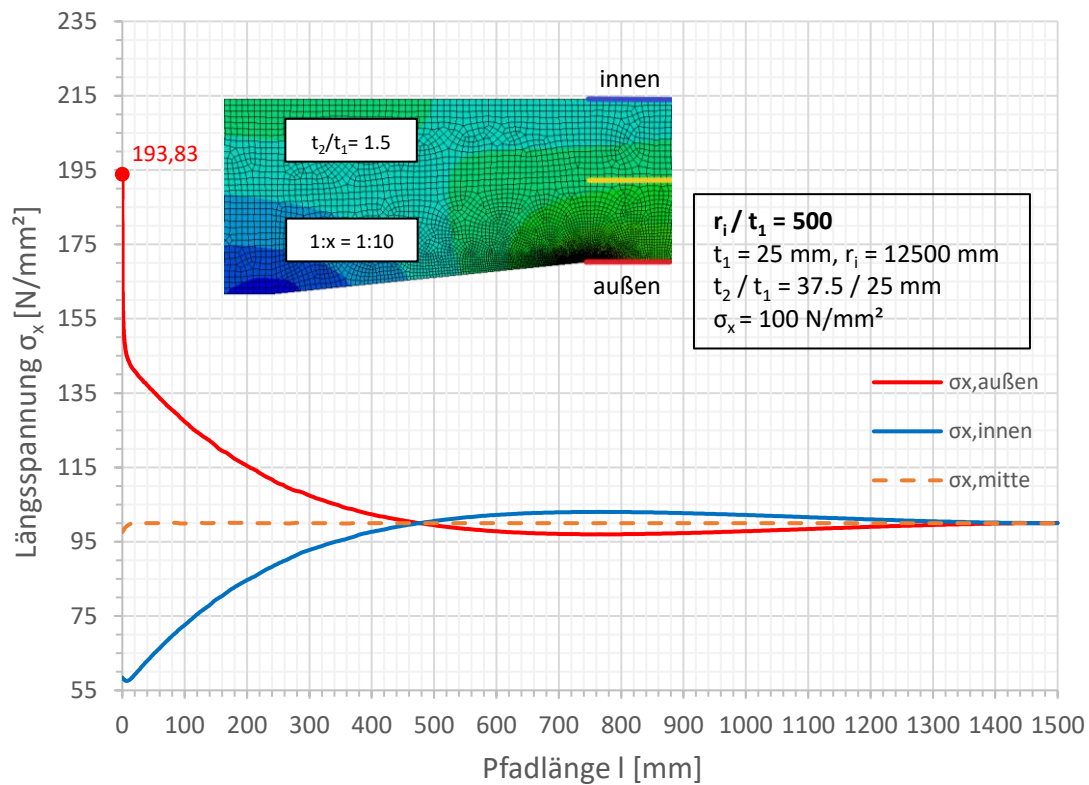


Spannungen an der Außenseite

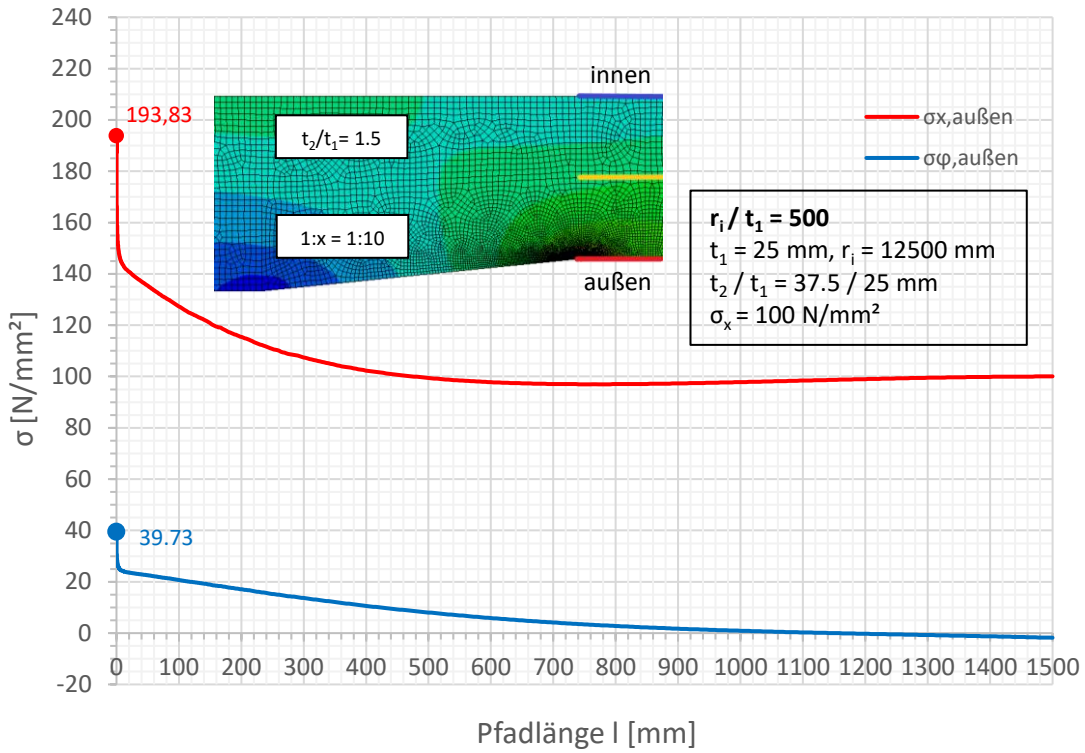


Spannungen an der Außenseite

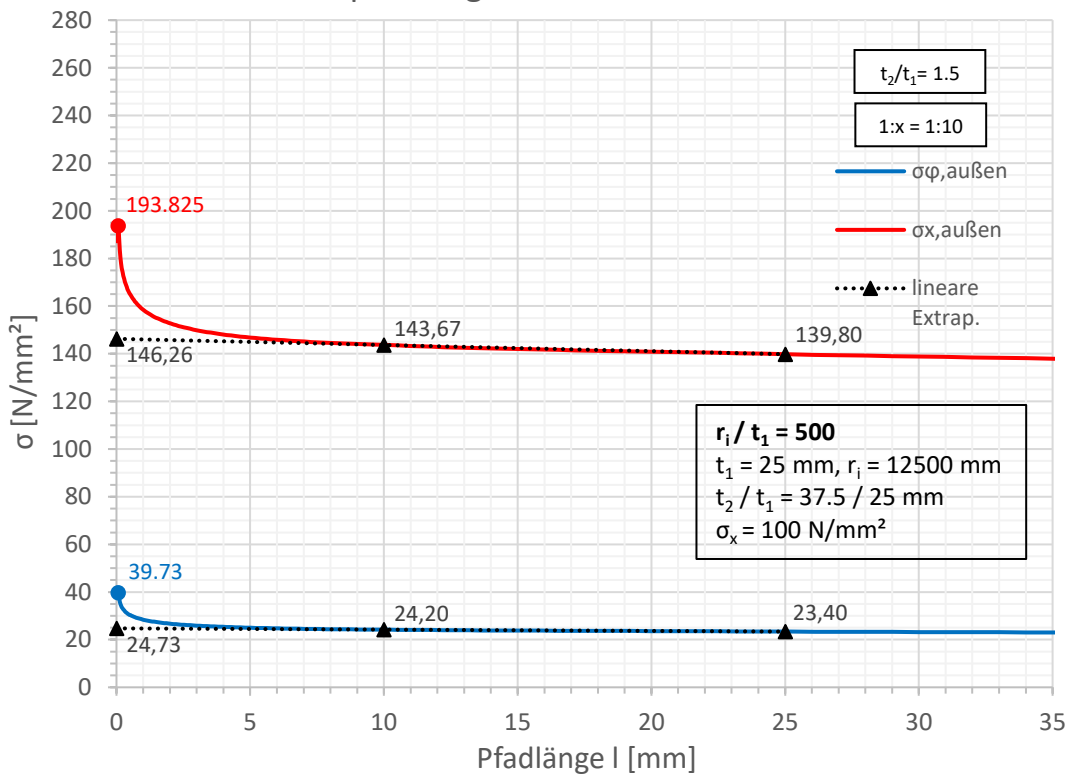


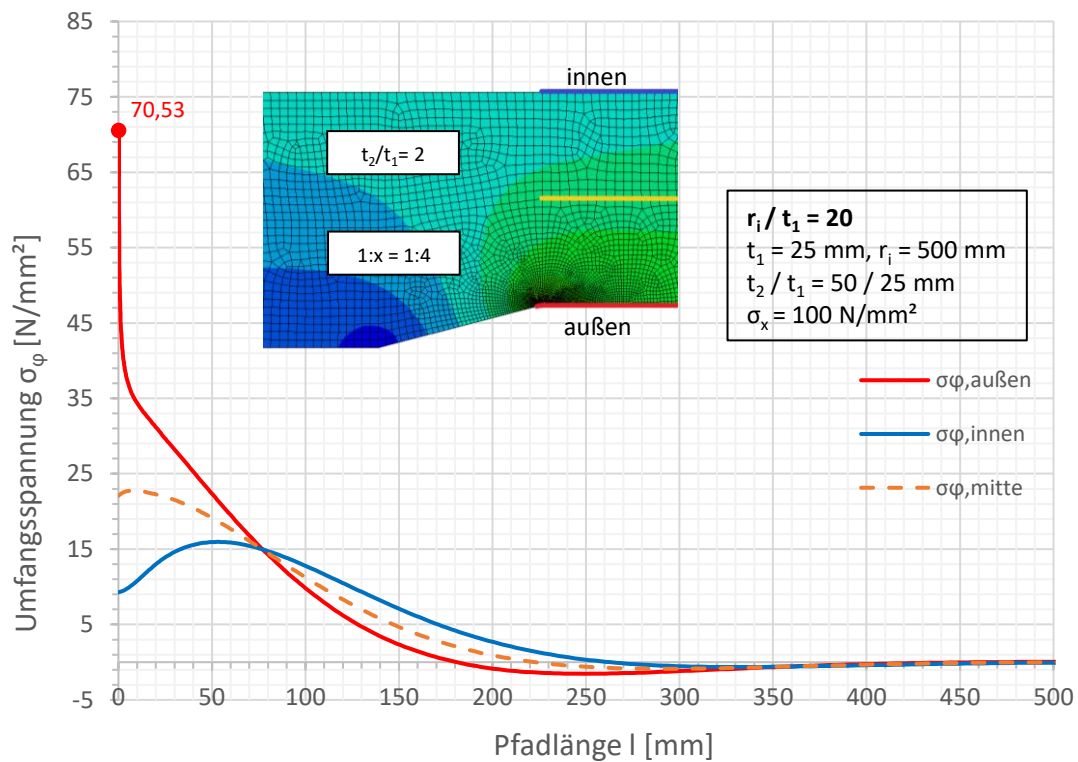
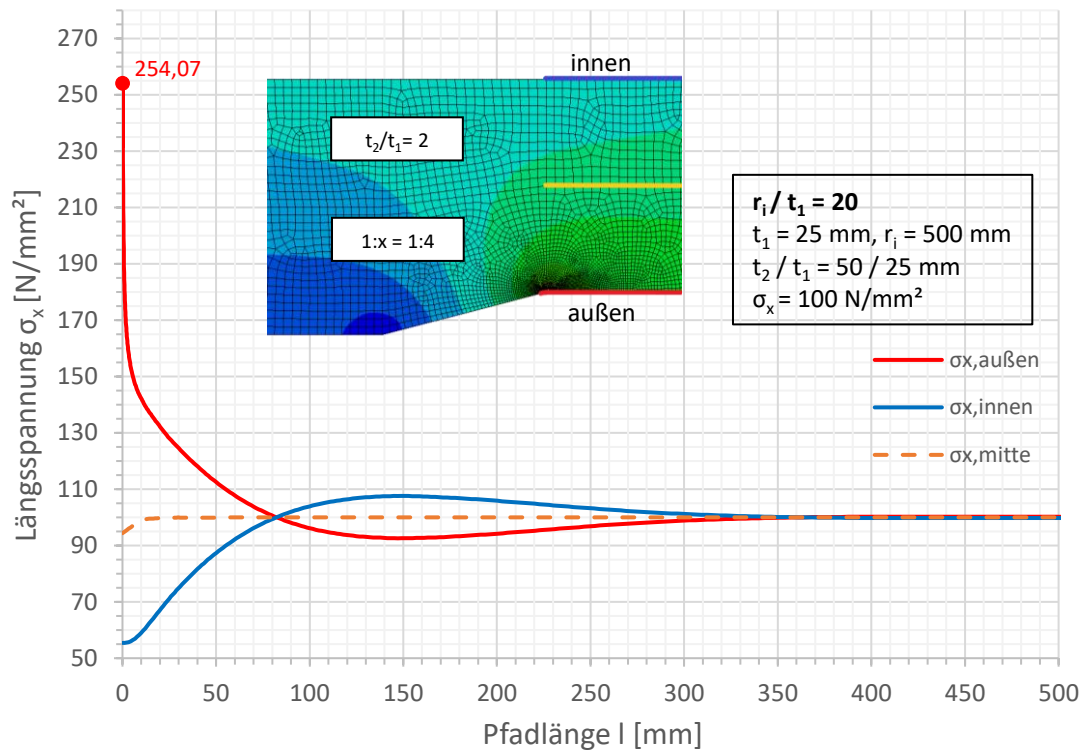


Spannungen an der Außenseite

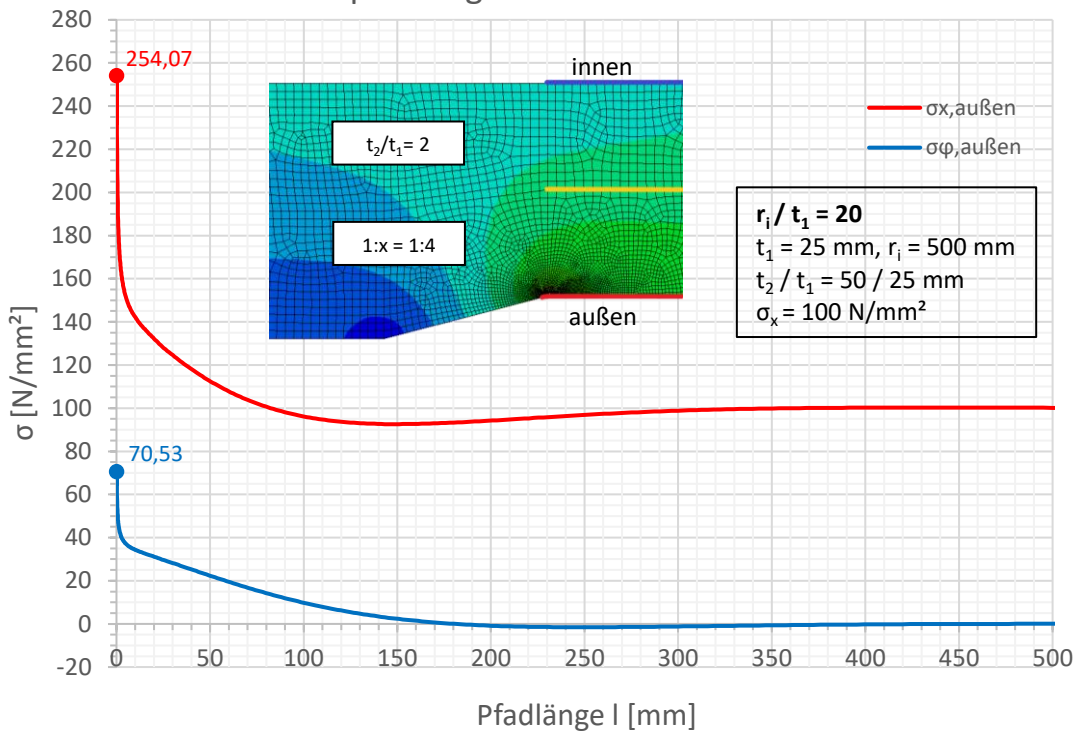


Spannungen an der Außenseite

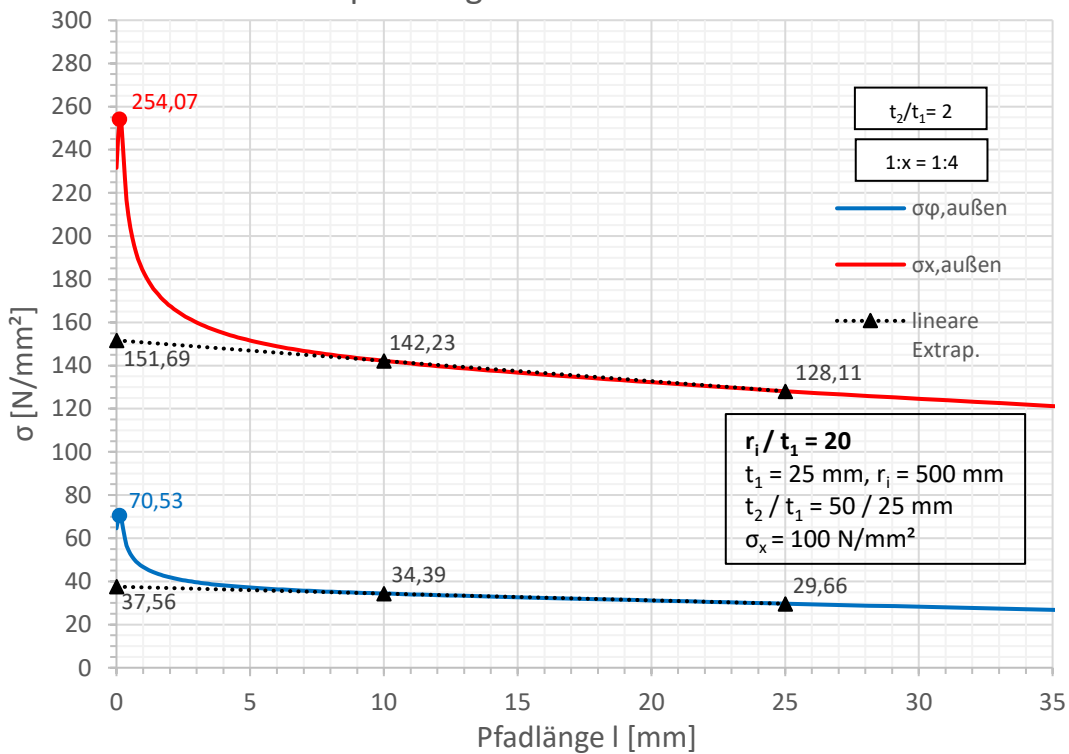


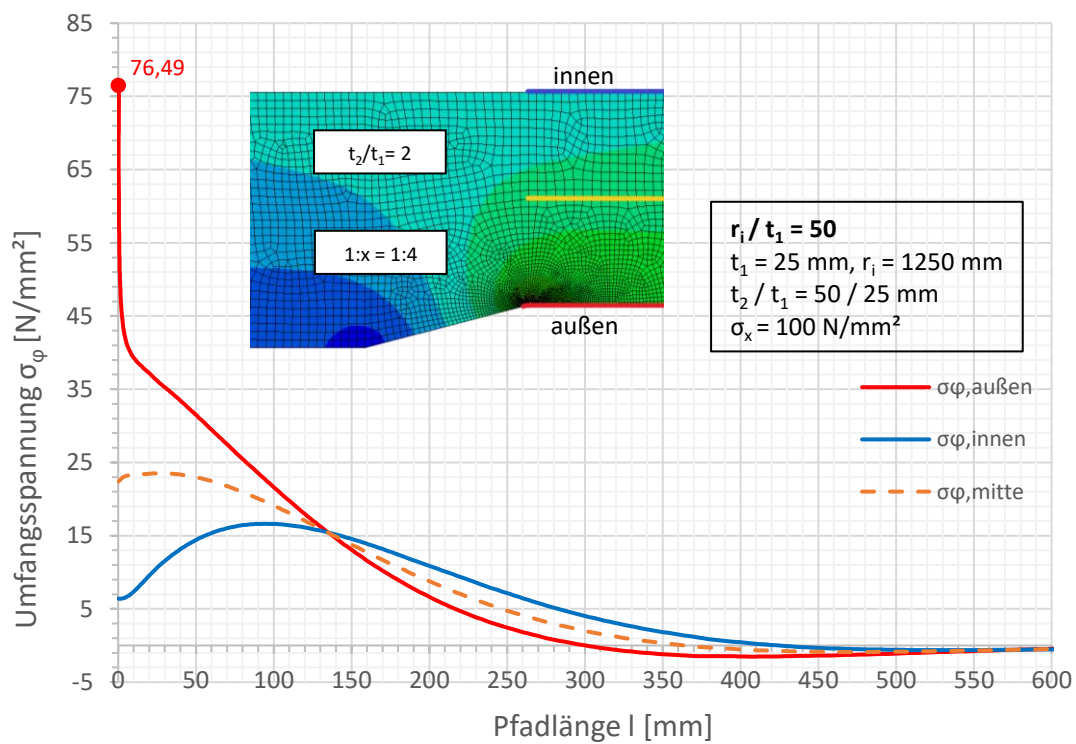
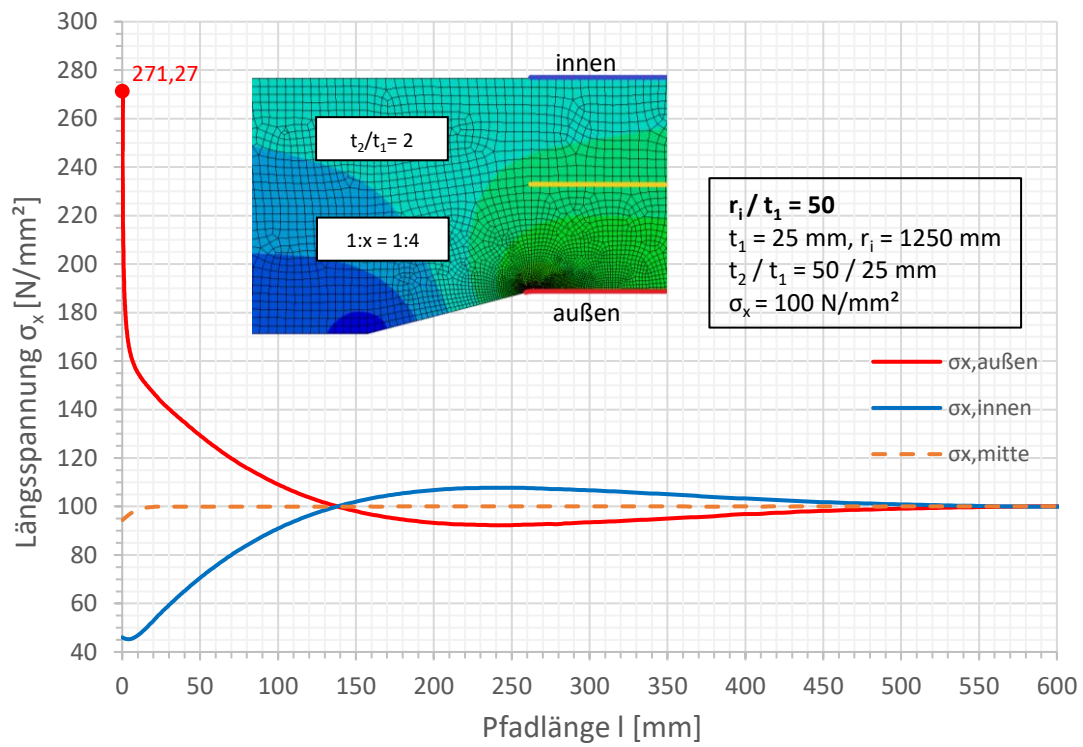


Spannungen an der Außenseite

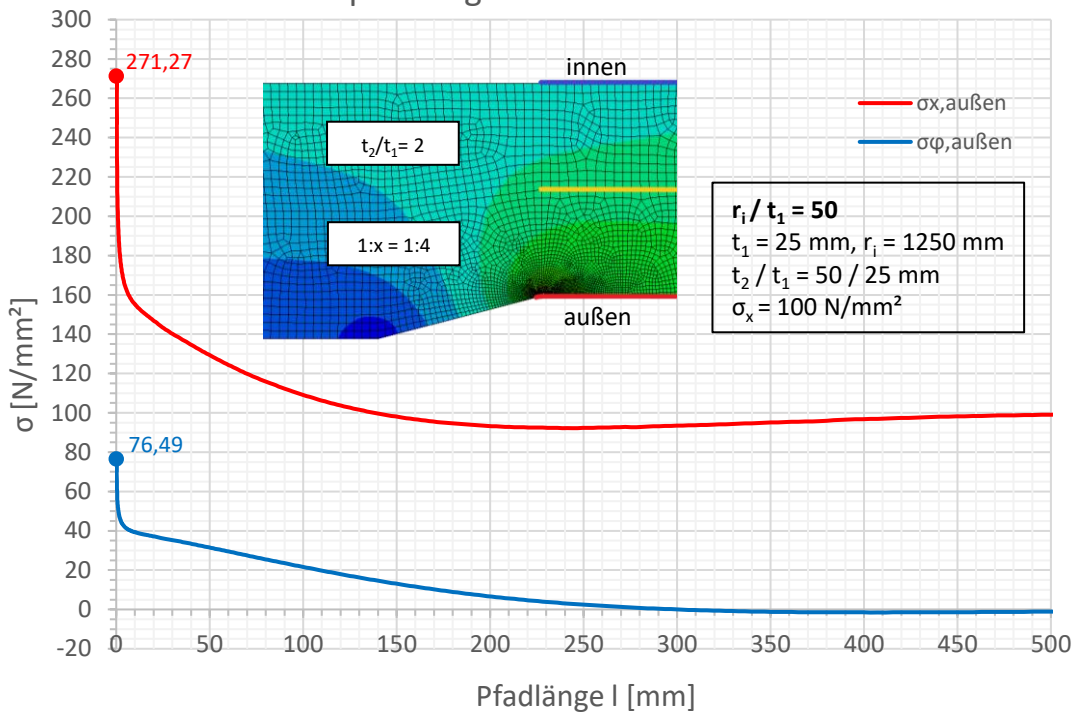


Spannungen an der Außenseite

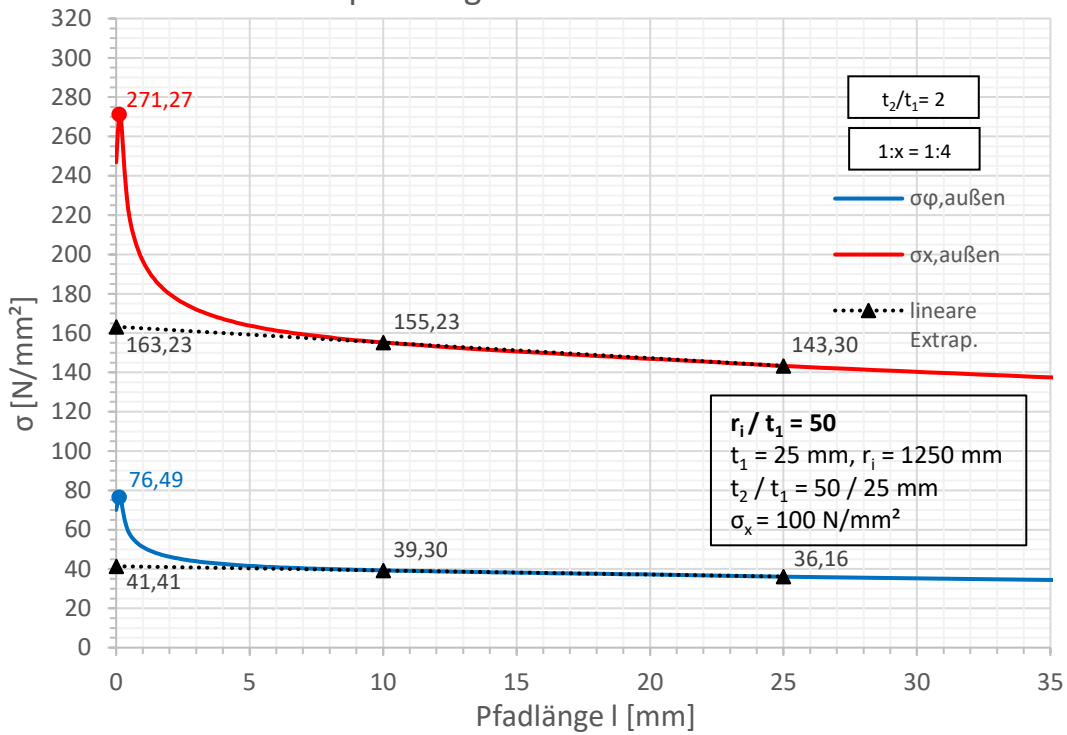


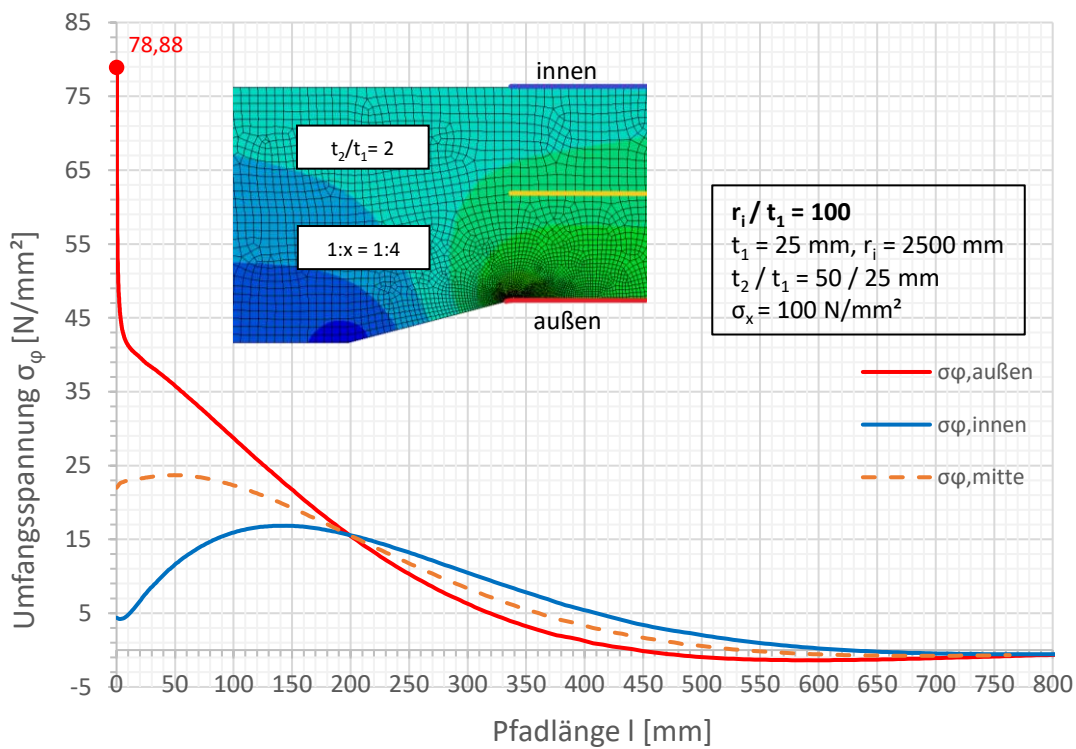
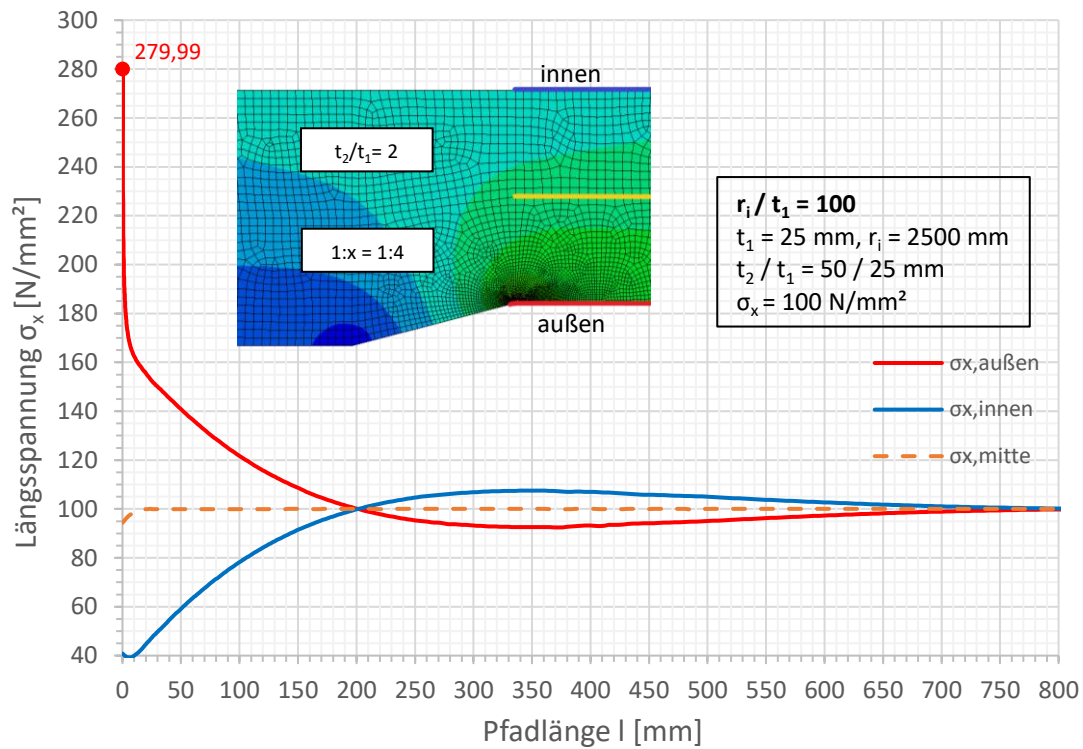


Spannungen an der Außenseite

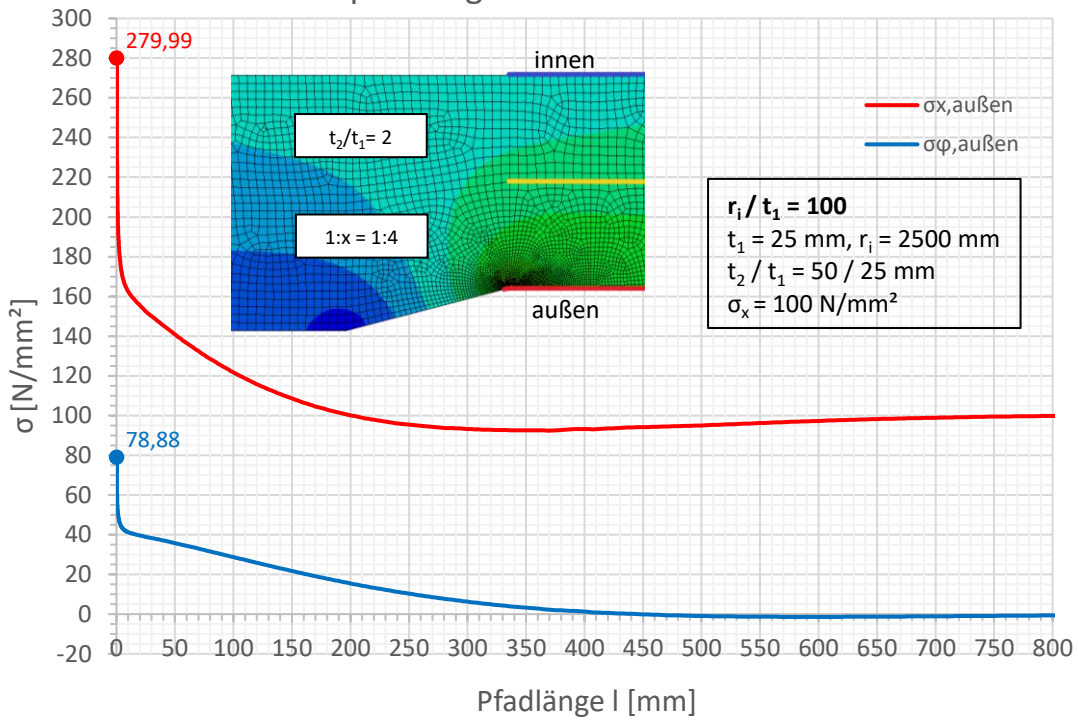


Spannungen an der Außenseite

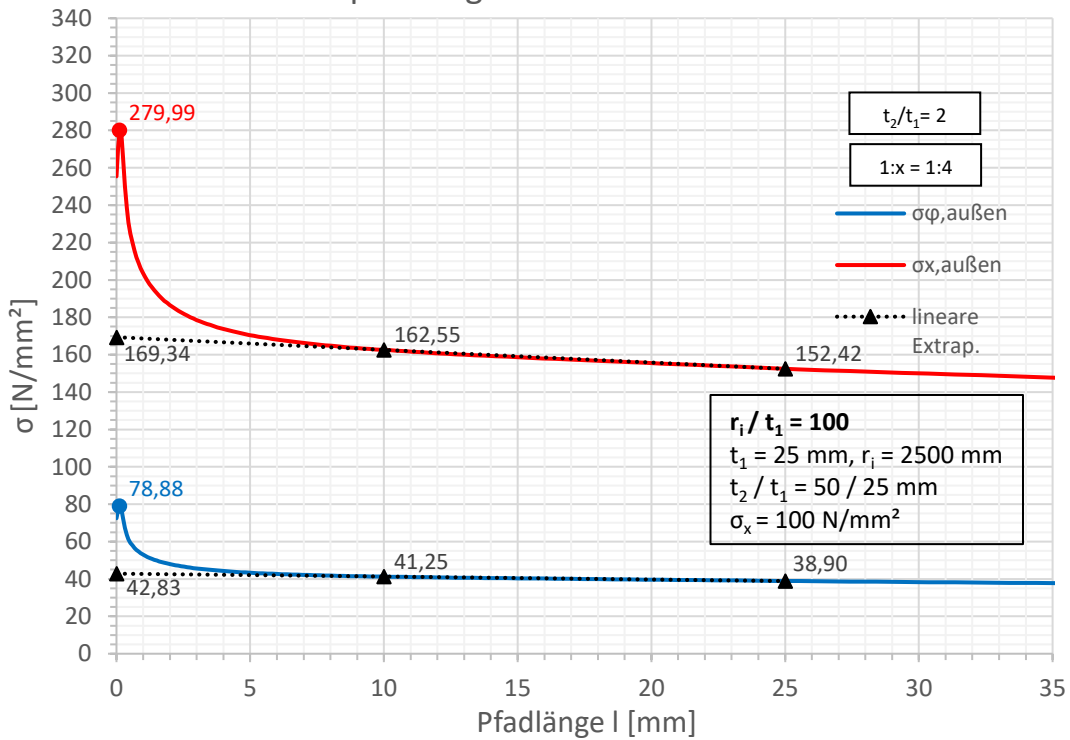


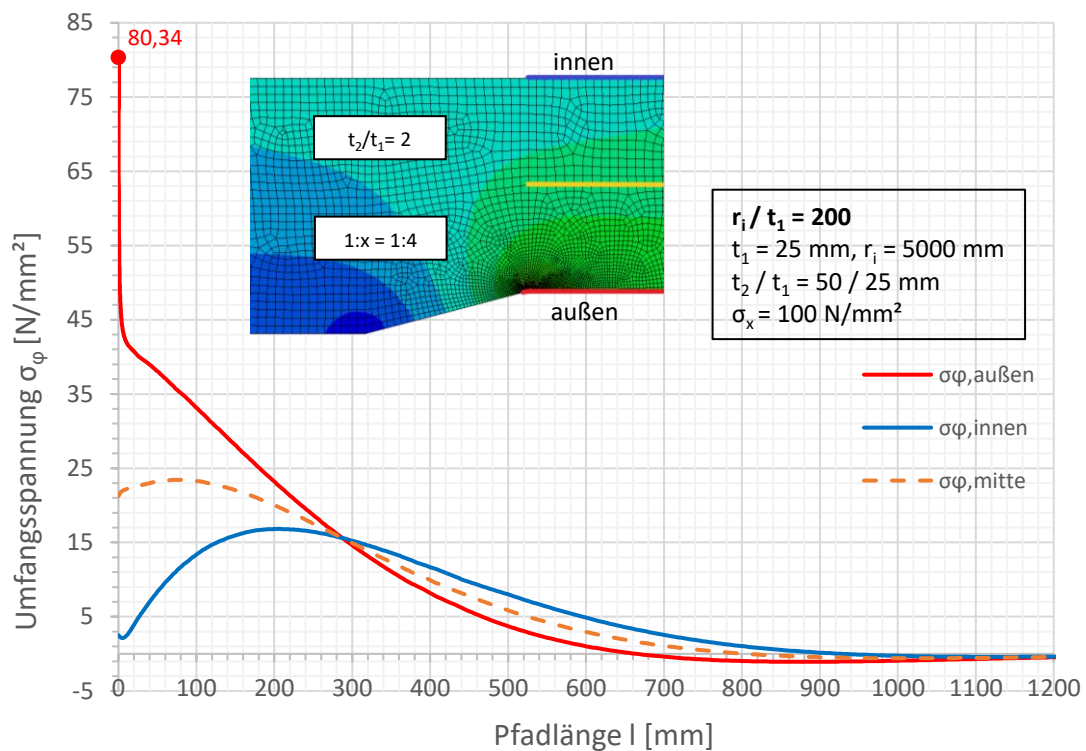
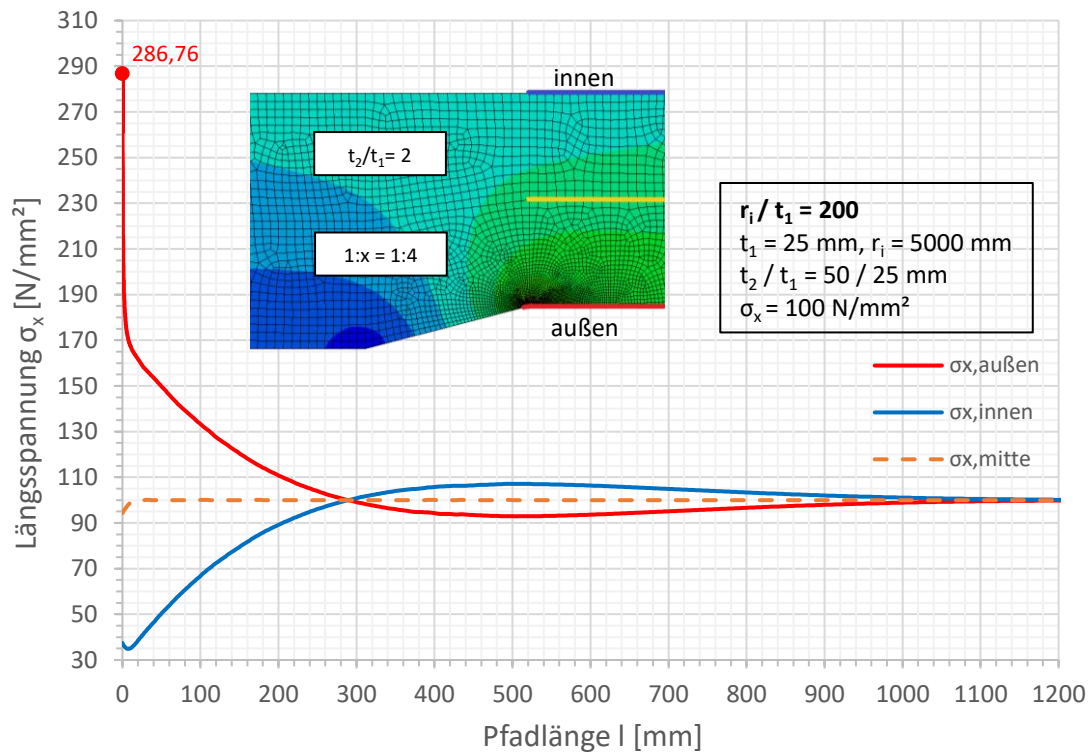


Spannungen an der Außenseite

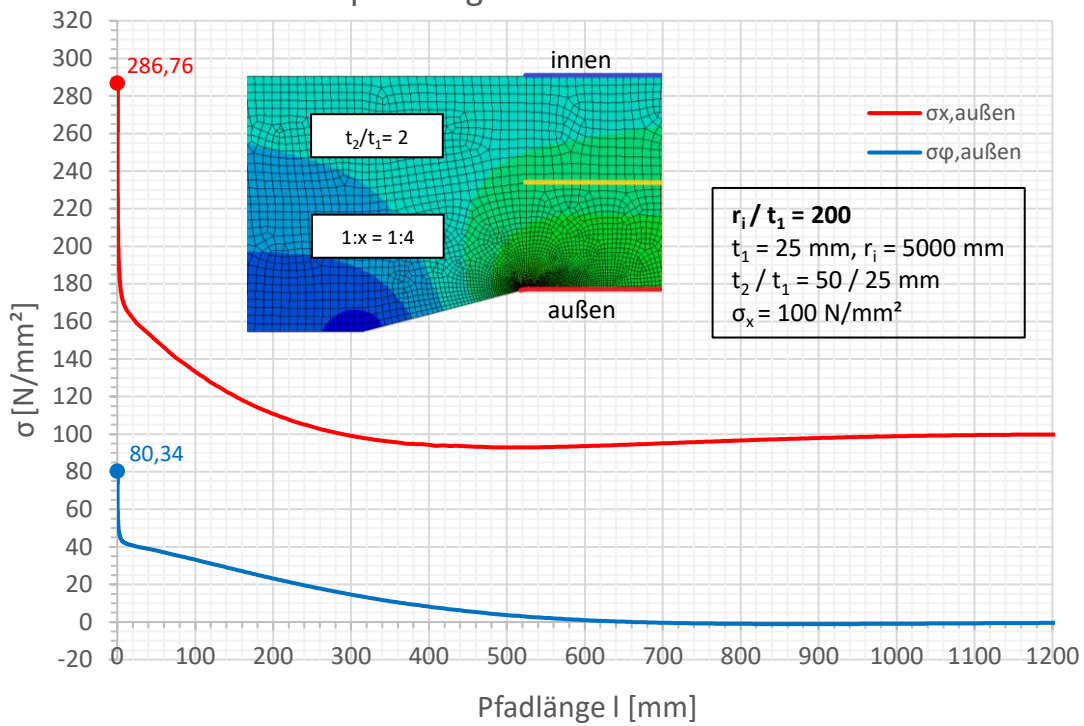


Spannungen an der Außenseite

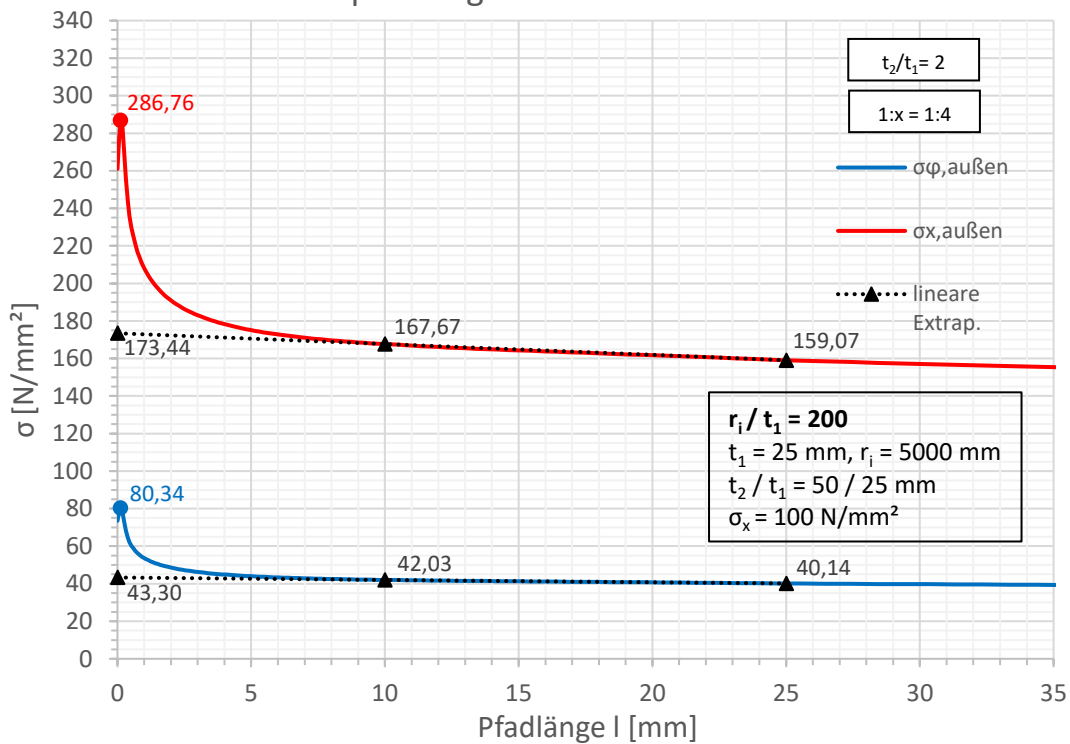


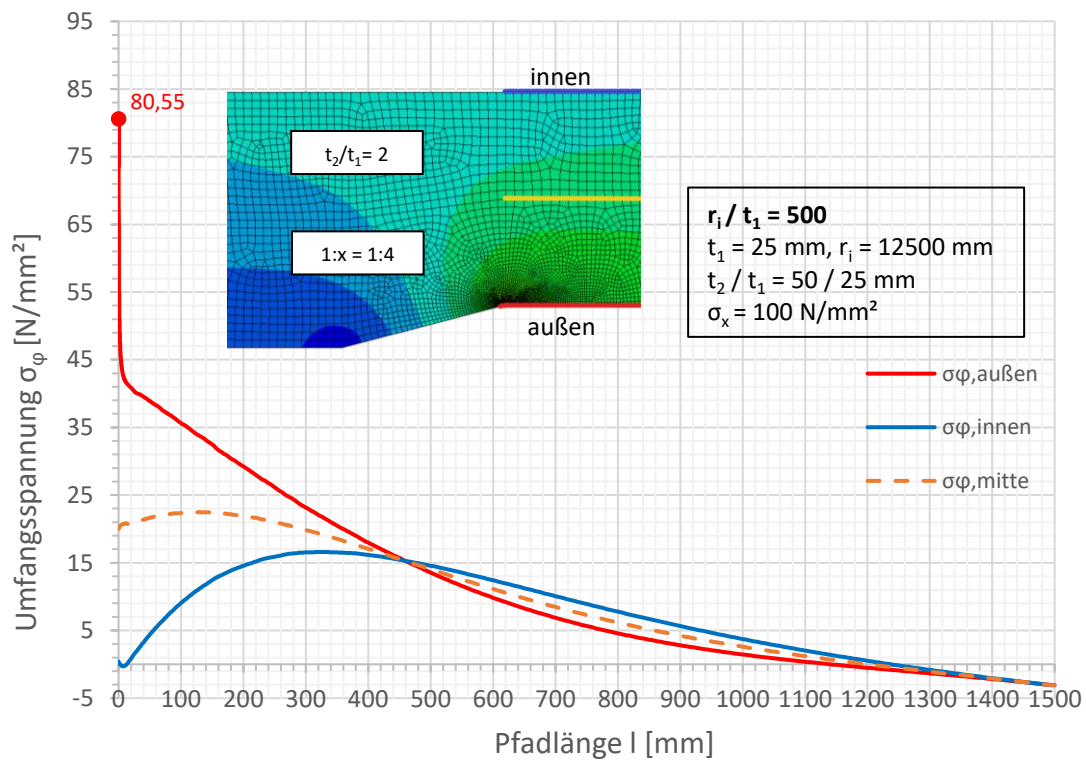
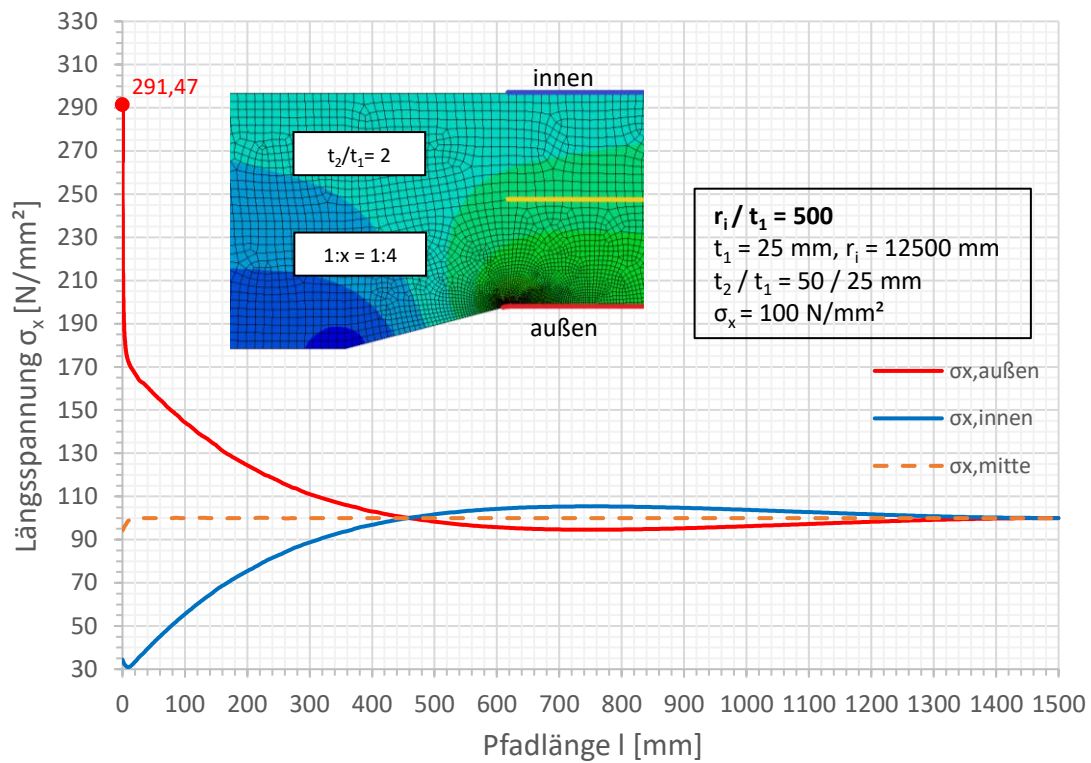


Spannungen an der Außenseite

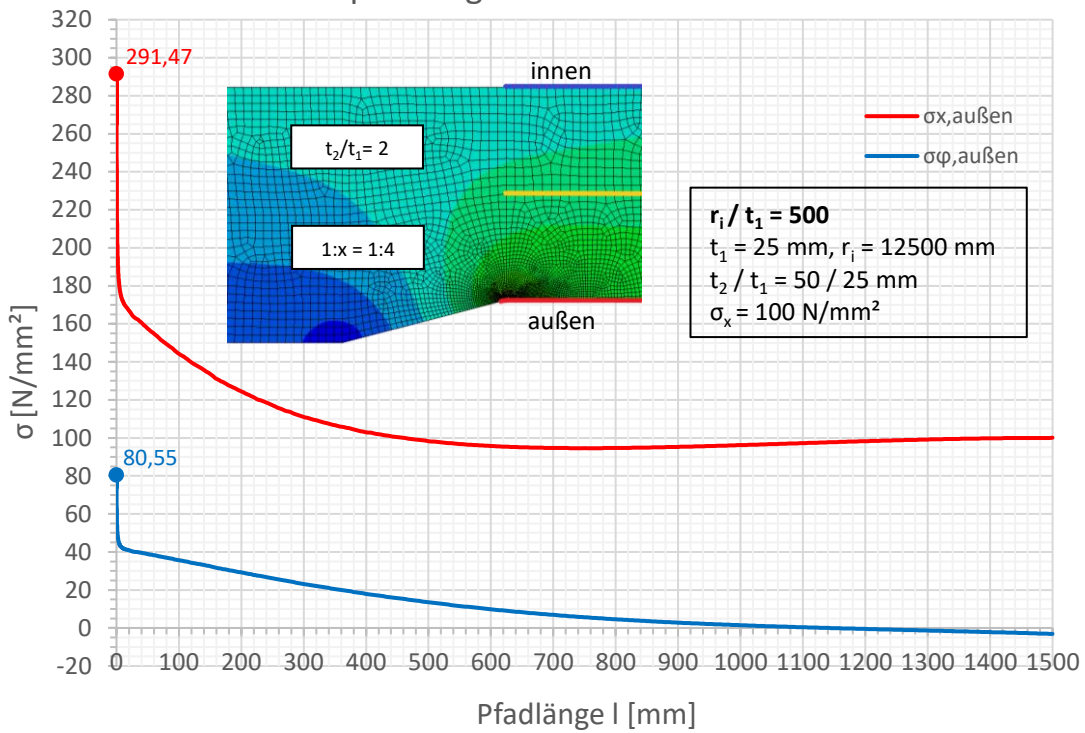


Spannungen an der Außenseite

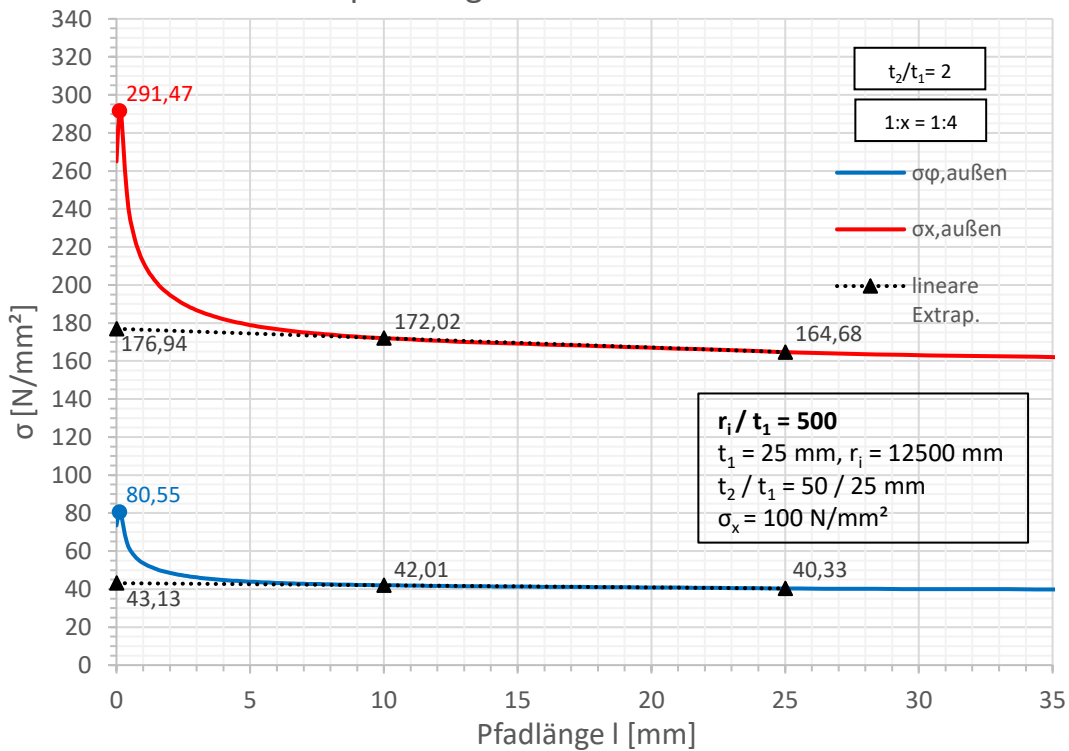


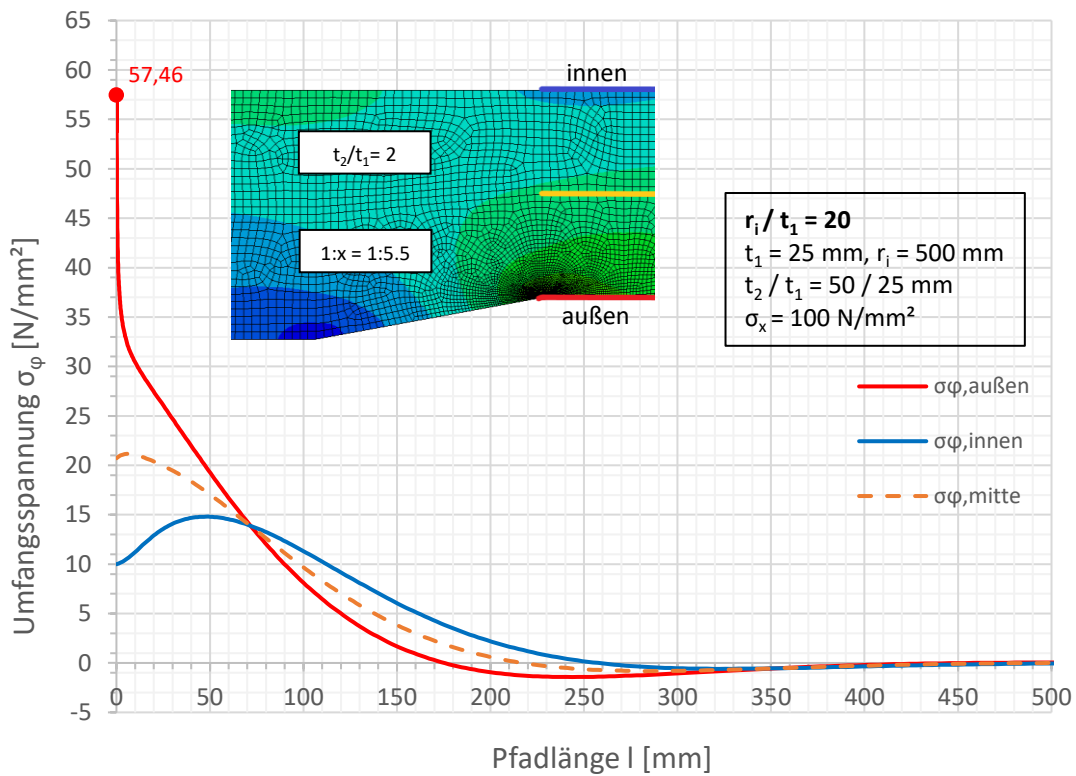
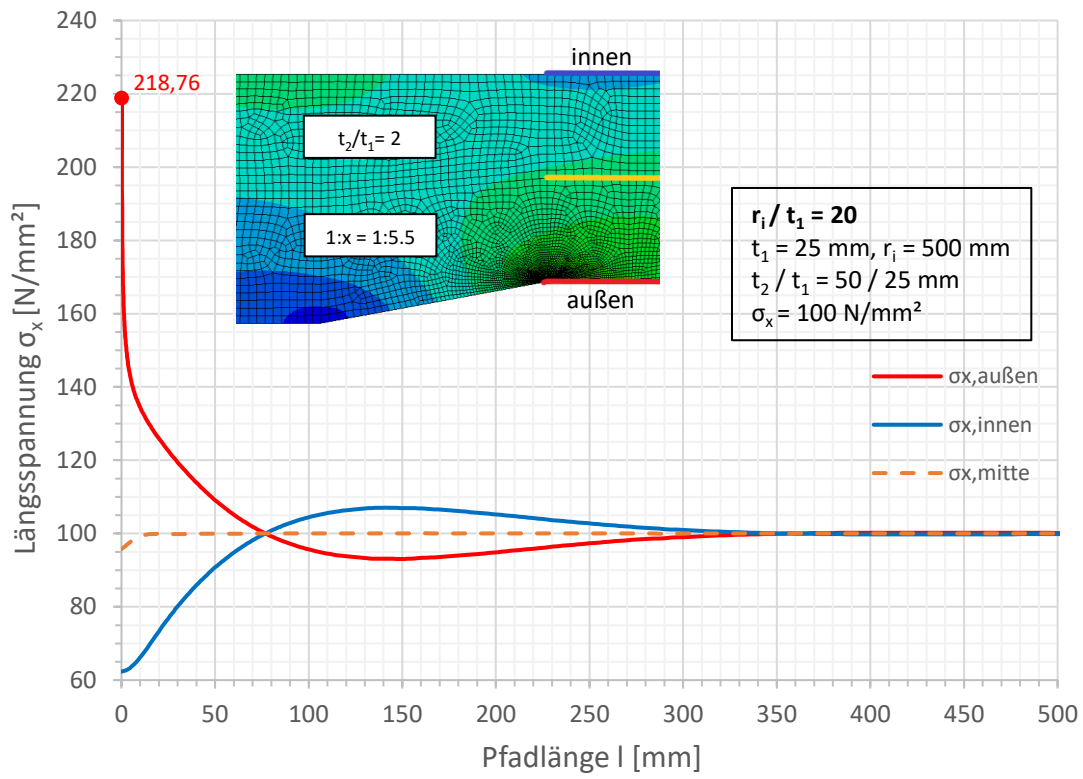


Spannungen an der Außenseite

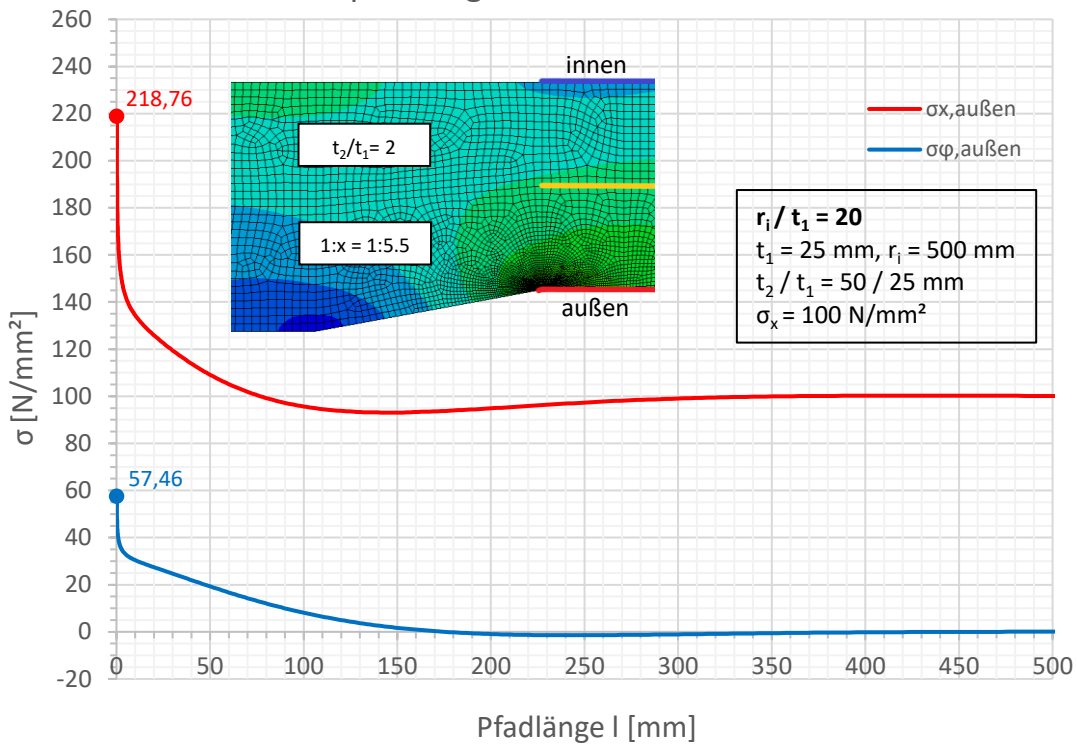


Spannungen an der Außenseite

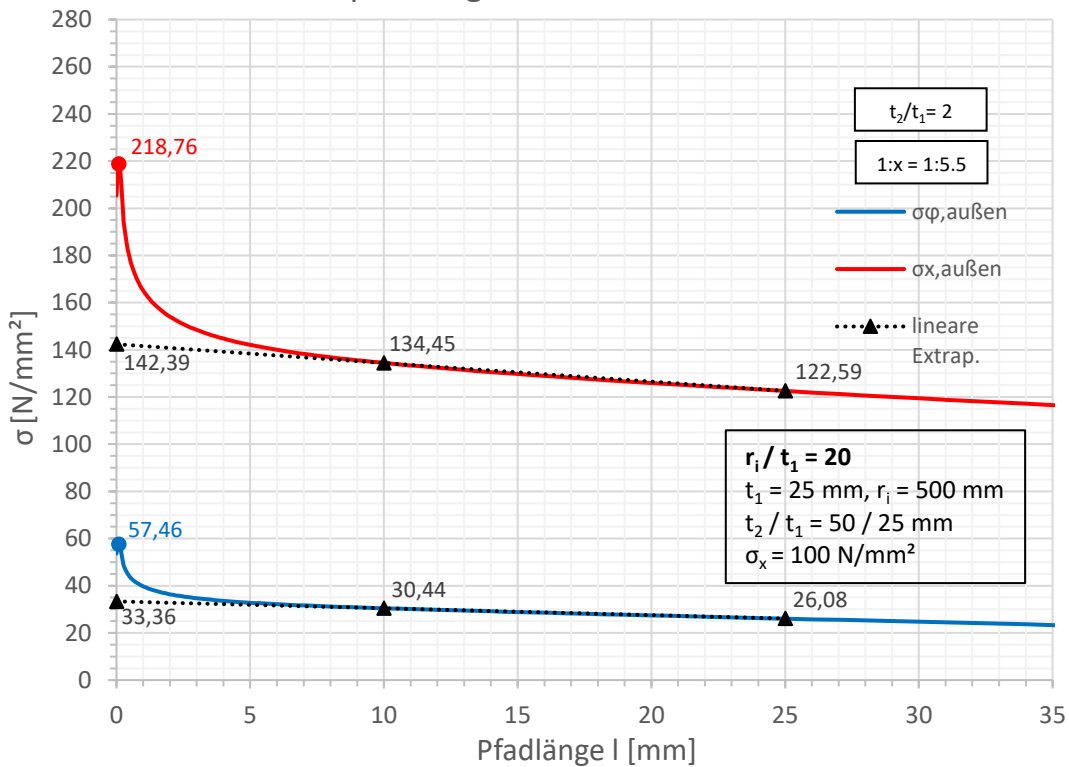


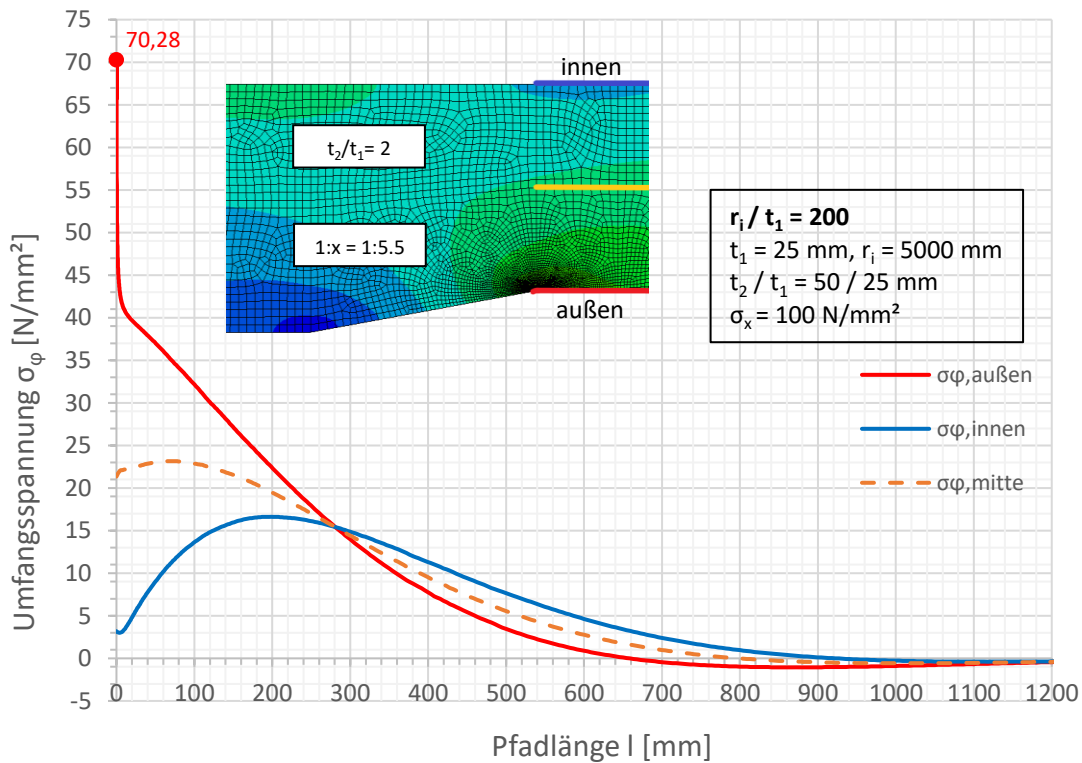
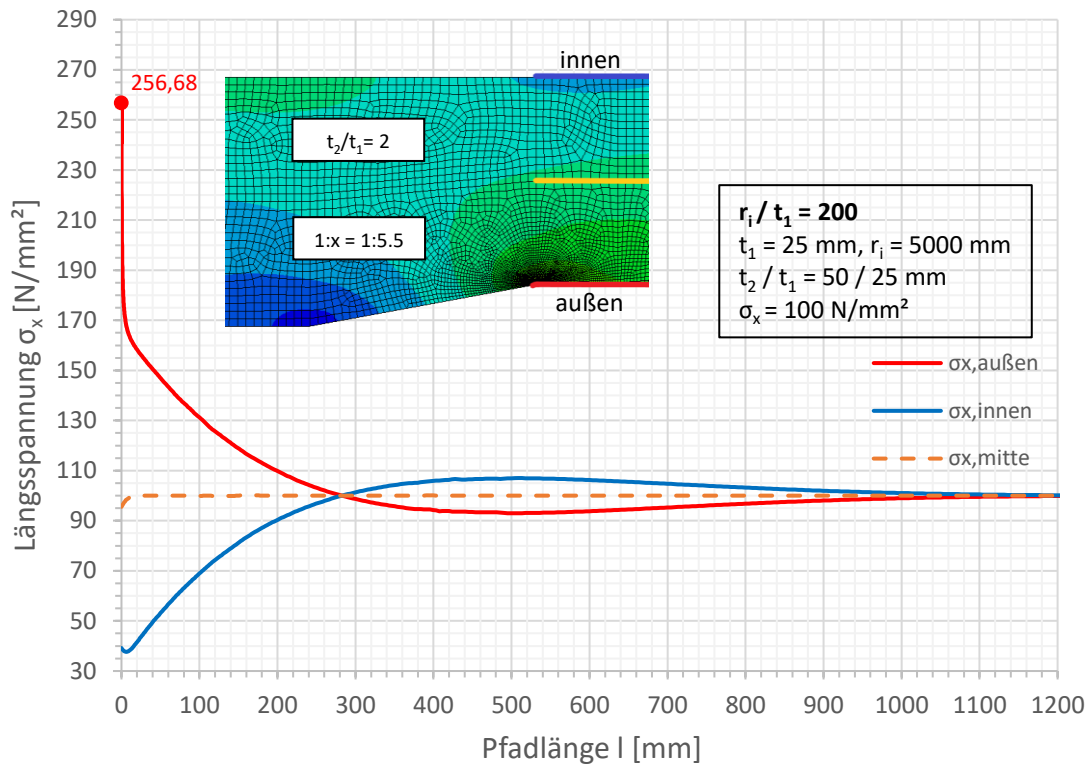


Spannungen an der Außenseite

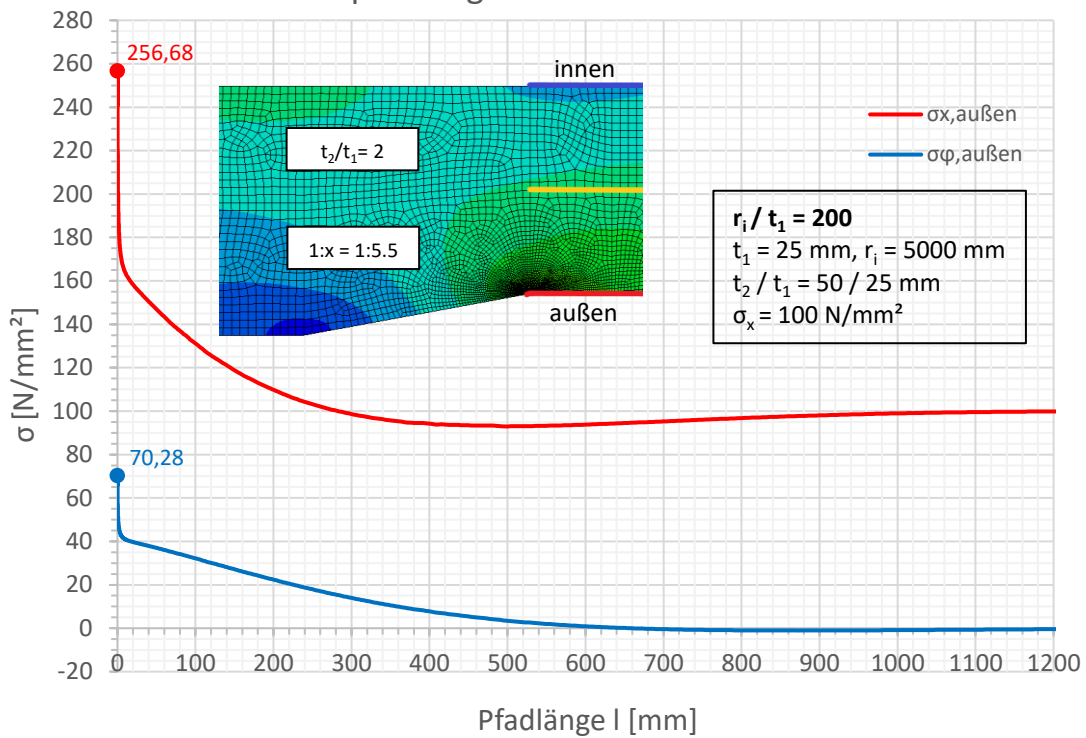


Spannungen an der Außenseite

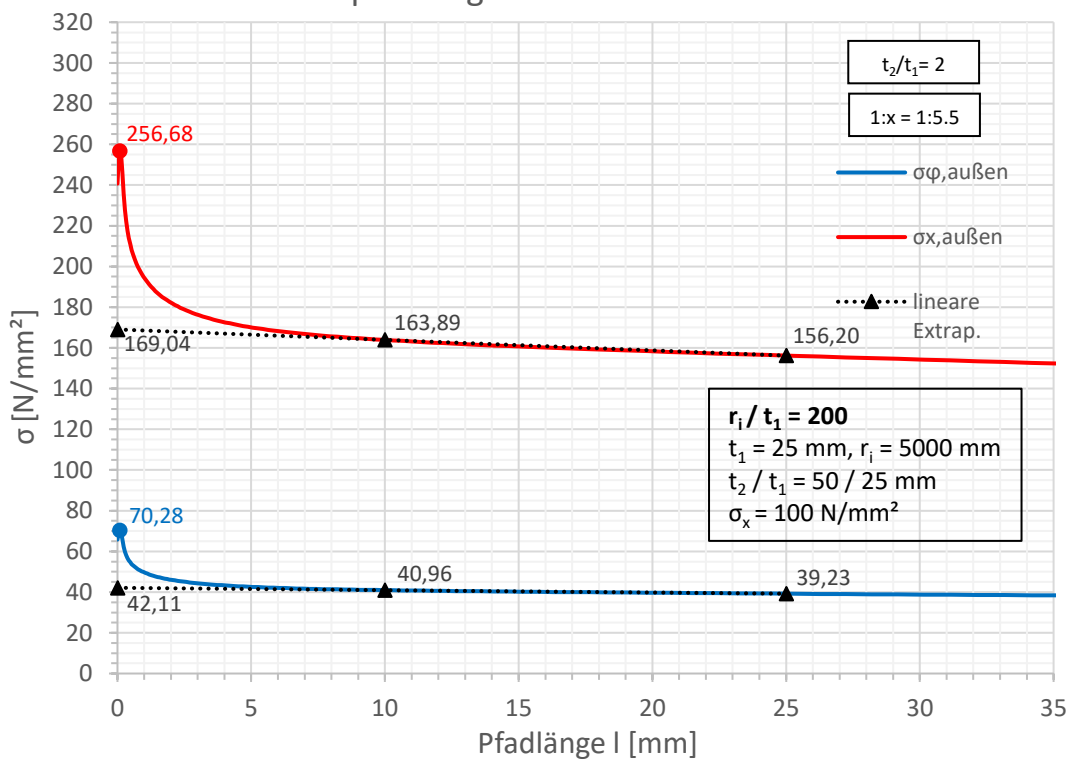


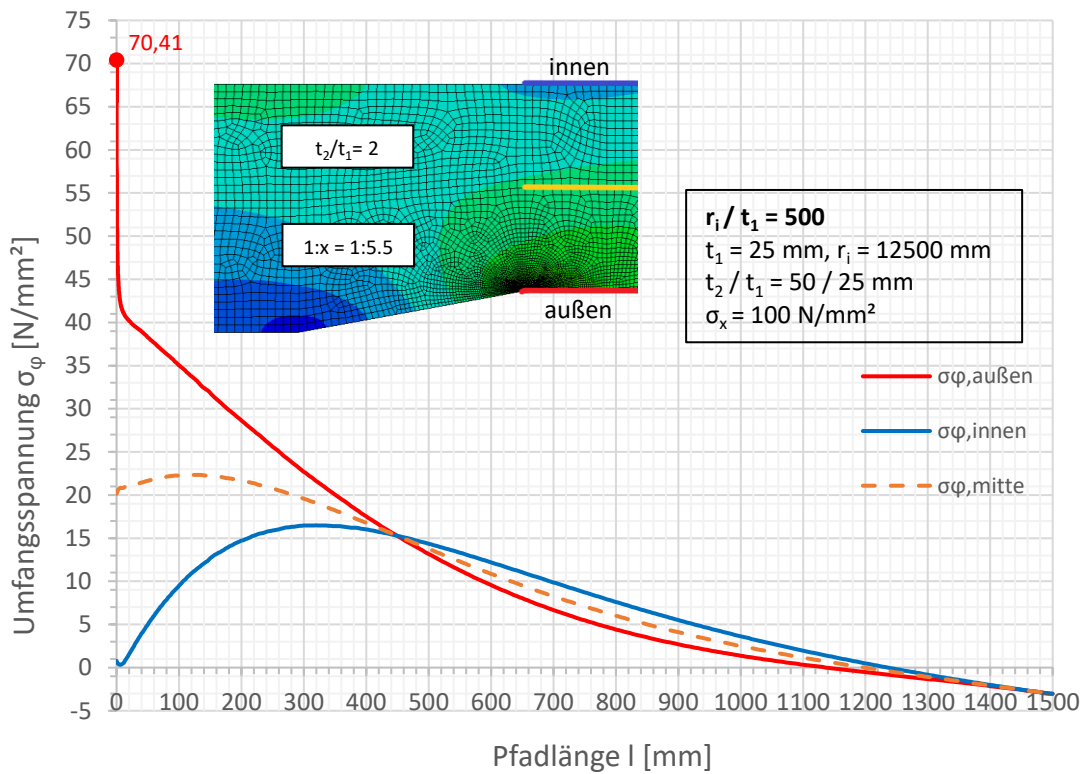
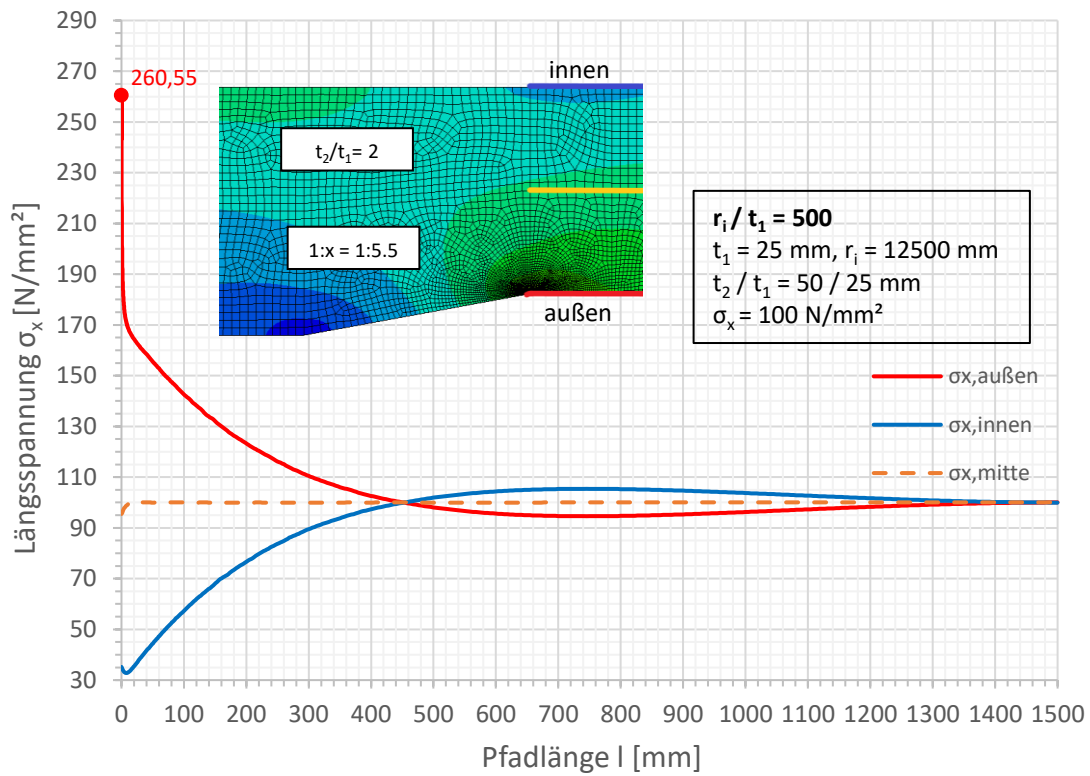


Spannungen an der Außenseite

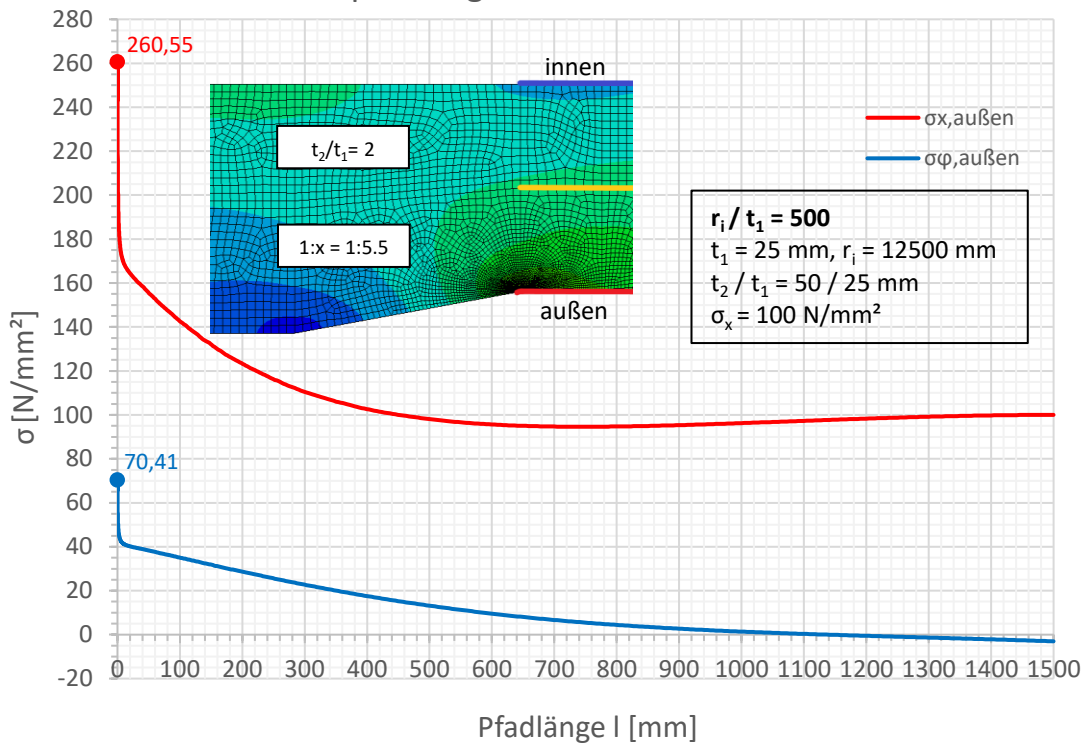


Spannungen an der Außenseite

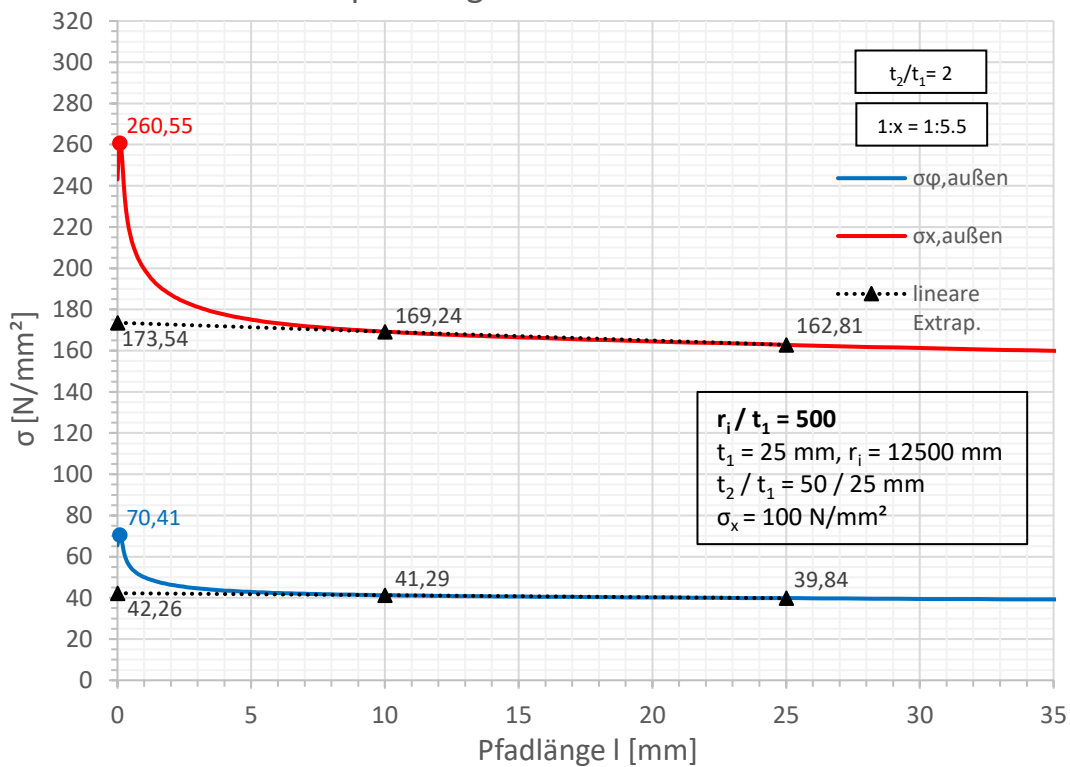


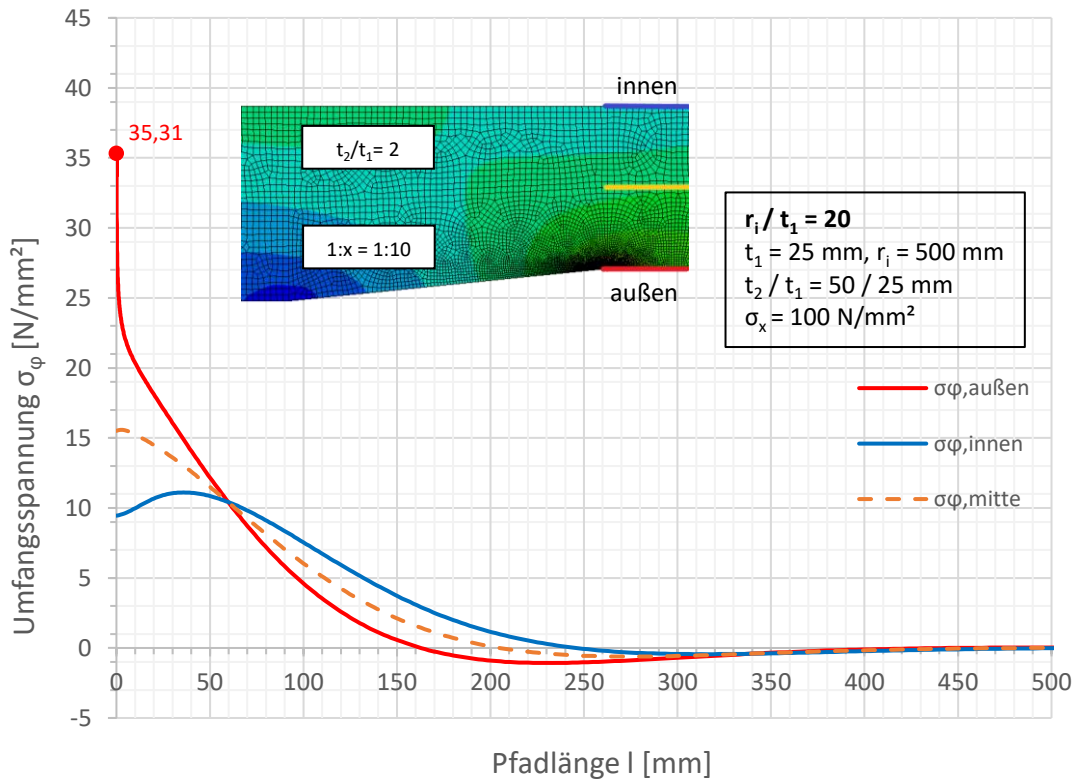
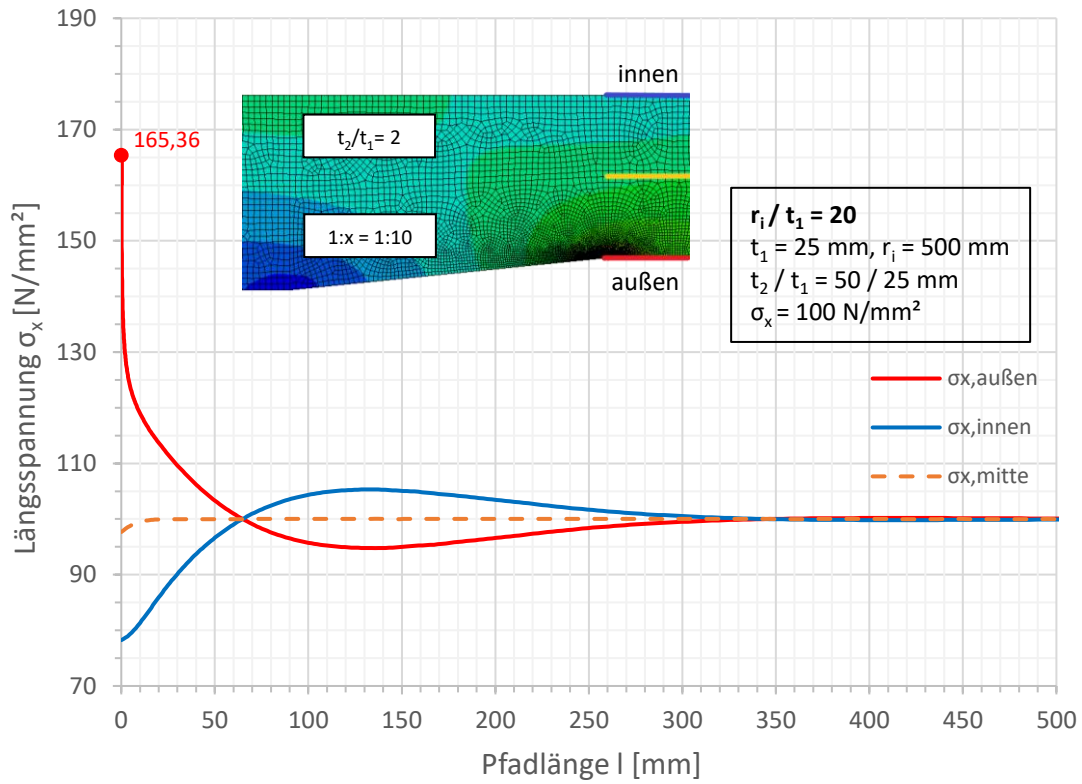


Spannungen an der Außenseite

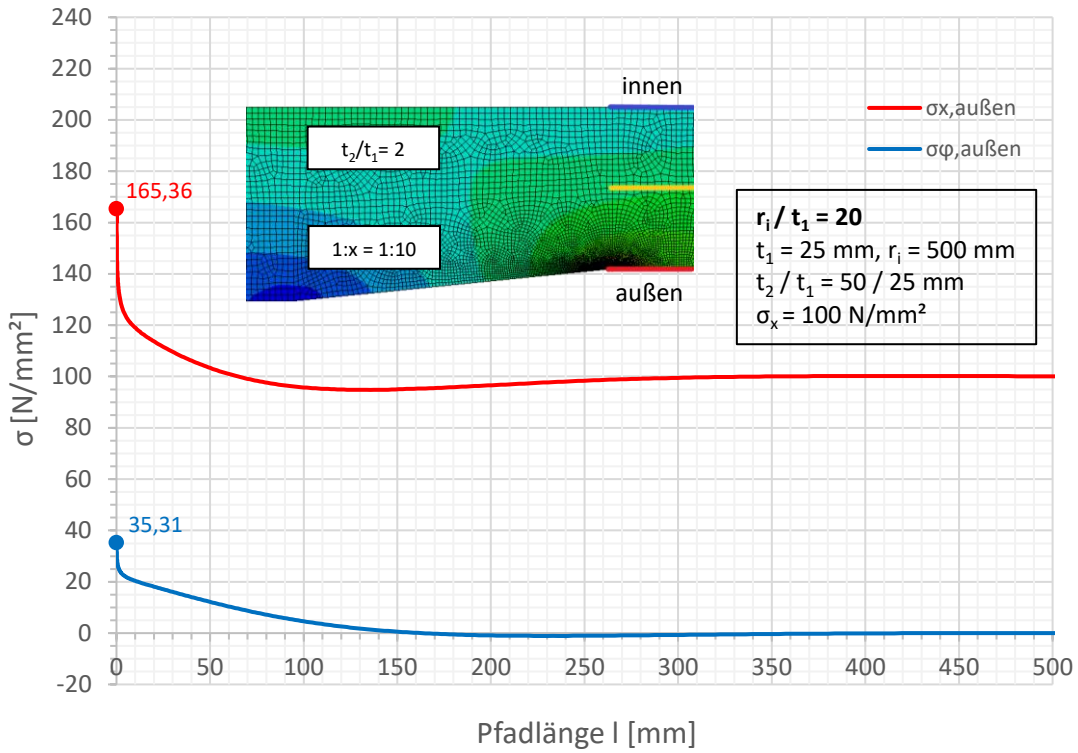


Spannungen an der Außenseite

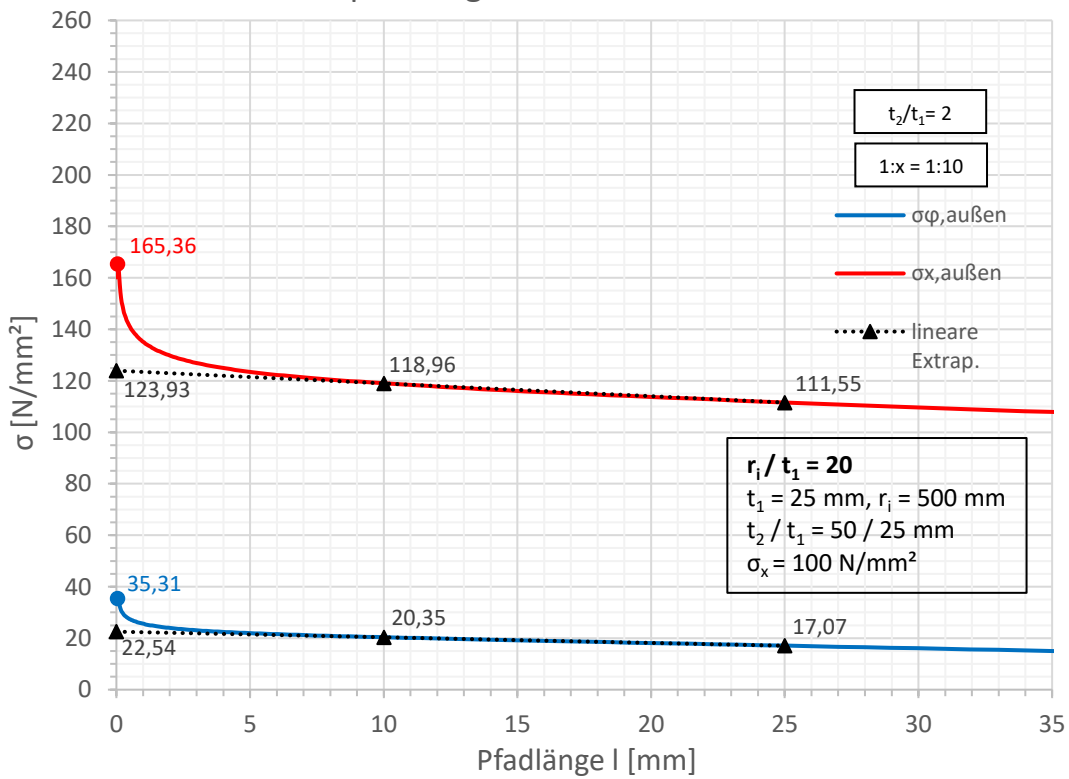


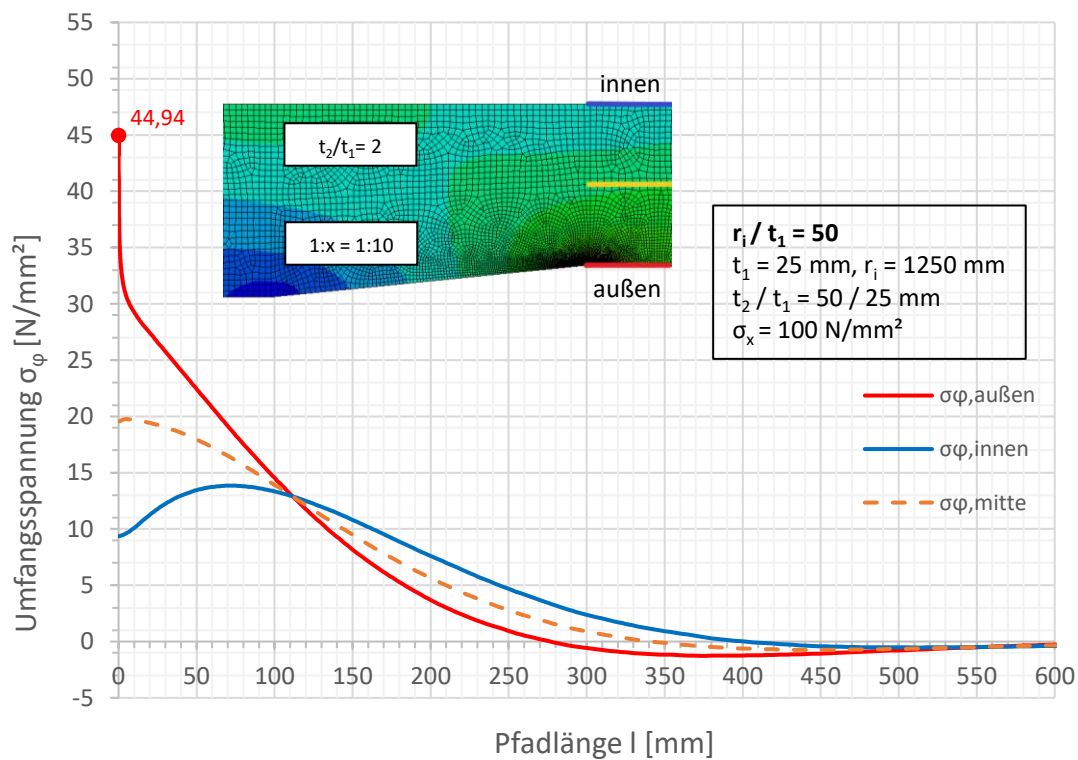
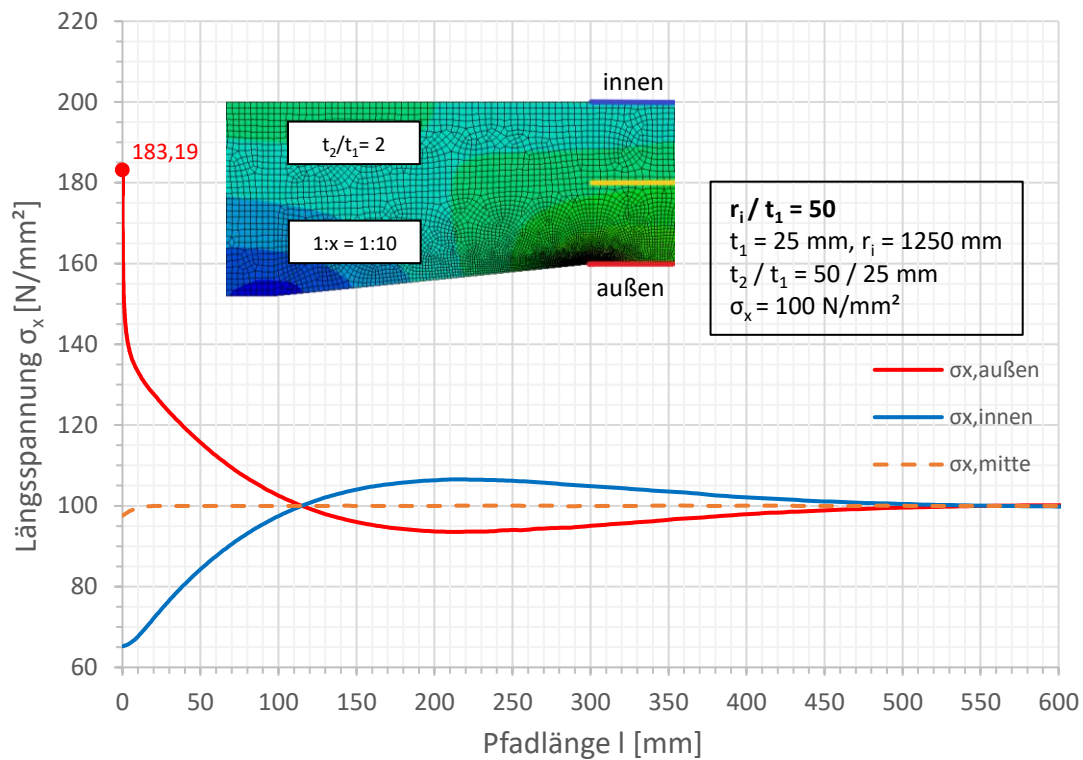


Spannungen an der Außenseite

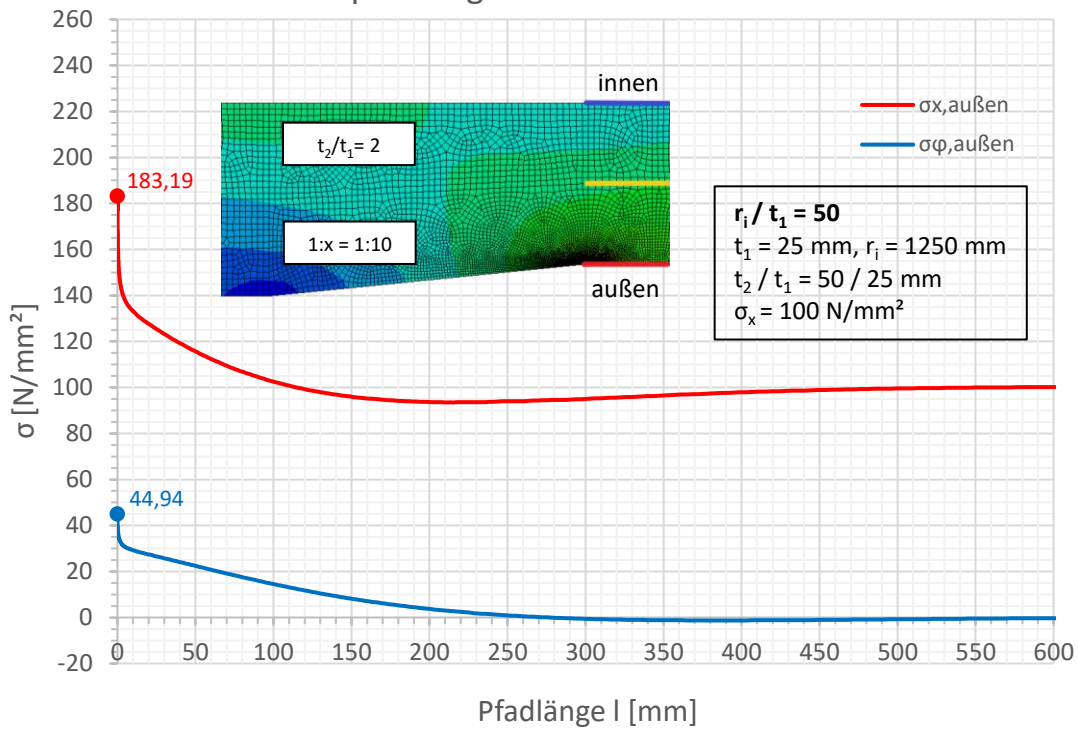


Spannungen an der Außenseite

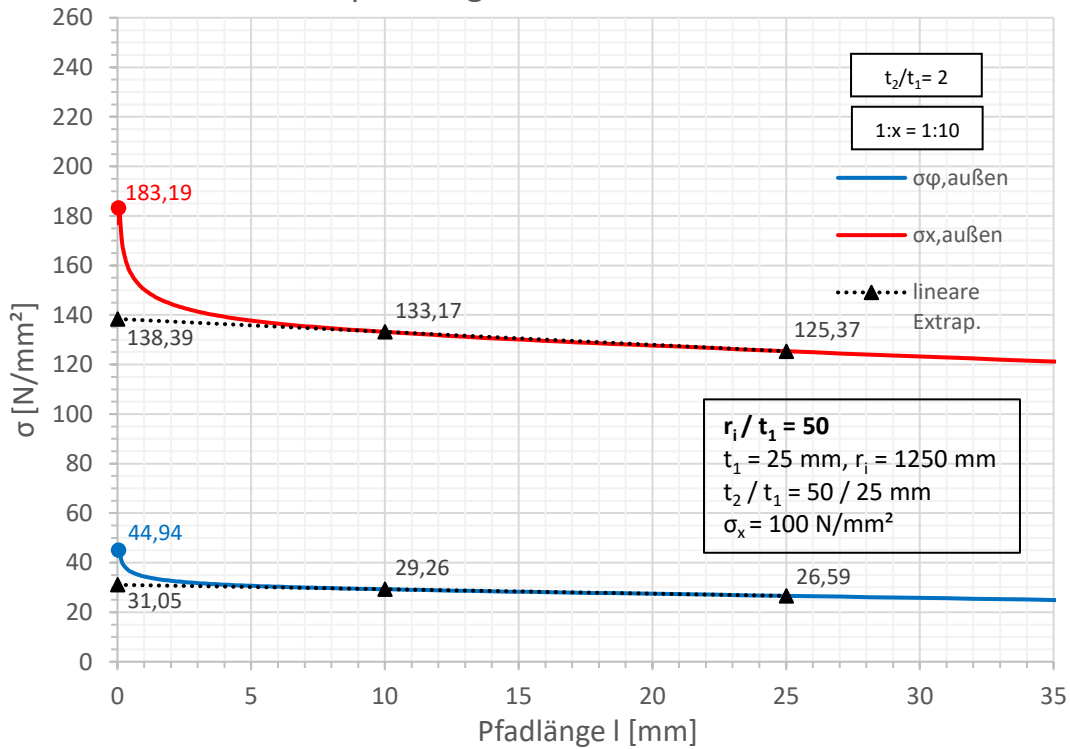


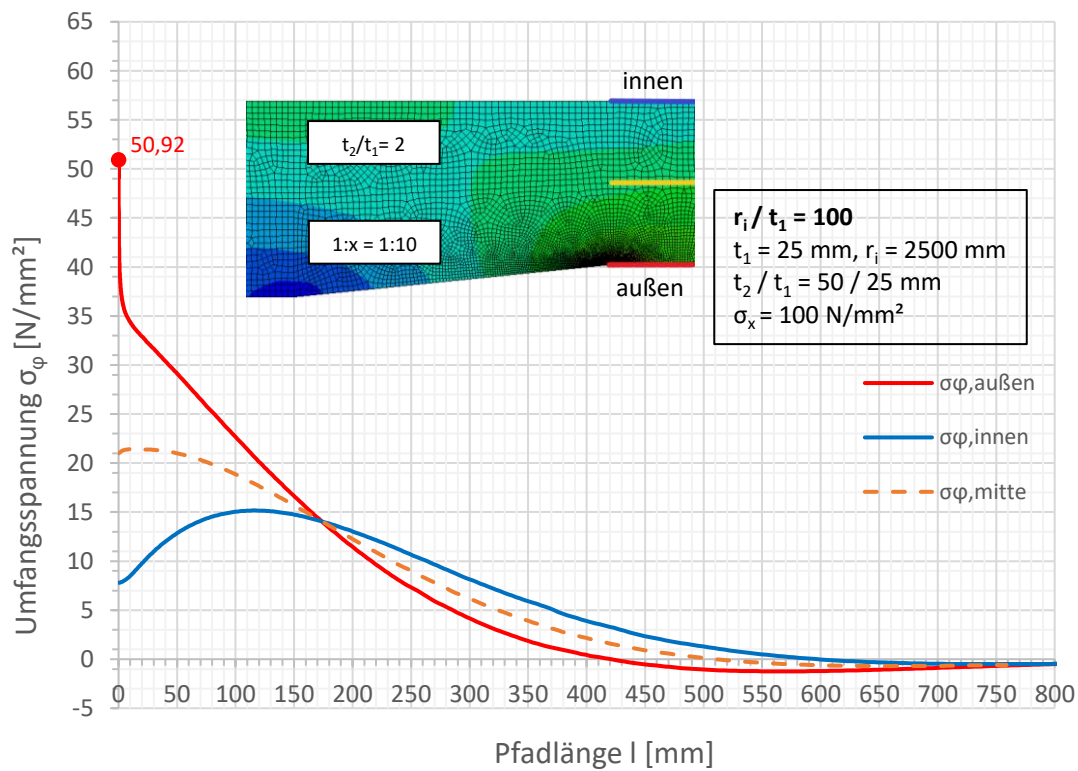
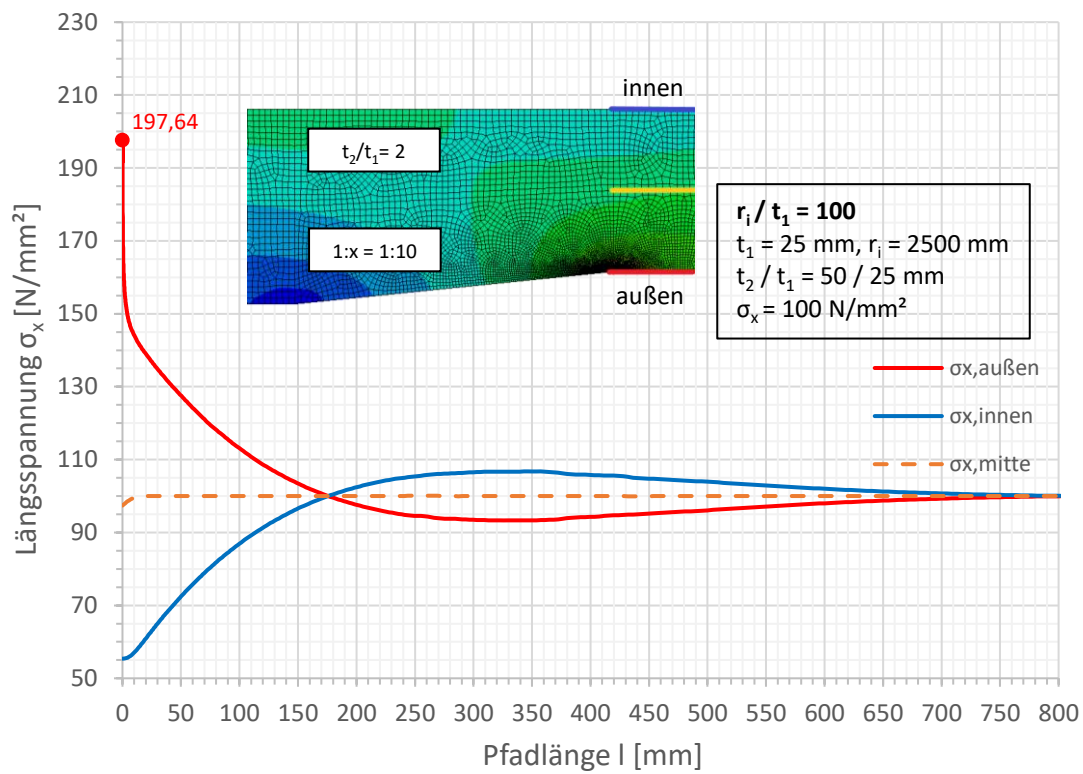


Spannungen an der Außenseite

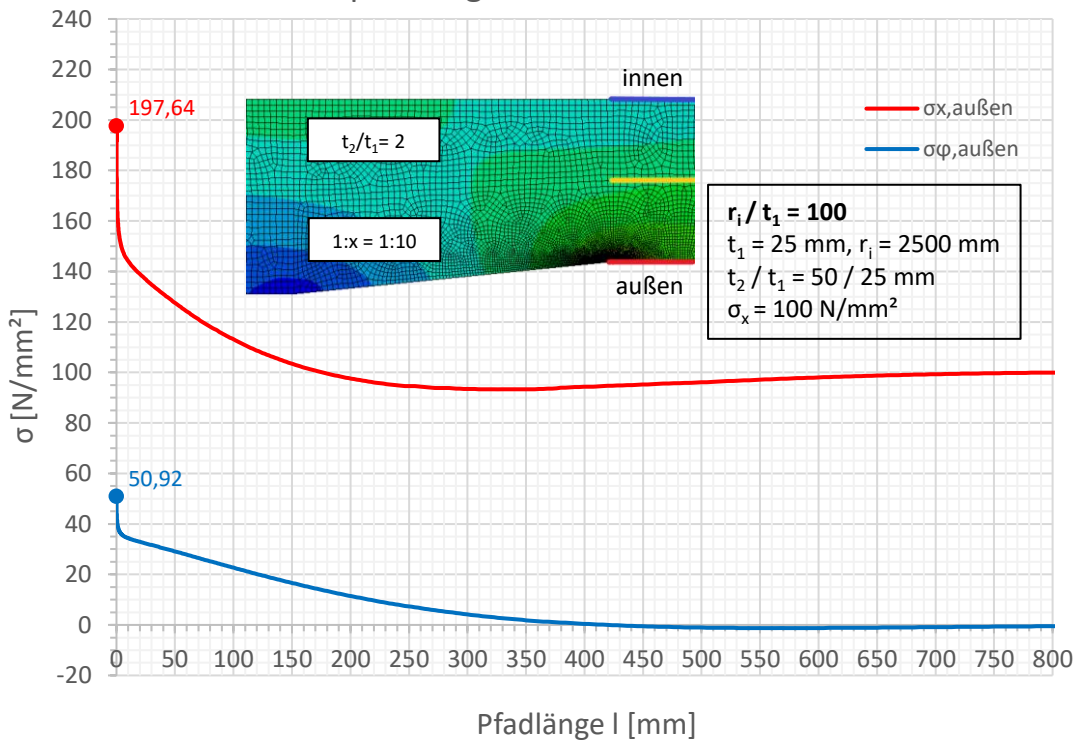


Spannungen an der Außenseite

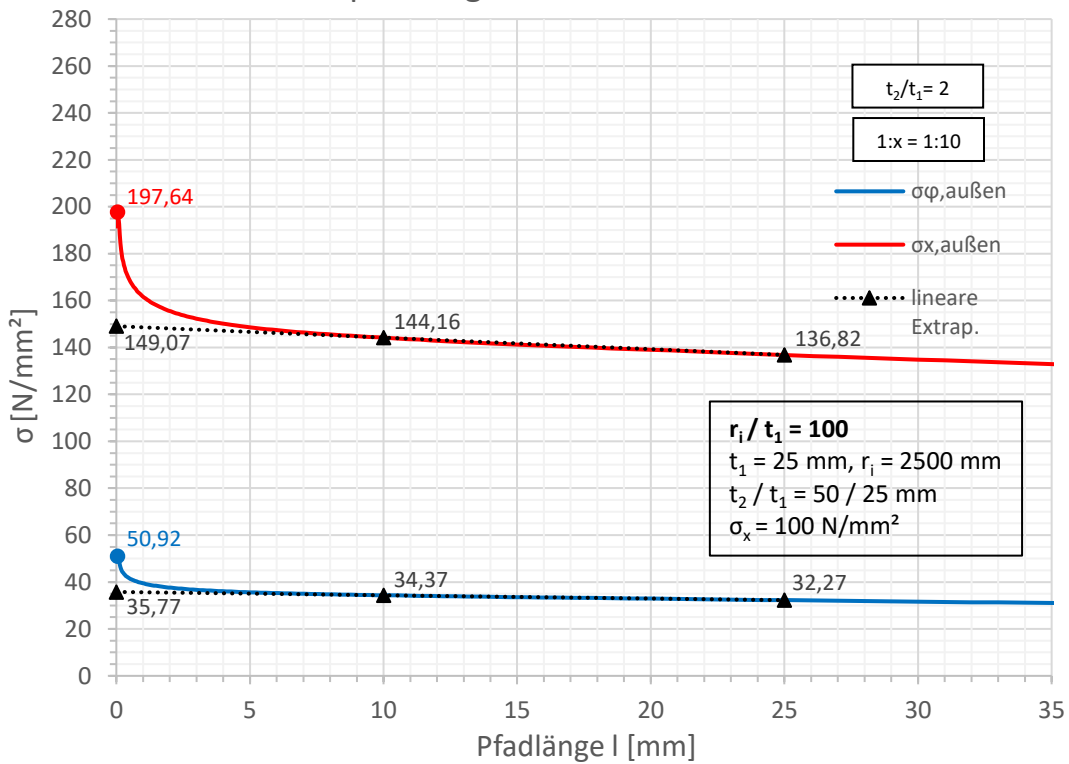


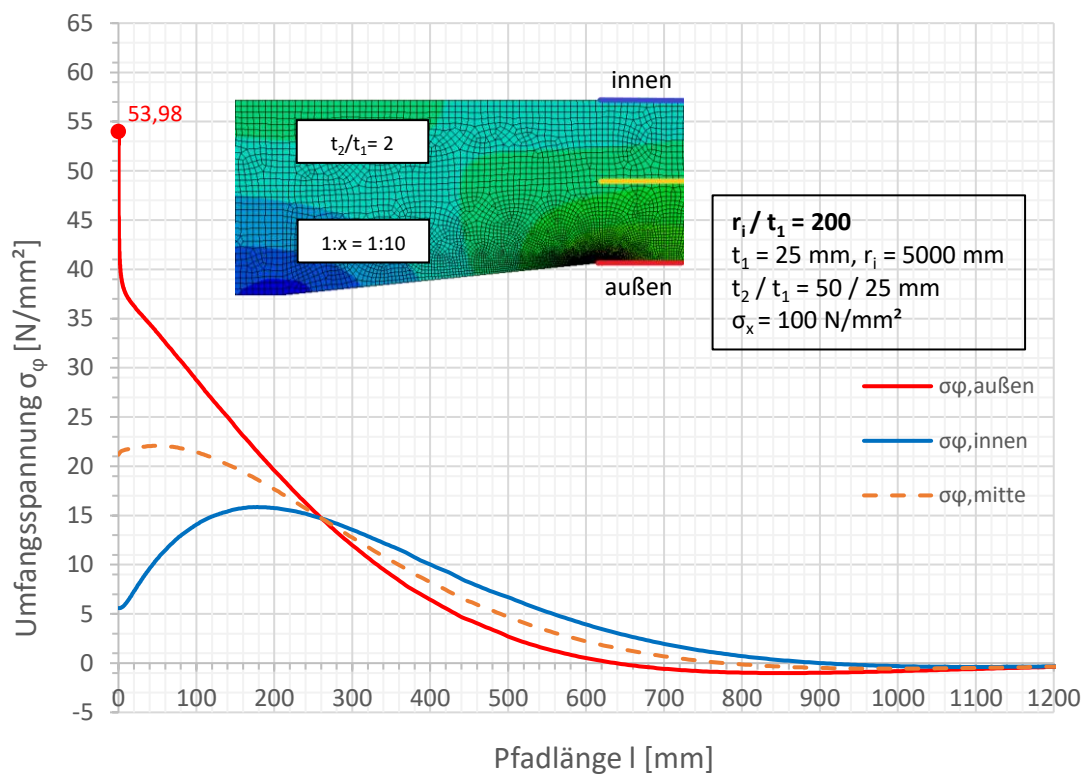
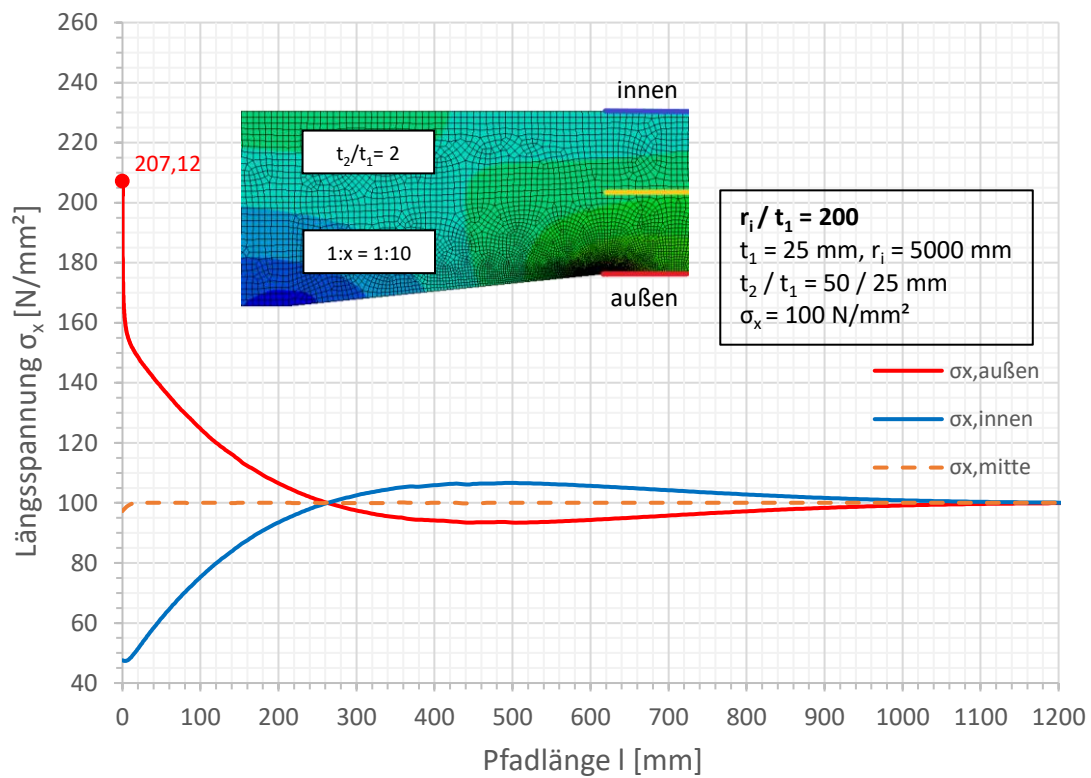


Spannungen an der Außenseite

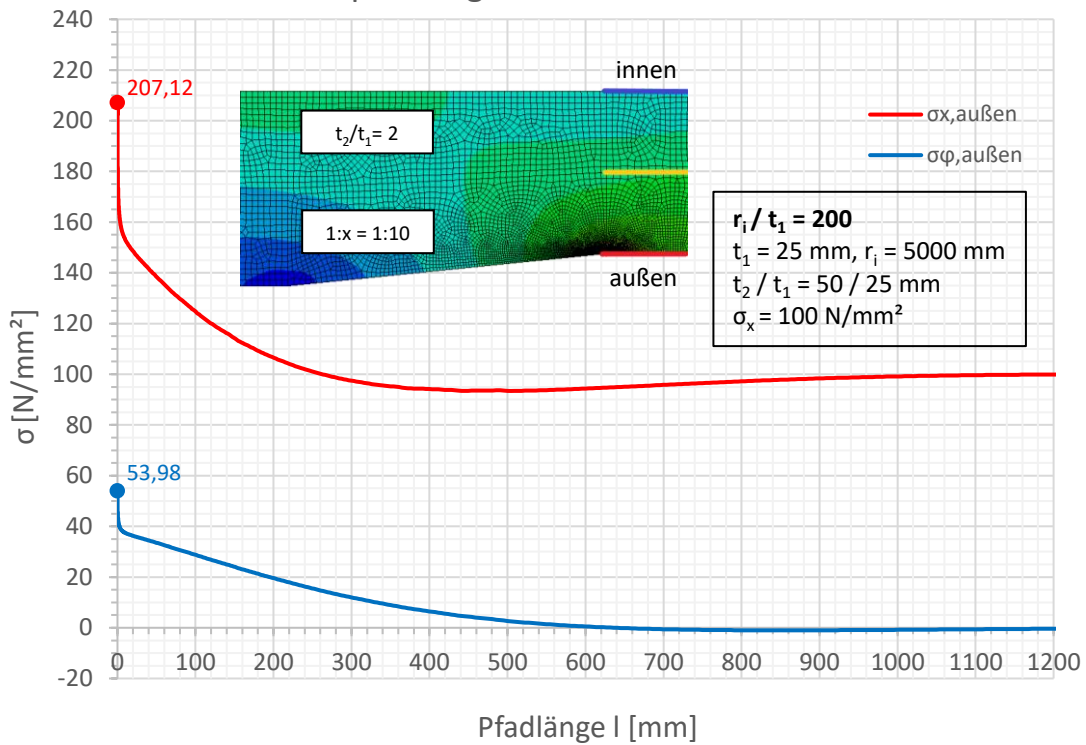


Spannungen an der Außenseite

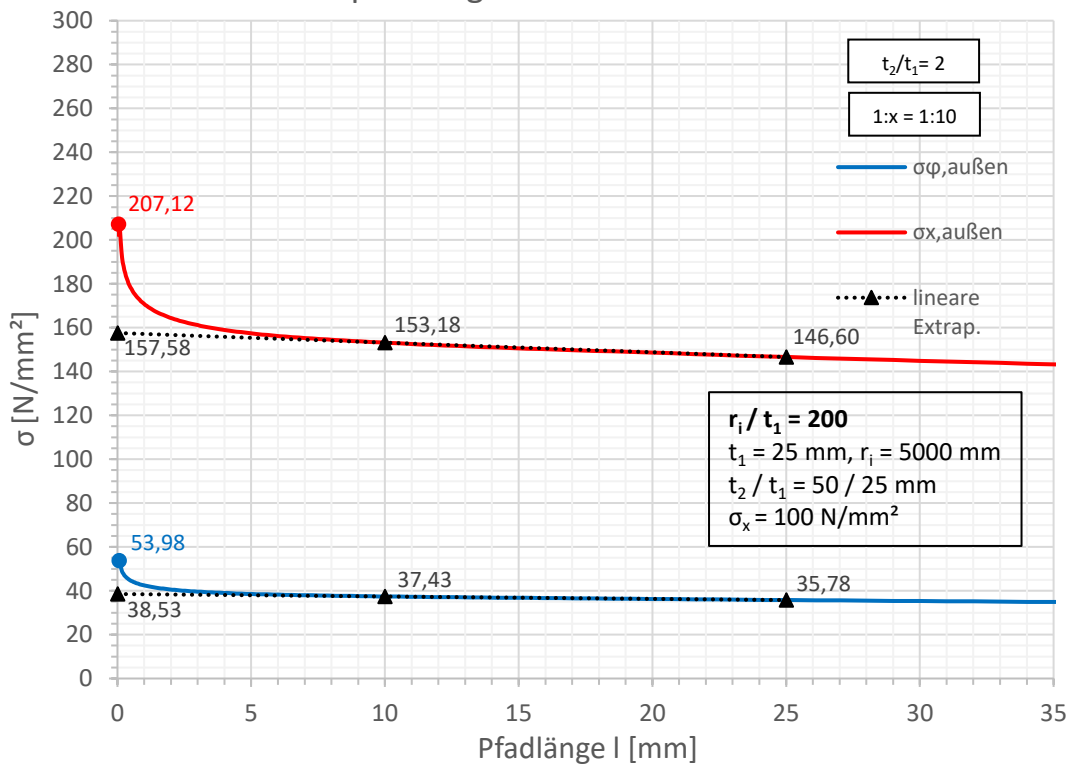


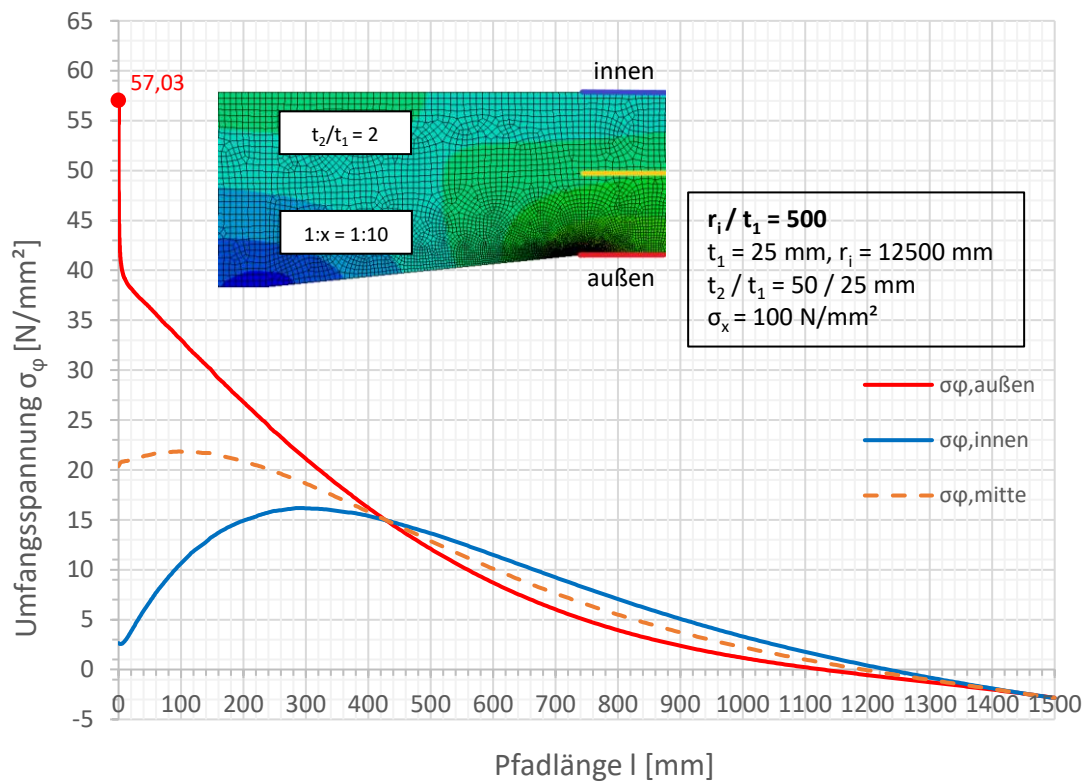
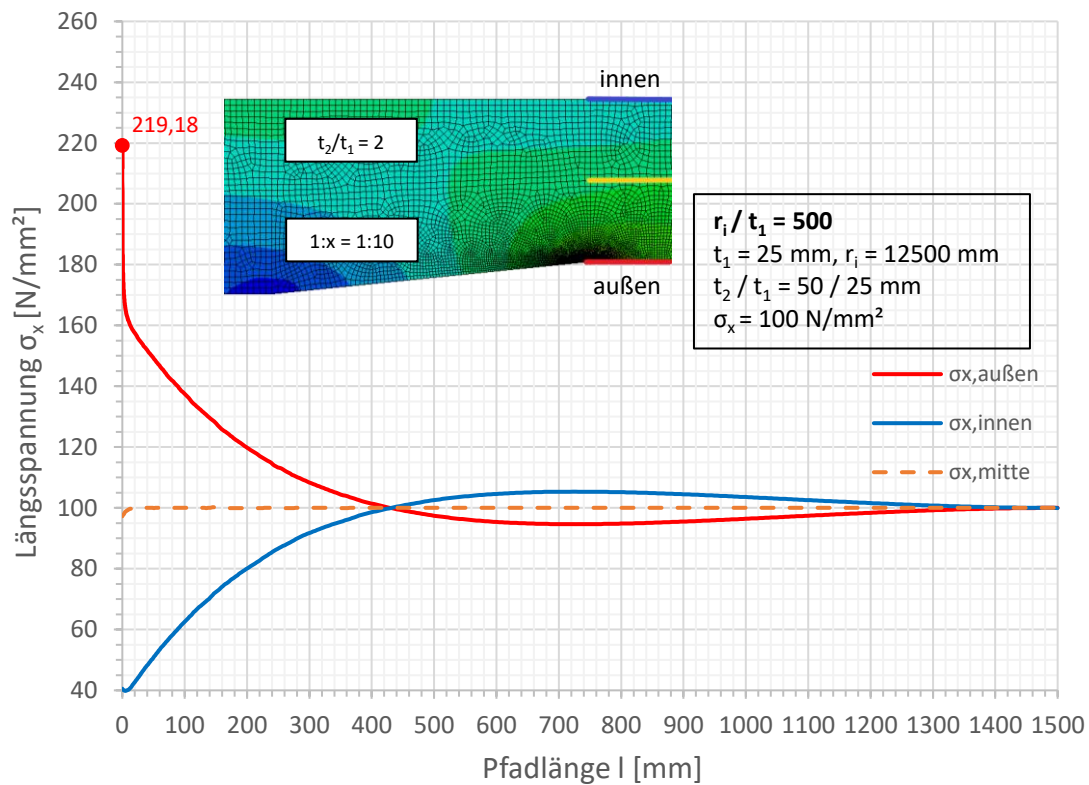


Spannungen an der Außenseite

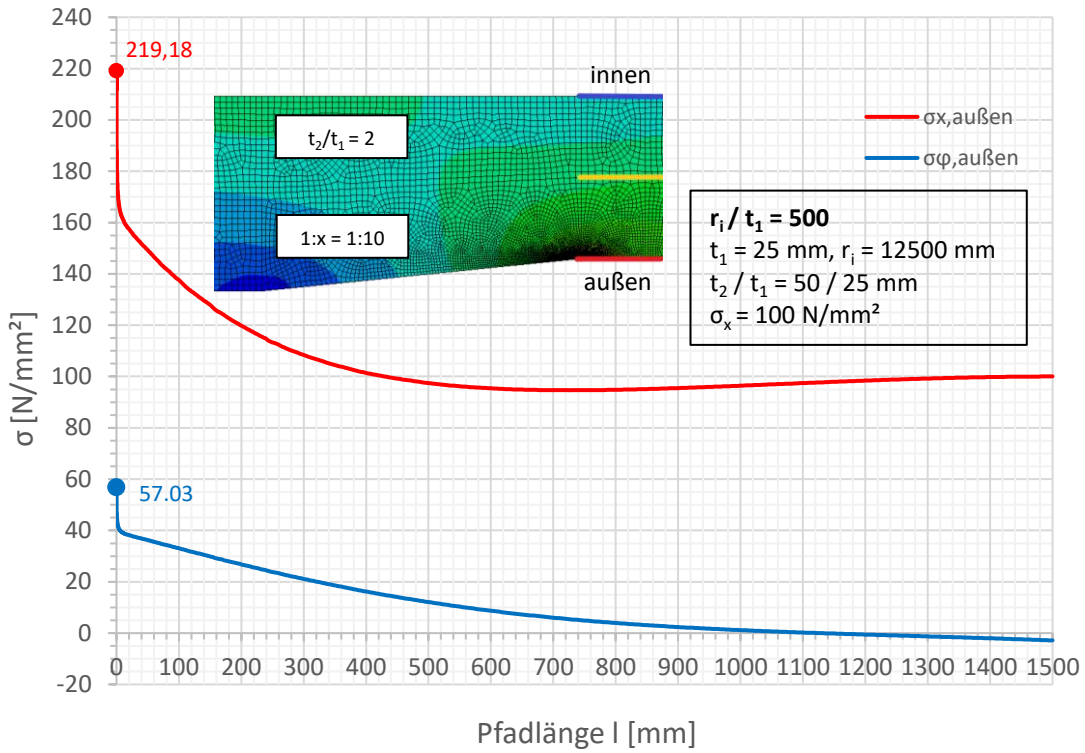


Spannungen an der Außenseite

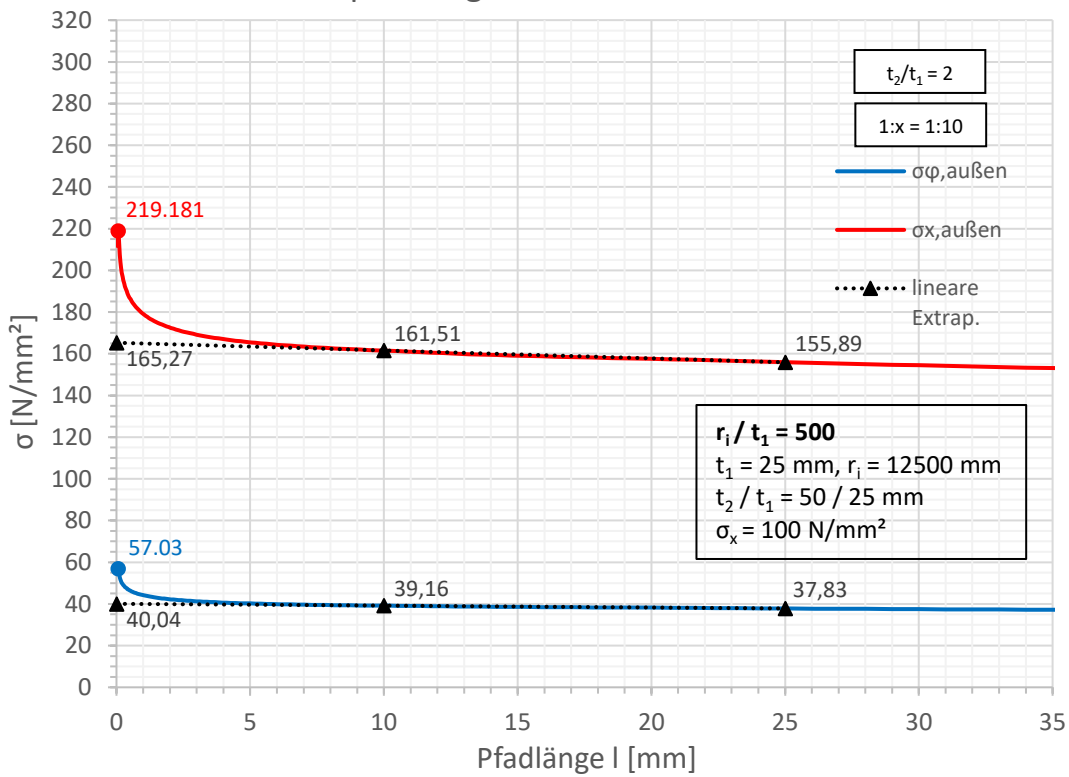




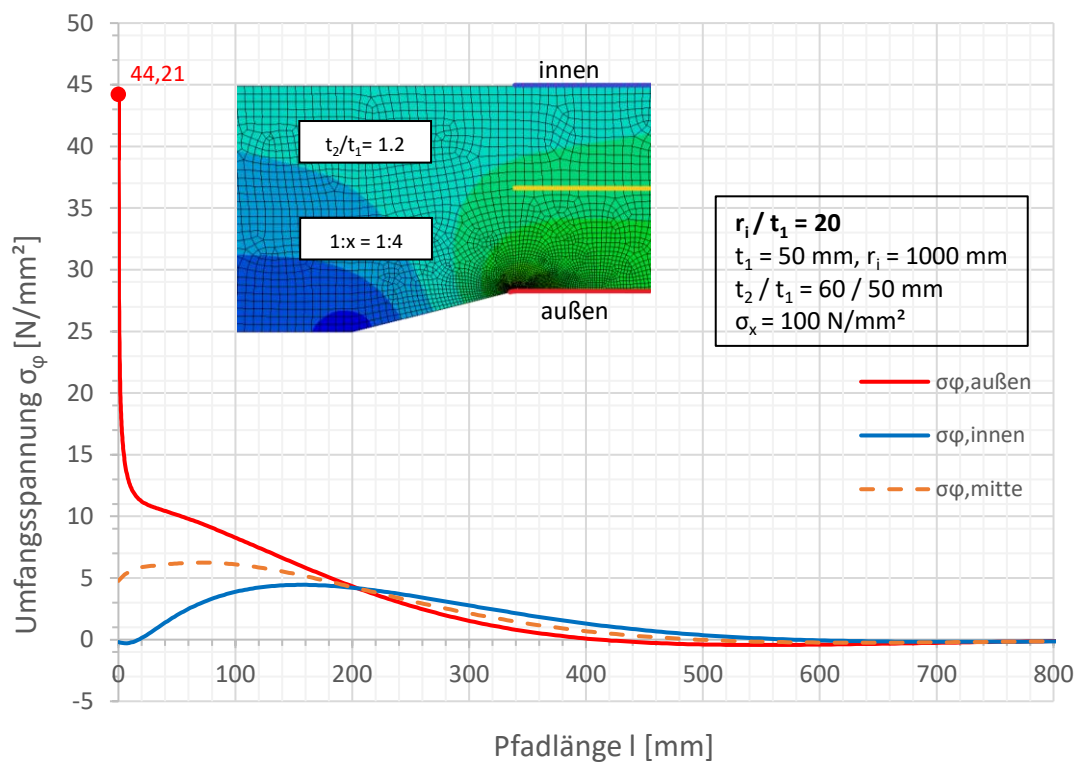
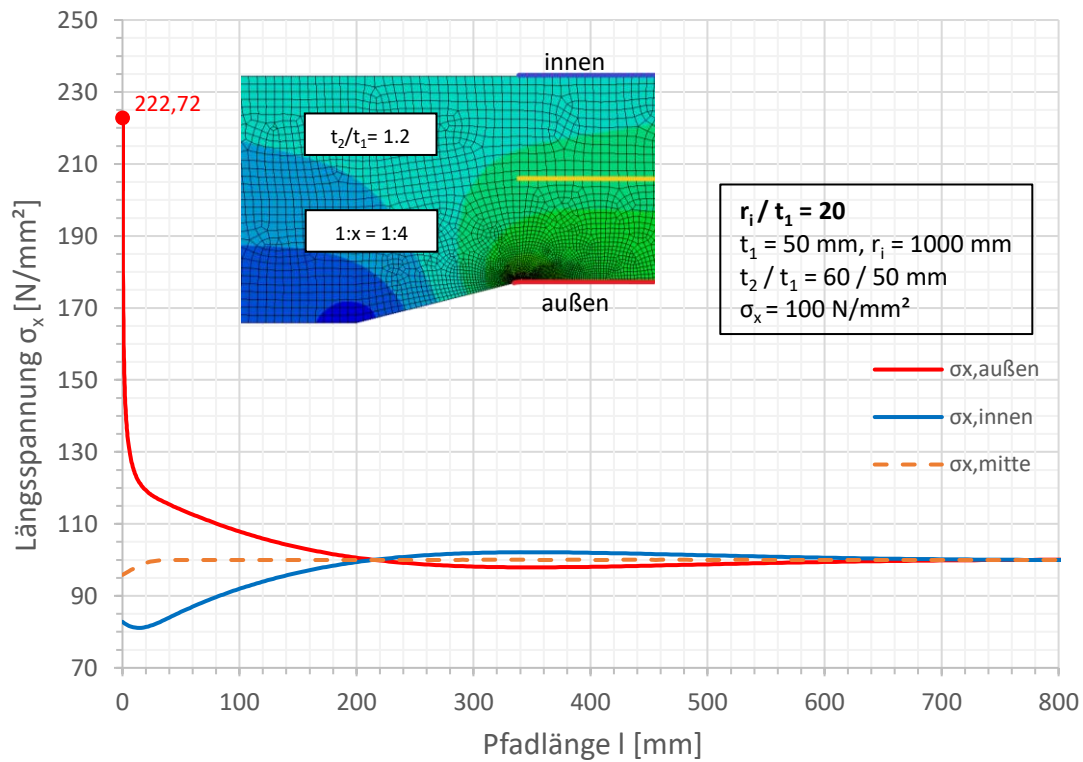
Spannungen an der Außenseite



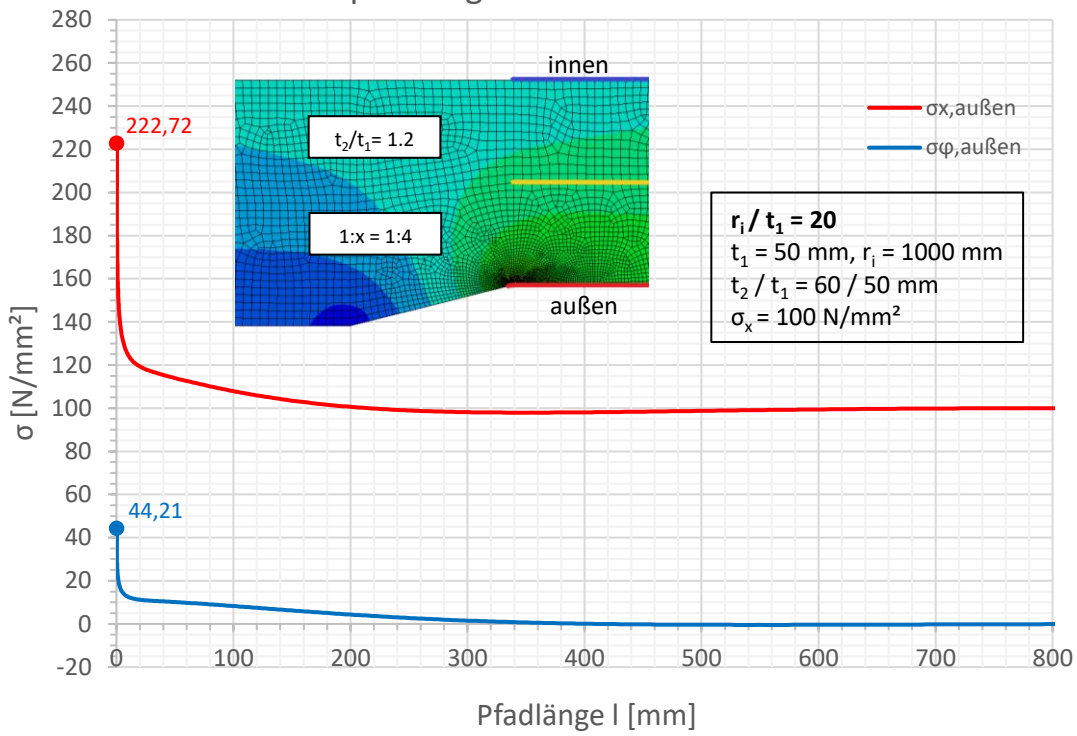
Spannungen an der Außenseite



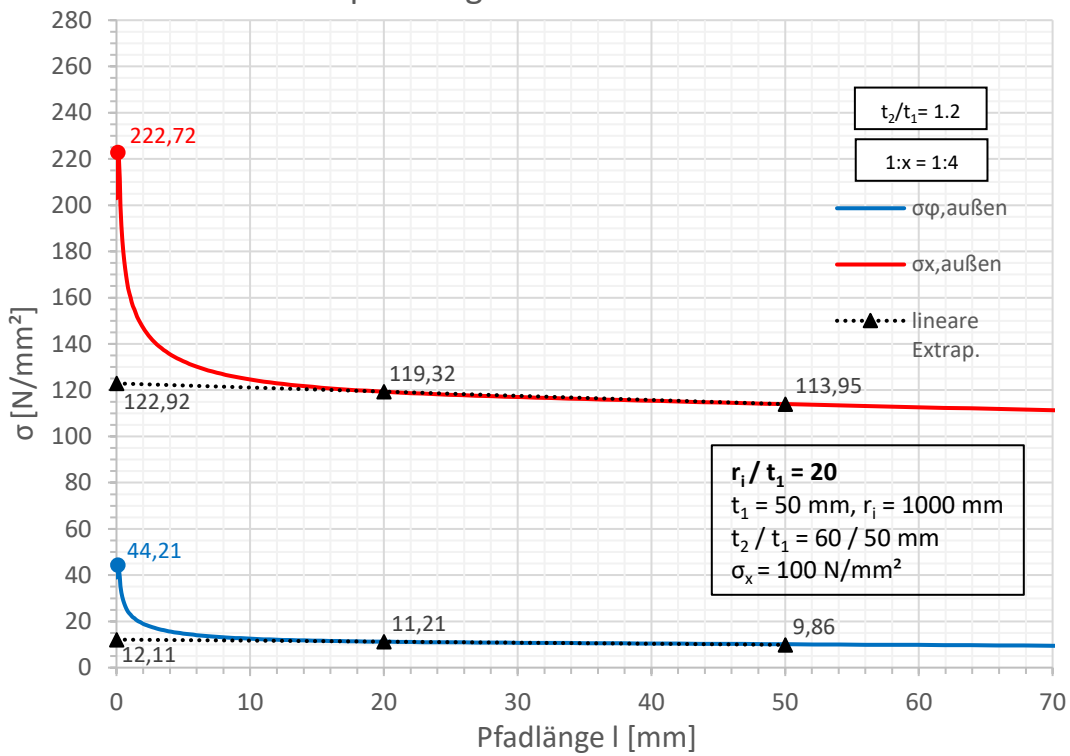
B.2. Wanddicke $t_1 = 50$ mm

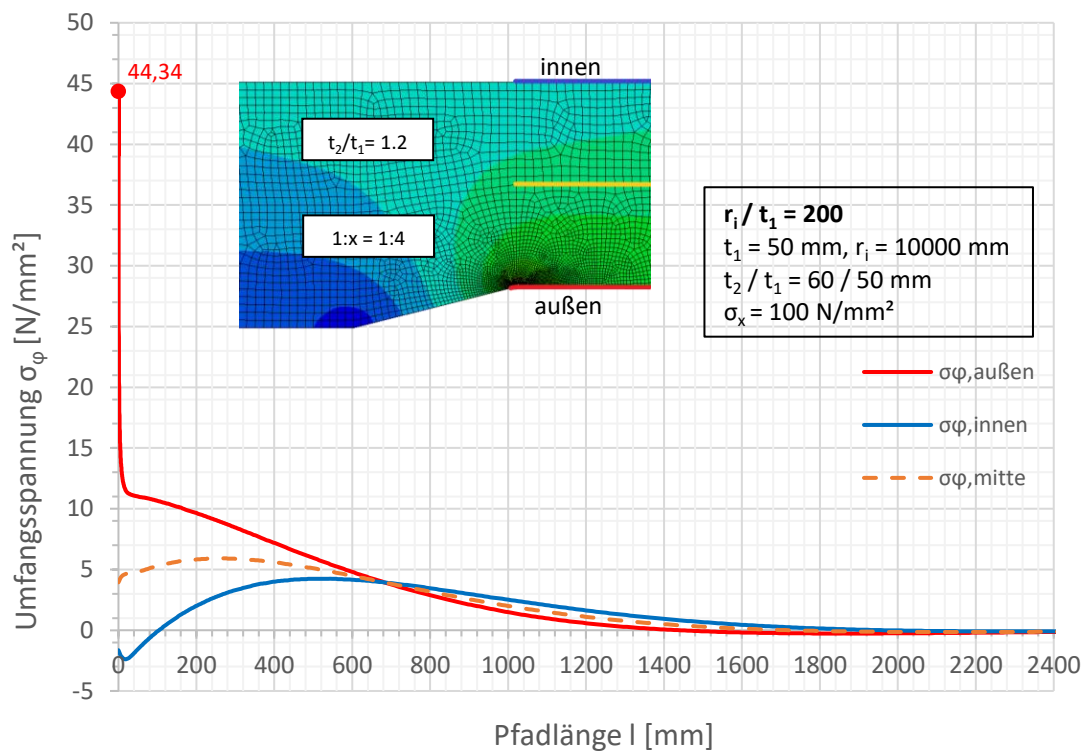
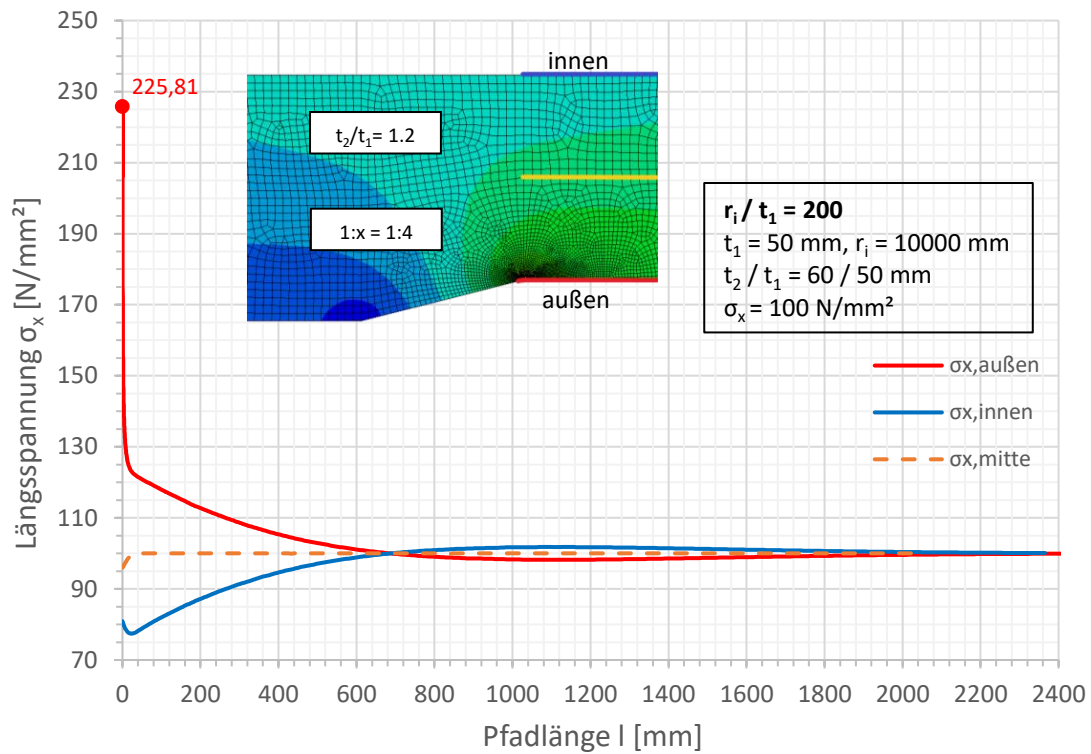


Spannungen an der Außenseite

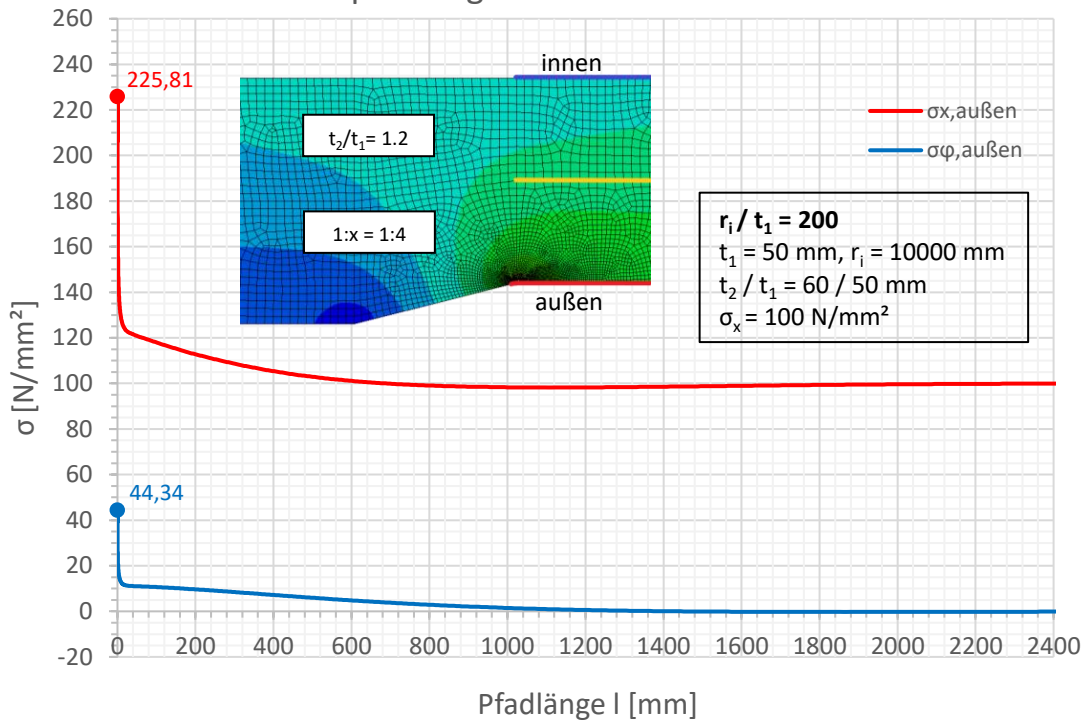


Spannungen an der Außenseite

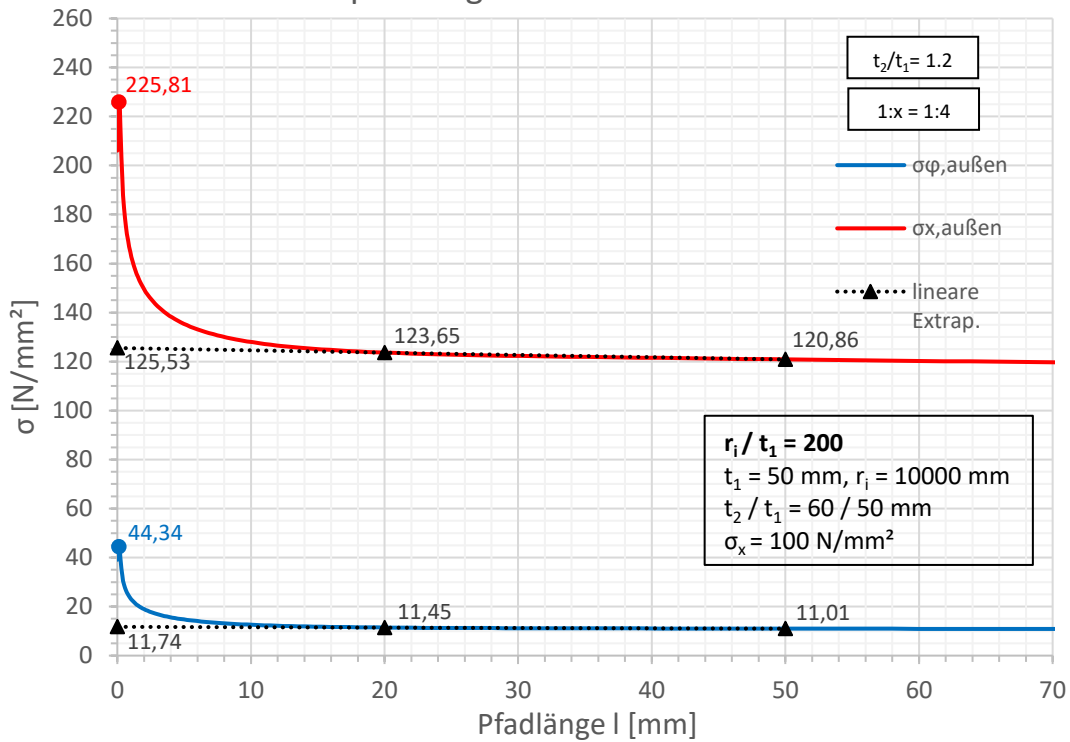


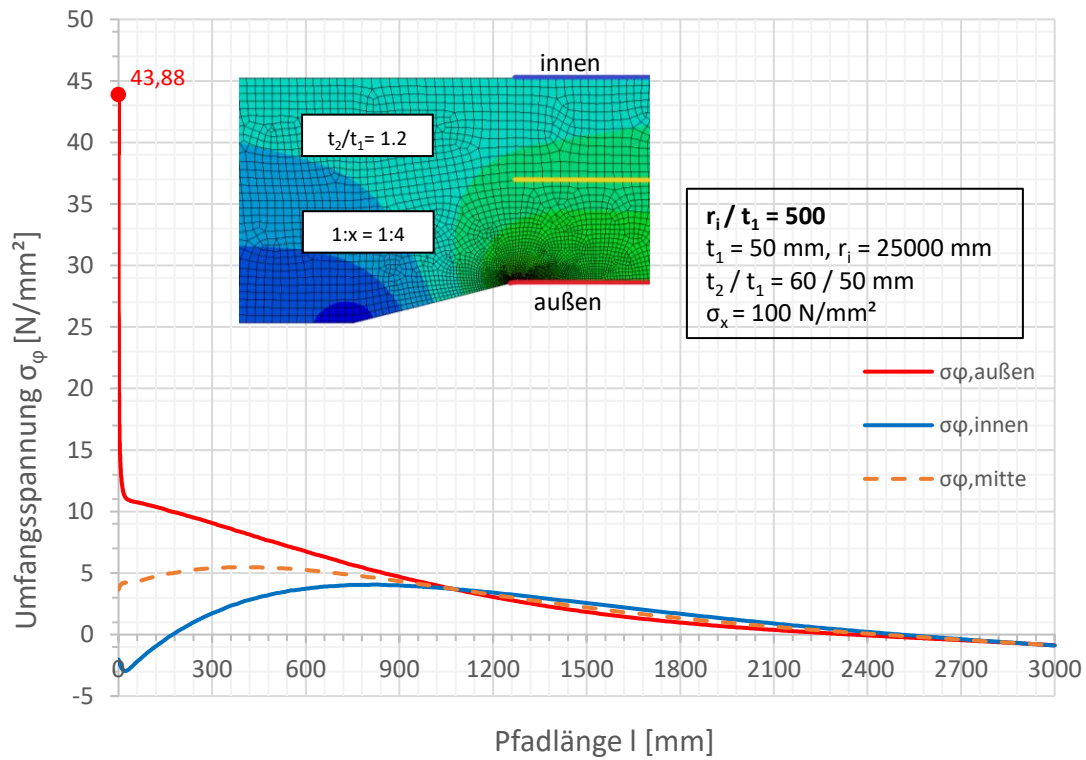
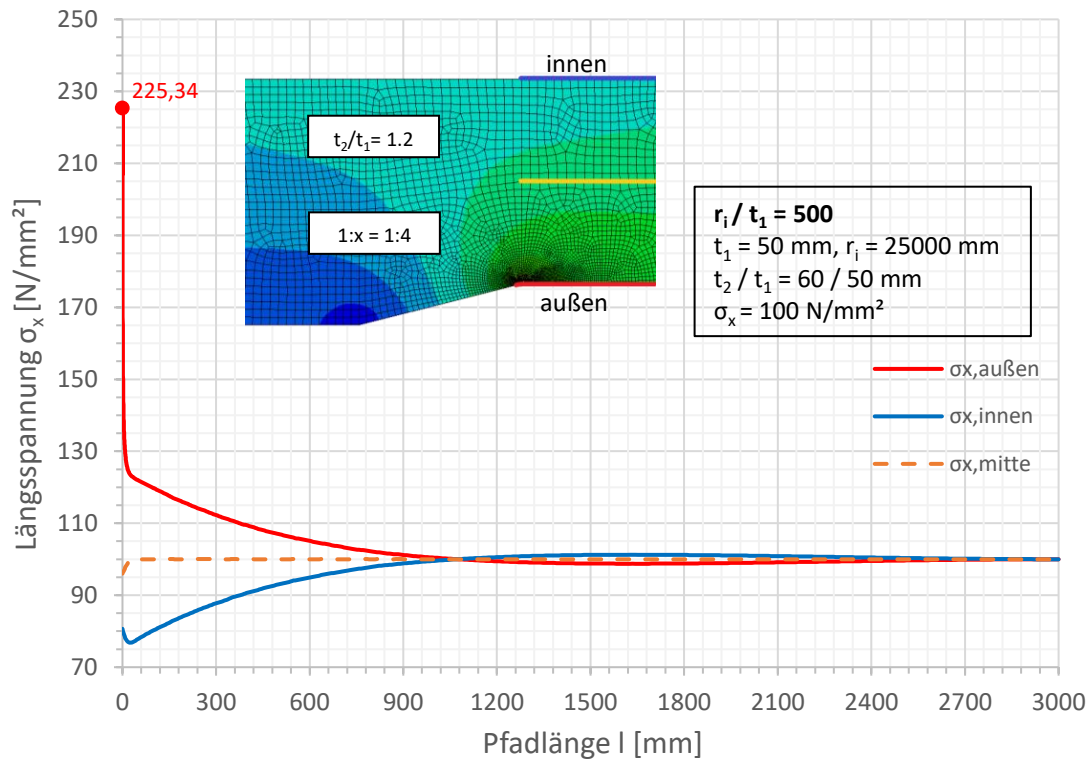


Spannungen an der Außenseite

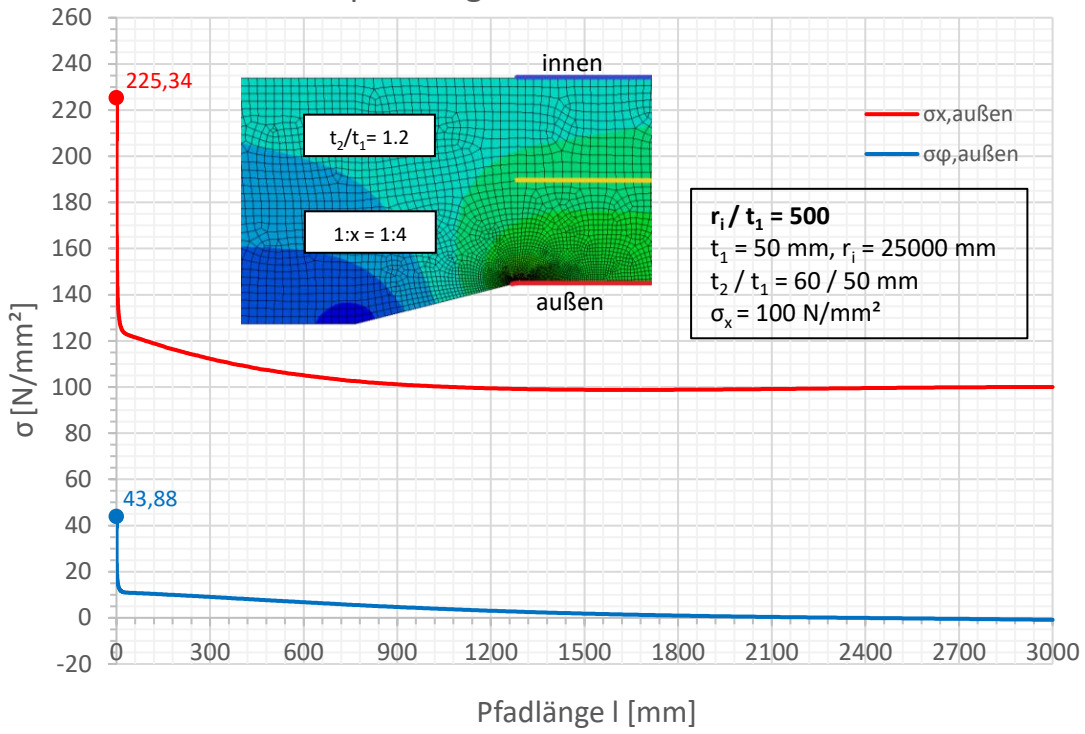


Spannungen an der Außenseite

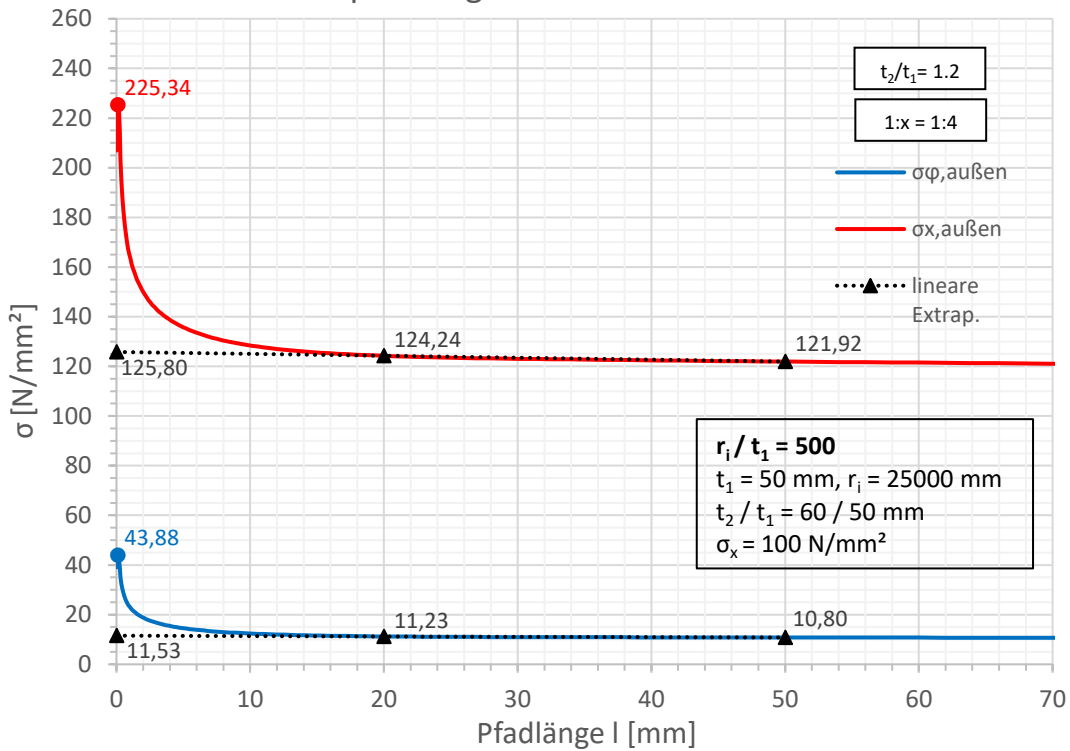


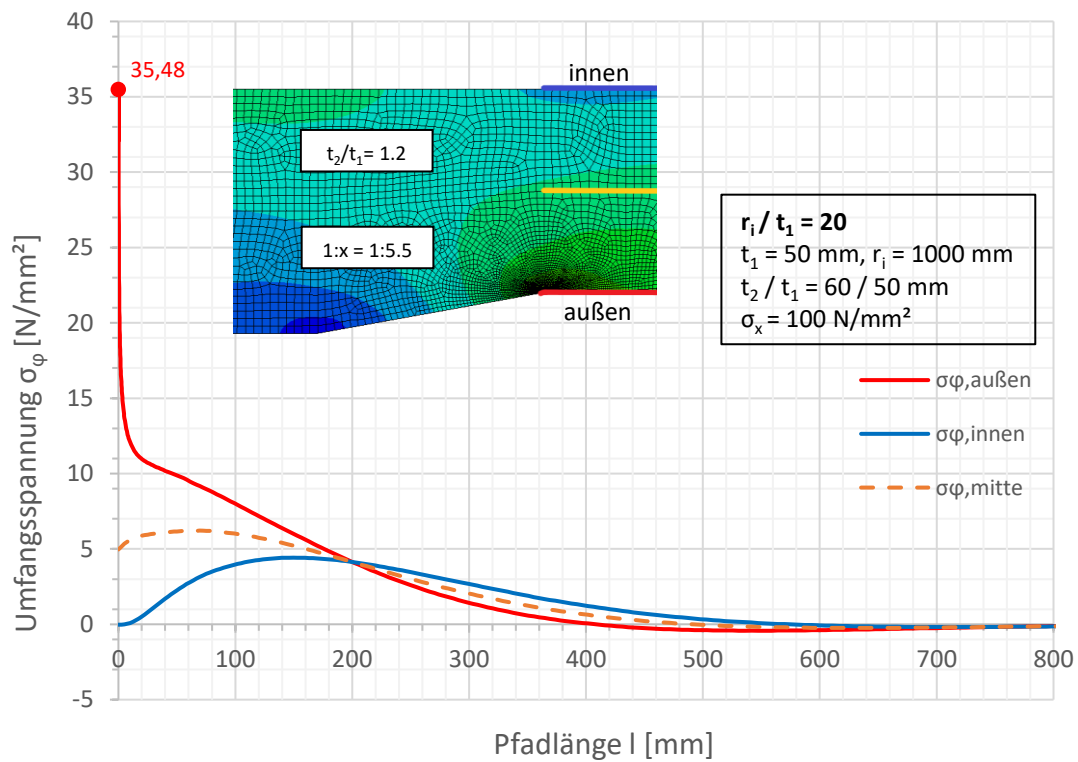
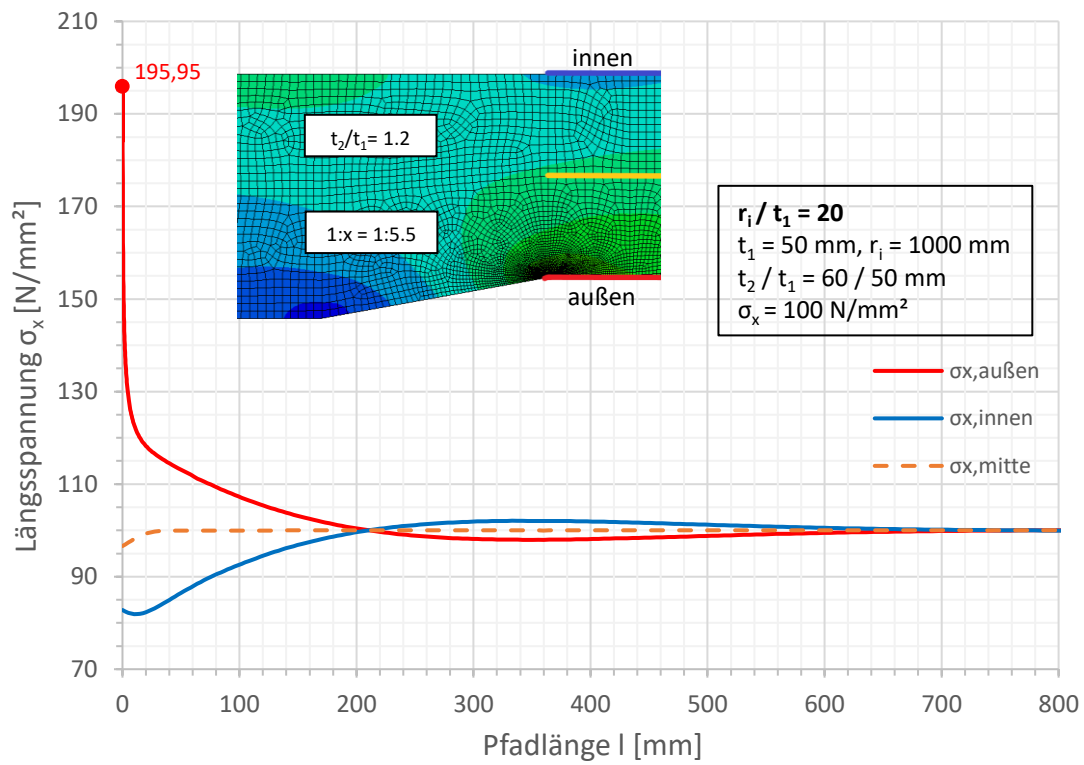


Spannungen an der Außenseite

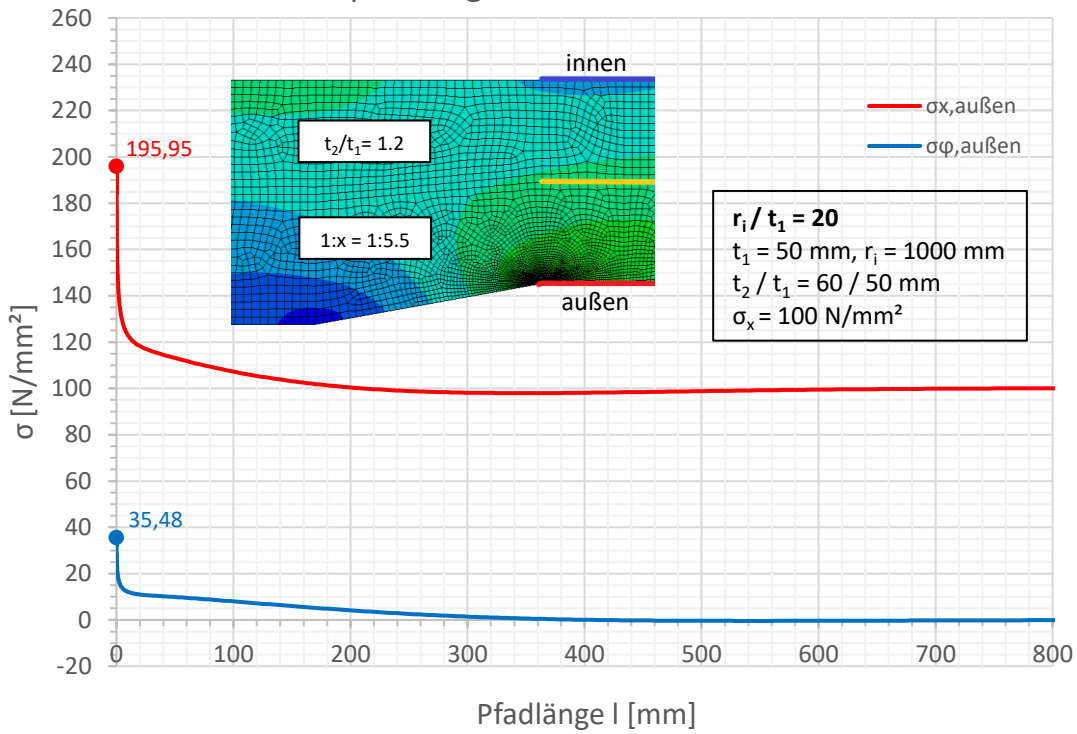


Spannungen an der Außenseite

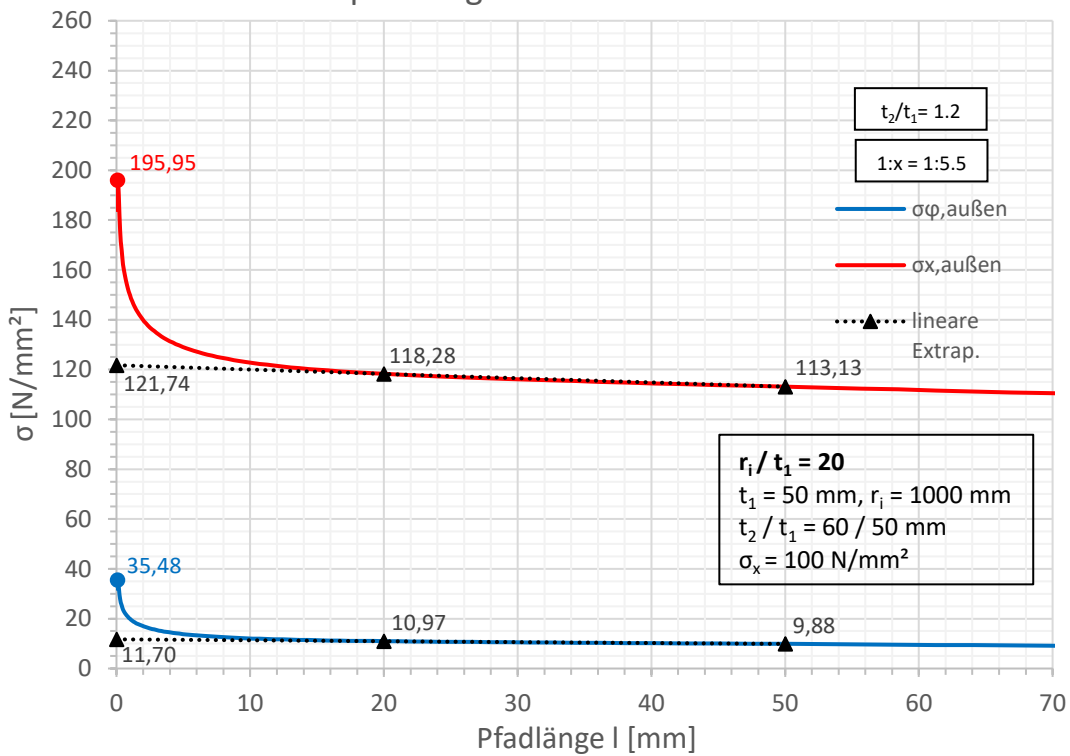


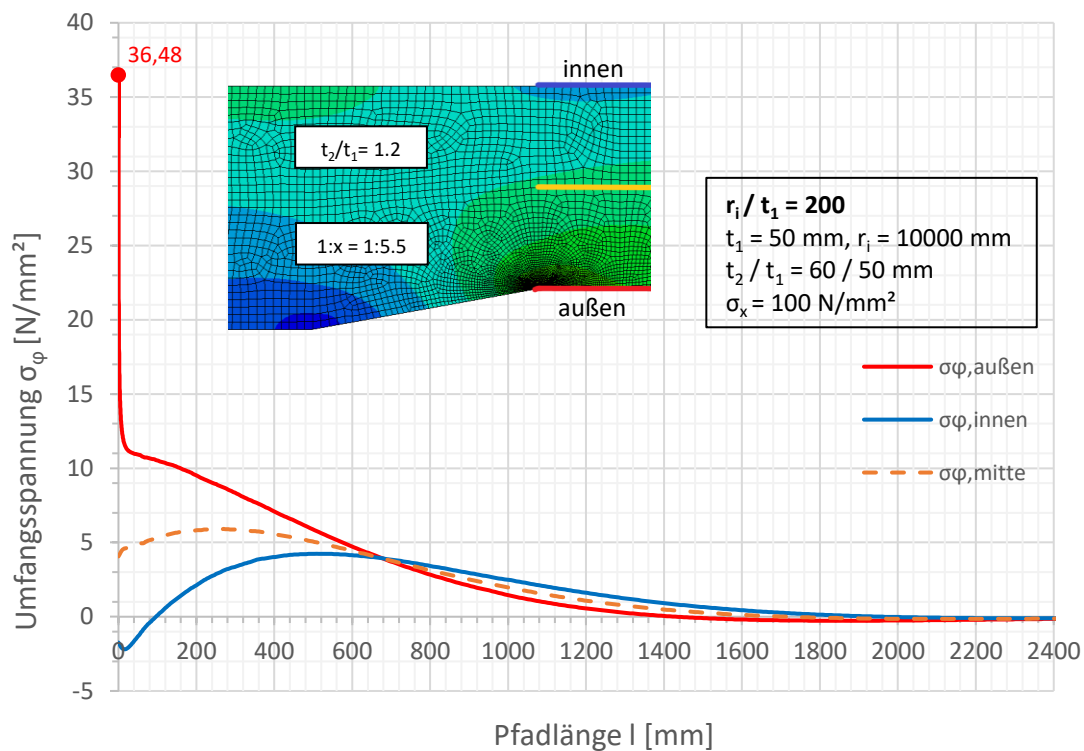
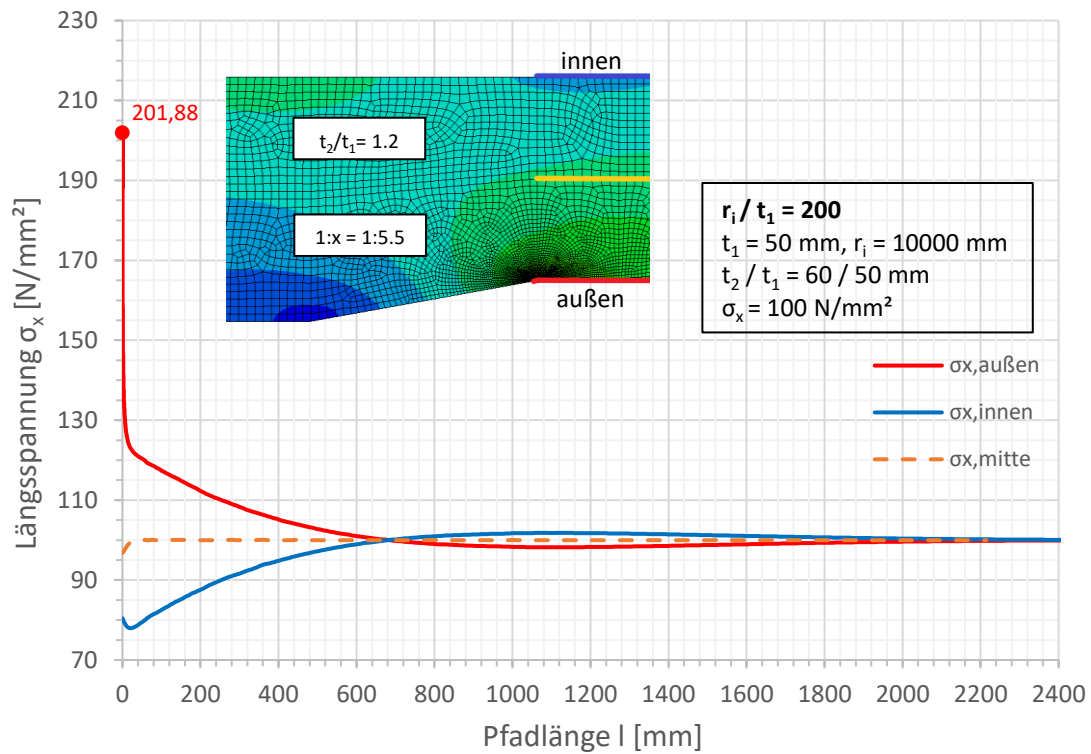


Spannungen an der Außenseite

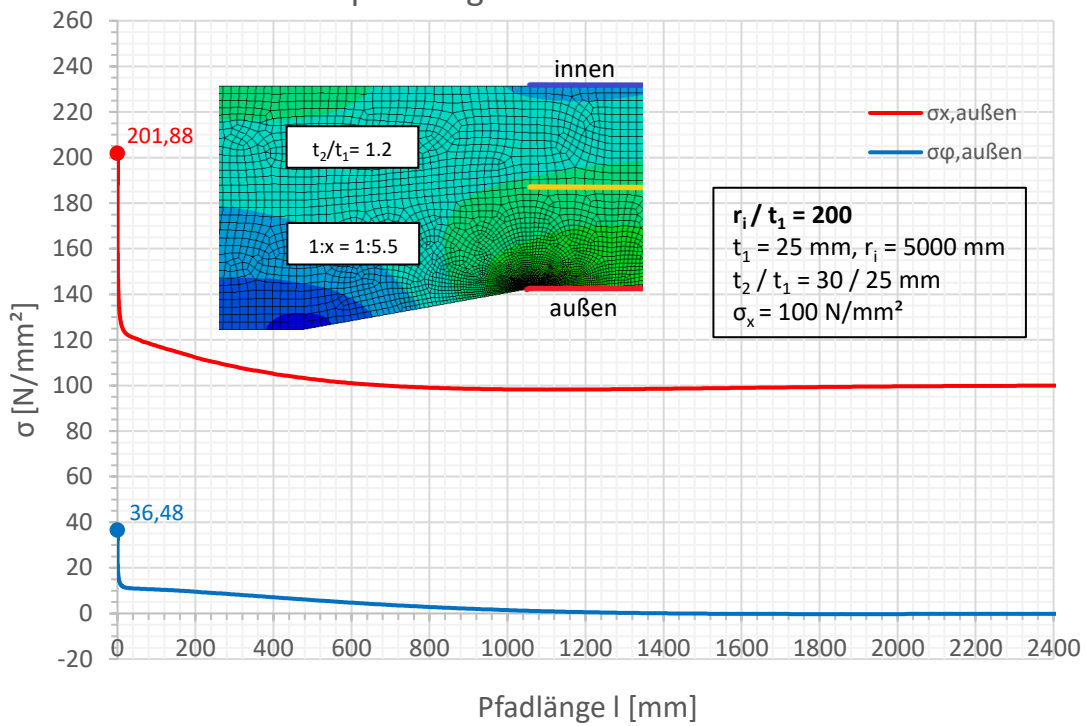


Spannungen an der Außenseite

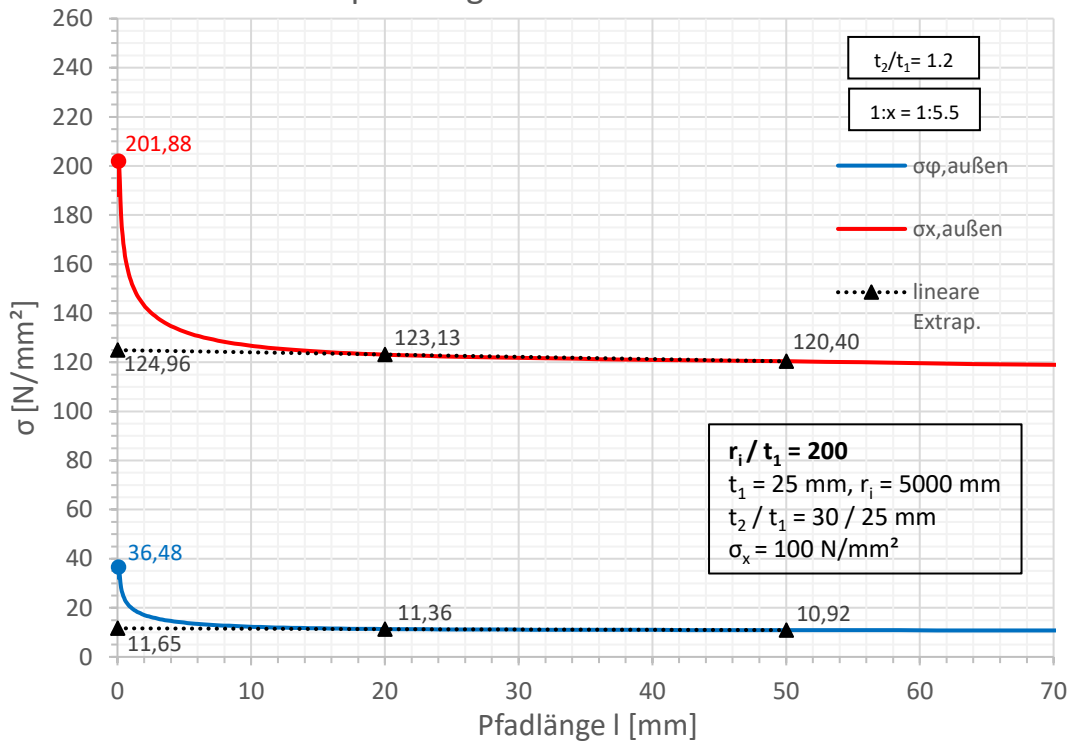


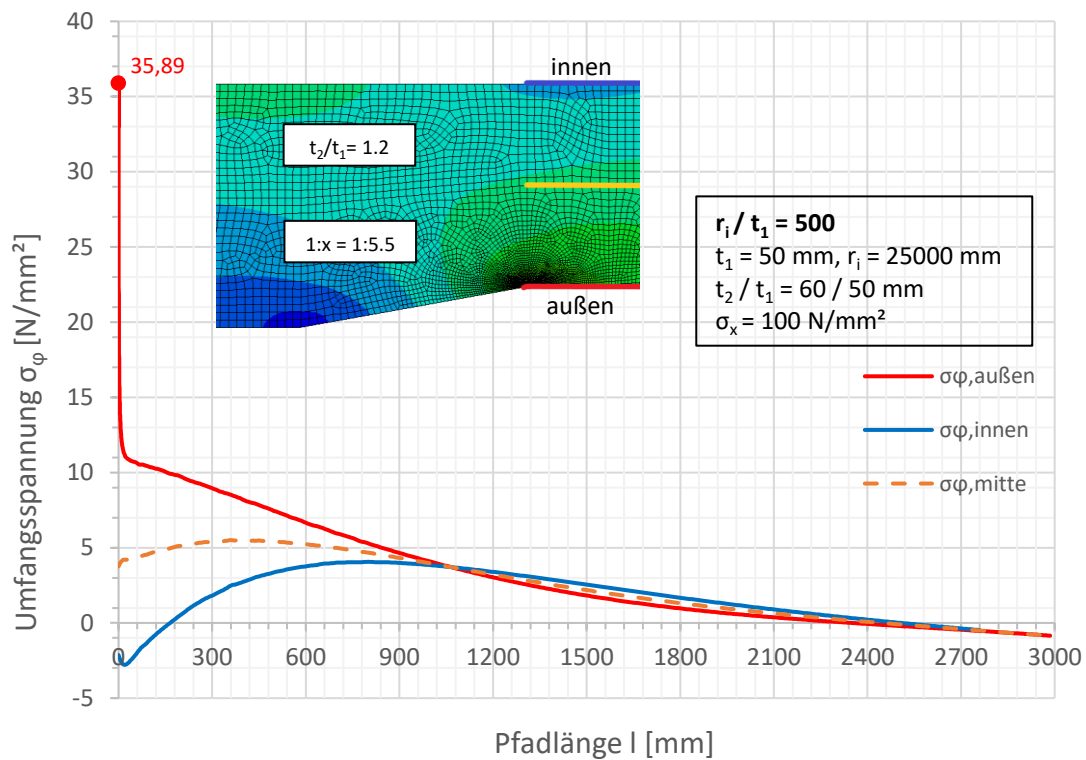
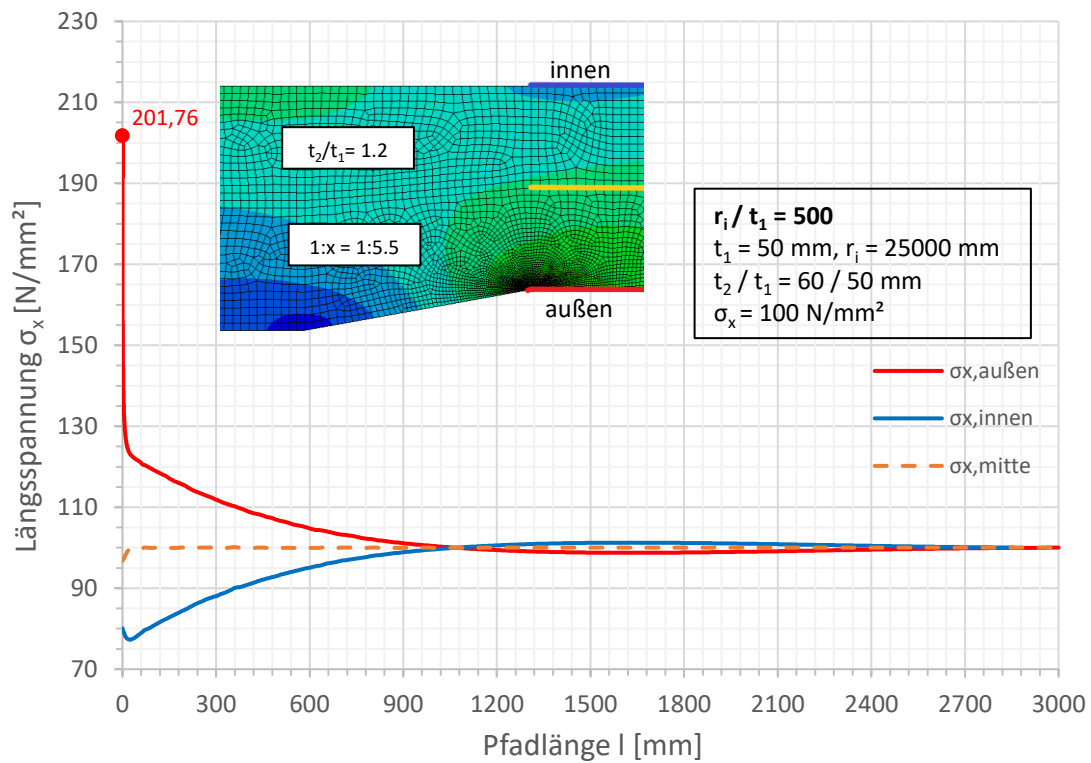


Spannungen an der Außenseite

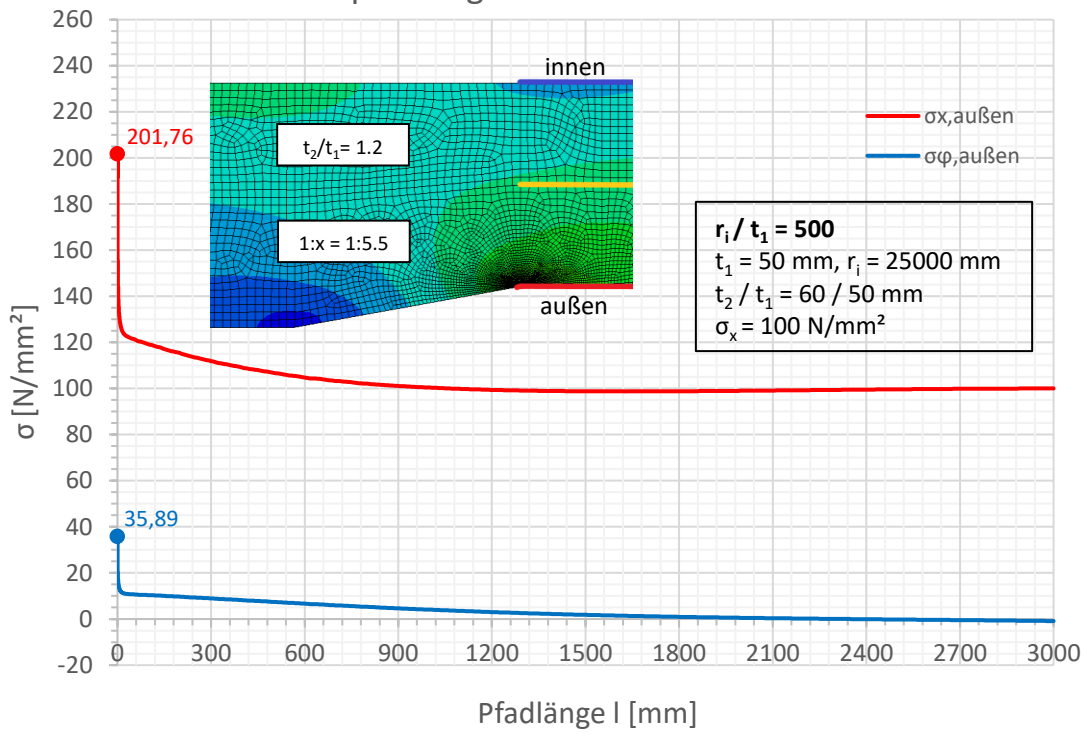


Spannungen an der Außenseite

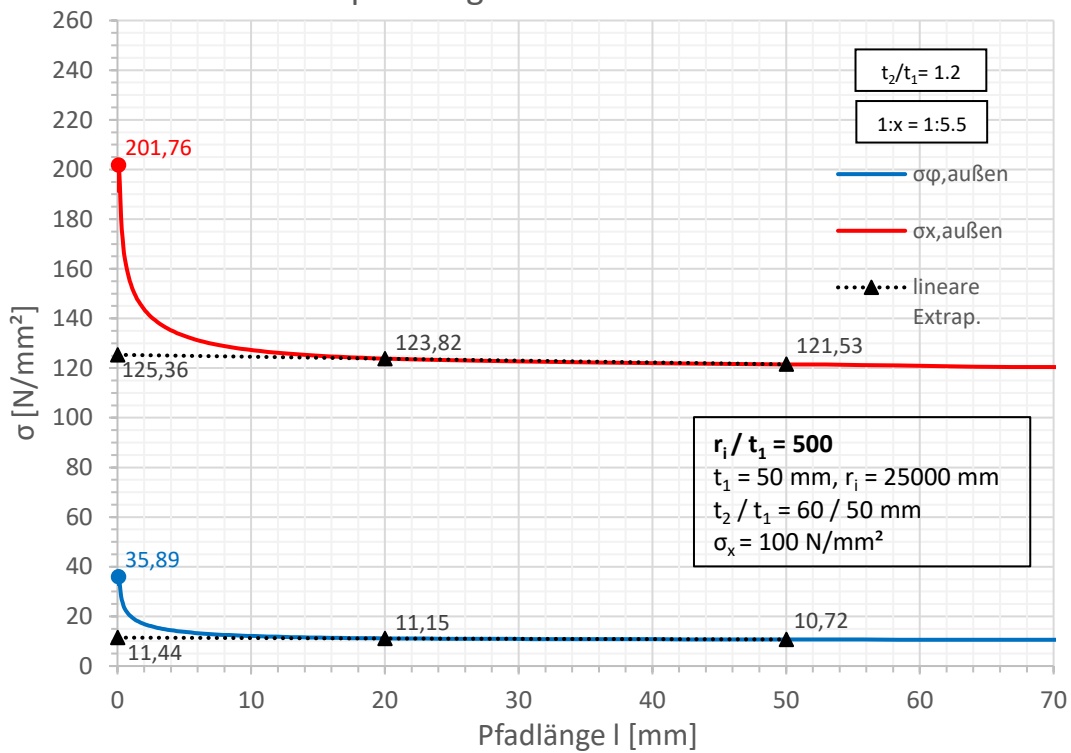


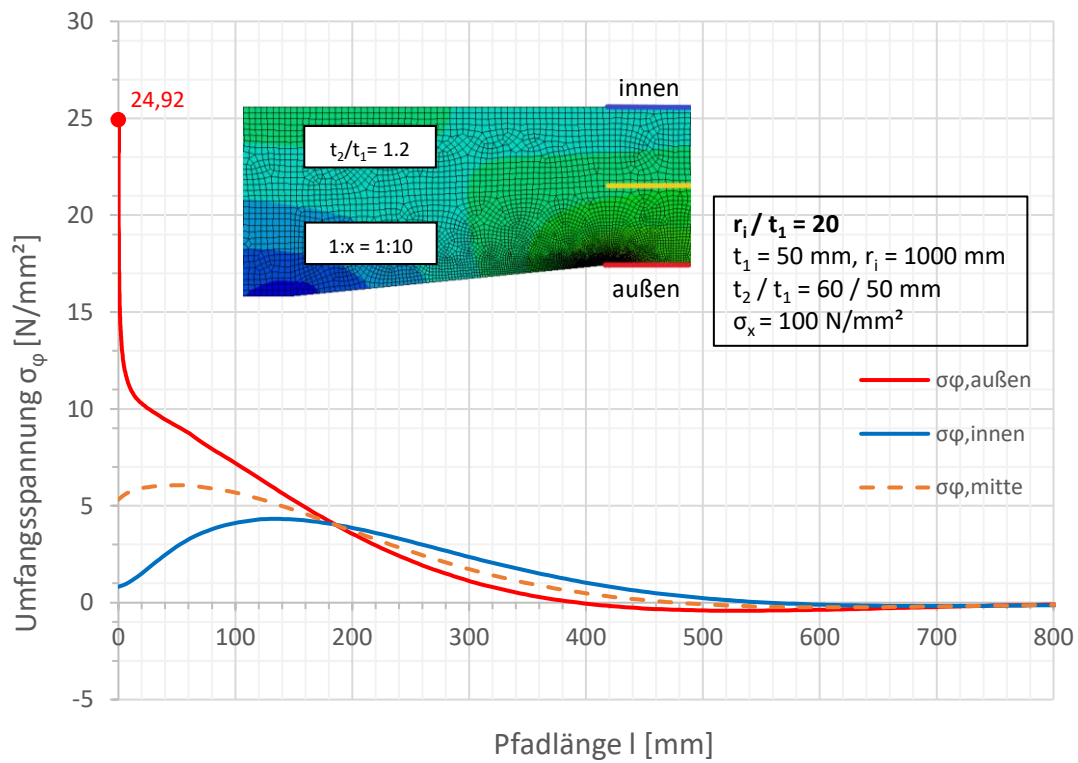
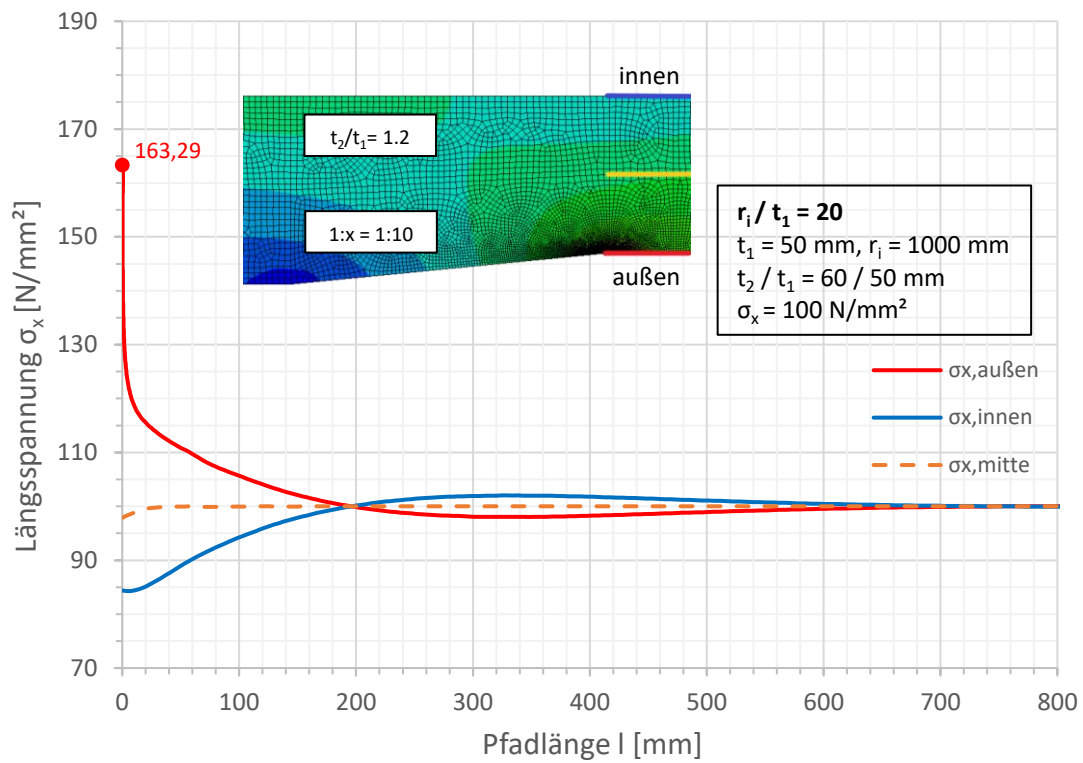


Spannungen an der Außenseite

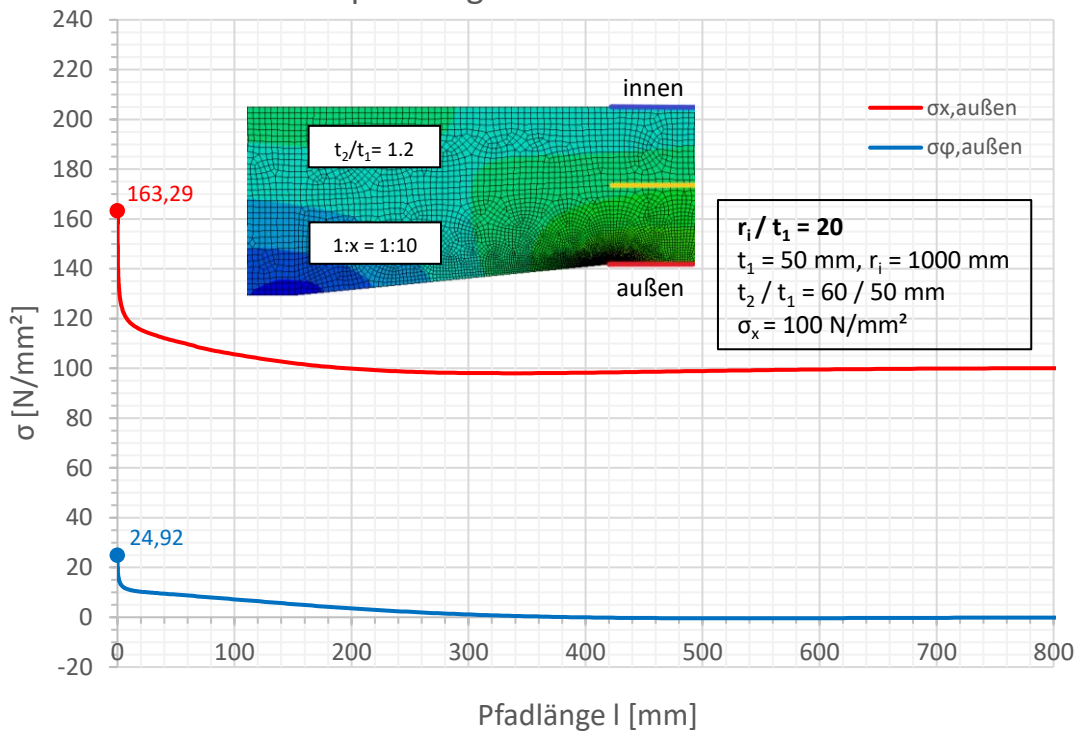


Spannungen an der Außenseite

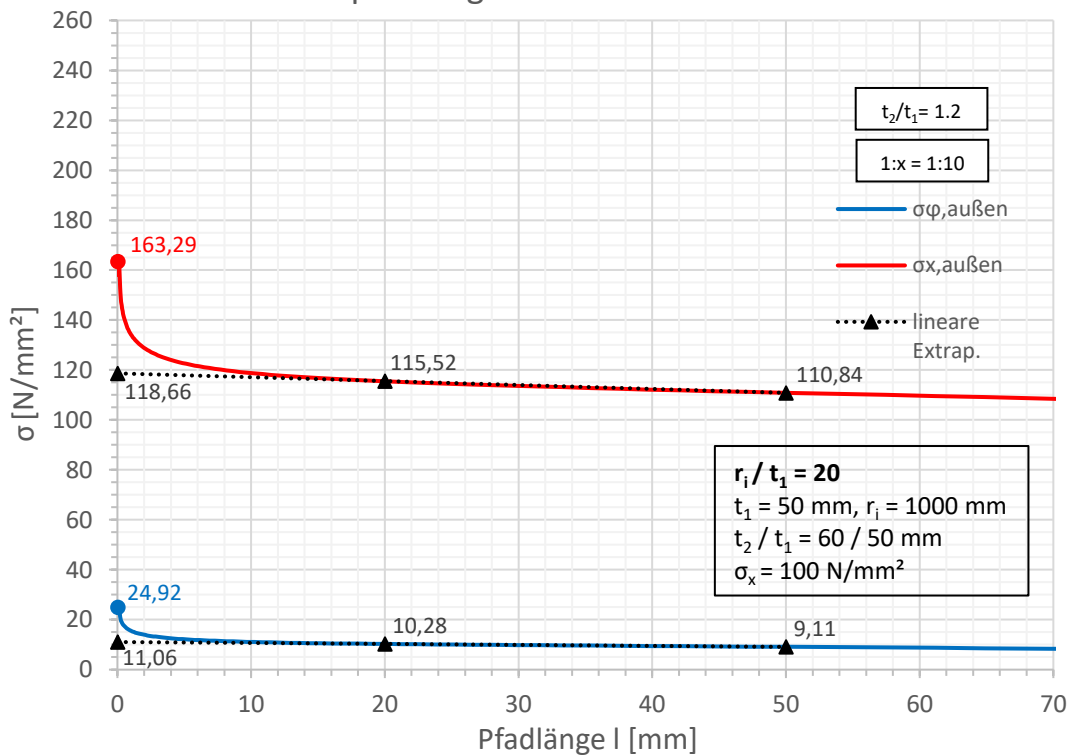


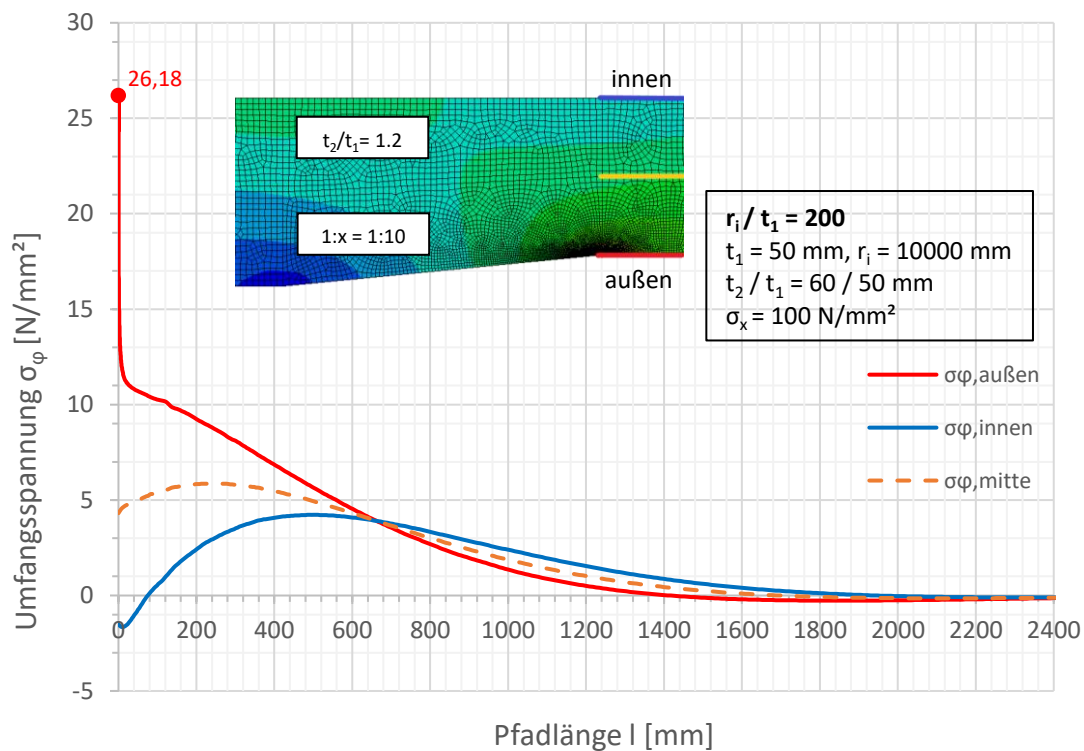
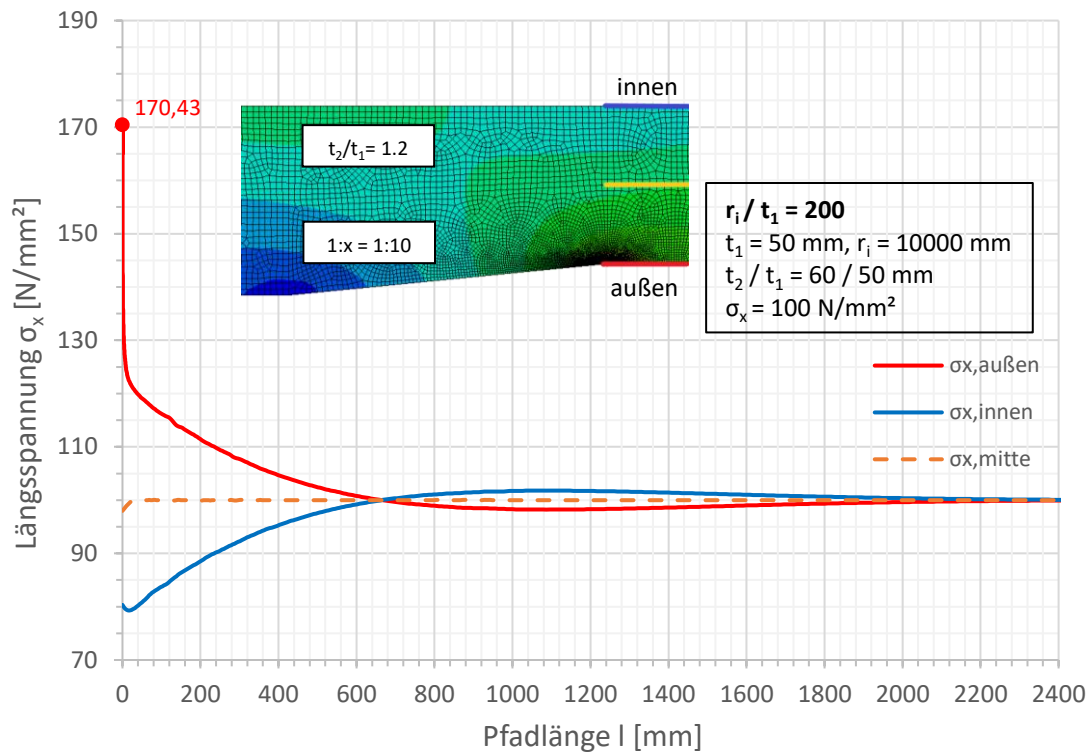


Spannungen an der Außenseite

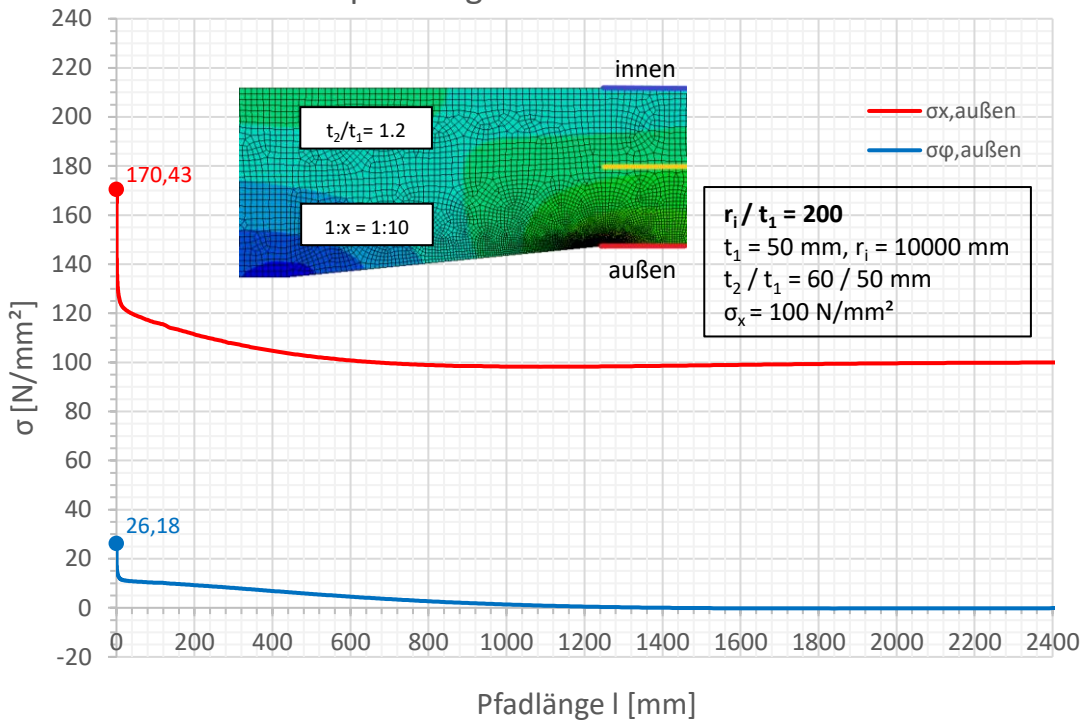


Spannungen an der Außenseite

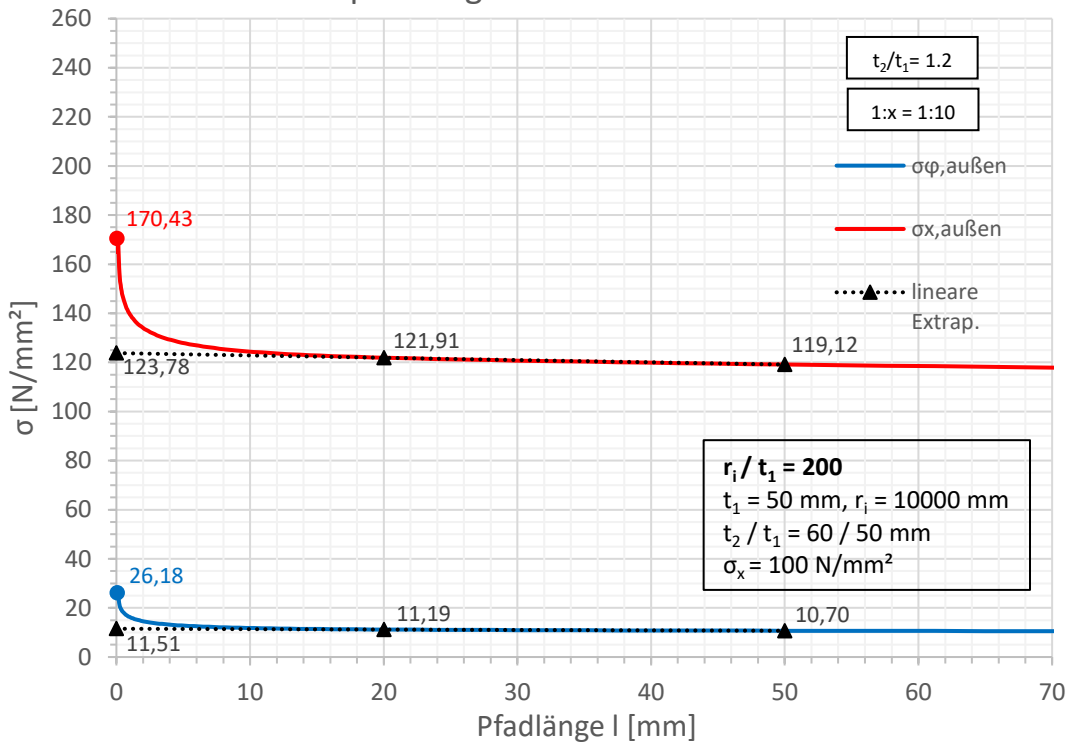


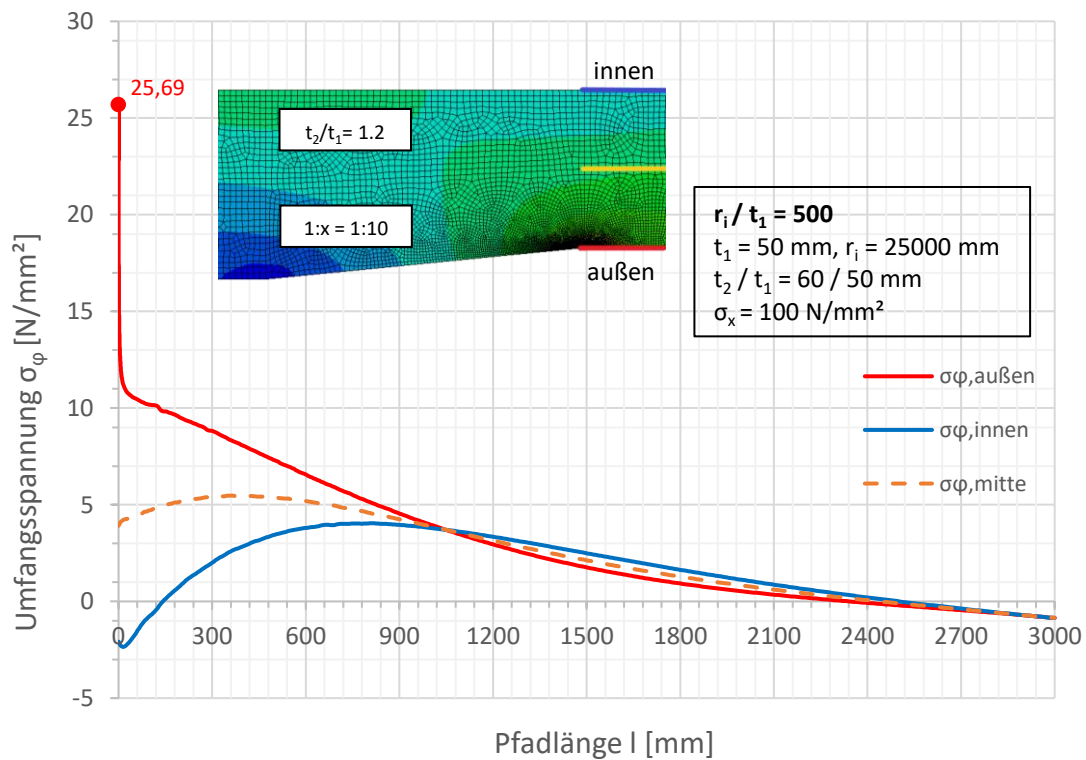
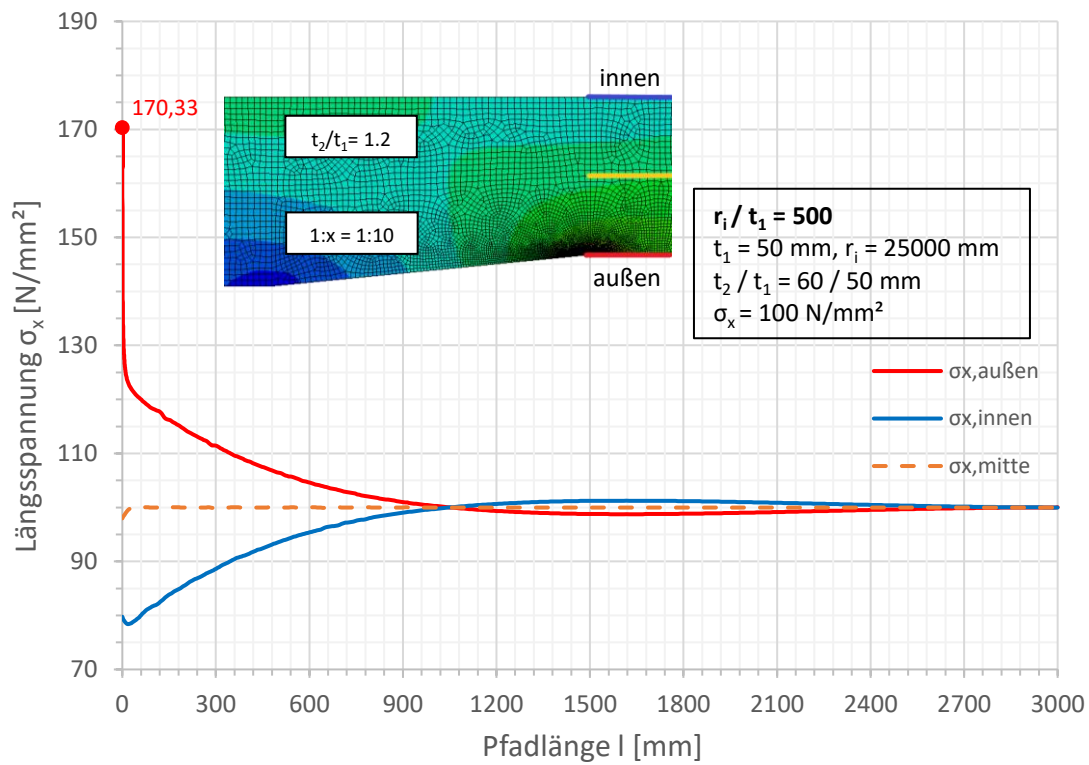


Spannungen an der Außenseite

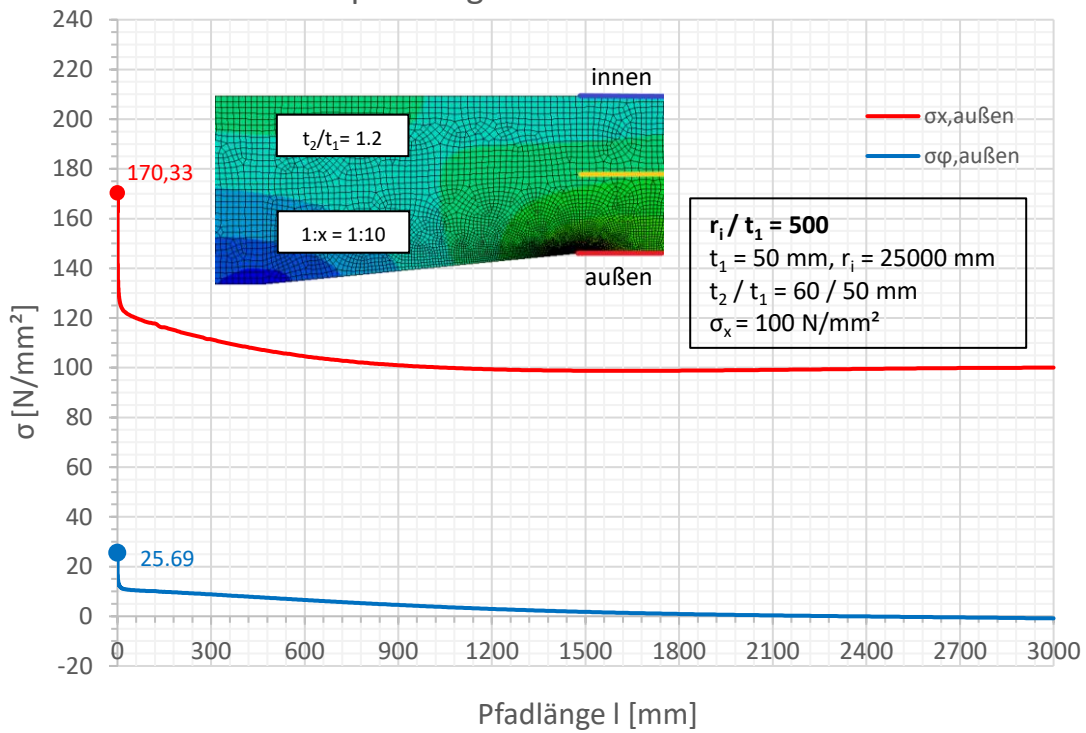


Spannungen an der Außenseite

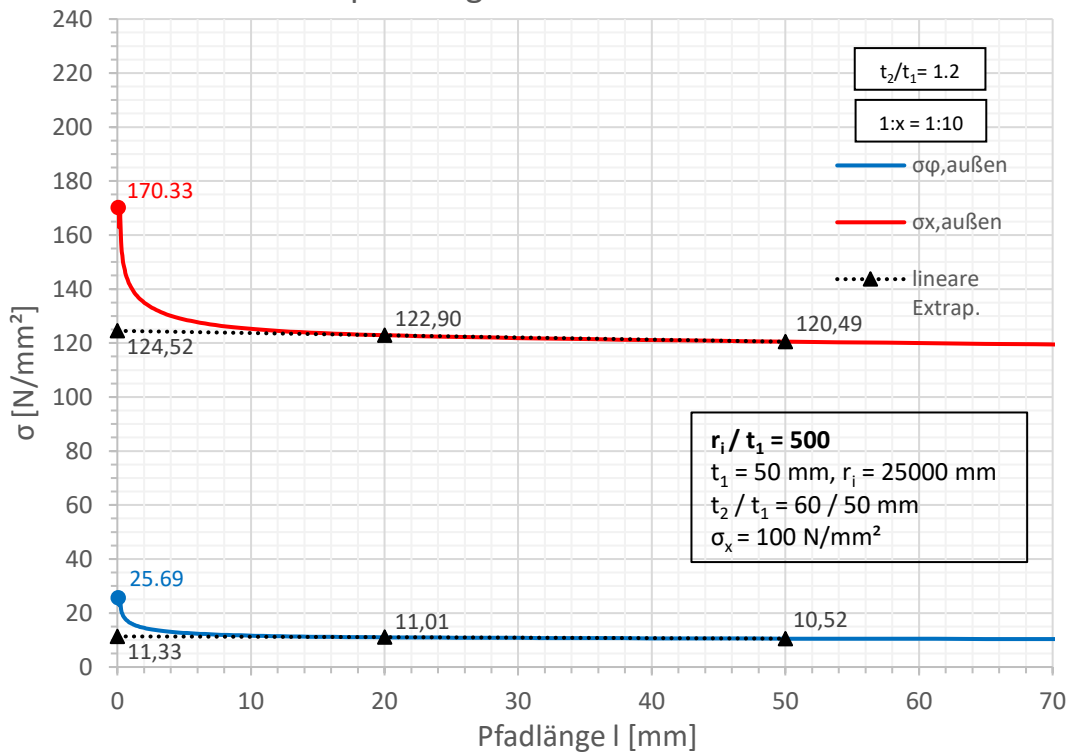


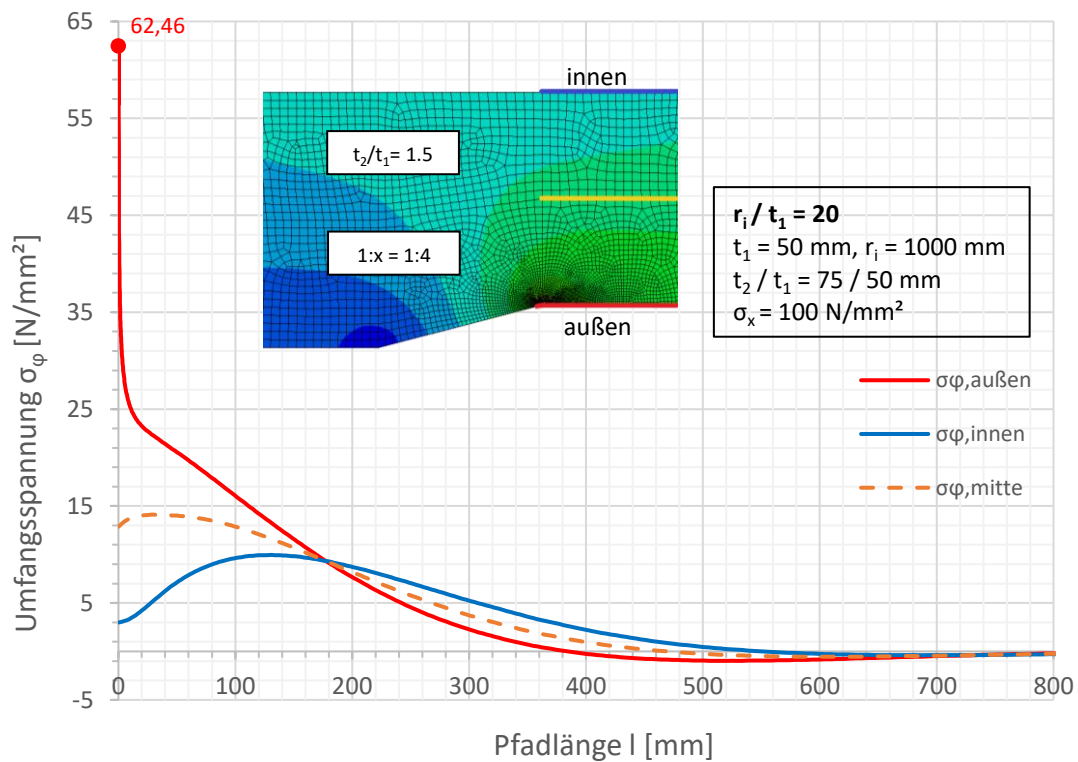
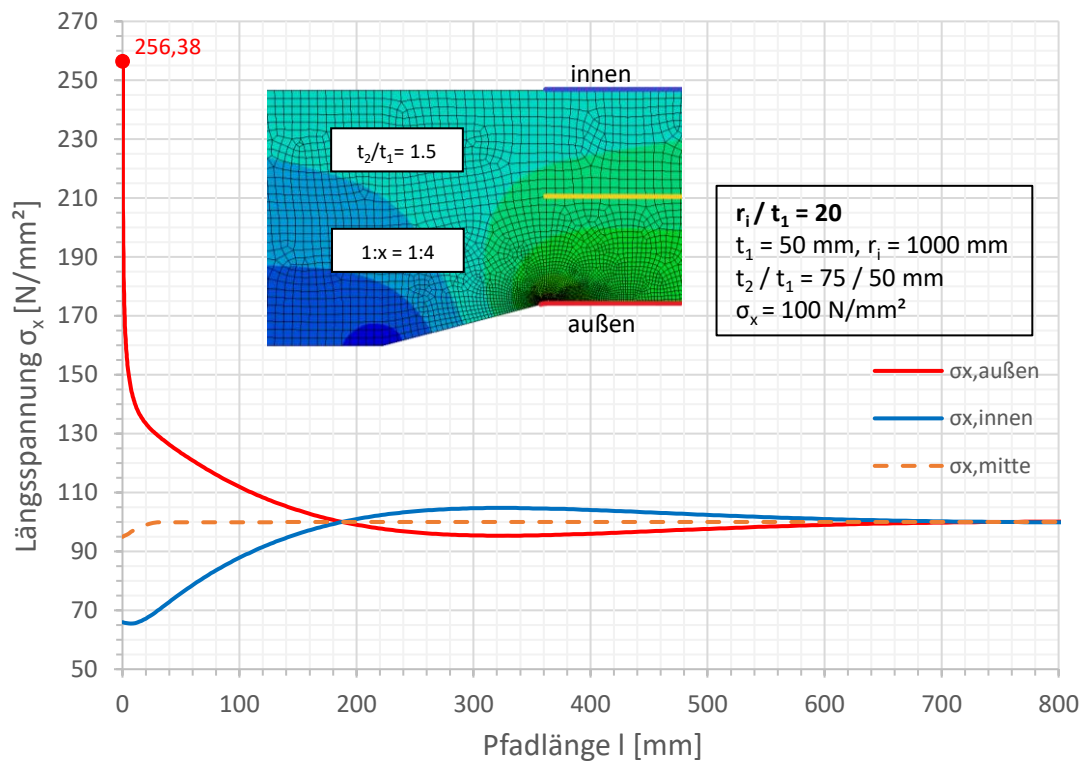


Spannungen an der Außenseite

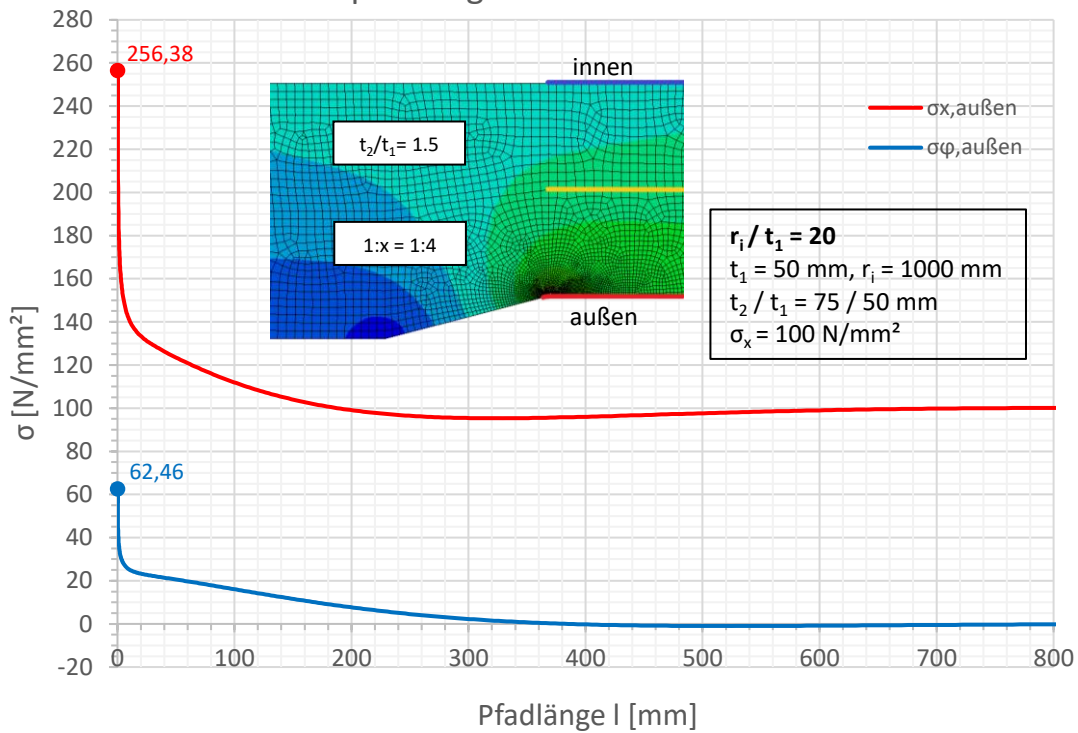


Spannungen an der Außenseite

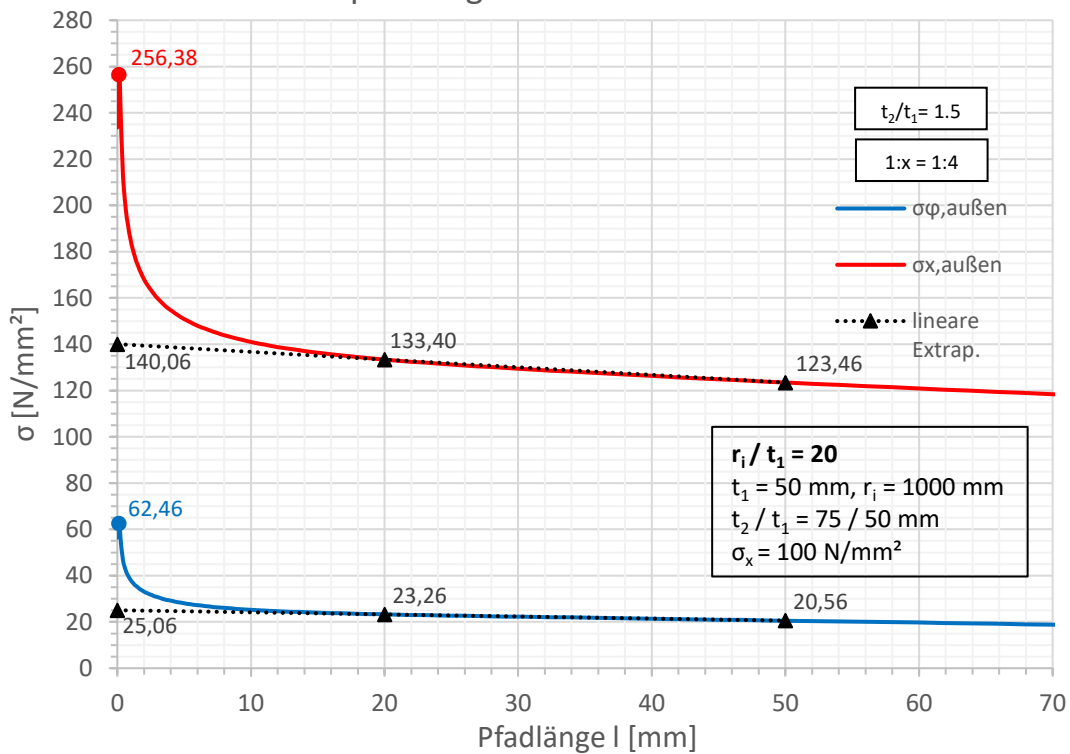


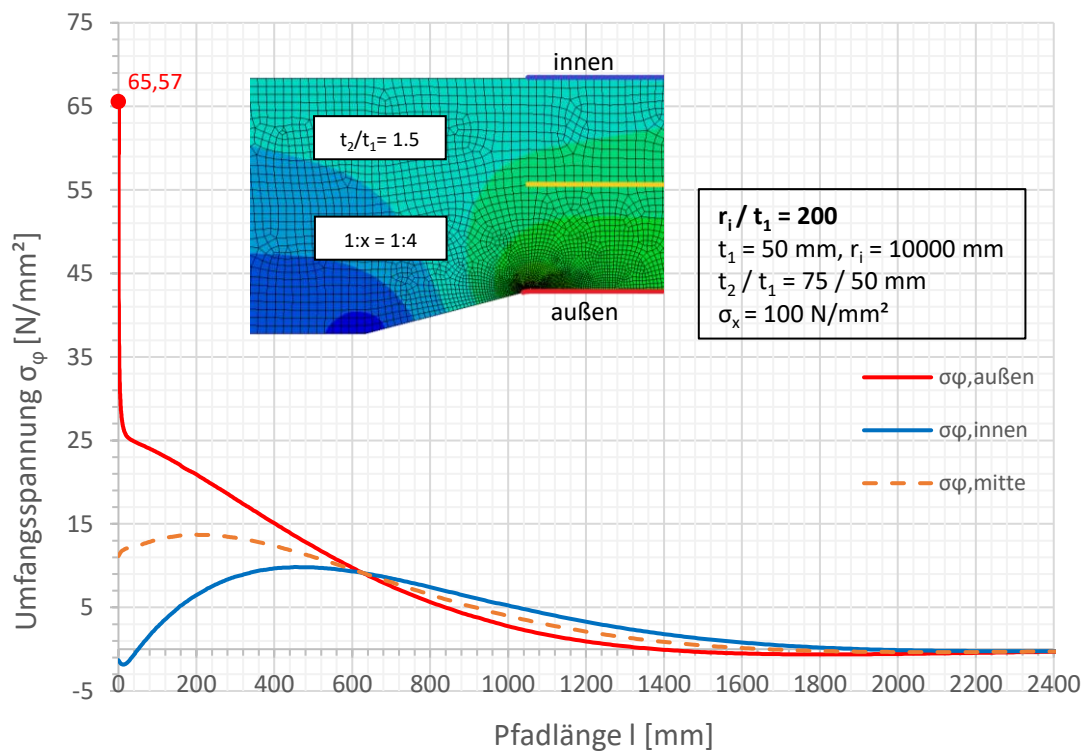
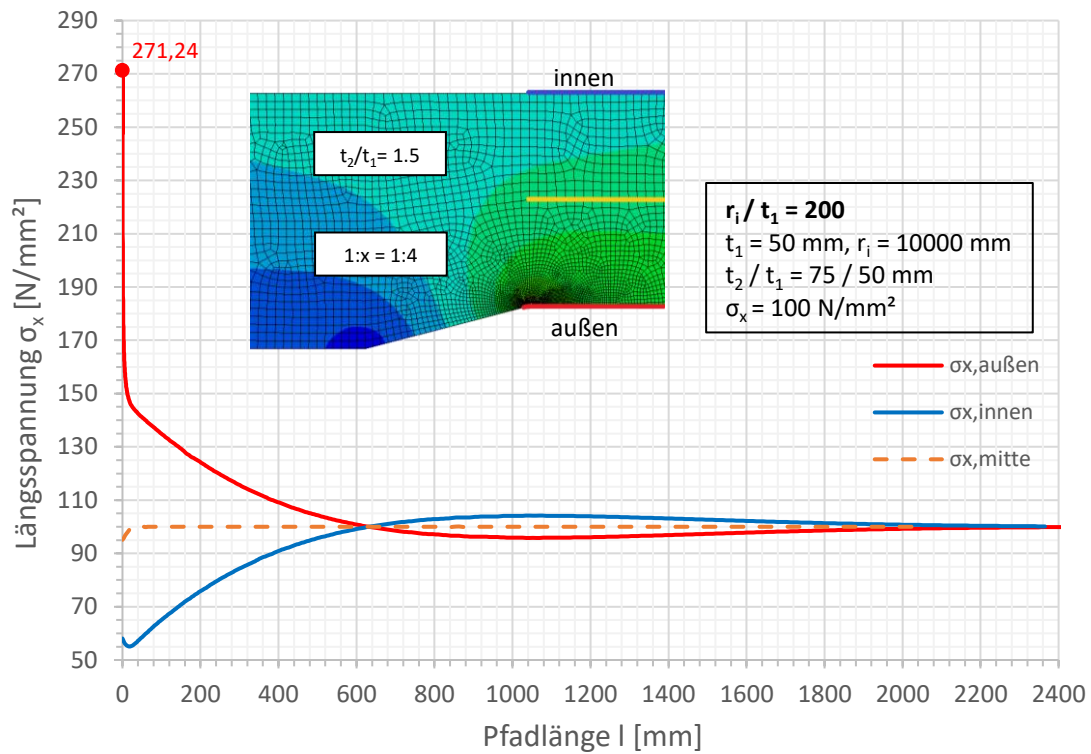


Spannungen an der Außenseite

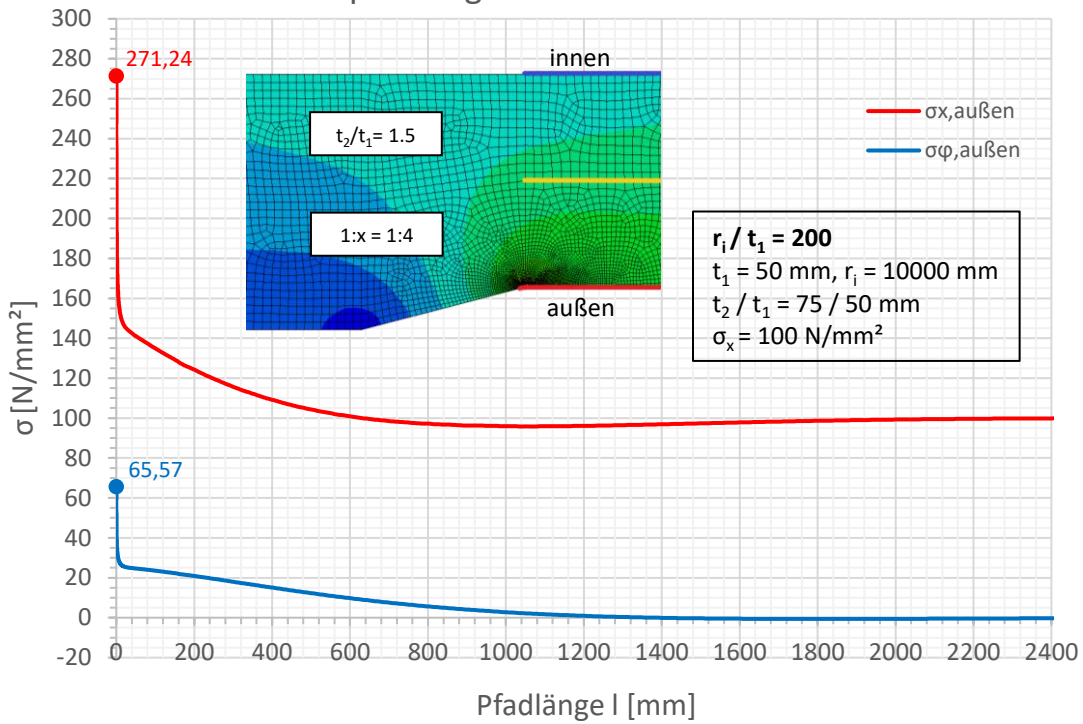


Spannungen an der Außenseite

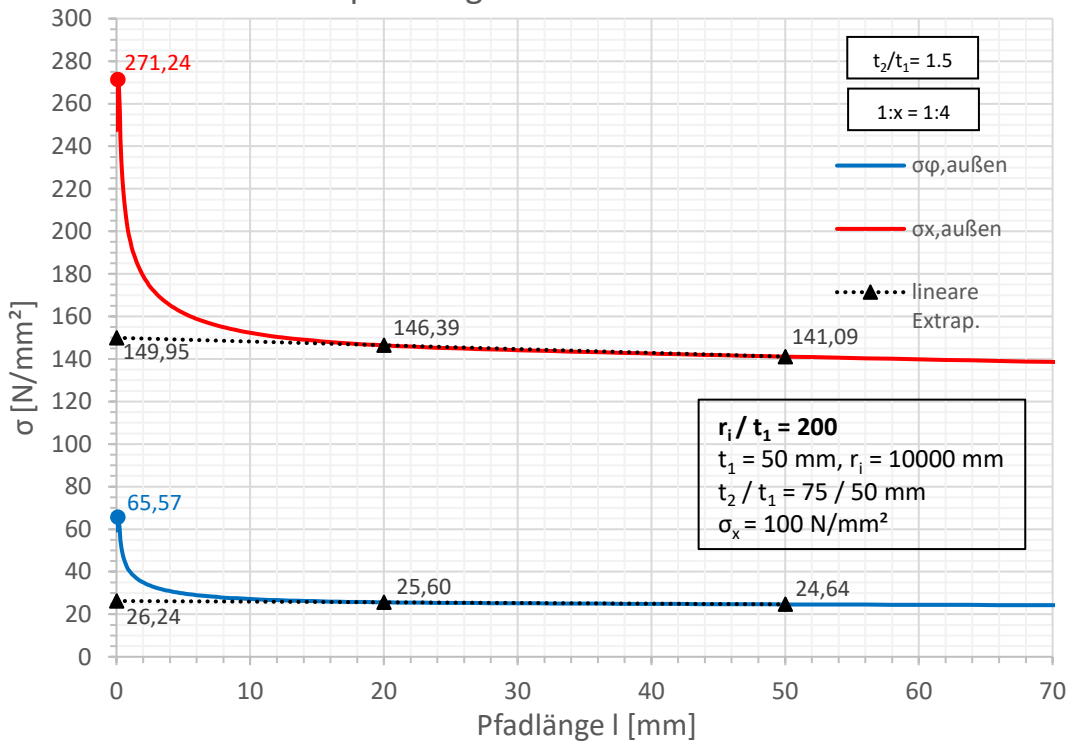


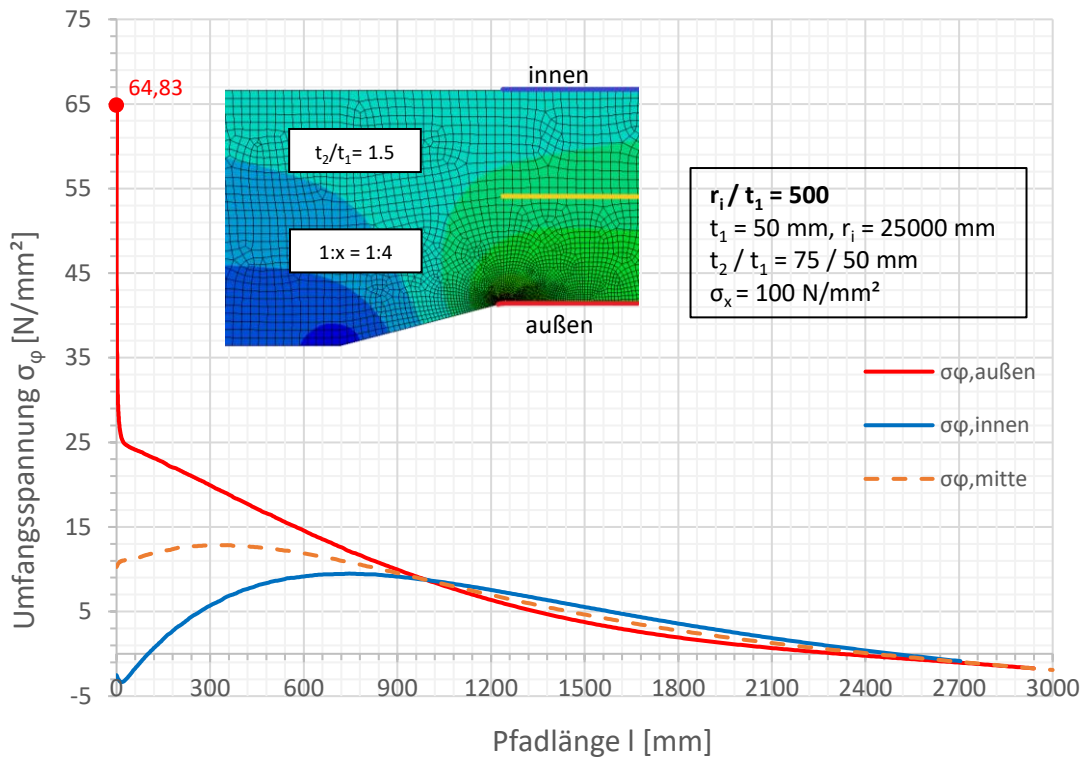
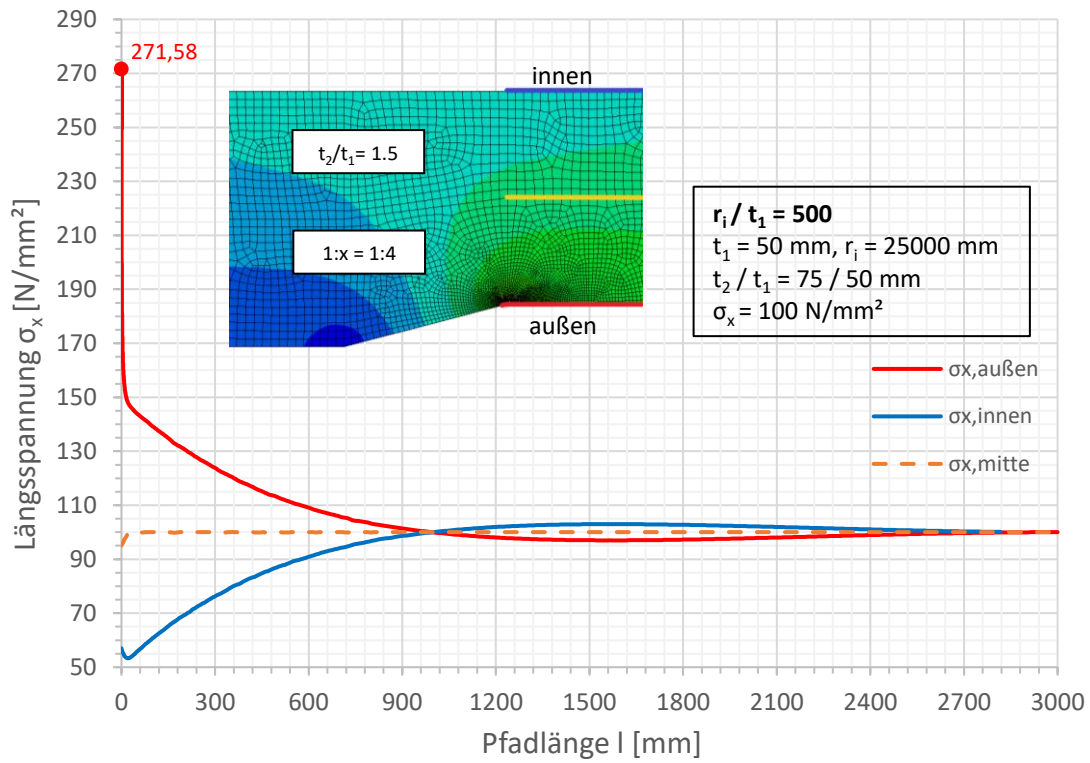


Spannungen an der Außenseite

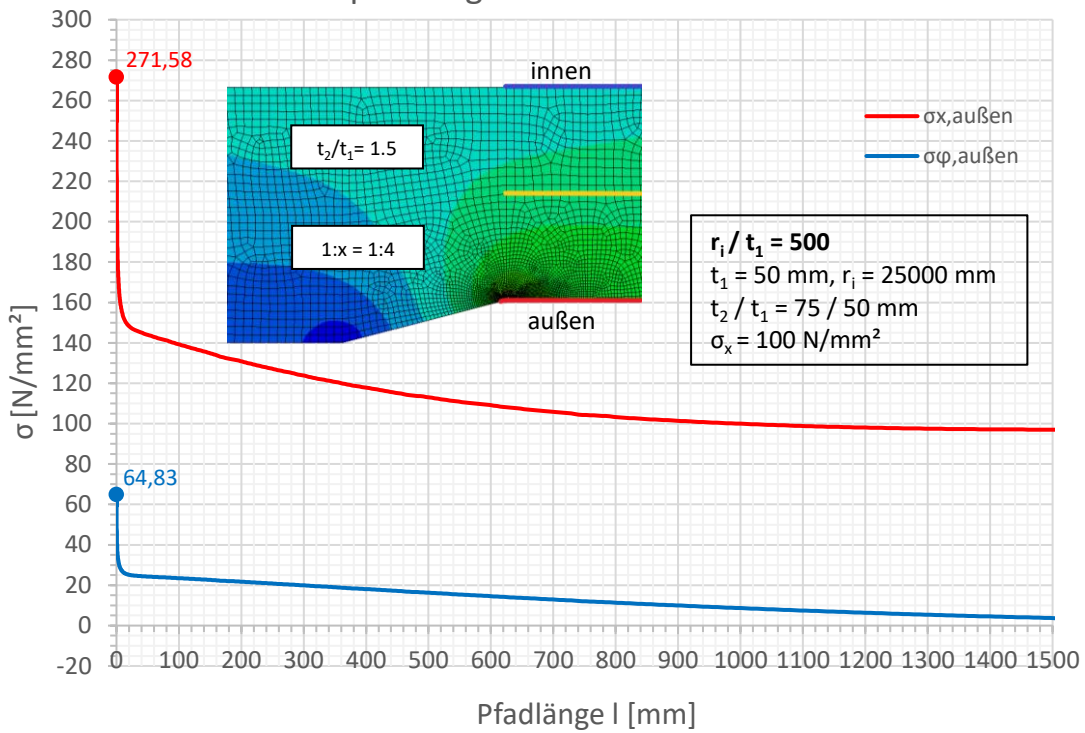


Spannungen an der Außenseite

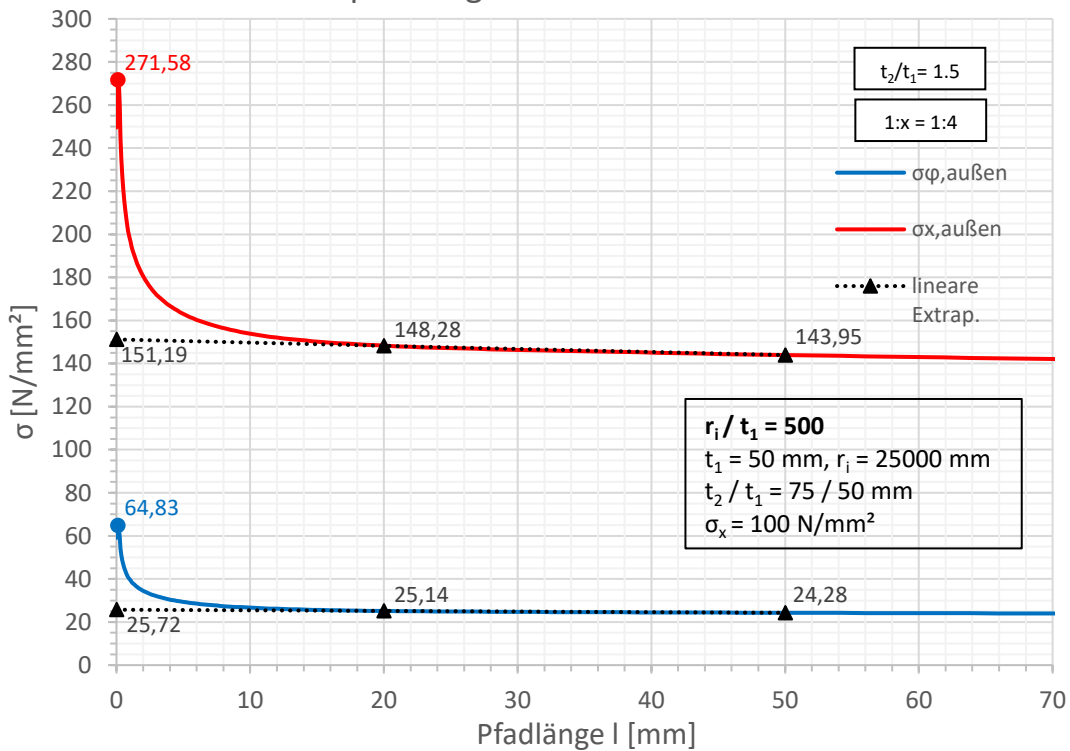


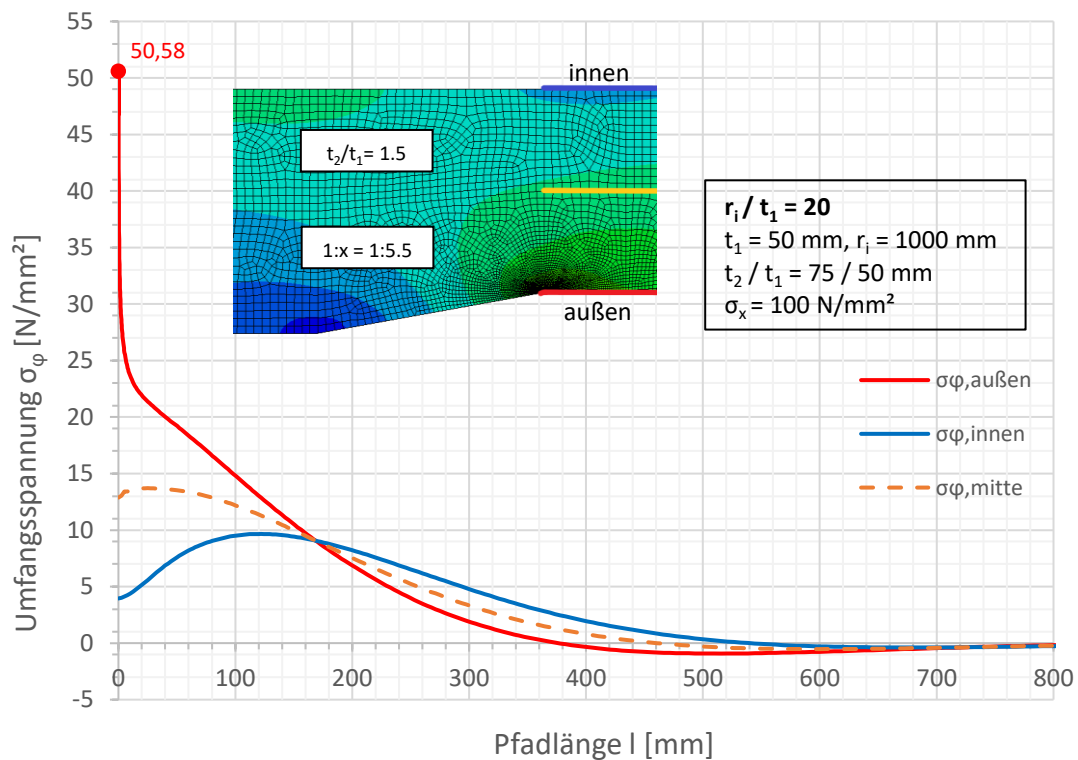
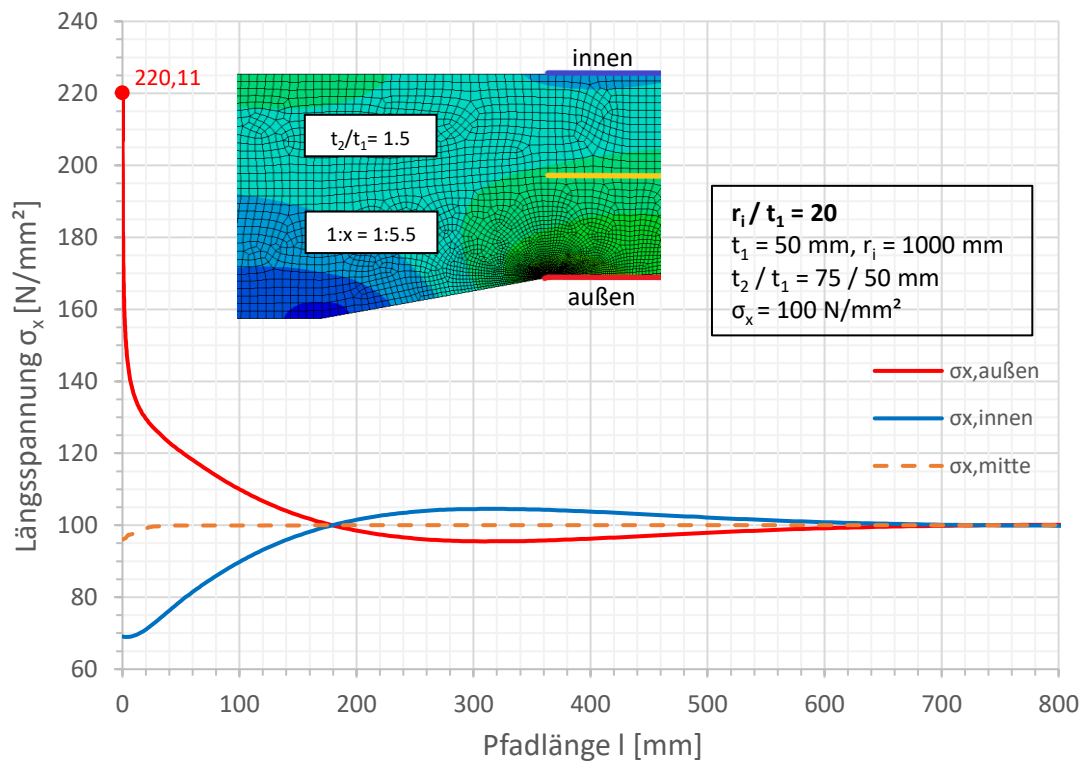


Spannungen an der Außenseite

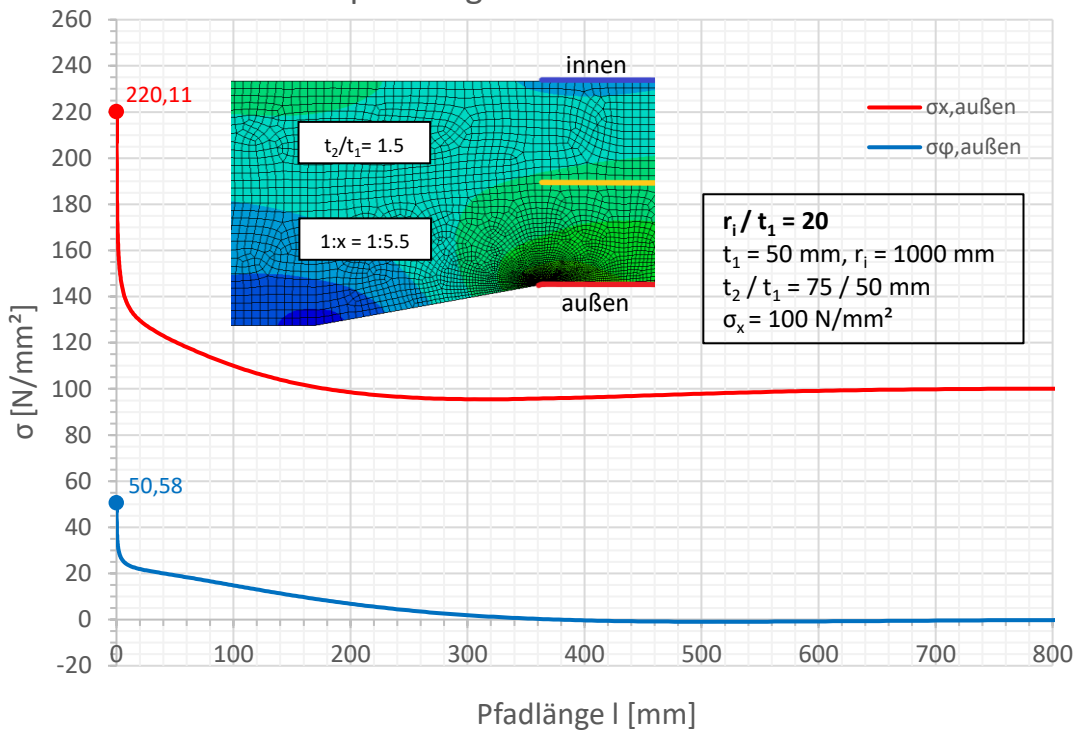


Spannungen an der Außenseite

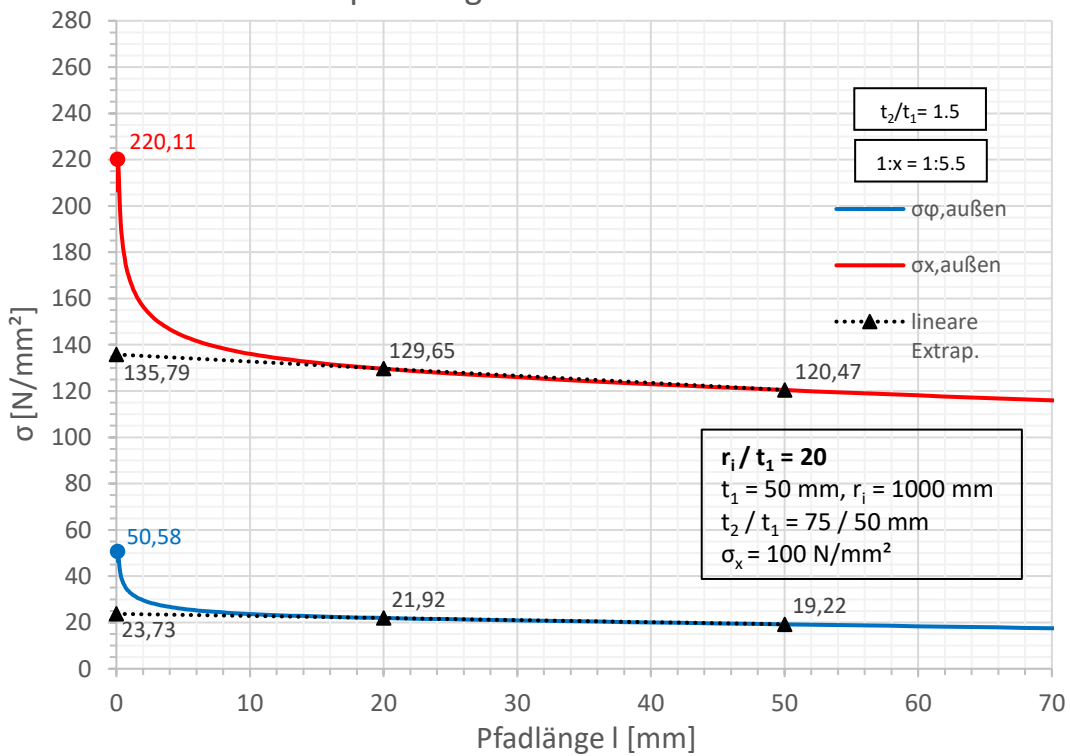


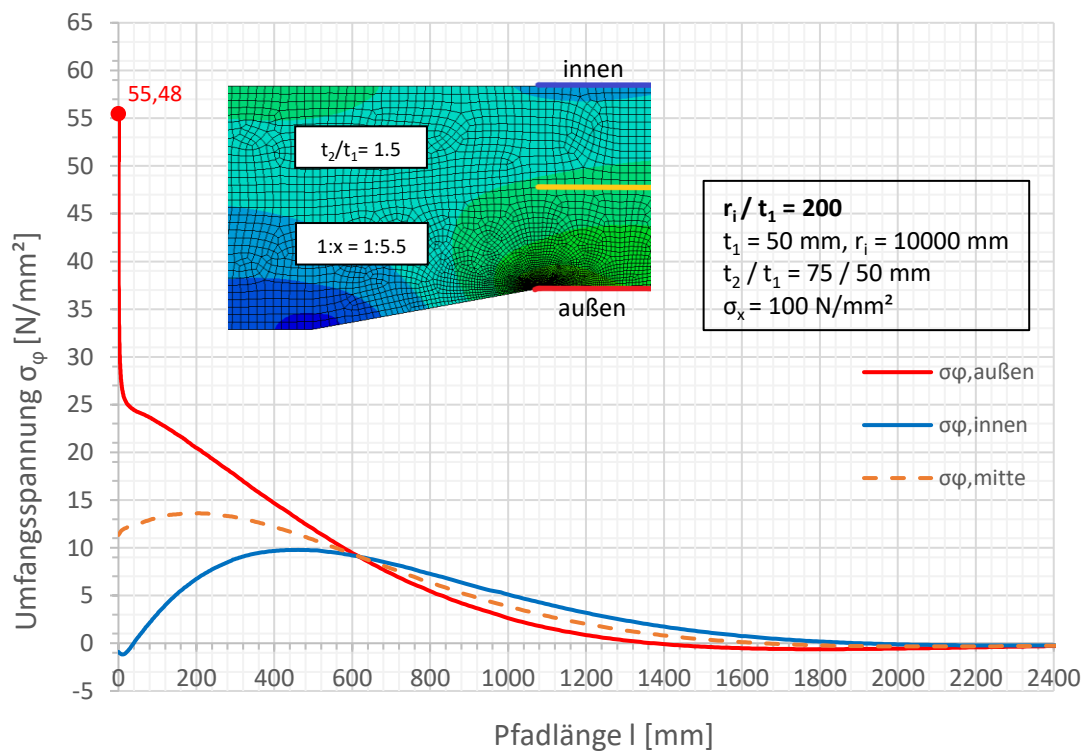
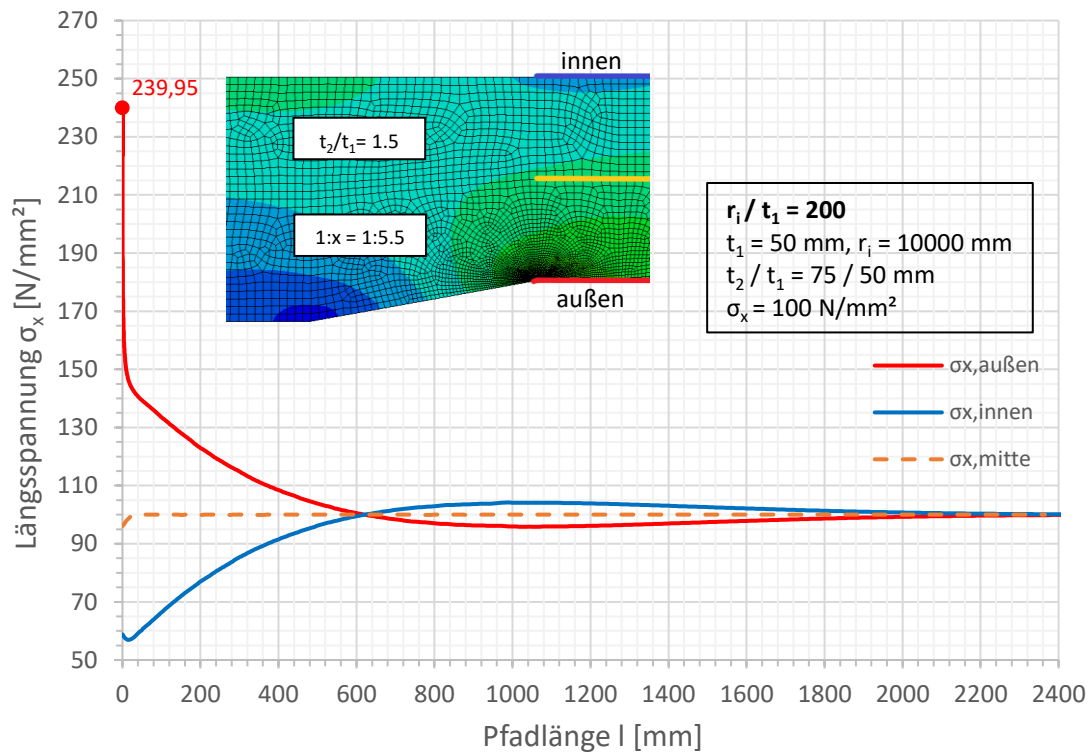


Spannungen an der Außenseite

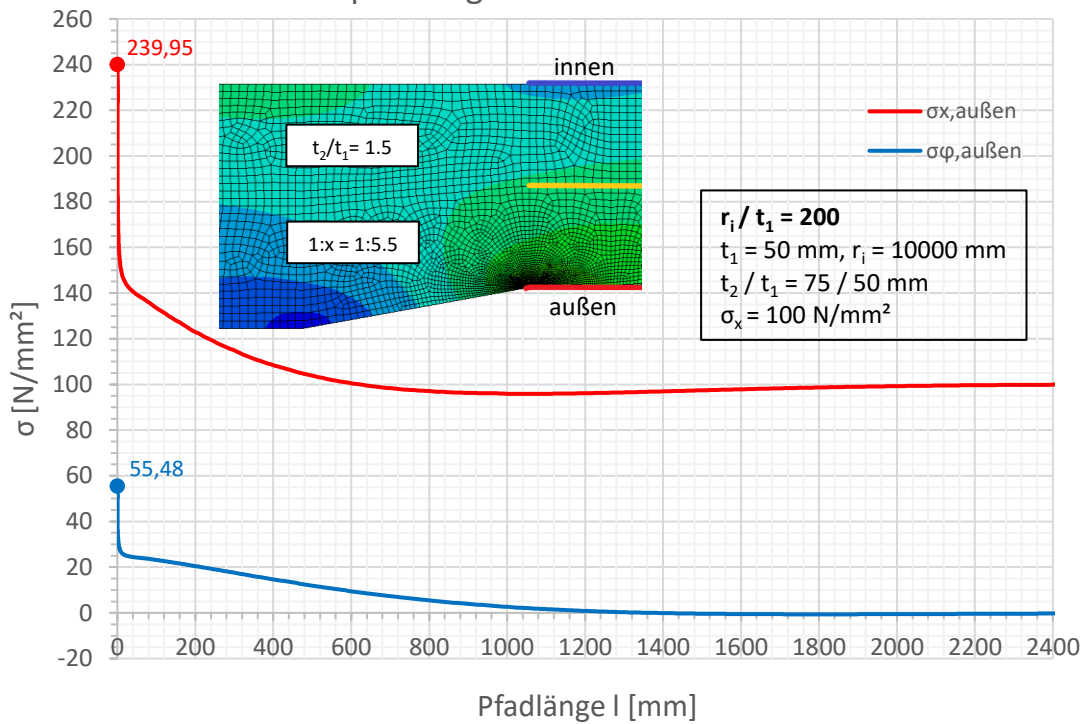


Spannungen an der Außenseite

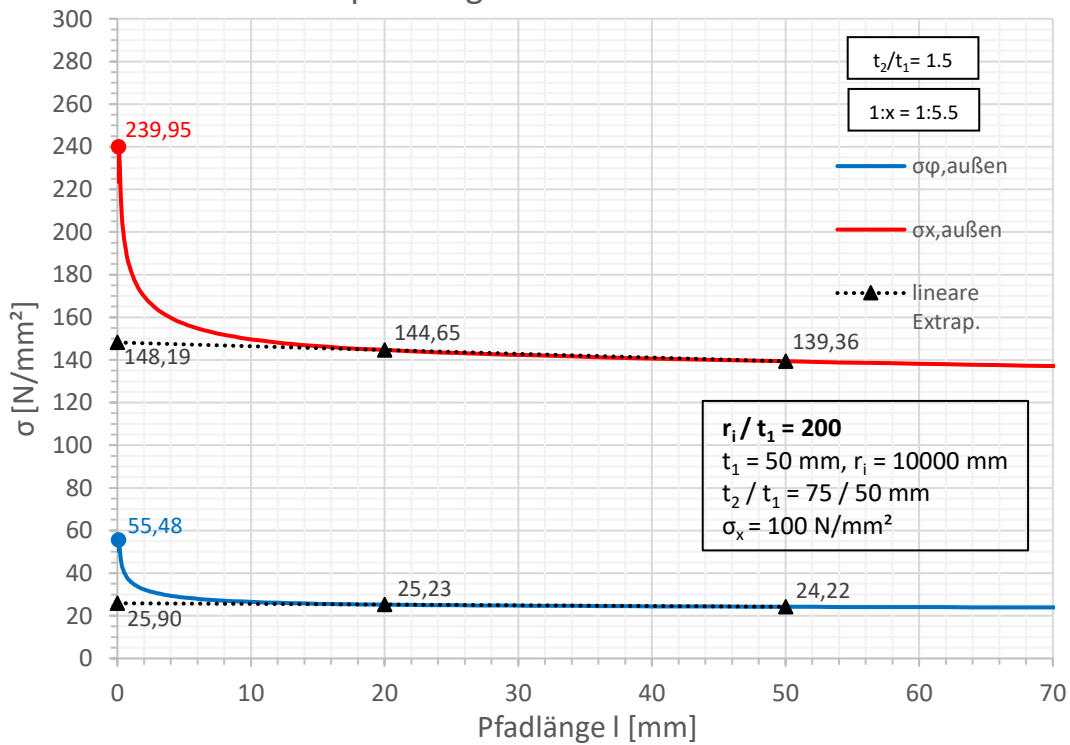


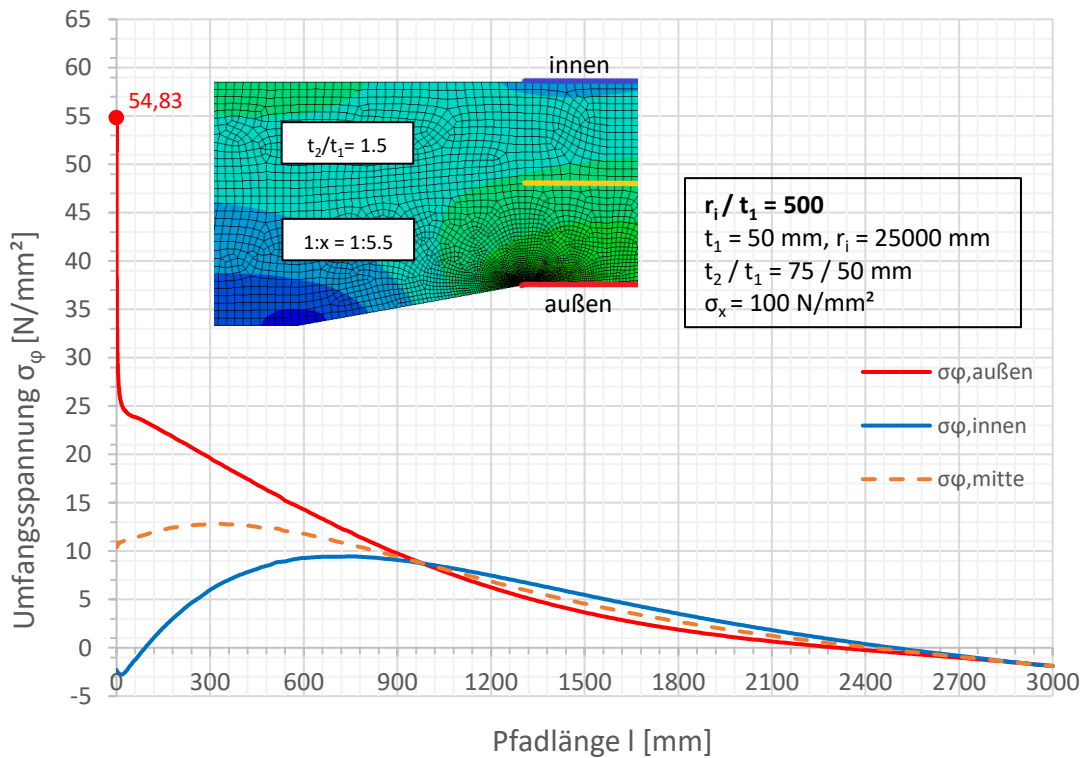
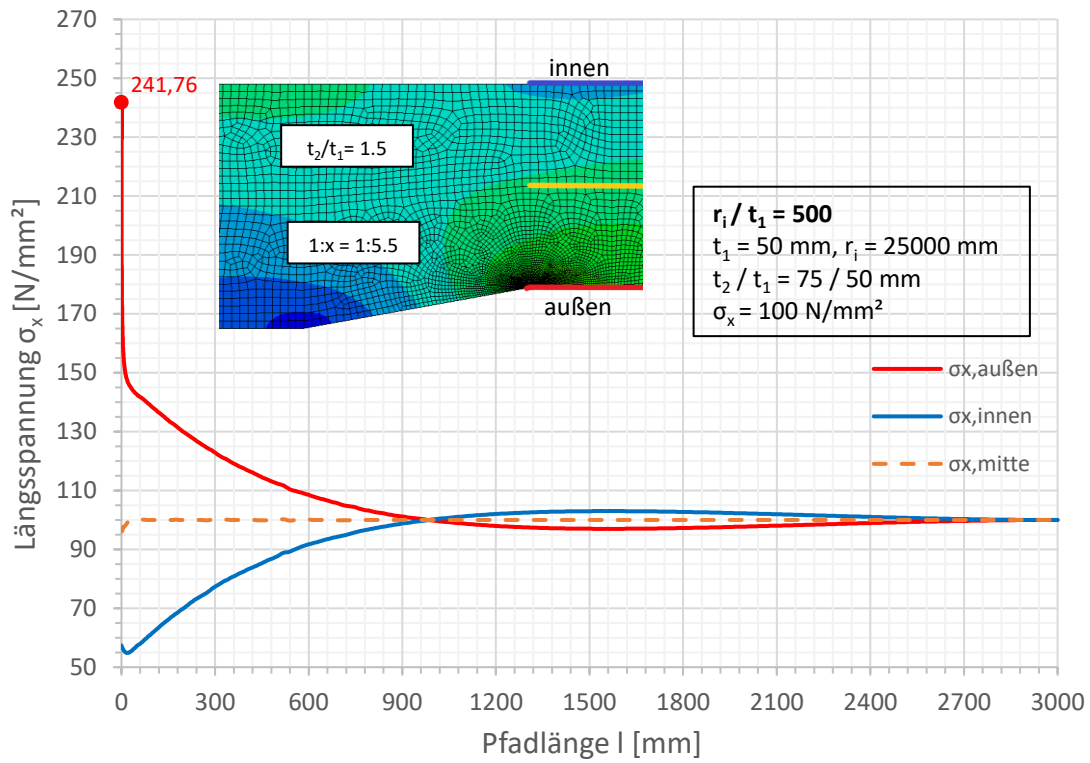


Spannungen an der Außenseite

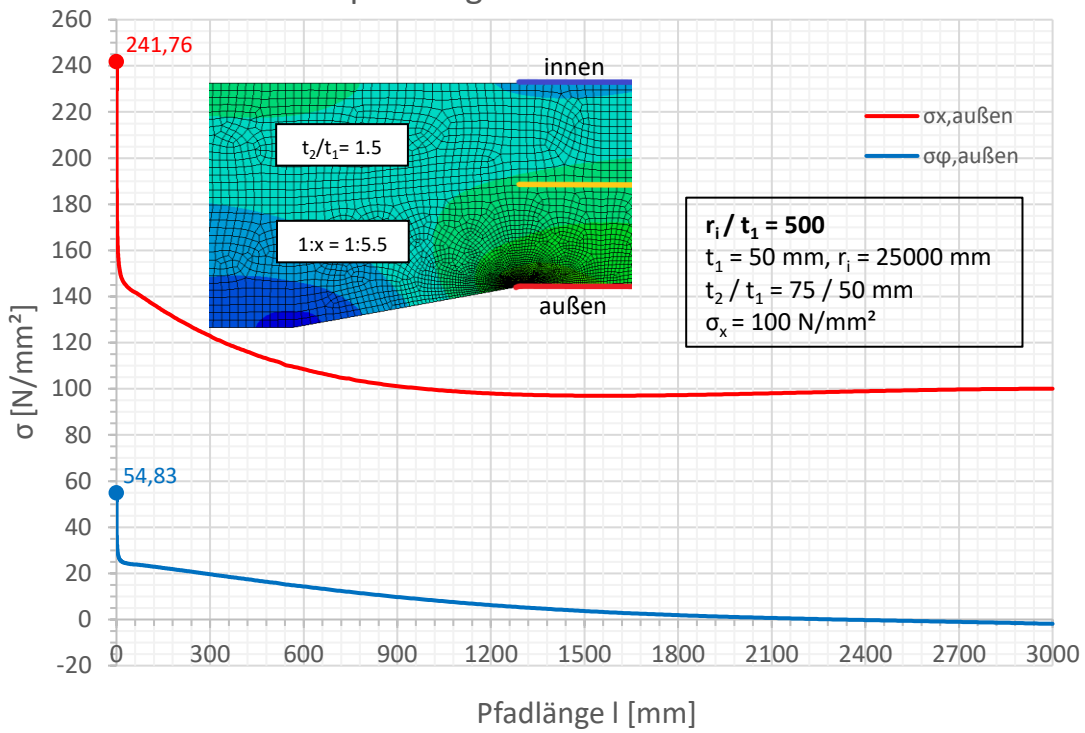


Spannungen an der Außenseite

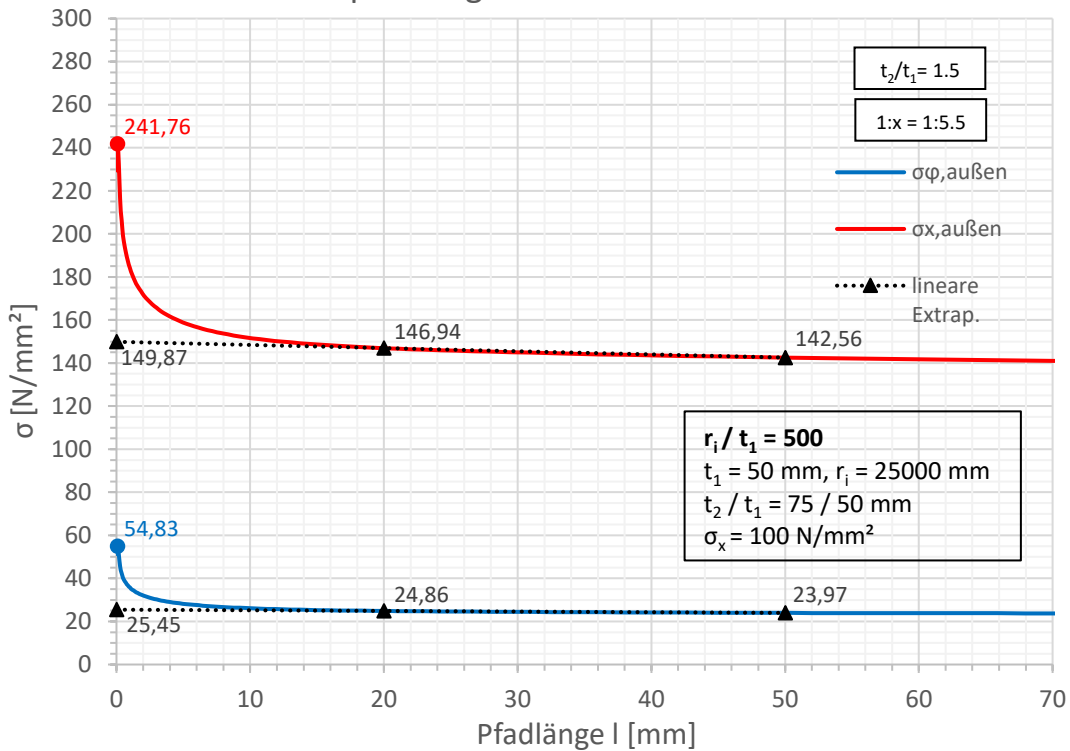


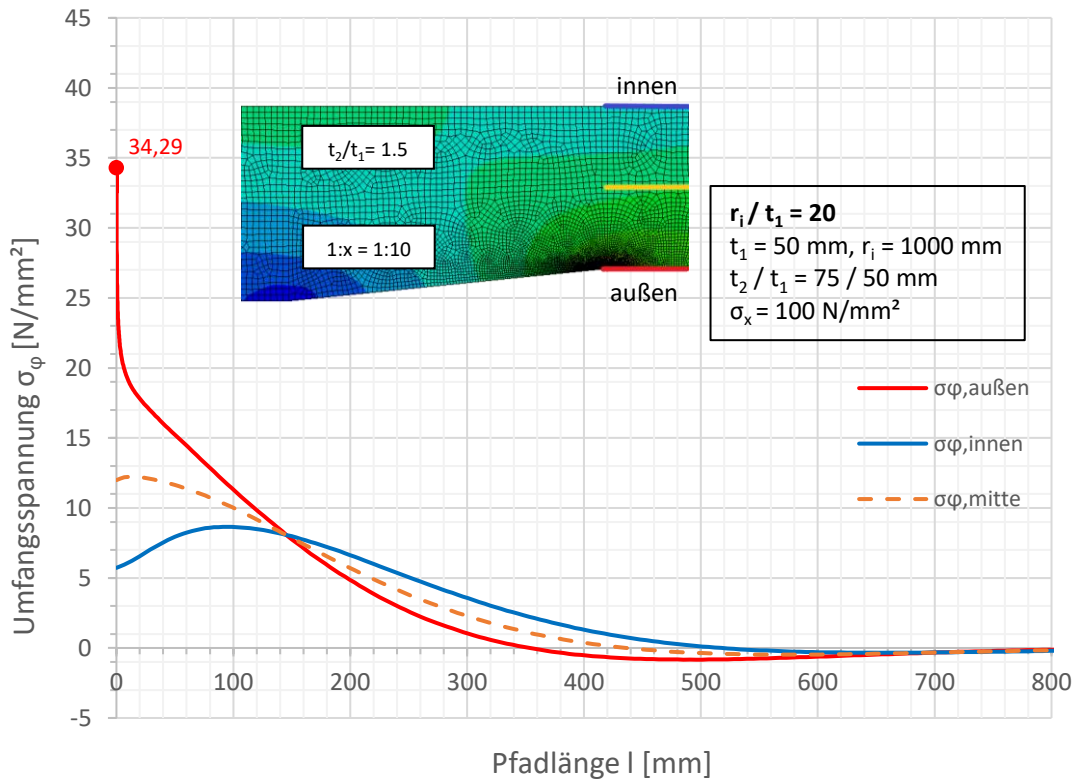
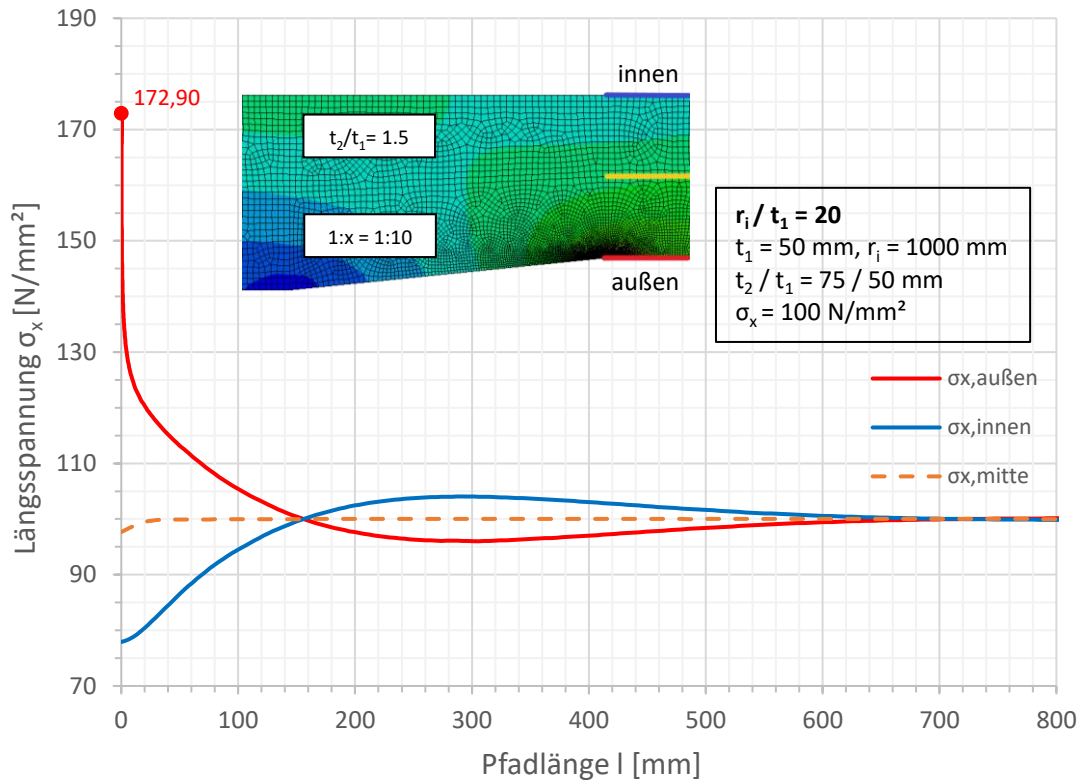


Spannungen an der Außenseite

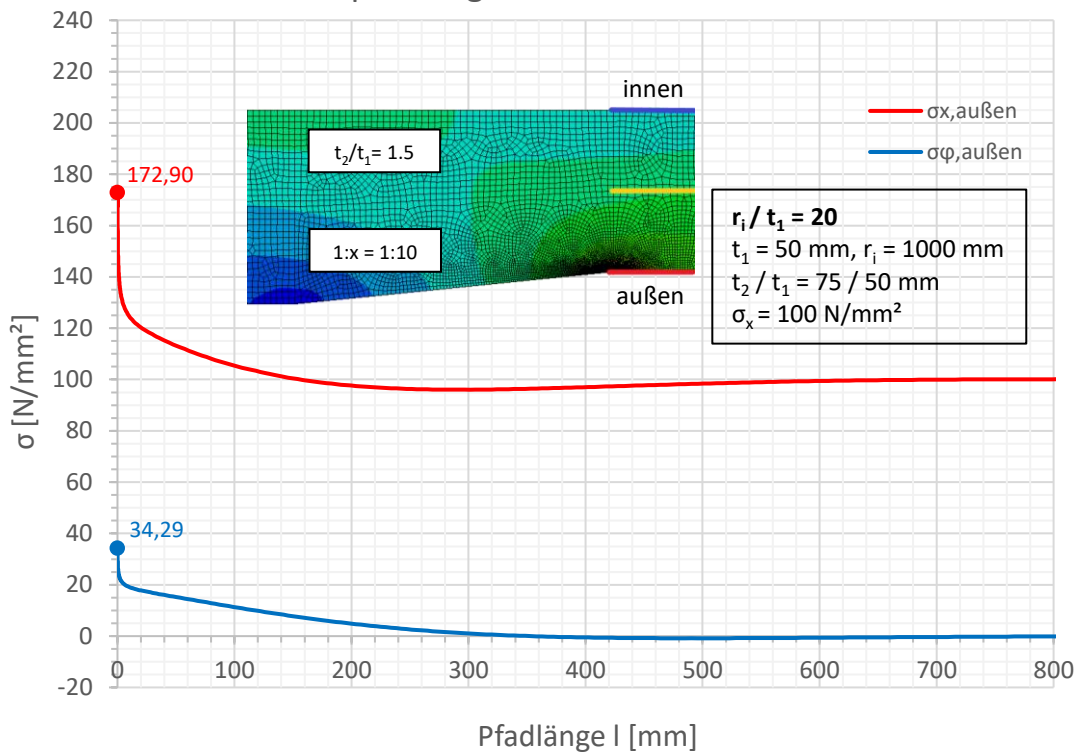


Spannungen an der Außenseite

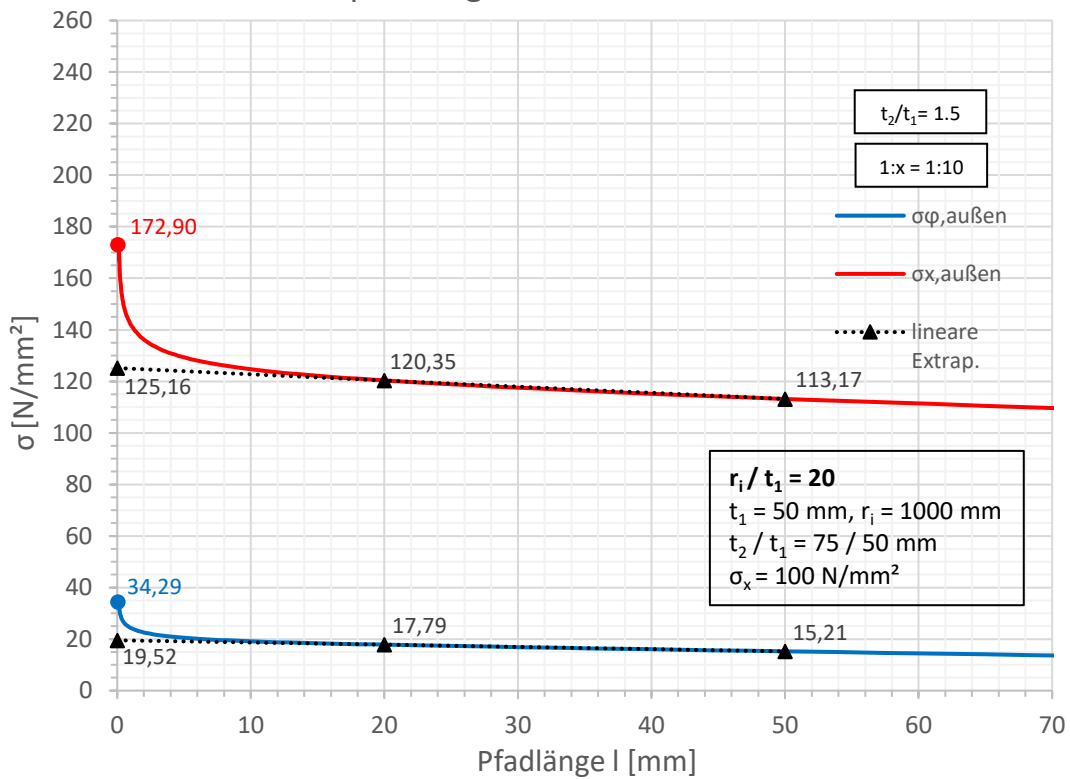


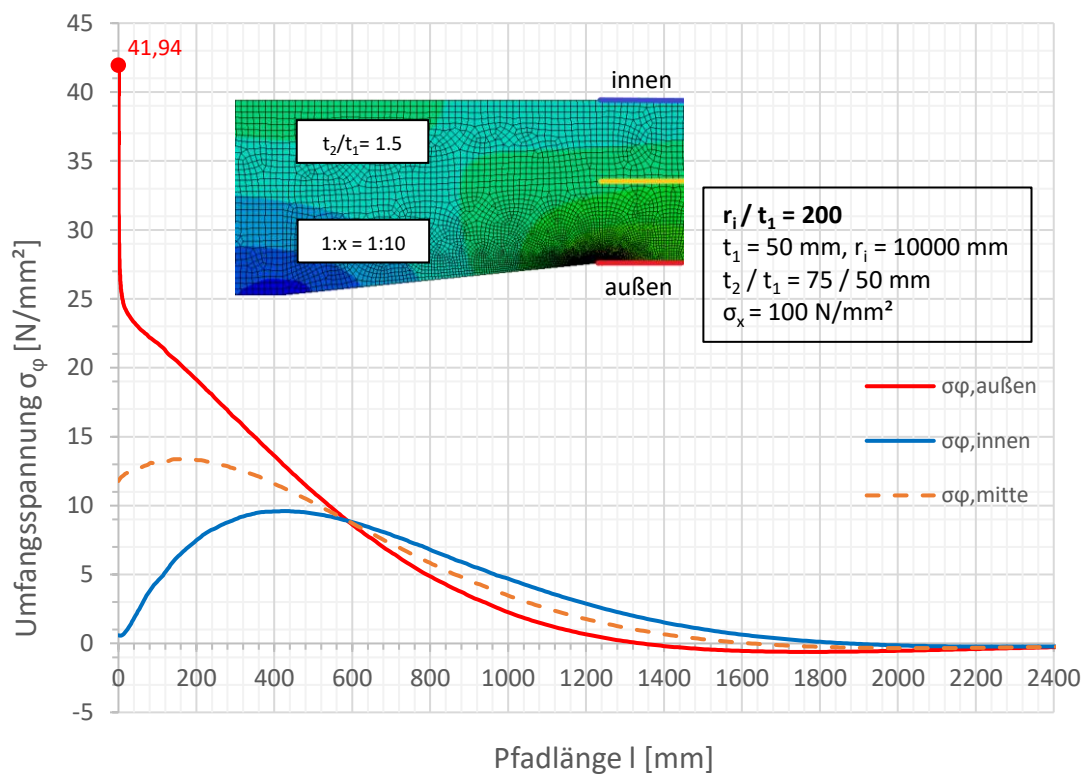
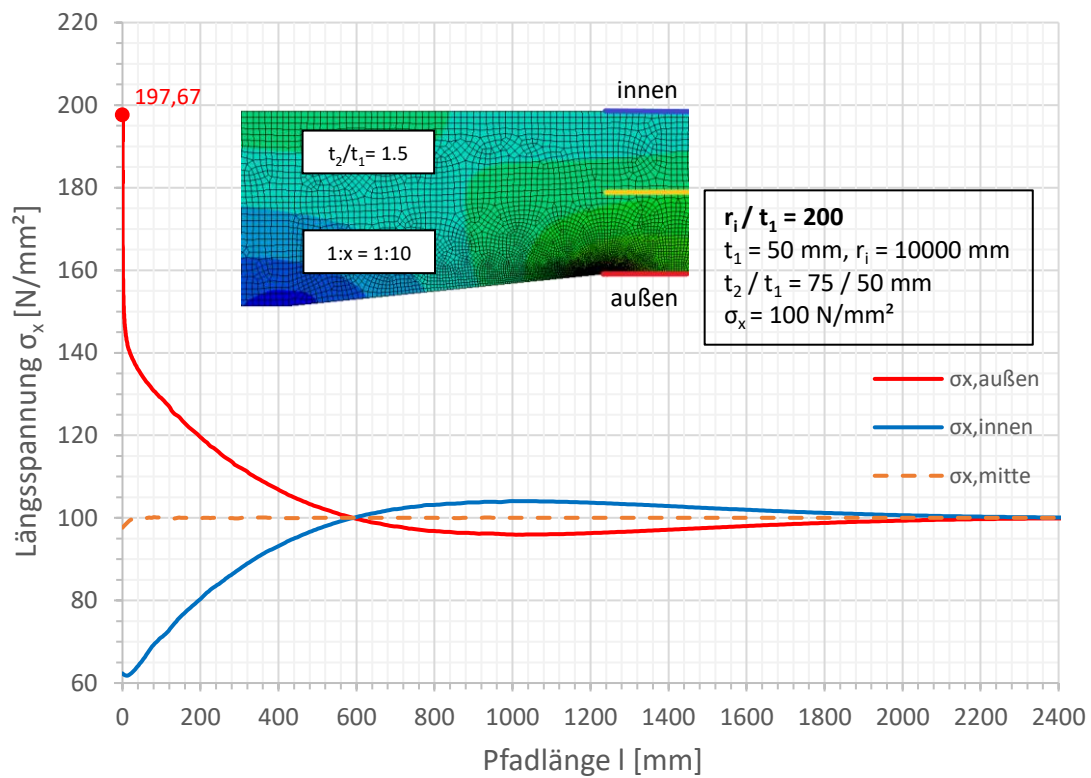


Spannungen an der Außenseite

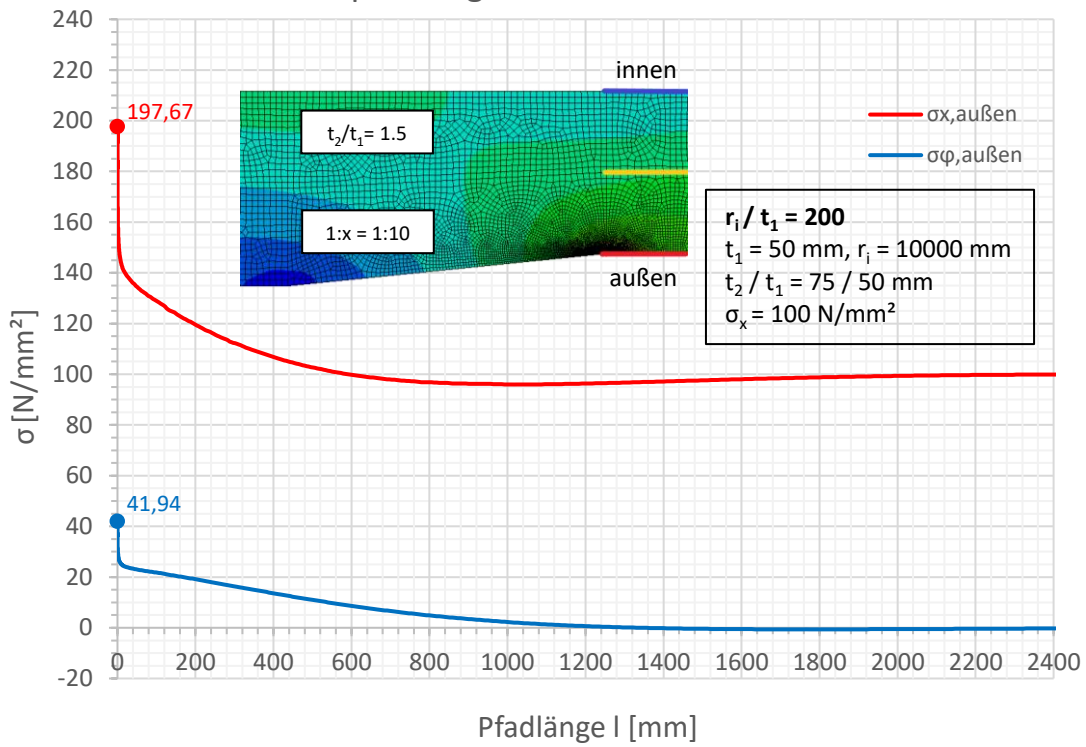


Spannungen an der Außenseite

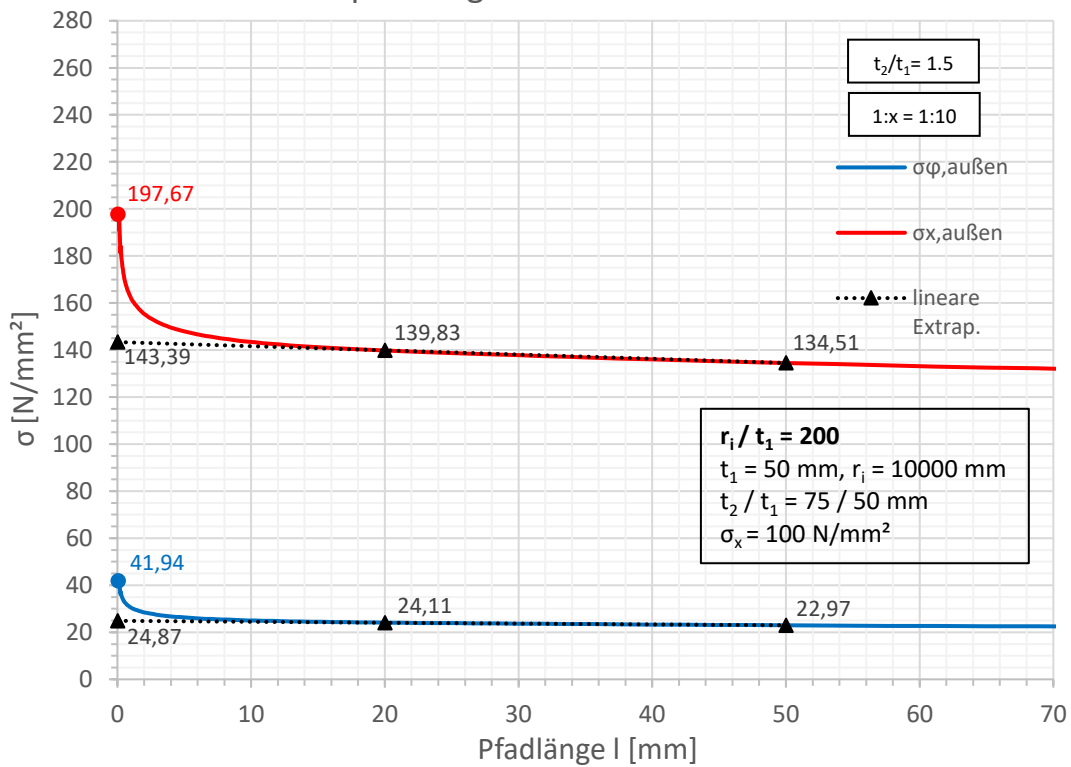


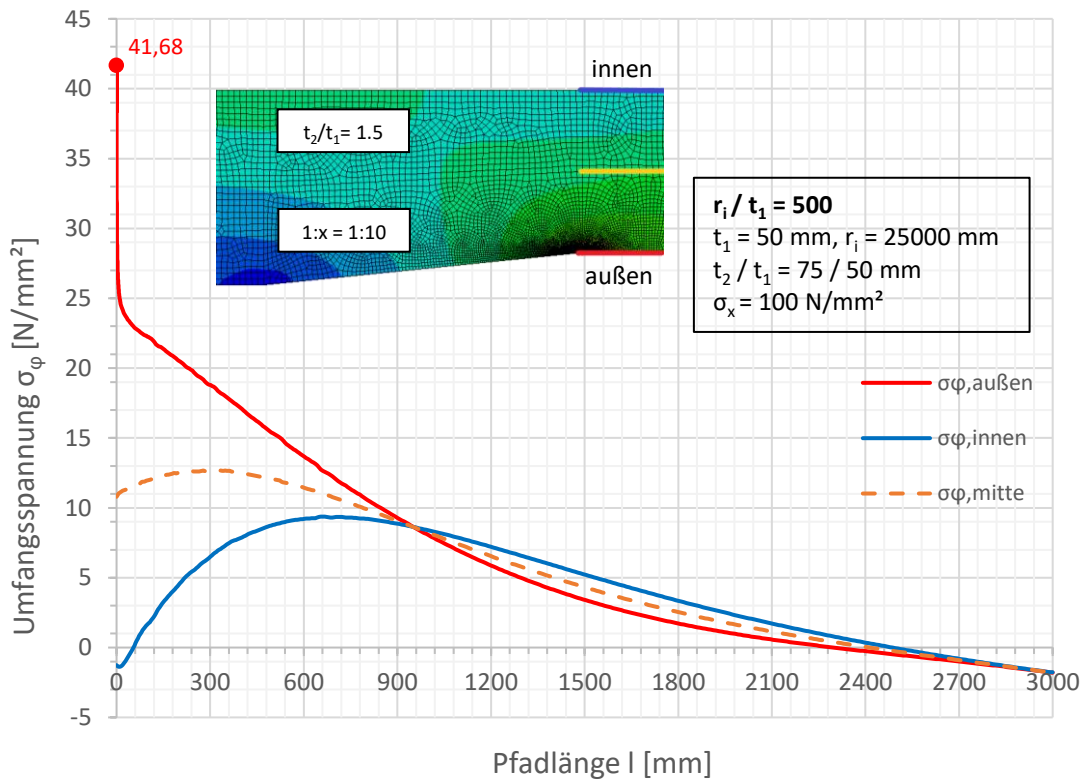
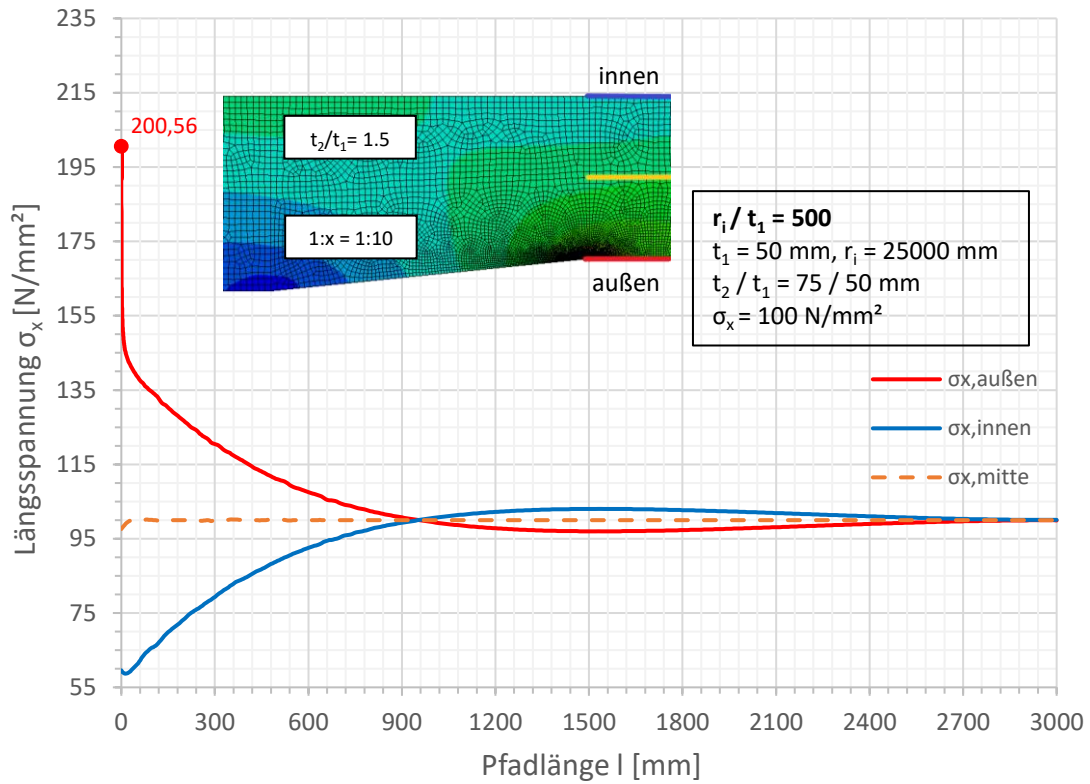


Spannungen an der Außenseite

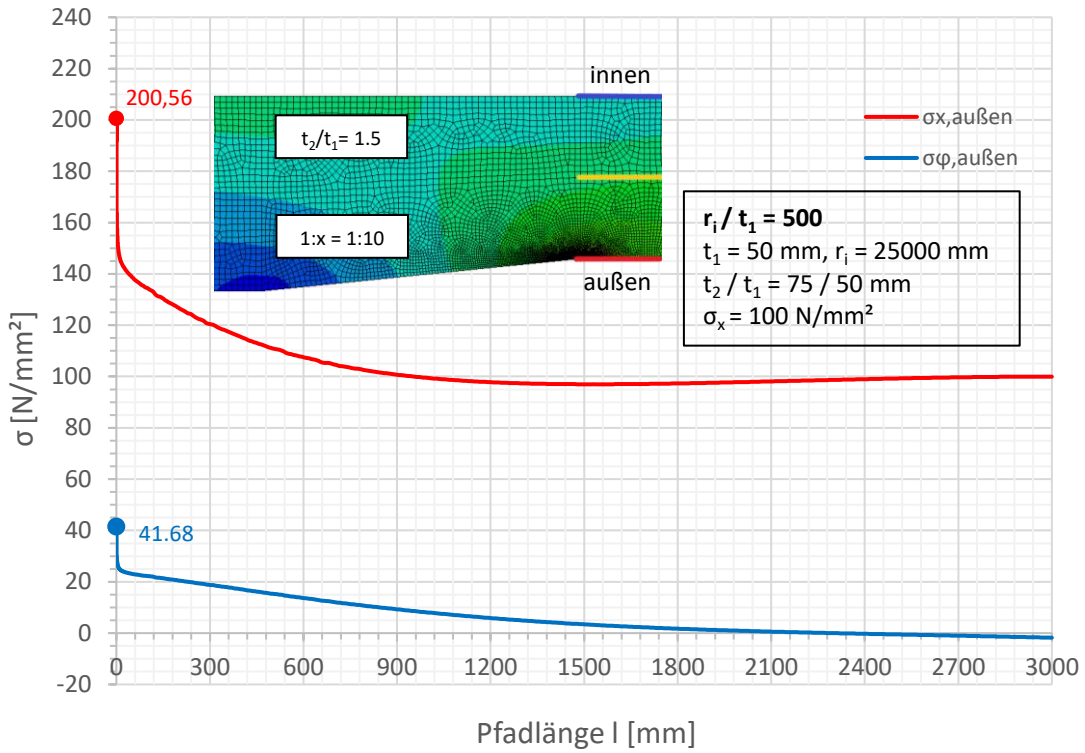


Spannungen an der Außenseite

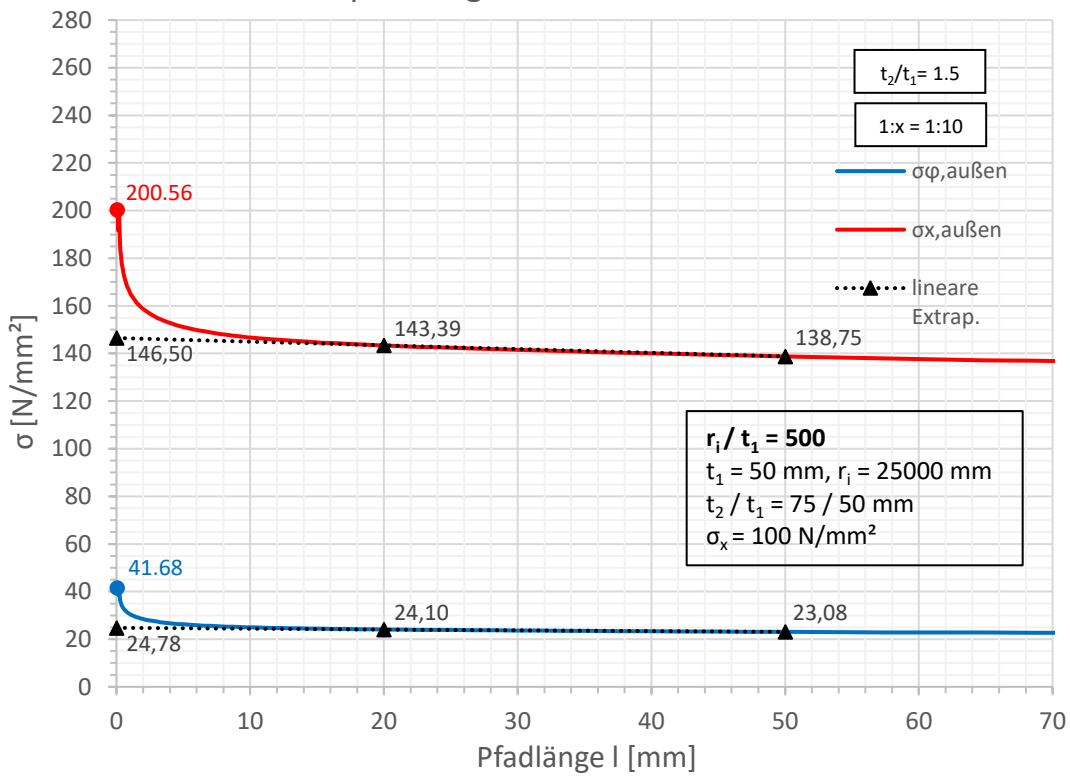


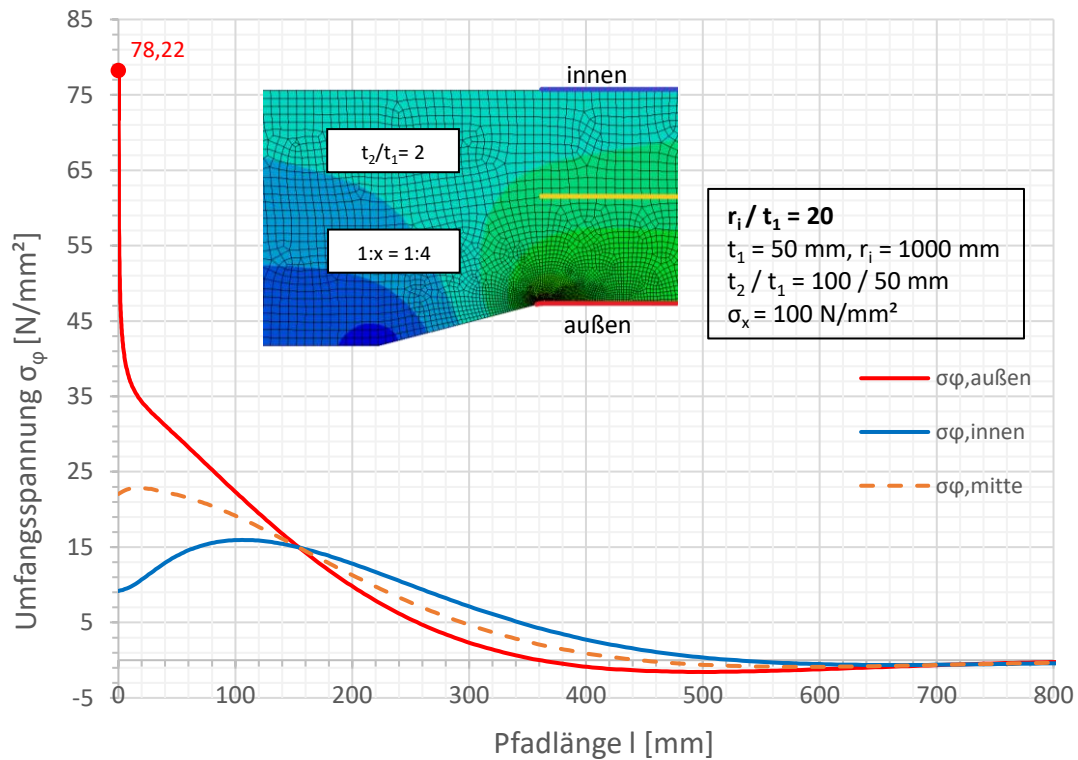
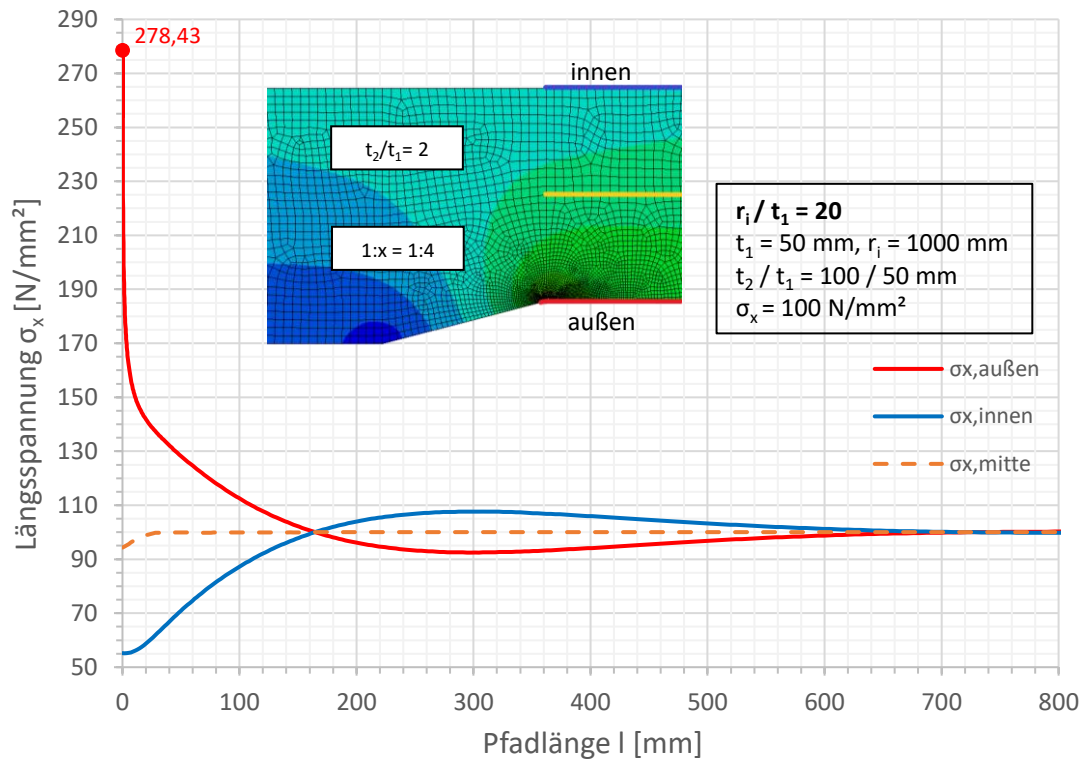


Spannungen an der Außenseite

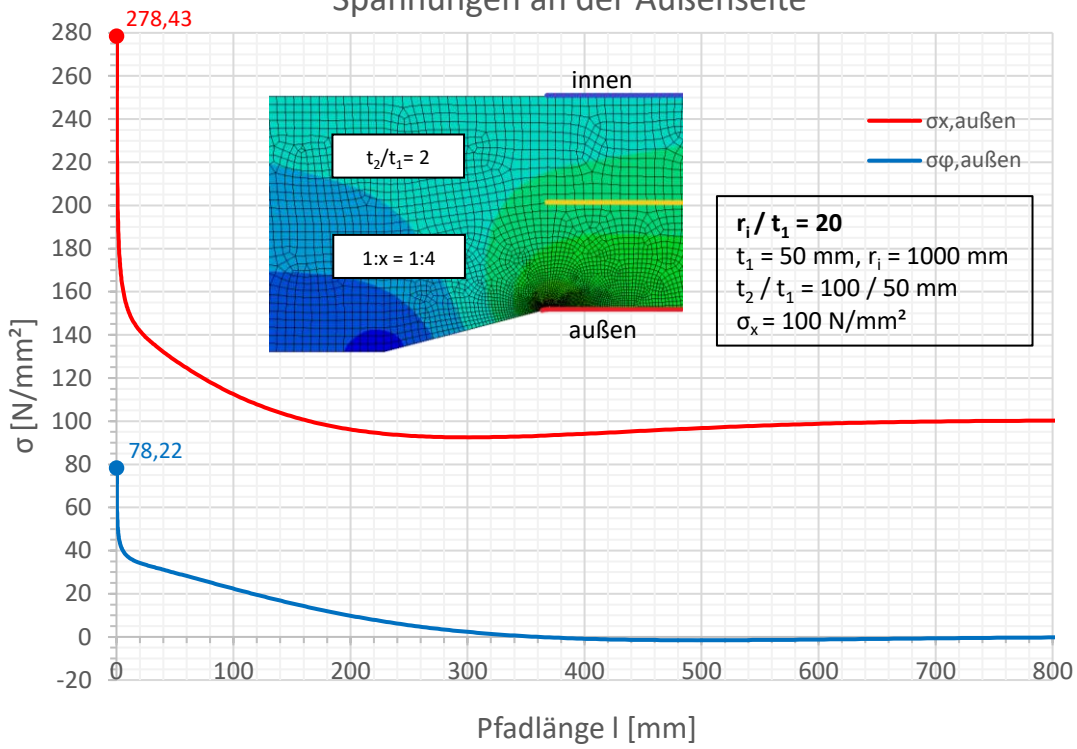


Spannungen an der Außenseite

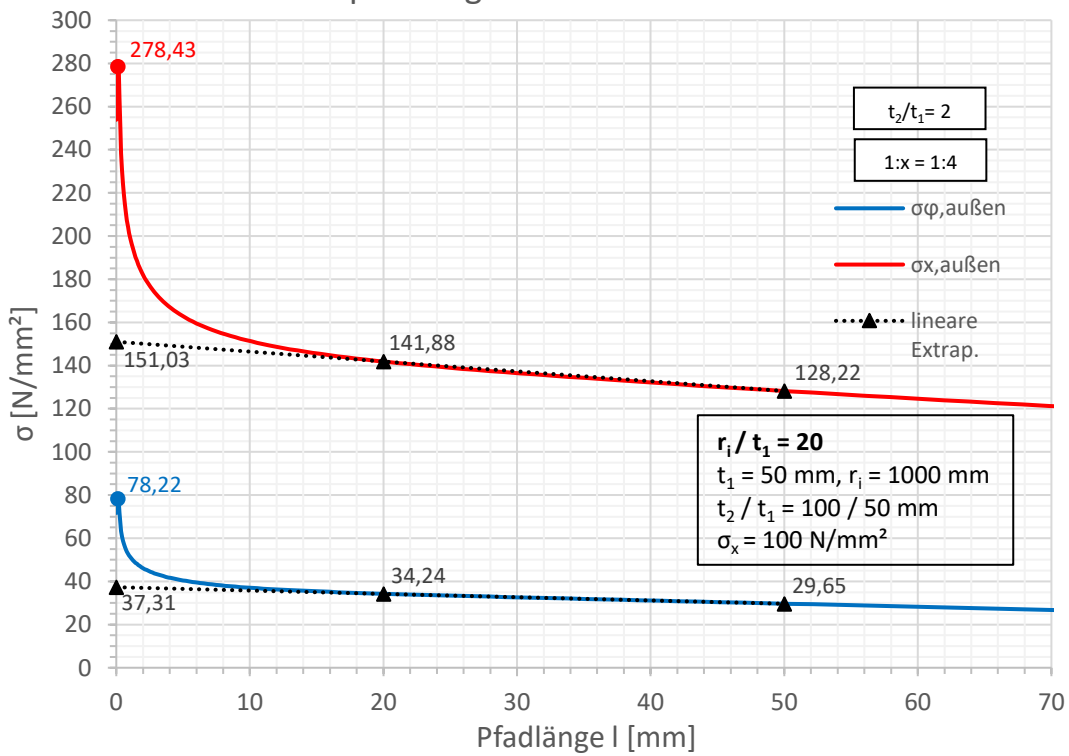


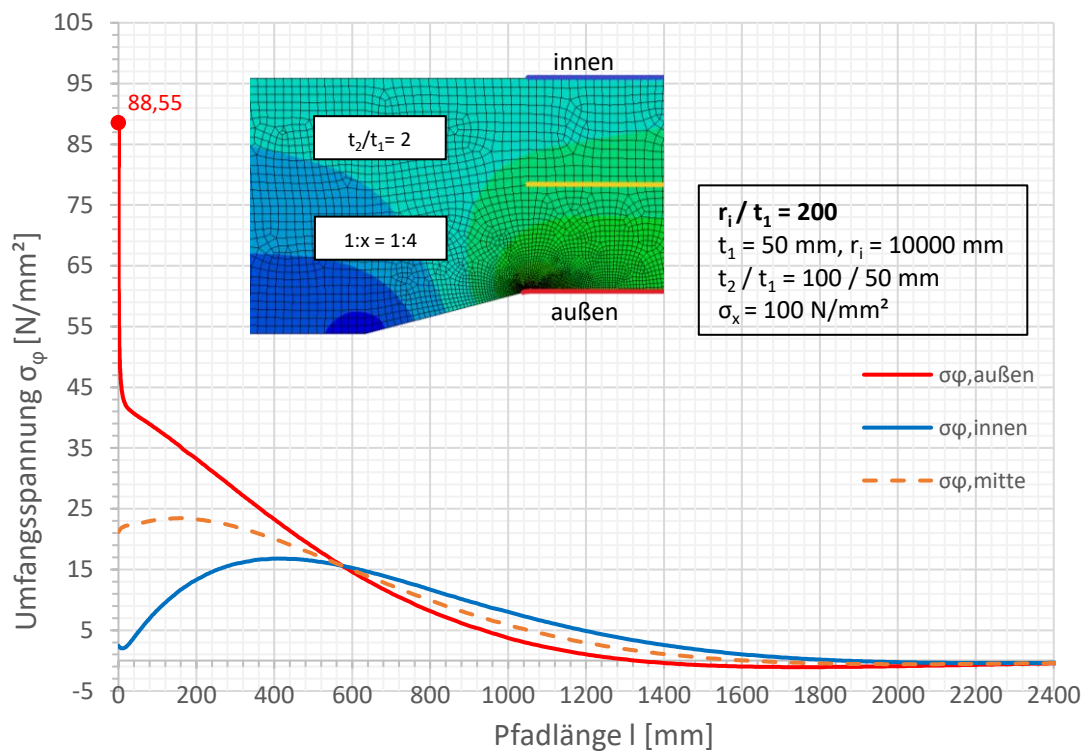
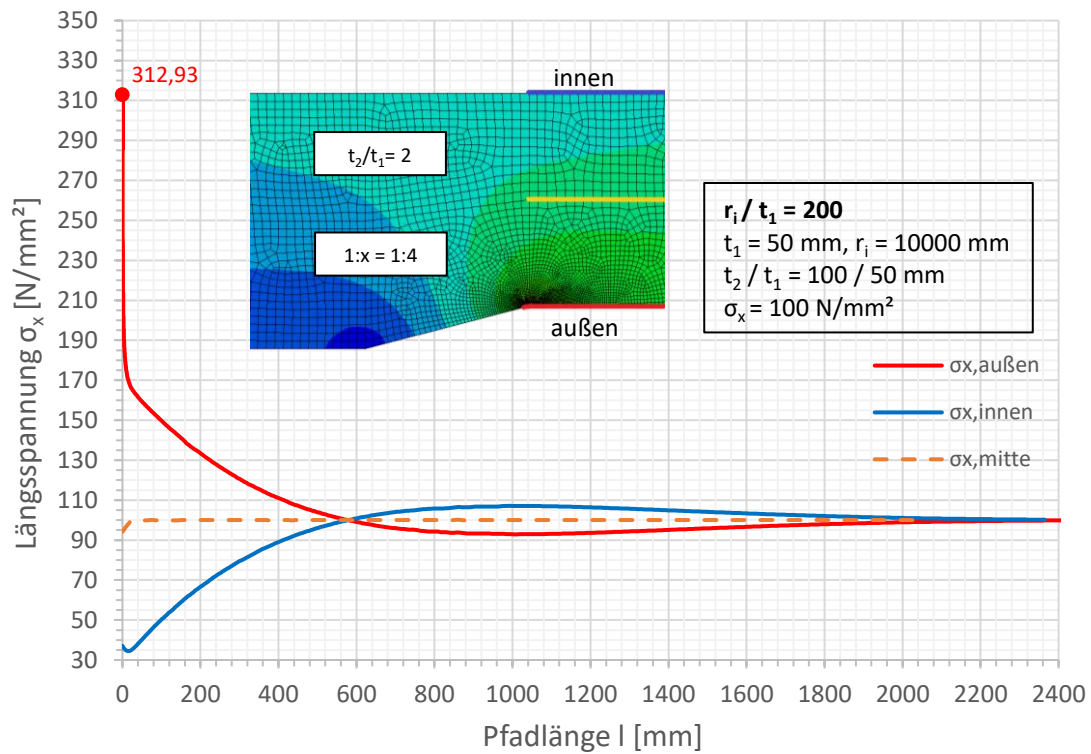


Spannungen an der Außenseite

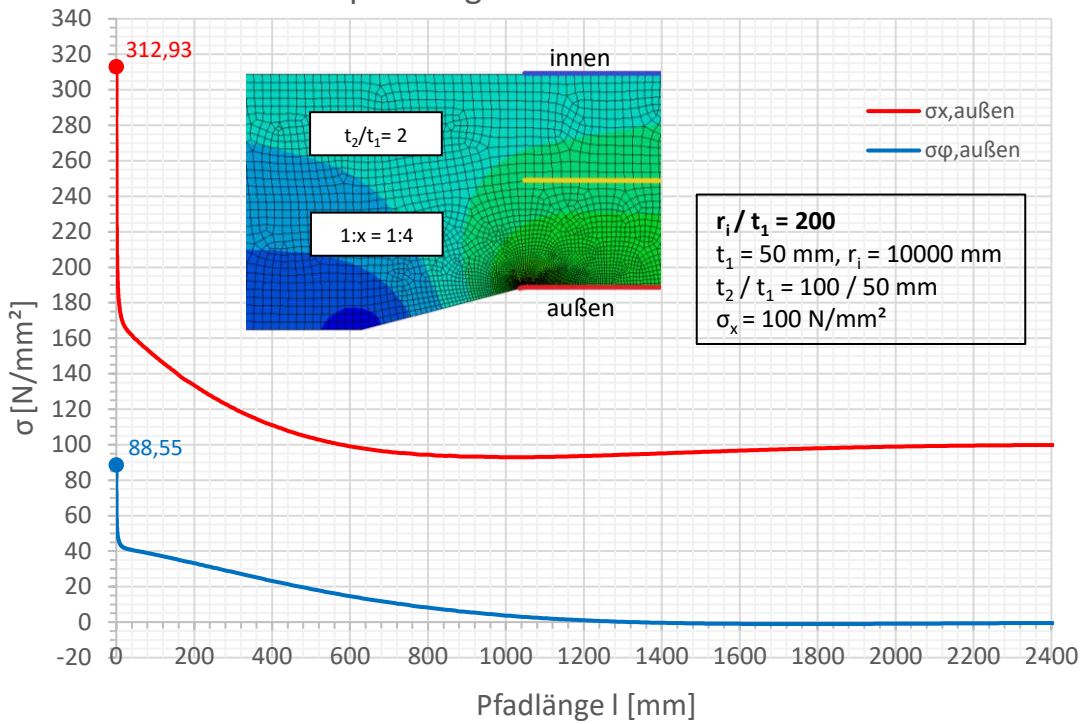


Spannungen an der Außenseite

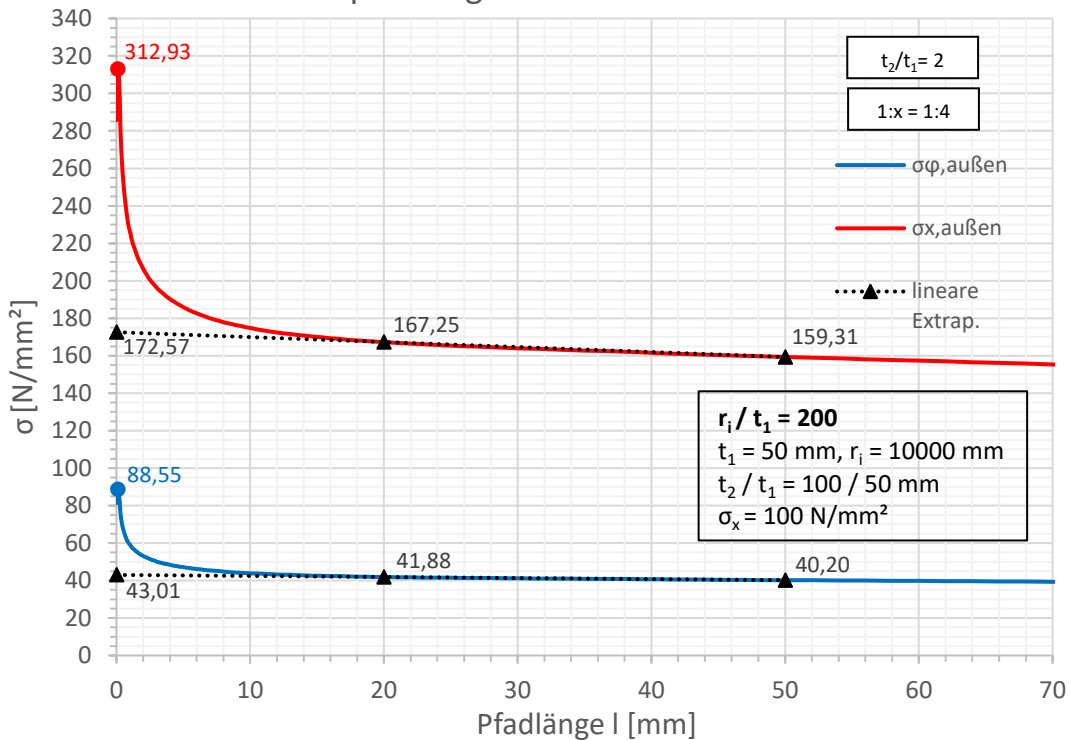


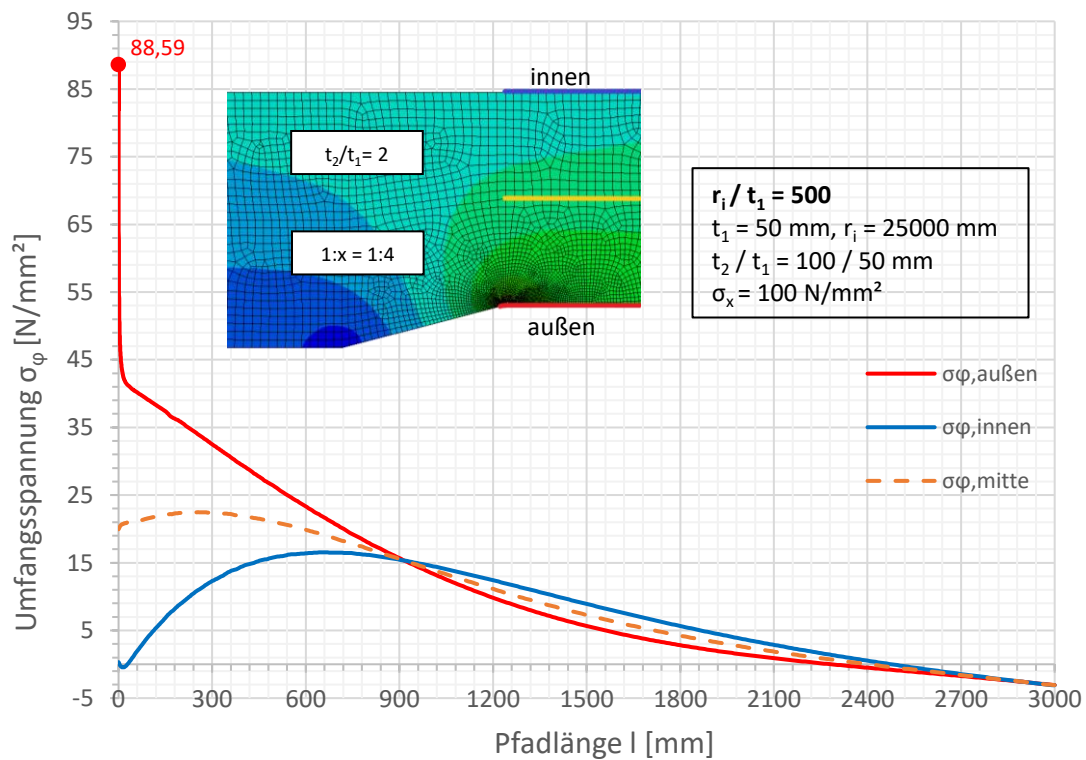
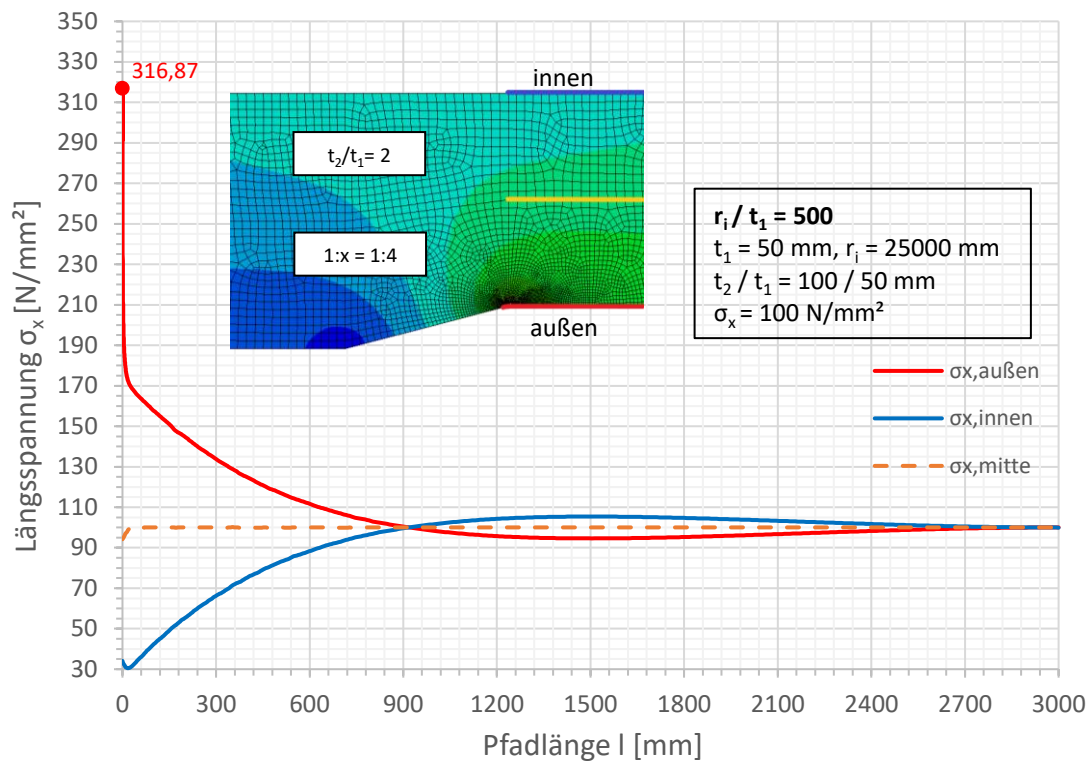


Spannungen an der Außenseite

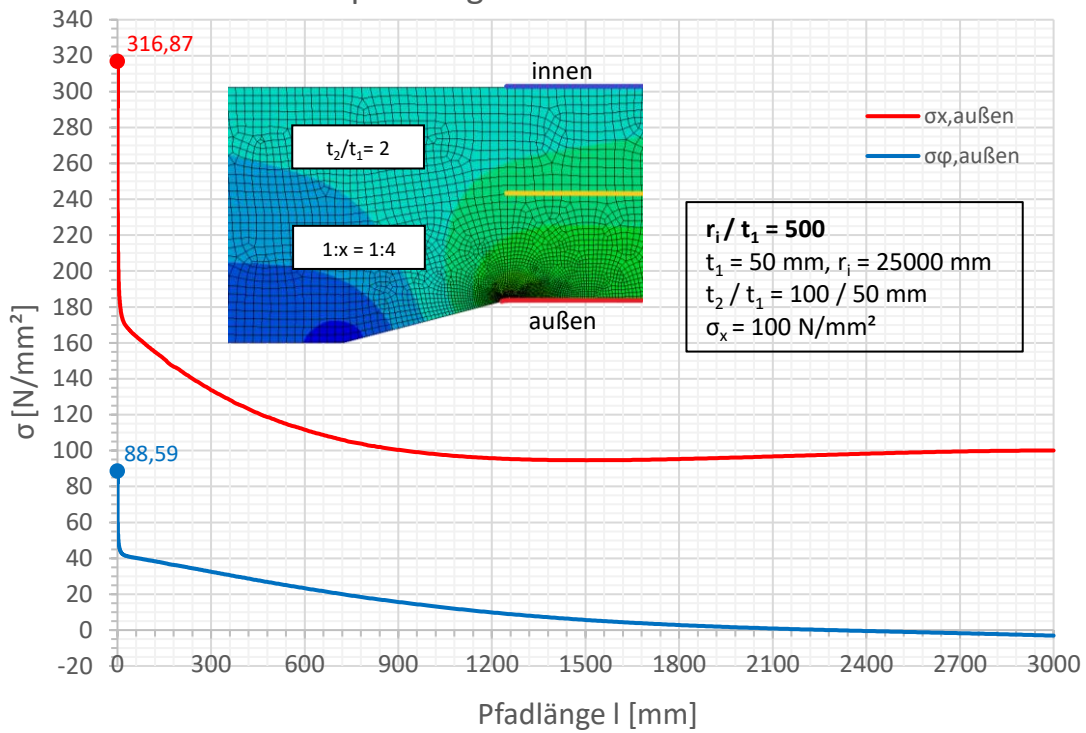


Spannungen an der Außenseite

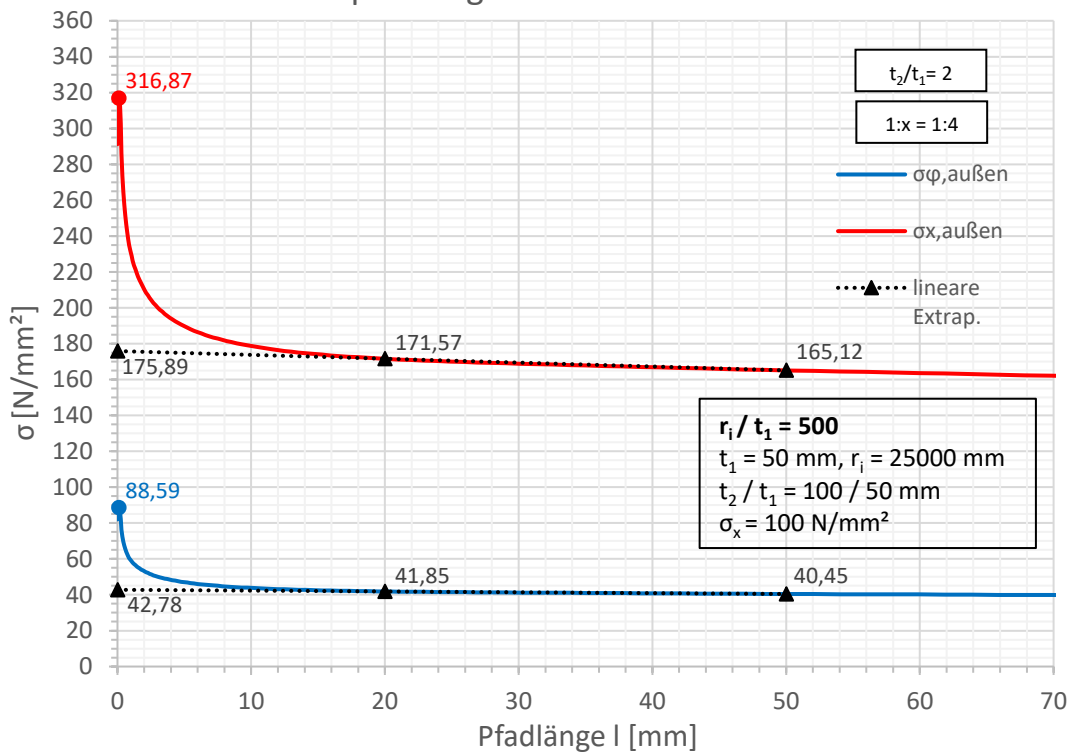


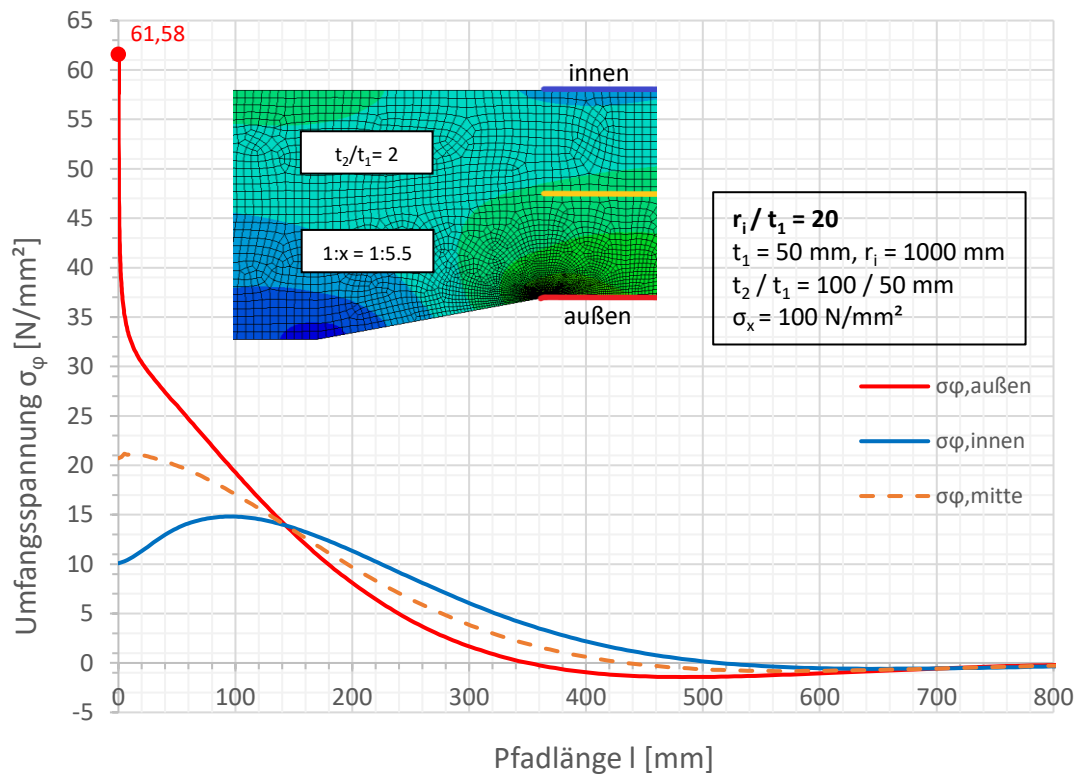
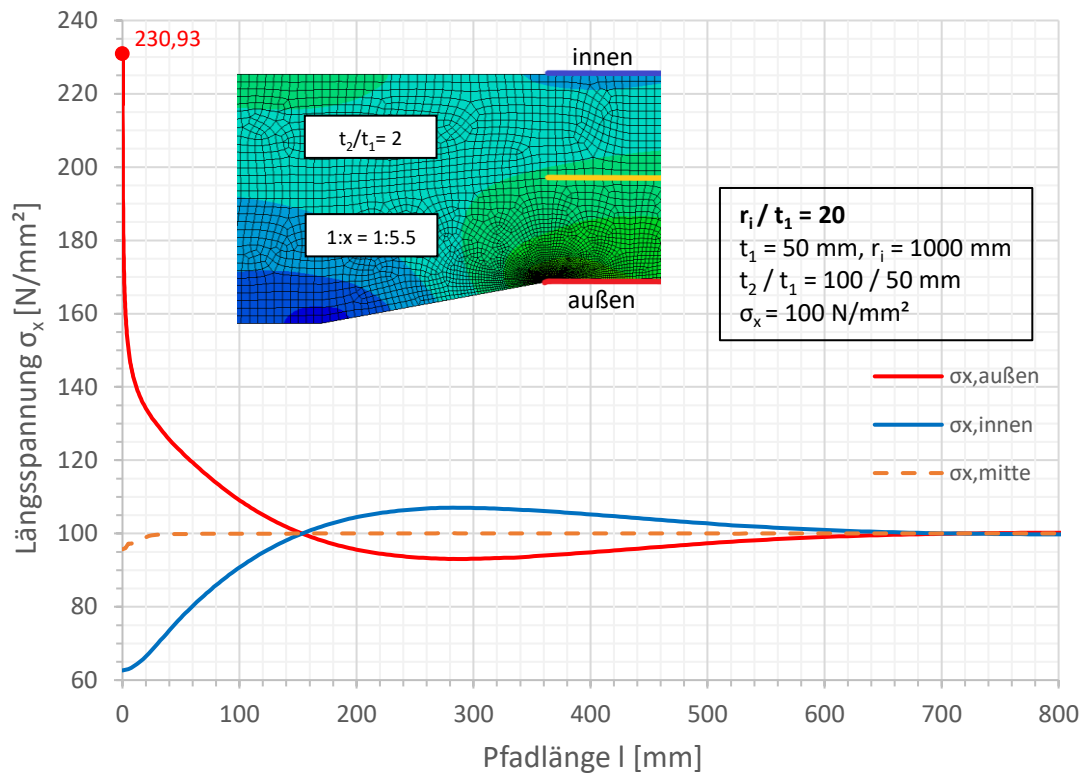


Spannungen an der Außenseite

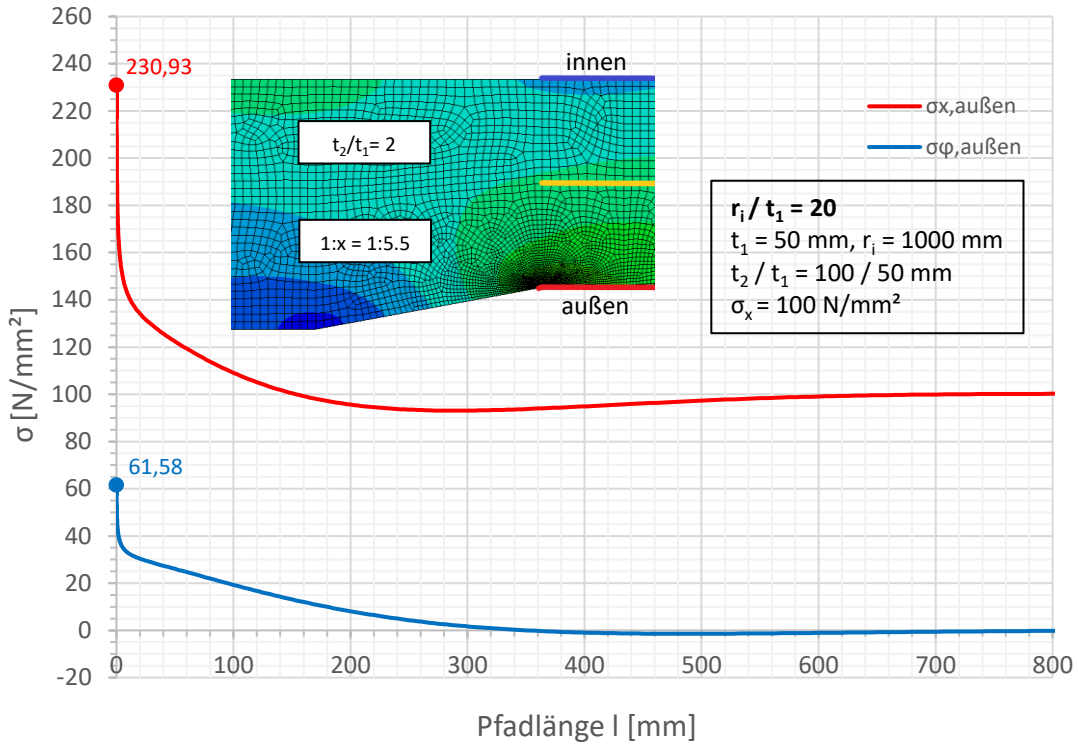


Spannungen an der Außenseite

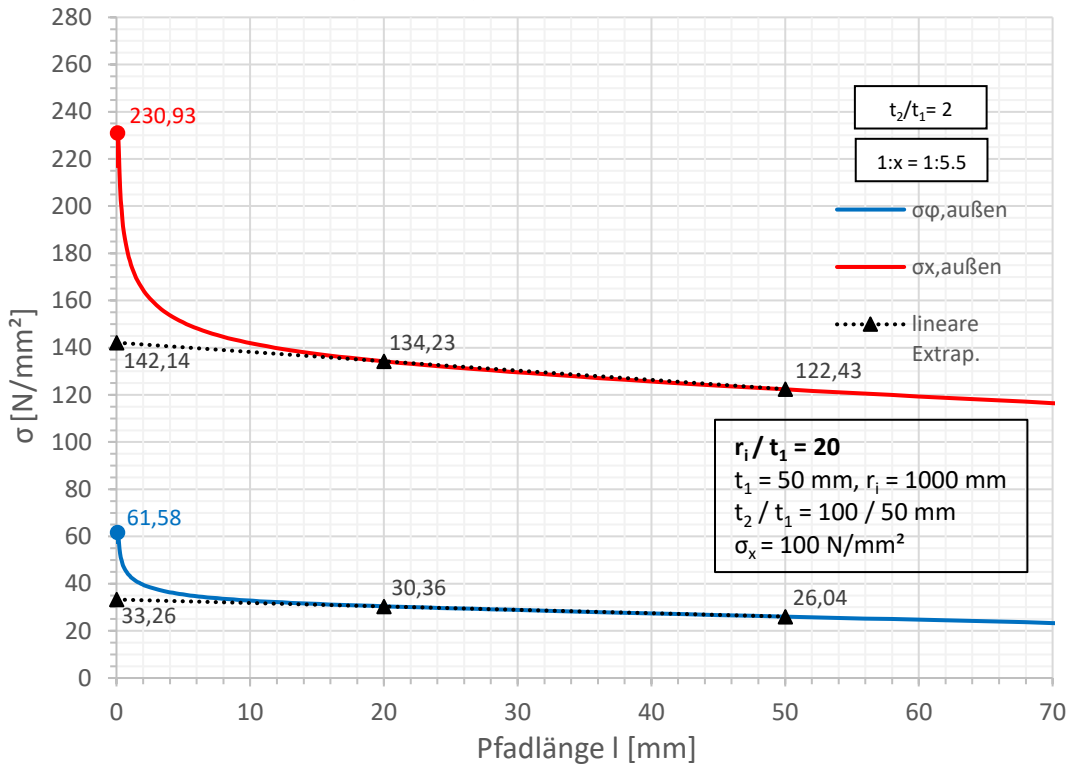


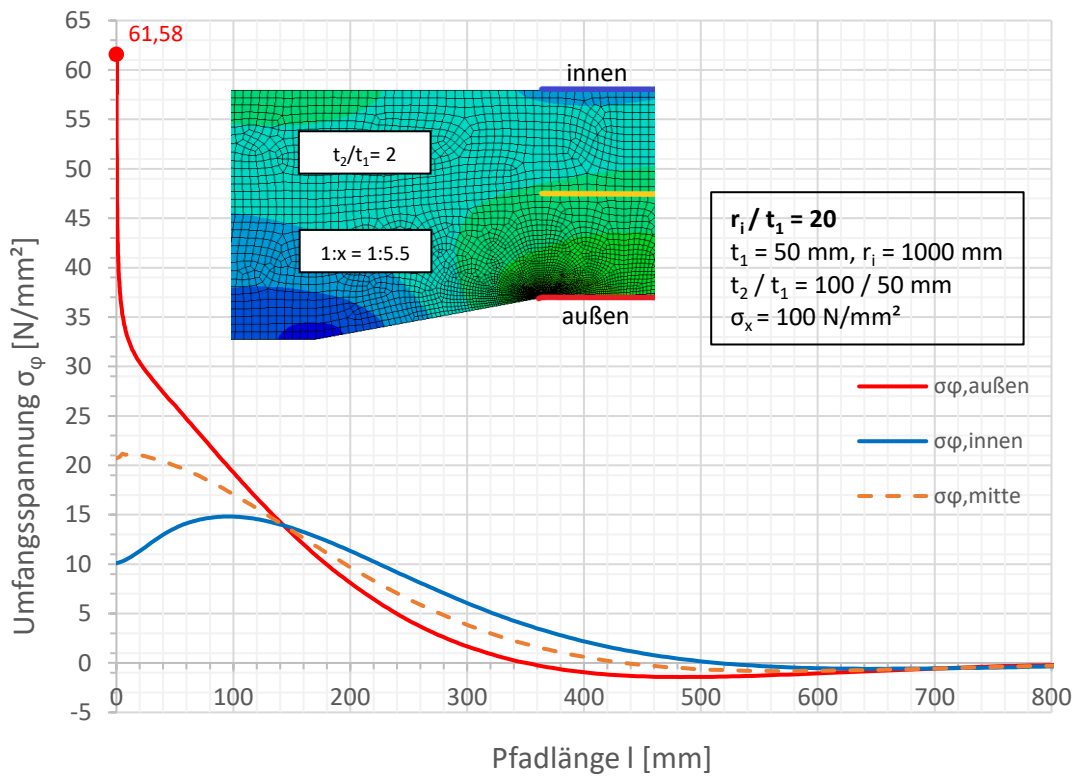
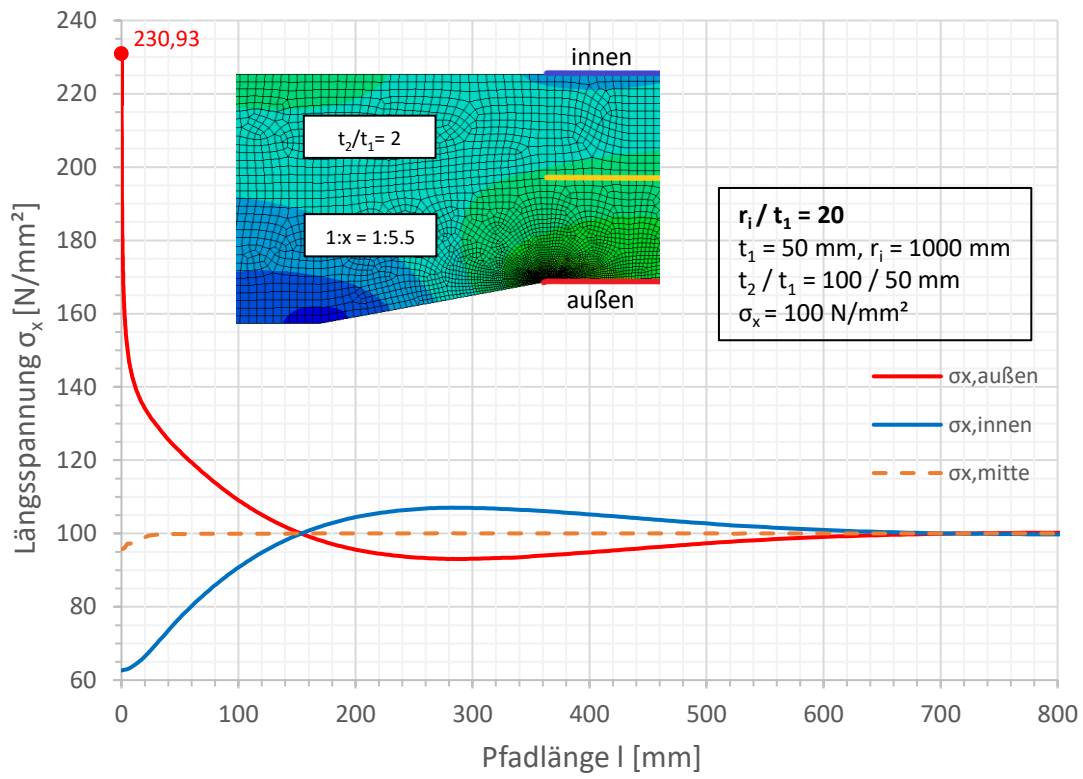


Spannungen an der Außenseite

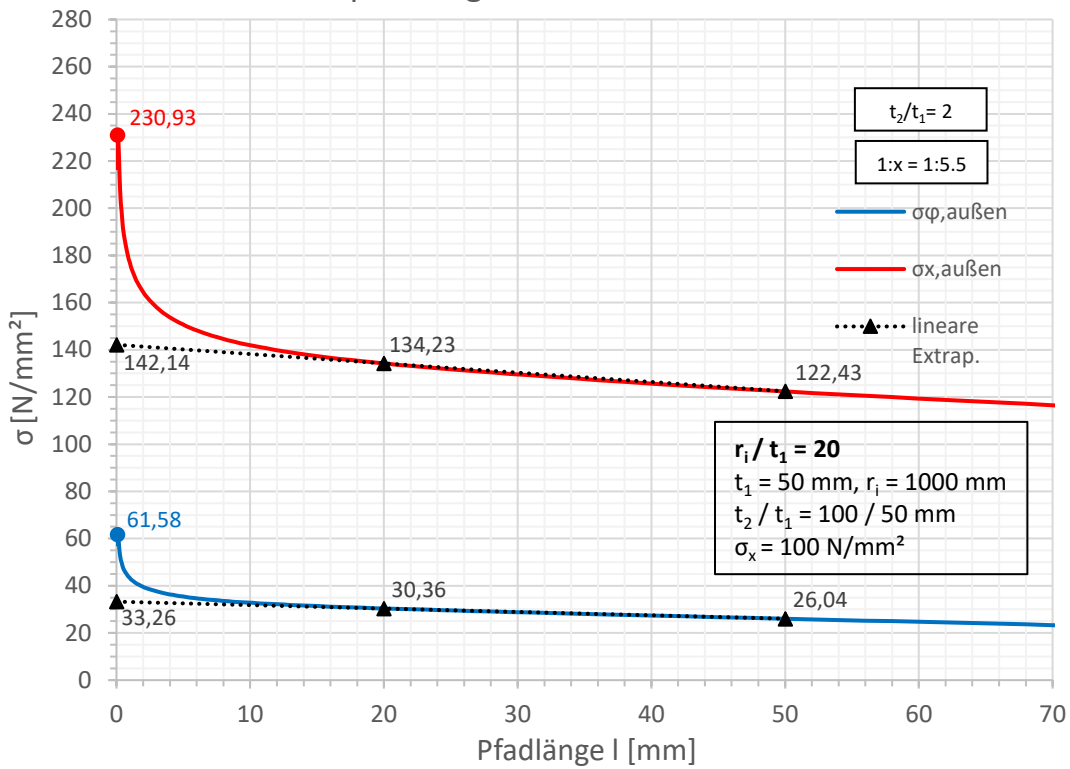


Spannungen an der Außenseite

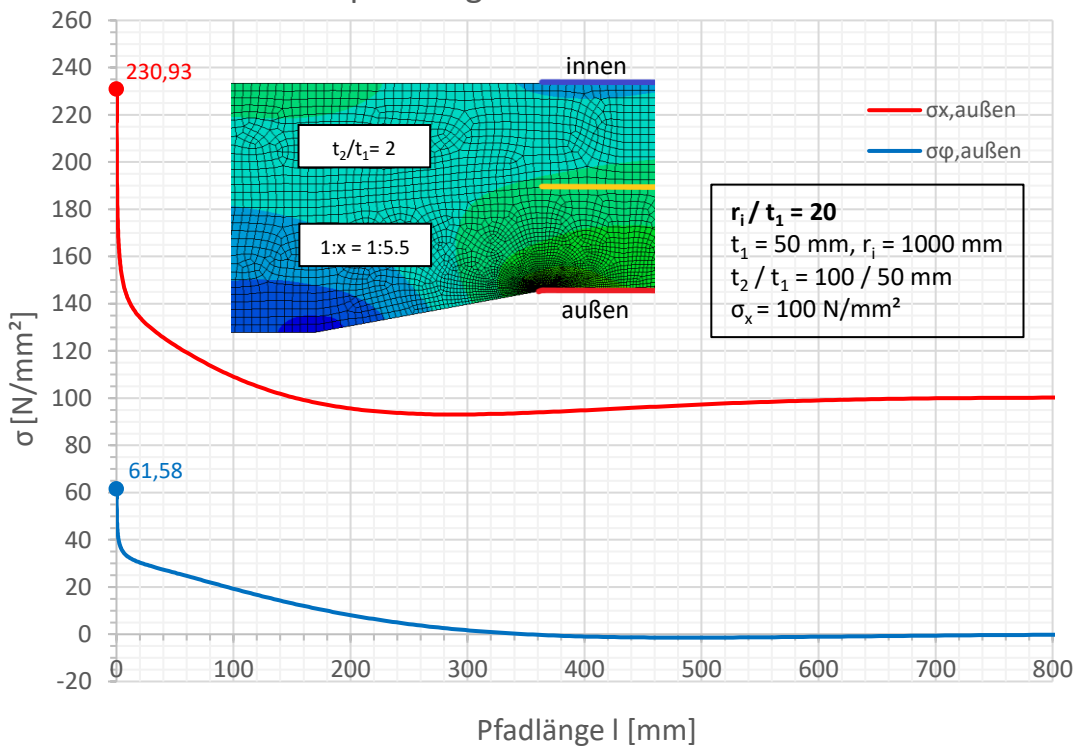


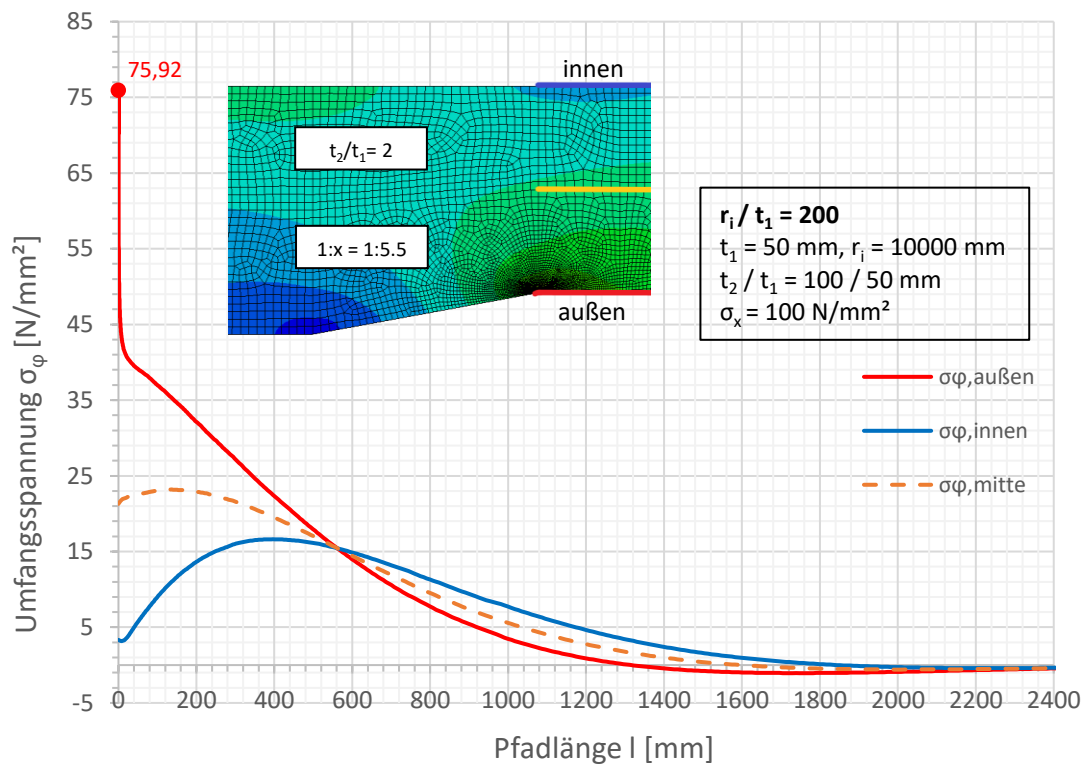
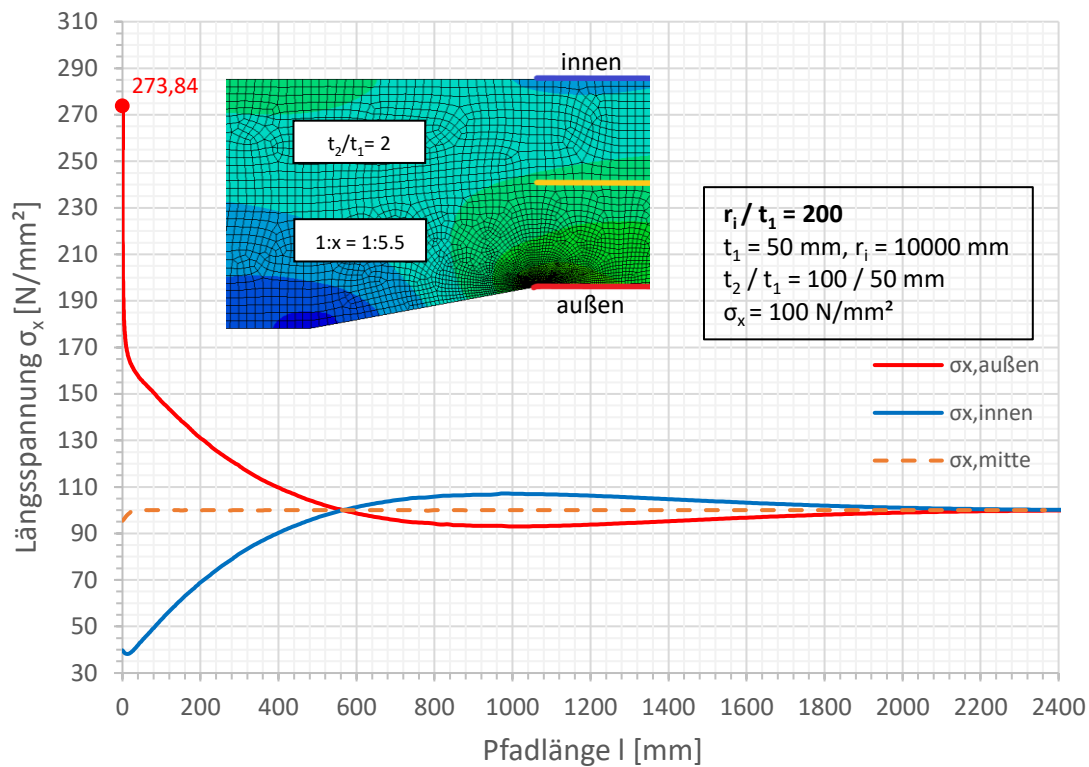


Spannungen an der Außenseite

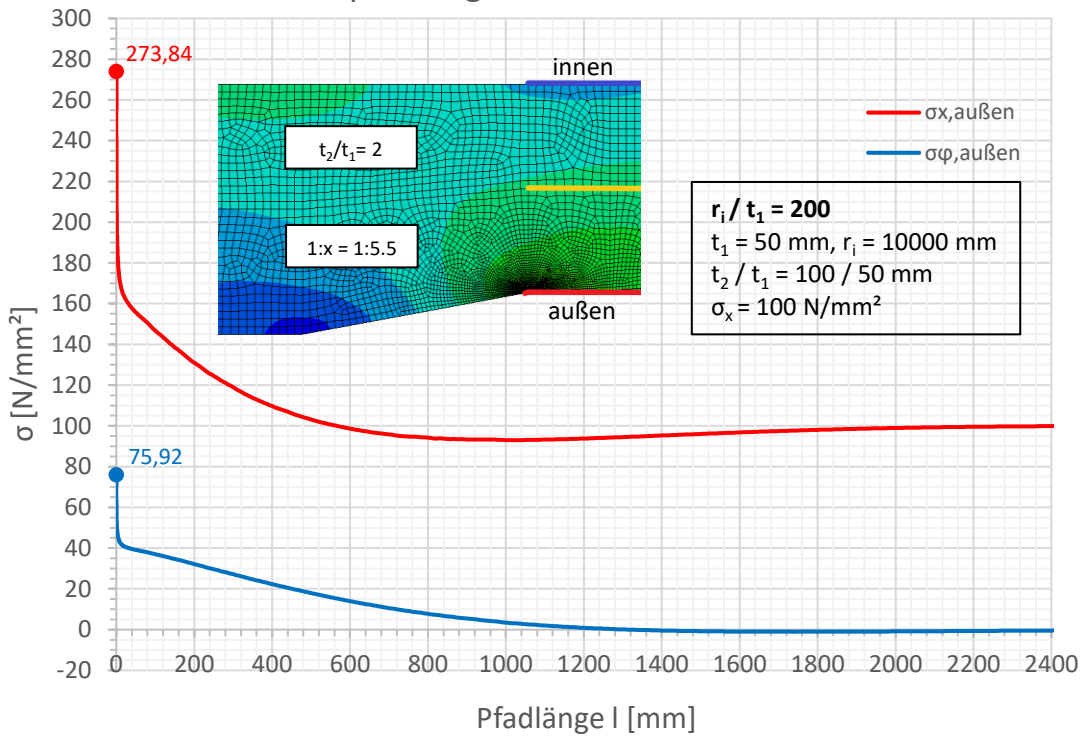


Spannungen an der Außenseite

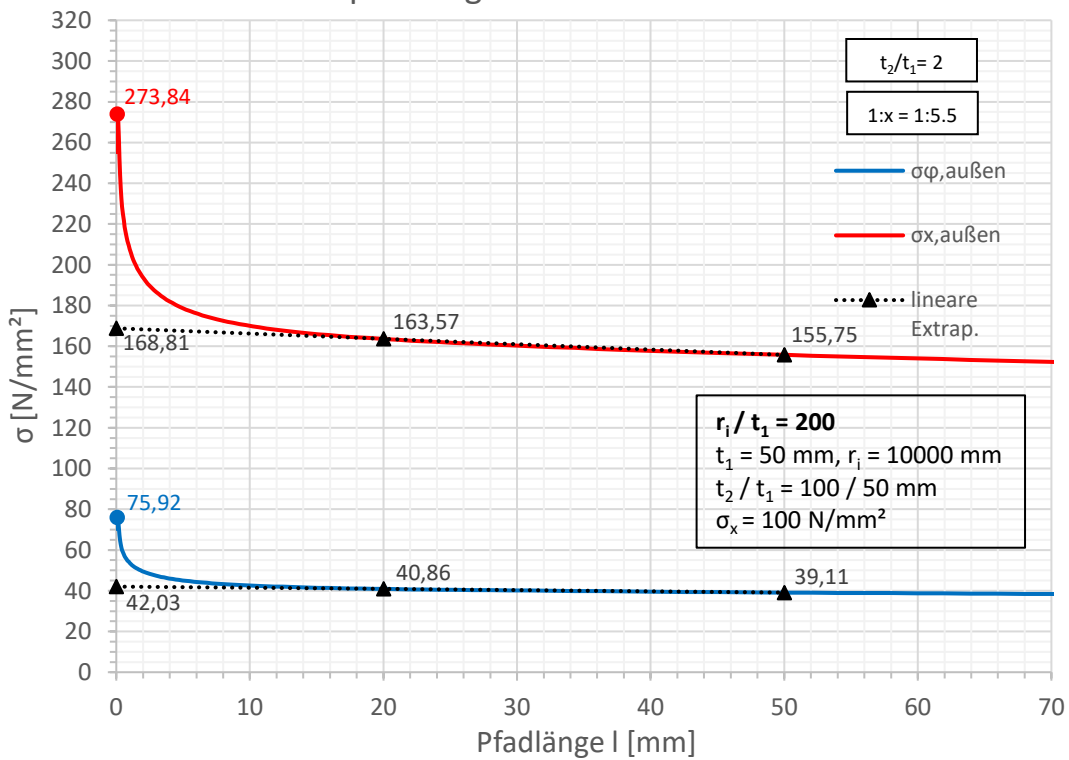


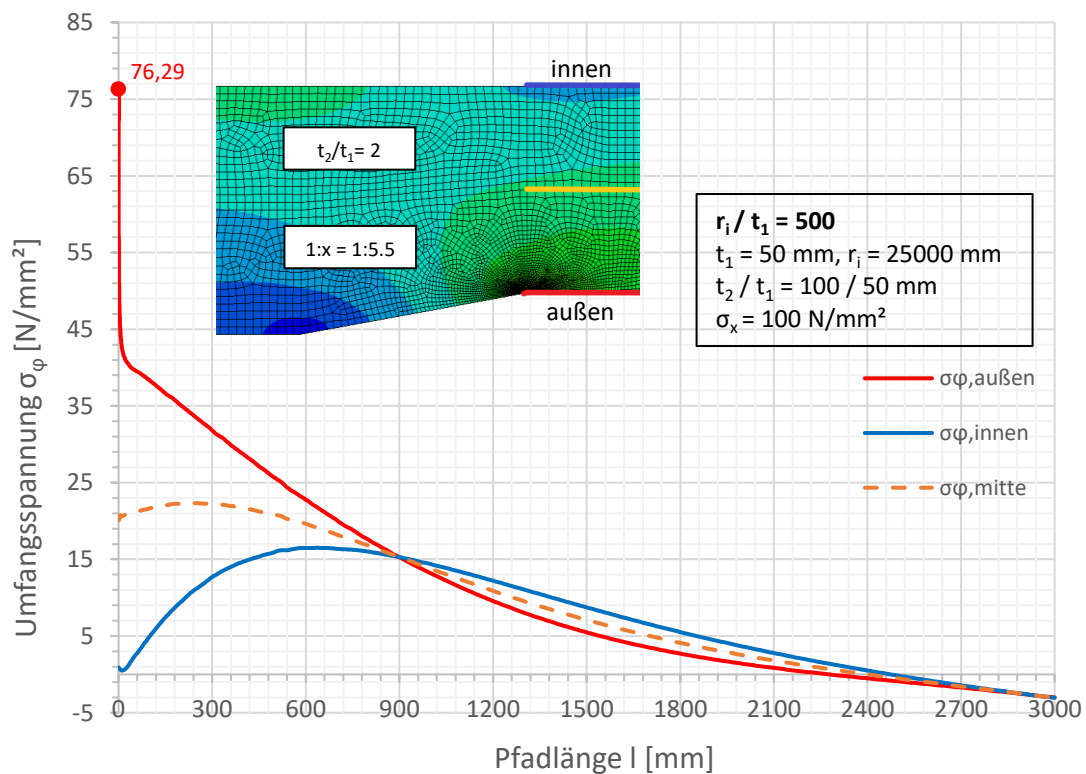
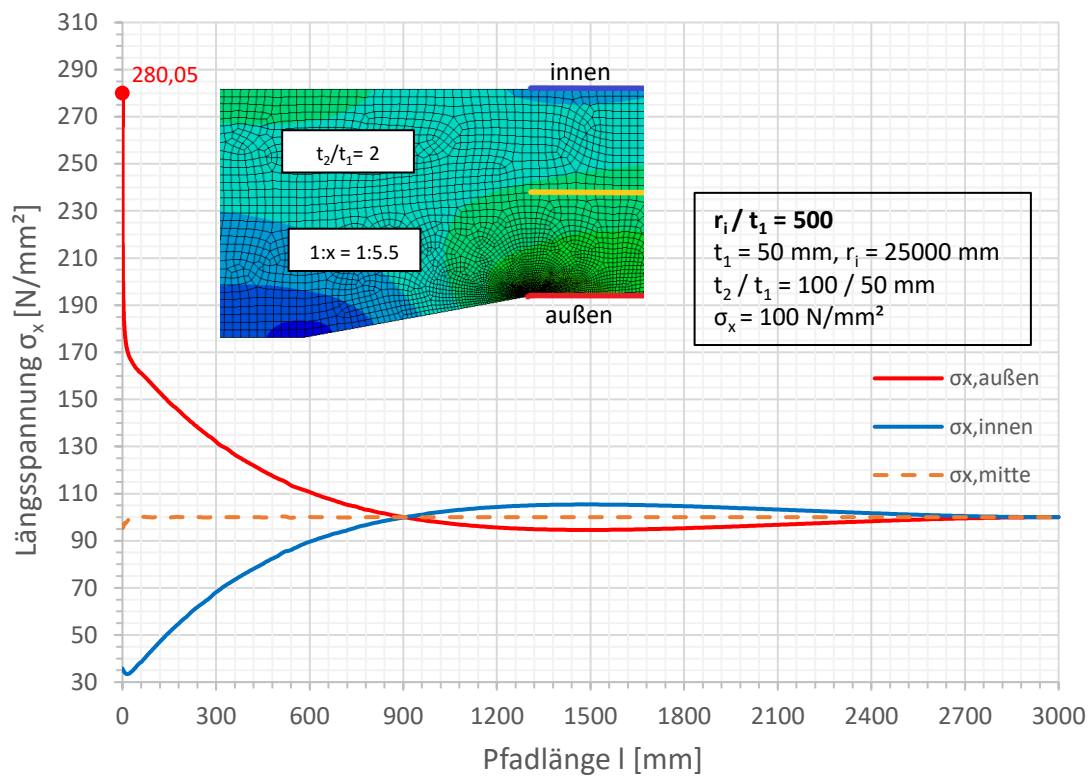


Spannungen an der Außenseite

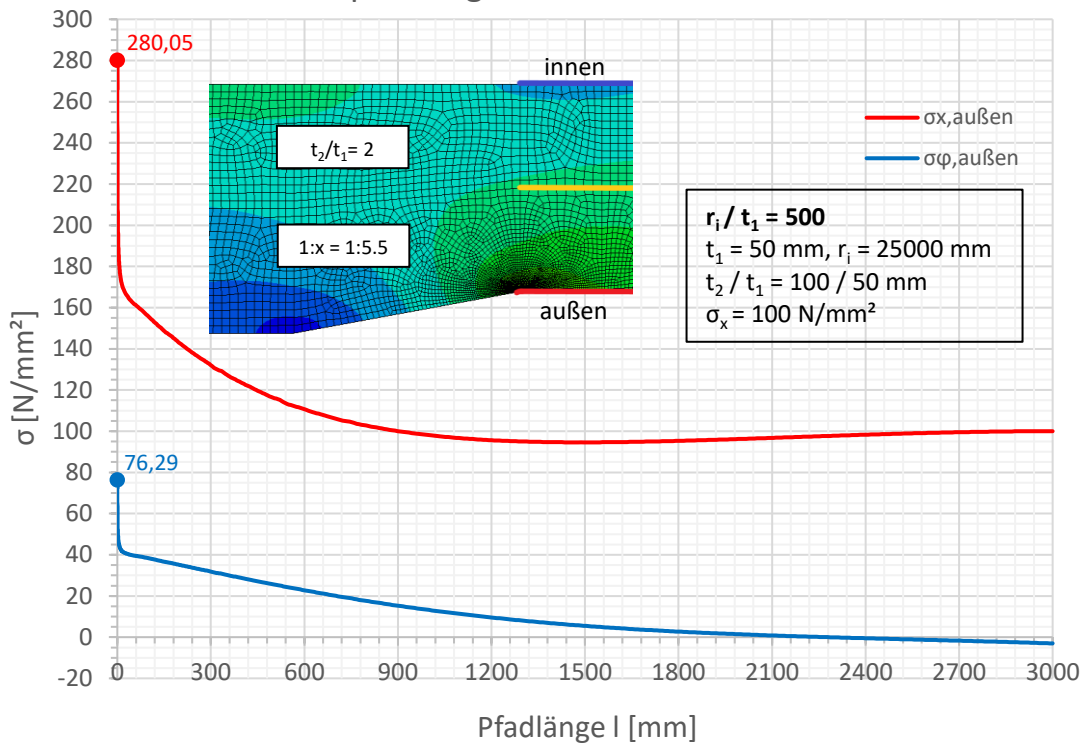


Spannungen an der Außenseite

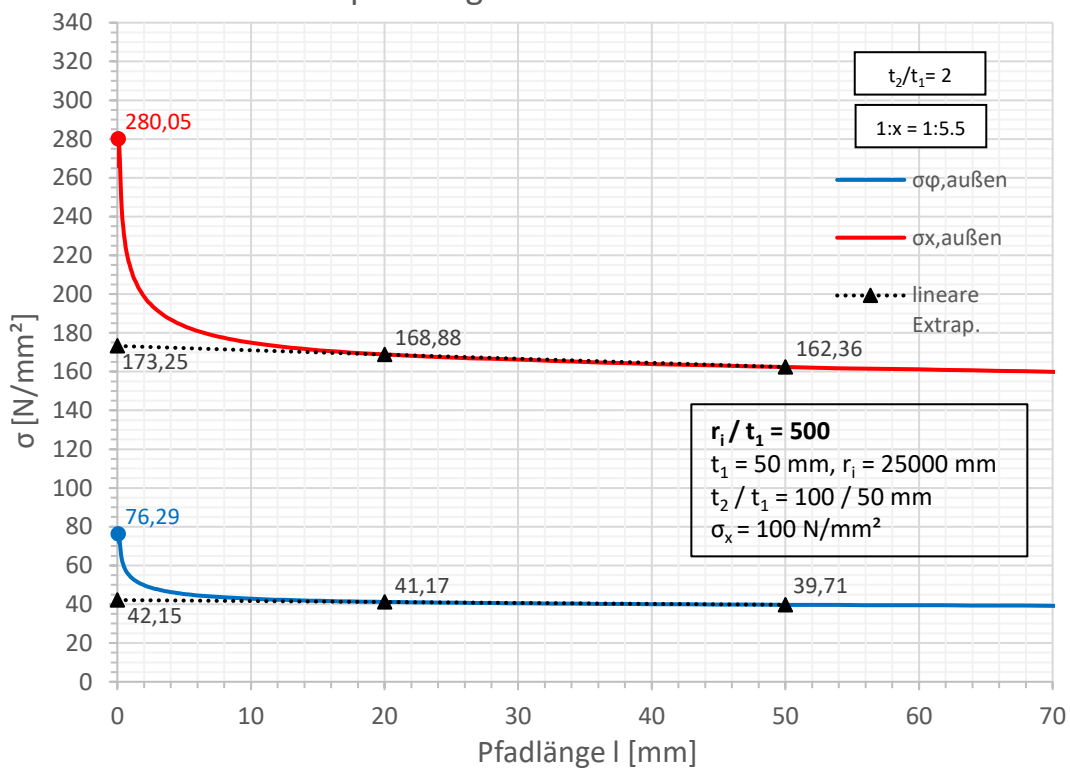


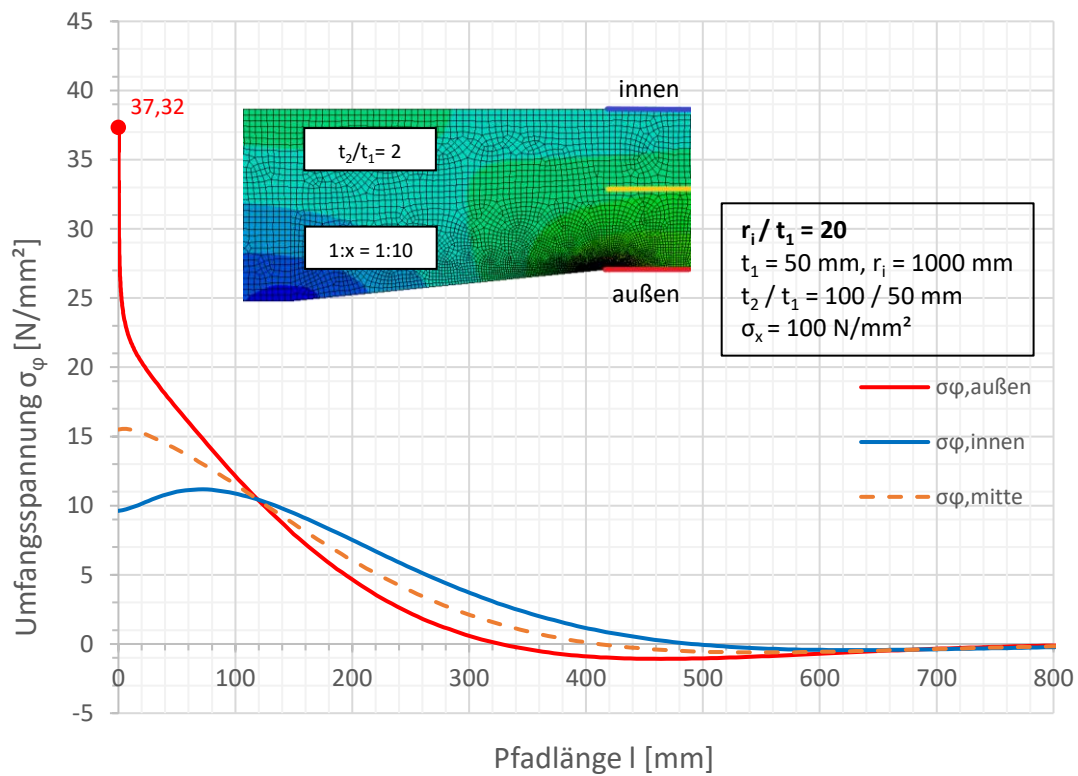
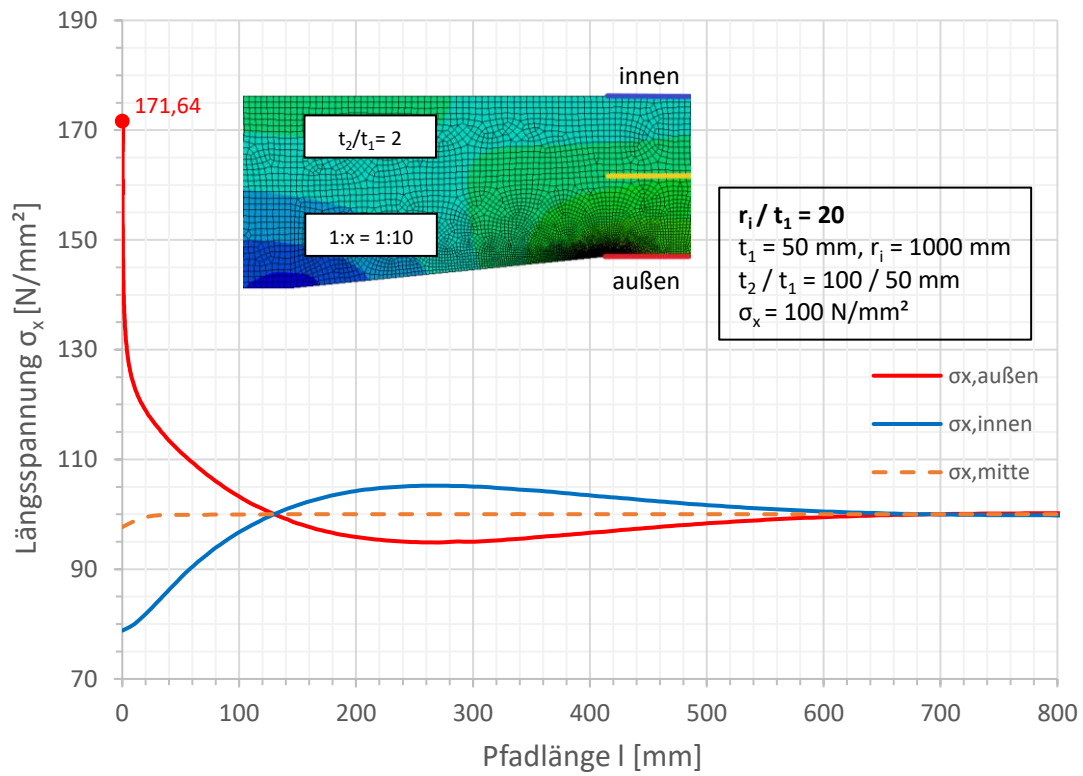


Spannungen an der Außenseite

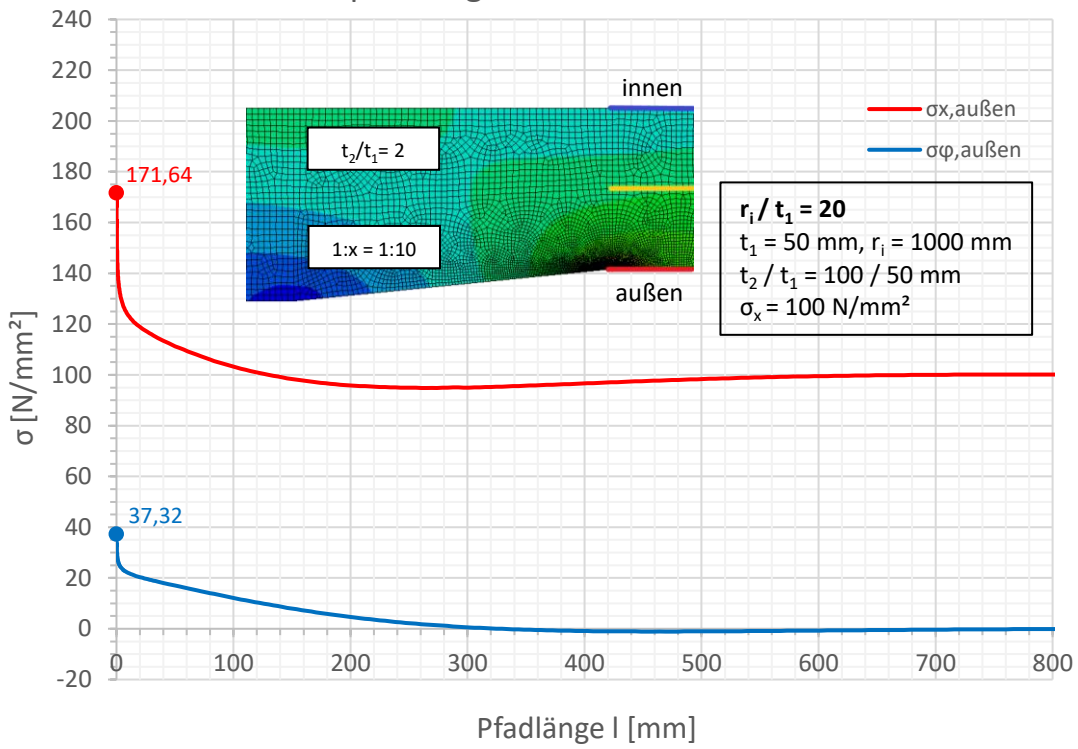


Spannungen an der Außenseite

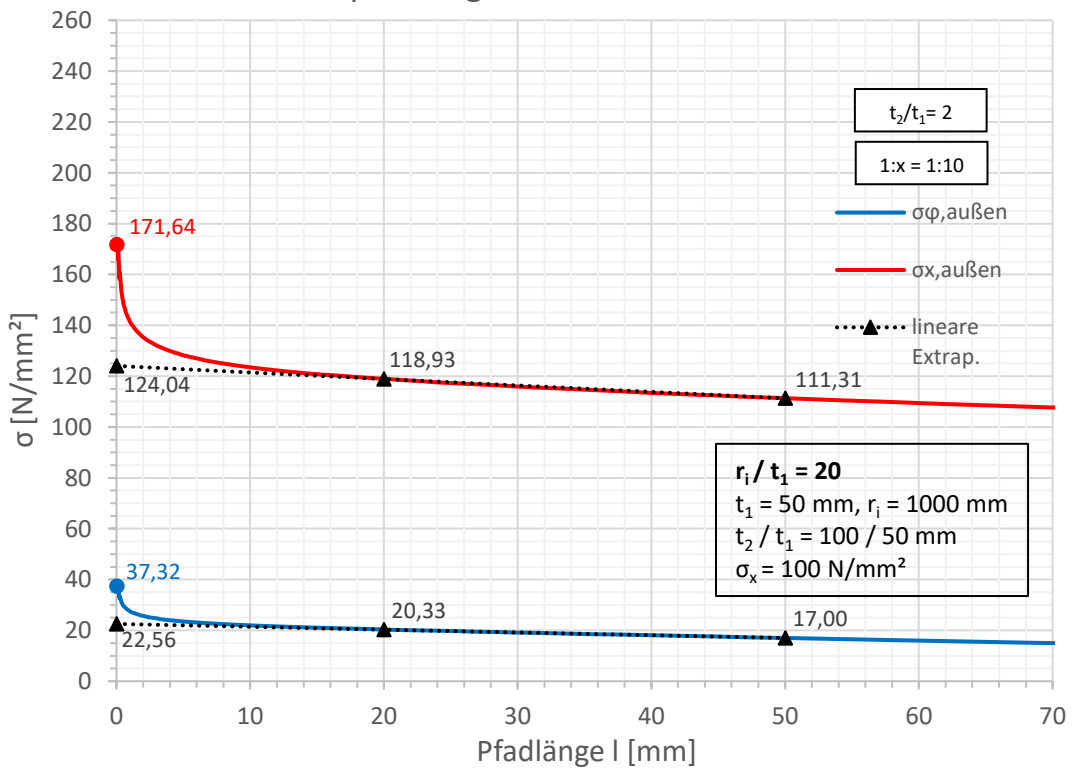


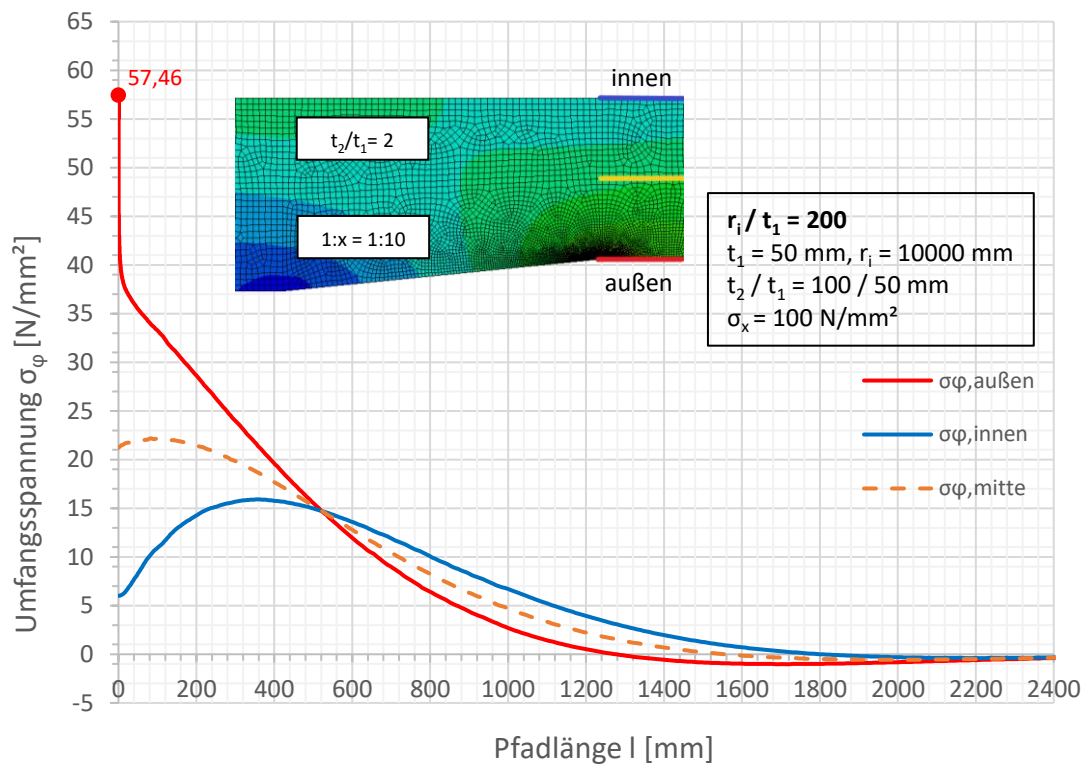
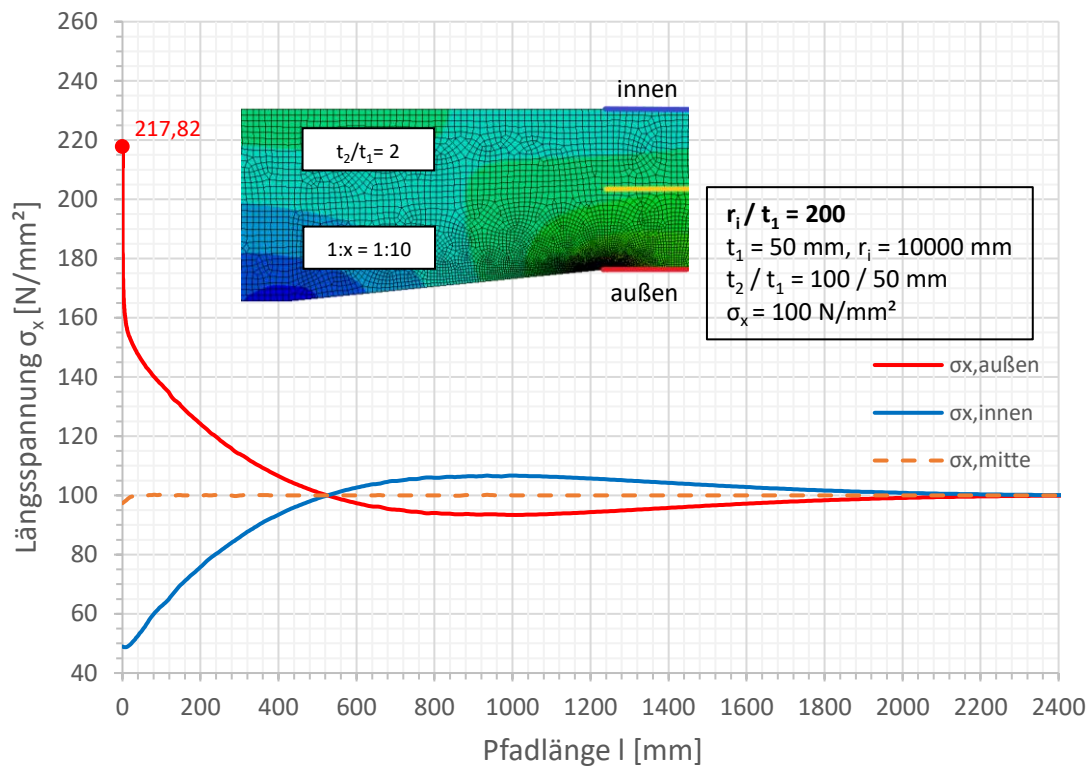


Spannungen an der Außenseite

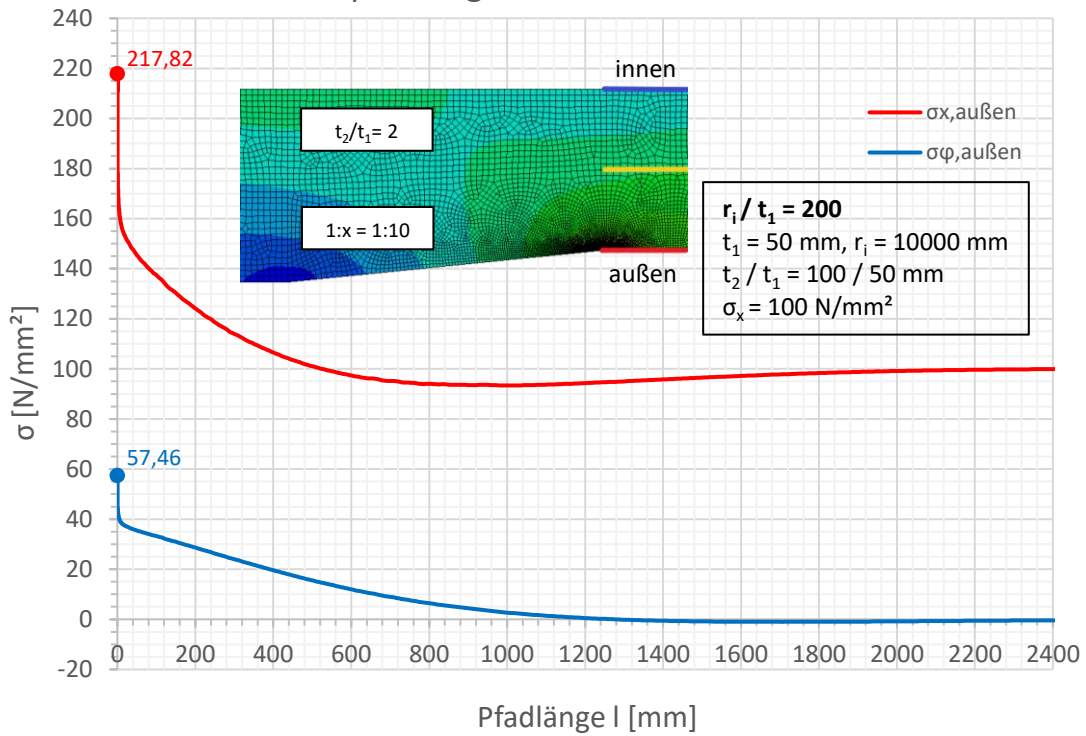


Spannungen an der Außenseite

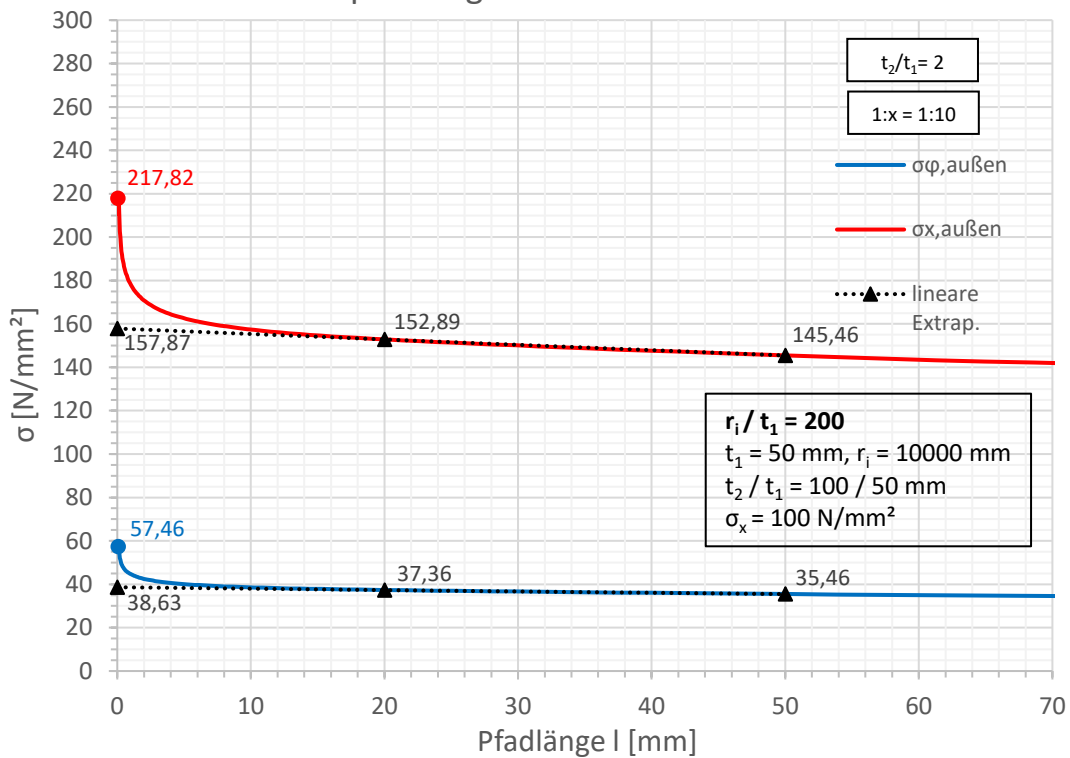


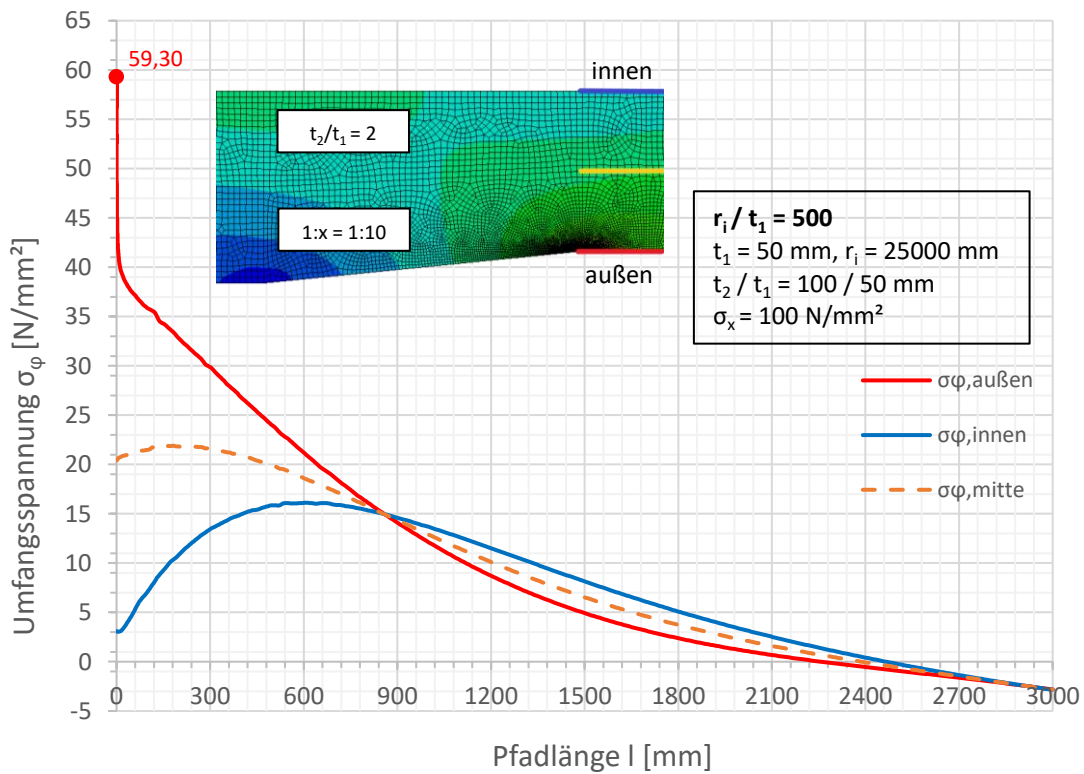
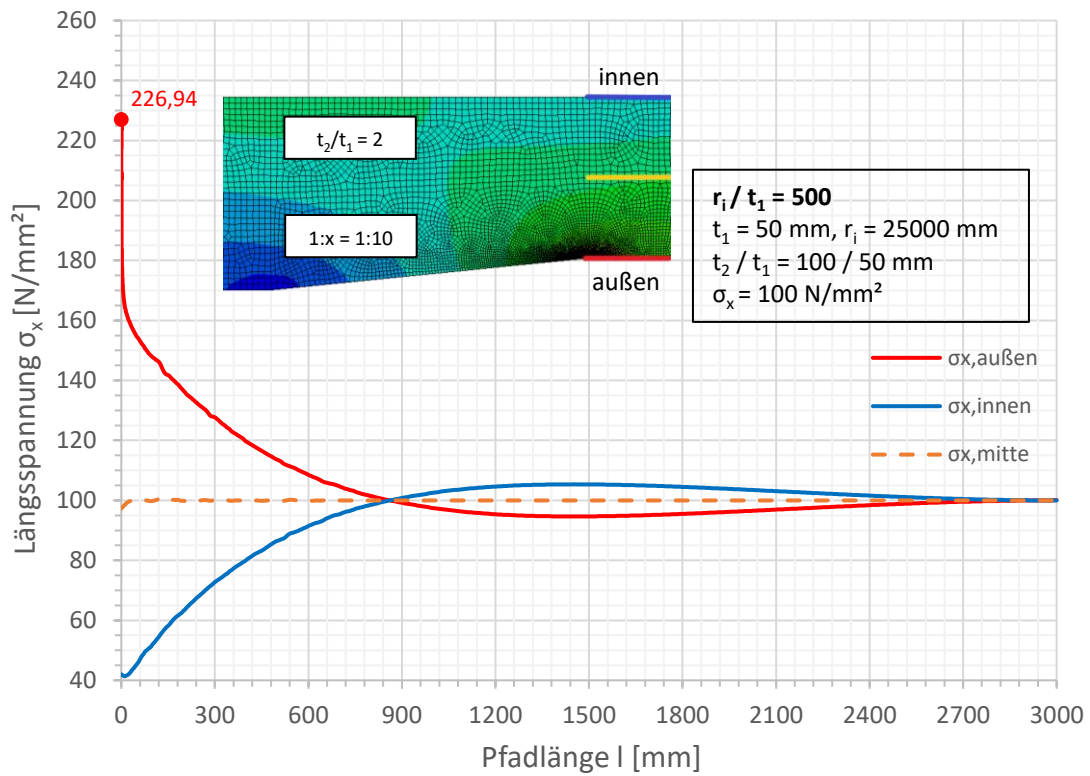


Spannungen an der Außenseite

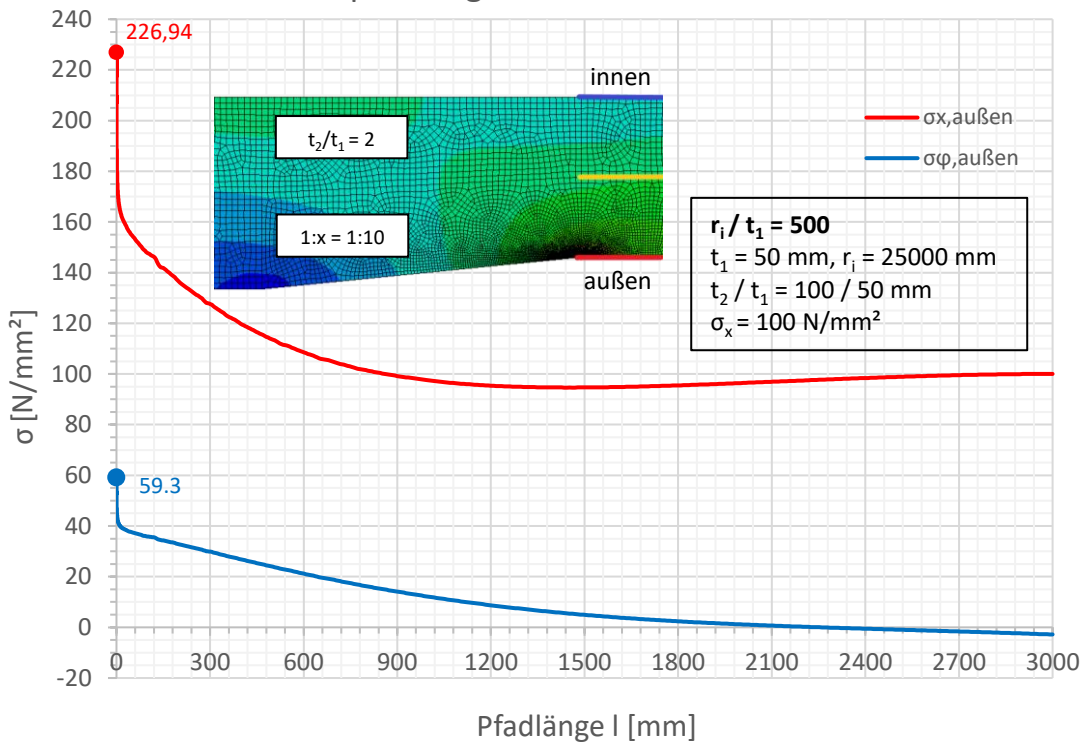


Spannungen an der Außenseite

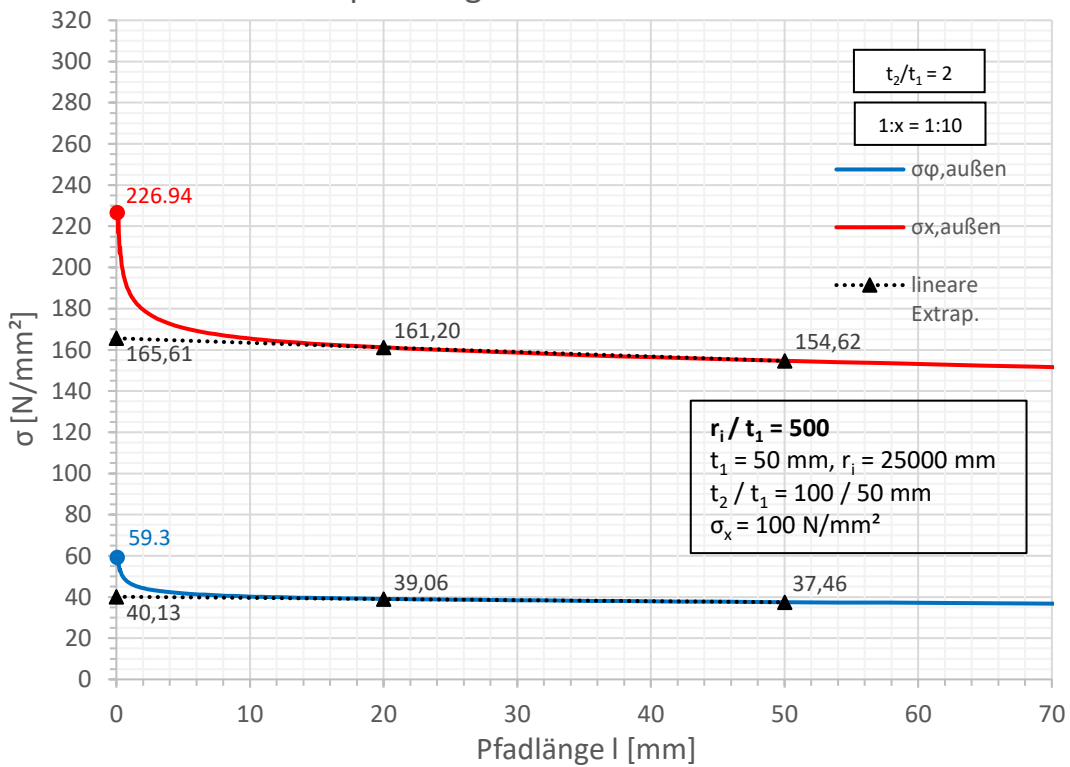




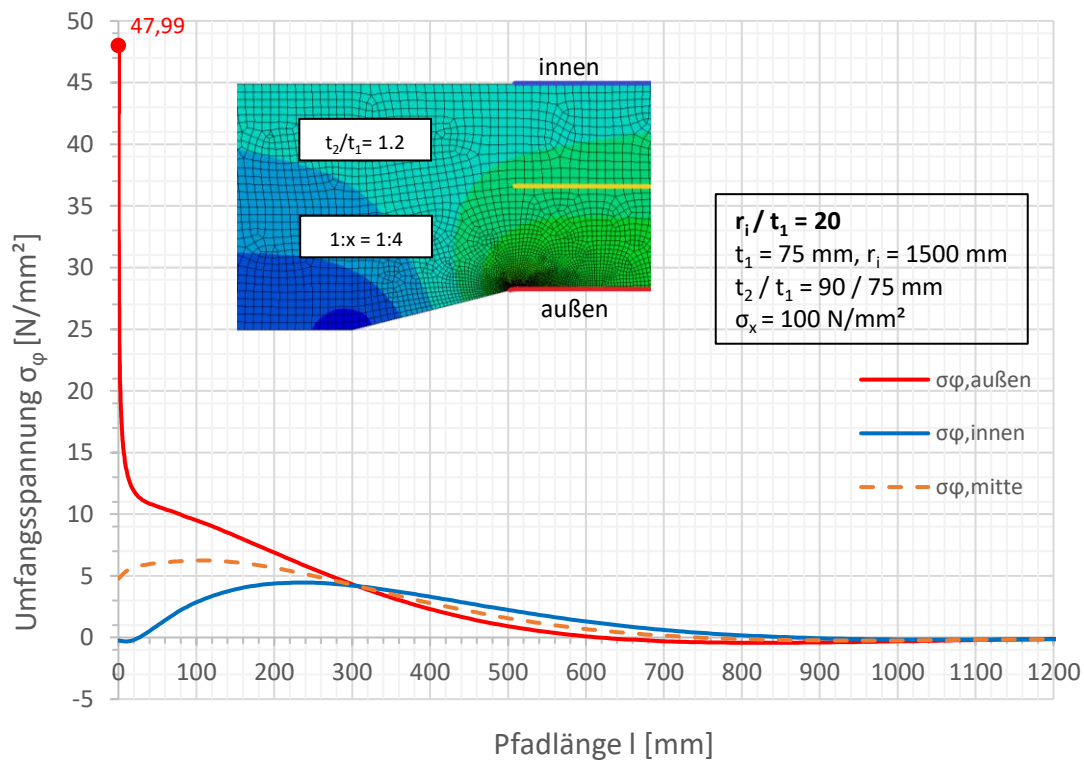
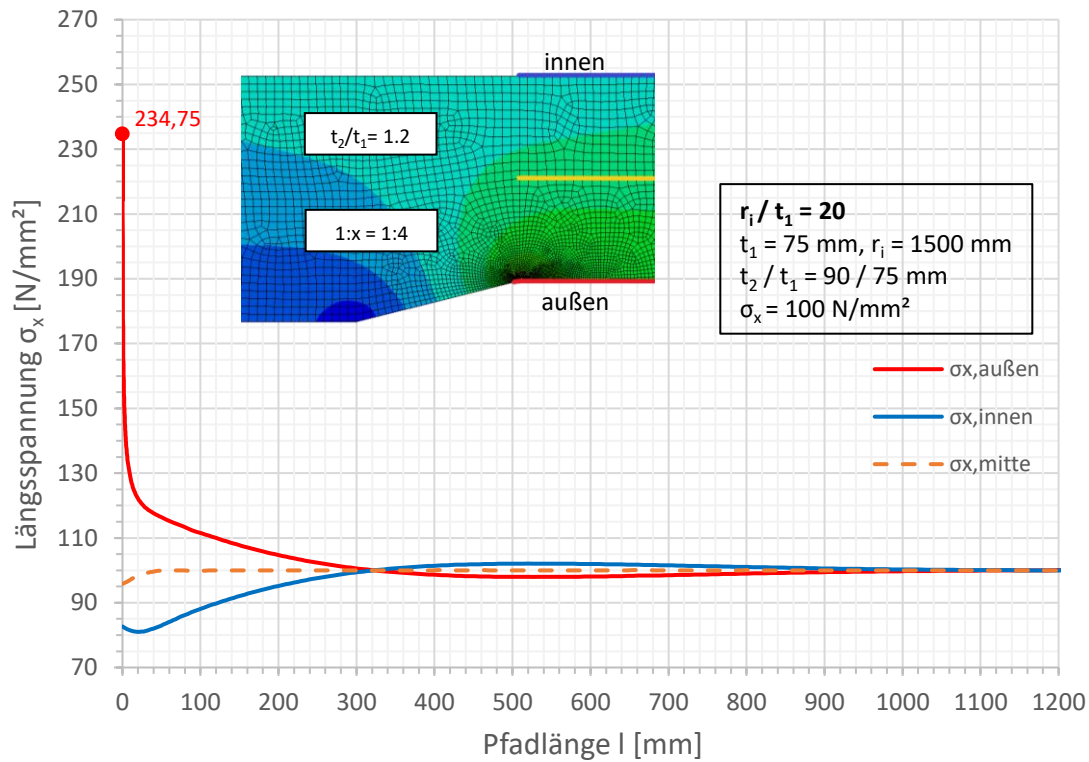
Spannungen an der Außenseite



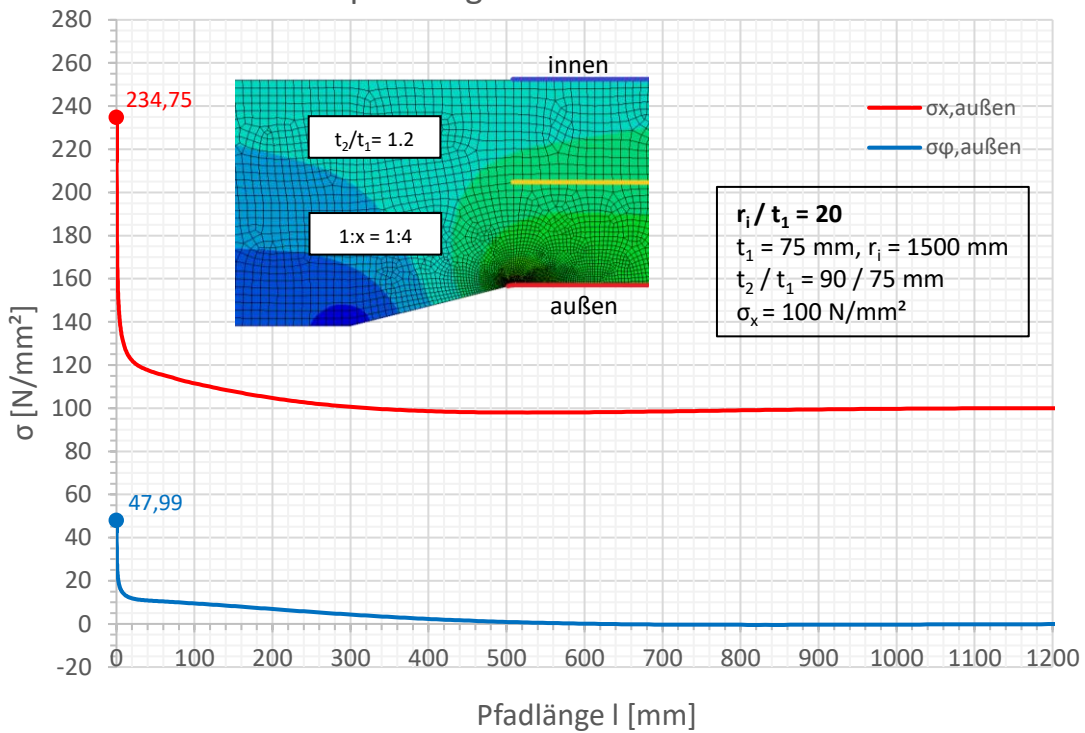
Spannungen an der Außenseite



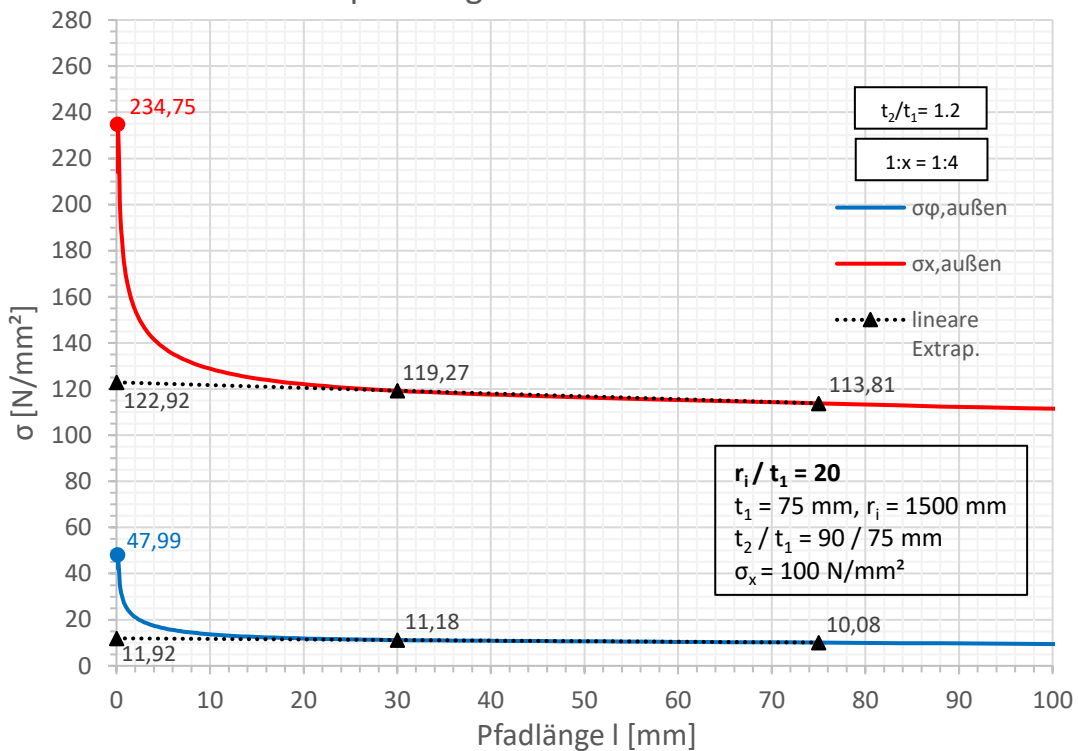
B.3. Wanddicke $t_1 = 75 \text{ mm}$

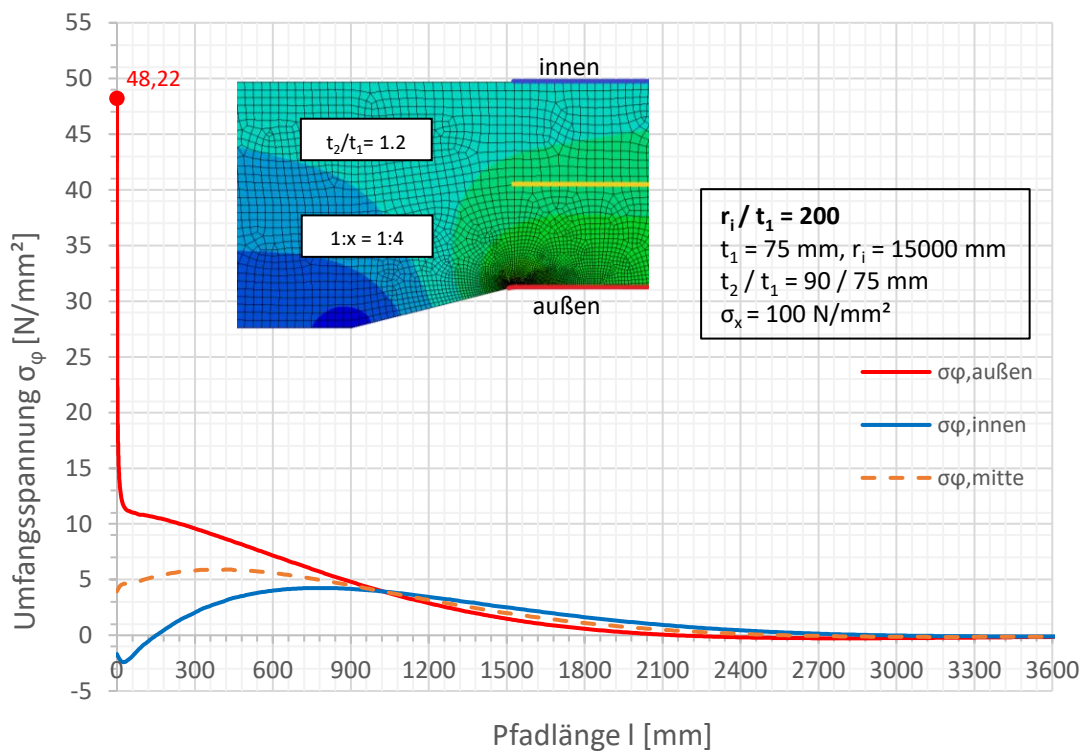
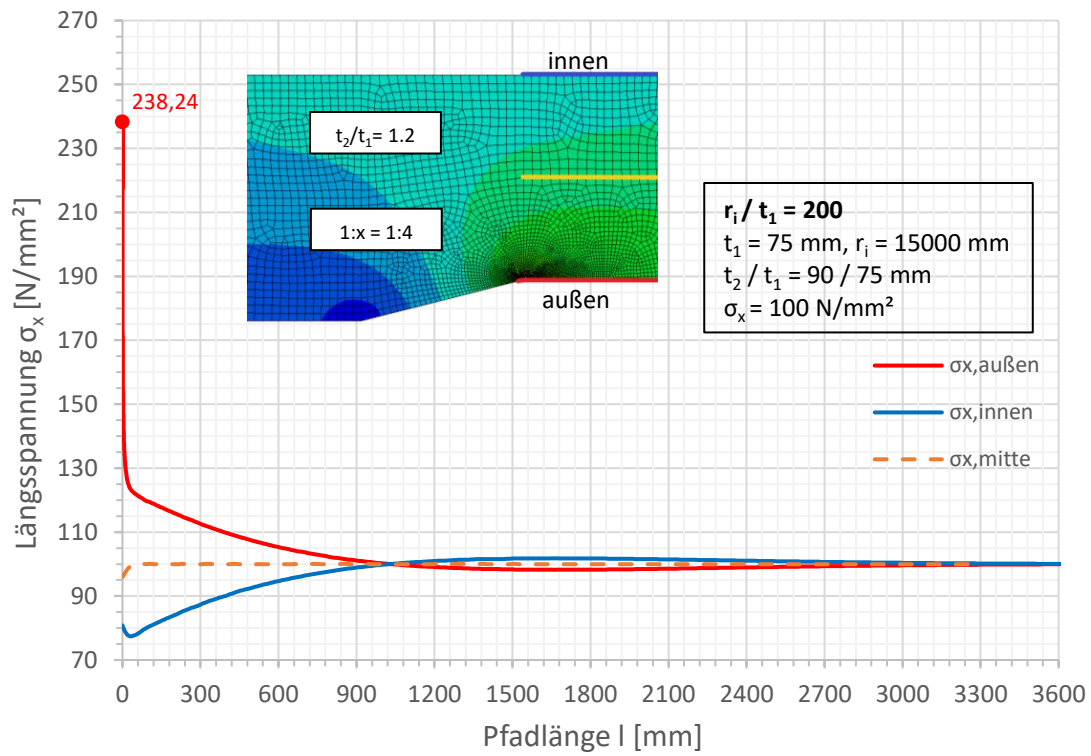


Spannungen an der Außenseite

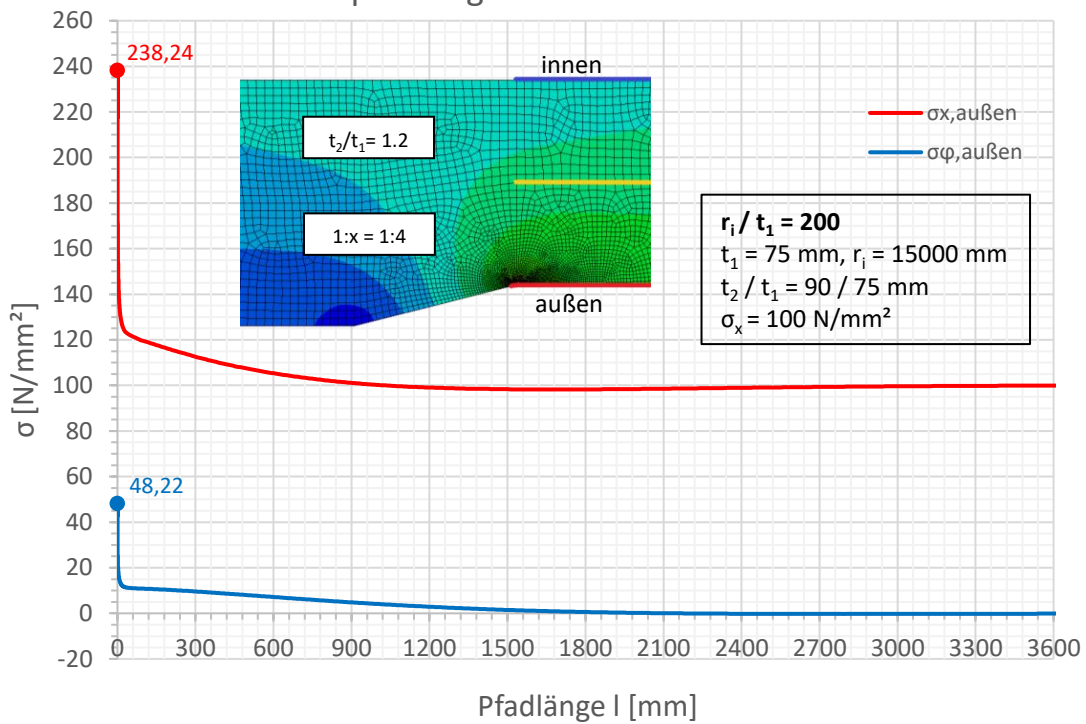


Spannungen an der Außenseite

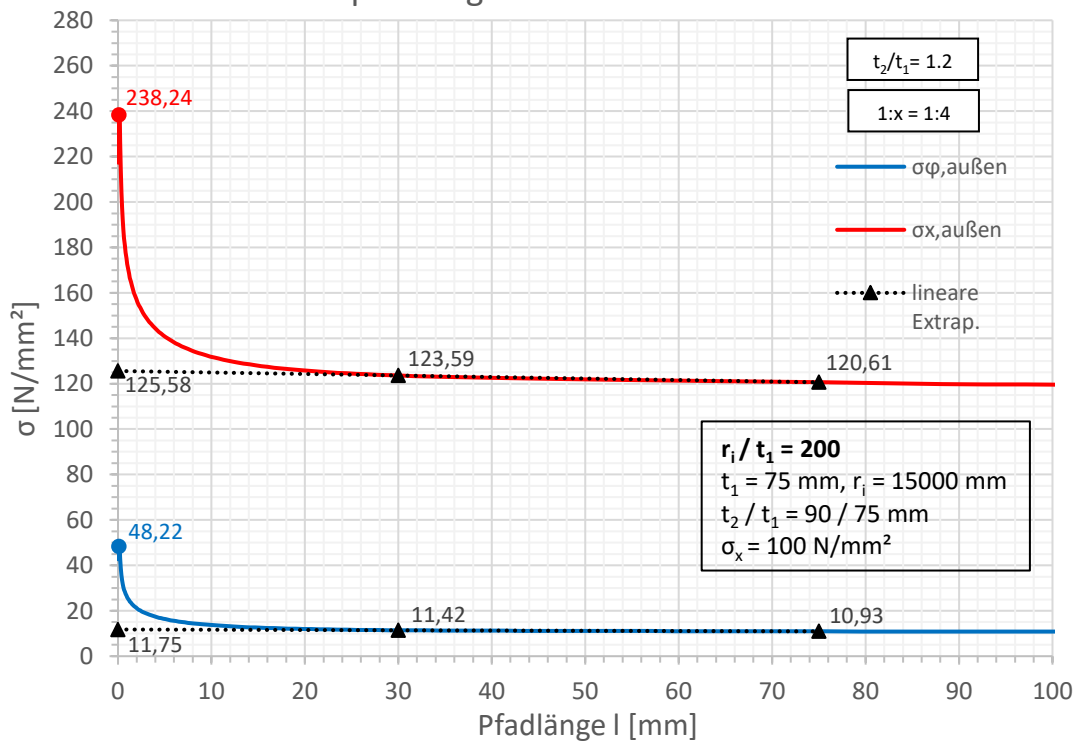


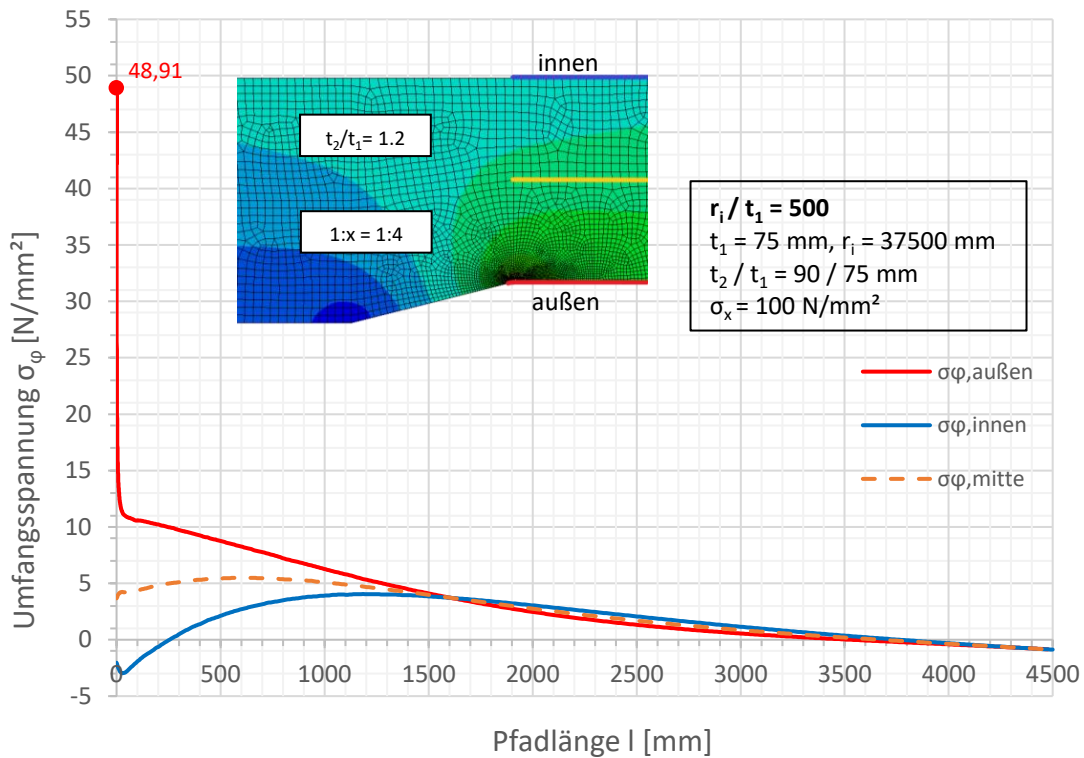
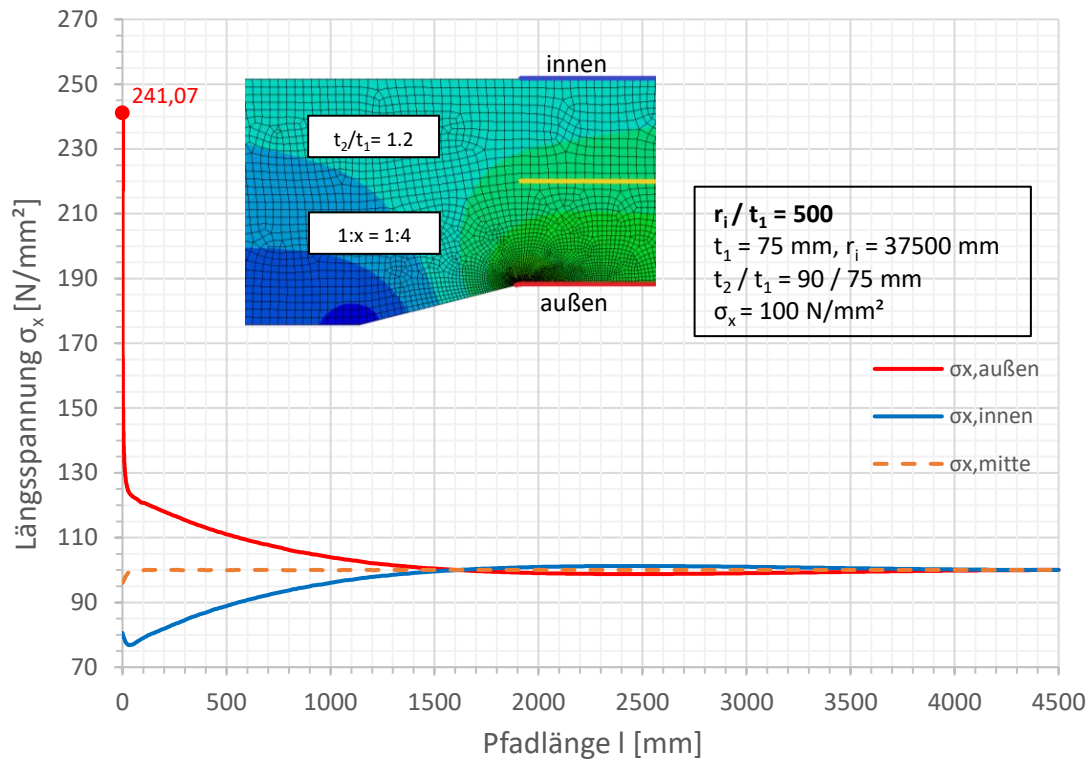


Spannungen an der Außenseite

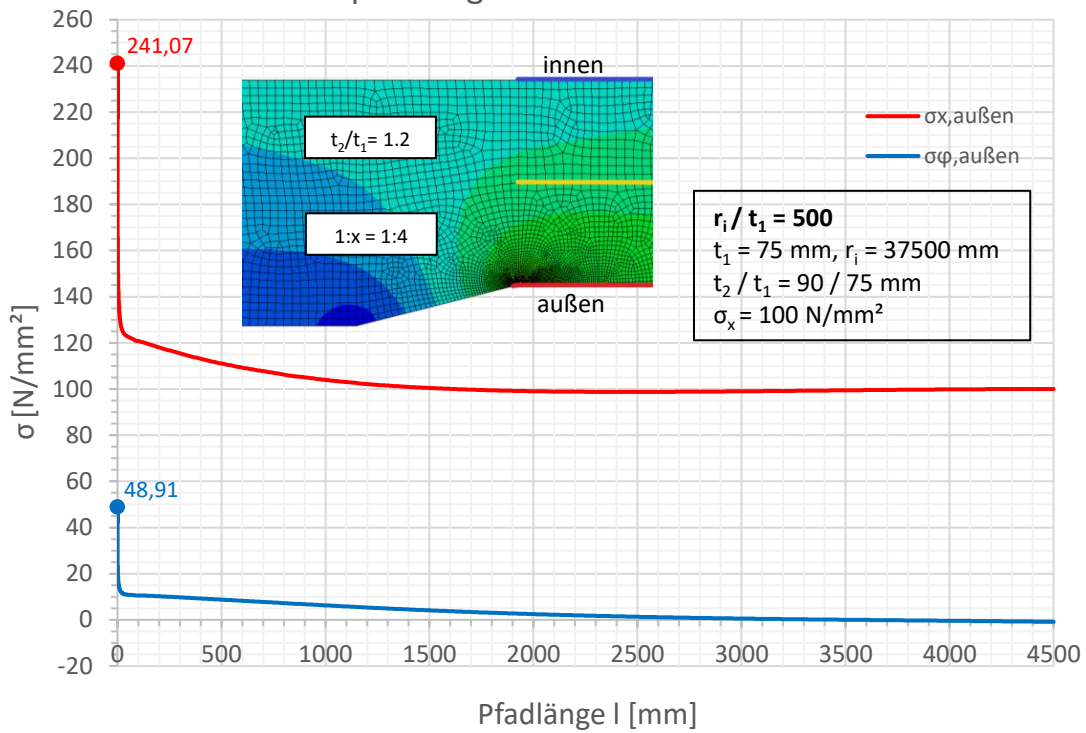


Spannungen an der Außenseite

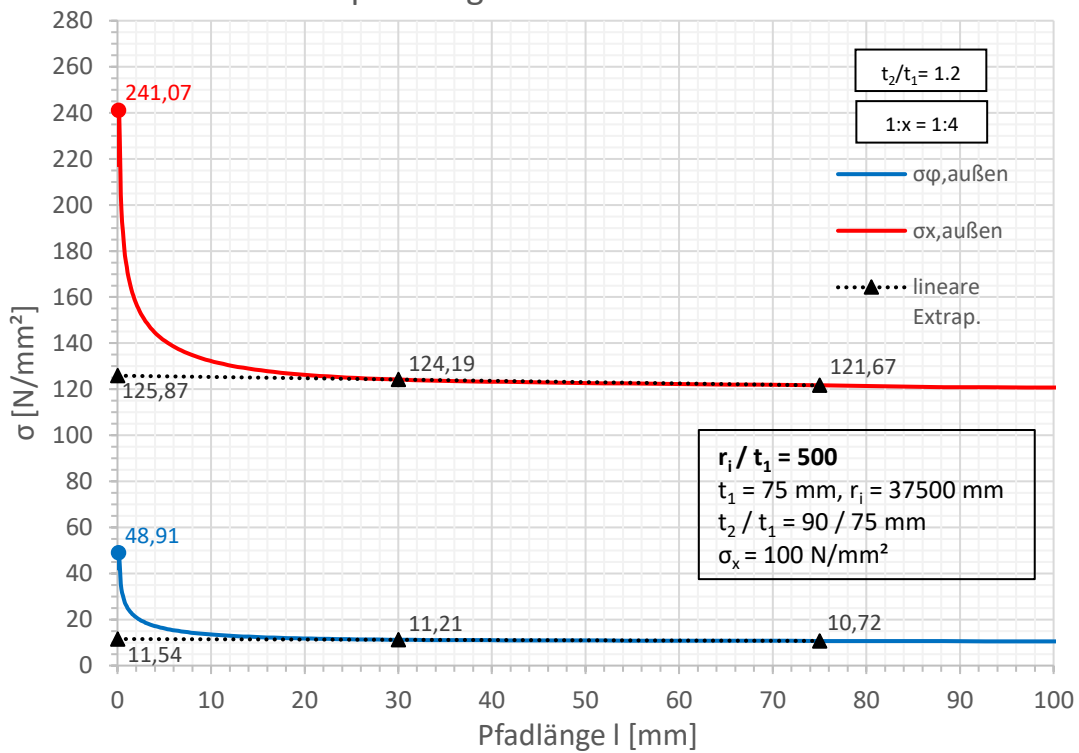


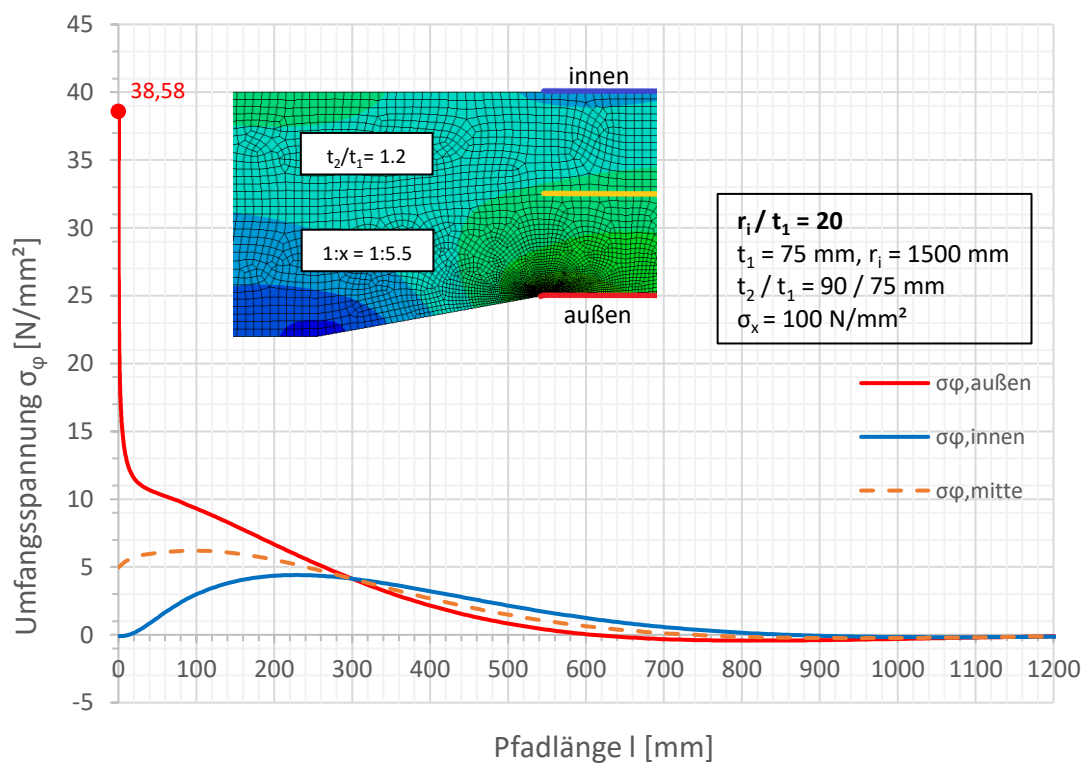
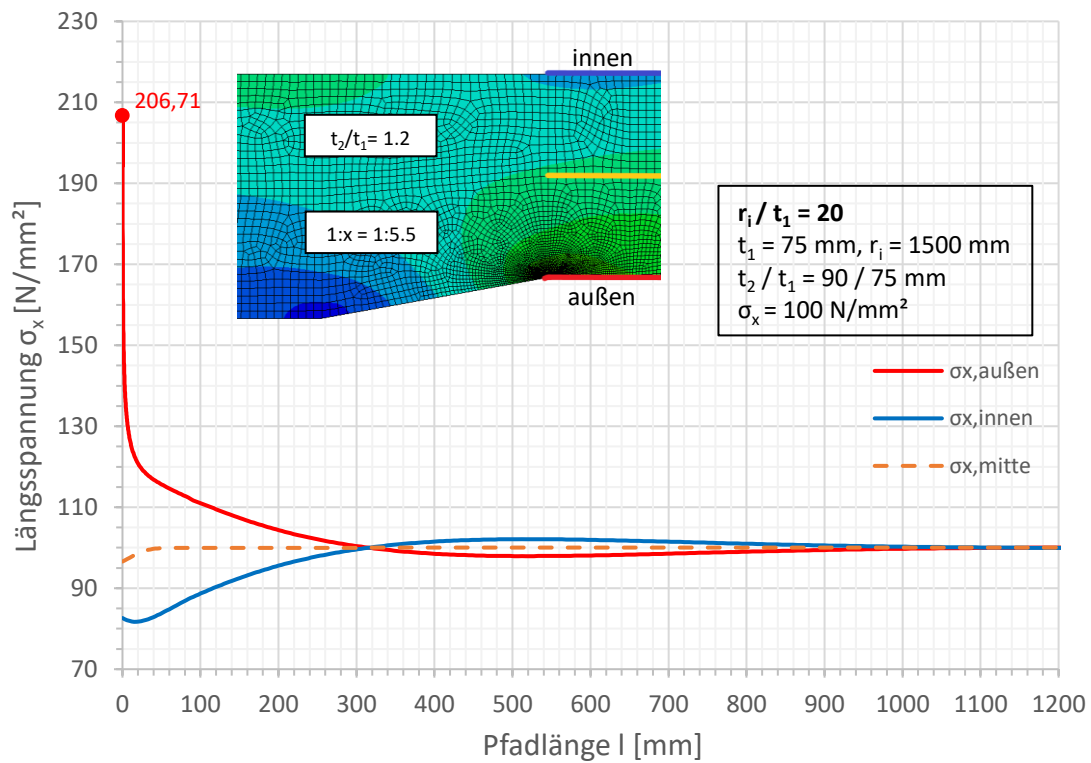


Spannungen an der Außenseite

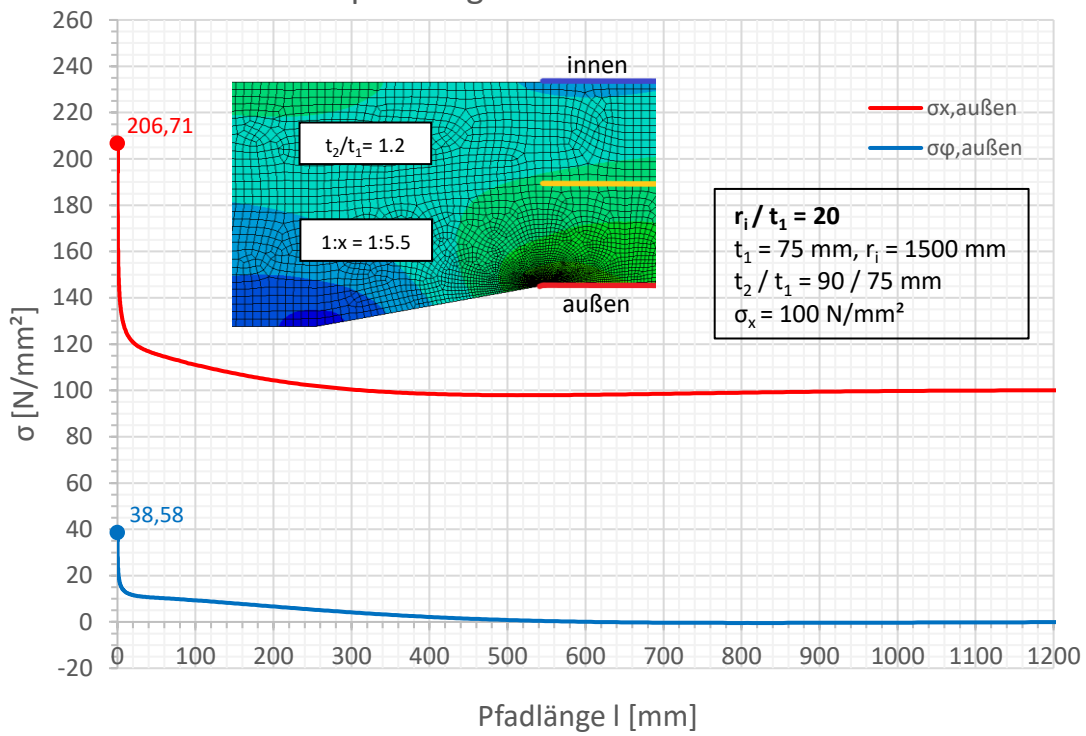


Spannungen an der Außenseite

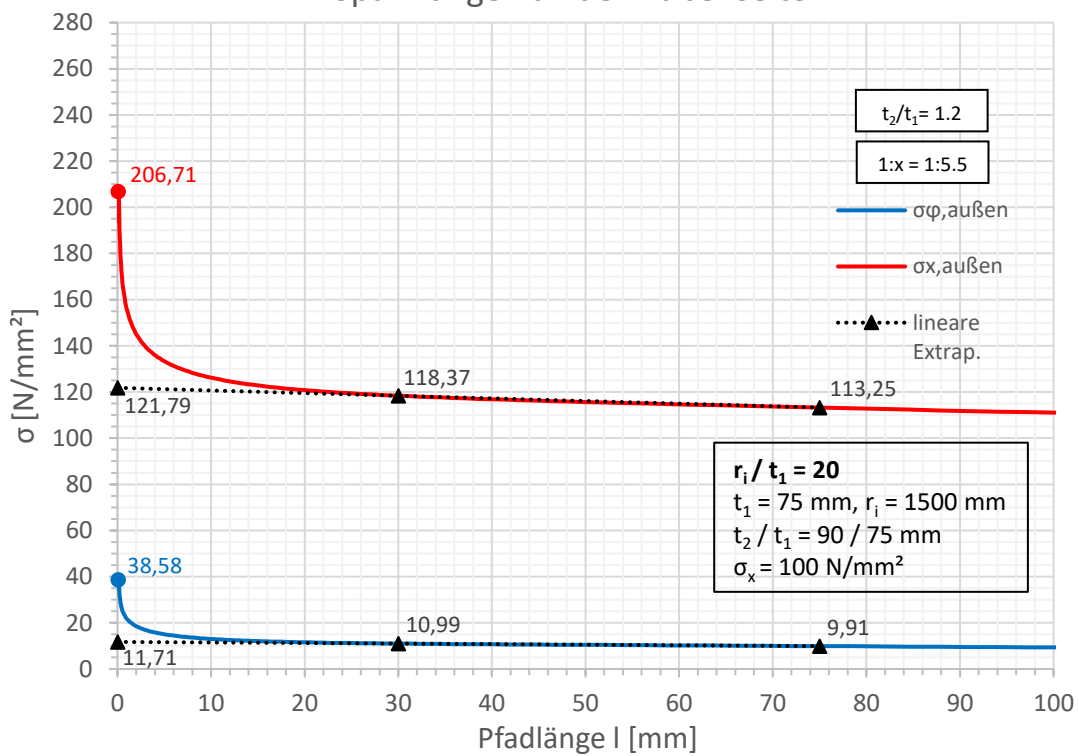


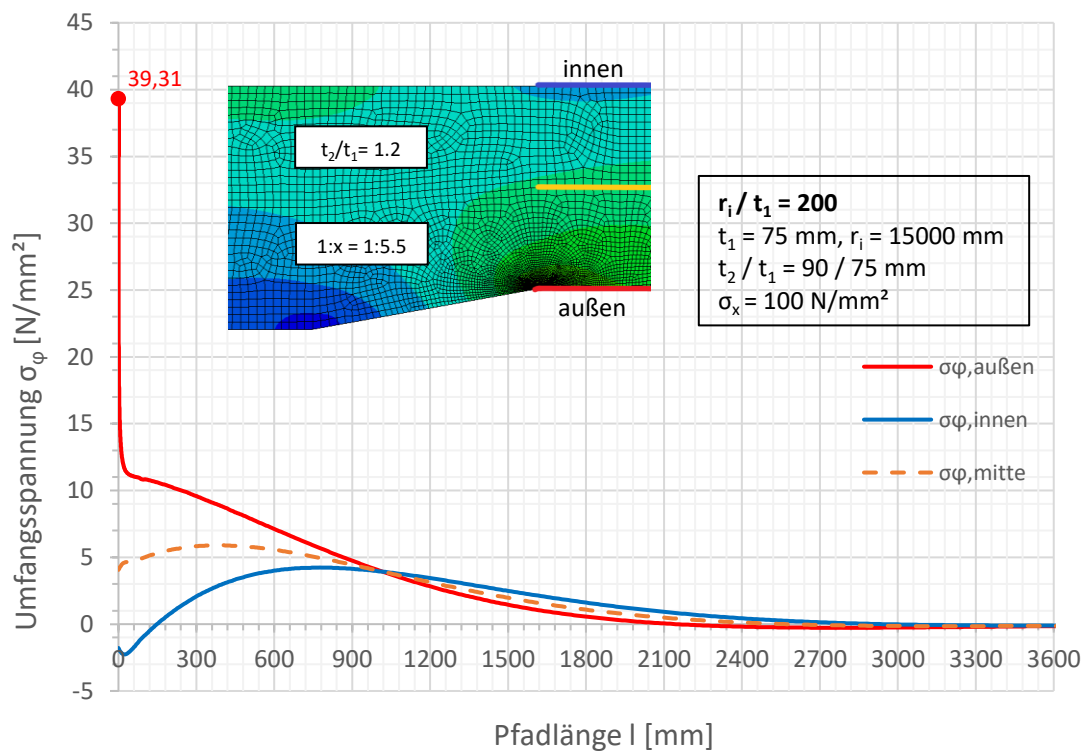
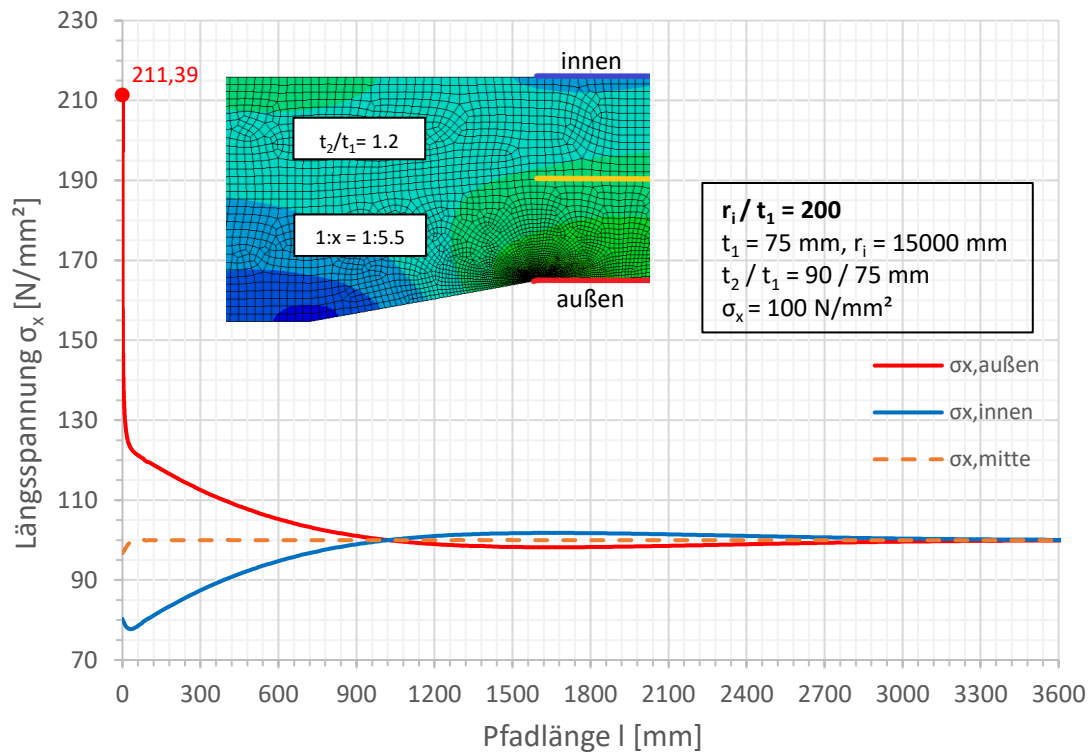


Spannungen an der Außenseite

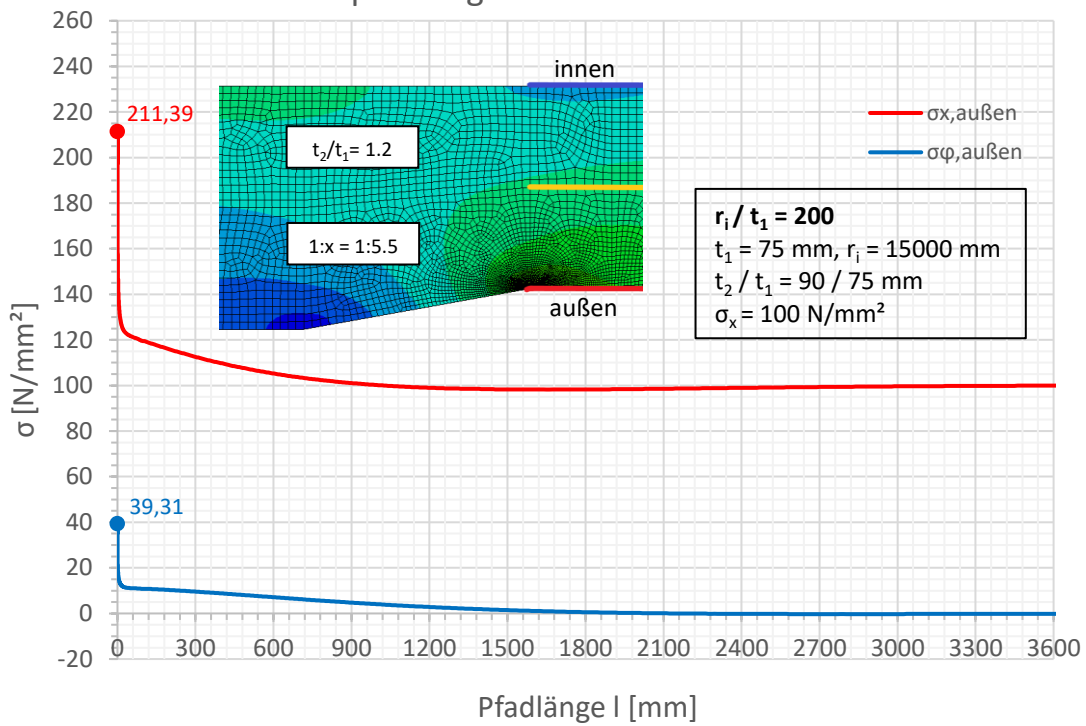


Spannungen an der Außenseite

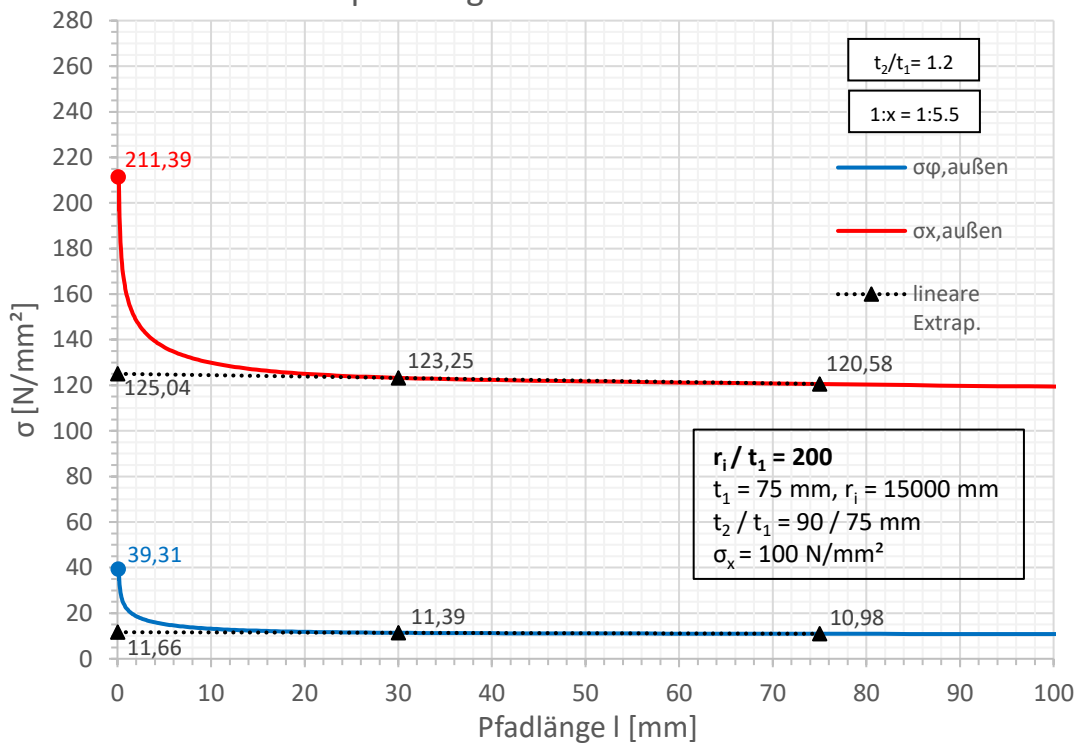


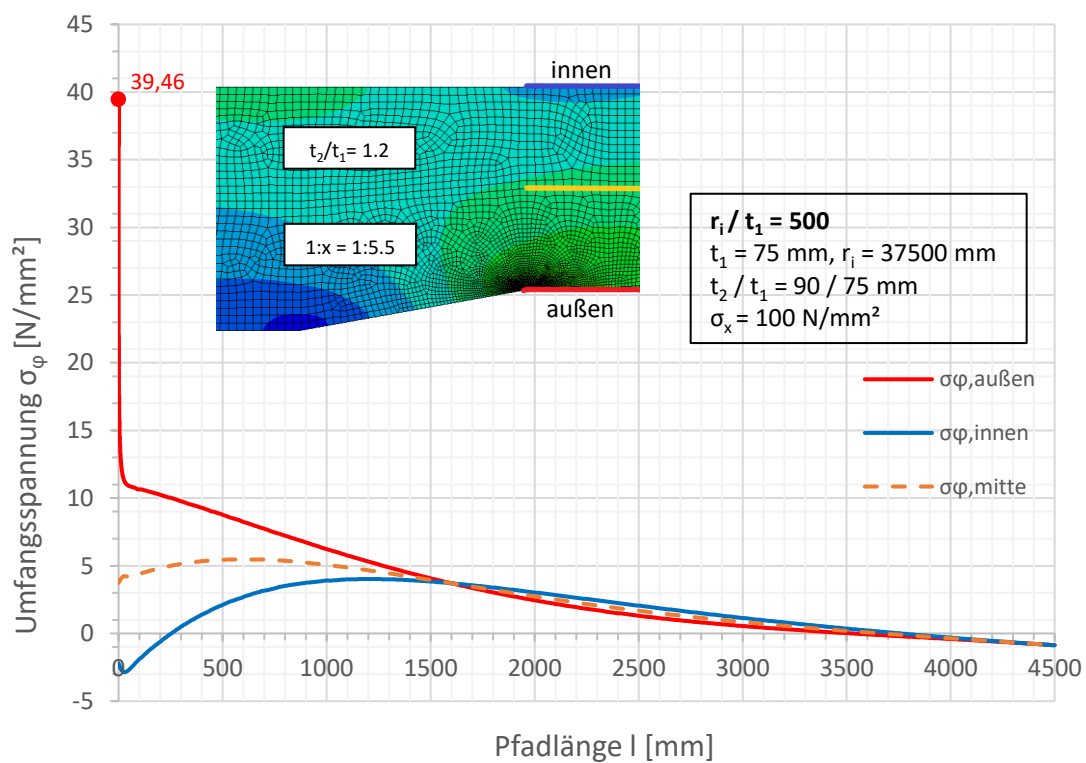
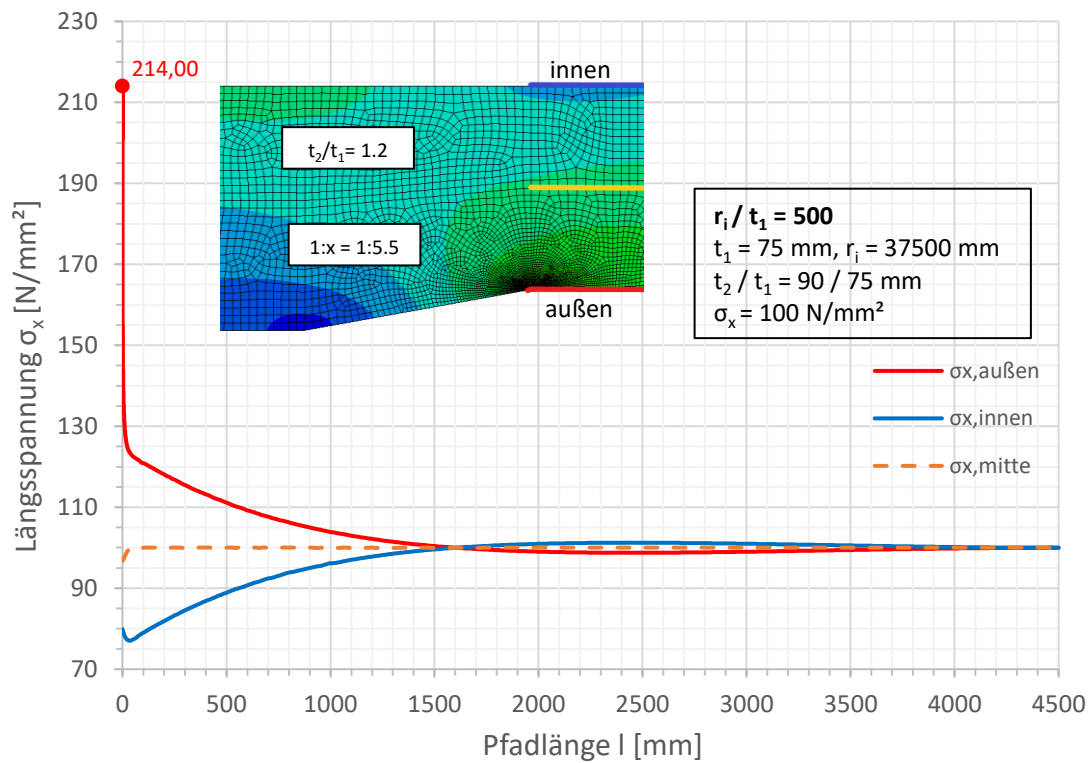


Spannungen an der Außenseite

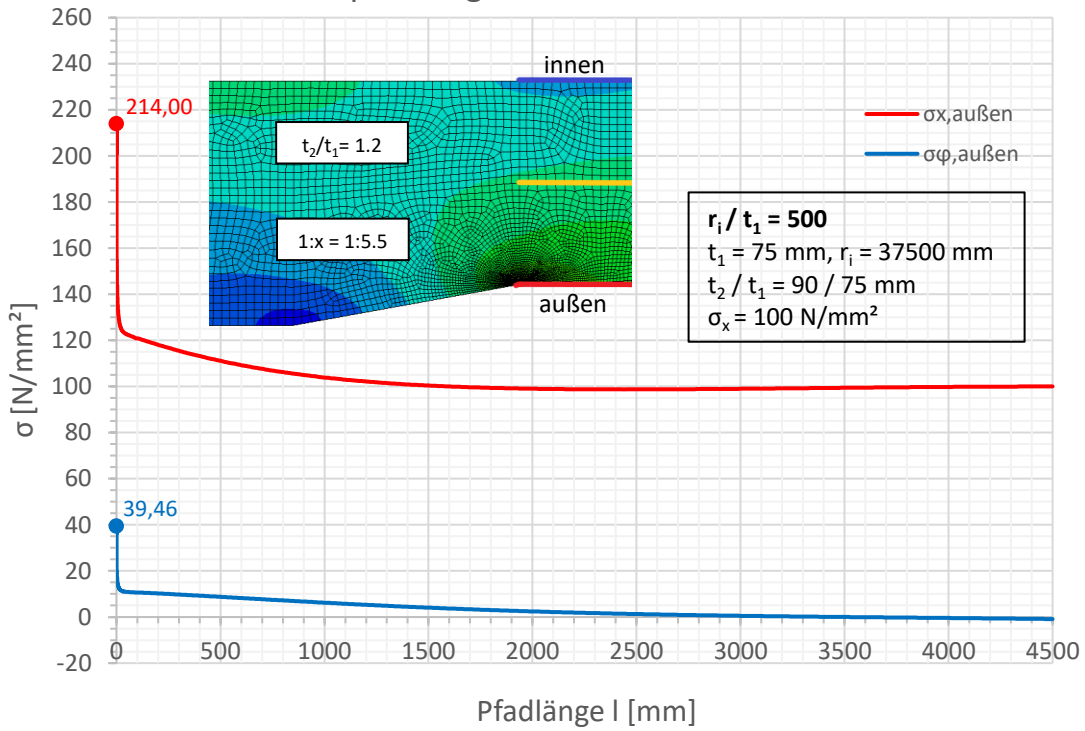


Spannungen an der Außenseite

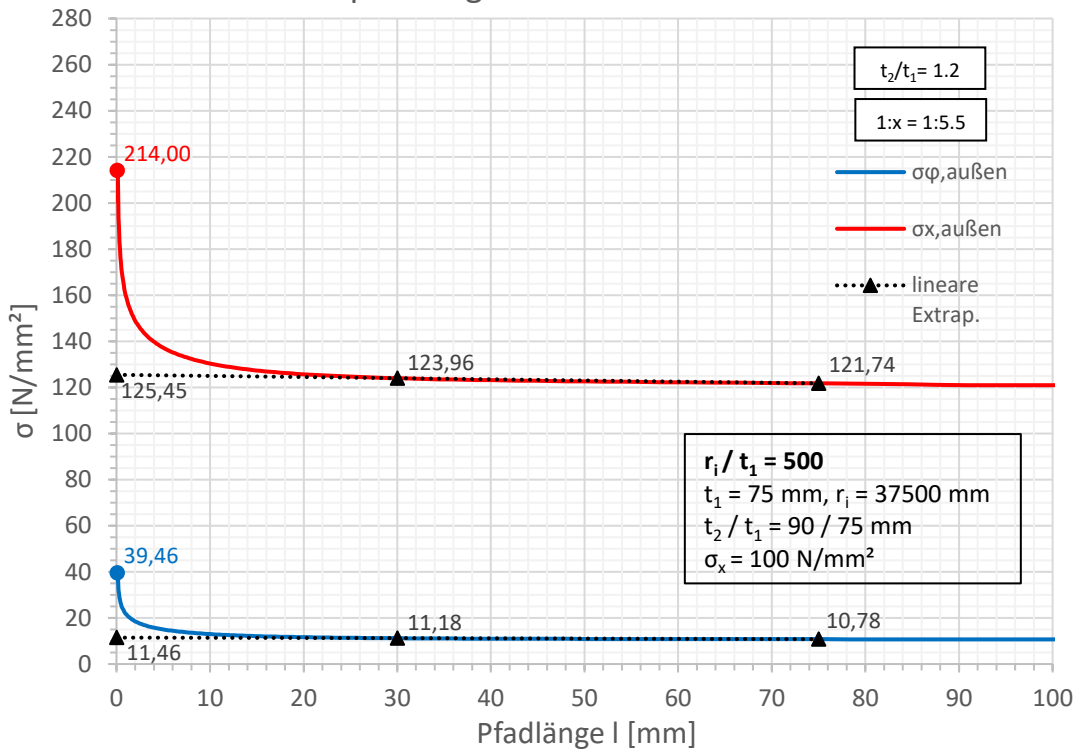


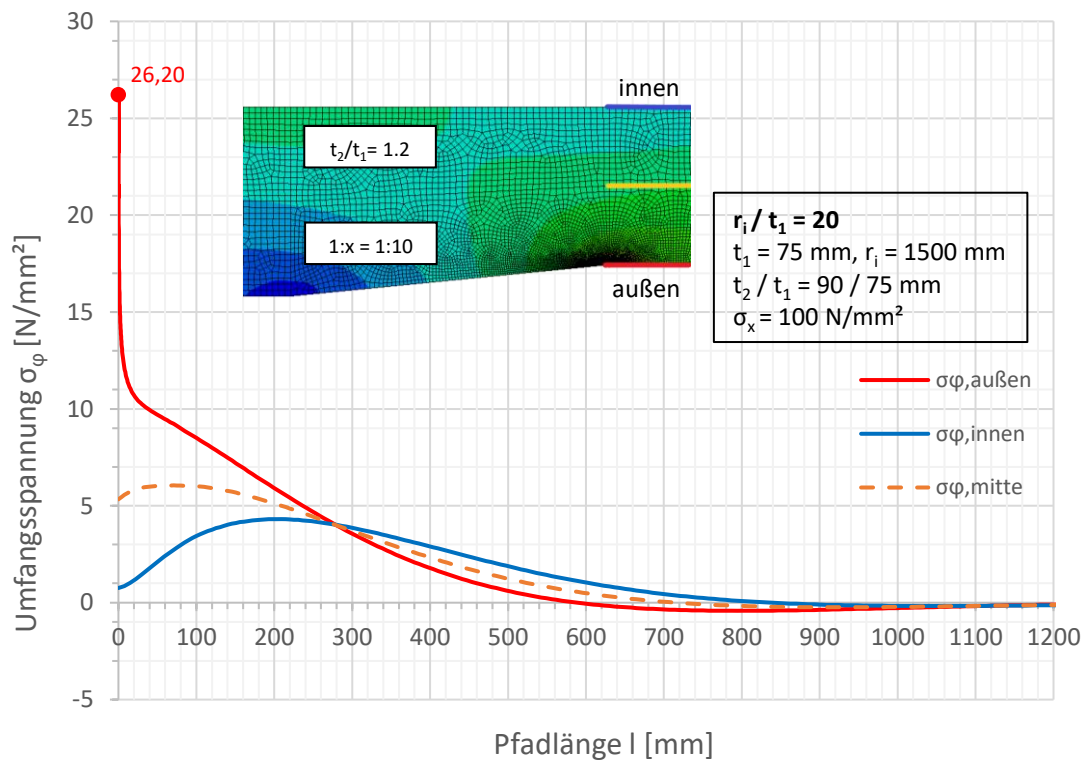
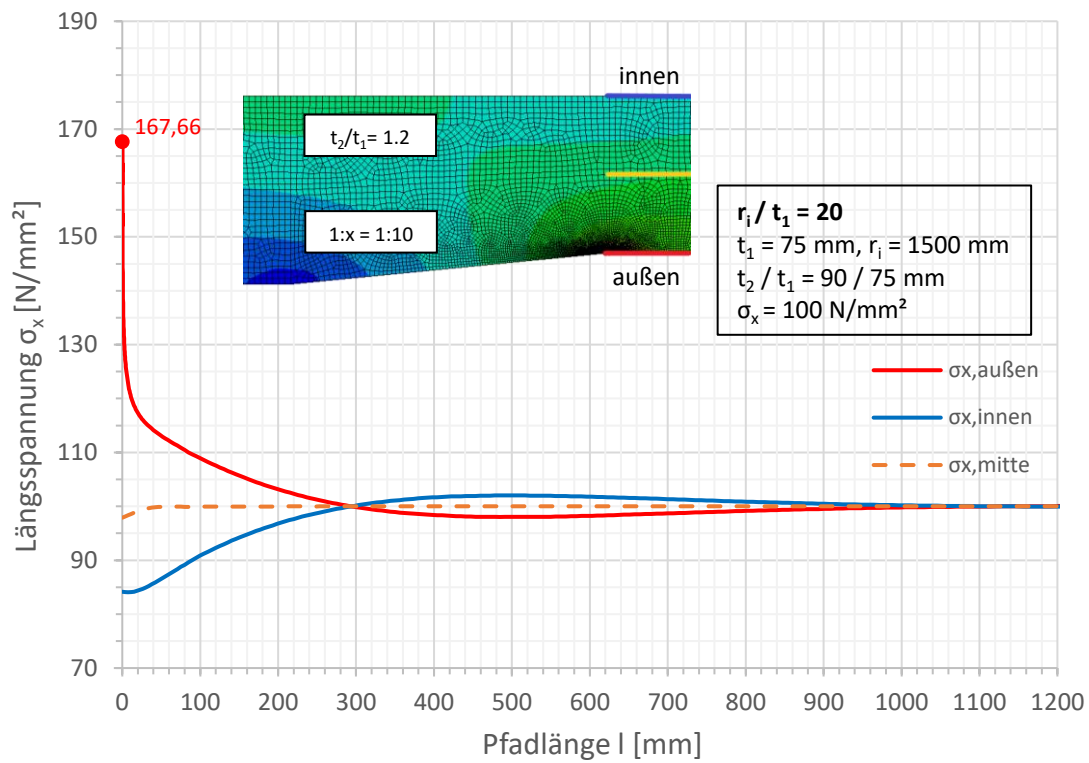


Spannungen an der Außenseite

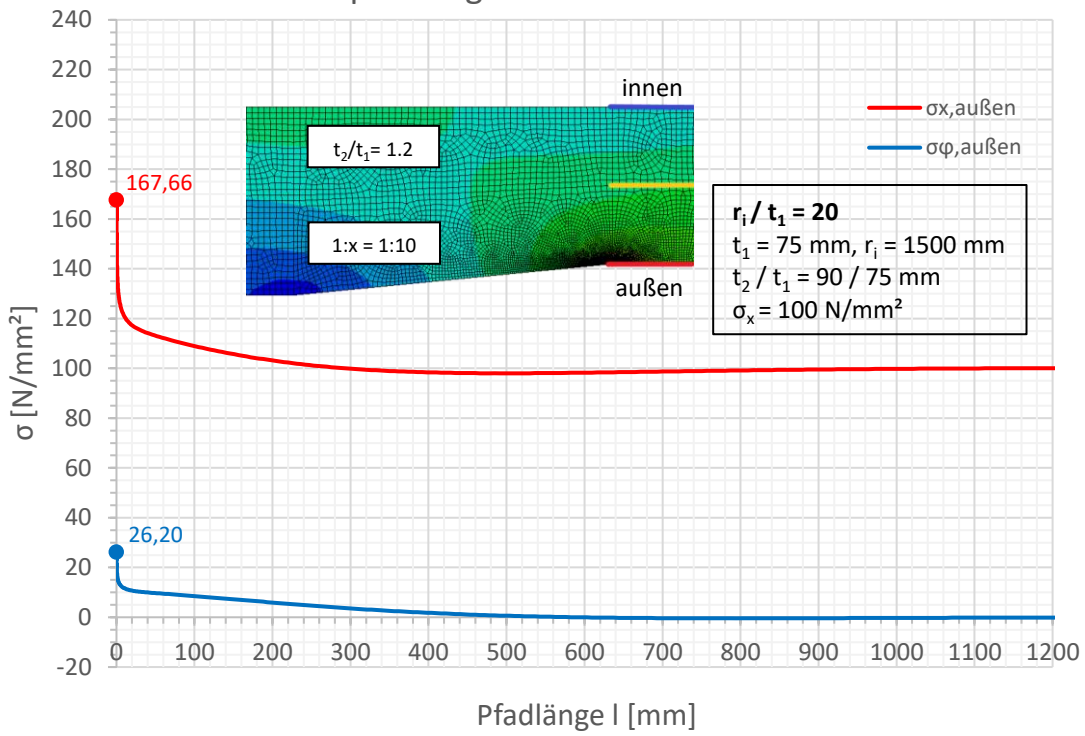


Spannungen an der Außenseite

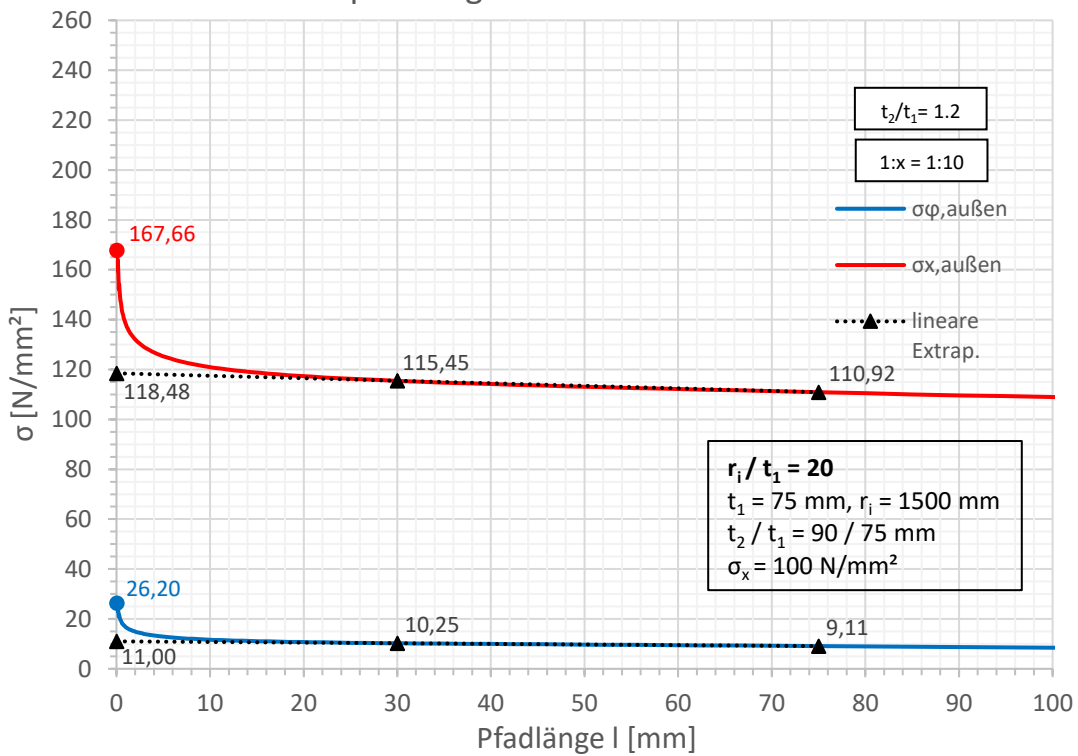


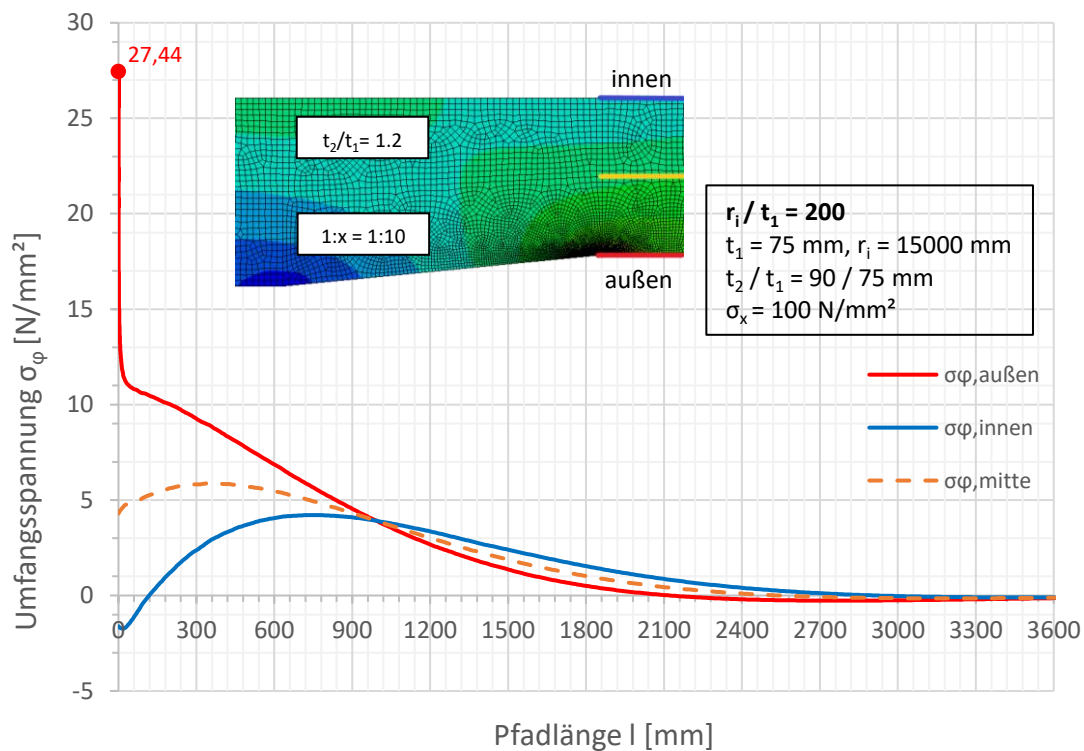
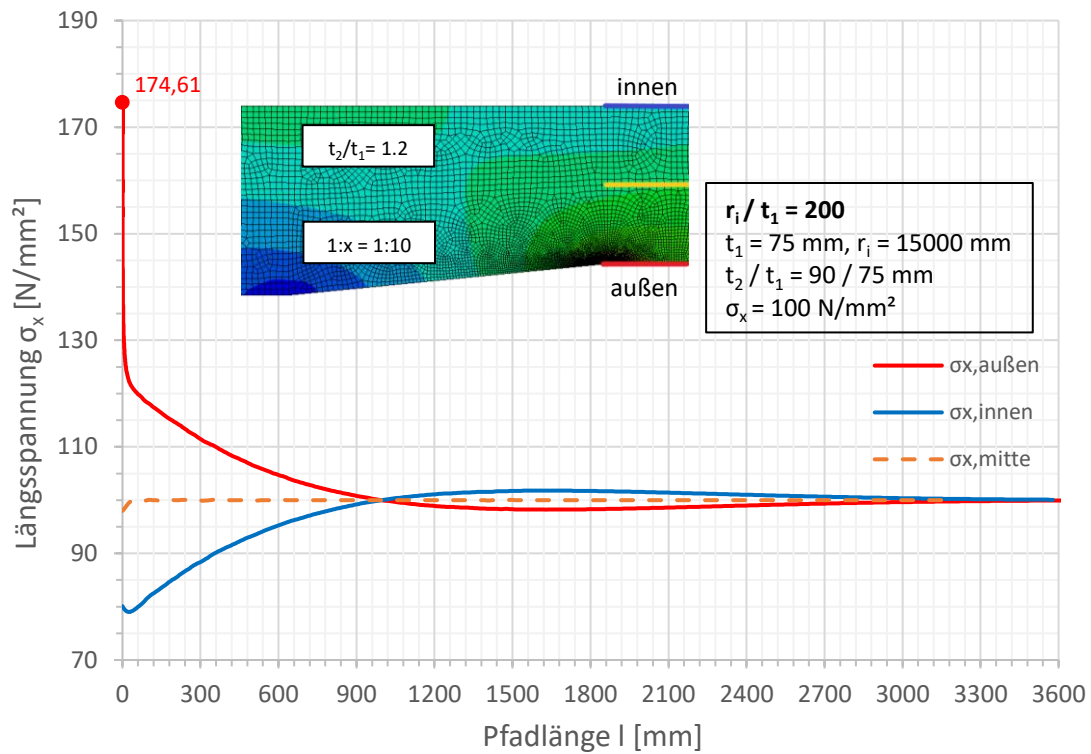


Spannungen an der Außenseite

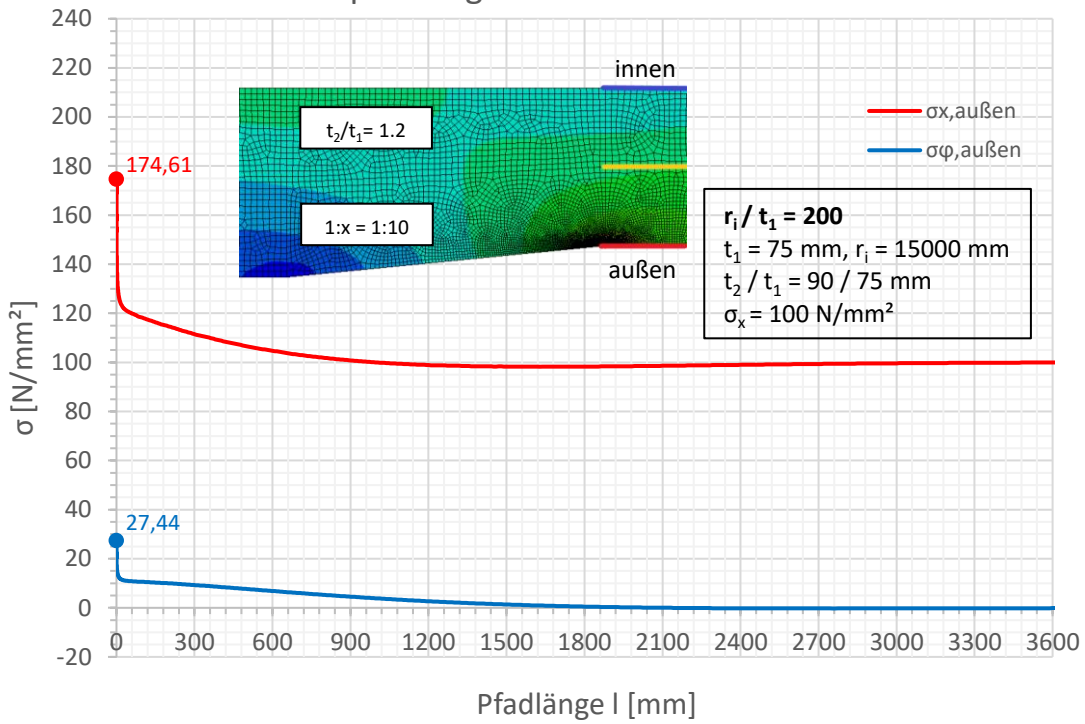


Spannungen an der Außenseite

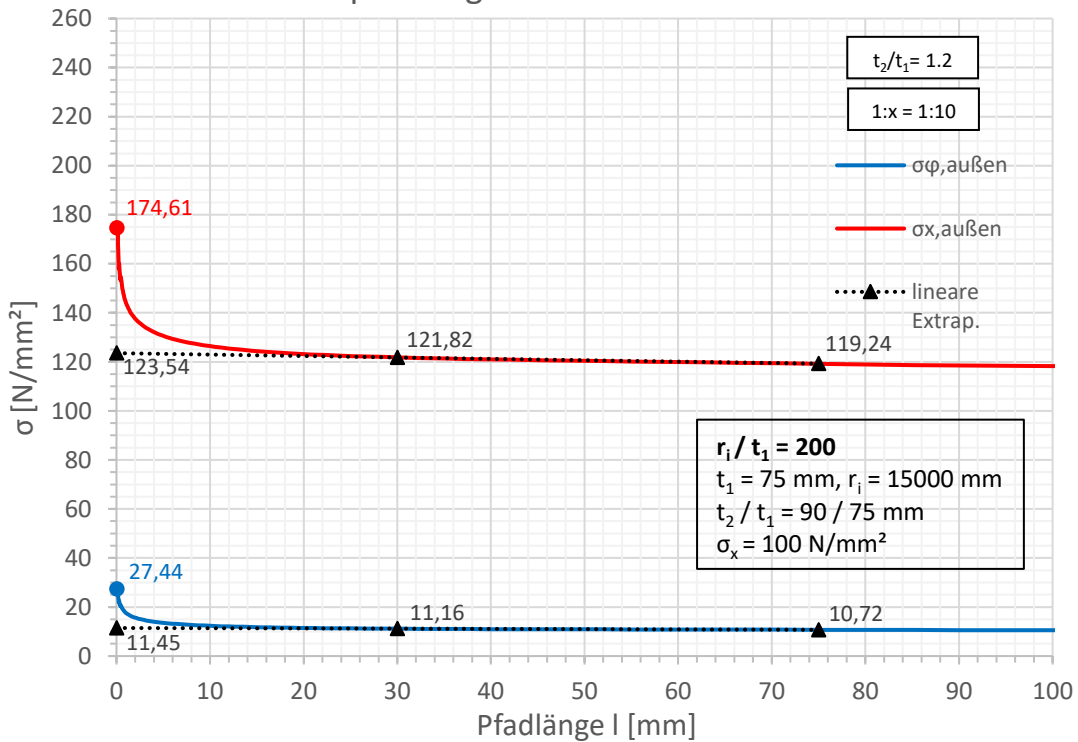


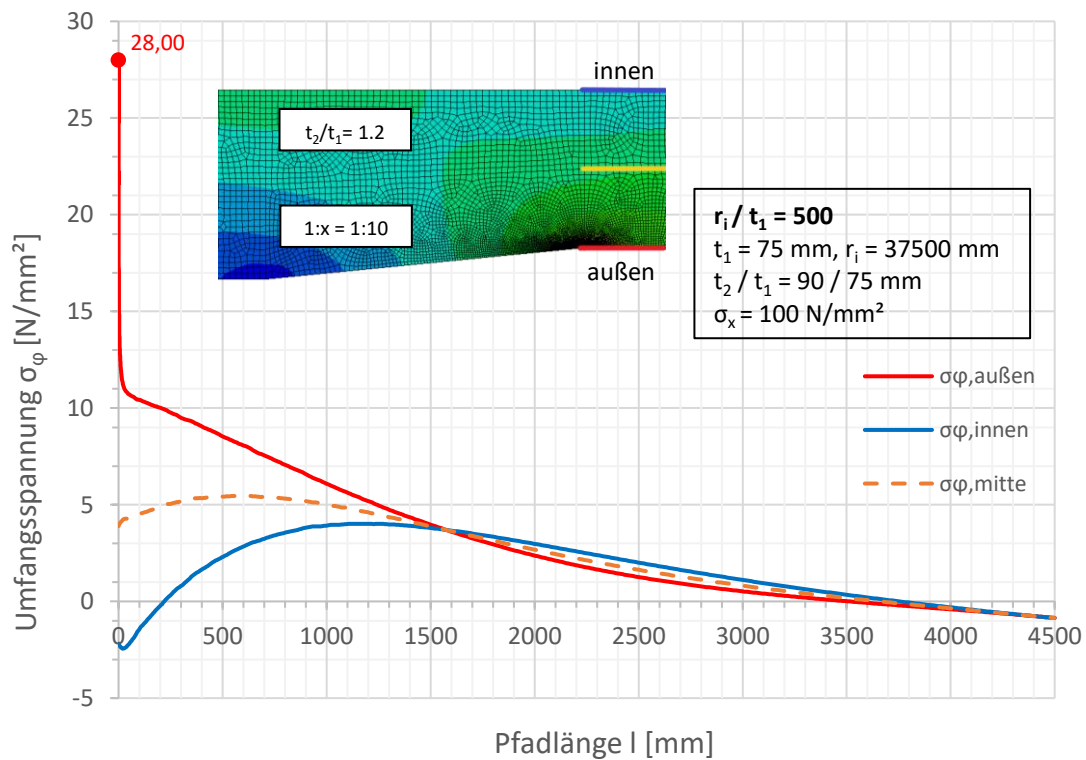
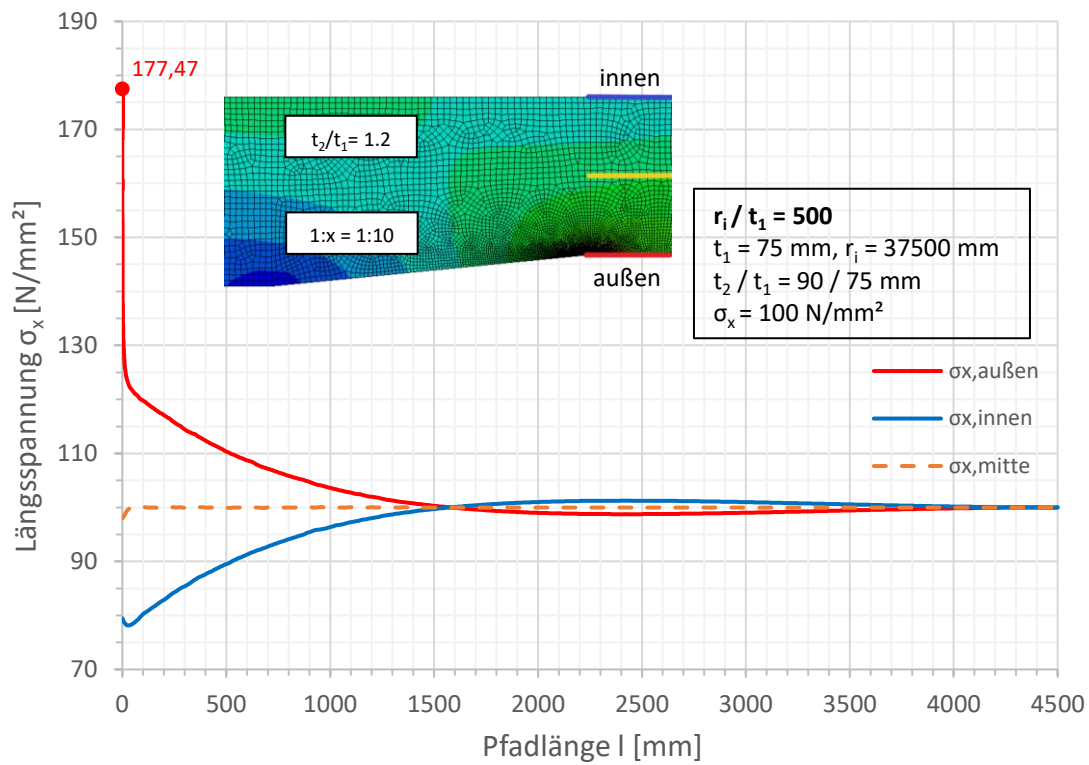


Spannungen an der Außenseite

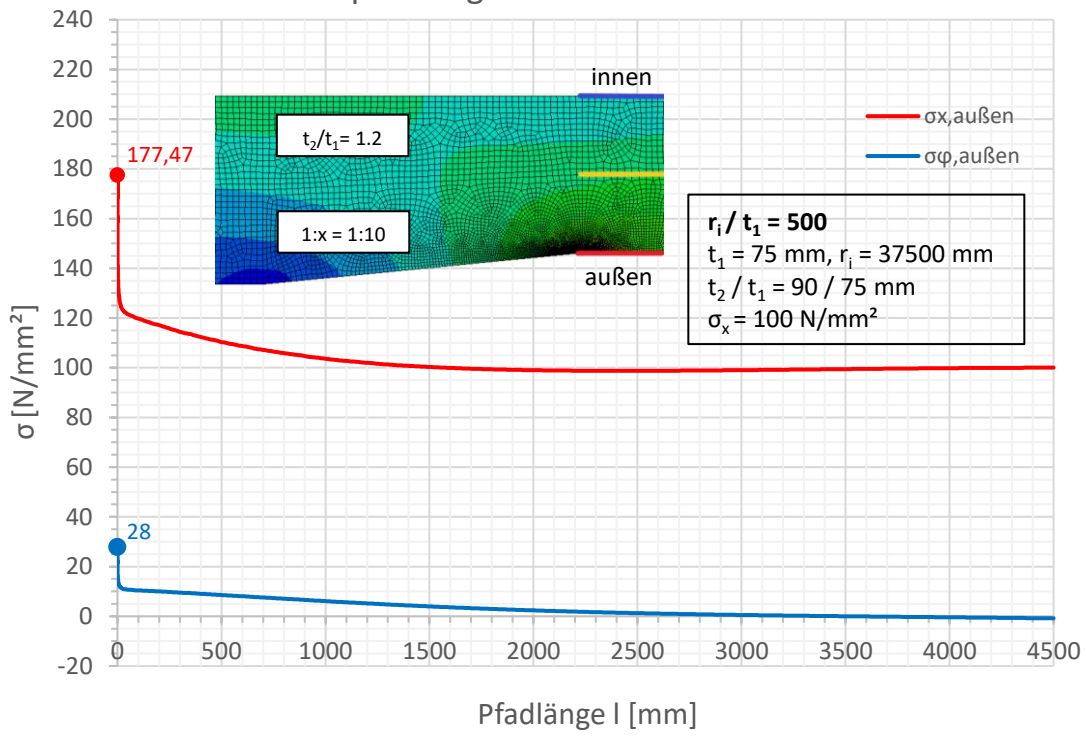


Spannungen an der Außenseite

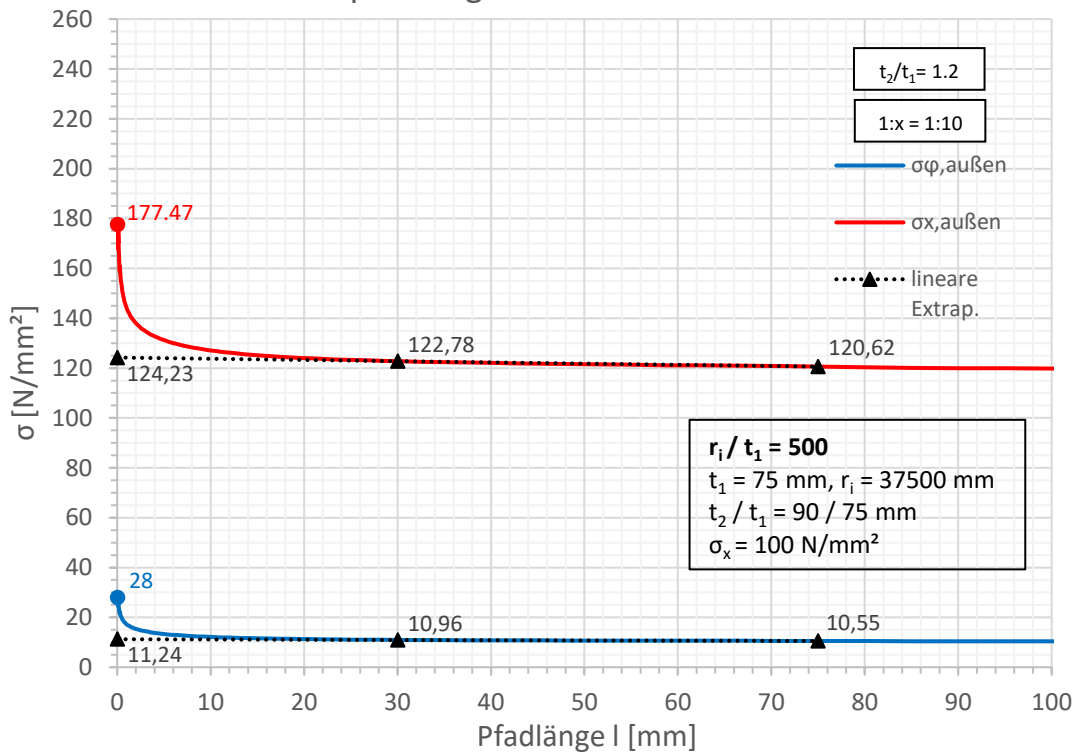


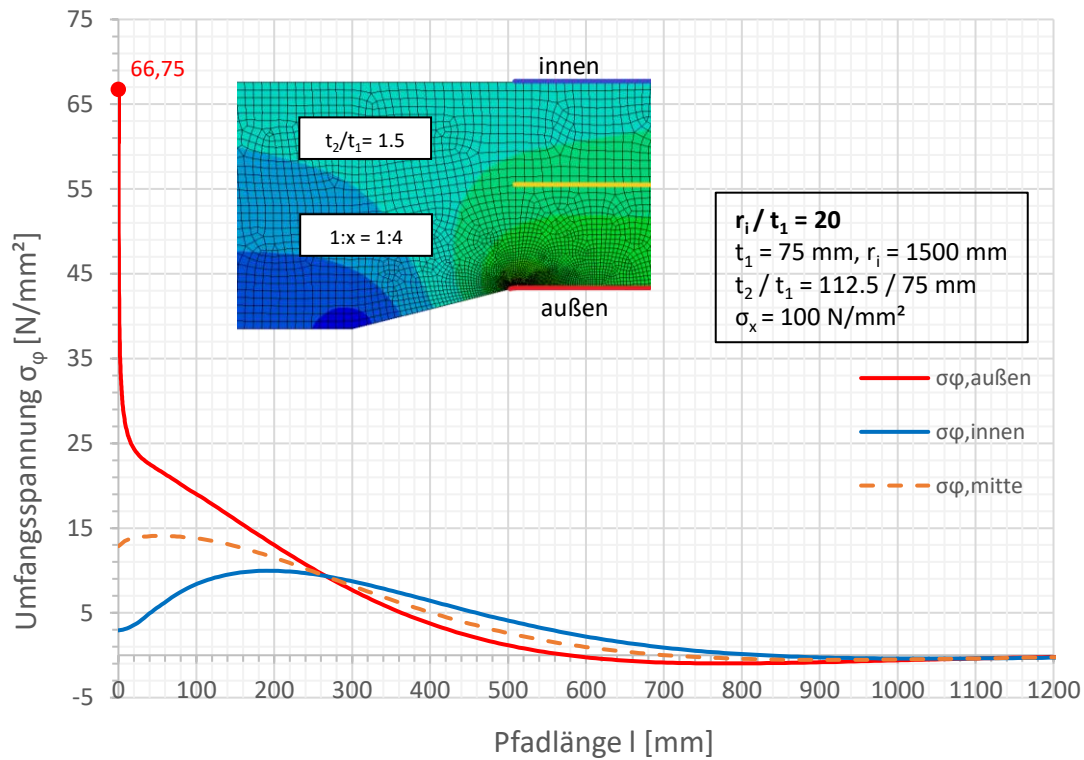
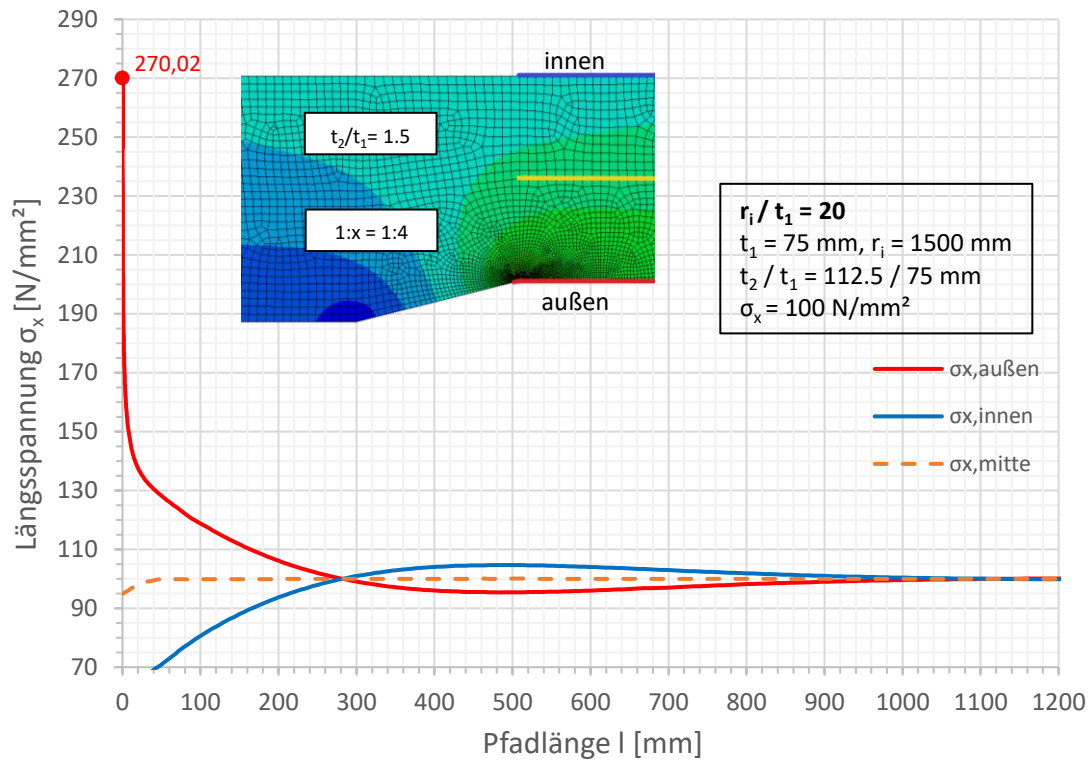


Spannungen an der Außenseite

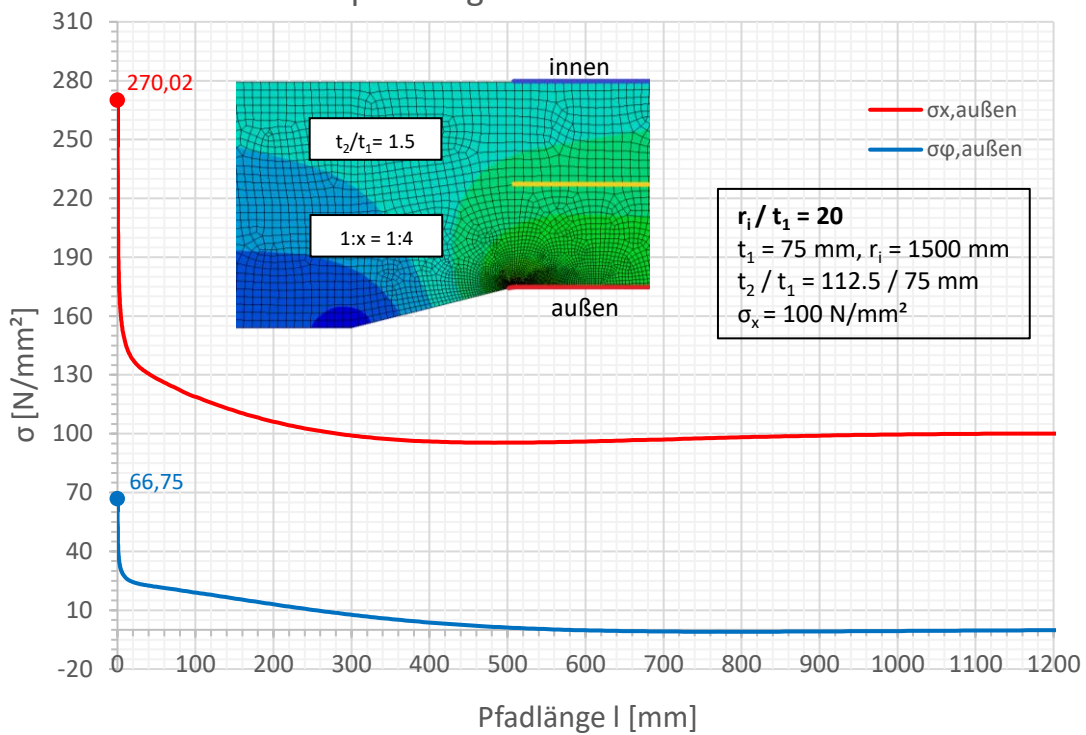


Spannungen an der Außenseite

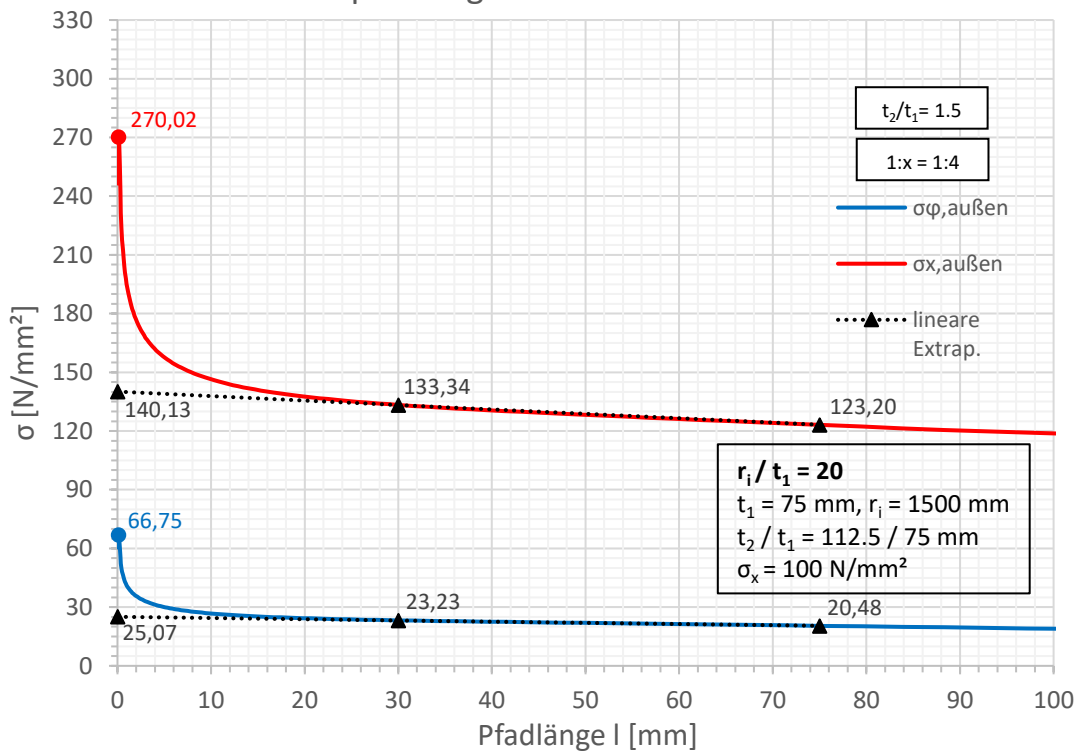


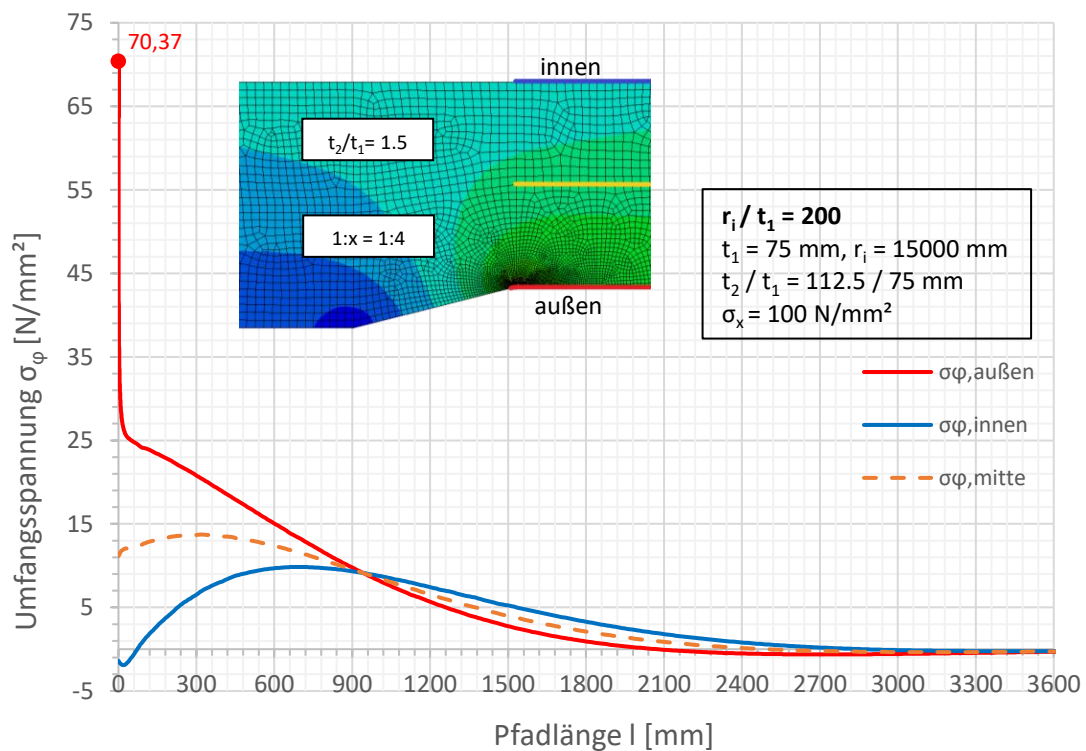
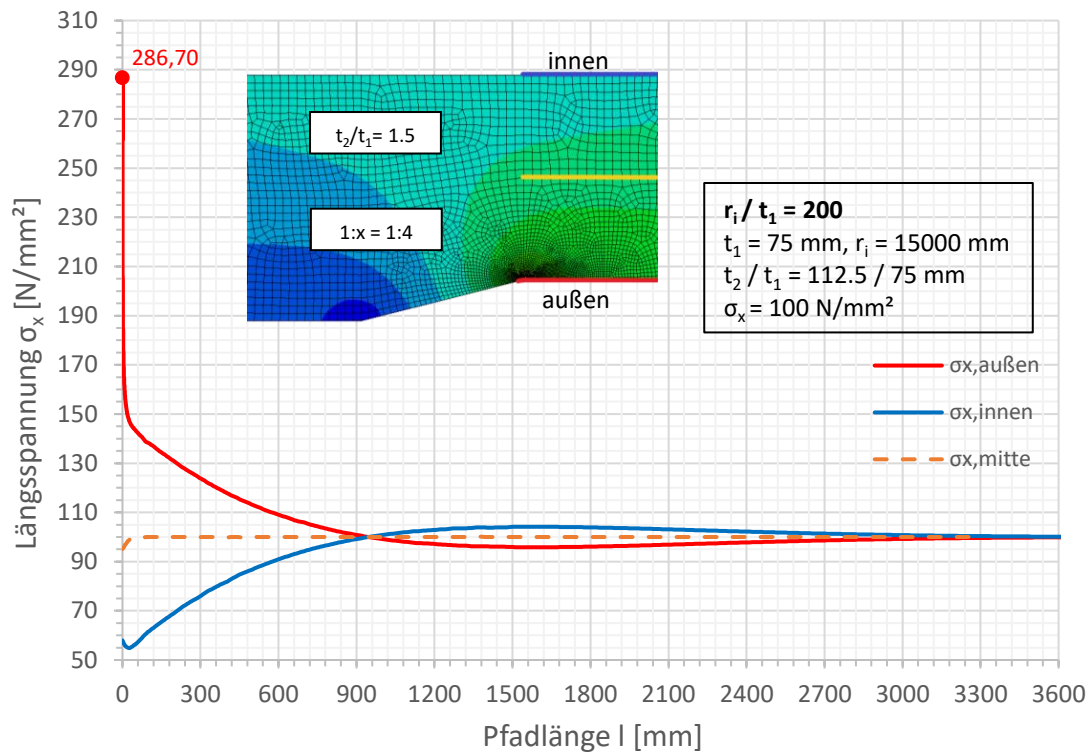


Spannungen an der Außenseite

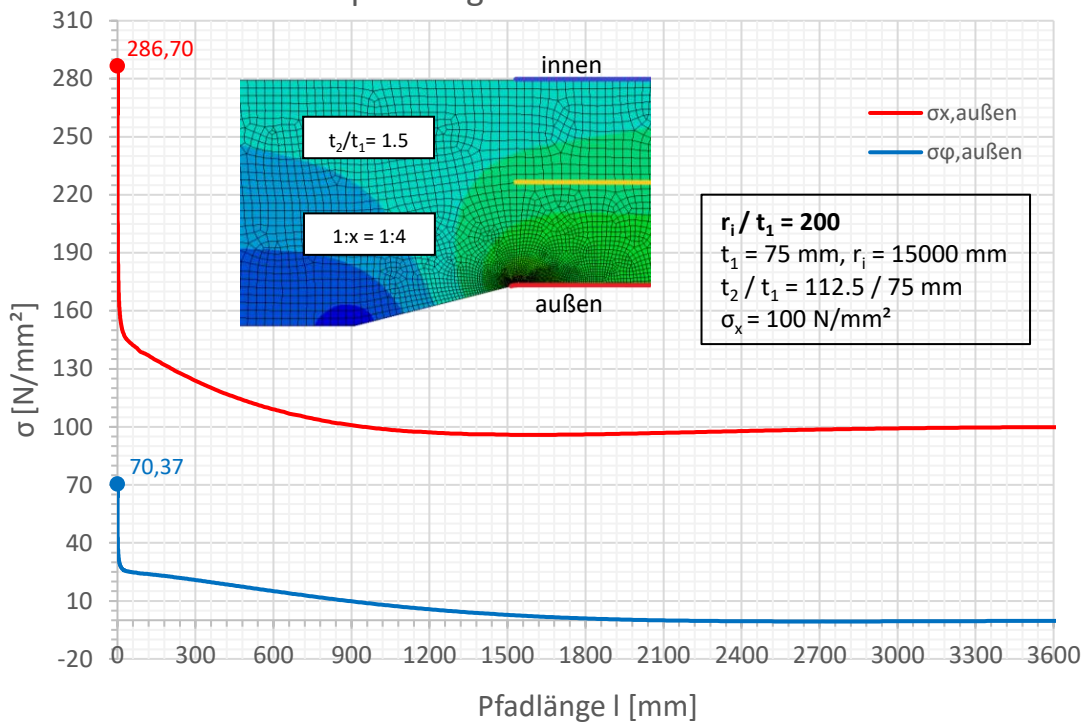


Spannungen an der Außenseite

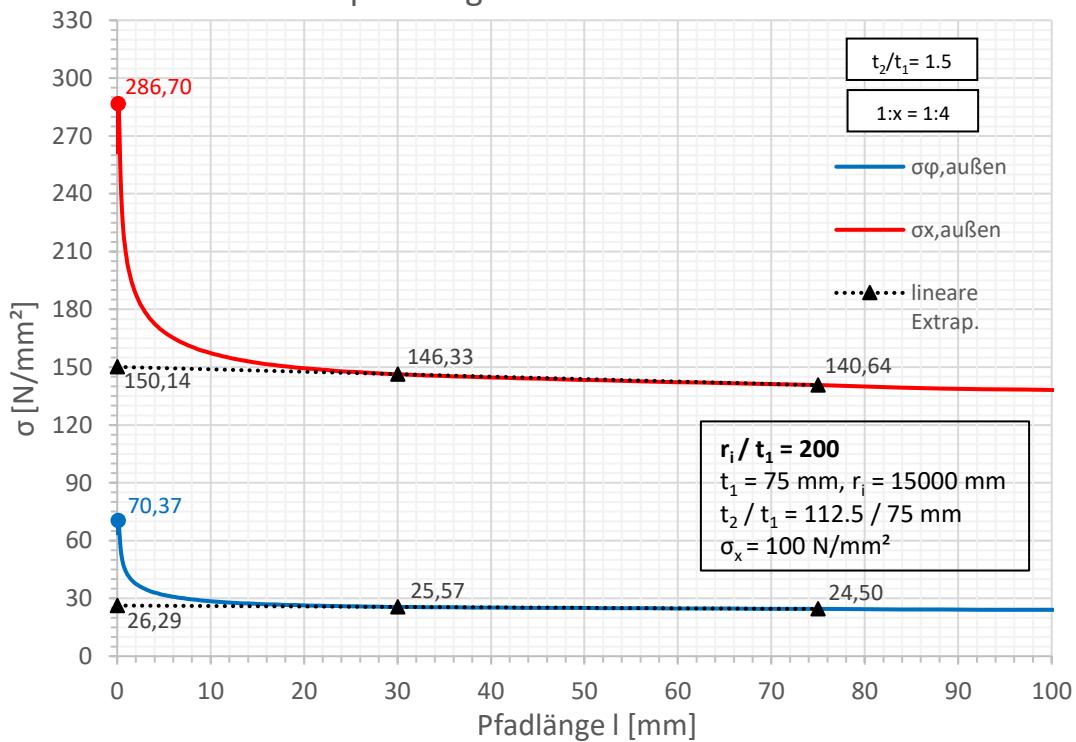


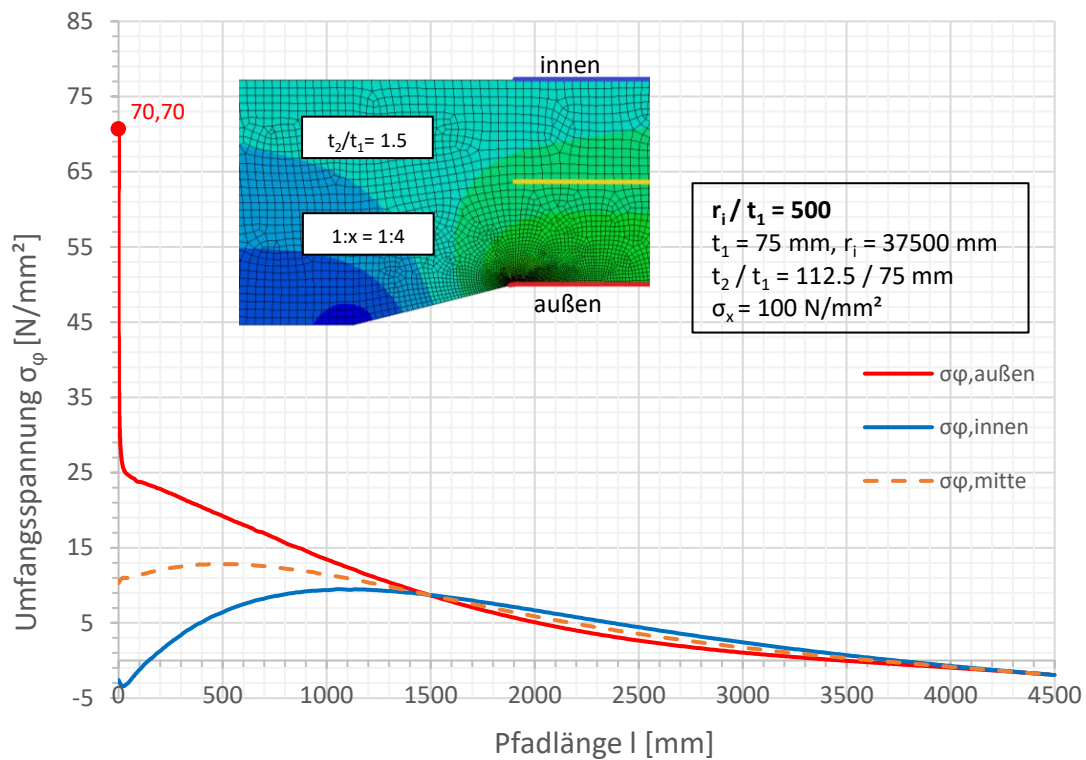
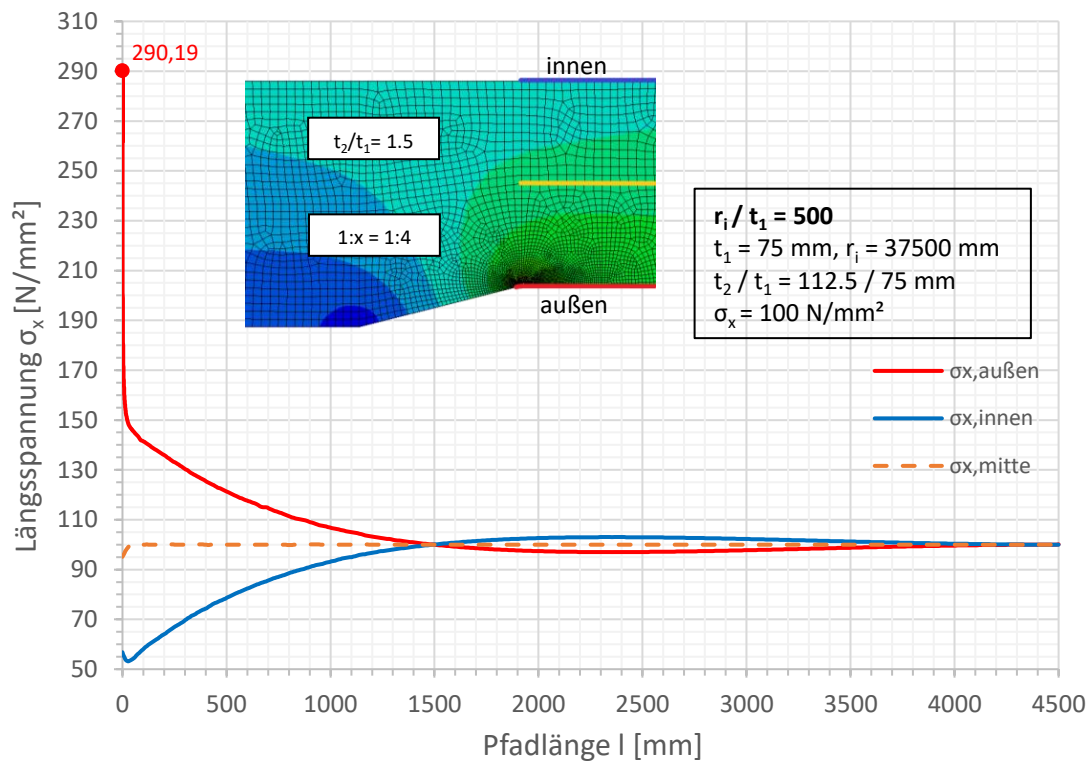


Spannungen an der Außenseite

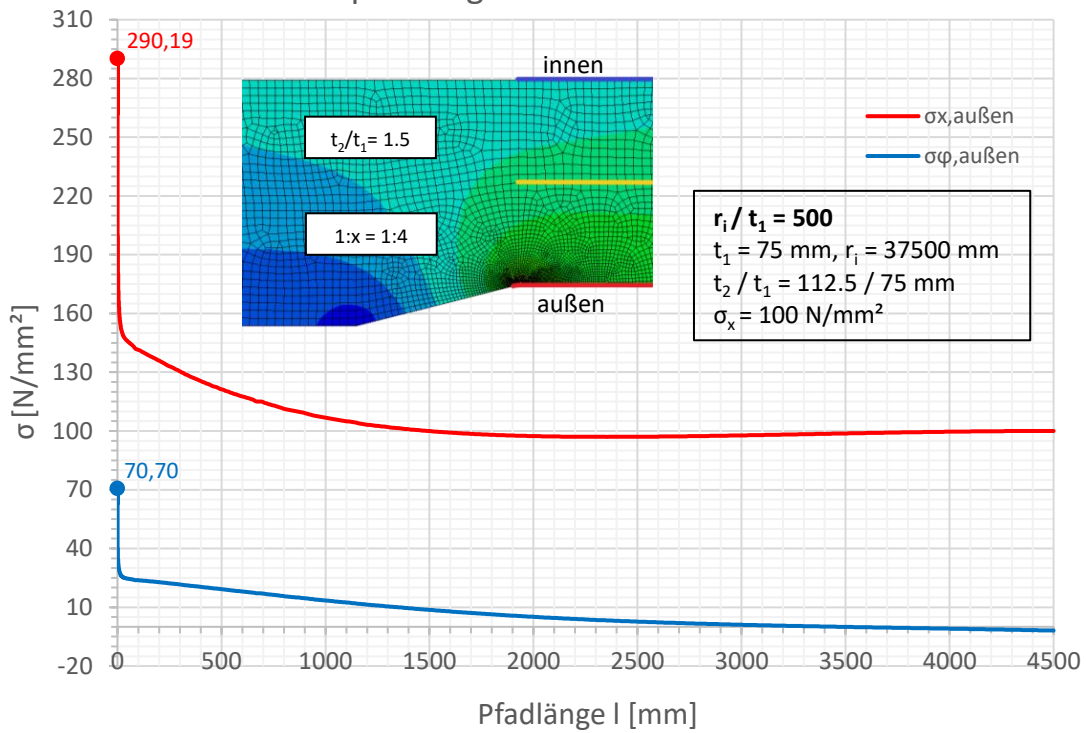


Spannungen an der Außenseite

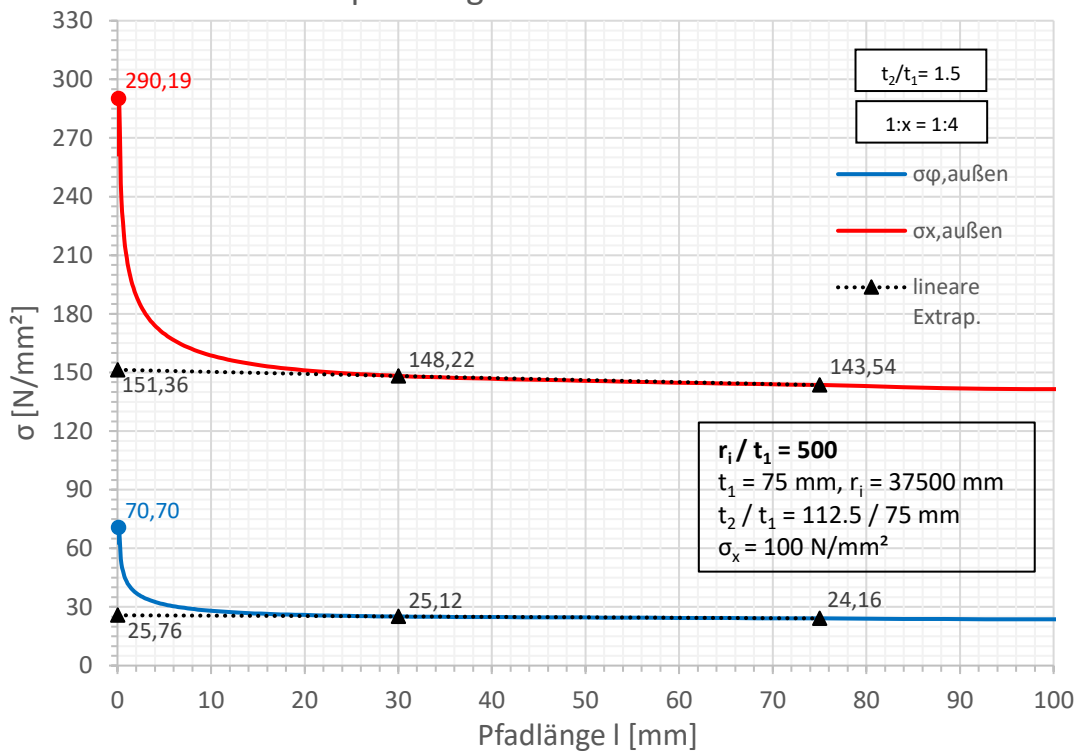


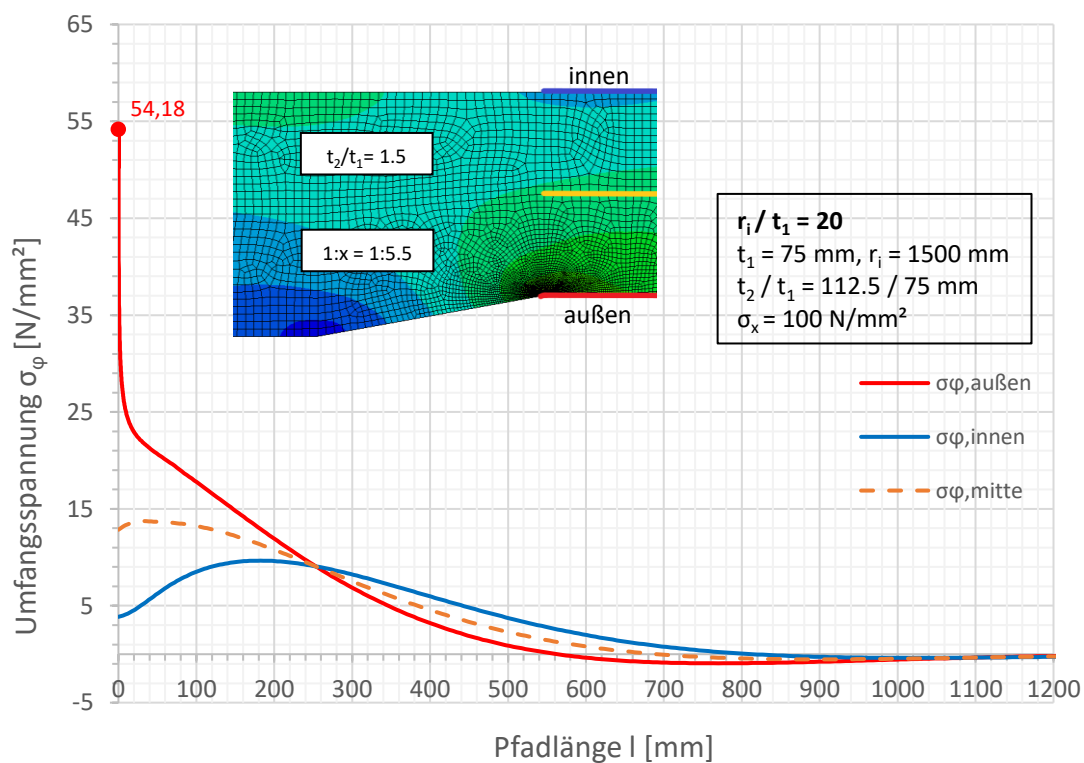
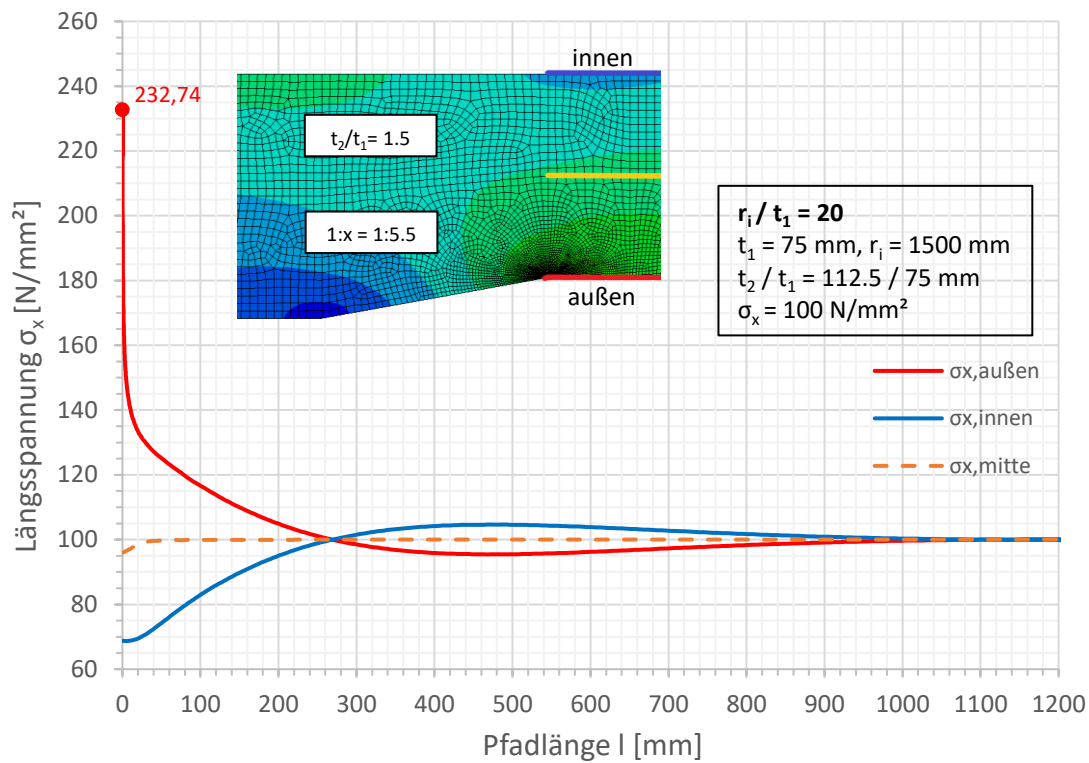


Spannungen an der Außenseite

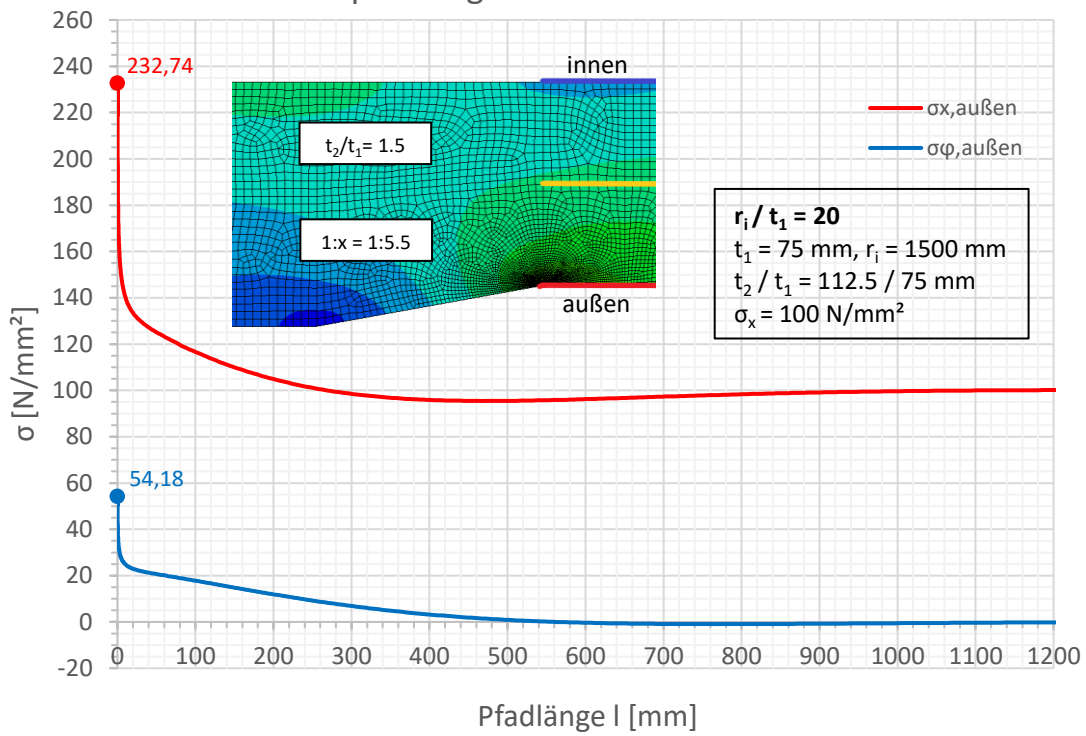


Spannungen an der Außenseite

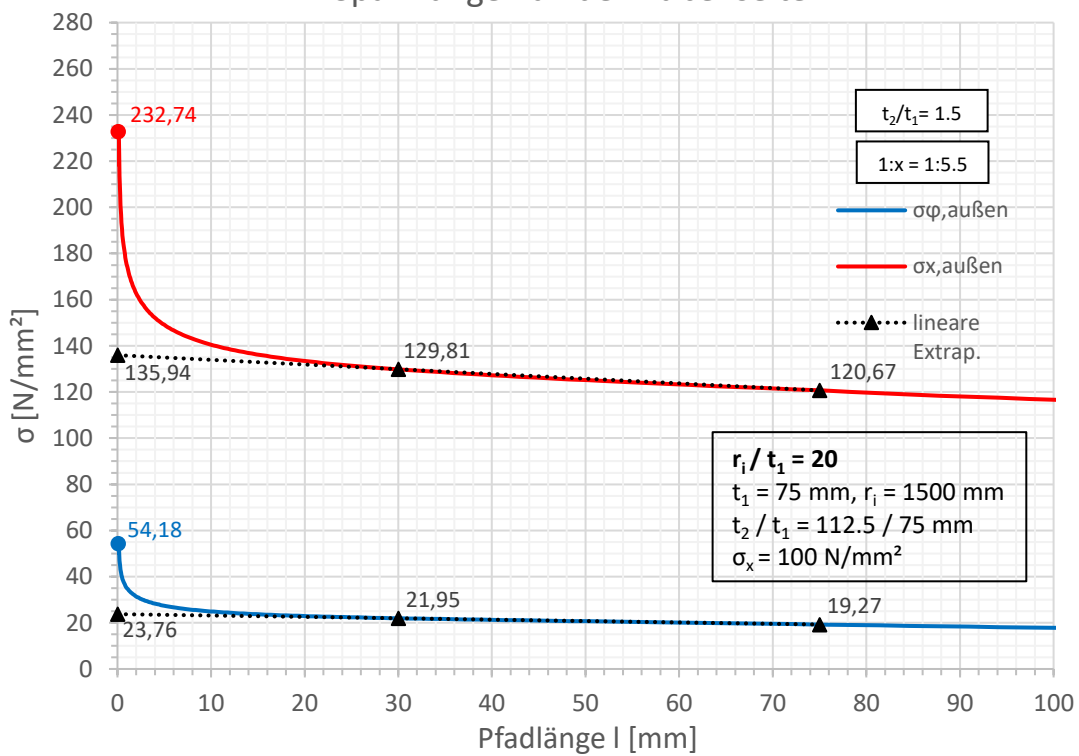


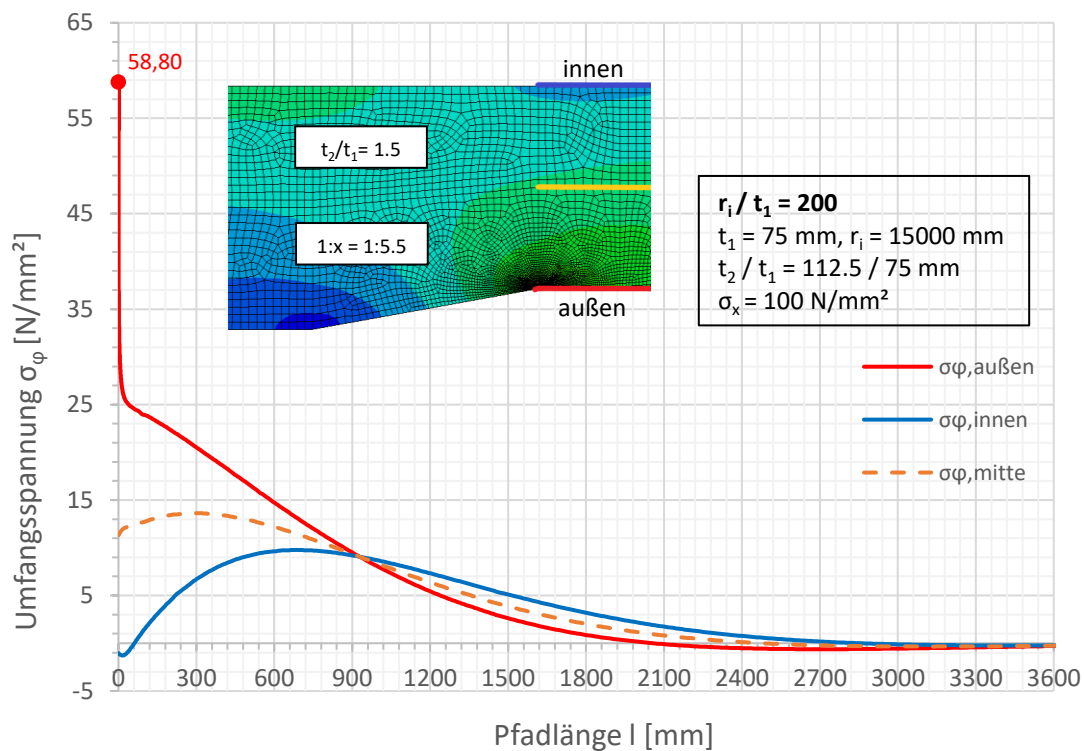
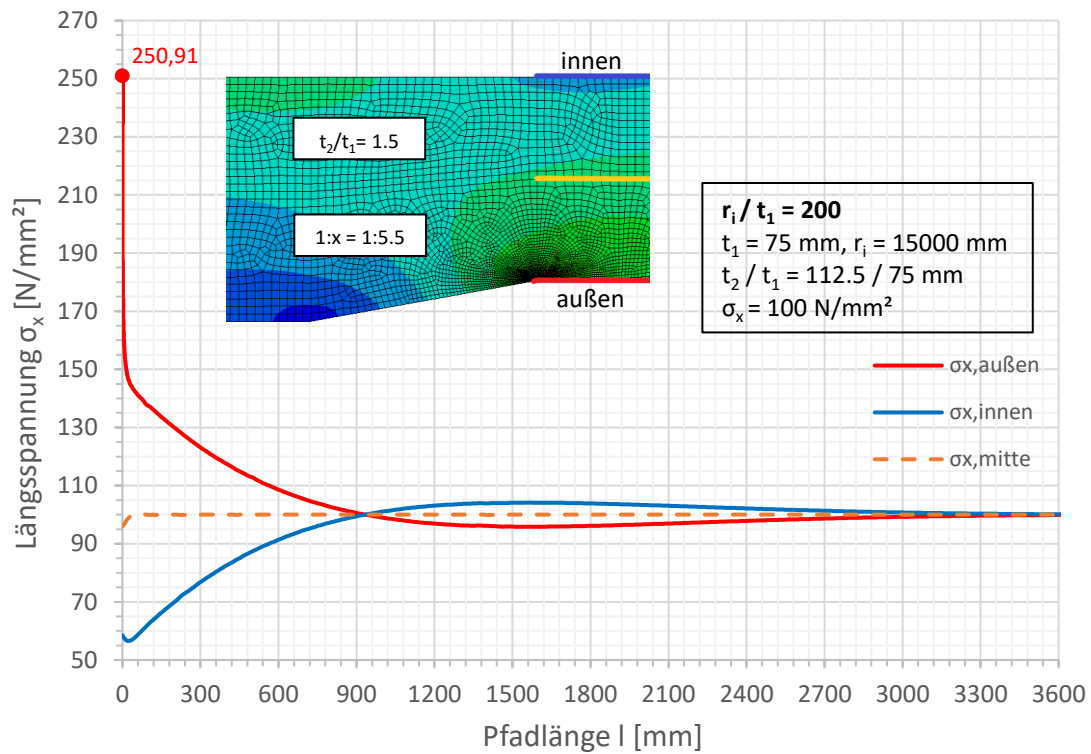


Spannungen an der Außenseite

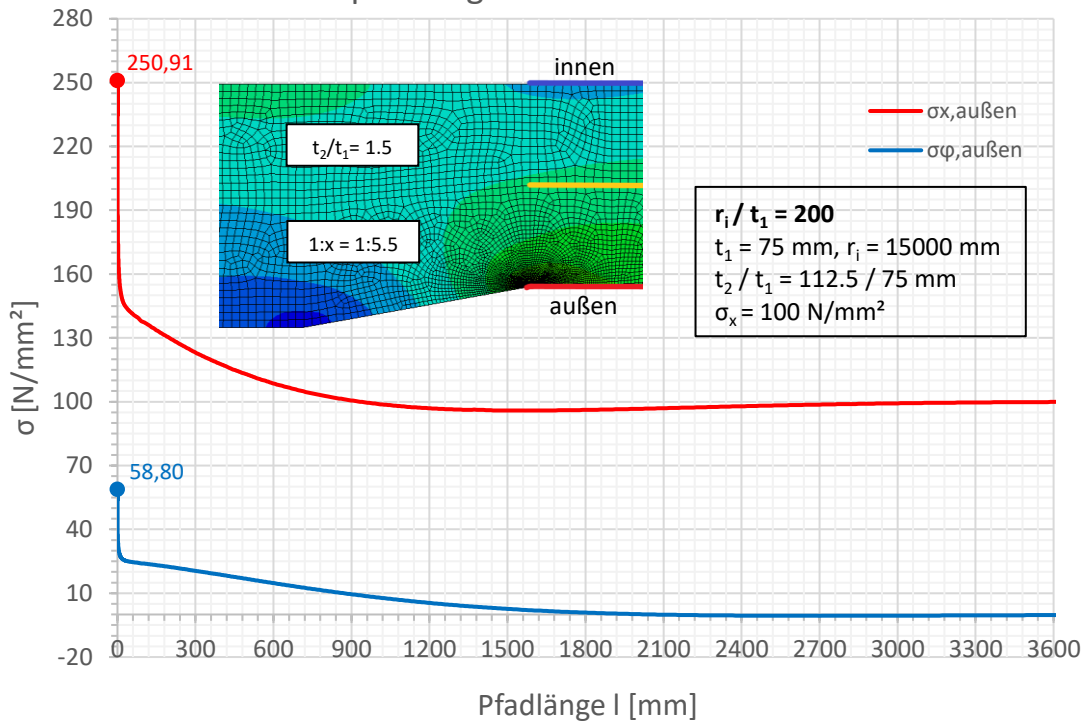


Spannungen an der Außenseite

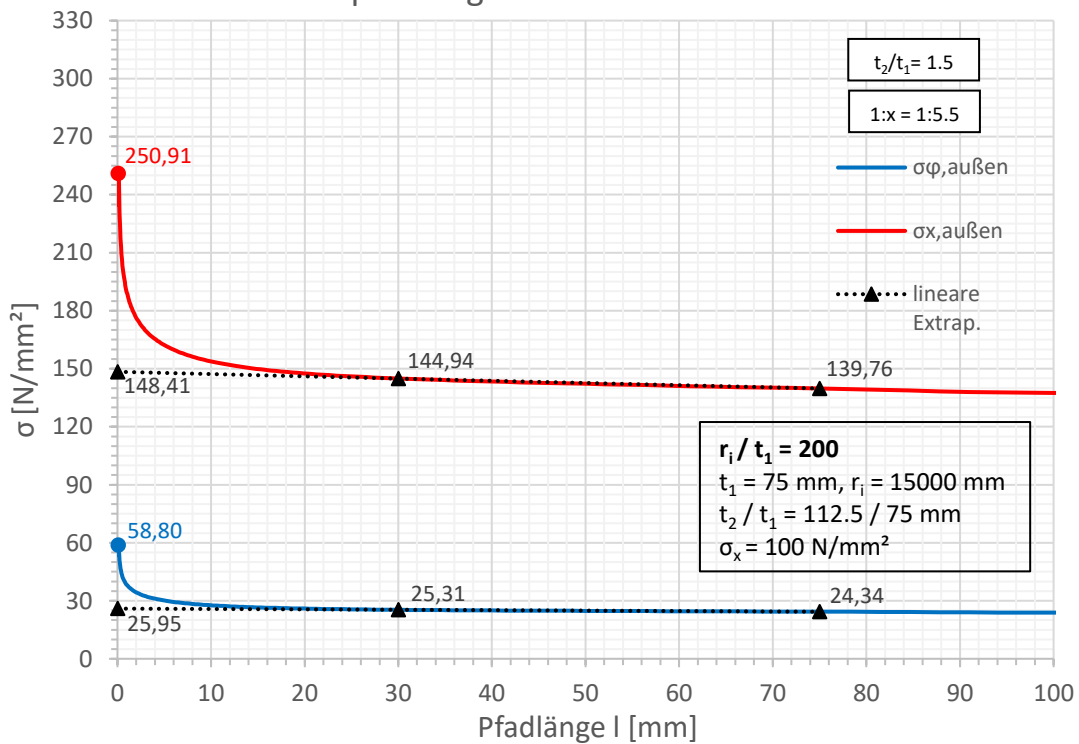


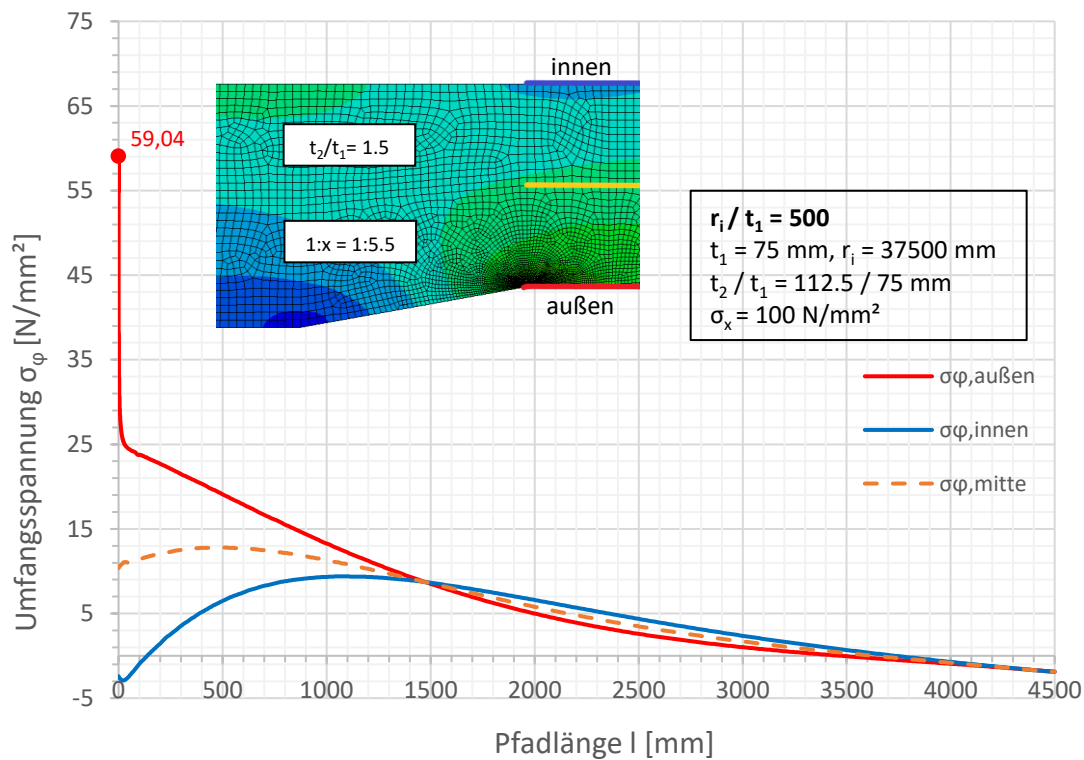
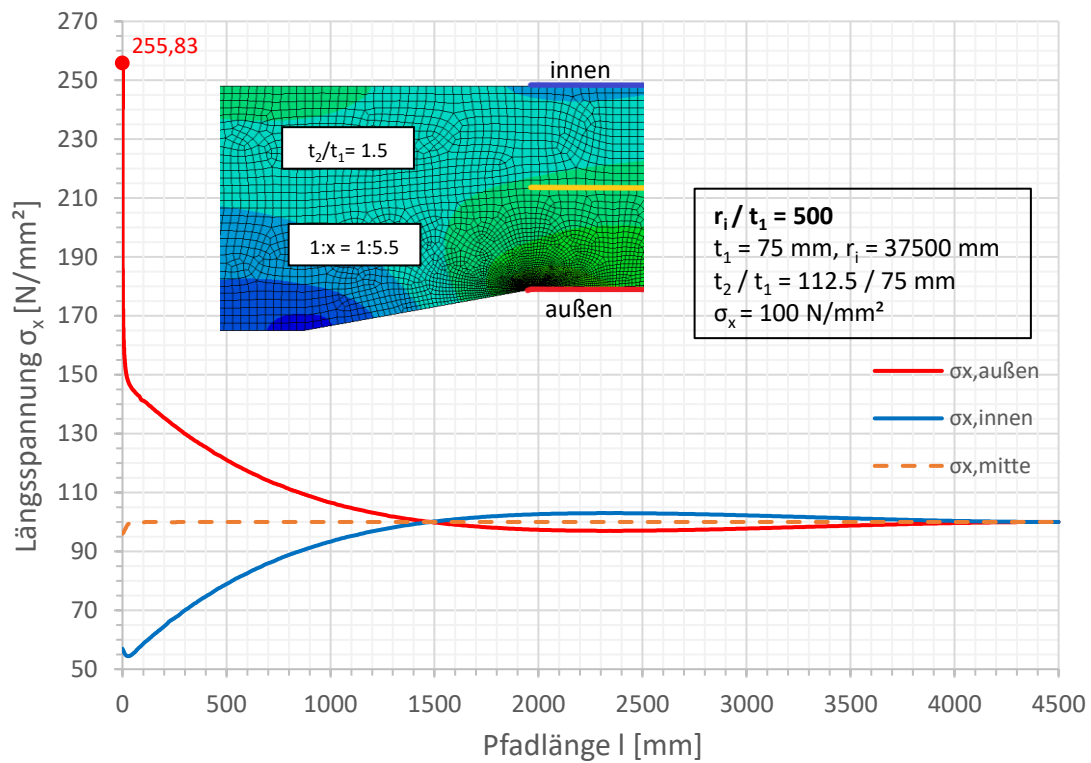


Spannungen an der Außenseite

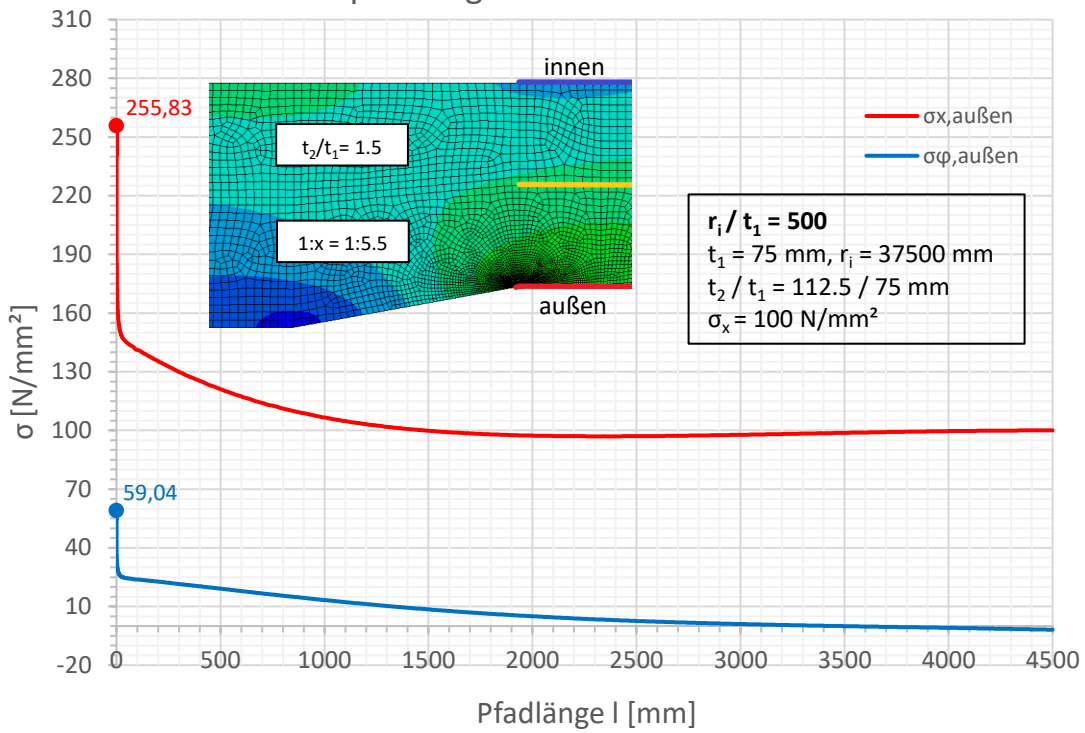


Spannungen an der Außenseite

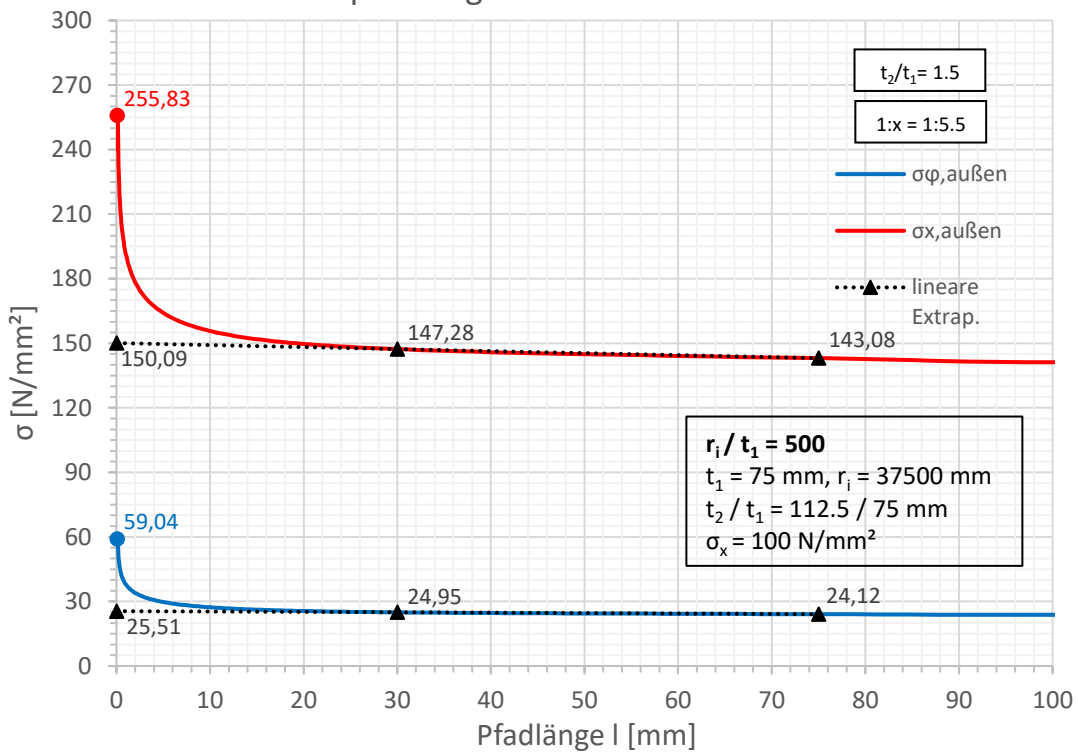


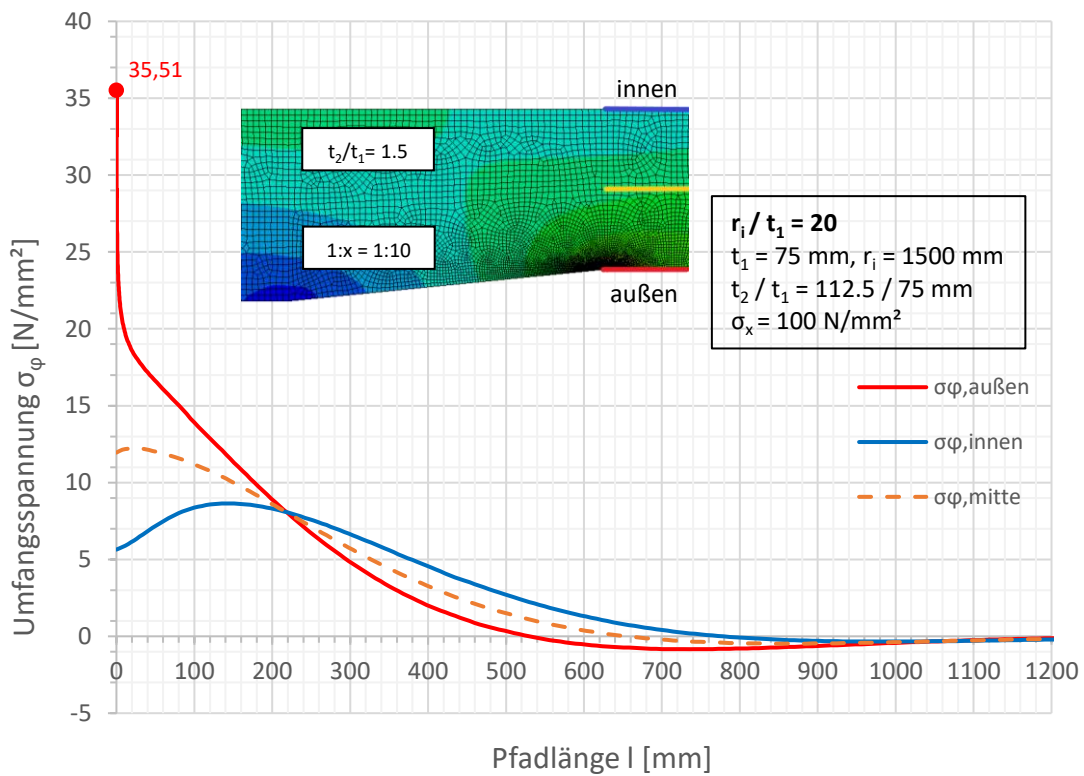
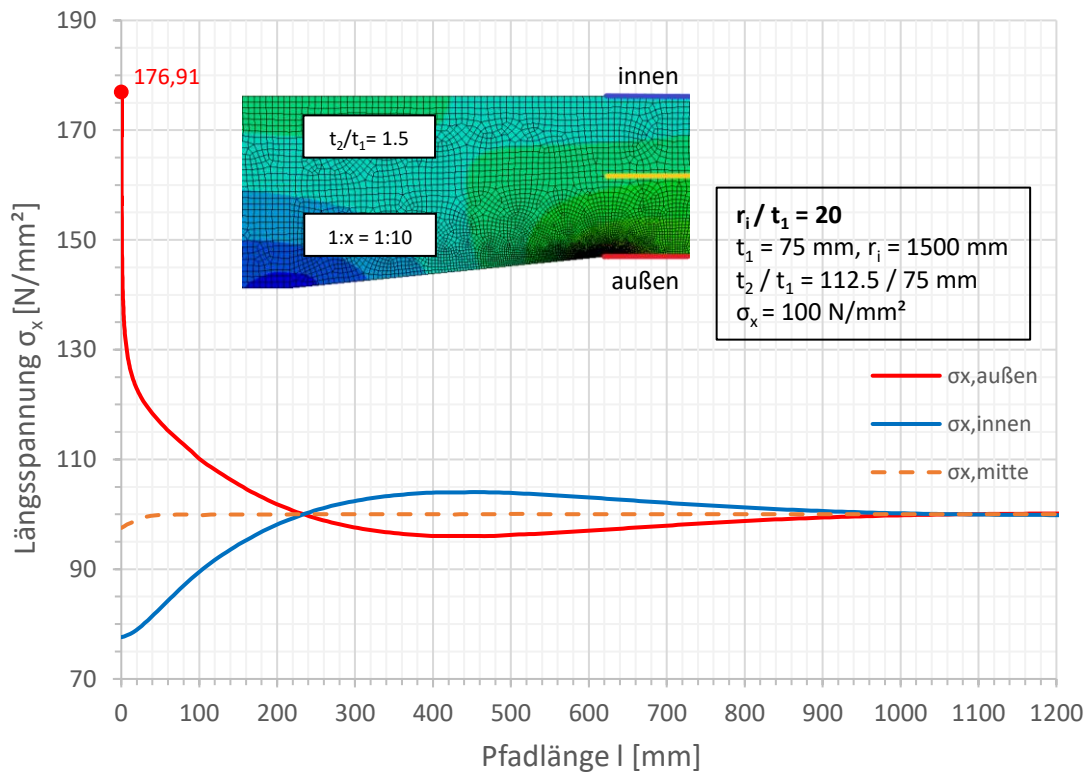


Spannungen an der Außenseite

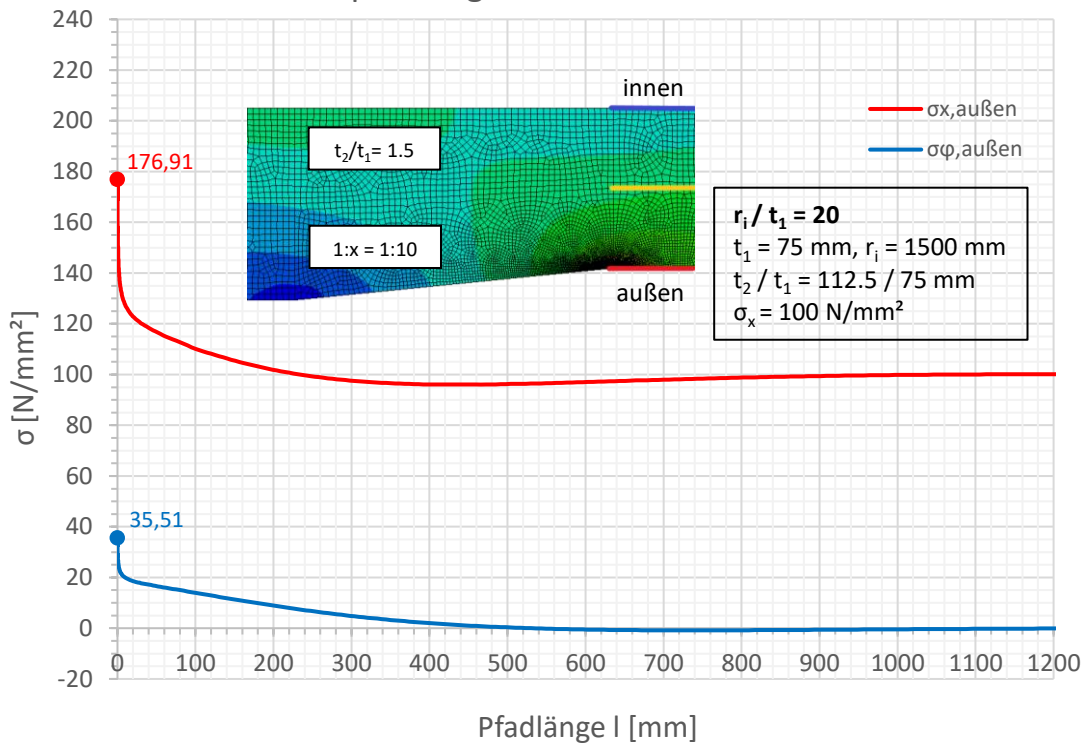


Spannungen an der Außenseite

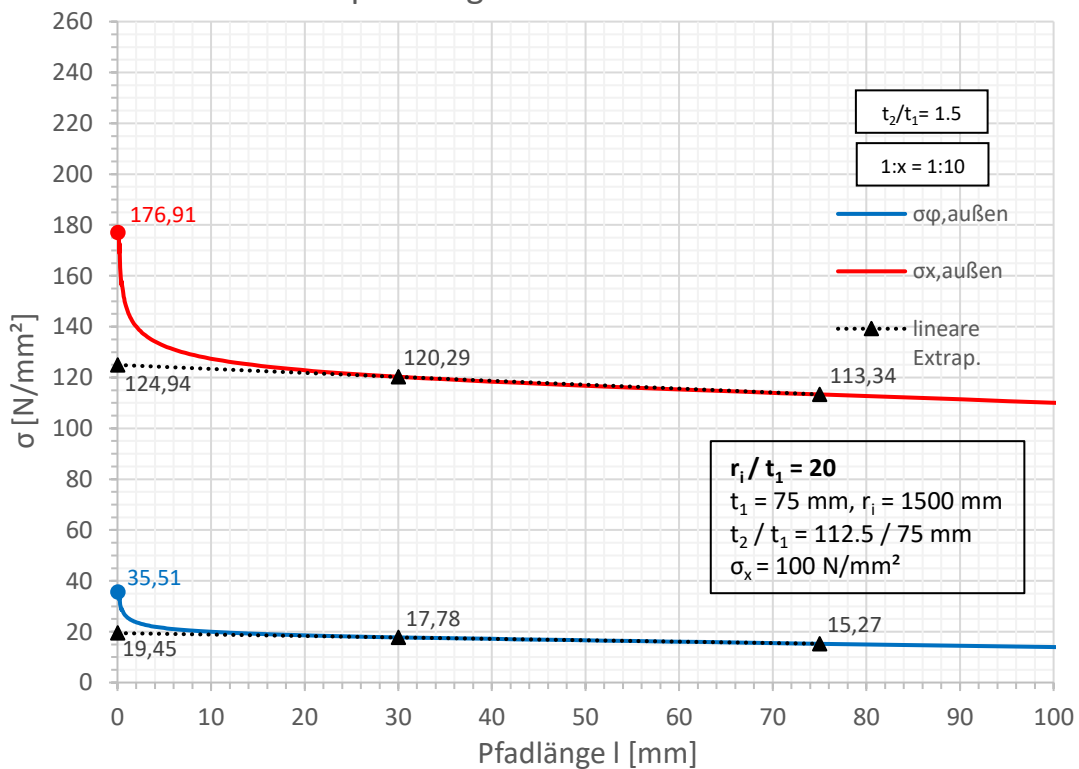


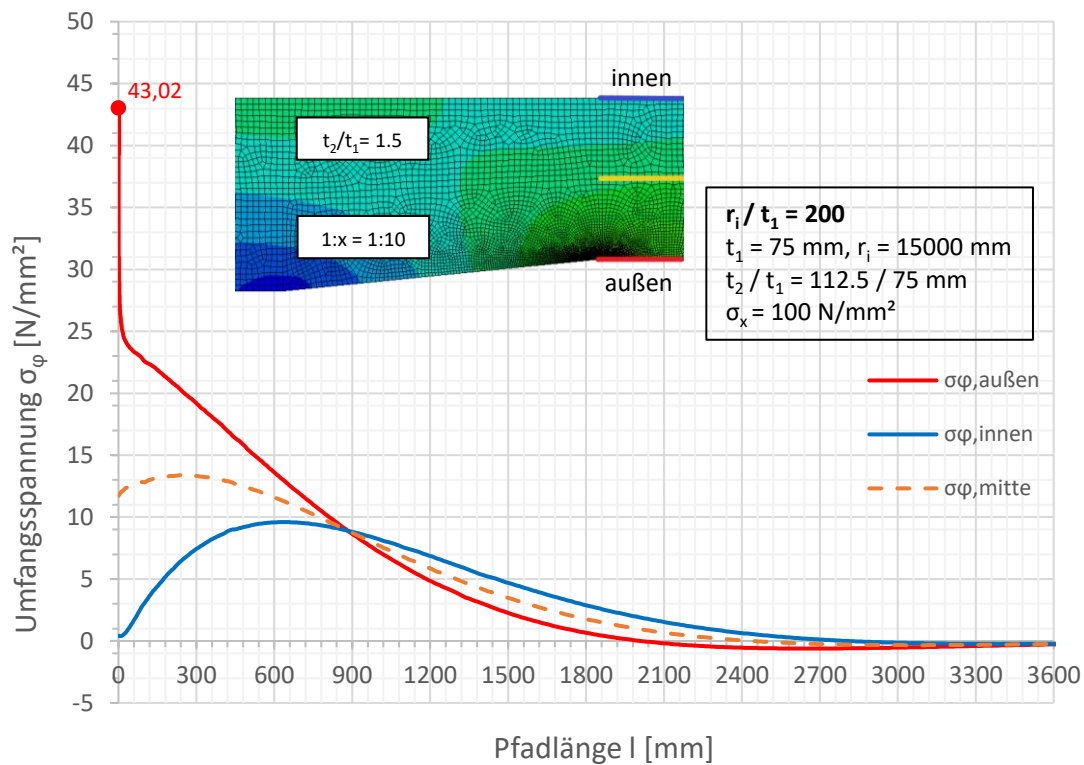
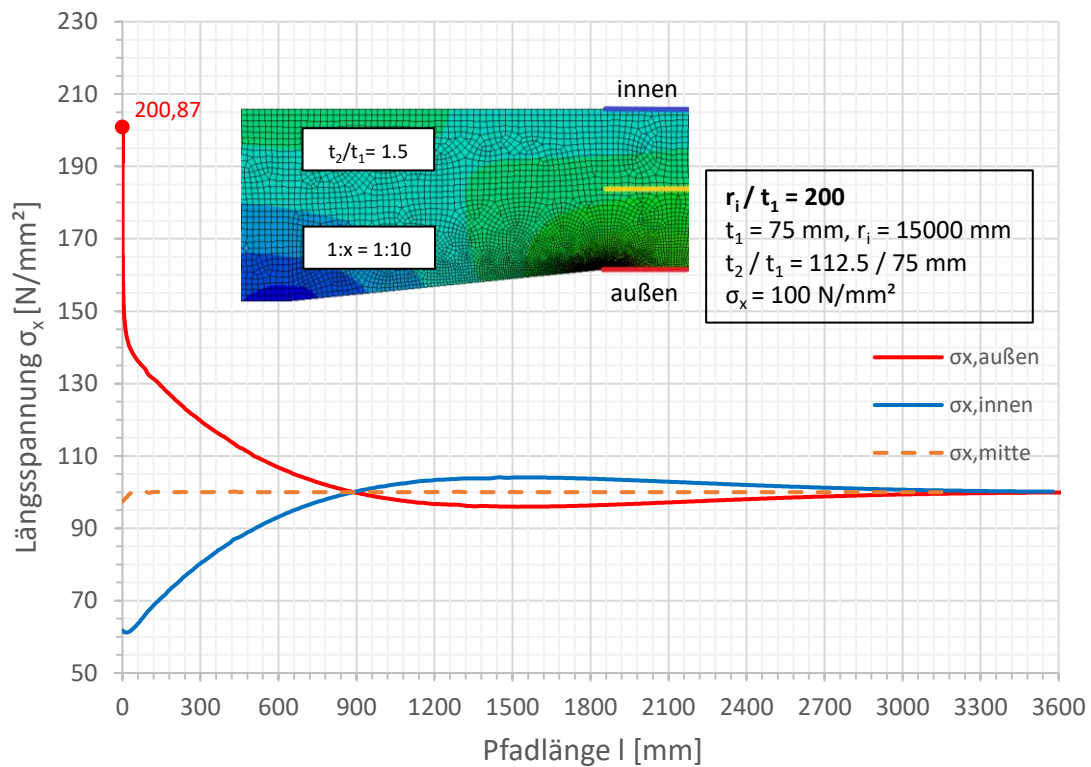


Spannungen an der Außenseite

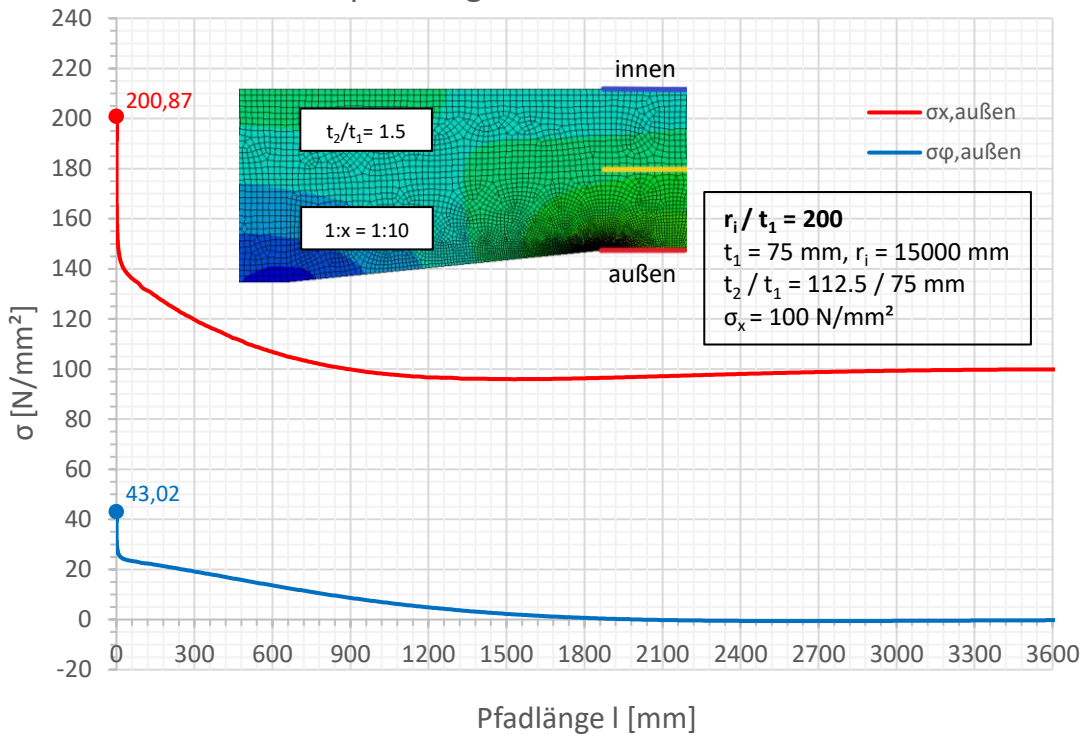


Spannungen an der Außenseite

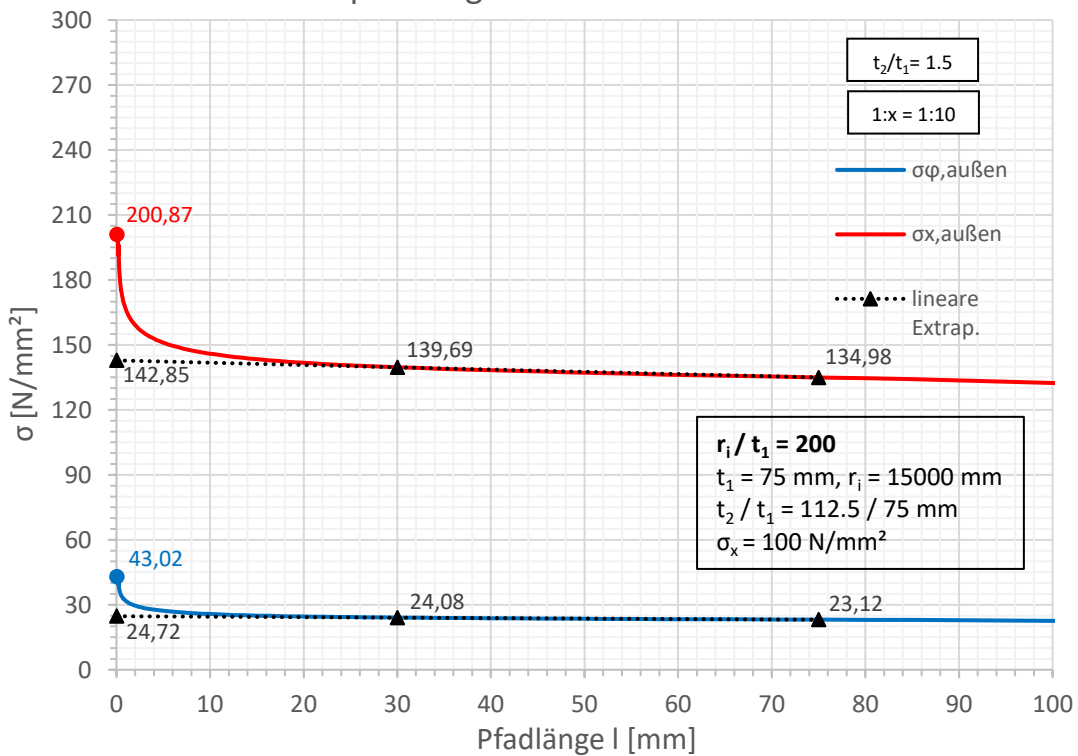


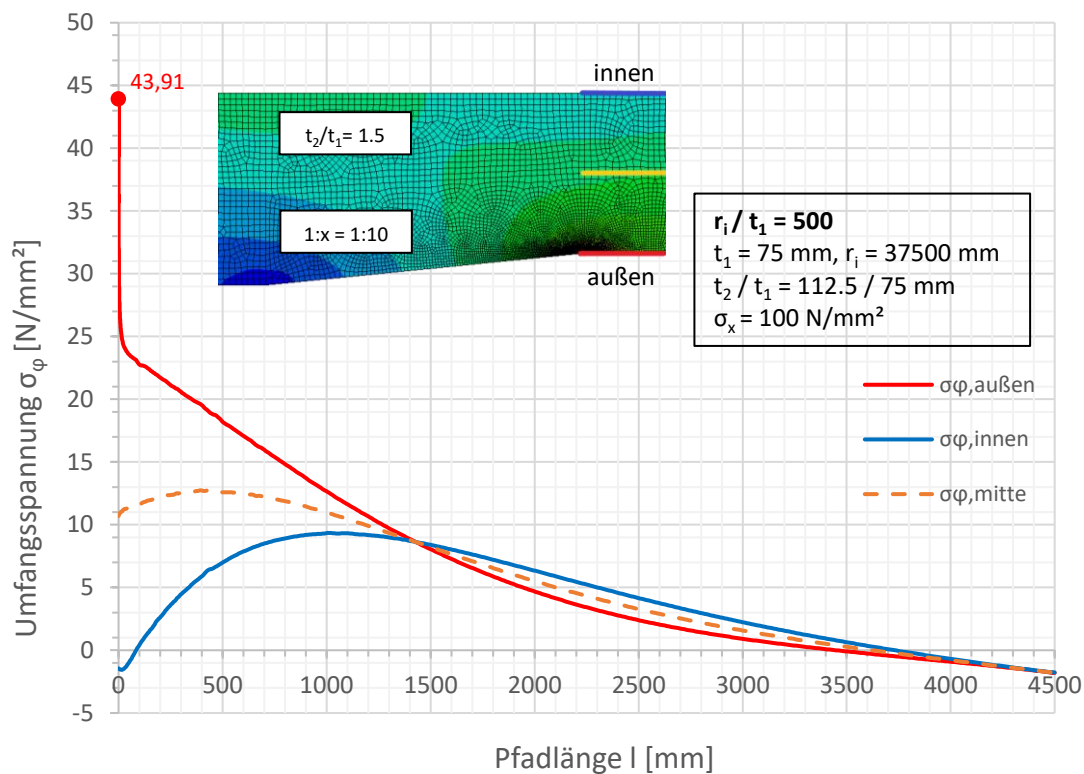
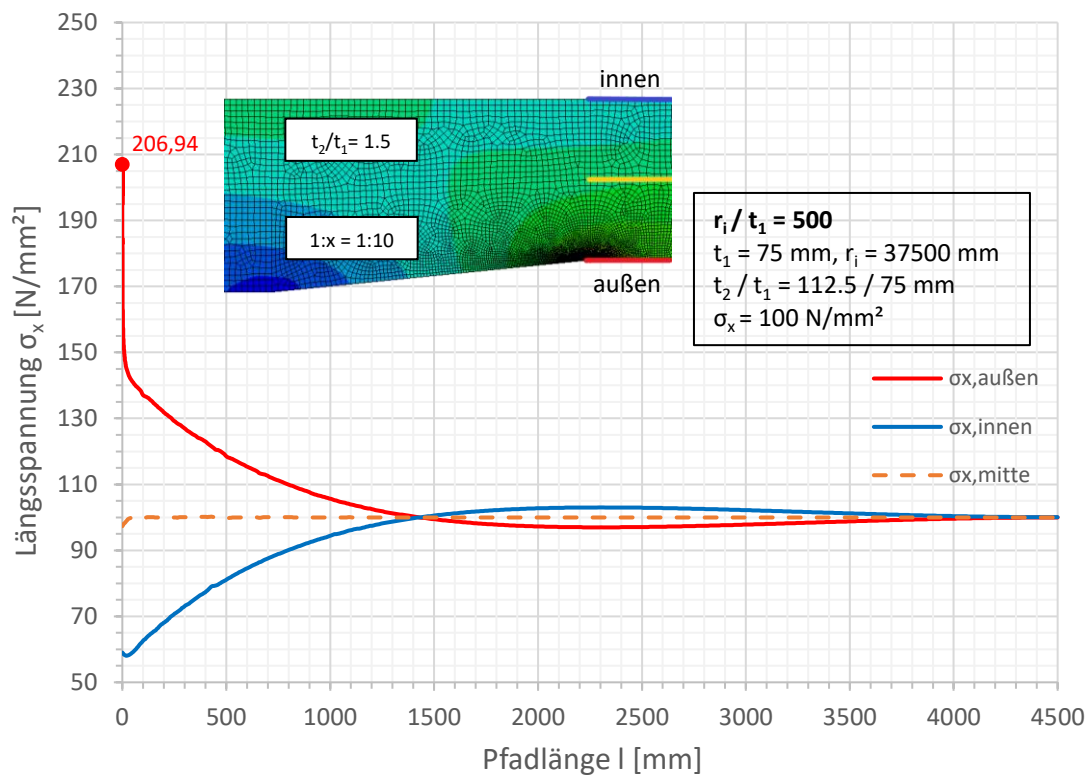


Spannungen an der Außenseite

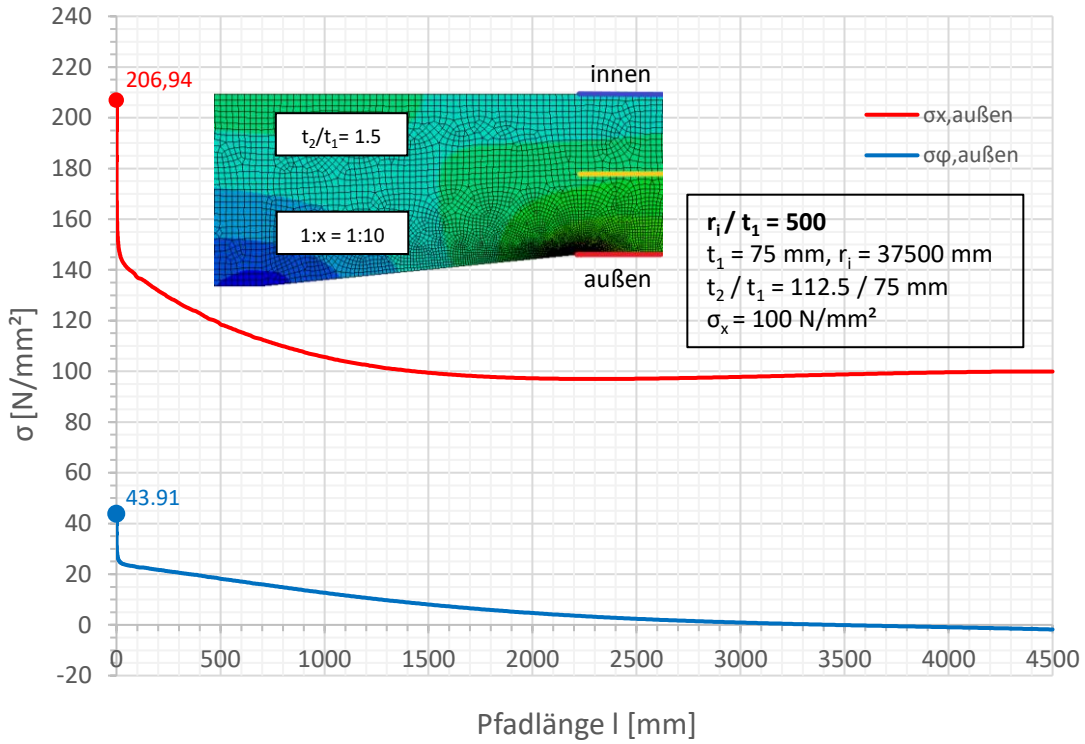


Spannungen an der Außenseite

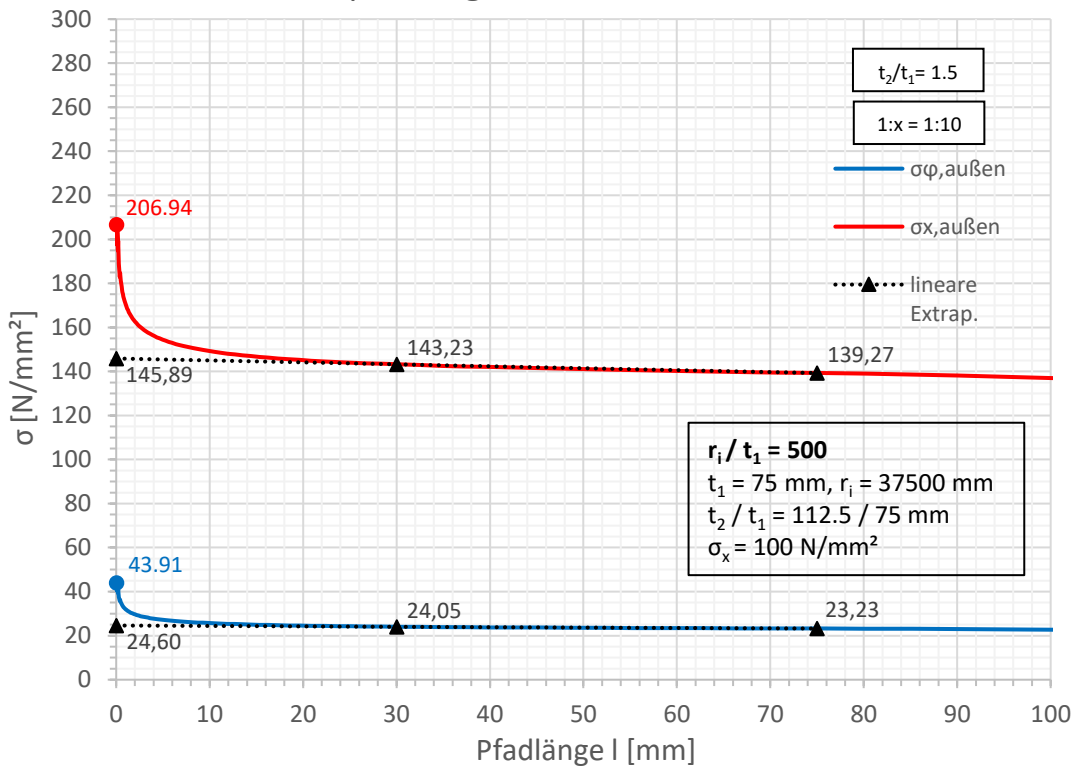


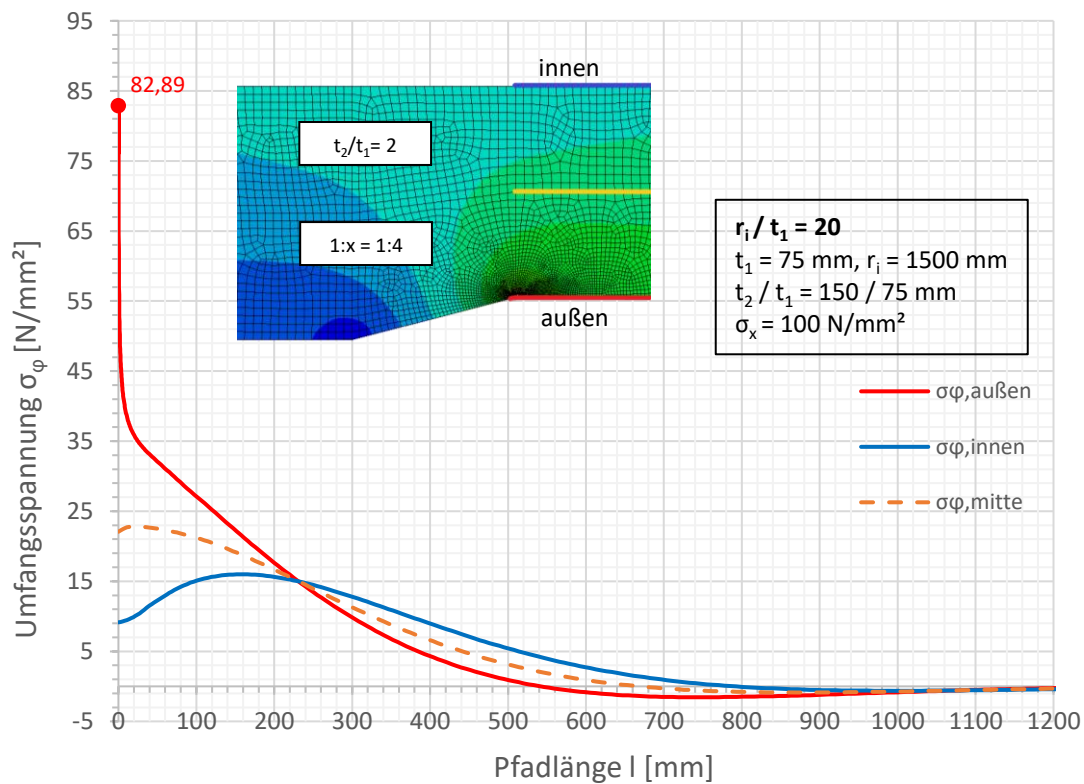
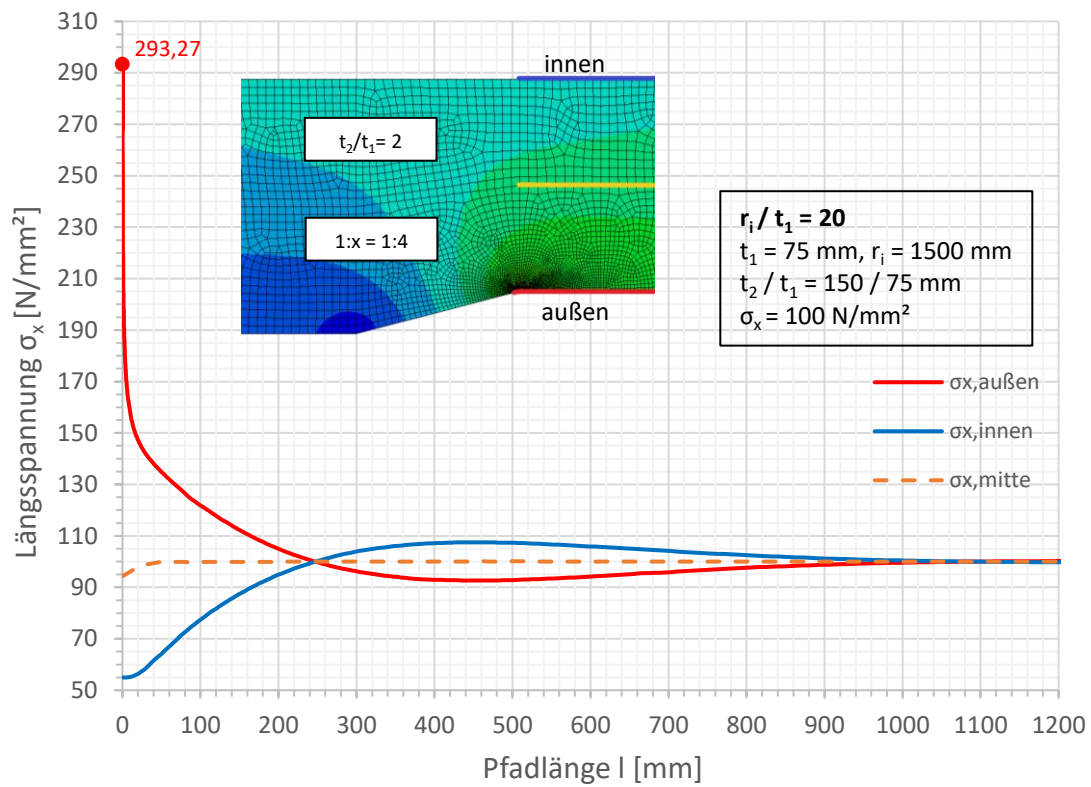


Spannungen an der Außenseite

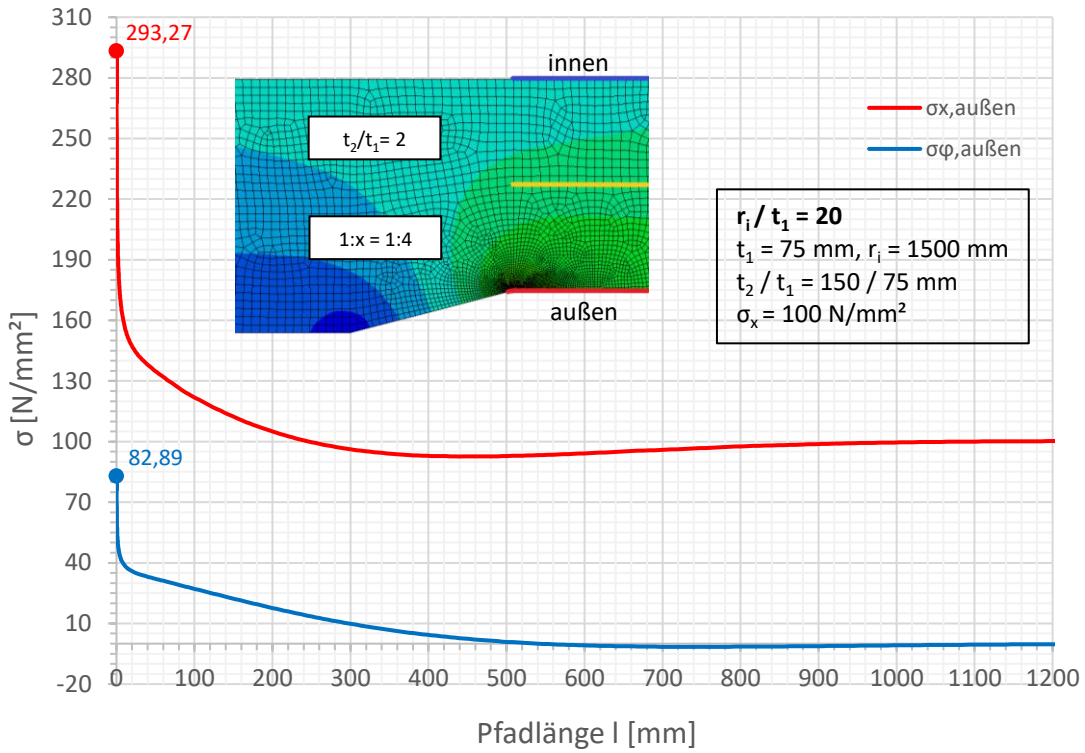


Spannungen an der Außenseite

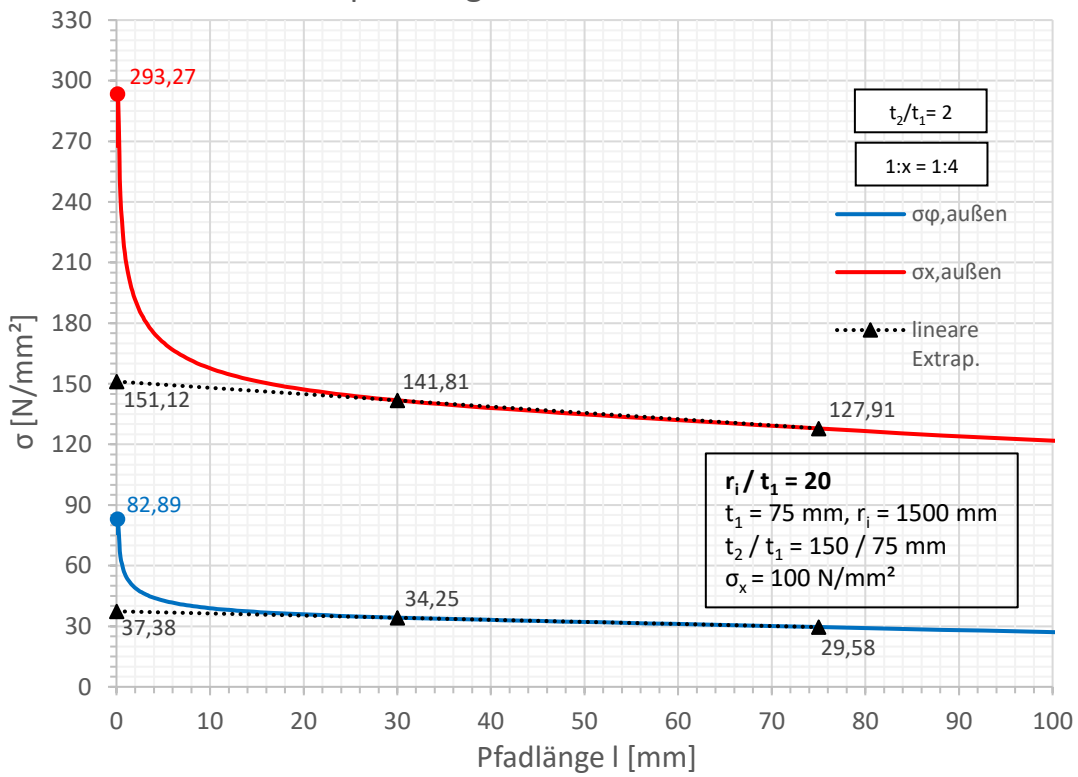


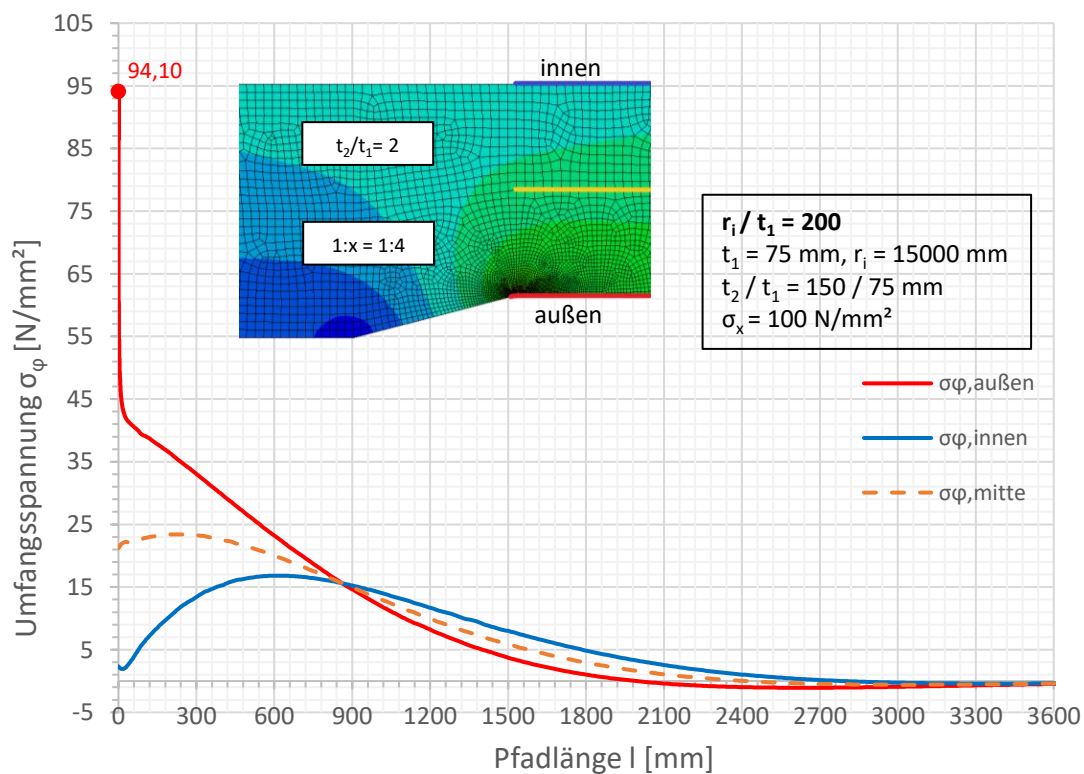
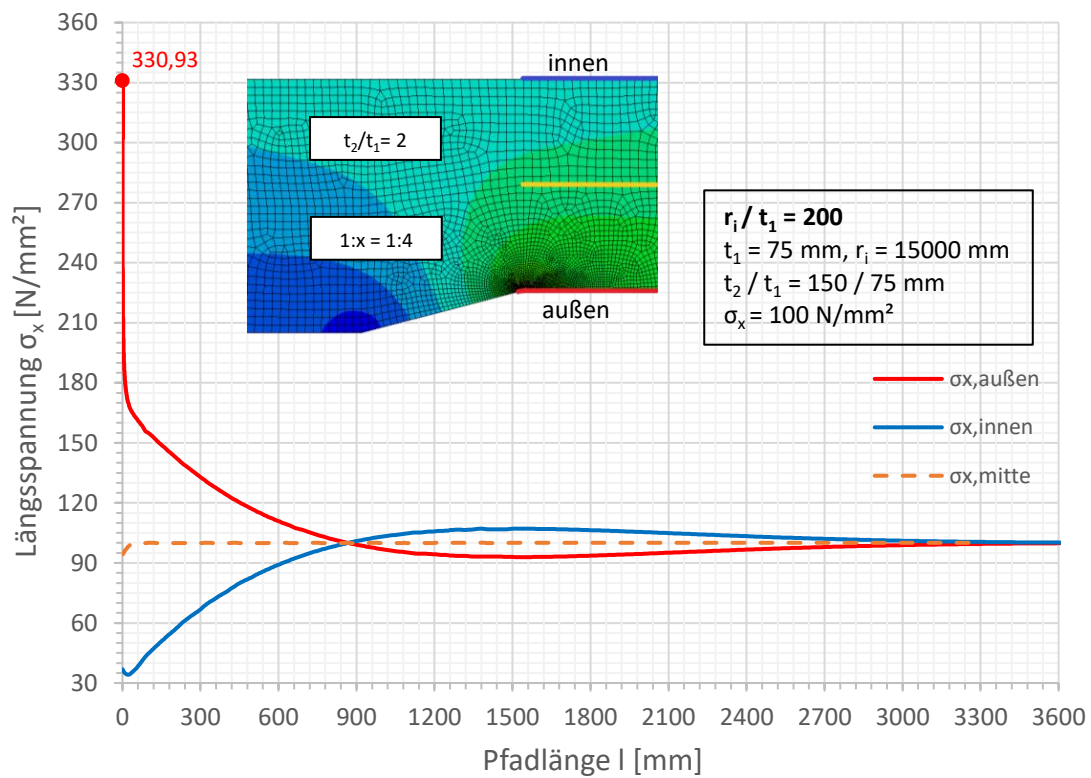


Spannungen an der Außenseite

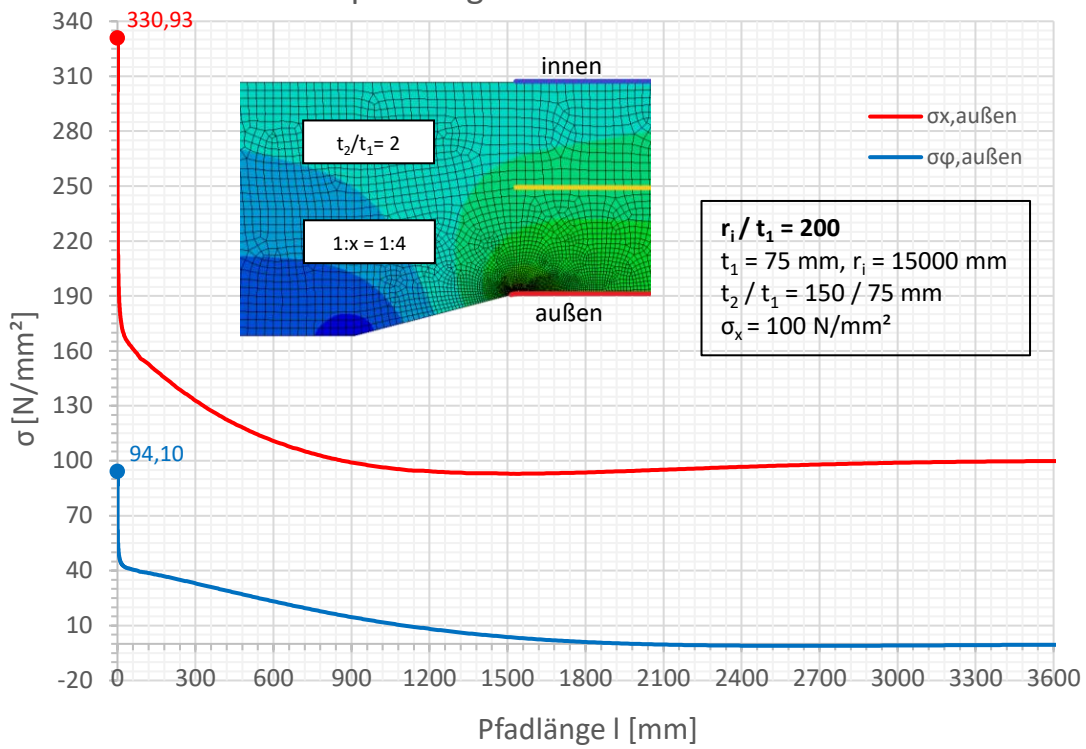


Spannungen an der Außenseite

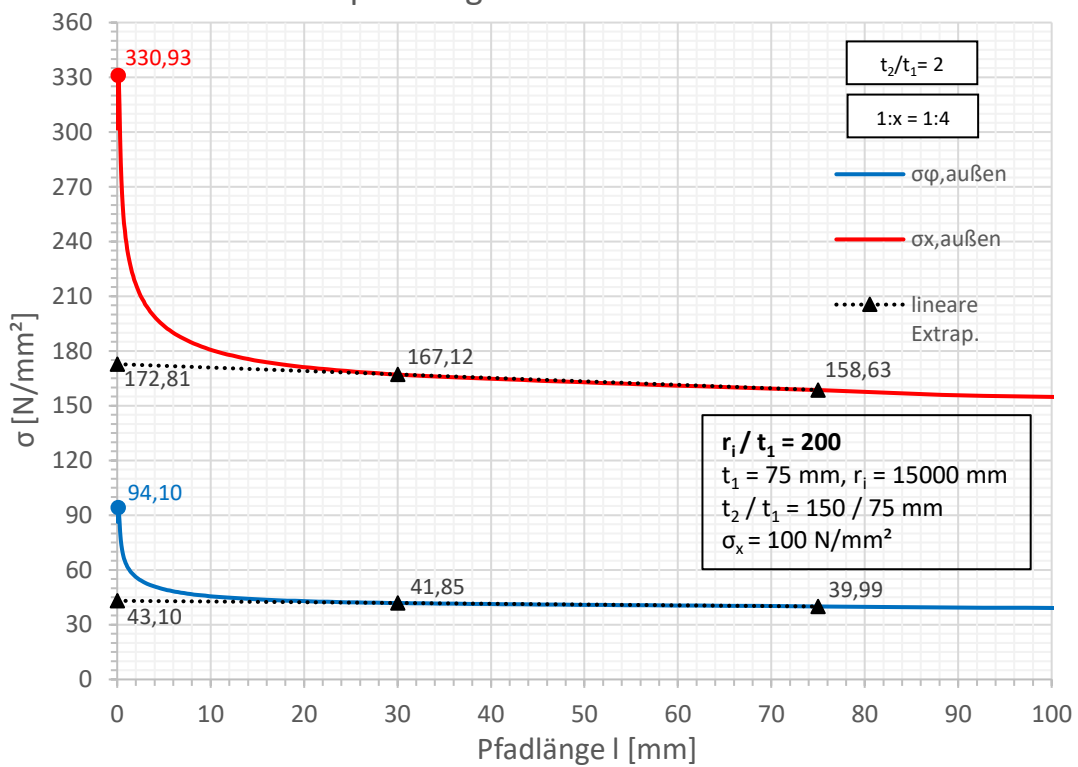


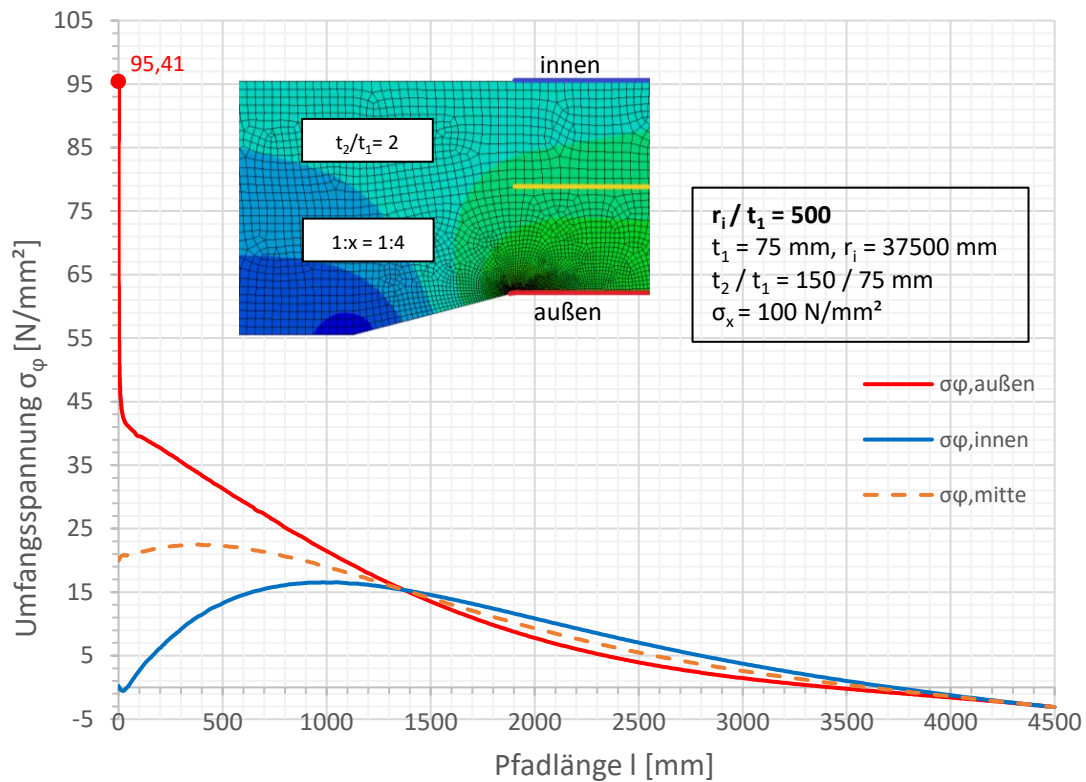
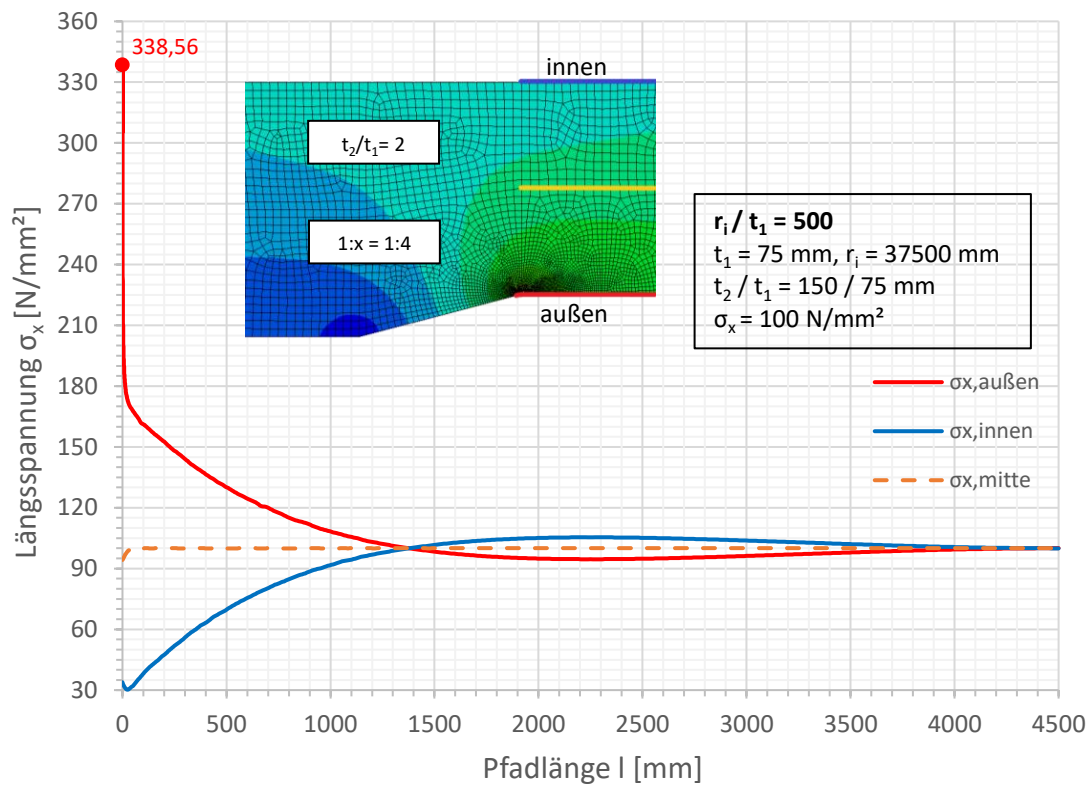


Spannungen an der Außenseite

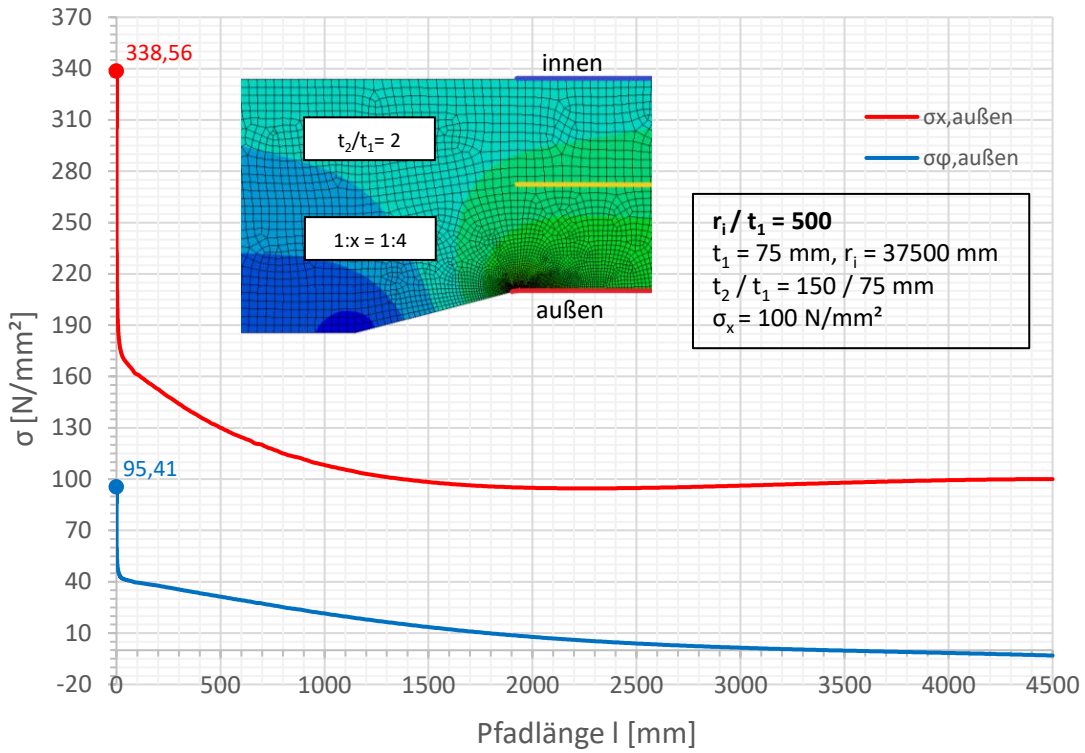


Spannungen an der Außenseite

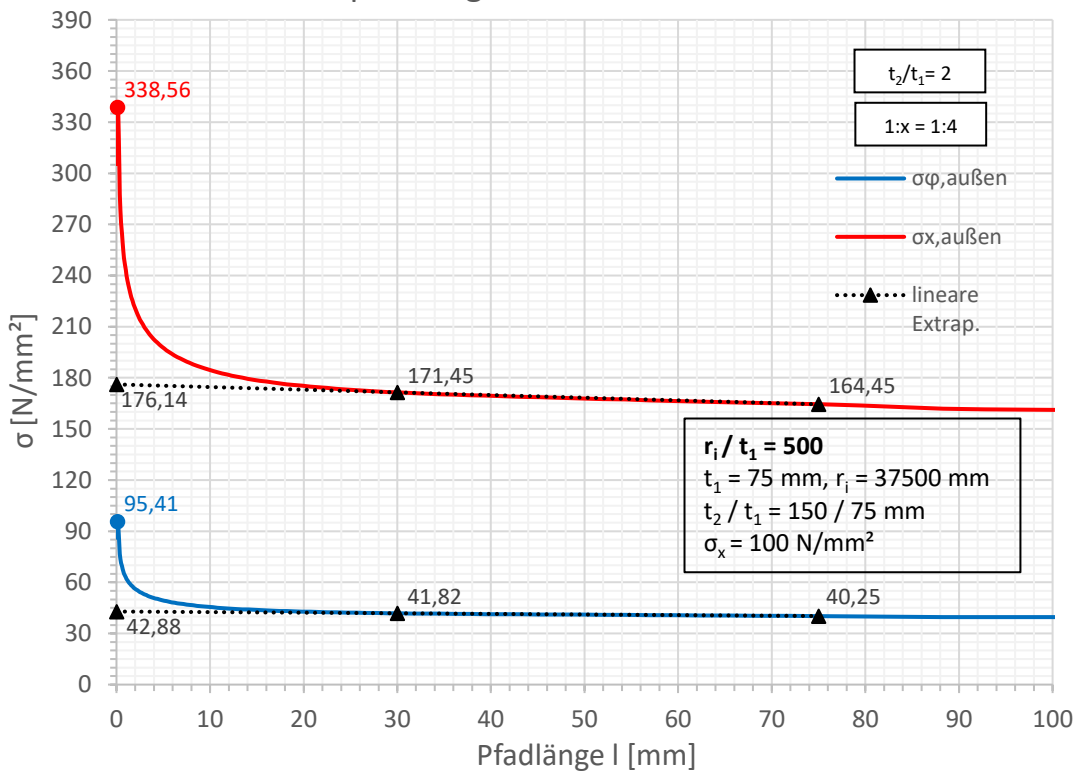


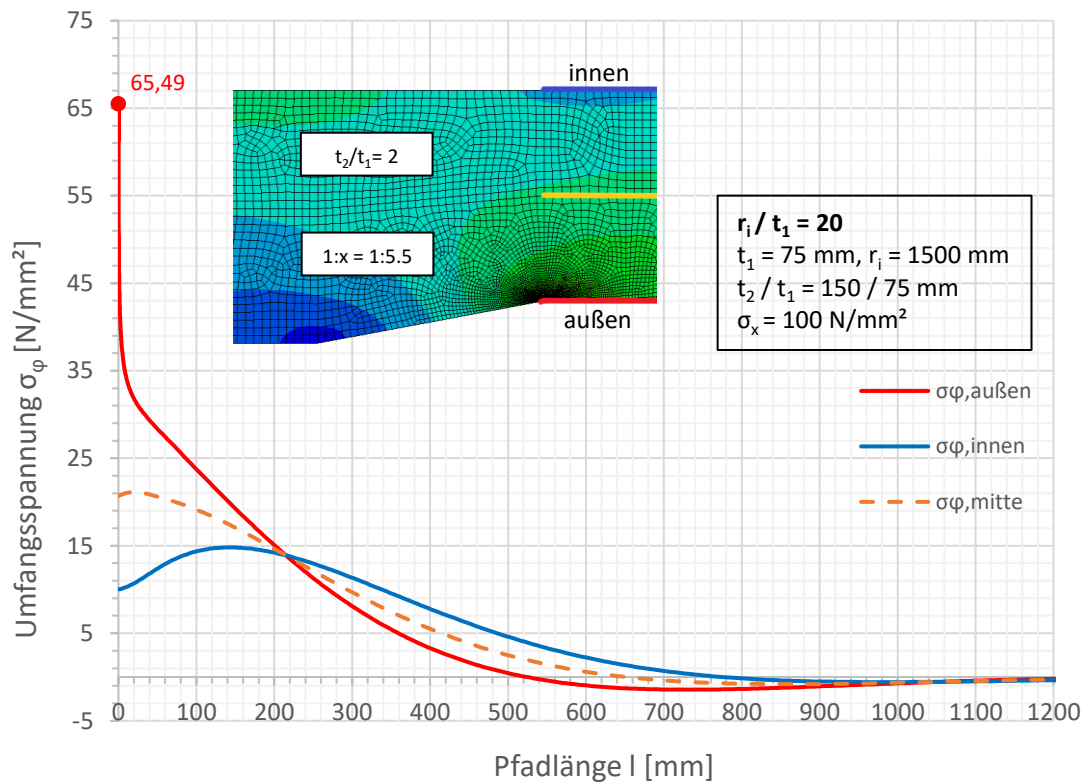
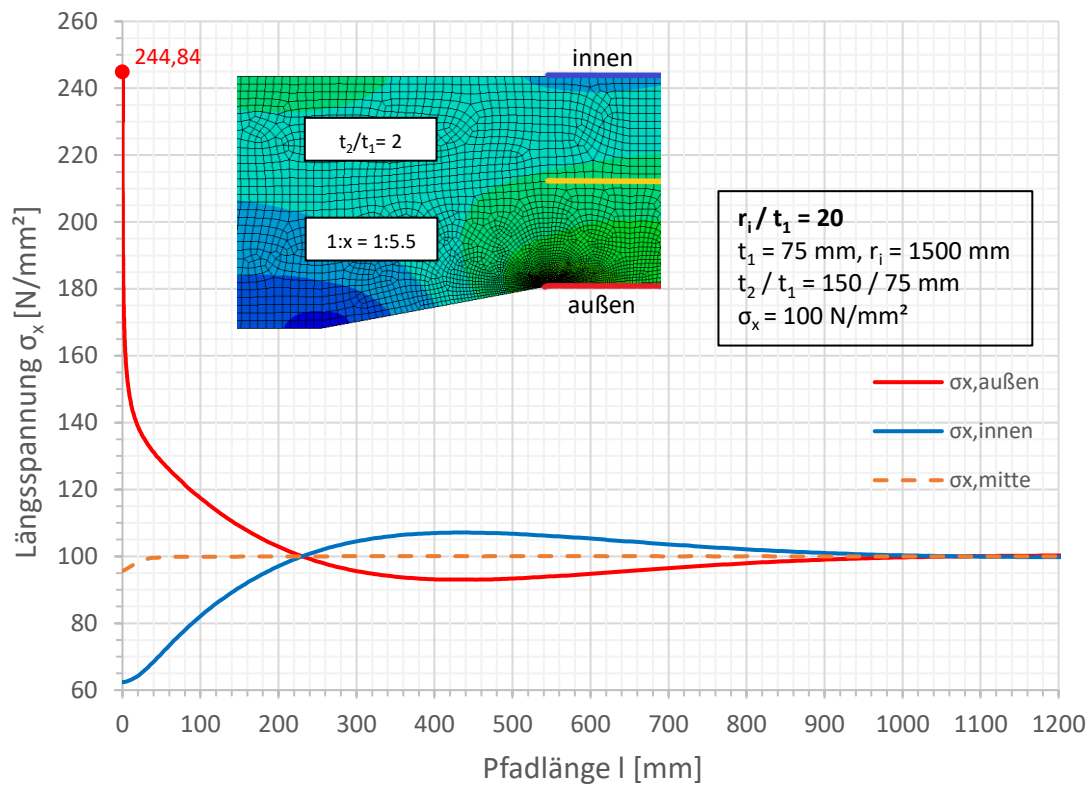


Spannungen an der Außenseite

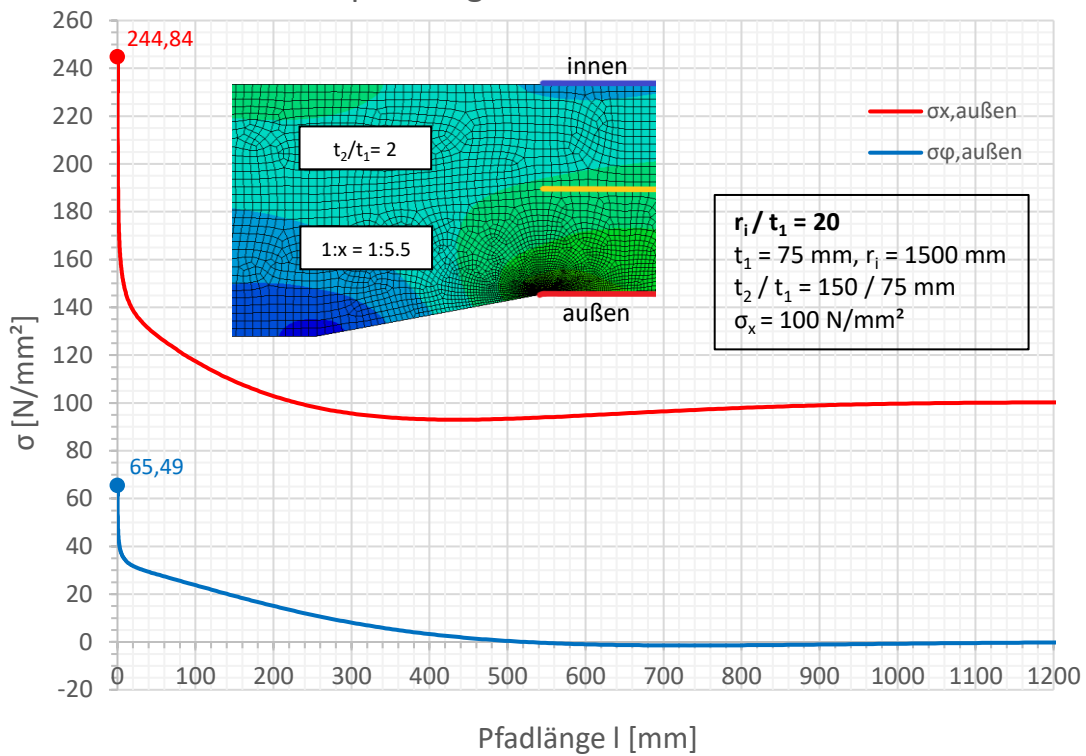


Spannungen an der Außenseite

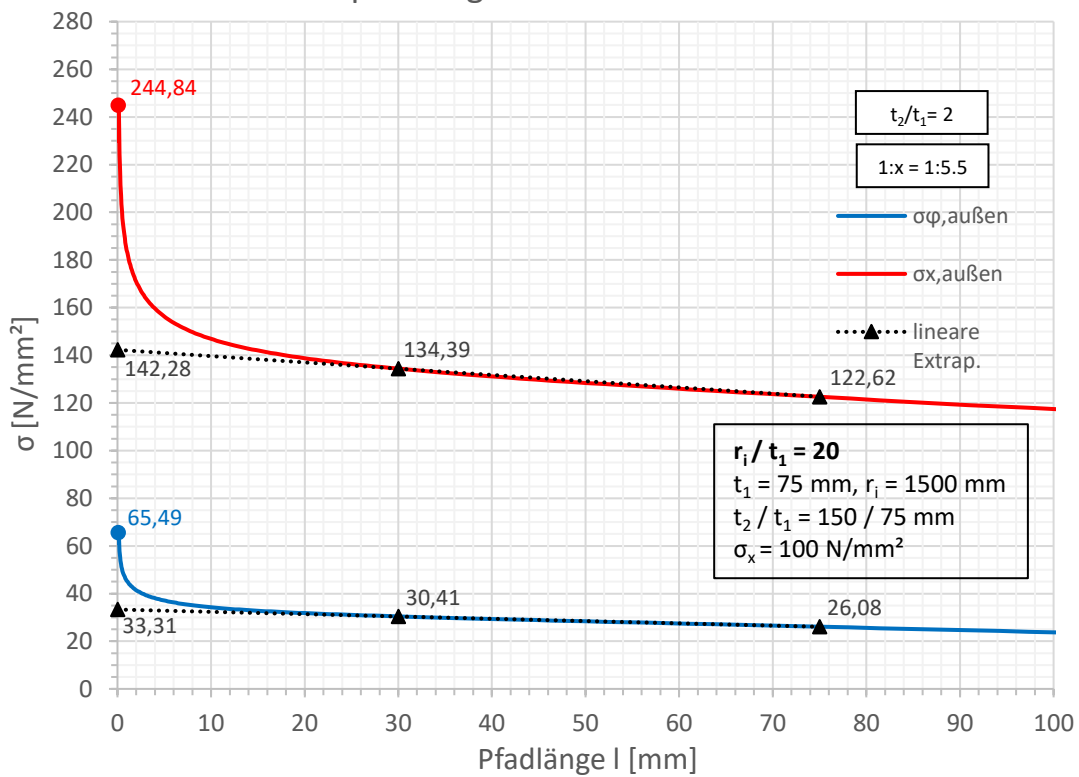


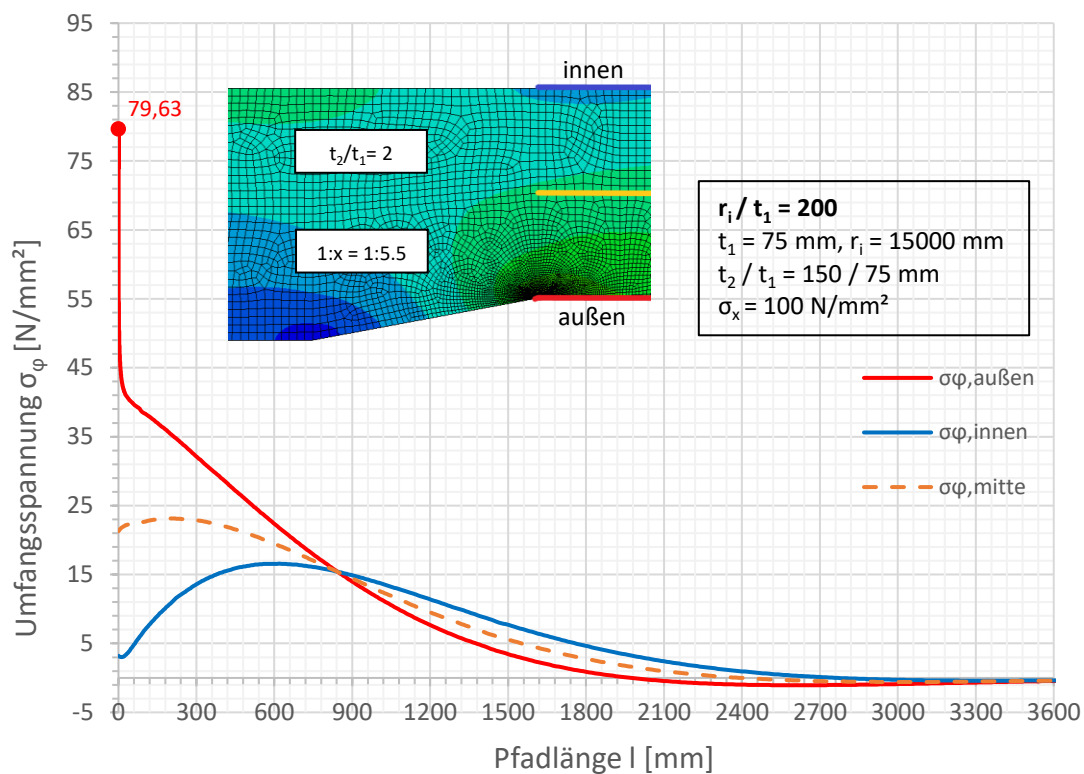
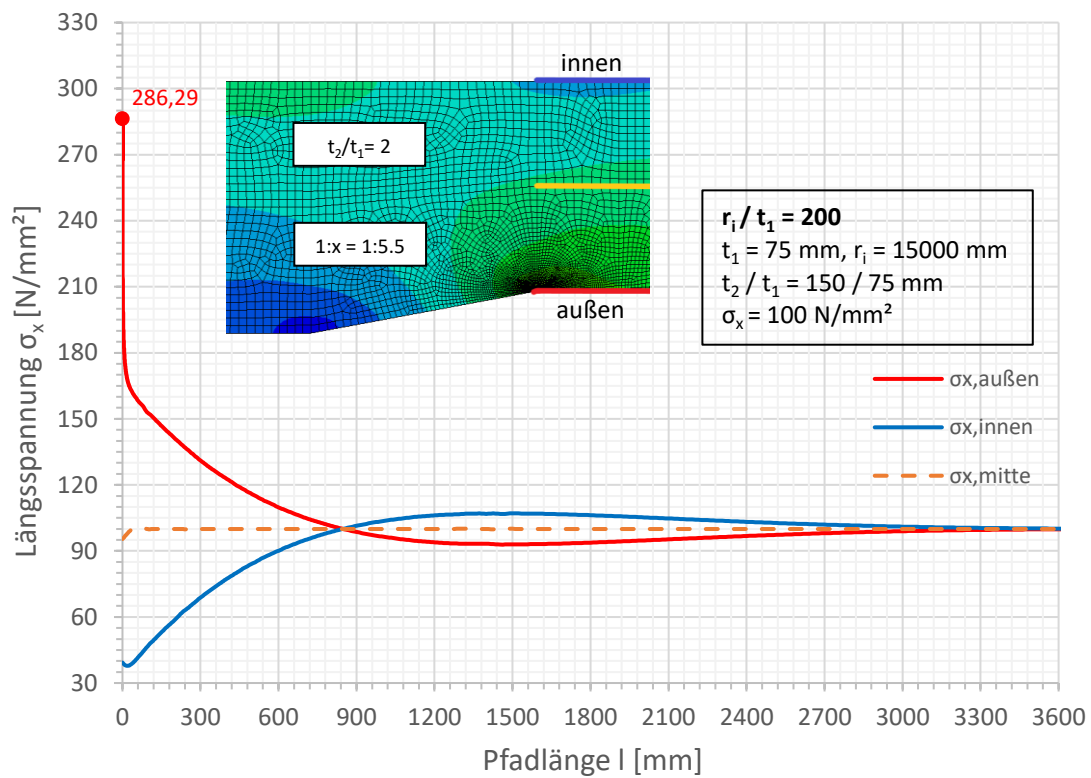


Spannungen an der Außenseite

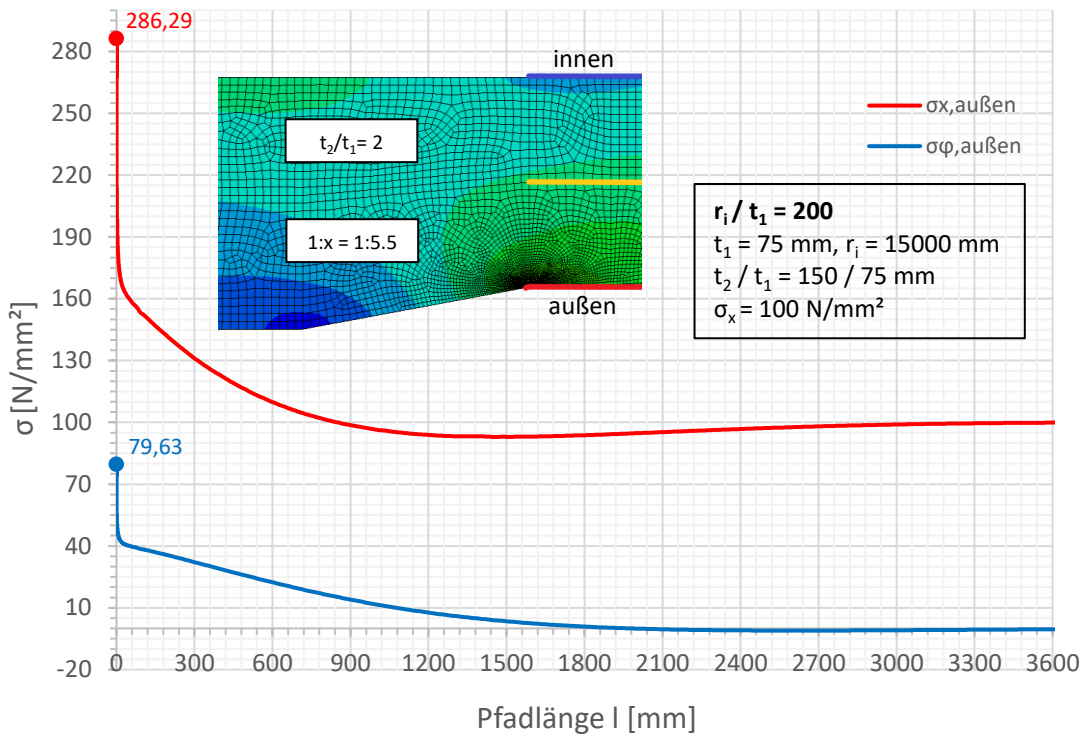


Spannungen an der Außenseite

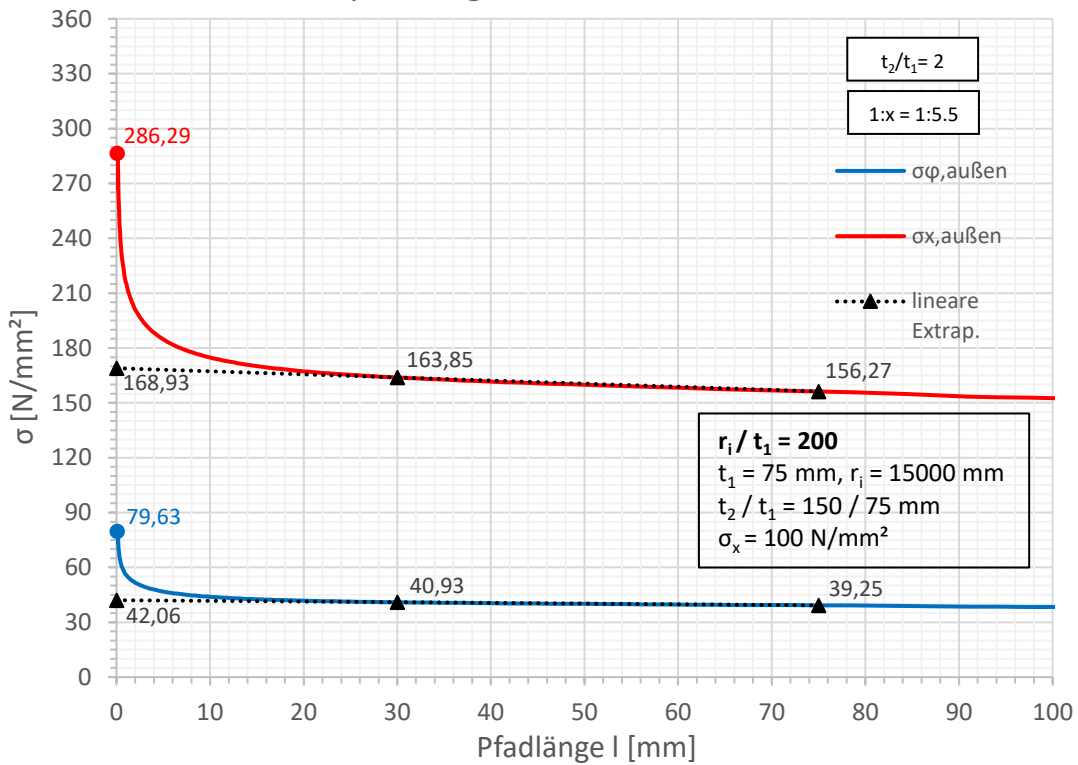


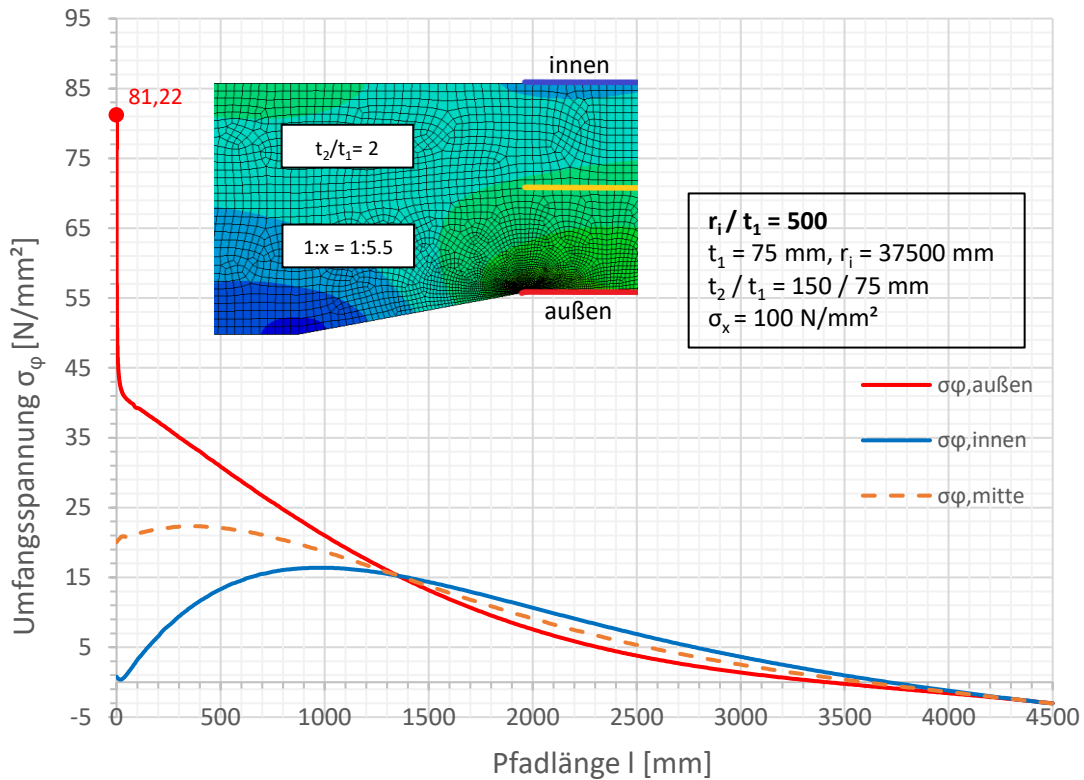
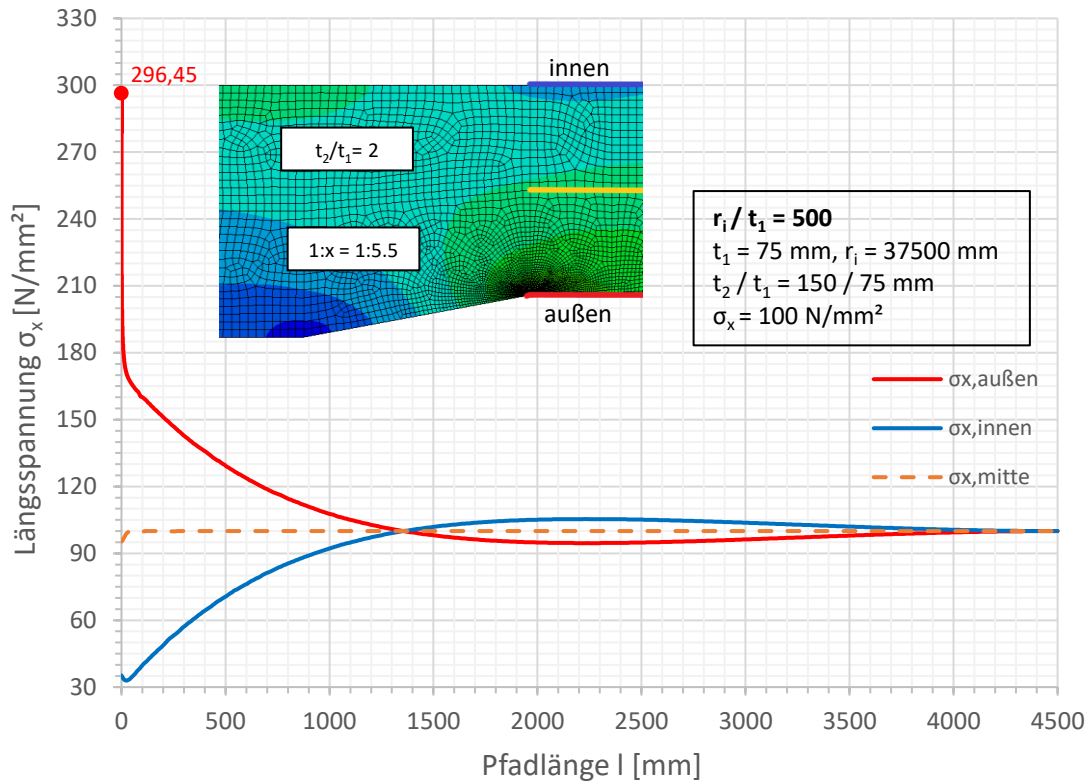


Spannungen an der Außenseite

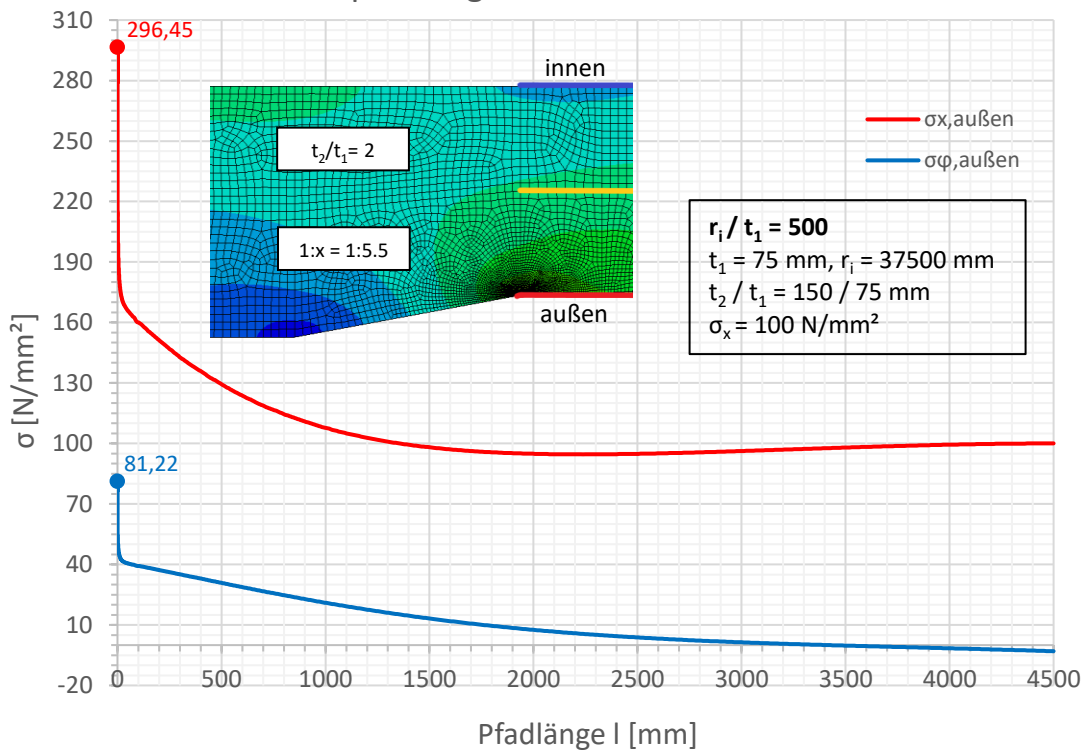


Spannungen an der Außenseite

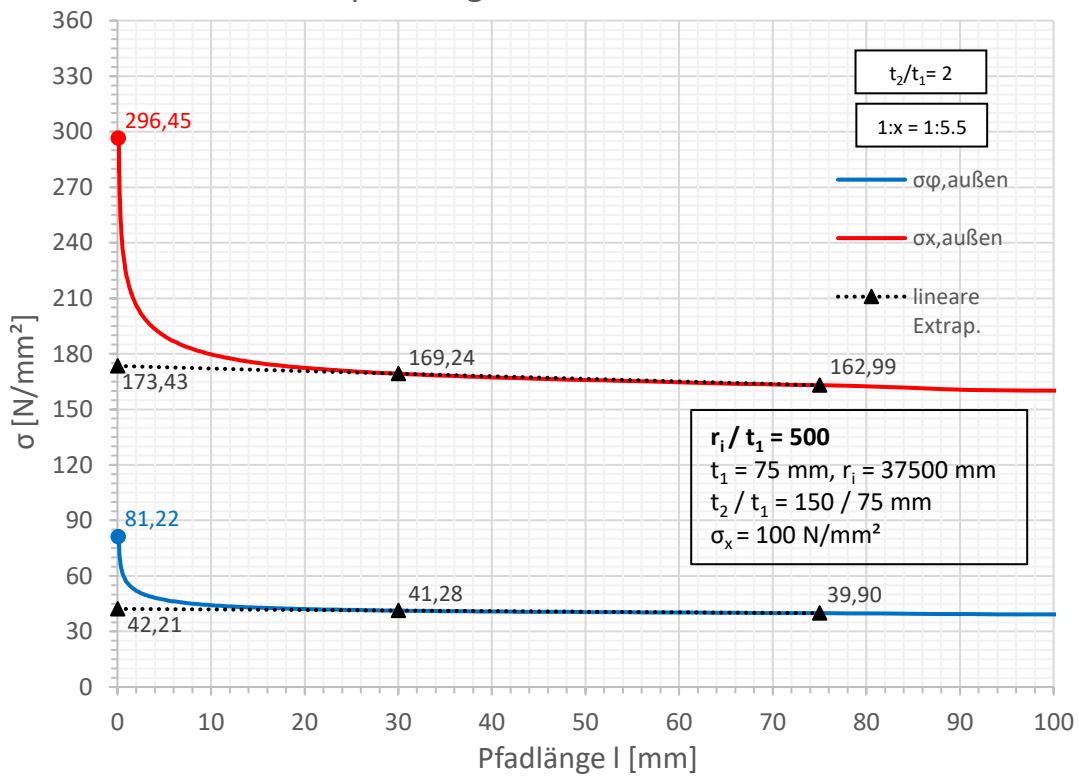


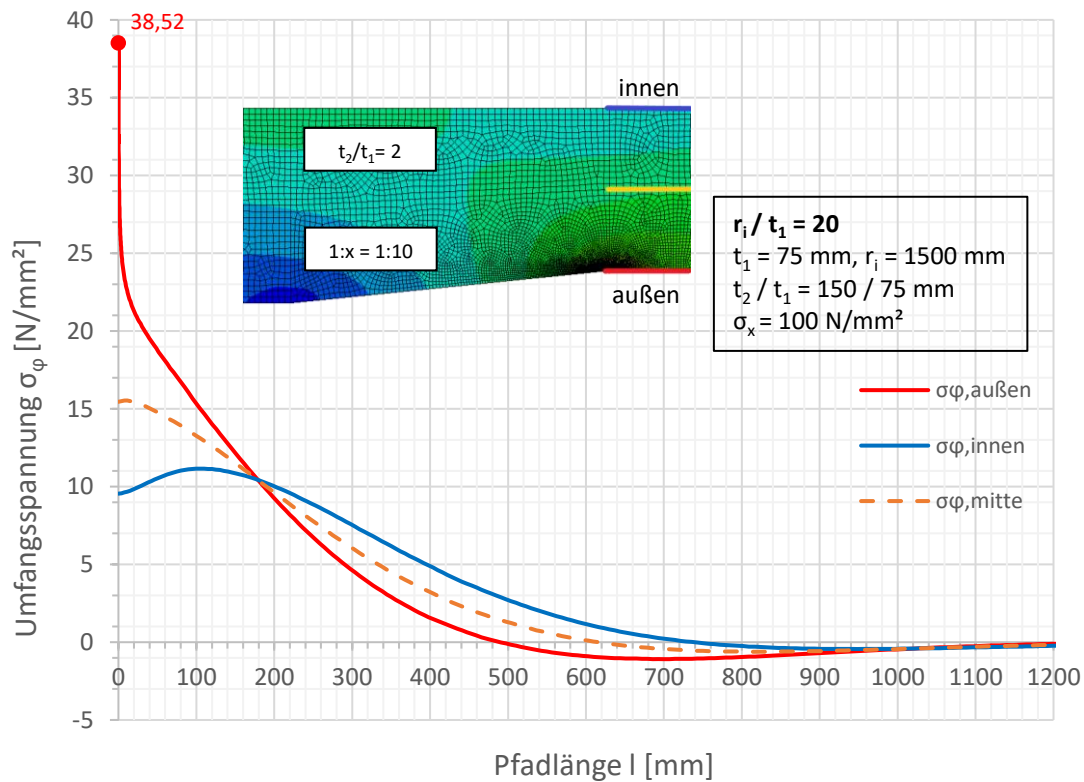
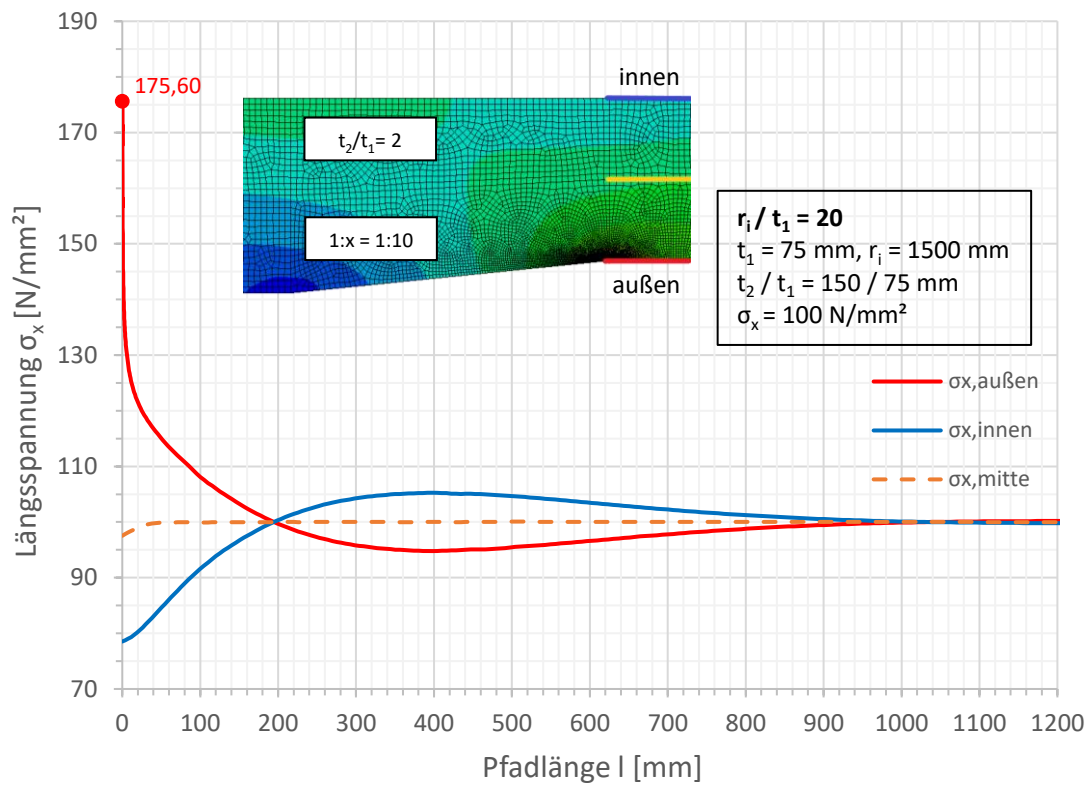


Spannungen an der Außenseite

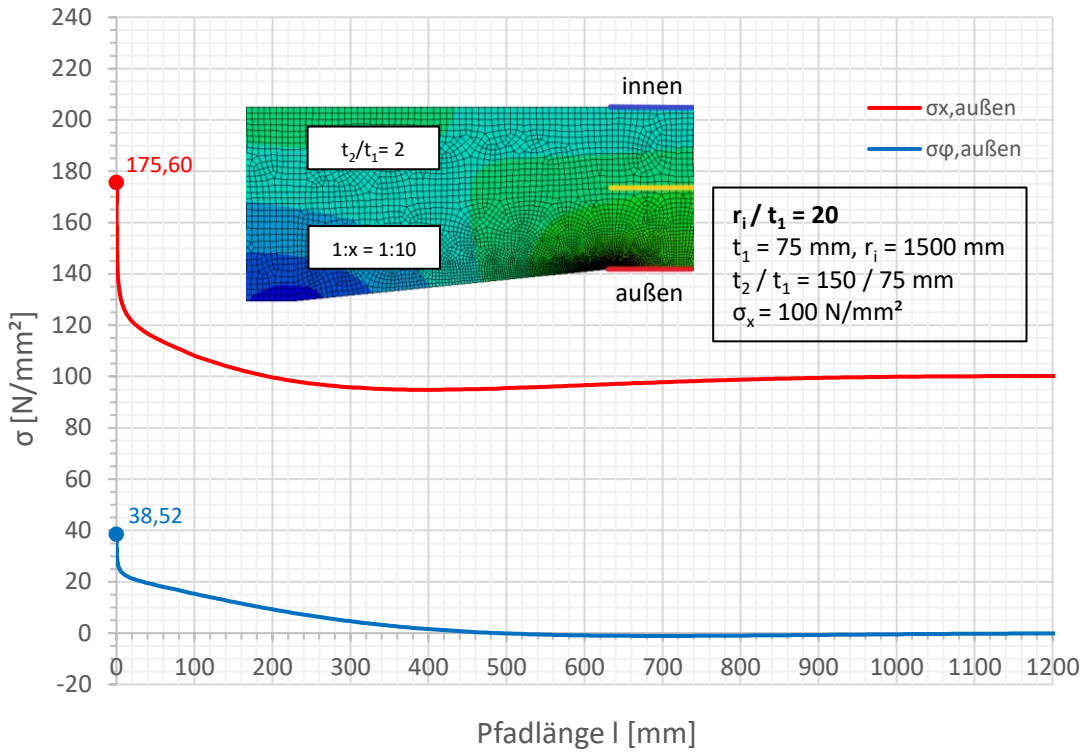


Spannungen an der Außenseite

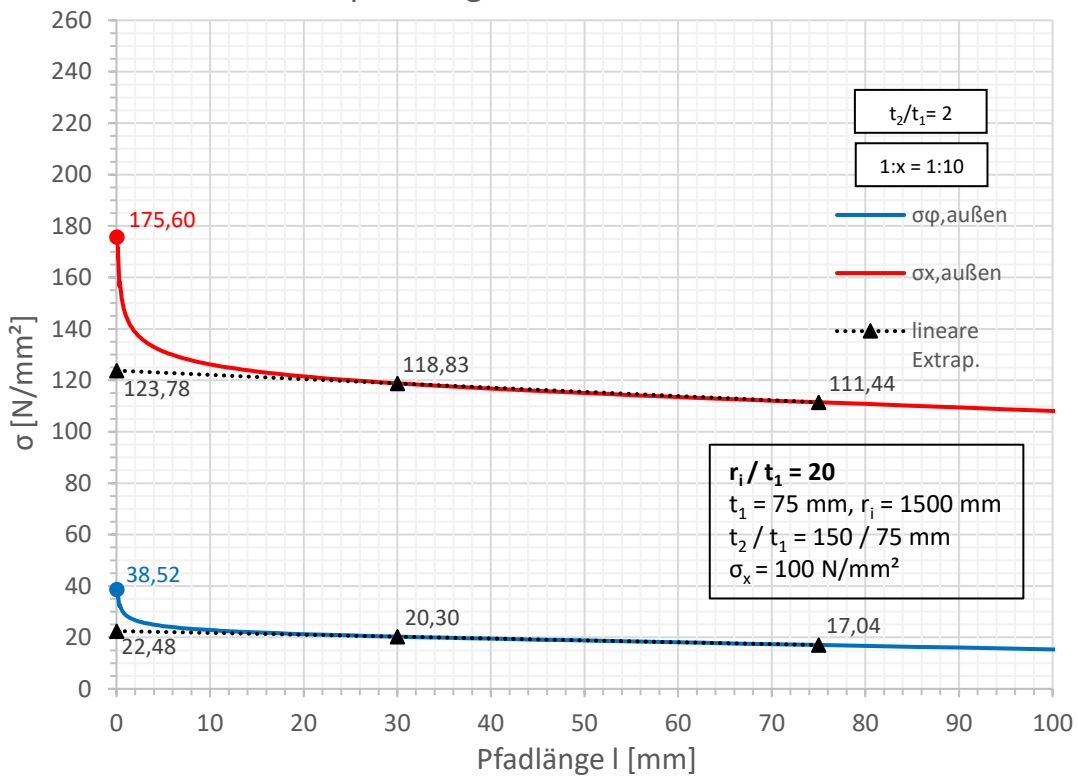


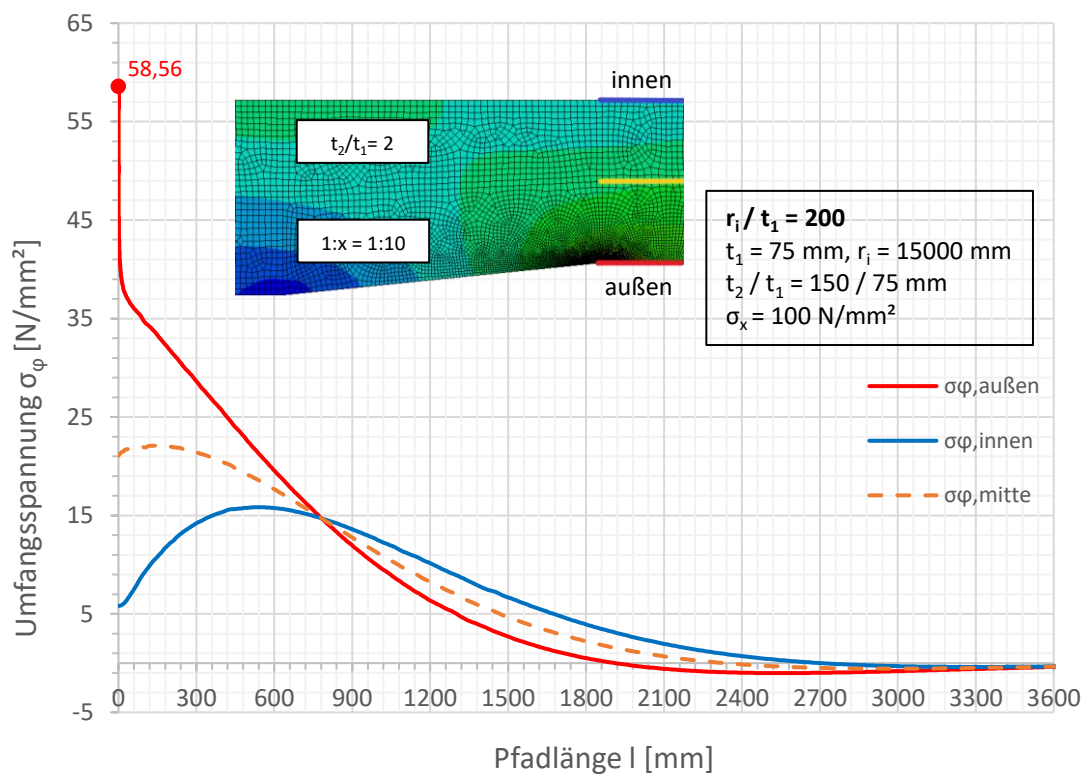
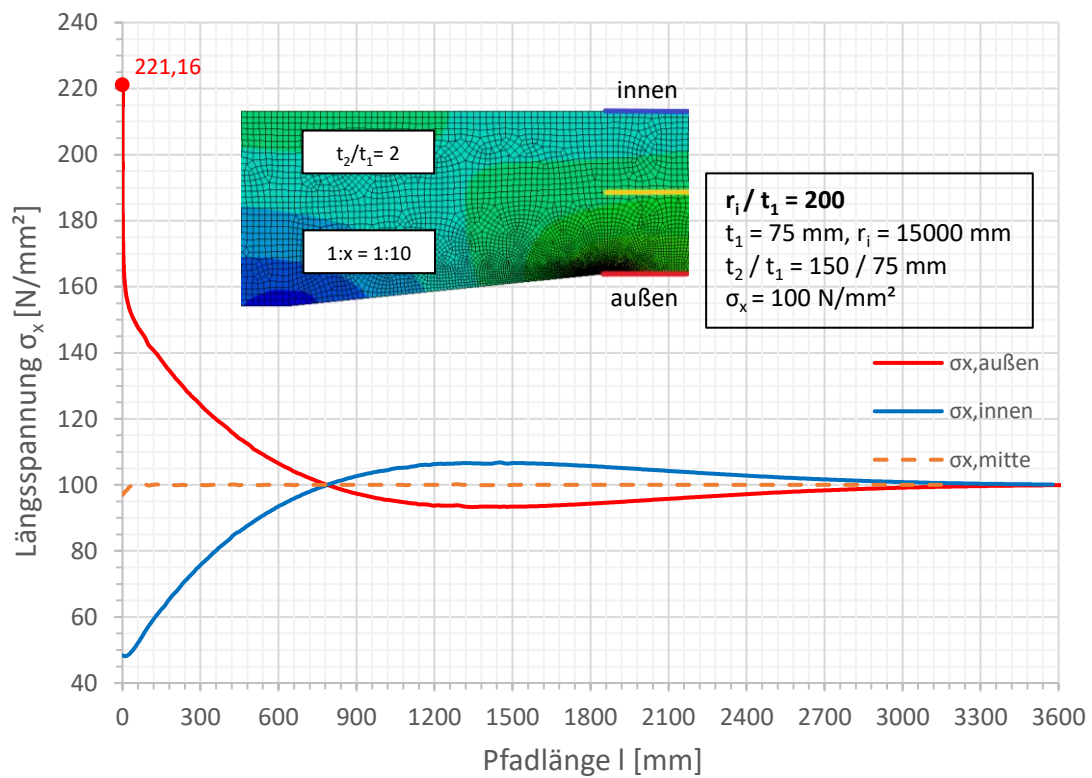


Spannungen an der Außenseite

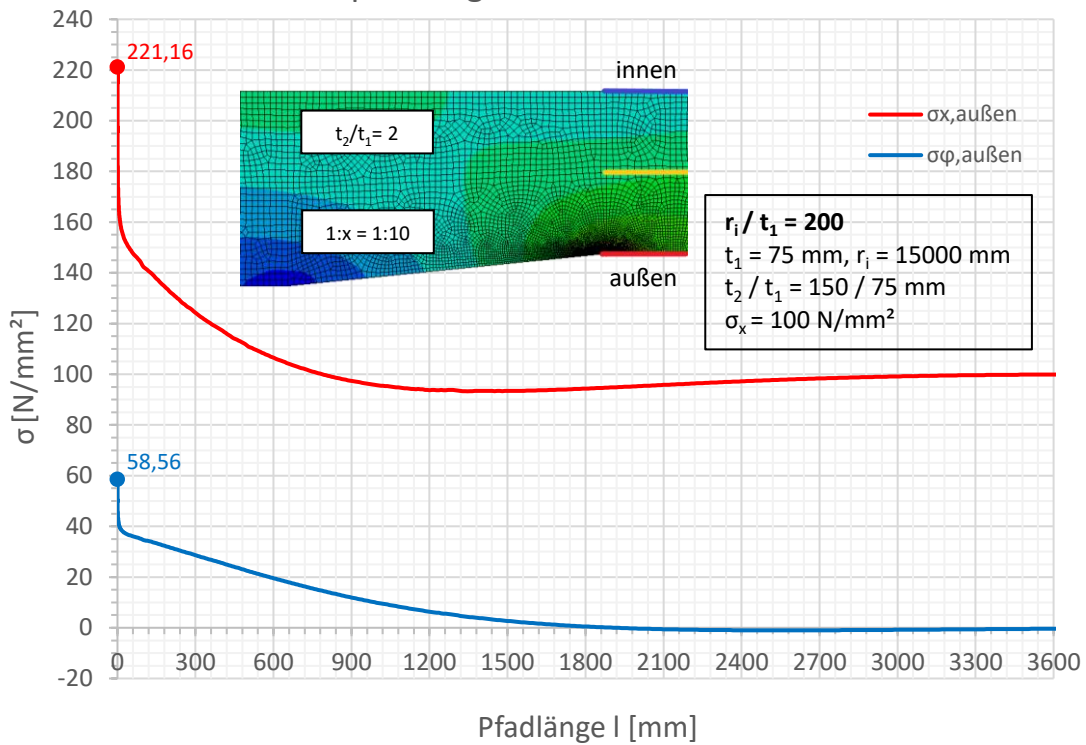


Spannungen an der Außenseite

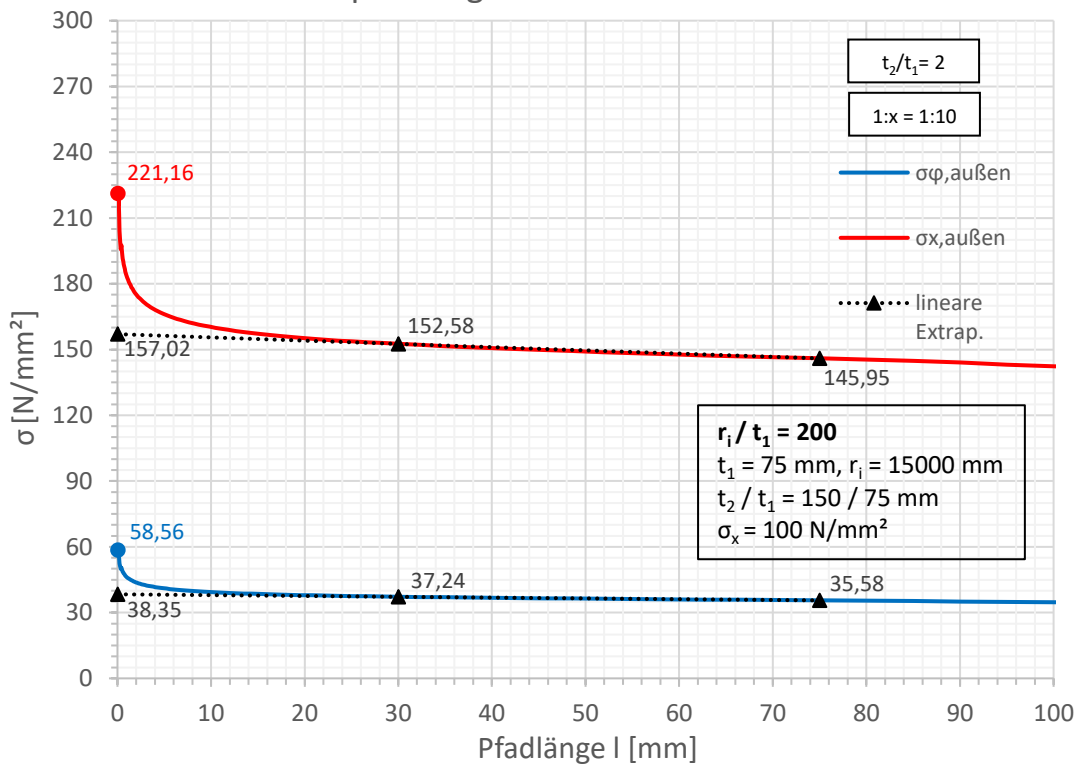


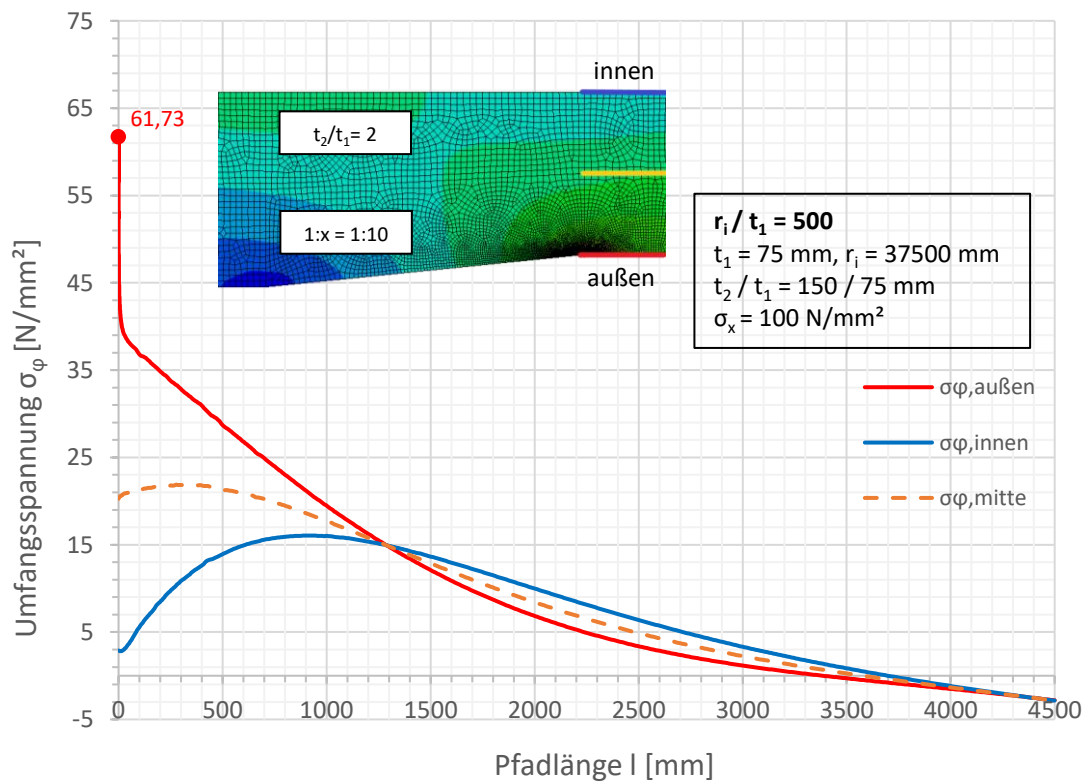
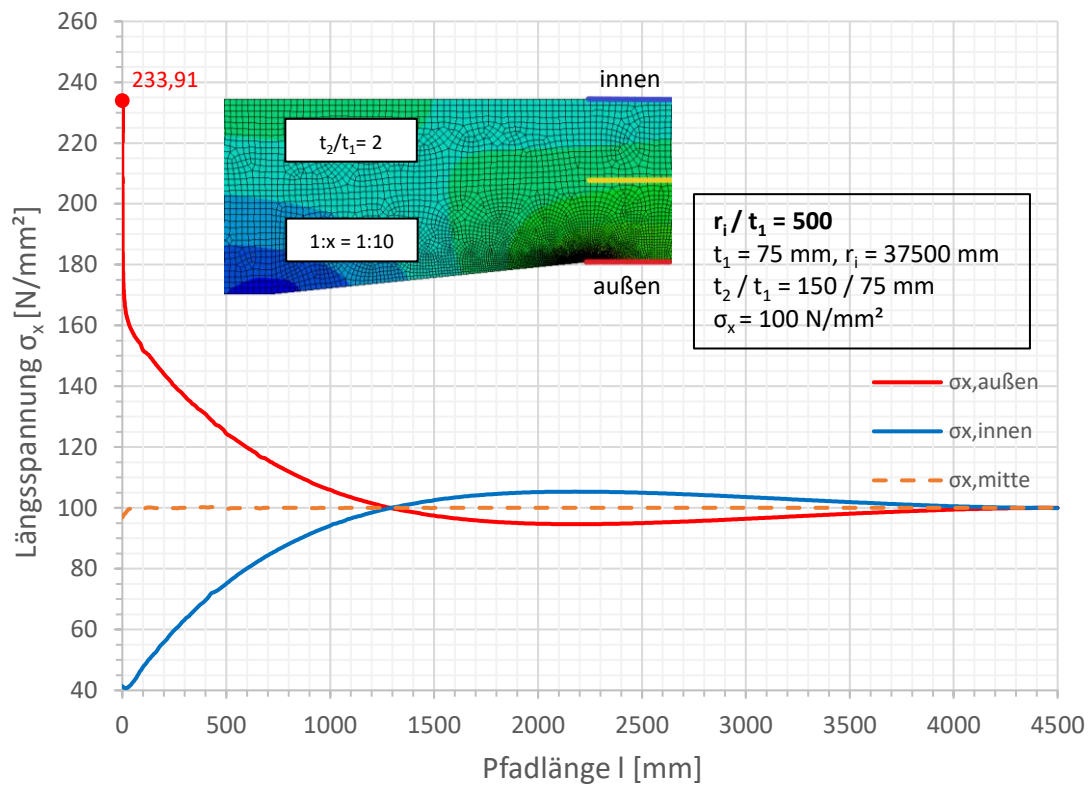


Spannungen an der Außenseite

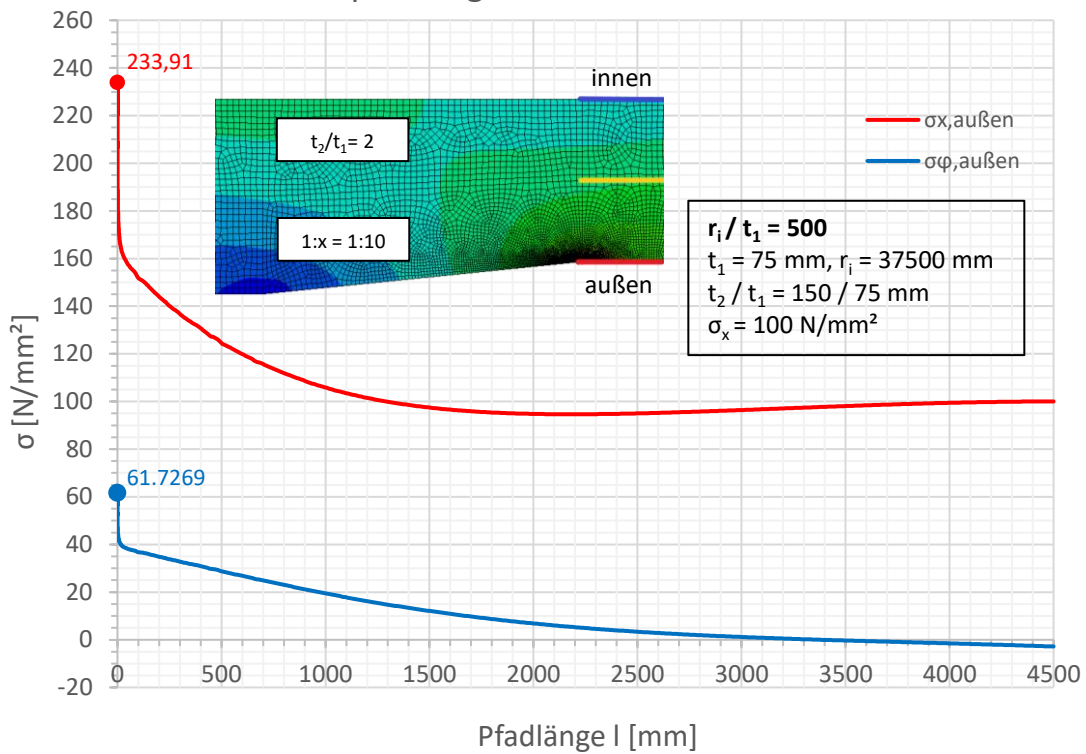


Spannungen an der Außenseite

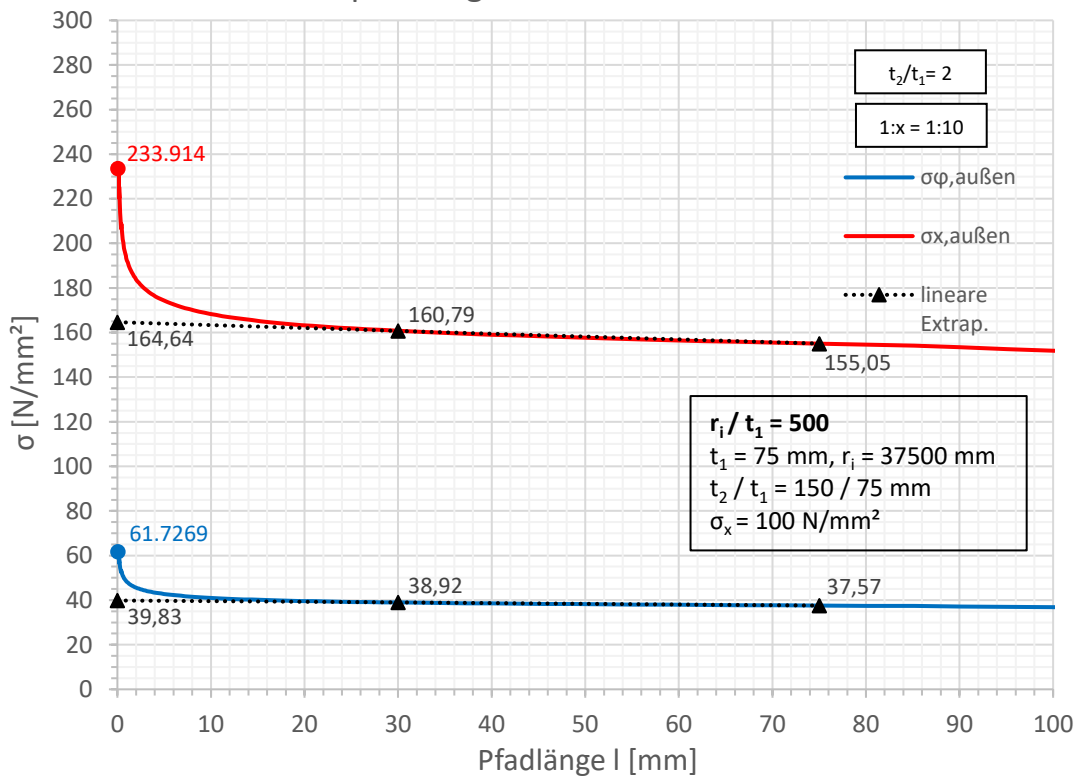




Spannungen an der Außenseite



Spannungen an der Außenseite



Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahestehenden 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