



D I P L O M A R B E I T  
M A S T E R ' S T H E S I S

Vergleichende Finite Elemente Analyse der  
geschweißten und  
geschmiedeten Hängeranschlusskonstruktion

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen  
Grades eines Diplom-Ingenieurs

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.  
**Josef Fink**

Univ.- Ass. Dipl.-Ing.  
**Marlene Steurer**

E 212

Institut für Tragkonstruktionen  
Forschungsbereich Stahlbau

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Bernhard Birklbauer**

**Martin Johannes Neier**

Matr.Nr.: 0826609

Matr.Nr.: 0727172

Burghardtgasse 28/11

Johannagasse 20/19

A - 1200 Wien

A - 1050 Wien

Wien, Juni 2014

.....  
(Bernhard Birklbauer)

.....  
(Martin Johannes Neier)



# Danksagung

An dieser Stelle danken wir all jenen, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Unser Dank gilt vor allem unserem betreuenden Professor Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Josef Fink** für die Initiierung dieser Arbeit und die hervorragende fachliche und persönliche Betreuung. Ebenso danken wir Frau Univ.-Ass. Dipl.-Ing. **Marglene Steurer** für die softwarebezogene Unterstützung bei der Bedienung des Finiten Elemente Programmes Abaqus FEA.

Besonderer Dank gilt auch unseren **Freundinnen** und **Freunden** bzw. **StudienkollegInnen** für die nützlichen Tipps und das Korrekturlesen der Diplomarbeit. Vor allem danken wir ihnen jedoch für die schönen Jahre während unserer gemeinsamen Studienzeit.

Abschließend möchten wir uns herzlich bei unseren **Familien**, insbesondere bei unseren **Eltern**, für die Unterstützung während unseres Studiums bedanken.



# Abstract

There exist two fundamentally different construction methods exist for the hanger connections of tied arch bridges and network arch bridges, which correspond to the state of the art. The present master's thesis compares the welded and the forged hanger connections regarding their service life. The comparison is based on the fatigue check in accordance with Eurocode 3 and a technical code of the International Institute of Welding. The required input values are calculated using the finite element program Abaqus FEA.

With the help of a simplified 2D model the term *stress concentration factor* is introduced, meaning the relation of the maximum principal normal stress to the nominal stress at a defined cross section. Furthermore, the relevant geometric parameters for a fatigue analysis are determined.

In a next step, a 3D model of the welded hanger connection is created. A geometric parameter analysis determines the range of the stress concentration factors.

The geometry of the forged hanger connection is determined by scanning a real hanger connection using a 3D scanner. This scan is converted into a 3D model, which is used for calculations in Abaqus FEA. Stress concentration factors are identified.

In the final chapter the welded and forged hanger connection are compared regarding the different fatigue checks. Finally, a comparison of the characteristic values used for a cost estimation is done.



# Kurzfassung

Für den Hängeranschluss bei Stabbogenbrücken und Netzbogenbrücken gibt es zwei grundsätzlich verschiedene Konstruktionsweisen, die dem Stand der Technik entsprechen. In der vorliegenden Diplomarbeit sollen die geschweißte und die geschmiedete Anschlussart bezüglich ihrer Lebensdauer einander gegenübergestellt werden. Der Vergleich wird auf Basis der Ermüdungsnachweise nach Eurocode und einem technischen Regelwerk des International Institute of Welding geführt. Vier verschiedene Nachweismodelle für die Ermüdung finden dazu Anwendung.

Die erforderlichen Eingangsgrößen werden mithilfe des Finiten Elemente Programms Abaqus FEA berechnet. Anhand eines vereinfachten 2D-Modells wird der Begriff der *Strukturformzahl* als Quotient von maximaler 1. Hauptspannung und einer definierten Nennspannung eingeführt. Außerdem werden die für die Ermüdung relevanten geometrischen Parameter ermittelt.

Anschließend wird ein 3D-Modell der geschweißten Hängeranschlusskonstruktion erstellt. In einer geometrischen Parameteruntersuchung wird die Bandbreite aufgezeigt, in der sich die Strukturformzahlen bewegen.

Zur Ermittlung der Geometrie beim stauchgeschmiedeten Hänger wird ein fotografischer 3D-Scan eines realen Hängeranschlusses durchgeführt. Dieser wird in ein 3D-Modell übergeführt und zur Berechnung in das Finite Elemente Programm Abaqus FEA eingespielt.

In einem abschließenden Kapitel werden anhand des geschweißten und des geschmiedeten Modells die verschiedenen Nachweismodelle für Ermüdung verglichen. Außerdem erfolgt eine Gegenüberstellung der Kennwerte, die in eine Kostenkalkulation Eingang finden.





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Entwicklung des Hängeranschlusses . . . . .	2
1.2	Zielsetzung . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Geometrie des Hängeranschlusses . . . . .	5
2.2	Ermüdungsnachweis . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Vereinfachtes 2D-Modell</b>	<b>11</b>
3.1	Modellierung in Abaqus FEA . . . . .	11
3.1.1	Geometrische Abmessungen . . . . .	11
3.1.2	Materialparameter . . . . .	12
3.1.3	Randbedingungen, Krafteinleitung . . . . .	12
3.1.4	Netzerstellung . . . . .	14
3.1.5	Elementwahl . . . . .	15
3.1.6	Anforderungen an die Modellierung . . . . .	15
3.2	Ergebnisse des 2D-Modells . . . . .	16
3.2.1	Kritische Bereiche . . . . .	17
3.2.2	Ermittlung der Strukturformzahl . . . . .	18
3.2.3	Spannungsverläufe am Gesamtmodell . . . . .	19
3.2.4	Berechnung der Nennspannungen . . . . .	20
3.2.5	Netzverfeinerung . . . . .	21
3.2.6	Normalkraft . . . . .	23
3.2.7	Moment um die Z-Achse . . . . .	27
3.2.8	Moment um die X-Achse . . . . .	31
3.3	Geometrische Parameteruntersuchung . . . . .	34
3.3.1	Ausrundungsradius im Bereich S1 . . . . .	37
3.3.2	Verändertes Knotenblech im Bereich S1 . . . . .	47
3.3.3	Außenradius des Knotenbleches . . . . .	52
3.3.4	Position und Größe des Freischnittes S2 . . . . .	65
3.3.5	Restbreite auf Höhe des Freischnittes S2 . . . . .	71
3.4	Zusammenfassung des vereinfachten 2D-Modells . . . . .	77
3.4.1	Kritischer Bereich S1 - Beginn Knotenblech . . . . .	77
3.4.2	Kritischer Bereich S2 - Freischnitt . . . . .	80

<b>4</b>	<b>Geschweißter Hängeranschluss</b>	<b>83</b>
4.1	Modellierung in Abaqus FEA . . . . .	83
4.1.1	Geometrische Abmessungen . . . . .	83
4.1.2	Randbedingungen, Lasteinleitung . . . . .	87
4.1.3	Vernetzung . . . . .	89
4.2	Ergebnisse . . . . .	90
4.2.1	Berechnung der Nennspannungen . . . . .	90
4.2.2	Spannungsverläufe am Gesamtmodell . . . . .	91
4.2.3	Normalkraft . . . . .	94
4.2.4	Moment um die Z-Achse . . . . .	96
4.2.5	Moment um die X-Achse . . . . .	97
4.3	Geometrische Parameteruntersuchung . . . . .	99
4.3.1	Strukturformzahlen in Abhängigkeit von den Ausrundungsradi- en im Bereich S1 . . . . .	100
4.3.2	Ausrundungsradien im Bereich S2 . . . . .	104
4.3.3	Modell 3 und Kerbspannungsmodell . . . . .	108
4.4	Hot-Spot-Spannungen . . . . .	114
4.5	Zusammenfassung, Kernaussagen . . . . .	116
4.5.1	Kritischer Bereich S1 - Beginn Knotenblech . . . . .	116
4.5.2	Kritischer Bereich S2 - Freischnitt . . . . .	118
<b>5</b>	<b>Geschmiedeter Hängeranschluss</b>	<b>121</b>
5.1	Modellierung in Abaqus FEA . . . . .	121
5.1.1	Geometrische Abmessungen . . . . .	123
5.1.2	Blechunebenheiten, Krümmungsverlauf . . . . .	124
5.1.3	Randbedingungen, Lasteinleitung . . . . .	128
5.1.4	Vernetzung . . . . .	129
5.2	Ergebnisse . . . . .	131
5.2.1	Berechnung der Nennspannungen . . . . .	131
5.2.2	Asymmetrischer Hänger . . . . .	132
5.2.3	Symmetrischer Hänger . . . . .	138
5.2.4	Zusammenfassung, Kernaussagen . . . . .	142
<b>6</b>	<b>Vergleich geschweißte und geschmiedete Anschlusskonstruktion</b>	<b>147</b>
6.1	Übersicht der untersuchten Modelle . . . . .	147
6.2	Vergleichsbasis der Hängeranschlüsse . . . . .	150
6.3	Vergleichsberechnungen hinsichtlich Ermüdung . . . . .	152
6.3.1	Statik der Hänger . . . . .	152
6.3.2	Nachweisformate für Ermüdung . . . . .	156
6.3.3	Ermüdungsnachweis, Berechnung der Lebensdauer . . . . .	159
6.3.4	Vergleich der Ergebnisse . . . . .	166
6.4	Kenndaten für eine Kalkulation . . . . .	168
6.4.1	Massen- und Oberflächenermittlung . . . . .	169
6.4.2	Ermittlung der Schweißnahtvolumina . . . . .	169

6.5	Schlussbetrachtungen . . . . .	172
<b>A</b>	<b>Aufnahmeverfahren des geschmiedeten Hängers</b>	<b>i</b>
<b>B</b>	<b>Berechnung der Kalkulationsgrundlagen</b>	<b>v</b>
B.1	Tabelle zur Massen- und Oberflächenermittlung . . . . .	v
B.2	Plangeometrien der Knotenbleche . . . . .	vii



## Einleitung

Stabbogenbrücken und Netzwerkbogenbrücken stellen im mittleren Spannweitenbereich eine attraktive Brückenform dar. Bei geringer Bauhöhe können relativ große Spannweiten erreicht werden. Außerdem genügt die Konstruktion ästhetischen und architektonischen Ansprüchen [7].

Eine Netzwerkbogenbrücke zeigt Abbildung 1.1.



**Abbildung 1.1:** Netzwerkbogenbrücke beim Verschiebebahnhof Kledering [11]

Um den Anforderungen an ein dauerhaftes Tragwerk gerecht zu werden, sind bei Stabbogenbrücken in Hinblick auf die Hänger einige kritische Punkte zu beachten [7]:

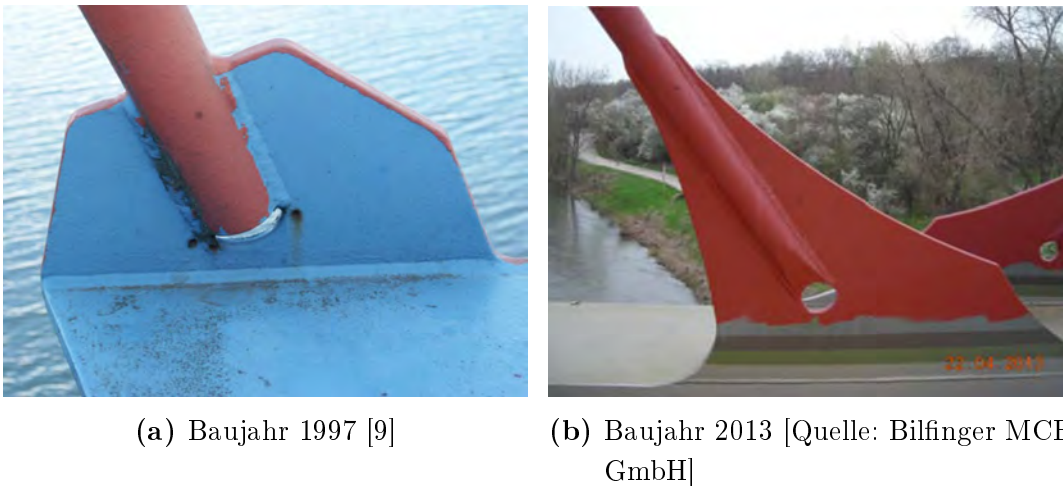
- Die Hängeranschlüsse an Bogen und Versteifungsträger sind korrosionsbeständig auszuführen.
- Das Tragwerk ist ermüdungssicher zu konstruieren.
- Während der Montage ist zu gewährleisten, dass die Hänger nicht auf Druck beansprucht werden.
- Bei den Hängern sind Abmessungsverhältnisse einzuhalten, um schädliche Schwingungen zu vermeiden.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wird das Augenmerk vor allem auf die ermüdungsgerechte Konstruktion gelegt. Erfahrungsgemäß sind meistens die Anschlussbereiche der

Hänger an den Aussteifungsträger und den Bogen als ermüdungsgefährdet einzustufen. Dies liegt an der Schwingungsanfälligkeit der Hänger, den auftretenden Einspannmomenten im Anschlussbereich und der Steifigkeitsänderungen aufgrund der Hängeranschlusskonstruktion.

## 1.1 Entwicklung des Hängeranschlusses

Gerade die Ermüdungssicherheit stellte in der Vergangenheit ein Problem bei Stabbogenbrücken dar. Speziell im Bereich des Hängeranschlusses wurden wiederholt Ermüdungsrisse festgestellt. Als Beispiel sei hier die Elbebrücke Dömitz erwähnt [12]. Hier traten bereits 2 Jahre nach der Fertigstellung erste Risse im Knotenblech auf.



**Abbildung 1.2:** Entwicklung der Hängeranschlusskonstruktionen

Vermehrte Schadensfälle führten zu einer stetigen Entwicklung der Hängeranschlusskonstruktion. Abbildung 1.2a zeigt einen Hängeranschluss im Baujahr 1997. Ein Vergleich mit Abbildung 1.2b (Baujahr 2013) zeigt deutliche Unterschiede hinsichtlich der Geometrie. Der Übergang vom Rundstahlhänger auf das Knotenblech verläuft kontinuierlicher und das Ende des Hängers ist abgeschrägt. Der Freischnitt ist außerdem in Kreisform ausgeführt. Diese geometrischen Änderungen führten zu einem besseren Kraftfluss, da es innerhalb der Anschlusskonstruktion zu keinen Steifigkeitssprüngen kommt.

## 1.2 Zielsetzung

Die Schädigungen der Elbebrücke Dömitz konnten auf eine kombinierte Belastung aus Wind und Regen zurückgeführt werden, welche die Hänger in besonders starke Schwingungen versetzte [12]. Bei der Nachweisführung sind neben diesen Regen-Wind-induzierten Schwingungen auch wirbelerregte Querschwingungen, Galloping-Schwingungen, sowie verkehrinduzierte Ermüdungsbeanspruchungen zu berücksichtigen [3].

Die kontinuierliche Entwicklung der geschweißten Anschlusskonstruktion führte auf genau festgelegte geometrische Abmessungen, wie sie in entsprechenden Normenwerken zu finden sind. Als davon unabhängige Entwicklung gilt die stauchgeschmiedete Anschlusskonstruktion.

Im Zuge dieser Diplomarbeit sollen beide Anschlusskonstruktionen hinsichtlich konstruktiver Gesichtspunkte gegenübergestellt werden. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Ermittlung quantitativer Kennwerte gelegt.

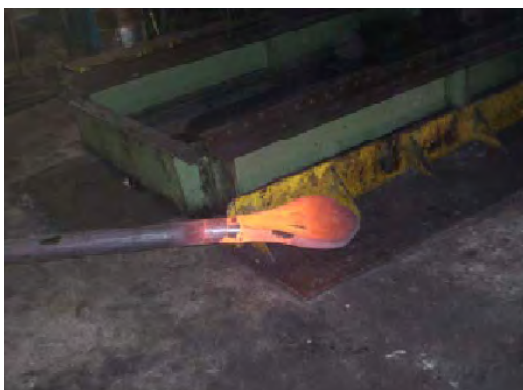




## Stand der Technik

### 2.1 Geometrie des Hängeranschlusses

Derzeit stellen zwei unterschiedliche Konstruktionsweisen für den Hängeranschluss an Stabbogenbrücken oder Netzwerkbogenbrücken den Stand der Technik dar. Die übliche Anschlusskonstruktion der letzten Jahrzehnte ist der geschweißte Anschluss des Hängers aus Rundstahl an ein geschlitztes Knotenblech (Abbildung 1.2b), und die Alternative dazu ist der geschmiedete Hängeranschluss, siehe Abbildung 2.1. Beim geschmiedeten Anschluss werden die Rundstahlenden durch Stauchen und Schmieden in mehreren Arbeitsgängen in eine Trapezform ausgeweitet. Nach dem Normalgühen der Spatenenden werden durch Brennschnitte und nachträglicher mechanischer Bearbeitung die gewünschten Spatenformen hergestellt [10].



(a) Herstellungsprozess



(b) Geschmiedeter Hängeranschluss

**Abbildung 2.1:** Geschmiedete Hängeranschlusskonstruktion [10]

Im DIN-Fachbericht 103 (2009) - Anhang II-H [3] sind Bemessungsregeln und geometrische Empfehlungen zum ermüdungsgerechten Konstruieren angegeben. Weitere Hintergrundinformationen werden im Leitfaden zum Anhang NA.F Bemessung von Hängern an Stabbogenbrücken [2] detailliert beschrieben.

## Geschweißte Hängeranschlüsse

Die konstruktiven Empfehlungen zur Anschlussgeometrie von Rundstahlhängern stellen das ermüdungsgerechte Konstruieren in den Vordergrund. Die rechnerischen Nachweise selbst sollen die Formfindung bestätigen. In Abbildung 2.2 sind die geometrischen Empfehlungen, die sich im Rahmen der Entwurfsplanung bewährt haben, zu sehen [2].

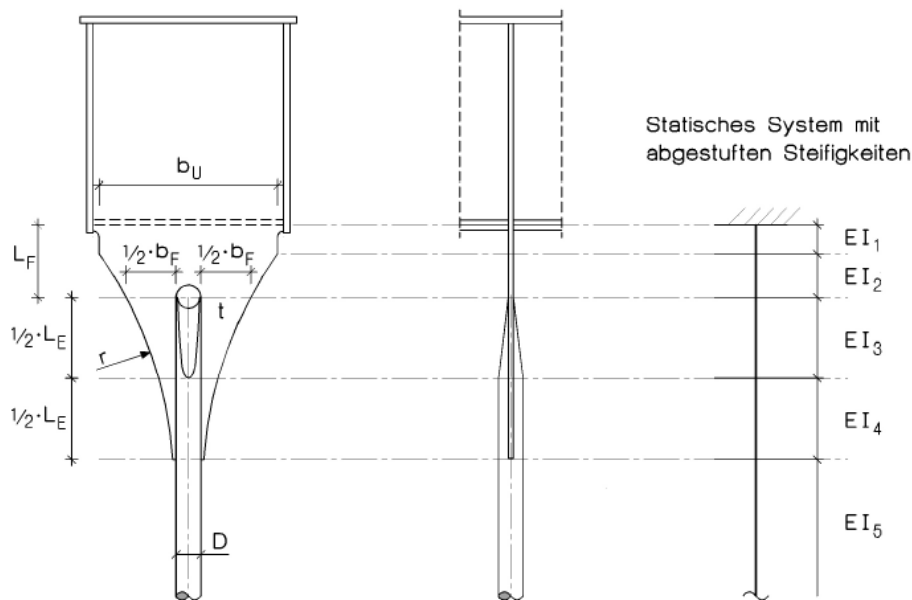


Abbildung 2.2: Geometrie des geschweißten Hängeranschlussbleches [2]

Darin sind:

$$\text{Hängerdurchmesser:} \quad D = 2 * \sqrt{\frac{N_{max}}{\pi * \sigma}} \quad (2.1)$$

$$\text{Knotenblechdicke:} \quad t = 0.2 * D \quad (2.2)$$

$$\text{Breite auf Höhe Freischnitt:} \quad b_F = \frac{N_{max}}{\sigma_{netto} * t} \quad (2.3)$$

$$\text{Einbindelänge:} \quad L_E = \frac{N_{max}}{2 * \tau * t} \quad (2.4)$$

$$\text{Maximale Blechbreite:} \quad b_U = 1.5 * (b_F + D) \quad (2.5)$$

$$\text{Außenradius:} \quad r = 1.9 * \left( \frac{L_E^2}{b_F} + 0.25 * b_F \right) \quad (2.6)$$

$$\text{Freie Knotenblechhöhe:} \quad L_F = 0.45 * L_E \quad (2.7)$$

## Geschmiedete Hängeranschlüsse

Die Geometrie des geschmiedeten Hängeranschlusses sollte für einen harmonischen Kraftfluss entworfen werden. Die geometrischen Empfehlungen, Abbildung 2.3, sind als Hilfestellung für den Entwurf zu sehen und müssen durch den Nachweis der Tragfähigkeit und Ermüdungsfestigkeit bestätigt werden [10]. Der Gültigkeitsbereich der Empfehlungen nach [2] begrenzt sich auf Hängerdurchmesser  $D$  von:

$$70 \text{ mm} \leq D \leq 170 \text{ mm}$$

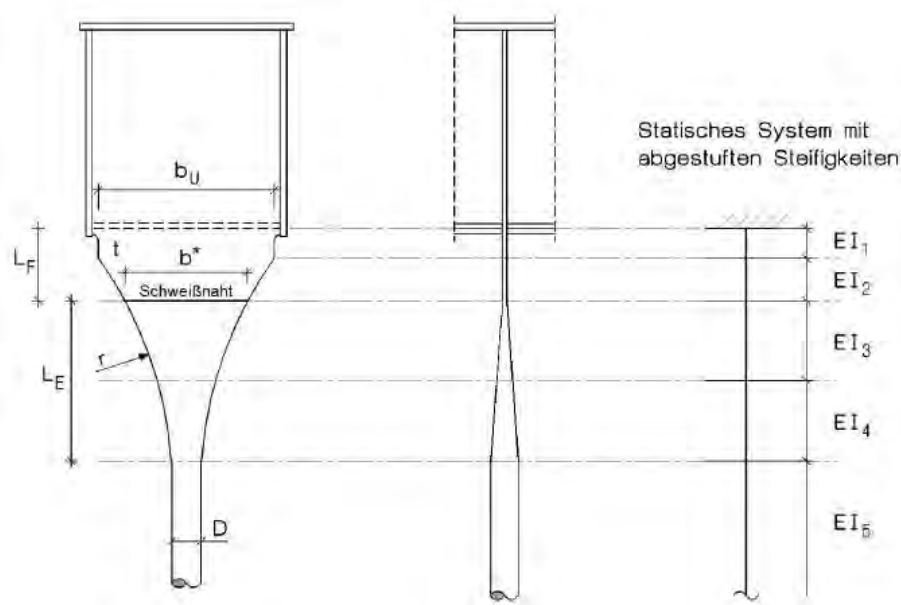


Abbildung 2.3: Geometrie des geschmiedeten Hängeranschlusses [2]

Darin sind:

$$\text{Hängerdurchmesser:} \quad D = 2 * \sqrt{\frac{N_{max}}{\pi * \sigma}} \quad (2.8)$$

$$\text{Knotenblechdicke:} \quad t = 0.25 * D \quad (2.9)$$

$$\text{Breite der Schweißnaht:} \quad b^* = \frac{N_{max}}{\sigma * t} \quad (2.10)$$

$$\text{Spatenlänge:} \quad L_E = 4.5 * D \leq 0.5 \text{ m} \quad (2.11)$$

$$\text{Maximale Blechbreite:} \quad b_U = 1.5 * b^* \quad (2.12)$$

Der bei der Spatenlänge angegebene Maximalwert von 0,5 m ist derzeit als fertigungstechnische Obergrenze im angegebenen Durchmesserbereich anzusehen. Die weiteren Eingangsgrößen können wie bei den geschweißten Hängeranschlüssen ermittelt werden. Generell sind eine möglichst große Spatenlänge und ein möglichst großer Außenradius erstrebenswert [2].

## 2.2 Ermüdungsnachweis

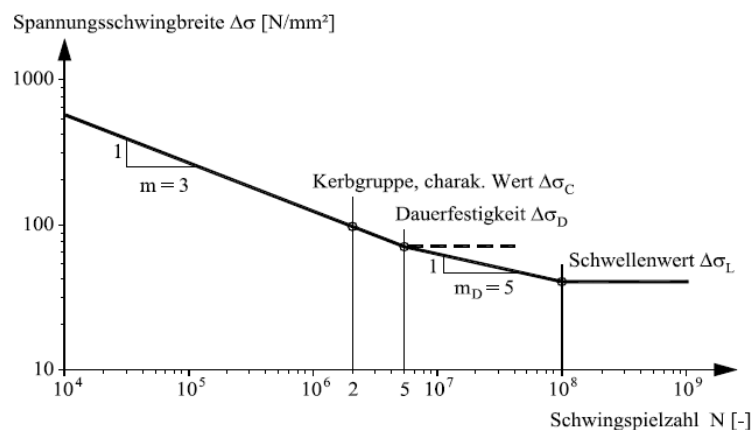
Bei Stahlbauteile und Konstruktionen, die zeitlich veränderlichen Belastungen ausgesetzt sind, muss zusätzlich zum statischen Nachweis auch ein Nachweis gegen Ermüdung erbracht werden. Als Eingangsgröße für den rechnerischen Ermüdungsnachweis wird fast ausschließlich die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$  verwendet. Der Nachweis kann entweder nach dem Nenn-, Struktur- oder Kerbspannungskonzept geführt werden. Regelungen für den Ermüdungsnachweis sind in unterschiedlichen Normen bzw. Richtlinien, wie zum Beispiel im Eurocode 3 [4] oder in den IIW-Empfehlungen [6] zu finden.

Im Folgenden werden die verschiedenen Konzepte mit ihren Grundprinzipien kurz dargestellt.

### Nennspannungskonzept

Beim Nennspannungskonzept ist nachzuweisen, dass die Nennspannungsschwingbreite für den versagensmaßgebenden Querschnitt kleiner als die zulässige Ermüdungsfestigkeit ist. Die Spannungen werden entsprechend der elementaren Festigkeitslehre berechnet. Dabei werden die maßgebenden Schnittgrößen (z.B. Biegemoment und Normalkraft) durch die Nennquerschnittswerte dividiert. Die örtlichen Effekte der Schweißverbindung oder der Bauteilgeometrie werden im Nennspannungskonzept nicht berücksichtigt.

Die zulässigen Nennspannungen sind durch genormte Wöhlerlinien für das betreffende Konstruktionsdetail bzw. Bauteil festgelegt. In Abbildung 2.4 ist die allgemeine Form der Ermüdungsfestigkeitskurve nach Eurocode 3 schematisch dargestellt.  $\Delta\sigma_C$  entspricht dem Bezugswert für die Ermüdungsfestigkeit bei  $N_C = 2 * 10^6$  Schwingspielen. Die Anwendungen des Nennspannungskonzepts sind an der eindeutigen Definition der Nennspannungen und einer eindeutigen Zuordnung des betrachteten Konstruktionsdetails bzw. Bauteils an eine Wöhlerlinie gebunden.



**Abbildung 2.4:** Definition der Ermüdungsfestigkeitskurven nach Eurocode 3, Teil 1.9 [4]

## Strukturspannungskonzept

Das Strukturspannungskonzept wird für komplizierte geometrische Konstruktionen bzw. Bauteile empfohlen, bei denen die Bestimmung einer Nennspannung sowie die Zuordnung zu einer Wöhlerlinie nicht mehr eindeutig möglich sind. Die Strukturspannung enthält zusätzlich zur Nennspannung alle spannungserhöhenden Effekte aus der Bauteilgeometrie, jedoch werden die lokalen Kerbeffekte der Schweißnaht nicht berücksichtigt. In der Literatur wird das Strukturspannungskonzept oft auch als Hot-Spot-Verfahren bezeichnet, da zur Bewertung der Ermüdungsfestigkeit die Spannungen an den kritischen Stellen (Hot-Spot) bestimmt werden. In Abbildung 2.5 ist die Strukturspannung im Vergleich zur Nennspannung und zur Kerbspannung zu sehen.

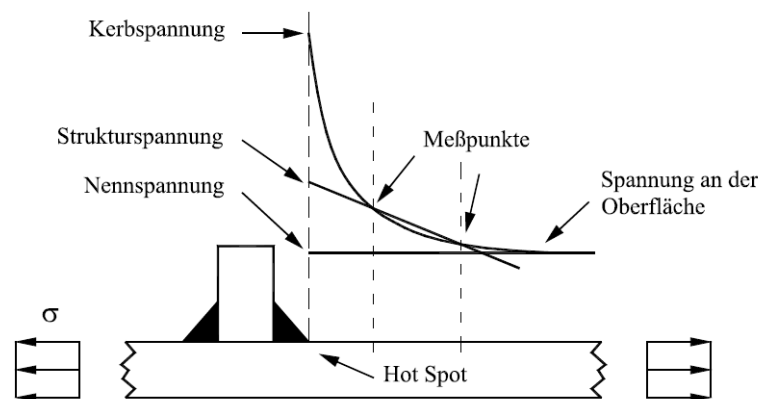


Abbildung 2.5: Definition der Strukturspannung [6]

Zur Berechnung der Hot-Spot-Strukturspannung ist es in Abhängigkeit vom Modell unter Umständen erforderlich, den Spannungsverlauf zu interpolieren. Welche Interpolationsverfahren dabei sinnvoll angewendet werden können, ist von der Netzdichte abhängig. Genauere Informationen dazu sind in einer Ausarbeitung des *International Institute of Welding* [8] zu finden. Bei einem relativ feinen Netz kann die Gleichung 2.13 verwendet werden. Die notwendigen Spannungen erhält man an Interpolationspunkten nach Abbildung 2.6.

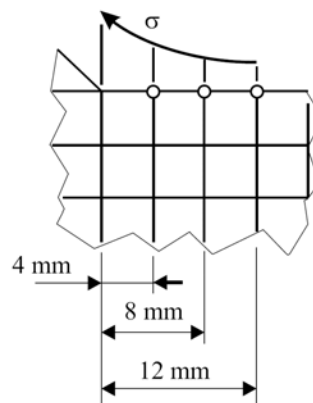
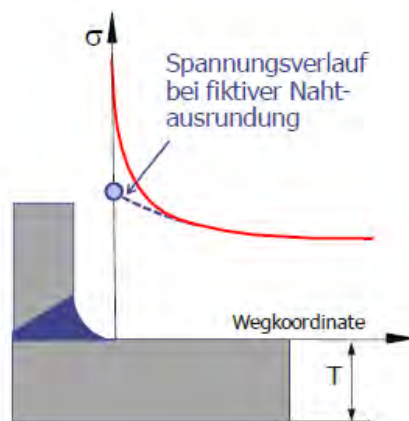


Abbildung 2.6: Interpolationspunkte beim Hot-Spot-Verfahren [5]

$$\sigma_{hs} = 3 * \sigma_{4mm} - 3 * \sigma_{8mm} + \sigma_{12mm} \quad (2.13)$$

Im allgemeinen ist eine analytische Bestimmung der Strukturspannungen nicht möglich, so dass in der Regel numerische Verfahren mit Hilfe der FE-Methode angewendet werden. Laut den IIW-Empfehlungen [6] sollten in diesem Fall die maximalen Hauptspannungen bestimmt werden. Werden FE-Modelle mit einer fiktiven, nahezu kerbfreien Naht modelliert, ist es laut [13] möglich, die ermittelten Spannungen direkt als Strukturspannungen interpretieren zu können, siehe Abbildung 2.7. In dieser Arbeit wurden die Modelle nach diesem Prinzip erstellt und die örtlichen Spannungsspitzen als maximale Strukturspannungen gedeutet.



**Abbildung 2.7:** Strukturspannung mit fiktiver Nahtausrundung [13]

Diese Strukturspannungen werden den Nennspannungen gegenübergestellt und deren Verhältnis als Strukturformzahl angegeben, siehe Formel 2.14. Die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit erfolgt durch den Vergleich der vorhandenen Strukturspannung mit eigenen Strukturspannungs-Wöhlerlinien.

$$\text{Strukturformzahl} = \frac{\text{Strukturspannung}}{\text{Nennspannung}} \quad (2.14)$$

## Kerbspannungskonzept

Im Gegensatz zum Nenn- und Strukturspannungskonzept werden beim Kerbspannungskonzept die örtlichen Spannungsspitzen berücksichtigt. Die Spannungen werden auf Grundlage eines linear-elastischen Materialverhaltens berechnet und den örtlich zulässigen Spannungen gegenübergestellt. In Abbildung 2.5 ist zu sehen, dass Kerbspannungen lokal eng begrenzt sind und entlang der Oberfläche eines Bauteiles schnell abklingen. Die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit erfolgt durch den Vergleich der vorhandenen Kerbspannungen mit eigenen Kerbspannungs-Wöhlerlinien.

## Vereinfachtes 2D-Modell

Für die Berechnungen in dieser Diplomarbeit wurde das Programm Abaqus FEA [14] verwendet. Zur Erläuterung der Problemstellung und Einführung in das Finite Elemente Programm wurde ein Hängeranschluss mit vereinfachter Geometrie untersucht. Anhand dieses Hängers werden jene Parameter und Faktoren eingeführt, die danach für einen Vergleich der beiden Hängeranschlüsse herangezogen werden.

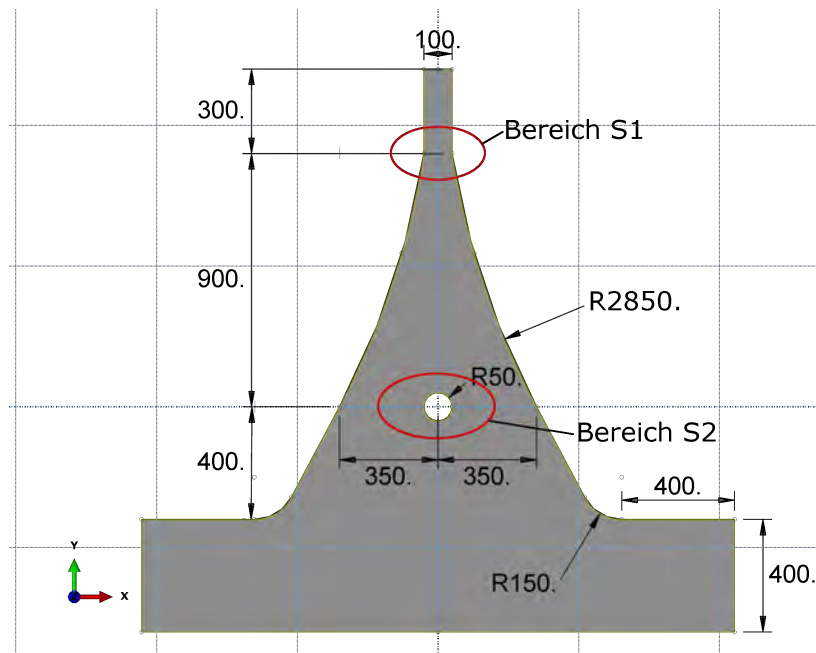
### 3.1 Modellierung in Abaqus FEA

#### 3.1.1 Geometrische Abmessungen

In Abbildung 3.1 sind die Abmessungen des vereinfachten Hängeranschlusses dargestellt. In Anlehnung an den Leitfaden zum DIN-Fachbericht 103 [2] wurde der Ausrundungsradius des Knotenbleches mit 2850 mm gewählt. Das Hängerende wurde mit einer Breite von 100 mm modelliert und der Durchmesser des kreisrunden Freischnittes betrug ebenfalls 100 mm. Das gesamte Knotenblech ist symmetrisch um die Y-Achse. Um ein 3D-Modell zu erzeugen, wurde der 2D-Geometrie eine konstante Dicke von 20 mm zugewiesen. Der Übergang vom Knotenblech auf das Stegblech des Versteifungsträgers wurde mit einem Radius von 150 mm ausgerundet. Der Übergang vom Hänger auf das Knotenblech im Bereich S1 wurde im Zuge der ersten Modellierung nicht ausgerundet.

Im Vergleich zur Hängeranschlussgeometrie, wie sie in der Realität auftritt, wurden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Der Hänger wird als Rechteckquerschnitt und nicht als Kreisquerschnitt ausgebildet.
- Die Geometrie bleibt in Z-Richtung unverändert (2D-Geometrie mit konstanter Dicke).
- Schweißnähte werden vernachlässigt.



**Abbildung 3.1:** Abmessungen und kritische Bereiche am vereinfachten Modell

- Die Modellierung erfolgt nach Planmaßen.
- Herstellungstoleranzen bleiben unberücksichtigt.
- Montageungenauigkeiten werden nicht berücksichtigt.
- Blechunebenheiten bleiben unbeachtet.

### 3.1.2 Materialparameter

Unter Ermüdungsbeanspruchung kommt es in der Regel zu keinen Spannungen, die die Fließgrenze des Materials überschreiten. Entsprechend kann ein Plastizieren des Materials von vornherein ausgeschlossen und ein linear-elastisches Materialmodell verwendet werden. Dem Material Stahl entsprechend wurde der Elastizitätsmodul mit  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$  und die Querdehnzahl mit  $\nu = 0,3$  festgelegt.

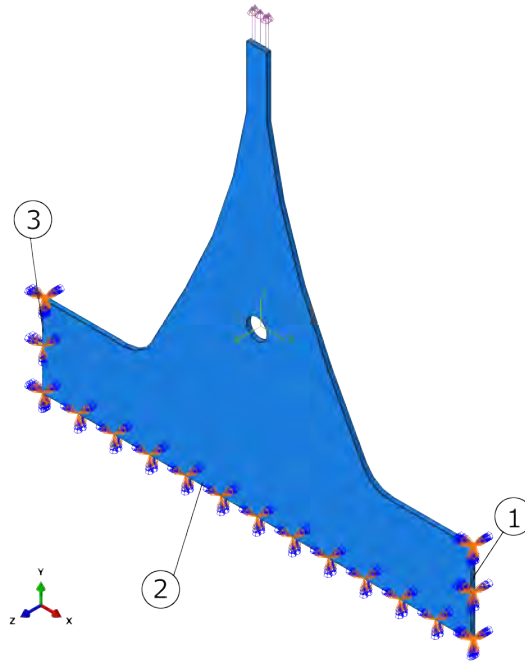
### 3.1.3 Randbedingungen, Krafteinleitung

Das Modell ist im unteren Bereich auf den Flächen 1, 2 und 3 jeweils über die gesamte Blechdicke eingespannt (siehe Abbildung 3.2). Die Einspannung verhindert sämtliche Bewegungen und Verdrehungen in allen drei Raumrichtungen (siehe Gleichung 3.1).

$$UX = UY = UZ = RX = RY = RZ = 0 \quad (3.1)$$

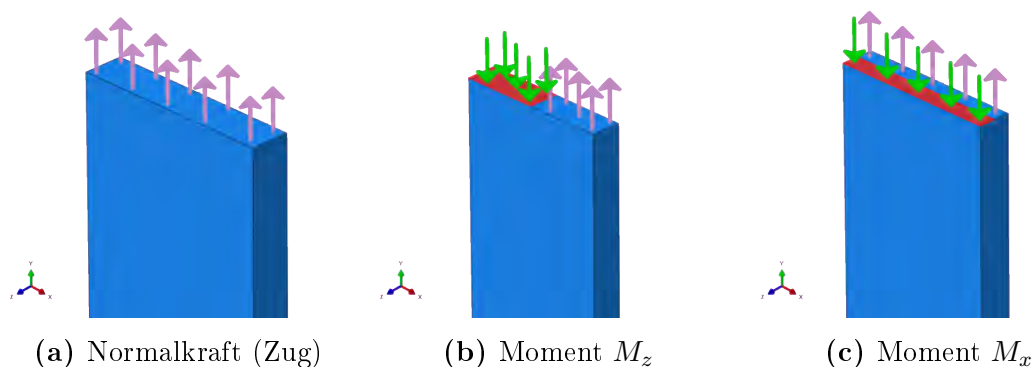
Mit  $X, Y, Z \dots$  Raumrichtungen  
 $U \dots$  Verschiebung  
 $R \dots$  Verdrehung





**Abbildung 3.2:** Randbedingungen am vereinfachten Modell

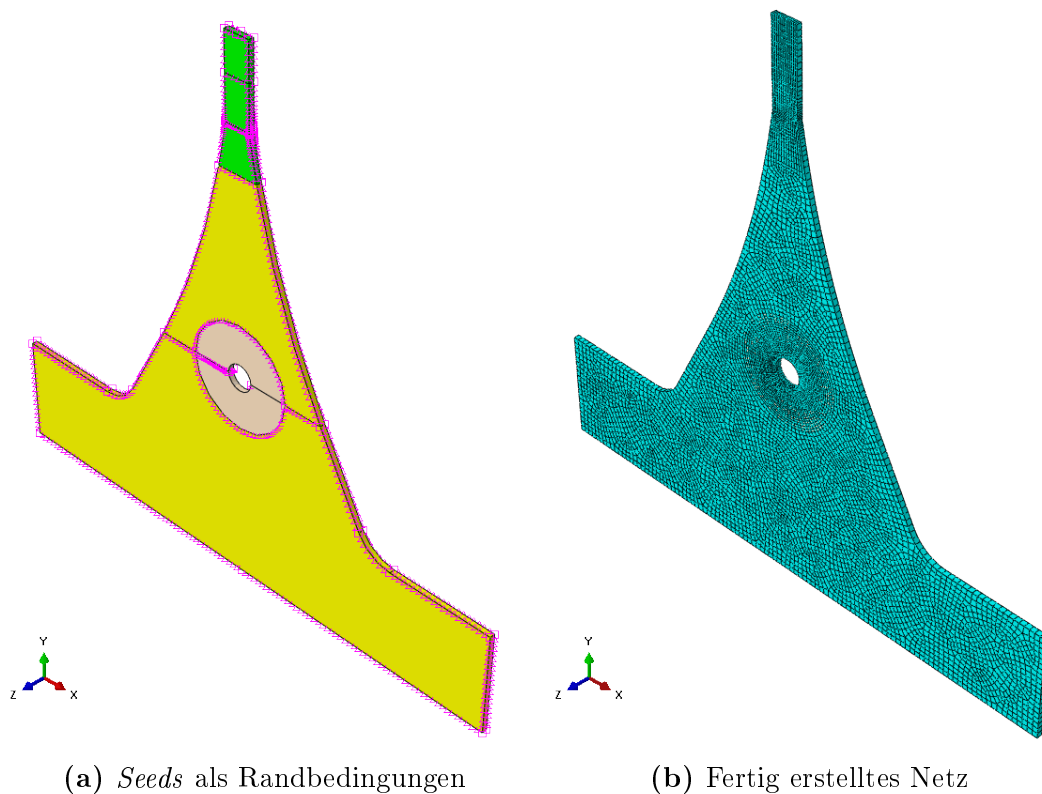
Die Belastung erfolgte mit Einheitslasten am oberen Ende des Modells. Unabhängig voneinander wurde eine Normalkraft in Richtung Y-Achse mit  $N = 1000 \text{ N}$ , ein positives Moment um die Z-Achse ( $M_z = 1000 \text{ Nmm}$ ) und ein positives Moment um die X-Achse ( $M_x = 1000 \text{ Nmm}$ ) aufgebracht. Sämtliche Belastungen wurden als konstant verteilte Flächenlasten eingeleitet. Um ein Moment zu erzeugen, wurde die Fläche zweigeteilt und mit jeweils entgegengesetzt gerichteten Flächenlasten beansprucht. Für  $M_z$  ergab sich damit ein Kräftepaar mit jeweils  $20 \text{ N}$ . Für  $M_x$  wurden jeweils  $100 \text{ N}$  angesetzt. Abbildung 3.3 zeigt, wie die Belastung eingeleitet wurde. Spätestens bei einer Länge von  $150 \text{ mm}$  nach der Lasteinleitung stellte sich in allen Modellen ein elastischer Spannungsverlauf ein.



**Abbildung 3.3:** Einleiten der Belastung mithilfe von Flächenlasten

### 3.1.4 Netzerstellung

Abaqus FEA bietet einige Algorithmen zur automatischen Vernetzung von Modellen. Hierbei werden sogenannte *Seeds* entlang der Modellkanten in festgelegten, wenn notwendig über die Länge veränderlichen, Abständen erzeugt. Unter Einhaltung dieser Randbedingungen berechnet Abaqus FEA entlang der Modellkanten ein passendes Elemente-Netz. Im gegenständlichen Modell wurden die *Seeds* im Abstand von 20 mm gewählt. Eine Netzverfeinerung auf 4 mm lange Elemente fand im Übergangsbereich zwischen dem Regelquerschnitt des Hängers und dem Beginn des Knotenbleches statt. Auch im Umkreis des Freischnittes wurde das Netz auf 4 mm verfeinert. Abbildung 3.4a zeigt die Verteilung der violetten *Seeds* entlang der Elementkanten. Die unterschiedli-



**Abbildung 3.4:** Netzgenerierung in Abaqus FEA

chen Farben der Elemente deuten auf unterschiedliche Algorithmen bei der Vernetzung hin. Grüne Bereiche wurden mit *Structured Meshing*, gelbe Teile mit *Sweep Meshing* und der hellbraune Bereich mit *Bottom-up Meshing* vernetzt. Für detaillierte Ausführungen zur Netzgenerierung sei auf das Abaqus Handbuch [15] verwiesen. Das fertig erstellte Elemente-Netz ist in Abbildung 3.4b ersichtlich.

Um möglichst konsistente und unverfälschte Ergebnisse zu erhalten, wurde die Netzerstellung nach folgenden Grundsätzen vorgenommen:

- Es werden ausschließlich Hexaederelemente verwendet.
- Der Winkel zwischen zwei Oberflächen eines Elementes liegt zwischen  $10^\circ$  und  $160^\circ$ .

- Das Verhältnis zwischen der längsten und kürzesten Elementkante ist nicht größer als 1:10.
- In kritischen Bereichen wird das Finite-Elemente-Netz hinreichend verfeinert.

### 3.1.5 Elementwahl

Als Elemente wurden Hexaeder-Elemente mit quadratischem Verschiebungsansatz und reduziertem Integrationsansatz gewählt. Es handelt sich somit um Elemente mit 20 Knotenpunkten und der Kurzbezeichnung  $C3D20R$ . Die gewählten Elemente tragen den Empfehlungen nach Feldmann et al. [5] Rechnung.

Abaqus FEA bietet außerdem die Möglichkeit, *Submodels* zu verwenden. Bei dieser Vorgangsweise wird nach erfolgreicher Berechnung des gesamten Modells ein Teilmodell erstellt. Hierzu wird ein Teil aus dem Modell herausgeschnitten. Als Randbedingungen werden an Schnittflächen die berechneten Knotenverschiebungen aus dem globalen Modell aufgebracht. In Abbildung 3.5 sind die Schnittflächen durch rote Rechtecke umrahmt. Der Vorteil von Teilmodellen liegt in der verkürzten Rechenzeit, da



Abbildung 3.5: Übergangsbereich S1 als Teilmodell

das globale Modell mit einer groben Vernetzung gerechnet werden kann. Nur in den kritischen Bereichen erfolgt danach eine Netzverfeinerung.

In den Teilmodellen wurden neben  $C3D20R$ -Elementen auch Tetraeder-Elemente mit quadratischem Verschiebungsansatz ( $C3D10$ ) verwendet. Abbildung 3.5 zeigt ein solches Teilmodell. Hier ist der Übergangsbereich vom Regelquerschnitt des Hängers auf das Knotenblech modelliert. Die Elementlänge beträgt 4 mm.

### 3.1.6 Anforderungen an die Modellierung

Bei der Berechnung mit Finiten Elementen besteht die Gefahr, dass Berechnungsergebnisse durch Fehler in der Modellierung verfälscht werden. Deshalb ist es notwendig, bestimmte Grenzwerte einzuhalten. In Anlehnung an [5] wurden bei der Modellierung folgende Punkte beachtet:

- Es sollten nach Möglichkeit Hexaederelemente verwendet werden.
- Es sind Elemente mit quadratischem Verschiebungsansatz zu wählen.
- Die Elemente sollten über reduzierten Integrationsansatz verfügen, um *shear locking* zu verhindern.
- In kritischen Bereichen sollten sich die Elementgrößen nicht sprunghaft ändern.
- Das Verhältnis der Elementlängen in Bauteilrichtung ( $e_y$ ) und in Richtung der Bauteilbreite ( $e_x$ ) ist mit 1:2 begrenzt ( $e_y : e_x \leq 1 : 2$ ).
- Die Elementlänge in Dickenrichtung ( $e_z$ ) darf bis zu zehn Mal größer sein als die Länge in den beiden anderen Raumrichtungen ( $e_y : e_z \leq 1 : 10$  und  $e_x : e_z \leq 1 : 10$ ).
- Durch kontinuierliche Netzverfeinerung konvergiert die Strukturspannung gegen einen numerischen Grenzwert.

Nach erfolgter Berechnung gibt es weitere Möglichkeiten, um ein Modell auf Plausibilität zu kontrollieren. Als erste Überprüfung werden die Auflagerkräfte ( $A_i$ ) und die aufgebrachten äußeren Lasten ( $E_i$ ) gegenübergestellt. Diese Gleichgewichtsbedingung ist in Gleichung 3.2 formuliert.

$$\sum E_i = \sum A_i \quad \text{mit } i \in [x, y, z] \quad (3.2)$$

Eine weitere Kontrolle bietet der Quotient aus kinetischer Energie ( $E_K$ ) und innerer Energie ( $E_U$ ) [16]. Bei einem statischen Modell muss dieser die Gleichung 3.3 erfüllen.

$$\frac{E_K}{E_U} \leq 0,1 \quad (3.3)$$

Der Energieerhaltungssatz kann für eine weitere Kontrolle herangezogen werden [16]. Die allgemeine Gleichung 3.4 vereinfacht sich im vorliegenden statischen Fall mit linear-elastischem Materialverhalten zu Gleichung 3.5.

$$E_U + E_K + E_F - E_W - E_{QB} = \textit{konstant}. \quad (3.4)$$

$$E_U - E_W = 0 \quad (3.5)$$

Mit	$E_U$	...	innere Energie
	$E_K$	...	kinetische Energie
	$E_F$	...	Reibungsenergie
	$E_W$	...	Arbeit der äußeren Kräfte
	$E_{QB}$	...	Dämpfungsenergie

## 3.2 Ergebnisse des 2D-Modells

Um die Ergebnisse des Programmes Abaqus FEA [14] besser interpretieren und auswerten zu können, wurden für die Berechnung der Strukturformzahlen, die Belastungen (Normalkraft, positives Moment um die Z-Achse und positives Moment um die X-Achse) auf das vereinfachte 2D-Modell separat angesetzt. Wesentliche Einflüsse auf die Strukturspannung haben einerseits die geometrischen Abmessungen des Konstruktionsdetails, sowie die entsprechende Vernetzung des FE-Modells.

### 3.2.1 Kritische Bereiche

Die geometrische Form des Knotenbleches sowie die Verbindung zwischen Rundstab und Knotenblech sind die maßgebenden Einflussfaktoren, die zu Spannungsspitzen führen. Diese Spannungsspitzen sind für die Bestimmung der Ermüdungsbeanspruchbarkeit eines Konstruktionsdetails erforderlich.

Die Effekte der geometrischen Einflüsse, die zu Spannungsspitzen führen, werden mit Hilfe des Programmes Abaqus FEA [14] gezeigt. In Abbildung 3.6 ist der Spannungsverlauf (1. Hauptspannung) des vereinfachten Modells dargestellt. Der blaue Bereich im Knotenblech zeigt die geringen Spannungen sowie einen eher homogenen Spannungsverlauf an. Der rote Bereich im Hänger weist auf höhere Spannungen hin, jedoch auch auf einen homogenen Spannungsverlauf. Die Spannungsspitzen treten bei Steifigkeitsänderungen auf. Diese sind in Abbildung 3.6 mit Spannungsspitze 1 und 2 gekennzeichnet. Für die maximalen Spannungsspitzen sind die 1. Hauptspannungen maßgebend.

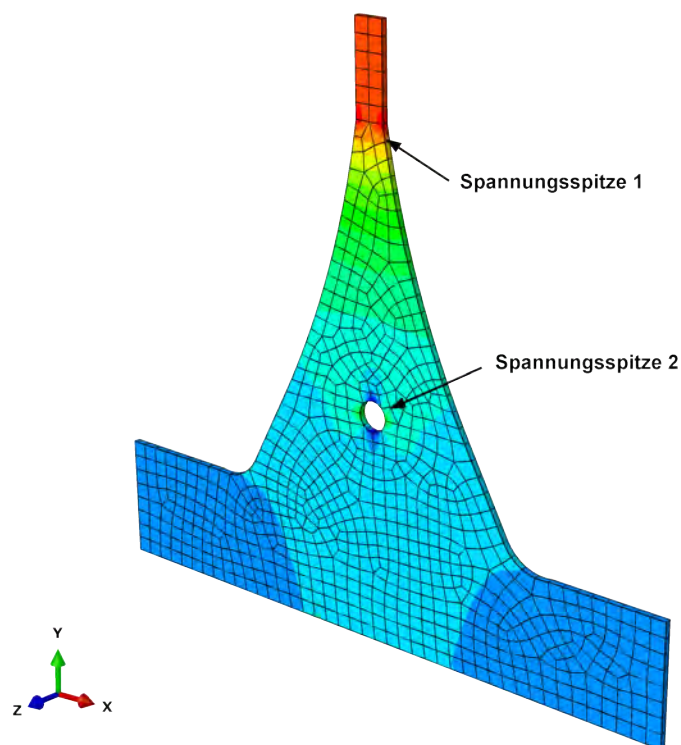


Abbildung 3.6: 1. Hauptspannung mit Spannungsspitzen

Die erste Störzone befindet sich im Übergang vom Hänger zum Knotenblech (Spannungsspitze 1), die zweite Störzone im Bereich des Freischnittes im Knotenblech (Spannungsspitze 2). Daher wurde in der Modellierung des Modells besonders auf diese zwei kritischen Bereiche geachtet. Mit Netzverfeinerungen an den Störzonen konnten die Spannungsspitzen genauer dargestellt und berechnet werden. Durch das Erzeugen von Pfaden entlang der kritischen Zonen konnten die Zahlenwerte der Spannungsspitzen abgelesen werden.

### 3.2.2 Ermittlung der Strukturformzahl

Zur Vergleichbarkeit der Spannungsspitzen wird die Strukturformzahl eingeführt. Diese geometrische Kennzahl stellt die Nennspannung und die Strukturspannung gegenüber. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 2.14. Zur Berechnung der Strukturformzahl benötigt man demnach die maximale Strukturspannung und die zugehörige Nennspannung. Für nachfolgende Berechnungen wurde die nun beschriebene Vorgangsweise gewählt:

- Das zu untersuchende Modell wird mit einer Einheitslast belastet und entsprechend dem Kapitel 3.1.4 Netzerstellung vernetzt. Danach werden die Spannungen im Modell mithilfe von Abaqus FEA berechnet.
- Es erfolgt die Ermittlung der Lage der maßgebenden Spannungen. Einen ersten Überblick dazu liefert ein Konturbild, bei dem die groben Spannungsverläufe erkennbar sind (siehe zum Beispiel Abbildung 3.7a). Außerdem wird die 1. Hauptspannung entlang von Pfaden angegeben, um einen quantitativen Spannungsverlauf für das Hängermodell zu bekommen (siehe Abbildung 3.7b). Beim vereinfachten 2D-Modell treten die maßgebenden Spannungsspitzen entlang der Modellkanten auf und können durch die angelegten Pfade gut erfasst werden.

Bei den 3D-Modellen in Kapitel 4 und 5 werden erst nach Auslesen der Integrationspunkte der Elemente eines kritischen Bereiches die maßgebenden Werte der Strukturspannungen ermittelt. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, können die Spannungsspitzen direkt als Strukturspannungen interpretiert werden.

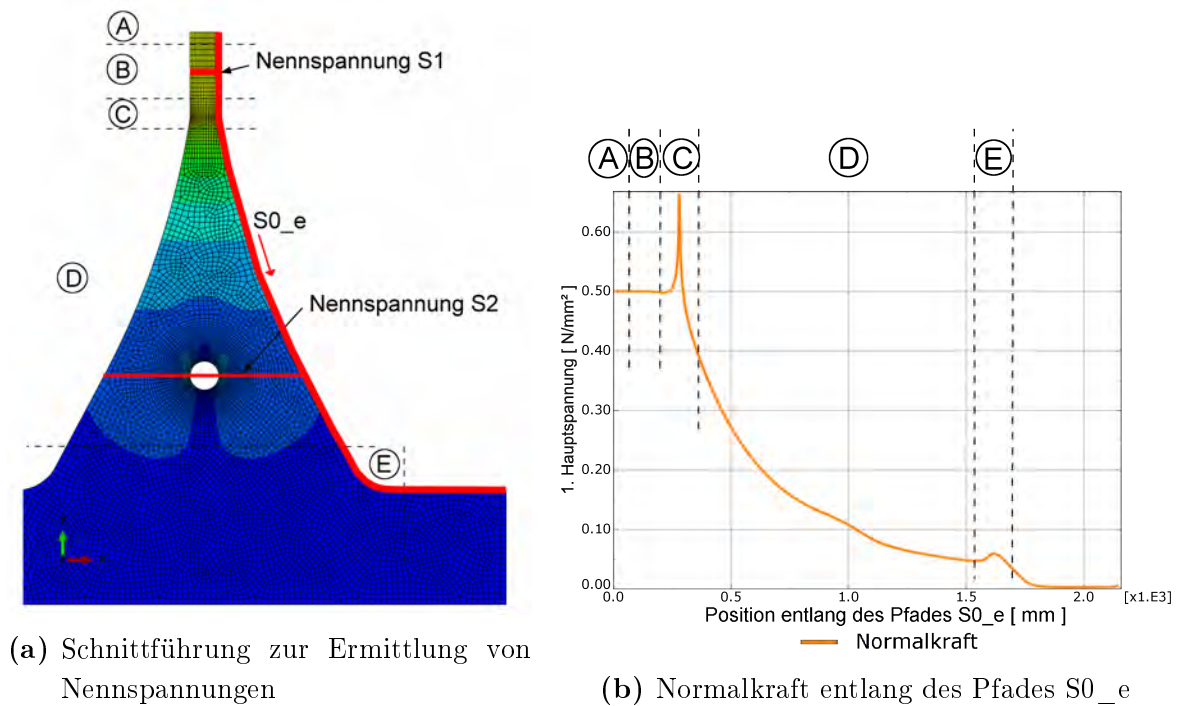
- In einem nächsten Schritt wird für jeden kritischen Bereich eine Schnittführung zugeordnet, bei dem die Nennspannungen leicht zu ermitteln sind. Diese Schnittführung liegt in der Nähe der Lage der Spannungsspitze und zeichnet sich durch eine einfache und genau definierte Geometrie aus. Dadurch wird gewährleistet, dass die Nennspannung ohne größeren Aufwand nach der linear elastischen Biegelehre berechnet werden kann. Die Berechnung der Nennspannung erfolgt demnach nicht zwingend in einem Schnitt, der die Spitzenspannung beinhaltet.
- Zuletzt wird der Quotient aus Strukturspannung und Nennspannung gebildet (siehe Gleichung 2.14). Als Ergebnis erhält man die Strukturformzahl.

Mithilfe der Strukturformzahlen ist ein Vergleich hinsichtlich der Ermüdungsbeanspruchbarkeit verschiedener Geometrien möglich. Als logische Konsequenz ergibt sich eine Abhängigkeit der Strukturformzahl von der gewählten Geometrie. Bei einer Änderung der Abmessungen muss auch mit einer Änderung der Strukturformzahl gerechnet werden.

Ist die lokale Spannungsspitze unter gegebener Belastung unbekannt, kann mithilfe der Strukturformzahl eine Abschätzung erfolgen. Dazu wird die Nennspannung in einem Schnitt nach Abbildung 3.7a berechnet. Aus dem Produkt von Nennspannung und Strukturformzahl kann dann die Strukturspannung in dem kritischen Bereich ermittelt werden. Dabei spielt die genaue Lage der maximalen Spannungsspitze eine untergeordnete Rolle.

### 3.2.3 Spannungsverläufe am Gesamtmodell

Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8 zeigen die Spannungsverläufe entlang des Pfades S0\_e. Der Pfad S0\_e verläuft entlang der äußeren Kante des 2D-Modells, siehe Abbildung 3.7a. Sowohl unter Normalkraftbeanspruchung (Abbildung 3.7b) als auch unter Momentenbeanspruchung um die X-Achse (Abbildung 3.8a) und die Z-Achse (Abbildung 3.8b) zeigt sich ein ähnlicher Spannungsverlauf. In den Diagrammen im Bereich A erfolgt die Lasteinleitung. Dadurch ist ein teilweise unstetiger Verlauf vorhanden. Nach einer Lasteinleitungsphase ergeben sich im Bereich B für die 1. Hauptspannung die Nennspannung S1 des Querschnitts des Hängers. Bei der Kerbe im Übergangsbereich C von Flachstahlhänger auf Knotenblech steigt die 1. Hauptspannung stark an und erreicht das globale Maximum. Durch die Querschnittsvergrößerung kommt es dann zu einem stetigen Spannungsabfall. Dieser wird erst beim Übergangsbereich E von Hängeranschlussblech zum Steg unterbrochen. Durch einen Ausrundungsradius von 150 mm ist hier jedoch nur eine geringe Spannungserhöhung vorhanden. Die Spannungsspitze 2 ist in den gegebenen Diagrammen nicht erkennbar. Hierzu ist eine Auswertung der Spannungen im Bereich des Freischnittes notwendig.



**Abbildung 3.7:** Schnittführung und Spannungsverlauf des 2D-Modells

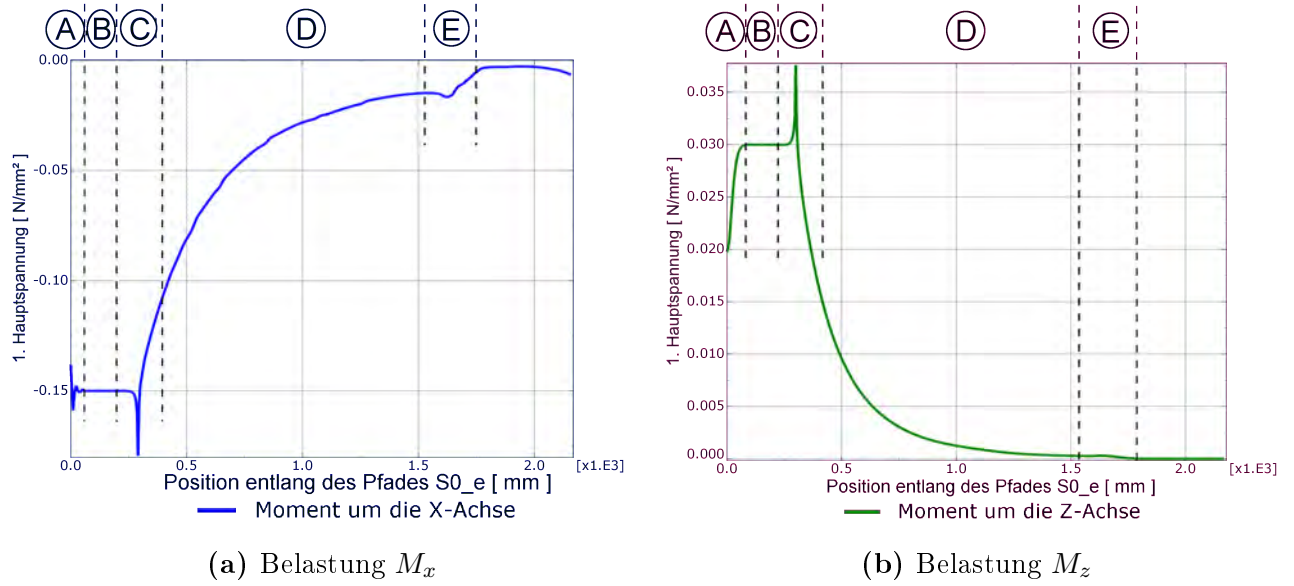


Abbildung 3.8: Spannungsverlauf entlang des Pfades (S0\_e) am 2D-Modell

### 3.2.4 Berechnung der Nennspannungen

Wie bereits angemerkt, ist zur Berechnung der Strukturformzahl eine Nennspannung erforderlich. Diese wird an zwei Schnitten gemäß Abbildung 3.7a ermittelt. Der erste Schnitt erfolgt im Regelbereich des Hängers. Wie im Kapitel 3.2.3 beschrieben, stellt sich nach dem Lasteinleitungsbereich für die 1. Hauptspannungen die Nennspannung S1 ein, siehe zum Beispiel Bereich B in Abbildung 3.8. Dies bedeutet, dass eine lineare Spannungsverteilung über den Querschnitt vorhanden ist und die Nennspannungsberechnungen nach der linear elastischen Biegelehre erfolgen dürfen. Im gegebenen Fall handelt es sich um eine Querschnittsfläche mit den Abmessungen  $h = 100 \text{ mm}$  und  $b = 20 \text{ mm}$ . Die Nennspannungen S1 ergeben sich damit zu:

$$\sigma_{S1 \text{ Normalkraft}} = \frac{N}{A} = \frac{1000 \text{ N}}{2000 \text{ mm}^2} = 0.5 \text{ N/mm}^2 \quad (3.6)$$

$$\sigma_{S1 \text{ MomentZ}} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{1000 \text{ Nmm}}{33333 \text{ mm}^3} = 0.03 \text{ N/mm}^2 \quad (3.7)$$

$$\sigma_{S1 \text{ MomentX}} = \frac{M_x}{W_x} = \frac{1000 \text{ Nmm}}{6667 \text{ mm}^3} = 0.15 \text{ N/mm}^2 \quad (3.8)$$

Die zweite Schnittführung verläuft horizontal auf Höhe des Freischnittes. Der Schnitt ist so zu legen, dass er durch den Mittelpunkt des Freischnittes geht. Die zu verwendende Nennspannung ist jene Spannung, die direkt am Freischnitt auftritt. Dadurch sind die Nennspannungen S2 mit folgenden Formeln zu berechnen:

$$\sigma_{S2 \text{ Normalkraft}} = \frac{N}{A} = \frac{1000 \text{ N}}{12000 \text{ mm}^2} = 0.083 \text{ N/mm}^2 \quad (3.9)$$

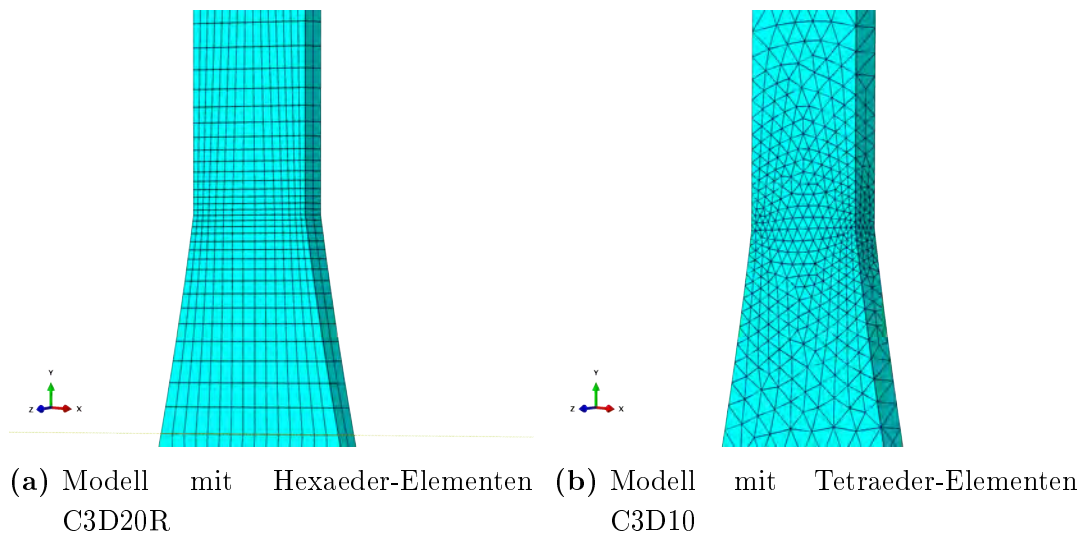
$$\sigma_{S2 \text{ MomentZ}} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{1000 \text{ Nmm}}{1.14 * 10^7 \text{ mm}^3} = 8.77 * 10^{-5} \text{ N/mm}^2 \quad (3.10)$$

$$\sigma_{S2 \text{ MomentX}} = \frac{M_x}{W_x} = \frac{1000 \text{ Nmm}}{40000 \text{ mm}^3} = 0.025 \text{ N/mm}^2 \quad (3.11)$$



### 3.2.5 Netzverfeinerung

Um genauere Ergebnisse der Spannungsspitzen bei den kritischen Zonen zu erhalten, wurde in den Störzonen das Netz verfeinert. Eine Netzverfeinerung auf 4 mm lange Elemente fand im Übergang vom Hänger und dem Beginn des Knotenbleches statt, sowie im Bereich des Freischnittes im Knotenblech. Anhand von zwei Modellen mit der Belastung Normalkraft wurden die Spitzenspannungen in der ersten Störzone bei unterschiedlicher Wahl der Elemente verglichen. Im ersten Modell wurden 4 mm Hexaeder-Elemente und beim zweiten 4 mm Tetraeder-Elemente verwendet (siehe Abbildung 3.9). Zudem wurde ein Modell mit 0,5 mm Hexaeder-Elementen untersucht.



**Abbildung 3.9:** Modelle mit unterschiedlichen Elementen

Bei dem vereinfachten Modell ist zu beachten, dass es in der ersten Störzone durch den geometrischen Knick in der Hängerform eine geometrische Kerbe gibt und es dadurch zu Spannungsspitzen kommt. In der Abbildung 3.10 sind die 1. Hauptspannungen der Modelle entlang dem Pfad S1\_e zu sehen. Hier erkennt man, dass die Spannungsspitzen zwischen den drei Modellen sehr unterschiedliche Größen aufweisen.

Werden die Strukturspannungen nach dem Hot-Spot-Konzept berechnet, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, wird eine Interpolation bestimmter Spannungen notwendig. Dies geschieht nach *International Institute of Welding* [8] mit der Gleichung 2.13. Die dafür notwendigen Spannungen erhält man über Interpolationspunkte, welche sich in einem definierten Abstand zu dem geometrischen Knick befinden (siehe Abbildung 2.6).

Die benötigten Spannungen mit den Interpolationspunkten in den Abständen 4 mm, 8 mm und 12 mm sind in der Tabelle 3.1 aufgelistet. Ebenfalls sind die Spannungsspitzen am Knick (Abstand 0 mm) angegeben. In der Tabelle 3.1 sind weiters die interpolierten Hot-Spot-Strukturspannungen nach der Gleichung 2.13 zu sehen. Man erkennt, dass sich die Hot-Spot-Strukturspannungen im Gegensatz zu den Spannungsspitzen (Abstand 0 mm) kaum unterscheiden und daher die Elementwahl keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Spannungen hat.

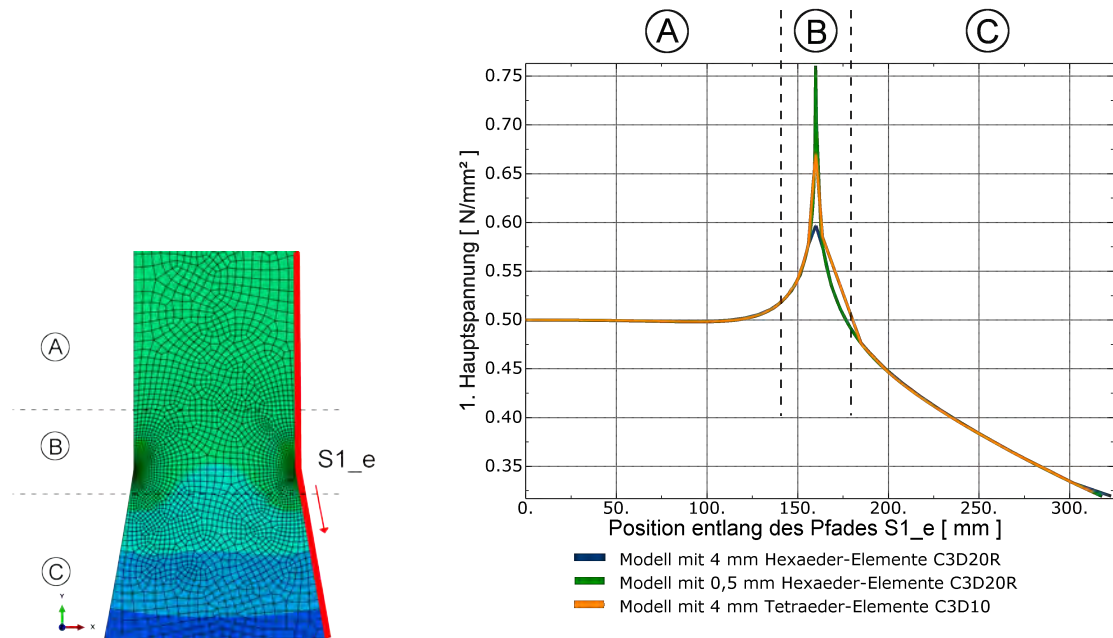


Abbildung 3.10: 1. Hauptspannung in Abhängigkeit von der Vernetzung

Tabelle 3.1: Hot-Spot-Strukturspannung in Abhängigkeit der Vernetzung

Abstand	1. Hauptspannung		
	4mm Hex-Elemente	0,5 mm Hex-Elemente	Tet-Elemente
[ mm ]	[ N/mm <sup>2</sup> ]	[ N/mm <sup>2</sup> ]	[ N/mm <sup>2</sup> ]
0	5.964E-01	7.606E-01	6.703E-01
4	5.779E-01	5.782E-01	5.803E-01
8	5.502E-01	5.506E-01	5.525E-01
12	5.347E-01	5.350E-01	5.343E-01
Hot-Spot-Spannung	6.178E-01	6.179E-01	6.176E-01

Bei einem Modell mit geometrischer Knick steigt die Spitzenspannung mit jeder Netzverfeinerung an. Es ist nicht möglich, einen Grenzwert zu ermitteln, da die Spannung theoretisch unendlich hoch wird. In der Realität wird beim Knick immer eine gewisse Ausrundung vorhanden sein. Deshalb wurde im Zuge der Parameteruntersuchung der geometrische Knick mit einem Radius von 5 mm ausgerundet. Mithilfe von Kreistangenten wurde die fiktive Ausrundung an die benachbarten Geometrien angeschlossen. Dadurch ist ein Interpolieren nach den Empfehlungen des *International Institute of Welding* [6] nicht mehr notwendig und die Spannungsspitzen können bei hinreichender Netzverfeinerung als Strukturspannungen interpretiert werden.

Um herauszufinden inwie weit eine Netzverfeinerung notwendig ist, wurde ein Modell mit einem Ausrundungsradius von 2 mm untersucht. Die Berechnung erfolgte mit vier verschiedenen Netzweiten. Wenn die Spannungserhöhungen bei einem doppelt so feinen Netz höchsten 10% beträgt, wird das Netz als hinreichend genau modelliert betrachtet.

Wie Abbildung 3.11 zeigt, würde eine Netzverfeinerung von 4 mm auf 2 mm großen Elementen hinreichend genau sein. Jedoch bei den Berechnungen der Modelle kommt es in den Bereichen der Ausrundungen mit diesen Netzweiten zu verzerrten Elementen. Deshalb wurde für die Modelle in dieser Diplomarbeit für die kritischen Bereiche Netzverfeinerungen bis zu einer Elementlänge von 1 mm vorgenommen.

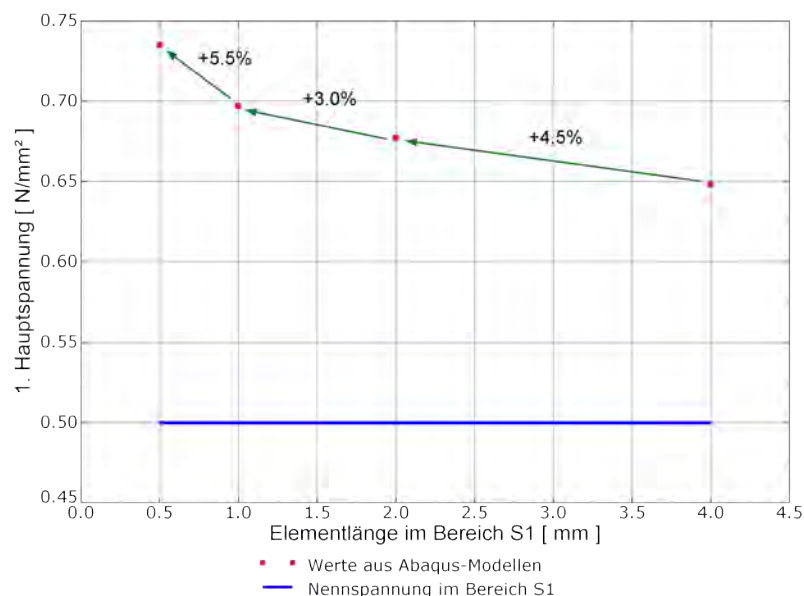
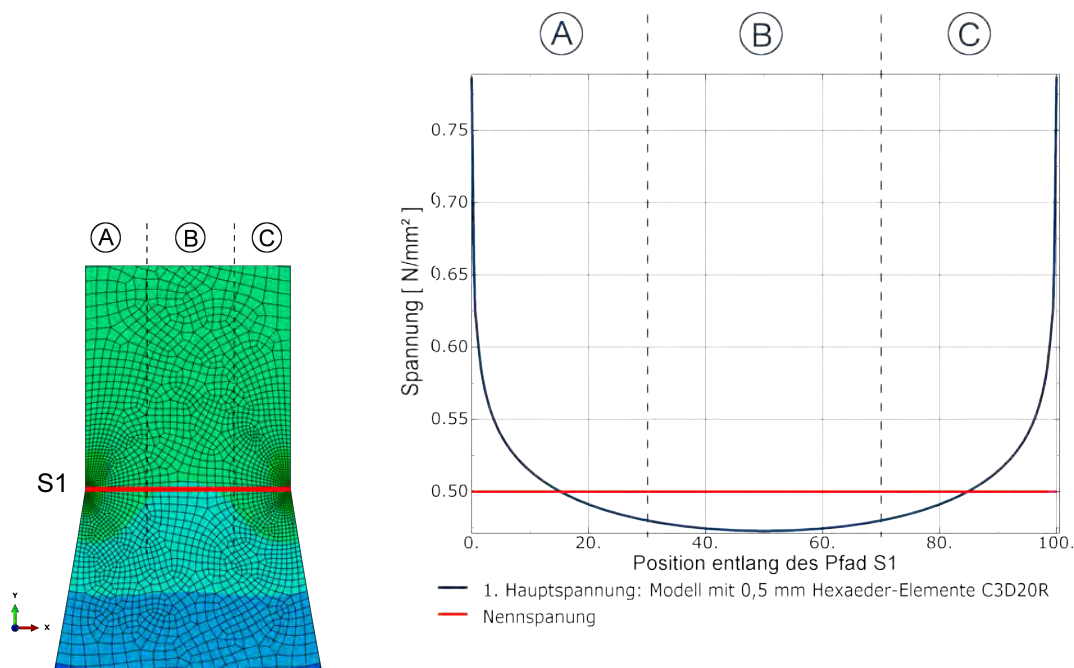


Abbildung 3.11: Änderung der 1. Hauptspannung in Abhängigkeit von der Netzfeinheit

### 3.2.6 Normalkraft

Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, haben sich vor allem der Übergangsbereich vom Regelquerschnitt des Hängers zum Knotenblech (Spannungsspitze 1) sowie der Bereich beim Freischnitt (Spannungsspitze 2) als kritische Zonen erwiesen. Um einen ersten Überblick über die Spannungsverläufe unter der Belastung Normalkraft zu bekommen, werden im Folgenden diese zwei kritischen Bereiche genauer betrachtet.

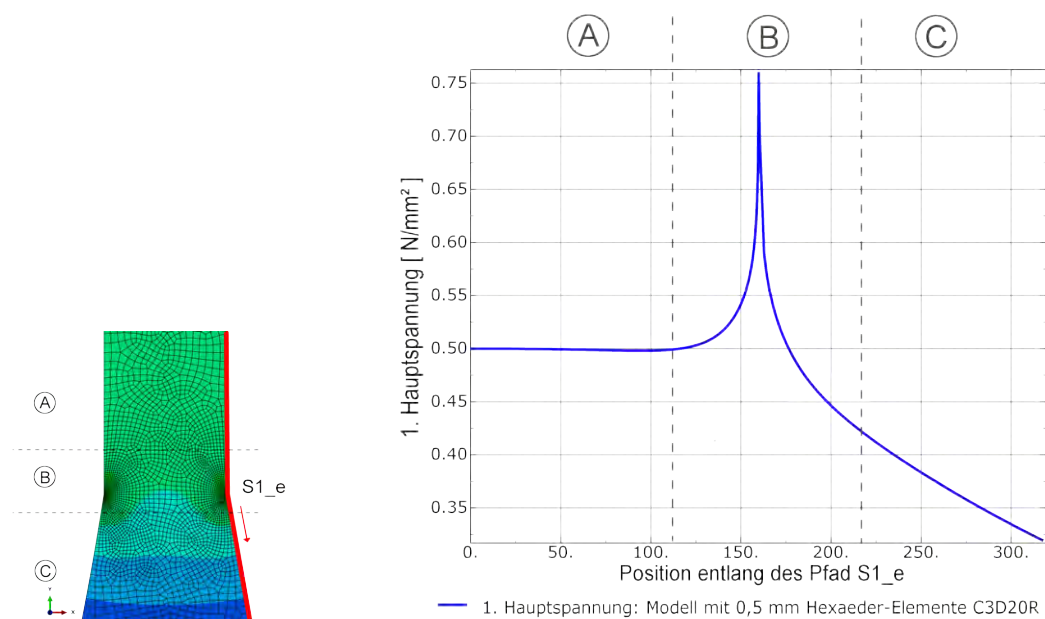
In Abbildung 3.12 ist der Spannungsverlauf entlang des Pfades S1 unter Normalkraftbelastung (Zugkraft = 1000 N) zu sehen. Der Spannungsverlauf entlang des Pfades S1\_e, welche entlang der Modellkante verläuft, ist in Abbildung 3.13 zu sehen. Man erkennt, dass es beim Übergangsbereich B vom Regelquerschnitt des Hängers zum Knotenblech zu deutlichen Spannungserhöhungen kommt. Im Lasteinleitungsbereich A entspricht der Wert der 1. Hauptspannung dem der Nennspannung ( $\sigma_{S1\text{ Normalkraft}} = \frac{N}{A} = 0.5$ ). Bei der geometrischen Kerbe liegt die erwartete Spannungsspitze. Danach kommt es zu einem kontinuierlichen Abklingen der Spannungen. Dies resultiert aus dem größer werdenden Querschnitt.



**Abbildung 3.12:** Spannungsverlauf im kritischen Bereich S1 unter Normalkraftbelastung

In Abbildung 3.14 wird der Spannungsverlauf entlang des Pfades S2 unter Normalkraftbelastung gezeigt. Direkt beim Freischnitt kommt es zu deutlichen Spannungserhöhungen. Man erkennt, dass die Spannungsspitze lokal begrenzt ist und über die Restbreite auf Höhe des Freischnitts sehr schnell abklingt. Beim Betrachten des Pfades S2\_e, welcher entlang der Kante des kreisförmigen Freischnittes geführt ist (siehe Abbildung 3.15), sieht man, dass sich die maximale Spannungsspitze mit einem geringen Winkel von circa  $+2^\circ$  zur Horizontalen befindet (Bereich C).

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, werden die ermittelten Spannungsspitzen direkt als Strukturspannungen interpretiert. Für die Strukturformzahl wird die maximale Spannungsspitze in dem zu untersuchenden kritischen Bereich herangezogen. Dies bedeutet, dass auf einem ausgewählten Pfad nicht zwingend der maximale Wert liegt. Erst durch Auslesen der Integrationspunkte der Elemente im kritischen Bereich werden die maßgebenden Werte ermittelt. Der Quotient aus der Strukturspannung und der dazugehörigen, definierten Nennspannung bildet die Strukturformzahl, siehe Glei-



**Abbildung 3.13:** Spannungverlauf entlang des Pfades S1\_e im Bereich S1 unter Normal- kraftbelastung

chung 2.14. Im Gegensatz zu den 3D-Modellen in den Kapiteln 4 und 5 liegen aber beim vereinfachten 2D-Modell die maßgebenden Werte auf den ausgewählten Pfaden.

In der Tabelle 3.2 sind die Spannungen und die Strukturformzahlen unter Normal- kraftbelastung angegeben. Für die Strukturspannung im kritischen Bereich S1 wurde die maximale Spannungsspitze nach Abbildung 3.13 (Bereich B) verwendet. Für den kritischen Freischnittbereich S2 wurde die maximale Spannungsspitze nach Abbil- dung 3.15 (Bereich C) genommen. Die dazugehörigen Nennspannungen sind in Kapi- tel 3.2.4 berechnet worden. Die Strukturformzahl im Bereich des Freischnitts S2 hat einen Wert von 2,89. Diese ist relativ ähnlich mit der Strukturformzahl einer unendlich langen Scheibe mit Loch unter Zugkraft, welche 3 beträgt.

**Tabelle 3.2:** Spannungen und Strukturformzahl unter Normalkraftbelastung

	Einheit	S1	S2
Nennspannung	$[N/mm^2]$	5,00E-01	8,33E-02
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	7,60E-01	2,41E-01
Strukturformzahl	$[-]$	1,52	2,89

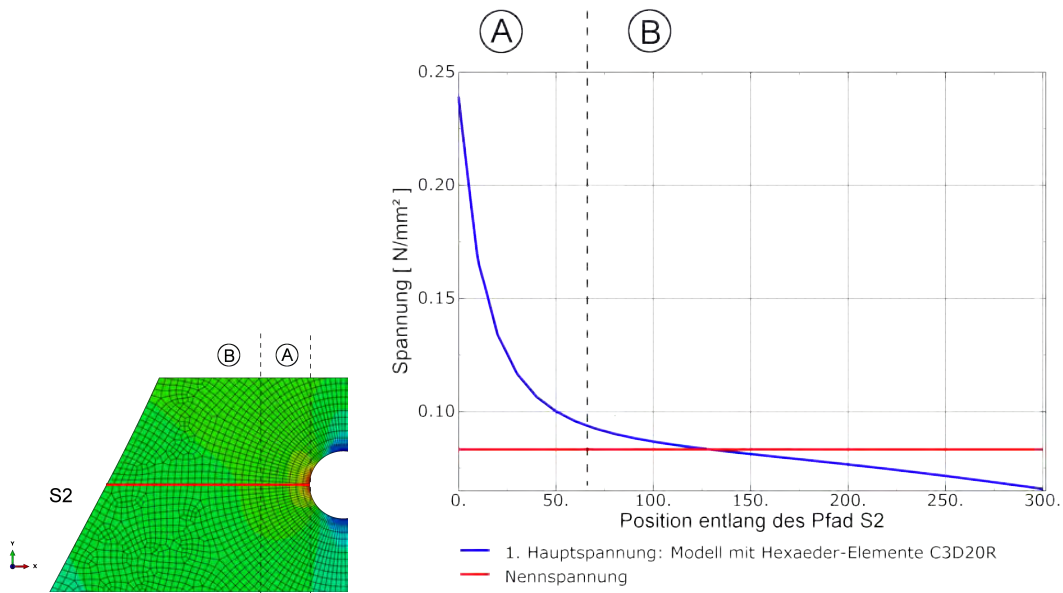


Abbildung 3.14: Spannungsverlauf im Freischnittbereich S2 unter Normalkraftbelastung

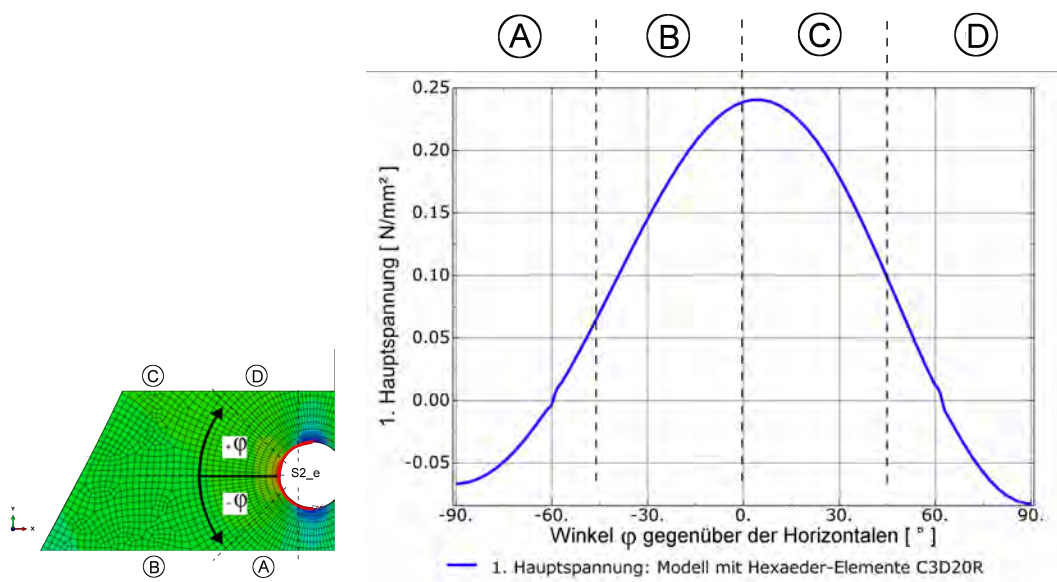
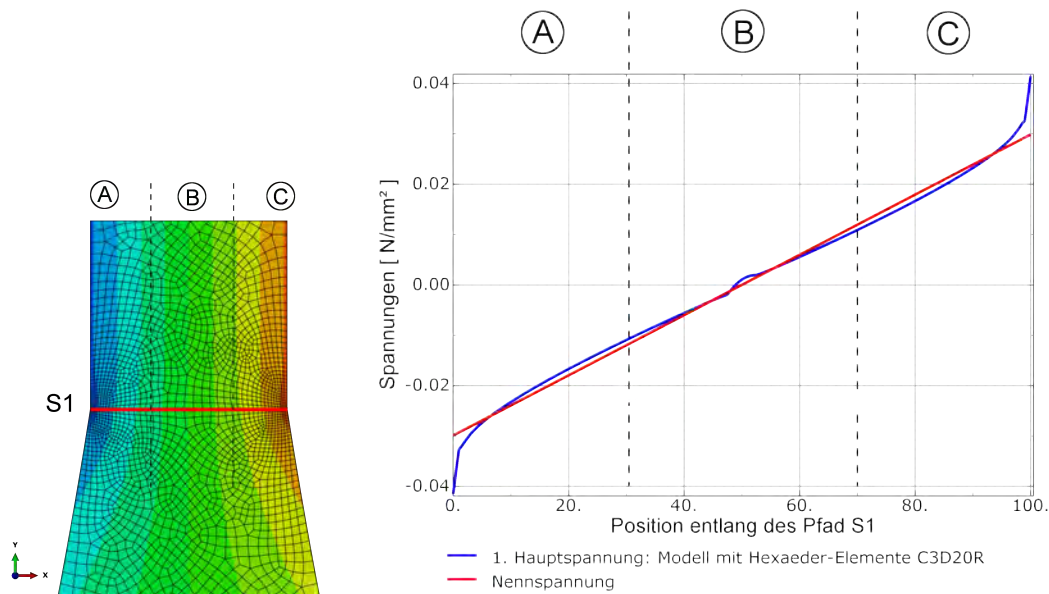


Abbildung 3.15: Spannungsverlauf entlang des Pfades S2\_e im Bereich S2 unter Normalkraftbelastung

### 3.2.7 Moment um die Z-Achse

Das positive Moment um die Z-Achse von  $1000 \text{ Nmm}$  wurde in das vereinfachte Modell als Kräftepaar eingeleitet. Diese Krafteinleitung, sowie die weiteren Randbedingungen für das Modell wurden umfangreich in Kapitel 3.1.3 beschrieben.

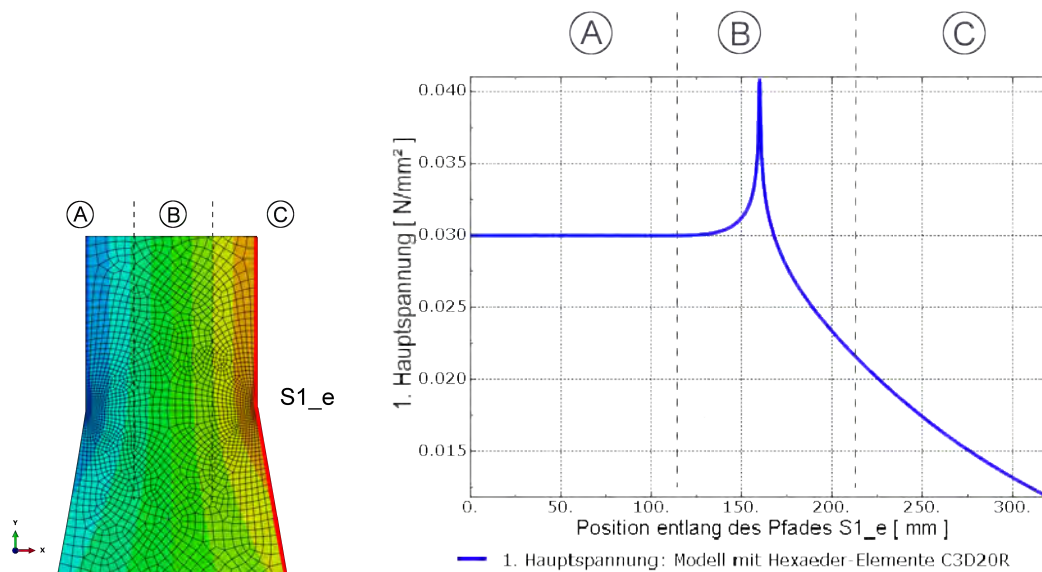
In Abbildung 3.16 ist der Spannungsverlauf entlang der Schnittführung S1 unter der Momentenbelastung in Z-Richtung zu sehen. Während der Spannungsverlauf größtenteils linear über den Querschnitt verläuft, kommt es im Randbereich zu Spannungserhöhungen. Der Spannungsverlauf entlang des Pfades S1\_e an der Modellkante ist in Abbildung 3.17 zu sehen. Im Bereich A entspricht die 1. Hauptspannung der Nennspannung ( $\sigma_{S1 \text{ Moment}Z} = \frac{M_z}{W_z} = 0.03$ ) vom Regelquerschnitt des Hängers. Im Bereich der Kerbe B befindet sich die maximale Spannungsspitze. Danach kommt es zu einem kontinuierlichen Abklingen der Spannungen, aufgrund der zunehmenden Querschnittsfläche.



**Abbildung 3.16:** Spannungsverlauf im Bereich S1 unter Momentenbelastung  $M_z$

In Abbildung 3.18 ist der Spannungsverlauf entlang der horizontalen Schnittführung im Freischnittbereich S2 unter Momentenbelastung um die Z-Achse zu sehen. Hier erkennt man, dass der Spannungsverlauf über den Querschnitt nichtlinear ist. Beim Freischnitt sind die Spannungen gegenüber der Nennspannung um ein Vielfaches größer. Im Randbereich B sind die Werte der 1. Hauptspannungen zwar größer als direkt beim Freischnitt, jedoch sind die Rand-Strukturspannungen kleiner als die Rand-Nennspannungen. Daraus folgt die genauere Betrachtung des kritischen Freischnittbereiches.

In Abbildung 3.19 ist der Spannungsverlauf entlang eines halbkreisförmigen Pfades entlang des Freischnittes zu sehen. Die maximale Spannungsspitze befindet sich mit einem Winkel von circa  $+50^\circ$  zur Horizontalen (Bereich D). Bei einem Winkel von circa  $-40^\circ$  tritt eine lokales Minimum auf (Bereich B).



**Abbildung 3.17:** Spannungsverlauf entlang des Pfades S1\_e im Bereich S1 unter Momentenbelastung  $M_z$

In der Tabelle 3.3 sind die Spannungen und die Strukturformzahlen unter Momentenbelastung  $M_z$  um die starke Achse angegeben. Die Nennspannungen sind in Kapitel 3.2.4 berechnet worden. Für die Strukturspannung im Bereich S1 wurde der Wert der Spannungsspitze in der geometrischen Kerbe herangezogen, siehe Abbildung 3.17 (Bereich B). Beim Freischnitt wurde die maximale Spannungsspitze im Bereich D nach Abbildung 3.19 verwendet. Die Strukturformzahl ließ sich nach der Gleichung 2.14 berechnen. Die Strukturformzahl im Bereich S1 hat einen Wert von 1,36 und ist ähnlich dem der Normalkraftbelastung. Beim Freischnittbereich S2 erhält man eine Strukturformzahl von 8,29. Dies ist fast dreimal größer als die Strukturformzahl bei Normalkraftbelastung und resultiert aus dem Vergleich eines großen Strukturspannungswertes und der dazugehörigen geringen Nennspannung (siehe Abbildung 3.16).

**Tabelle 3.3:** Spannungen und Strukturformzahl unter Momentenbelastung  $M_z$

	Einheit	S1	S2
Nennspannung	[ $N/mm^2$ ]	3,00E-02	8,77E-05
Strukturspannung	[ $N/mm^2$ ]	4,09E-02	7,27E-04
Strukturformzahl	[ - ]	1,36	8,29

Bei einer Momentenbeanspruchung um die Z-Achse treten im Bereich des Freischnittes geringere Spannungen als am Rand des Modells auf. Auf der sicheren Seite liegend kann man die Spannungen dieser Randbereiche nach der technischen Biegelehre berechnen. In Abbildung 3.20 ist erkennbar, dass lediglich im Umgebungsbereich der Kerbe (Position = 300 mm) die Randspannungen im Abaqus-Modell höher sind. Dieser Einfluss wird mithilfe der Strukturformzahl für S1 erfasst. Außerhalb davon zeigt sich, dass entlang der Randfaser die Nennspannung immer höher als die Strukturspannung



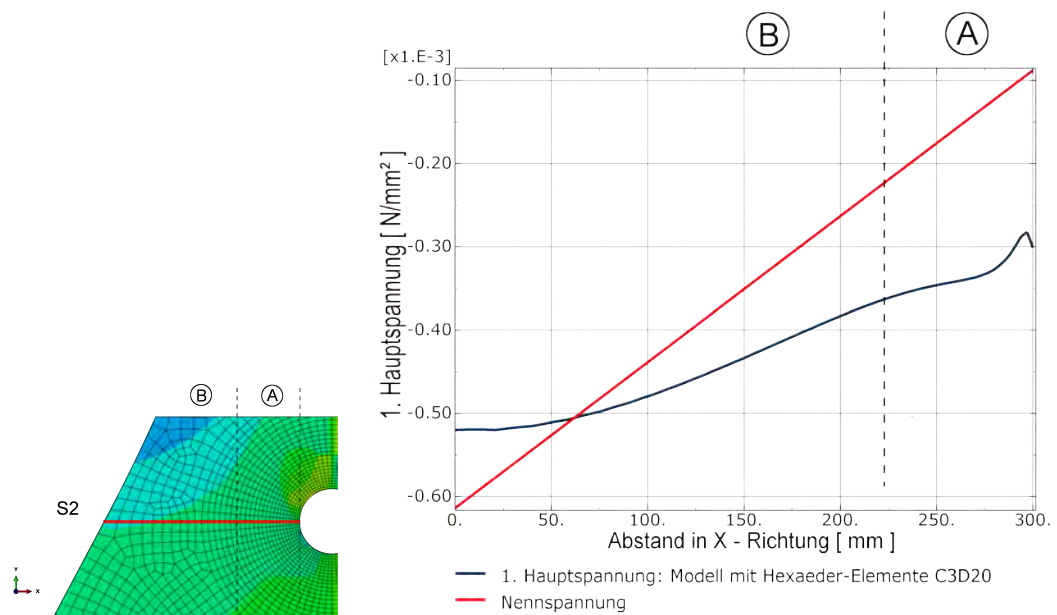


Abbildung 3.18: Spannungsverlauf im Freischnittbereich S2 unter Momentenbelastung  $M_z$

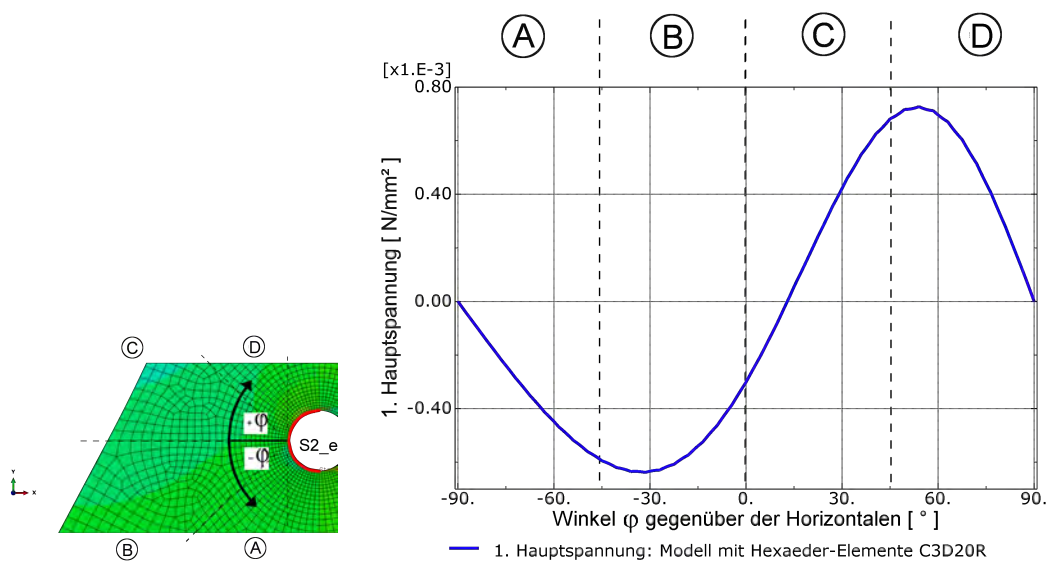
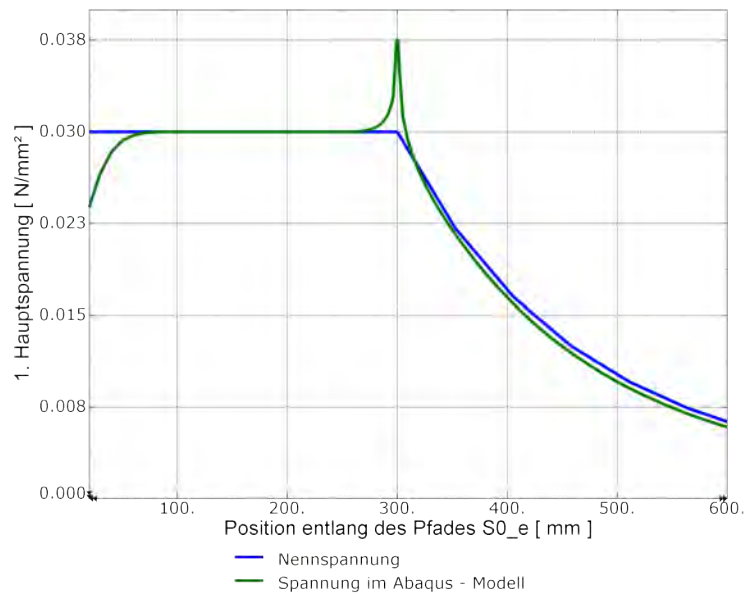


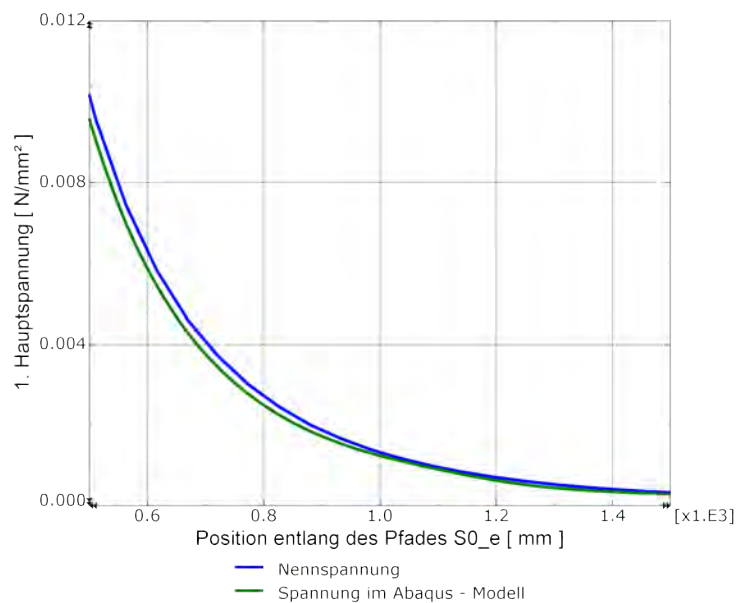
Abbildung 3.19: Spannungsverlauf entlang des Pfades S2\_e im Bereich S2 unter Momentenbelastung  $M_z$

ist.



**Abbildung 3.20:** Vergleich der Randspannungen im Bereich S1

Abbildung 3.21 zeigt, dass dies auch auf den Bereich auf Höhe des Freischnittes zutrifft (Position = 1250 mm). Die Nennspannung ist immer etwas höher als die ermittelte Strukturspannung. Deshalb ist eine Nachweisführung mittels der Nennspannungen möglich, ohne die genauen Strukturspannungswerte zu kennen.

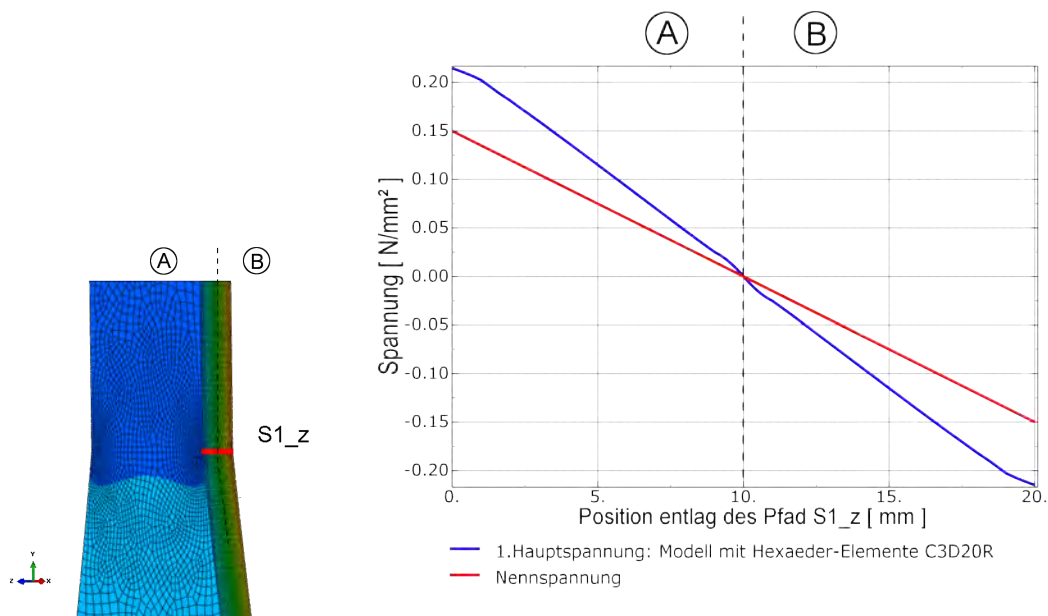


**Abbildung 3.21:** Vergleich der Randspannungen im Bereich S2

### 3.2.8 Moment um die X-Achse

Das positive Moment um die X-Achse von  $1000 \text{ Nmm}$  wurde ebenfalls in das vereinfachte Modell als Kräftepaar eingeleitet. Im Folgenden werden für die zwei kritischen Zonen die Spannungsverläufe unter der Momentenbelastung  $M_x$  um die schwache Achse beschrieben.

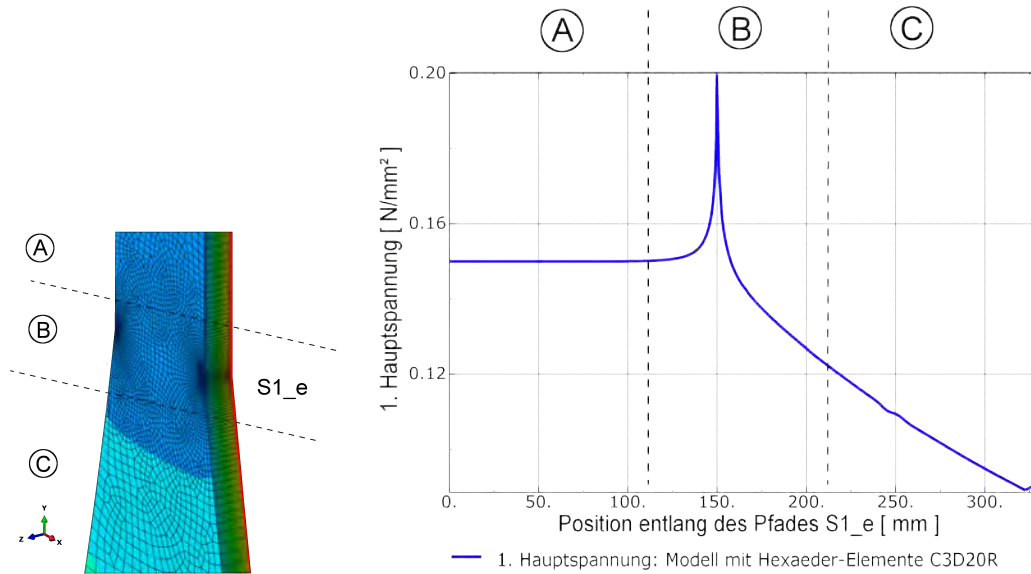
Um einen brauchbaren Spannungsverlauf im Bereich S1 zu bekommen, wurde der Pfad S1\_z entlang der Hängerdicke dargestellt, siehe Abbildung 3.22. Der Spannungsverlauf ist über die Hängerdicke größtenteils linear und nur im Randbereich kommt es zu geringeren Spannungserhöhungen. Um positive Werte für den Spannungsverlauf entlang der Modellkante zu bekommen, wurde die hintere Seite für den Pfad S1\_e gewählt. Der in Abbildung 3.23 zu sehende Spannungsverlauf verhält sich gleich wie der bei Momentenbelastung um die Z-Achse. Im Lasteinleitungsbereich A entspricht die 1. Hauptspannung gleich dem Wert der Nennspannung ( $\sigma_{S1 \text{ Moment} X} = \frac{M_x}{W_x} = 0.15$ ).



**Abbildung 3.22:** Spannungsverlauf entlang des Pfades S1\_z im Bereich S1 unter Momentenbelastung  $M_x$

In Abbildung 3.24 wird der Spannungsverlauf entlang der Hängerdicke auf Höhe des Freischnittes unter der Momentenbelastung  $M_x$  um die schwache Achse gezeigt. Der Spannungsverlauf ist entlang des Pfades S2\_z über die Hängerdicke linear. Um positive Werte für den Spannungsverlauf entlang der Modellkante beim Freischnitt zu bekommen, wurde der halbkreisförmige Pfad S2\_e ab der hinteren Seite angesetzt, siehe Abbildung 3.25. Ähnlich zum Spannungsverlauf bei Normalkraftbelastung befindet sich die maximale Spannungsspitze mit einem geringen Winkel von circa  $+2^\circ$  zur Horizontalen (Bereich C).

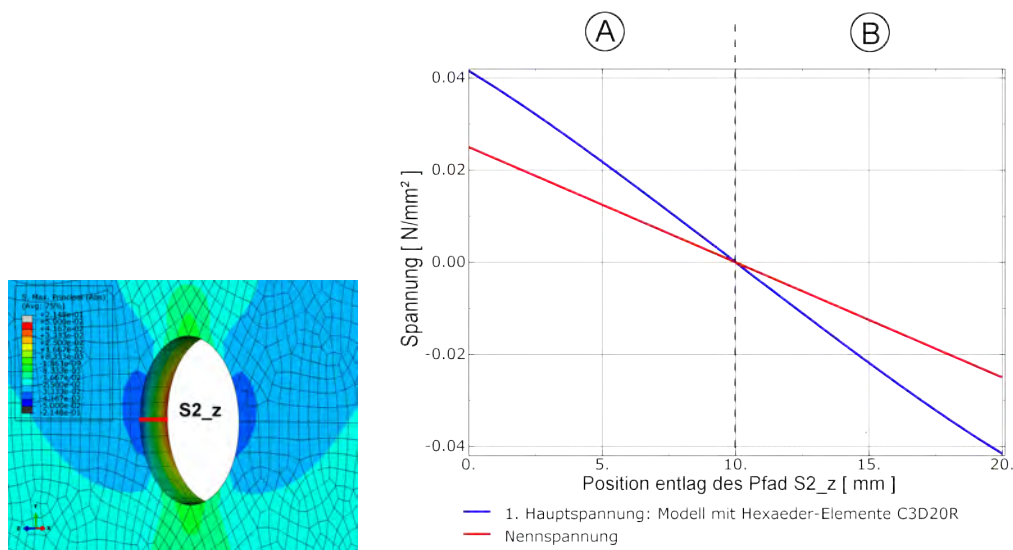
In der Tabelle 3.4 sind die Spannungen und die geometrischen Kennzahlen unter Momentenbelastung um die X-Achse dargestellt. Die für die kritischen Bereiche zugehörigen Nennspannungen wurden in Kapitel 3.2.4 berechnet. Für die Strukturspannung



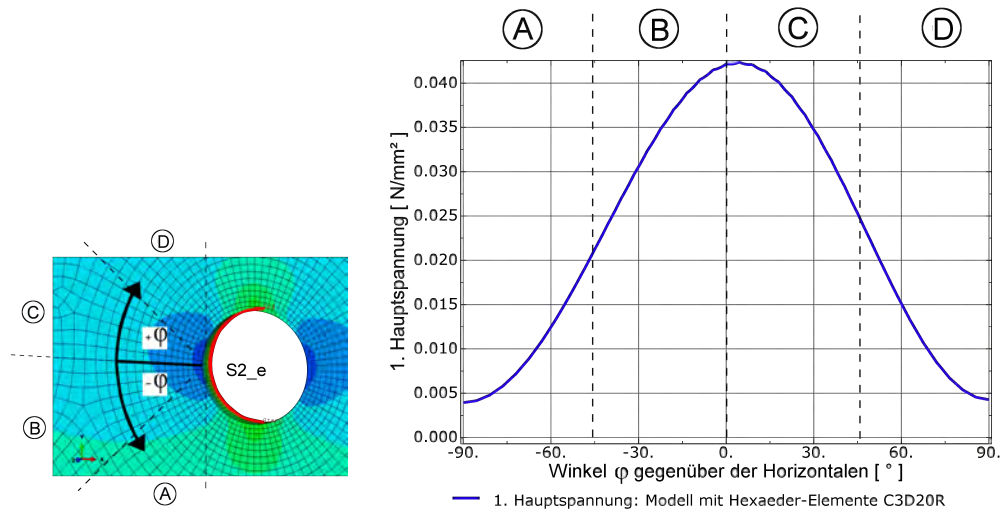
**Abbildung 3.23:** Spannungsverlauf entlang des Pfades S1\_e im Bereich S1 unter Momentenbelastung  $M_x$

im Bereich S1 wurde der Wert der Spannungsspitze in der geometrischen Kerbe herangezogen, siehe Abbildung 3.23 (Bereich B). Beim Freischnitt wurde die maximale Spannungsspitze im Bereich C nach Abbildung 3.25 verwendet. Nach der Gleichung 2.14 wurde die Strukturformzahl berechnet.

Die Strukturformzahl beim Pfad S1 hat einen Wert von 1,33 und ist sehr ähnlich dem der Momentenbelastung um die Z-Achse. Beim Pfad S2 erhält man eine Strukturformzahl von 1,69. Dies ist fast die Hälfte der Strukturformzahl bei Normalkraftbelastung.



**Abbildung 3.24:** Spannungsverläufe entlang des Pfades S2\_z im Bereich des Freischnitts unter Momentenbelastung  $M_x$



**Abbildung 3.25:** Spannungsverlauf entlang des Pfades S2\_e im Bereich des Freischnittes unter Momentenbelastung  $M_x$

**Tabelle 3.4:** Spannungen und Strukturformzahl unter Momentenbelastung  $M_x$

	Einheit	S1	S2
Nennspannung	[ $N/mm^2$ ]	1,50E-01	2,50E-02
Strukturspannung	[ $N/mm^2$ ]	2,00E-01	4,24E-02
Strukturformzahl	[ - ]	1,33	1,69

### 3.3 Geometrische Parameteruntersuchung

Das bis jetzt untersuchte Modell bildet einen vereinfachten Hängeranschluss ab. In den folgenden Ausführungen wird das ursprüngliche Modell in einigen Parametern variiert. So soll festgestellt werden, inwieweit bestimmte Geometrien einen Einfluss auf den Spannungsverlauf haben. Weiters werden asymmetrische Geometrien untersucht, um in weiterer Folge Herstellungstoleranzen berücksichtigen zu können.

Die Änderungen der Spannungsverläufe werden über die Strukturformzahlen quantitativ gegenübergestellt. Um die Ergebnisse besser interpretieren zu können, wurden die Werte aus den Abaqus Modellen durch Funktionen dargestellt. Mit dem mathematischen Standardverfahren zur Ausgleichsrechnung, Methode der kleinsten Fehlerquadrate, wurde nach den Gleichungen 3.12 und 3.13 linear oder exponentiell interpoliert.

$$y = k * x + d \quad (3.12)$$

$$y = c * e^{b \cdot x} \quad (3.13)$$

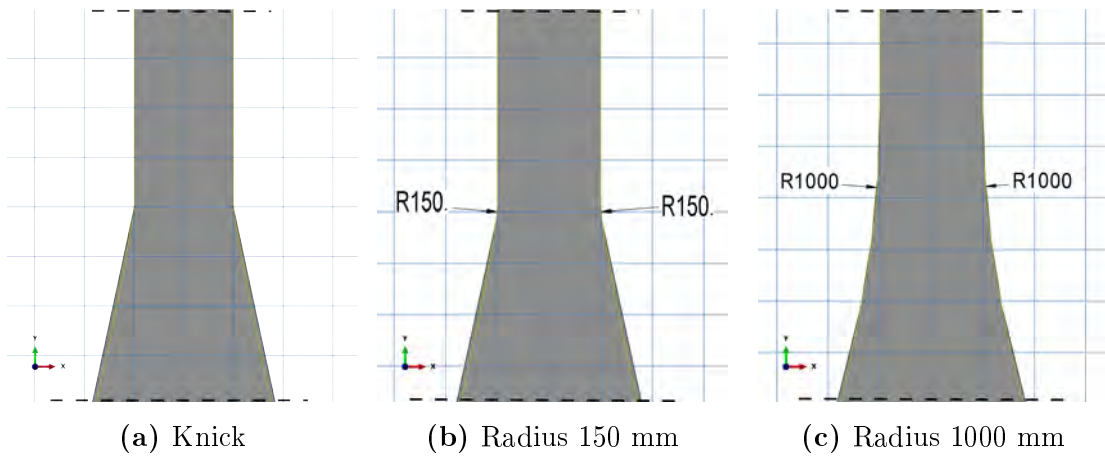
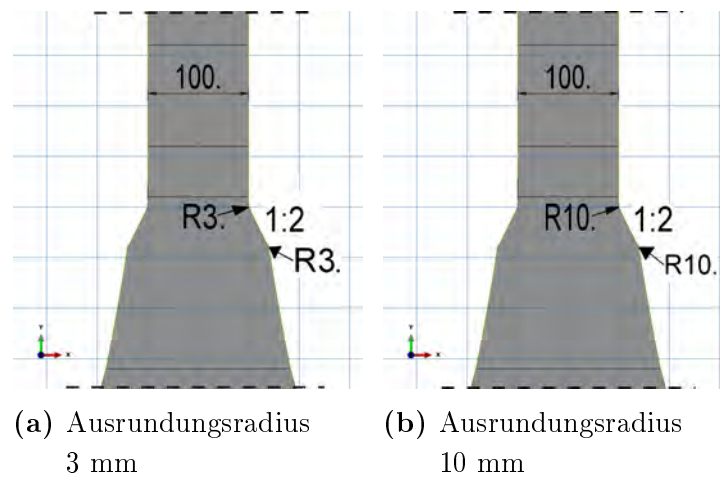
Als kritische Bereiche haben sich nach Abschnitt 3.2 vor allem der Übergangsbereich zwischen dem Regelquerschnitt des Hängers und dem Beginn des Knotenbleches (S1 nach Abbildung 3.6), sowie der Bereich beim Freischnitt (S2 in Abbildung 3.6) gezeigt.

Folgende Parameter wurden variiert:

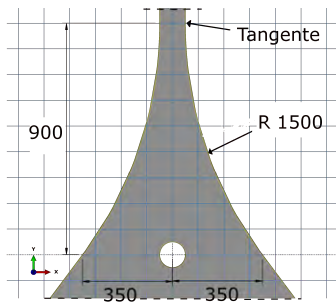
- der Ausrundungsradius im Bereich S1
- die Knotenblechgeometrie im Bereich S1
- der Außenradius des Knotenbleches
- die Größe und Lage des Freischnittes S2
- die Restbreite auf Höhe des Freischnittes S2

#### Übersicht der Modelle

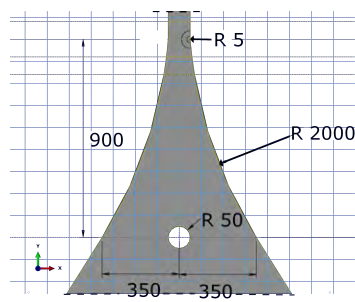
Zusätzlich zu dem vereinfachten Modell, Abbildung 3.1, werden folgende Geometrien für die Parameteruntersuchung variiert:

**Ausrundungsradius im Bereich S1****Knotenblechgeometrie im Bereich S1**

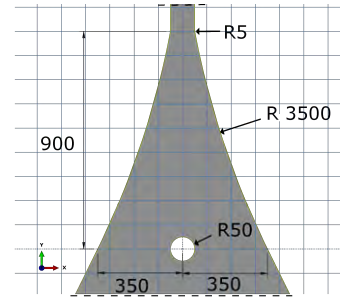
## Außenradius des Knotenbleches



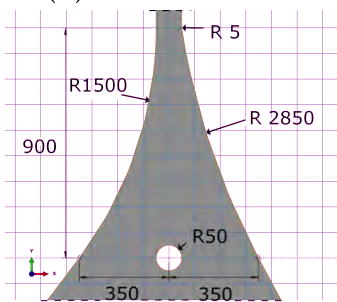
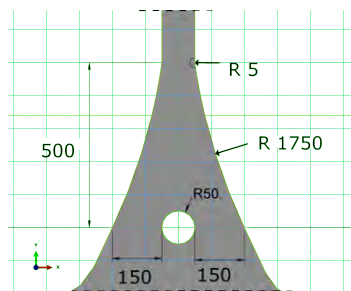
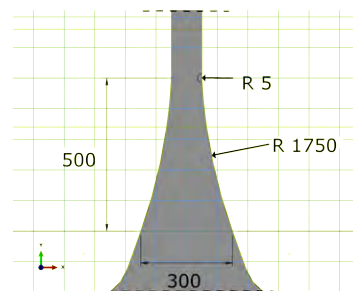
(a) Radius 1500 mm



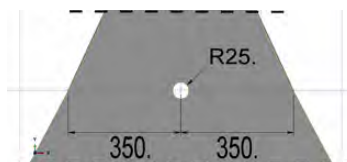
(b) Radius 2000 mm



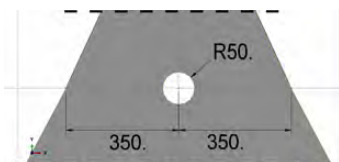
(c) Radius 3500 mm

(d) Asymmetrisch, Radien:  
1500 und 2850 mm(e) geschweißtes Modell W:  
Radius 1750 mm(f) geschmiedetes Modell M:  
Radius 1750 mm

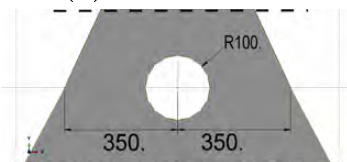
## Größe und Lage des Freischnittes S2



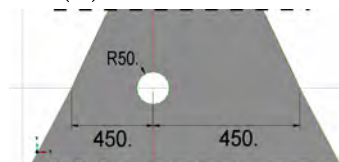
(a) Radius 25 mm



(b) Radius 50 mm



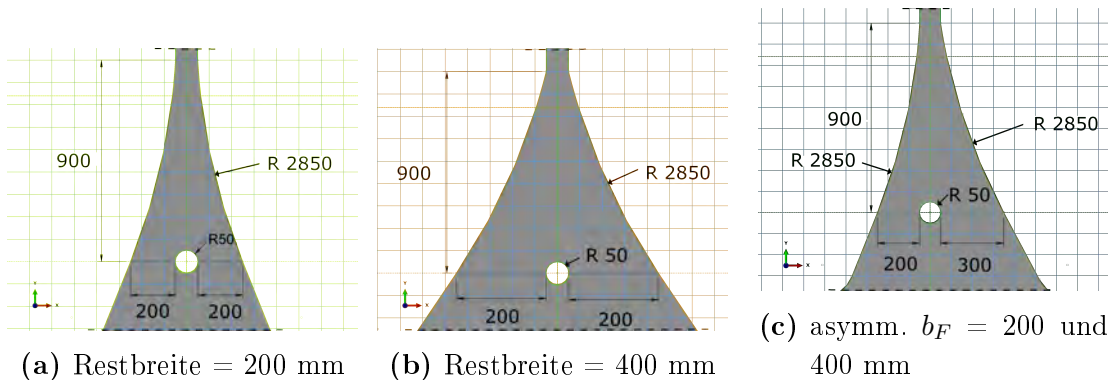
(c) Radius 100 mm



(d) Radius 50 mm, Asymmetrisch



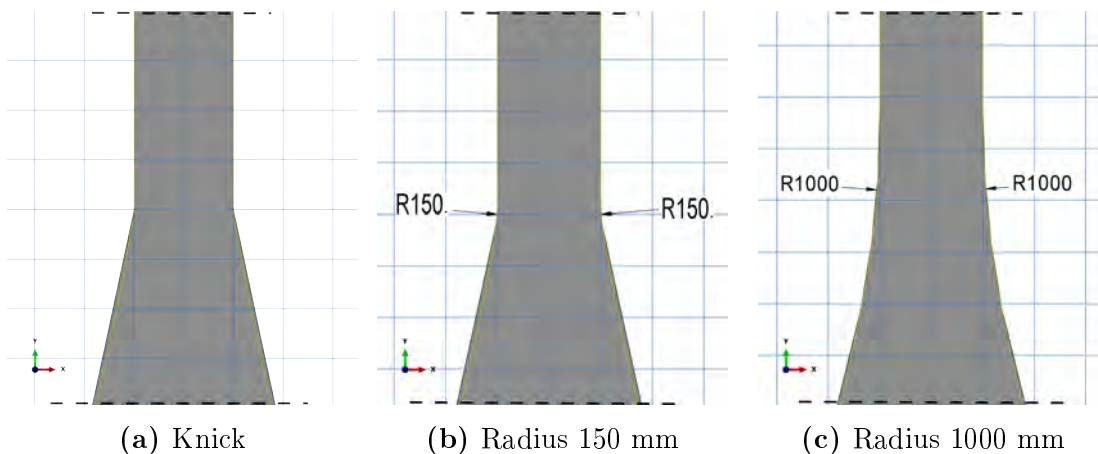
### Restbreite auf Höhe des Freischnittes S2



#### 3.3.1 Ausrundungsradius im Bereich S1

Im ursprünglichen Modell wurde der Übergangsbereich zwischen dem Regelquerschnitt des Hängers und dem Beginn des Knotenbleches nicht ausgerundet. Dadurch ergibt sich eine Kante, die zu hohen Spannungsspitzen führt. Diese ungenaue Modellierung führt außerdem dazu, dass es nicht möglich ist, die Strukturspannung direkt an der Stelle der Kerbe auszulesen. Es ist ein Interpolations-Verfahren nach [8] bzw. [5] notwendig. Eine perfekte Kerbe wird zudem in der Natur niemals auftreten, da eine minimale Ausrundung immer vorhanden ist.

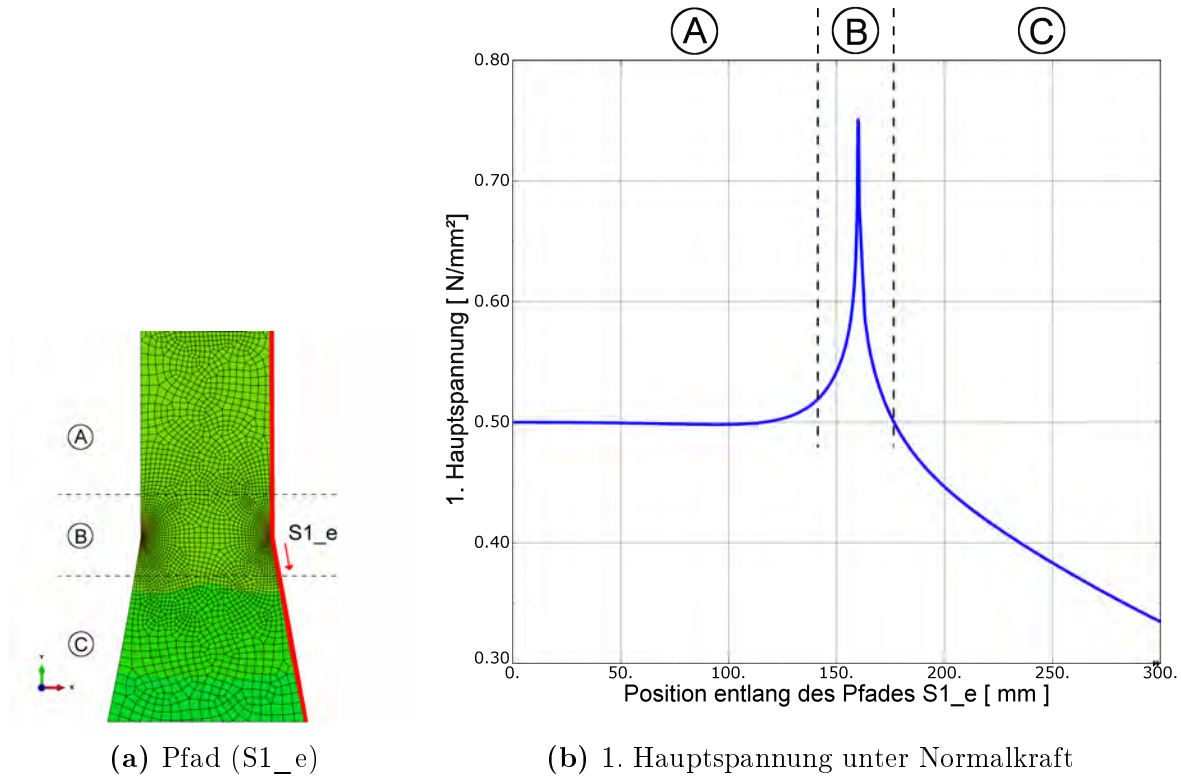
Um den Einfluss der Kerbe auf die Spannungen im Schnitt S1 zu untersuchen, wurde der Ausrundungsradius systematisch variiert. Als Radien wurden 2, 3, 5, 10, 150, 500 sowie 1000 mm gewählt. Für die restliche Hängeranschlusskonstruktion wurden die Abmessungen aus Kapitel 3.1.1 übernommen. Abbildung 3.31 zeigt eine Auswahl an unterschiedlichen Geometrien.



**Abbildung 3.31:** Modellierung verschiedener Ausrundungsradien im Bereich S1

### Strukturformzahlen bei Normalkraftbeanspruchung

Unter Normalkraftbeanspruchung ergeben sich abhängig von den Parametern deutliche Unterschiede in den resultierenden Spannungen. Einen ersten Überblick geben die folgenden Abbildungen.



**Abbildung 3.32:** Spannungsverlauf bei dem Modell ohne Ausrundung

Im Diagramm wurde die 1. Hauptspannung entlang der Modellkante aufgetragen. Vor der Ausrundung bzw. un-ausgerundeten Kante ist der Wert der 1. Hauptspannung gleich der Nennspannung ( $\sigma = \frac{N}{A} = 0,5$ ). Die Spannungsspitze ist vor allem bei keiner oder nur geringer Ausrundung deutlich ersichtlich. Erst bei einem Ausrundungsradius von 150 mm ist keine ausgeprägte Spitze mehr vorhanden. Nach dieser Spannungsspitze fällt die Spannung sukzessive ab.

Man erkennt, dass mit einem größeren Ausrundungsradius die Kerbwirkung abnimmt. Somit ergeben sich auch geringere Spannungsspitzen und eine gleichmäßigere Verteilung der Spannungen über den Querschnitt.

Wie bereits in Abschnitt 3.2.5 angemerkt, erhält man bei dem Modell ohne Ausrundung sehr unterschiedliche Ergebnisse. Sobald jedoch ein gewisser Ausrundungsradius vorhanden ist, kann man mit einem hinreichend feinen Netz genaue Ergebnisse erzielen. Bei einer Ausrundung mit einem Radius von 2 mm ergeben sich am Rand immer noch sehr hohe Spannungen. Diese sind jedoch bei einem ausreichend feinen Netz unabhängig von der Netzgeometrie. So liefert eine Vernetzung mit einer Elementlänge von 4 mm ähnliche Ergebnisse wie bei Elementen mit einer Länge von 0,5 mm.

Abbildung 3.39b zeigt die unterschiedlichen Spannungsverläufe entlang der X-Achse. Generell gilt: Umso größer die Ausrundung, desto geringer fällt die Spannungs-

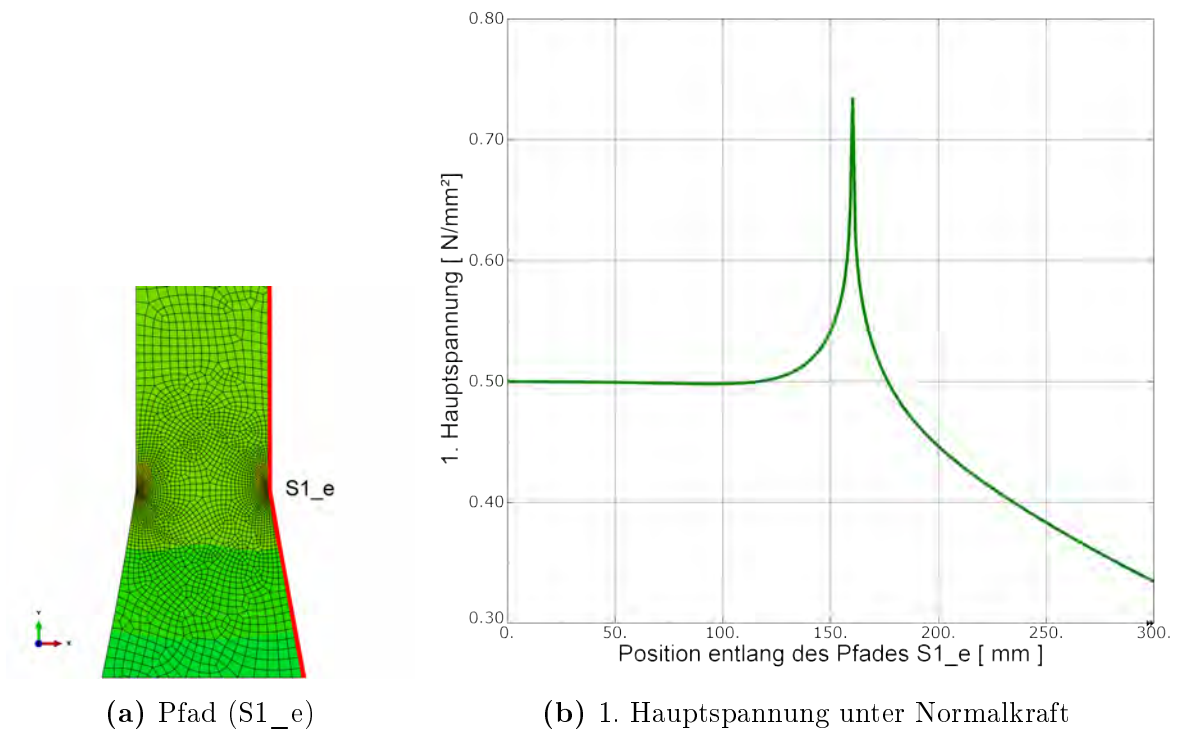


Abbildung 3.33: Spannungsverlauf bei dem Modell mit Ausrundungsradius von 2 mm

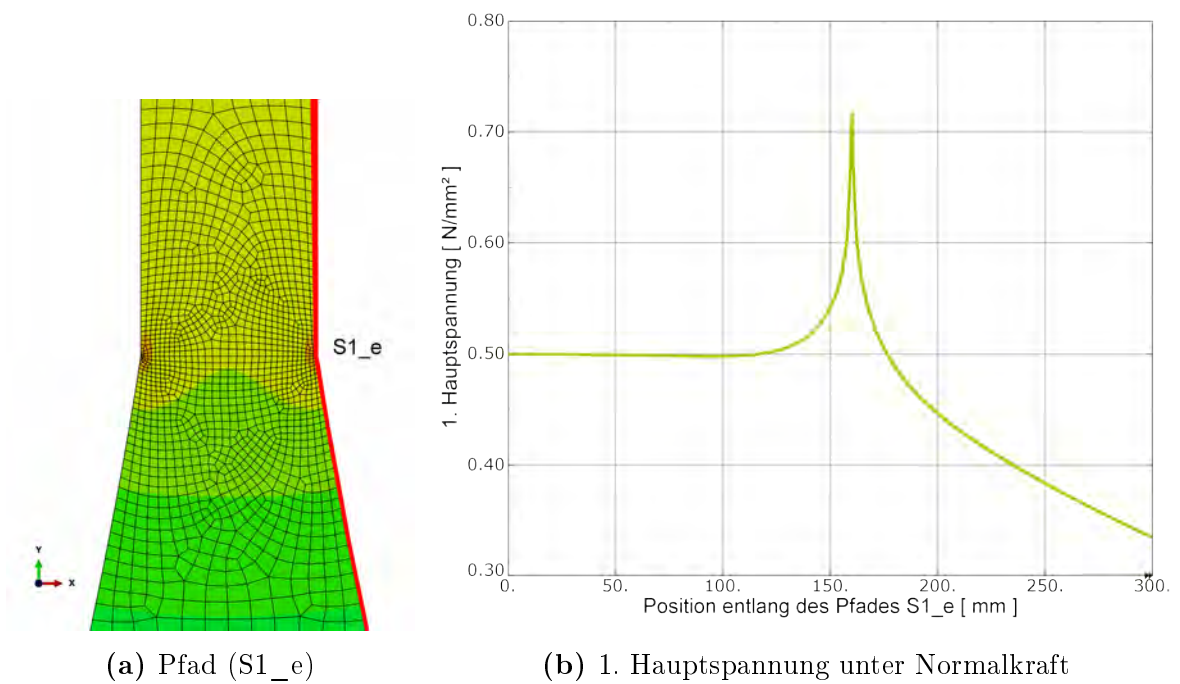


Abbildung 3.34: Spannungsverlauf bei dem Modell mit Ausrundungsradius von 5 mm

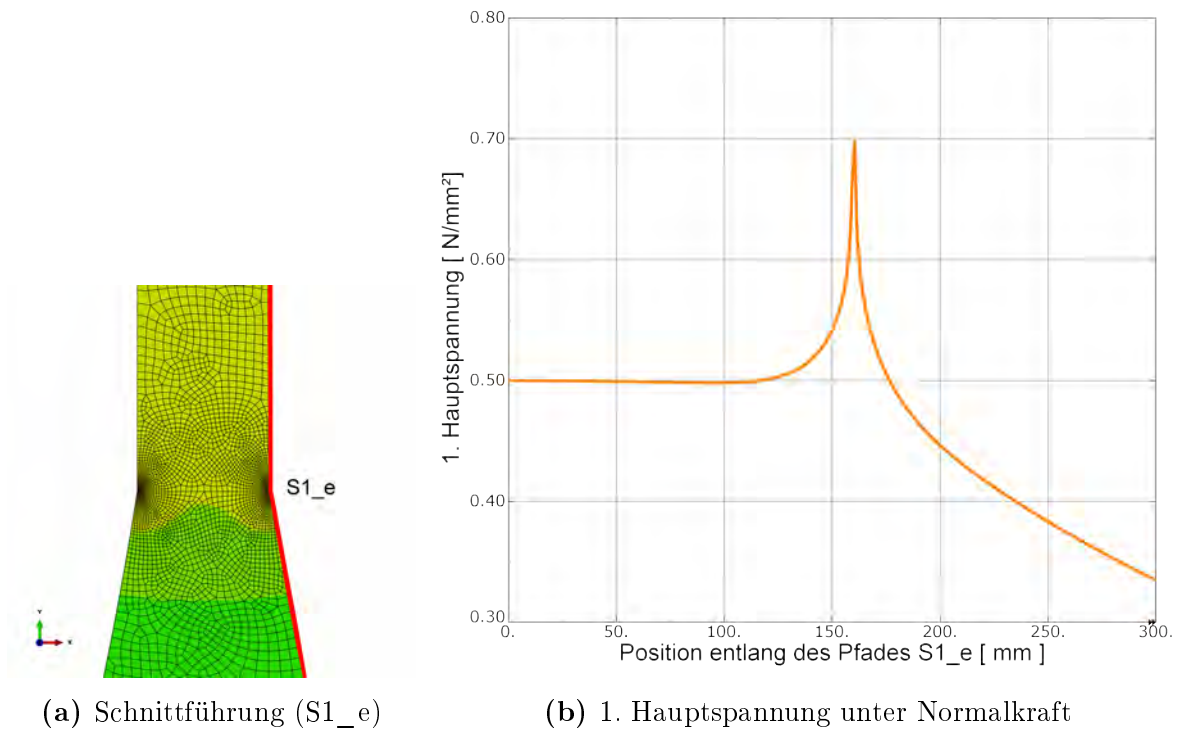


Abbildung 3.35: Spannungsverlauf bei dem Modell mit Ausrundungsradius von 10 mm

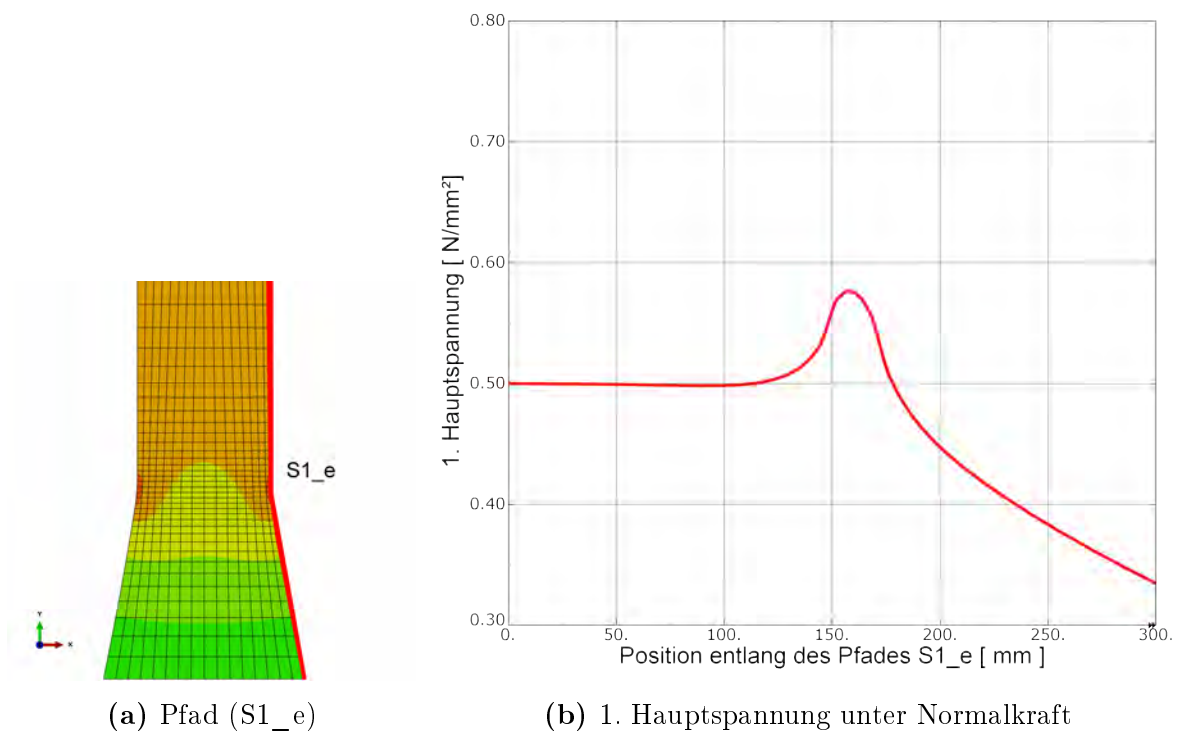


Abbildung 3.36: Spannungsverlauf bei dem Modell mit Ausrundungsradius von 150 mm

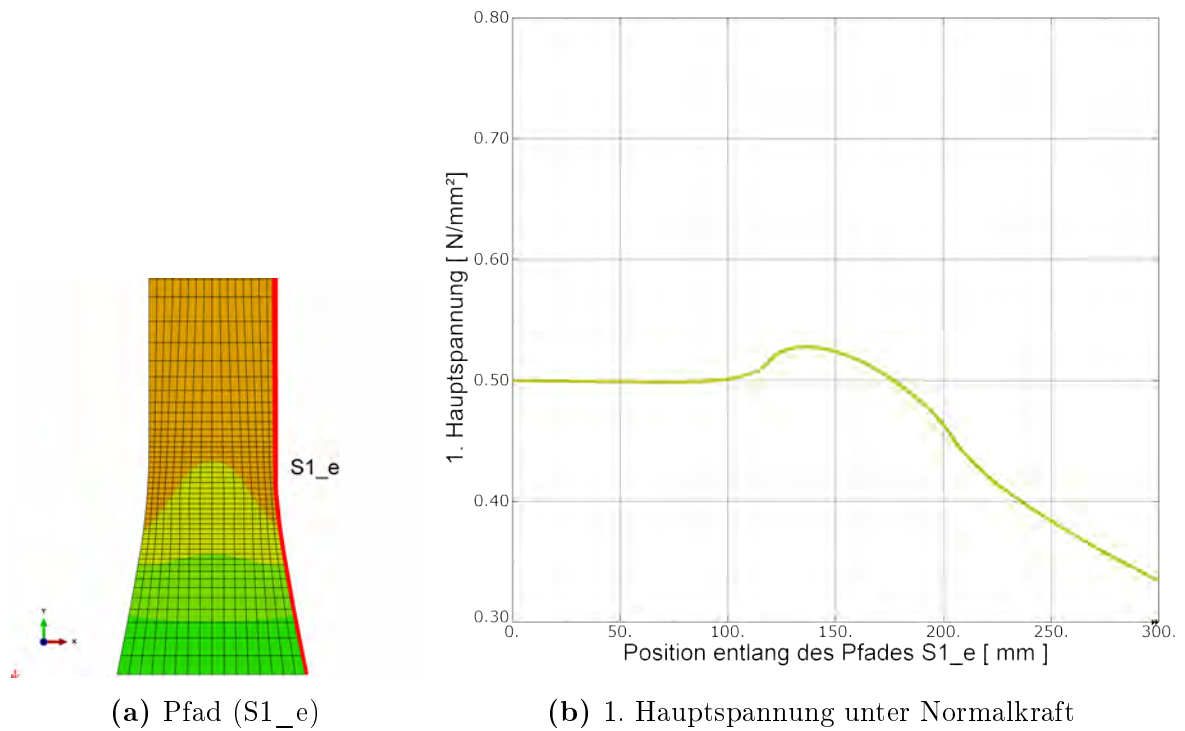


Abbildung 3.37: Spannungsverlauf bei dem Modell mit Ausrundungsradius von 500 mm

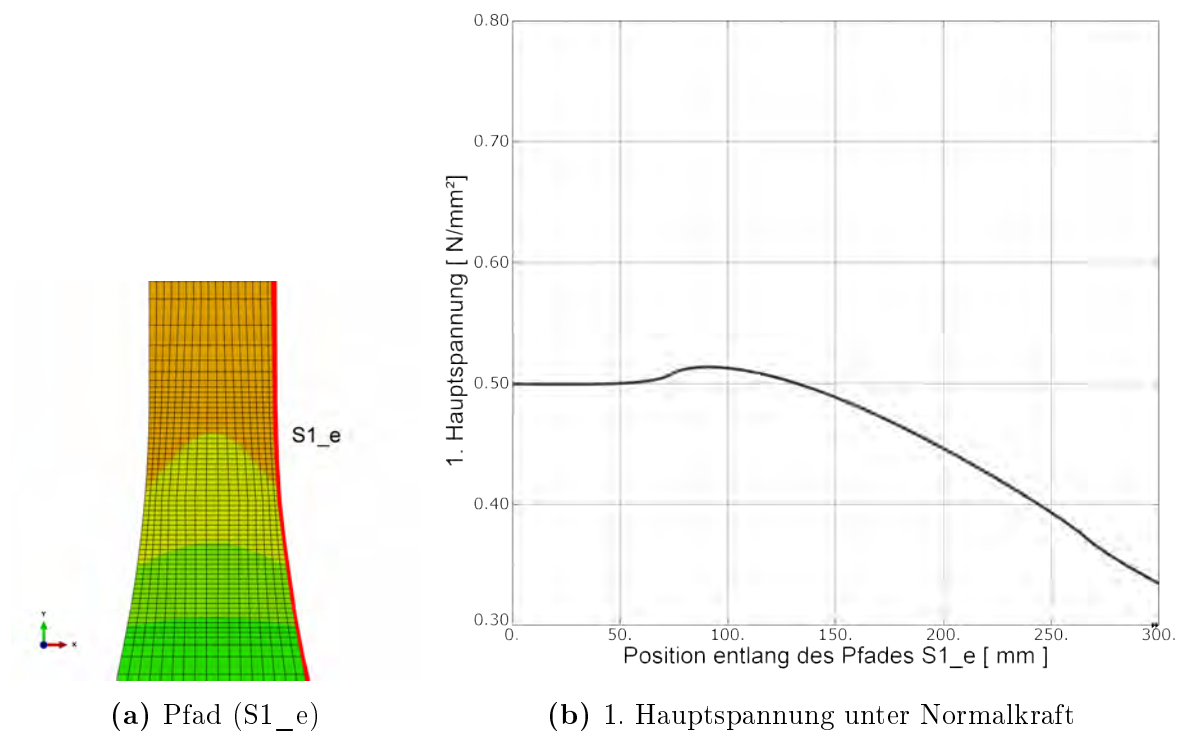
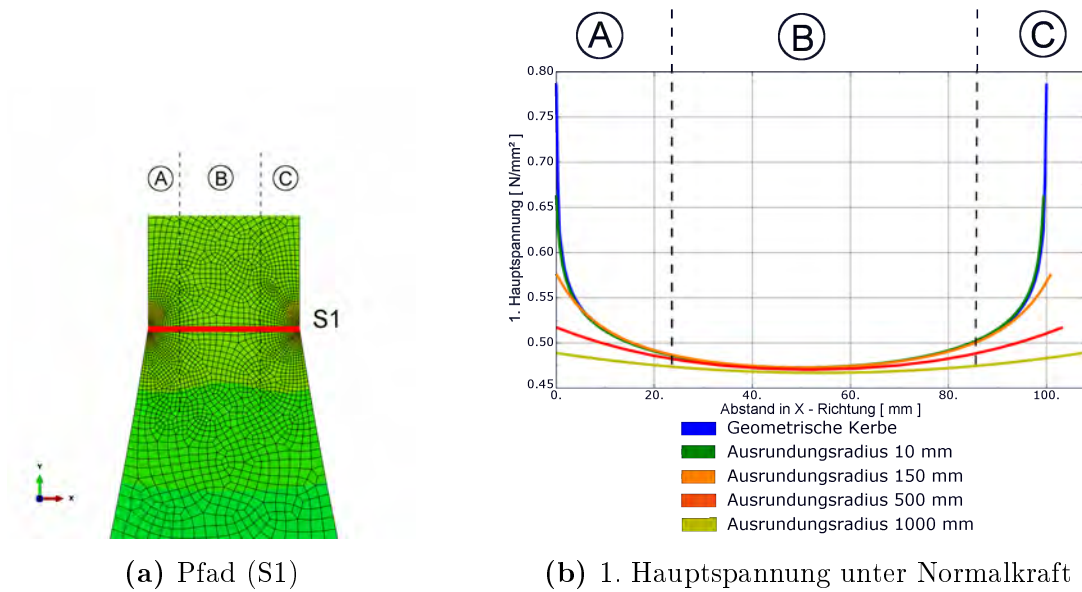


Abbildung 3.38: Spannungsverlauf bei dem Modell mit Ausrundungsradius von 1000 mm



**Abbildung 3.39:** Spannungsverläufe bei unterschiedlichem Ausrundungsradius

spitze am Rand aus.

Bei genauer Betrachtung der Abbildung 3.39b fällt auf, dass die Spannungen generell etwas abnehmen. Das liegt daran, dass sich der Querschnitt aufgrund der Ausrundung etwas vergrößert. Tabelle 3.5 zeigt die Gegenüberstellung der Nennspannungen, der Strukturspannungen und den daraus resultierenden Strukturformzahlen. Die Maximalwerte aus den Spannungsverläufen nach den Abbildungen 3.32 bis 3.38 stellen die Strukturspannungswerte in der Tabelle 3.5 dar.

**Tabelle 3.5:** Spannungen und Strukturformzahl unter Normalkraft

	Einheit	Kerbe	R10	R150	R500	R1000
Nennspannung	$[N/mm^2]$	5.00E-01	5.00E-01	5.00E-01	5.00E-01	5.00E-01
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	7.51E-01	6.99E-01	5.76E-01	5.28E-01	5.14E-01
Strukturformzahl	$[-]$	1.50	1.40	1.15	1.06	1.03

Bei kleinen Ausrundungsradien liegt die Strukturformzahl in einem Bereich von 1,4 bis 1,5. Die Spitzenspannung erreicht hier um bis zu 50% größere Werte als die Nennspannung. Bei einem Ausrundungsradius von 500 mm ist nur noch mit einer Spannungserhöhung von 6% zu rechnen.

Abbildung 3.40 zeigt, wie sich die Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius verändert. Die roten Markierungen stellen die Werte der Strukturformzahlen aus analysierten Modellen dar, wie sie auch in Tabelle 3.5 aufscheinen. Anhand einer Interpolationsfunktion erkennt man, dass die Strukturformzahl mit kleiner werdendem Radius stark zunimmt. Die Interpolationsfunktion geht bei einem Ausrundungsradius = 0 gegen unendlich. Das entspricht der Tatsache, dass bei einer geometrischen Kerbe die Spitzenspannung theoretisch unendlich groß wird.

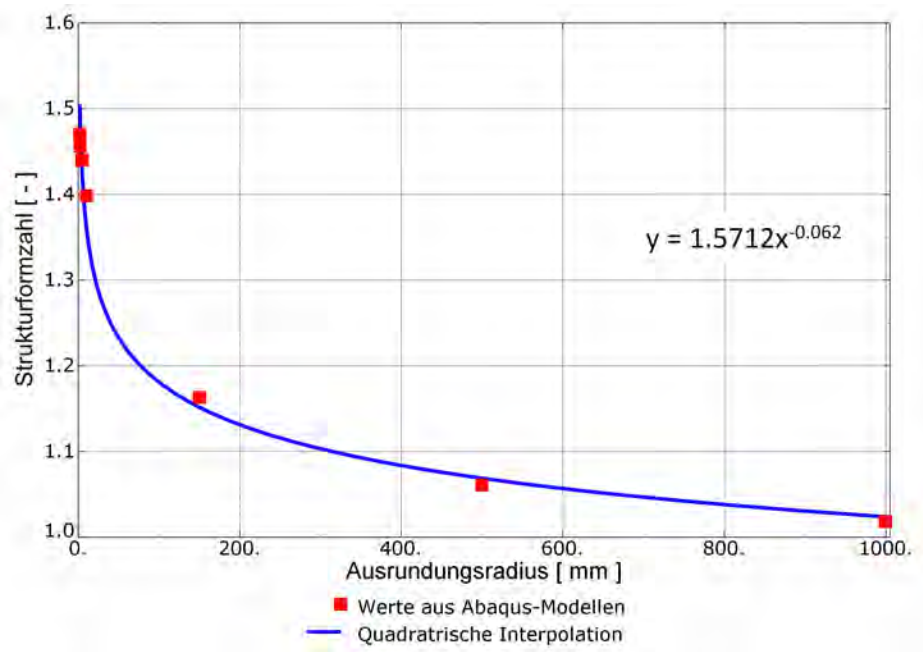


Abbildung 3.40: Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius

### Strukturformzahlen bei Moment um die Z-Achse

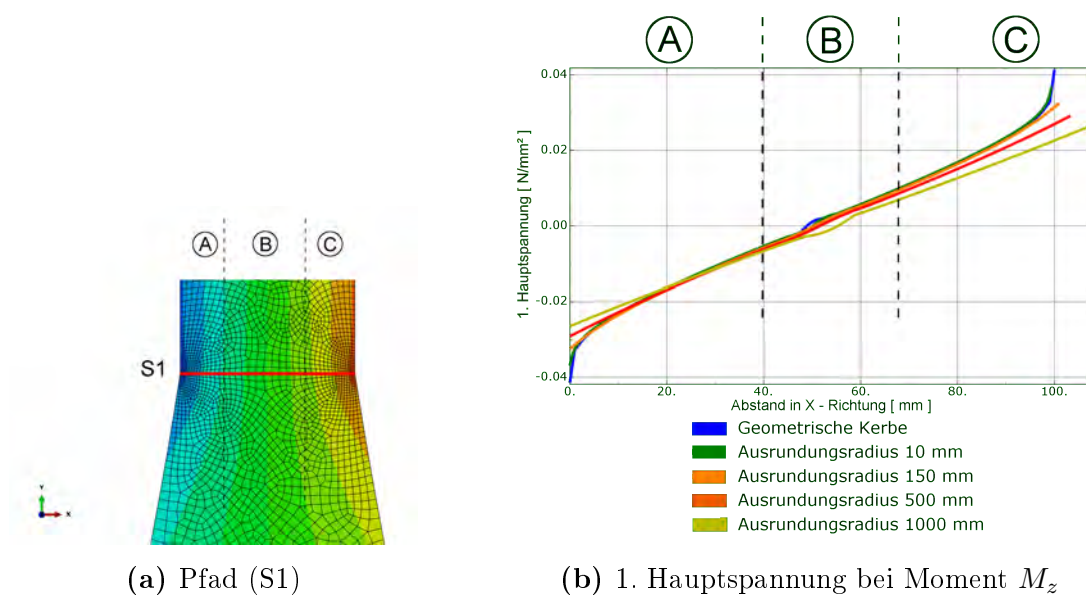
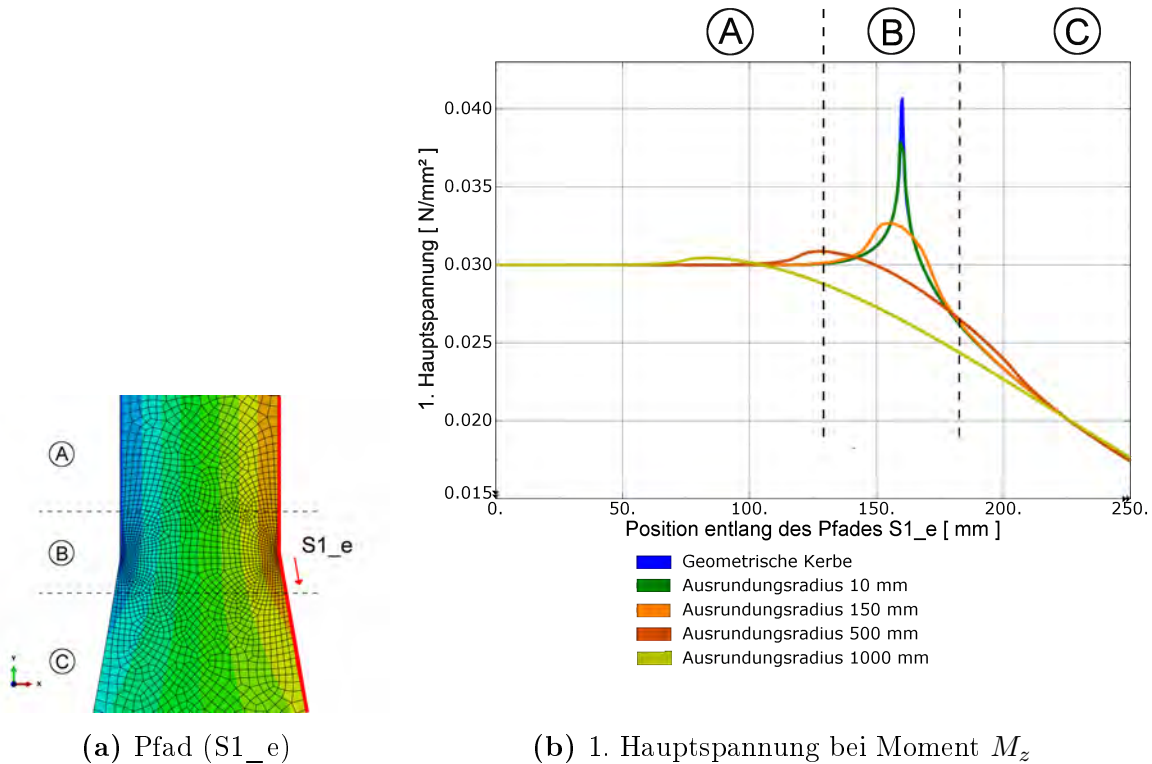


Abbildung 3.41: Spannungsverläufe in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius

Eine ähnliche Kerbwirkung ergibt sich unter Momentenbeanspruchung.

Abbildung 3.41b stellt die 1. Hauptspannung in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius über den Trägerquerschnitt dar. Die Maximalspannung tritt erwartungsgemäß am Rand auf. Während der Spannungsverlauf auf großen Teilen des Trägers linear verläuft, kommt es im Randbereich zu einem erhöhten Spannungsanstieg. Dieser fällt bei geringerem Ausrundungsradius entsprechend höher aus. Ab einem Ausrundungsradius von 150 mm ist kaum noch eine Spannungserhöhung wahrzunehmen. Die Struktur-

formzahl liegt hier noch bei 1,09, wie in Tabelle 3.6 ersichtlich ist.



**Abbildung 3.42:** Spannungsverläufe in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius

Die Spannungsverläufe entlang einer Kante des Hängeranschlusses zeigen die Veränderung mit zunehmender Ausrundung (Abbildung 3.42). Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie unter Normalkraftbeanspruchung. Mit zunehmendem Radius flacht die Spannungsspitze ab und die maximale Spannung verschiebt sich etwas in Richtung Hängerquerschnitt. Bei einem Ausrundungsradius von 1000 mm kommt es kaum noch zu einer Erhöhung der Spannung.

**Tabelle 3.6:** Spannungen und Strukturformzahl bei Moment  $M_z$

	Einheit	Kerbe	R10	R150	R500	R1000
Nennspannung	$[N/mm^2]$	3.00E-02	3.00E-02	3.00E-02	3.00E-02	3.00E-02
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	4.07E-02	3.79E-02	3.27E-02	3.09E-02	3.04E-02
Strukturformzahl	$[-]$	1.36	1.26	1.09	1.03	1.01

Tabelle 3.6 zeigt eine Gegenüberstellung der berechneten Strukturformzahlen. Speziell zwischen dem Ausrundungsradius von 10 mm und 150 mm zeigt sich ein großer Unterschied im Spannungsverlauf und auch in der Strukturformzahl. Der Vergleich mit den Strukturformzahlen unter Normalkraftbeanspruchung zeigt, dass vergleichbare Strukturformzahlen unter Normalkraft im Durchschnitt 10% höhere Werte aufweisen.

Wie in Abbildung 3.43 dargestellt, folgt die Abnahme der Strukturformzahl einem quadratischen Gesetz mit einem theoretischen Maximum bei einem Ausrundungsradius



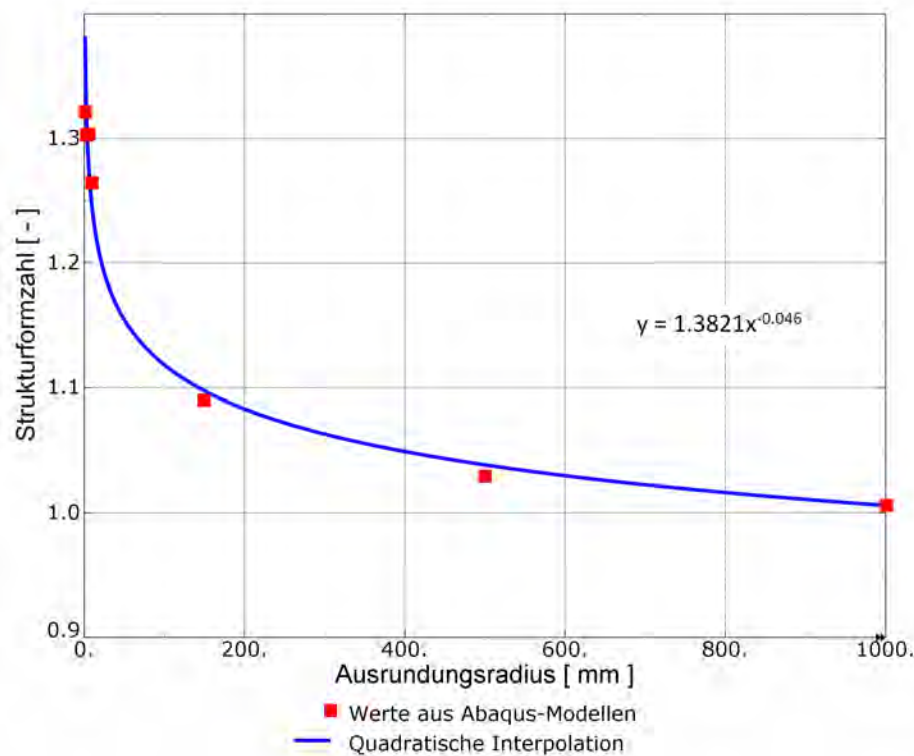


Abbildung 3.43: Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius bei  $M_z$

von 0 mm. Das ist konsistent mit den Ergebnissen aus vorhergehenden Berechnungen (Abbildung 3.40).

### Strukturformzahlen bei Moment um die X-Achse

Abbildung 3.44 stellt die 1. Hauptspannung über die Trägerdicke dar. Hier ist der Spannungsverlauf größtenteils linear. Am Rand kommt es bei einem kleinen Ausrundungsradius zu einem Knick und zu einer geringeren Spannungserhöhung.

Wird die 1. Hauptspannung entlang der Hängerkante ausgelesen, zeigt sich ein Verlauf wie er in Abbildung 3.45b dargestellt ist. Mit zunehmenden Ausrundungsradius nimmt die Spannungsspitze ab und es kommt zu einer Verflachung des erhöhten Spannungsbereiches. Die ermittelten Strukturformzahlen sind unter Momentenbelastung um die X-Achse nahezu ident mit jenen bei Moment um die Z-Achse (Siehe Tabelle 3.7). Das zeigt auf, dass die geometrische Kerbwirkung gleich hoch ist, unabhängig davon um welche Achse das Moment angreift.

Tabelle 3.7: Spannungen und Strukturformzahl bei Moment  $M_x$

	Einheit	Kerbe	R10	R150	R500	R1000
Nennspannung	$[N/mm^2]$	1.50E-01	1.50E-01	1.50E-01	1.50E-01	1.50E-01
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	2.12E-01	1.87E-01	1.61E-01	1.54E-01	1.52E-01
Strukturformzahl	[ - ]	1.41	1.25	1.07	1.02	1.01

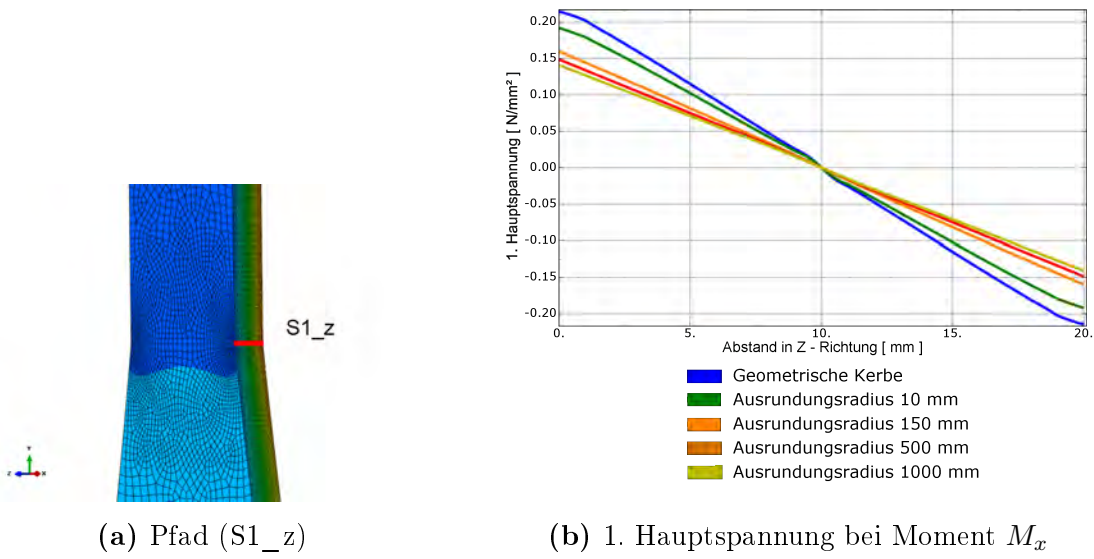


Abbildung 3.44: Spannungsverläufe in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius

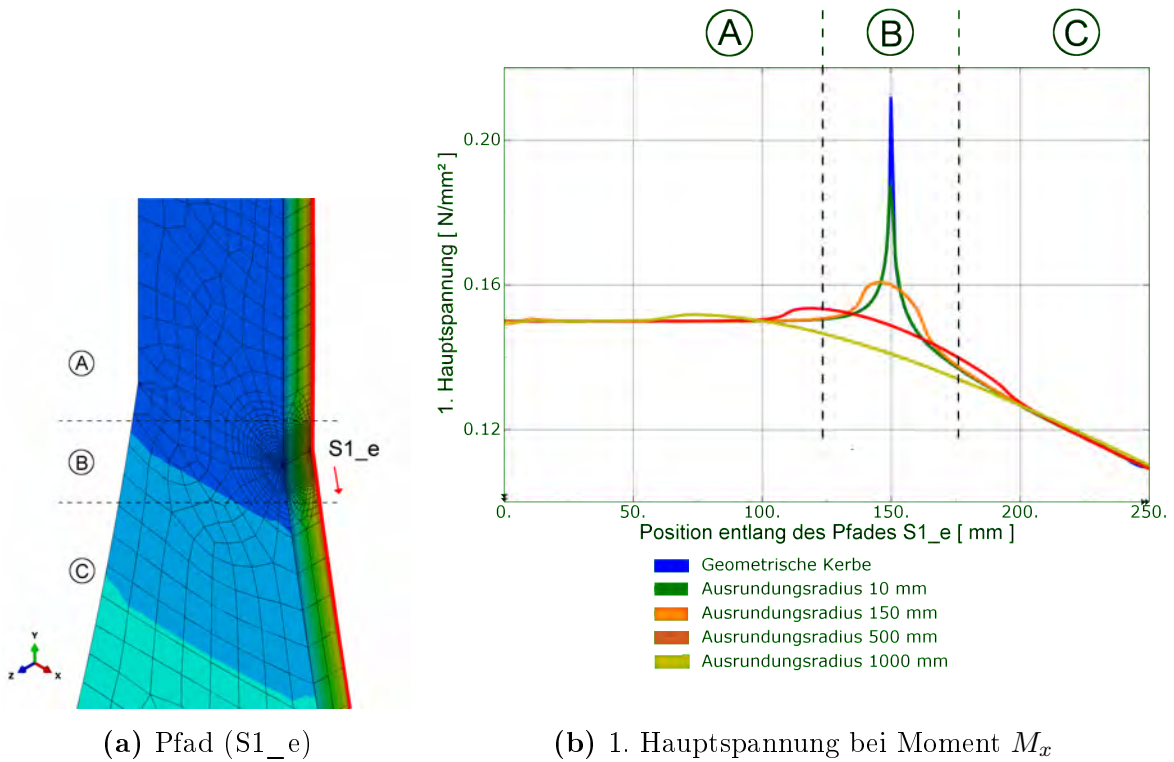


Abbildung 3.45: Spannungsverläufe in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius

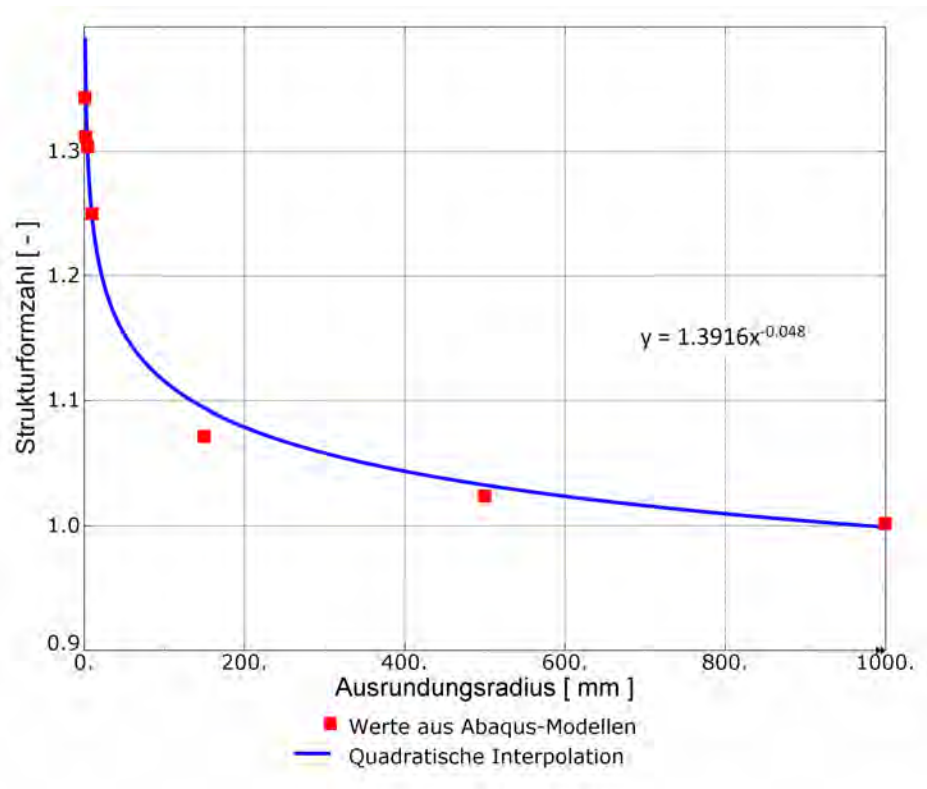


Abbildung 3.46: Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius bei  $M_x$

Abbildung 3.46 zeigt einen quadratischen Zusammenhang zwischen Ausrundungsradius und Strukturformzahl.

### 3.3.2 Verändertes Knotenblech im Bereich S1

Die Verbindung von Knotenblech und Hänger wird beim geschweißten Anschluss angearbeitet und kerbfrei beschliffen, um Spitzenspannungen zu reduzieren. Eine Skizze einer empfohlenen Anarbeitung ist aus dem Leitfaden zum Anhang NA.F Bemessung von Hängern an Stabbogenbrücken entnommen [2]. Abbildung 3.47 stellt diese Empfehlungen dar. Diese Anschlussgeometrie wurde vereinfacht modelliert. Dazu wurde in das bereits bestehende Modell eine zusätzliche Kante mit einer Neigung von 1 : 2 eingefügt. Die Ausrundung des Hängers im Bereich S1 erfolgte in einer Modellierung mit einem Radius von 3 mm. In einer zweiten Berechnung wurde ein Radius von 10 mm gewählt. Abbildung 3.48 zeigt eine Skizze dieser zwei Modelle. Die restliche Hängersanschlusskonstruktion wurde mit den Abmessungen nach Kapitel 3.1.1 modelliert.

#### Strukturformzahlen für Normalkraftbeanspruchung

In Abbildung 3.49 ist der Spannungsverlauf entlang der Modellkante im Bereich S1 dargestellt. Bei dem Modell mit Ausrundungsradius 3 mm ergibt sich eine sehr hohe Spannung im Bereich B der ersten Ausrundung. Hier ergibt sich für die Strukturformzahl einen Wert von 2,36. Im Bereich C der zweiten Ausrundung fällt die Spannung

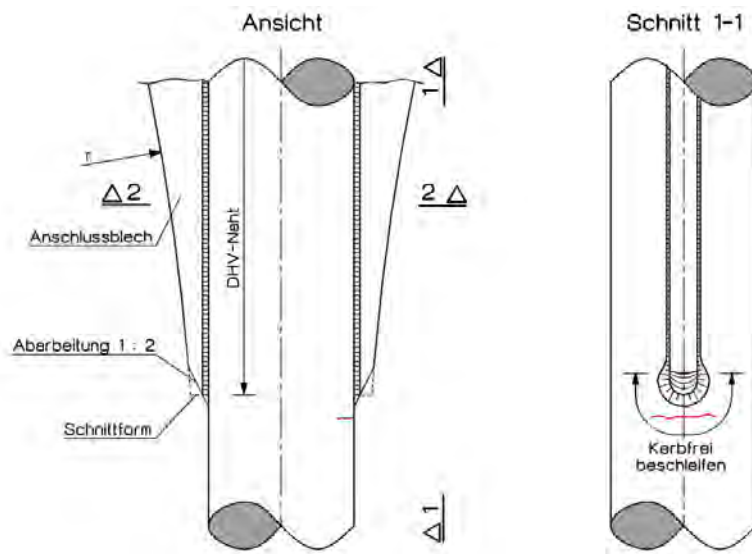


Abbildung 3.47: Anarbeitung vom Knotenblech an den Hänger gemäß [2]

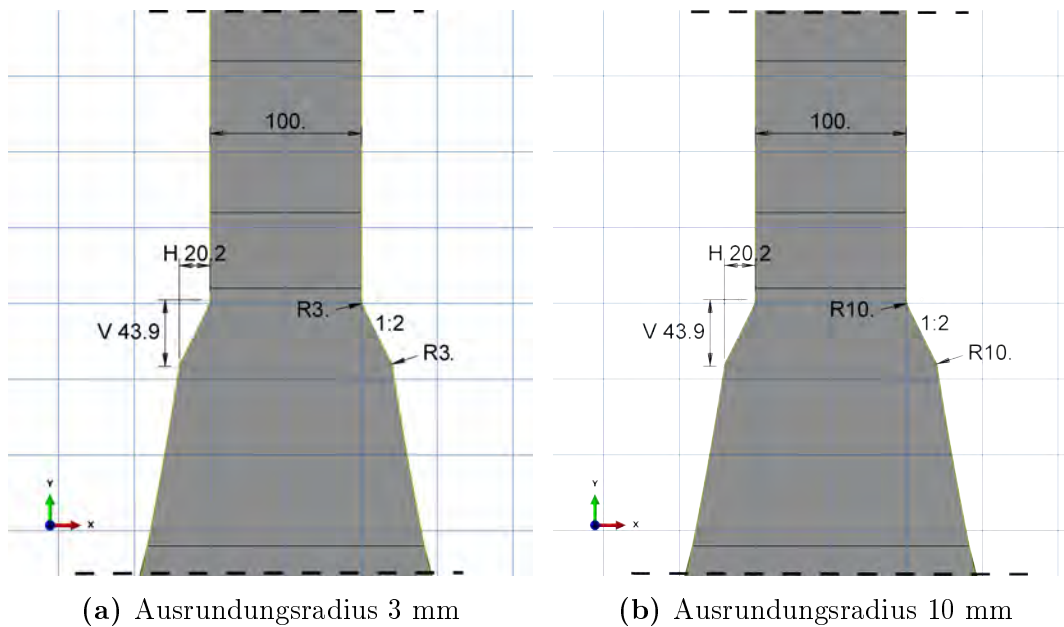
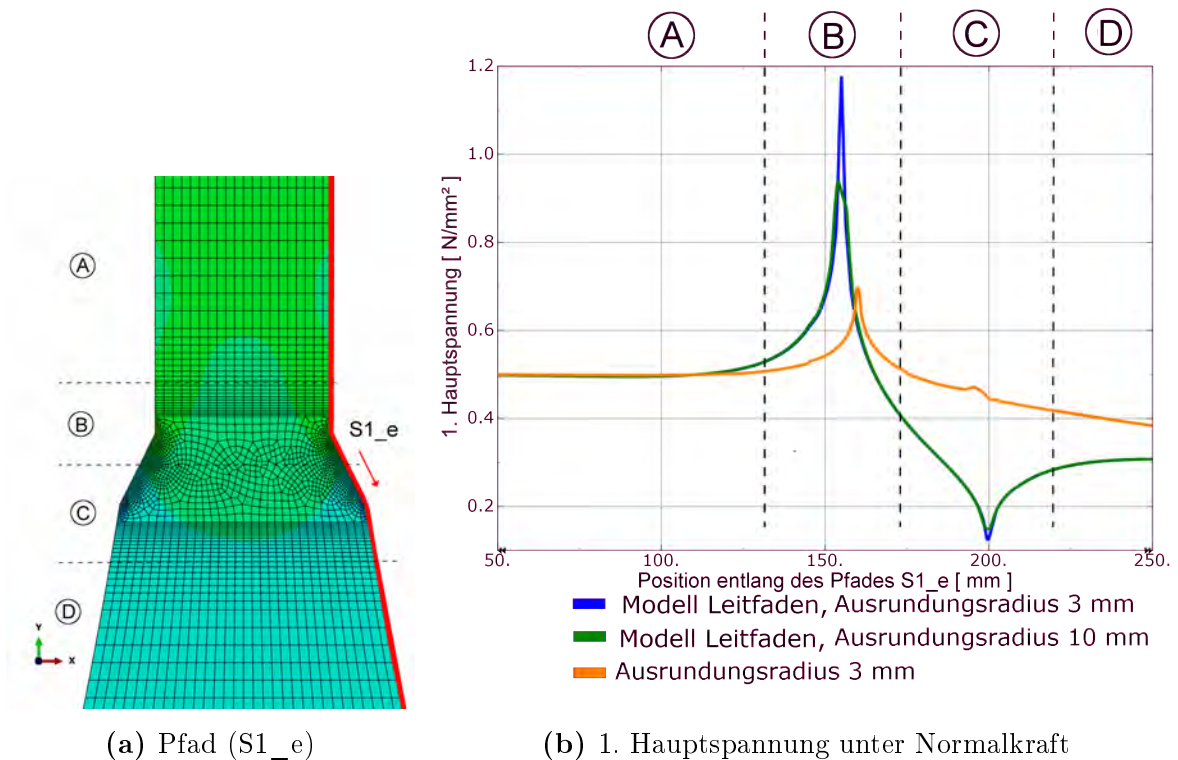


Abbildung 3.48: Knotenblechgeometrie in Anlehnung an den Leitfaden zum Anhang NA.F der EN 1993-2



**Abbildung 3.49:** Spannungsverläufe in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius

stark ab und beträgt nur noch rund ein Viertel der Nennspannung. Wird mit einem Radius von 10 mm ausgerundet, fällt die Spitzenspannung ab. Die Strukturformzahl beträgt dann 1,88. Als Vergleich dient die Geometrie nach Abbildung 3.33a mit einem Ausrundungsradius von 3 mm. Hier fällt die Spitzenspannung deutlich geringer aus. Die Strukturformzahl beträgt lediglich 1,46. Der etwas spitzere Winkel zwischen Hänger und Knotenblech führt demnach zu deutlich höheren Spannungsspitzen. Aufgrund des etwas größeren Querschnittes im Bereich D ist die 1. Hauptspannung in diesem Bereich bei den hier untersuchten Modellen geringer.

### Strukturformzahlen bei Momentenbeanspruchung um die Z-Achse

Unter Momentenbelastung um die Z-Achse ist eine ähnliche Kerbwirkung zu erkennen (Siehe Abbildung 3.50). Im Bereich der ersten Ausrundung ergibt sich eine Strukturformzahl von 2,0 bei einem Ausrundungsradius von 3 mm, respektive 1,6 bei einem Ausrundungsradius von 10 mm. Als Vergleich dazu dient der Spannungsverlauf der zuvor untersuchten Modelle mit einem Ausrundungsradius von 10 mm. Die Geometrie dazu ist in Abbildung 3.35a dargestellt. Hier beträgt die Strukturformzahl 1,26. Im Bereich der zweiten Ausrundung ist auch hier ein starker Spannungsabfall zu erkennen.

### Strukturformzahlen bei Moment um die X-Achse

Das Moment um die X-Achse wurde entlang der hinteren Modellkante ausgewertet. Die positiven Werte machen eine Gegenüberstellung mit den Verläufen unter Momen-

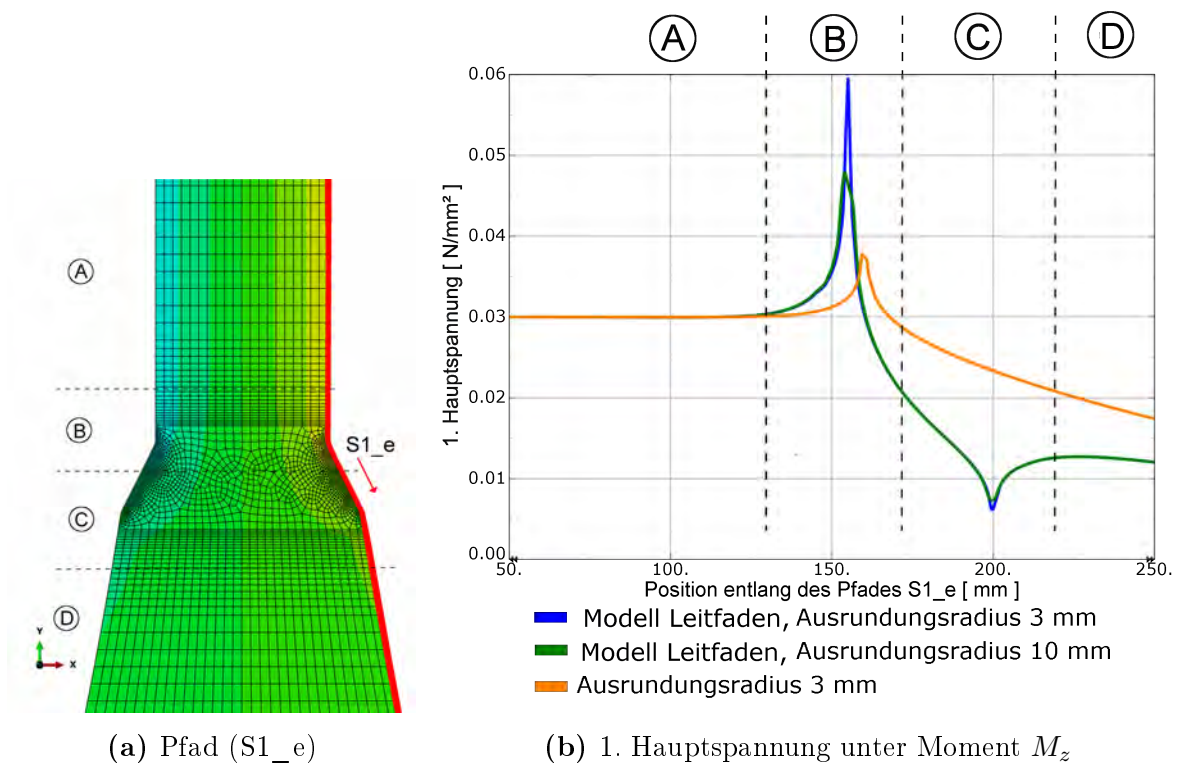


Abbildung 3.50: Spannungsverläufe in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius und der Knotenblechgeometrie

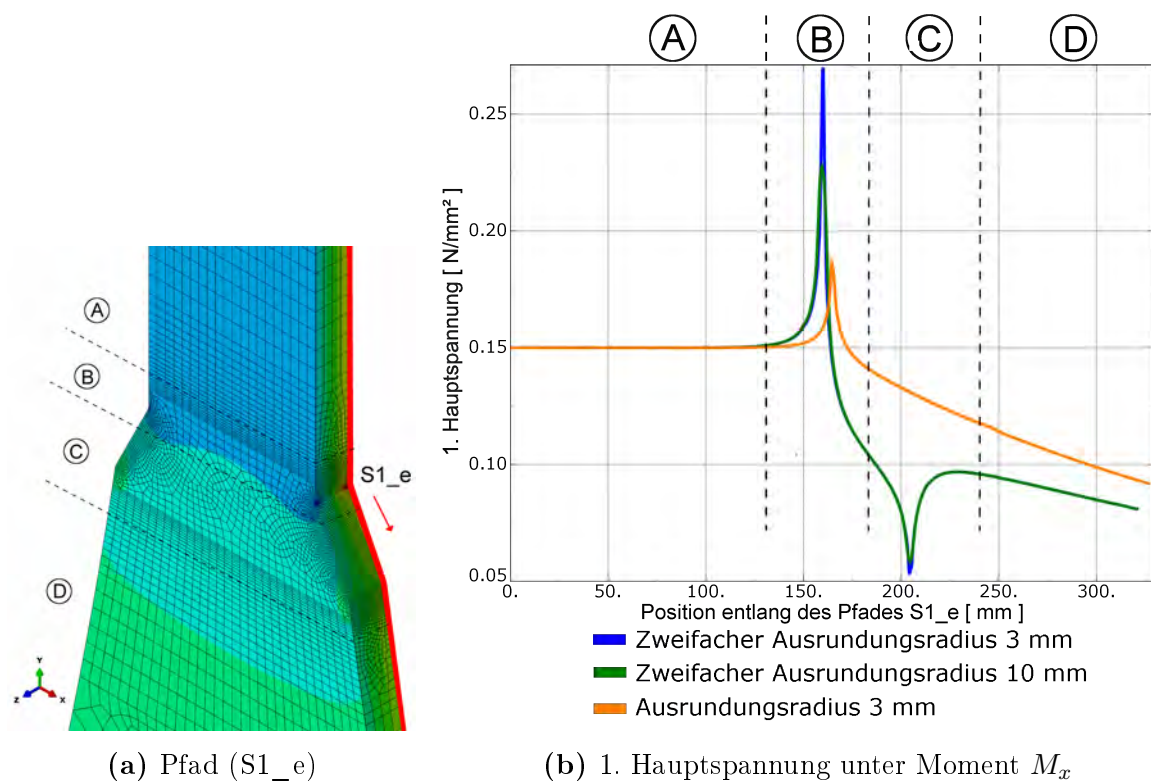
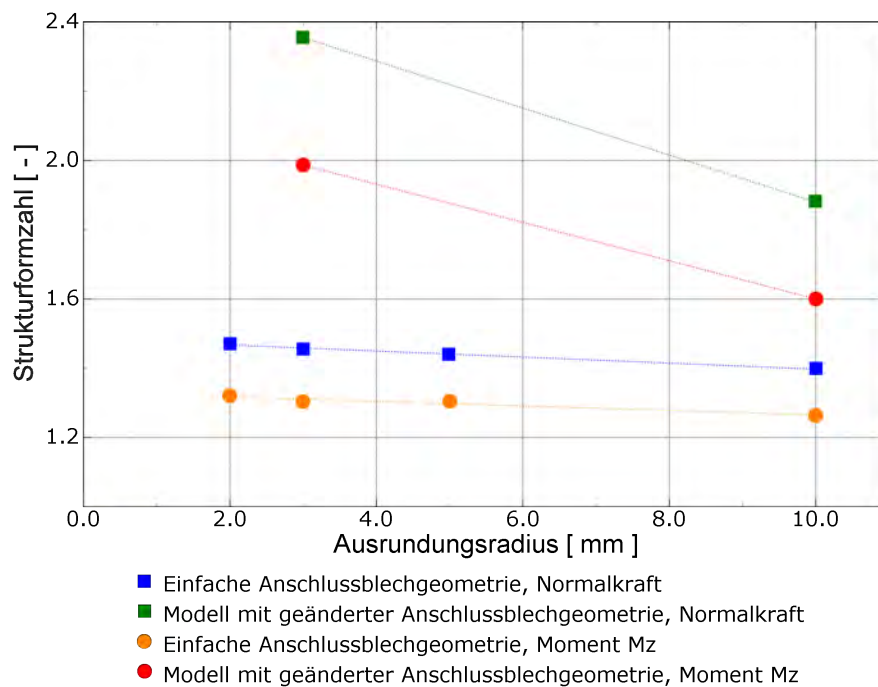


Abbildung 3.51: Spannungsverläufe in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius und der Knotenblechgeometrie

tenbelastung  $M_z$  und Normalkraft einfacher.

Im Bereich der ersten Ausrundung ergeben sich hier Strukturformzahlen von 1,8 (Ausrundungsradius 3 mm) und 1,52 (Ausrundungsradius 10 mm). Der Vergleichswert bei nur einer Ausrundung (Ausrundungsradius 10 mm) beträgt 1,25. Die Ergebnisse sind konsistent mit jenen bei Momentenbelastung um die Z-Achse. Auch hier ist ein deutlicher Spannungsabfall im Bereich der zweiten Ausrundung zu erkennen. Abbildung 3.51 zeigt die Spannungsverläufe unter Momentenbelastung  $M_x$ .

Eine Übersicht der Strukturformzahlen in Abhängigkeit von Ausrundungsradius, Hängergeometrie und Belastung gibt Abbildung 3.52 wieder. Hier ist erkennbar, dass



**Abbildung 3.52:** Strukturformzahl in Abhängigkeit von Ausrundungsradius, Hängergeometrie und Belastung

die Strukturformzahl bei der geänderten Knotenblechgeometrie stets höher ist als bei der zu Beginn gewählten Geometrie. Der grundlegende Unterschied jener beiden Geometrien liegt in der Steigung, mit der das Knotenblech vom Hänger weg verläuft. In den ersten Modellen betrug die Steigung 1 : 5, während bei der modifizierten Knotenblechgeometrie eine Steigung von 1 : 2 modelliert wurde. Bei der veränderten Knotenblechgeometrie ist außerdem ein höherer Anstieg der Strukturformzahlen zwischen den beiden Ausrundungsradien zu beobachten. Die exakten Werte der Spannungen und Strukturformzahlen sind in Tabelle 3.8 dargestellt.

**Tabelle 3.8:** Spannungen und Strukturformzahl bei veränderter Knotenblechgeometrie

	Einheit	Normalkraft		Moment $M_z$		Moment $M_x$	
		R3	R10	R3	R10	R3	R10
Nennspannung	$[N/mm^2]$	5.00E-01	5.00E-01	3.00E-02	3.00E-02	1.50E-01	1.50E-01
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	1.18E+00	9.40E-01	5.96E-02	4.80E-02	2.70E-01	2.28E-01
Strukturformzahl	$[-]$	2.36	1.88	1.99	1.60	1.80	1.52

### 3.3.3 Außenradius des Knotenbleches

Bei dem vereinfachten Modell wurde ein Außenradius des Knotenbleches von 2850 mm gewählt. Wie im Kapitel 2.1 ersichtlich, ist der Außenradius von der Einbindelänge  $L_e$  und der Breite auf der Höhe des Freischnittes  $b_F$  abhängig. Um den Einfluss des Außenradius auf die Spannungen in den zwei kritischen Bereichen S1 und S2 zu untersuchen, wurde nur der Außenradius des Knotenbleches variiert. Die Einbindelänge  $L_e$  wurde mit 900 mm und die Breite auf Höhe des Freischnittes mit 300 mm fixiert. Als weitere Außenradien wurden 1500, 2000 sowie 3500 mm gewählt. Außerdem wurde ein asymmetrisches Modell mit verschiedenen Außenradien, 1500 mm auf der linken Seite und 2850 mm auf der rechten Seite, untersucht.

Da in der Realität niemals eine geometrische Kerbe auftritt, wurde der Übergangsbereich S1 zwischen dem Regelquerschnitt des Hängers und dem Knotenblech ausgerundet. Aufgrund der in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Parameteruntersuchung vom Ausrundungsradius im Bereich S1 ist ein Radius mit 5 mm gewählt worden. Zusätzlich wurde noch in Anlehnung an den Leitfaden zum DIN-Fachbericht 103 [2] ein geschmiedetes Modell M und ein geschweißtes Modell W mit einem Außenradius von 1750 mm betrachtet. Dabei wurde bei diesen zwei Modellen nur deren geometrischer Einfluss auf die kritische Zone S1 untersucht.

Die verschiedenen Geometrien sind in der Abbildung 3.53 zu sehen.

### Strukturformzahlen für Normalkraftbeanspruchung

Da der Außenradius auf die beiden kritischen Zonen des Übergangs vom Regelquerschnitt des Hängers zum Knotenblech (Spannungsspitze 1) sowie des Bereichs beim Freischnitt (Spannungsspitze 2) einen geometrischen Einfluss hat, werden im folgenden Abschnitt beide Stellen untersucht.

In Abbildung 3.54 ist der Spannungsverlauf entlang des Pfades S1 unter Normalkraftbelastung (Zugkraft = 1000 N) zu sehen. Bei den Randbereichen A und C kommt es aufgrund der geometrischen Kerbe zu Spannungserhöhungen. Im Bereich S1 verläuft das Knotenblech abhängig vom Außenradius mit einer gewissen Neigung vom Hänger weg. Der dadurch entstehende Knick hat einen Einfluss auf die maximal auftretende Spannung. Wird der Außenradius hinreichend klein gewählt, erfolgt der Übergang auf den Hängerquerschnitt tangential. Daraus resultiert, dass sich die Spannungsspitze der Nennspannung im Hänger annähert. Die Ecken im asymmetrischen Verlauf entstanden durch die größere Elementwahl bei der Modellierung.

Wird der Spannungsverlauf entlang der Modellkante am Pfad S1\_e aufgetragen



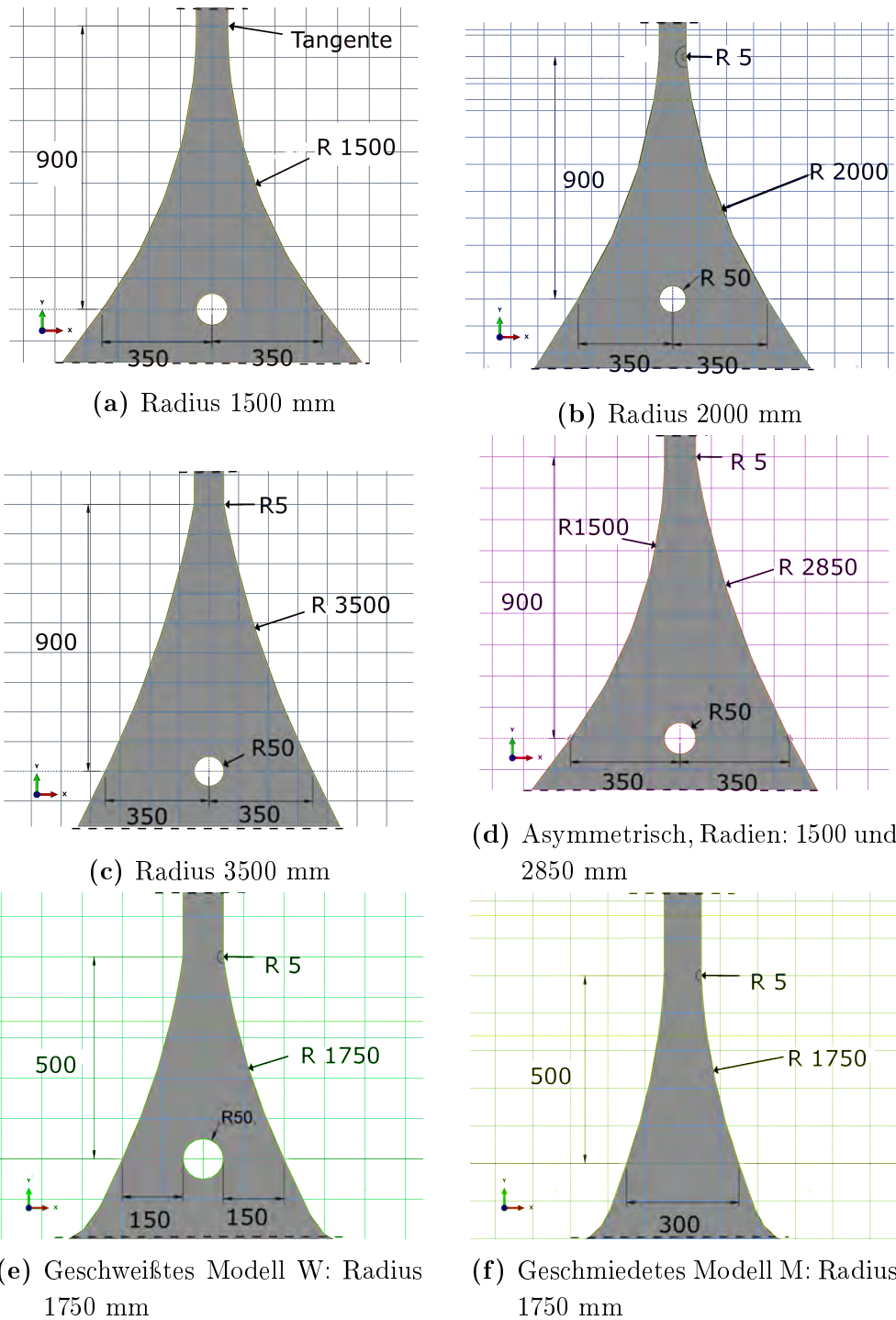
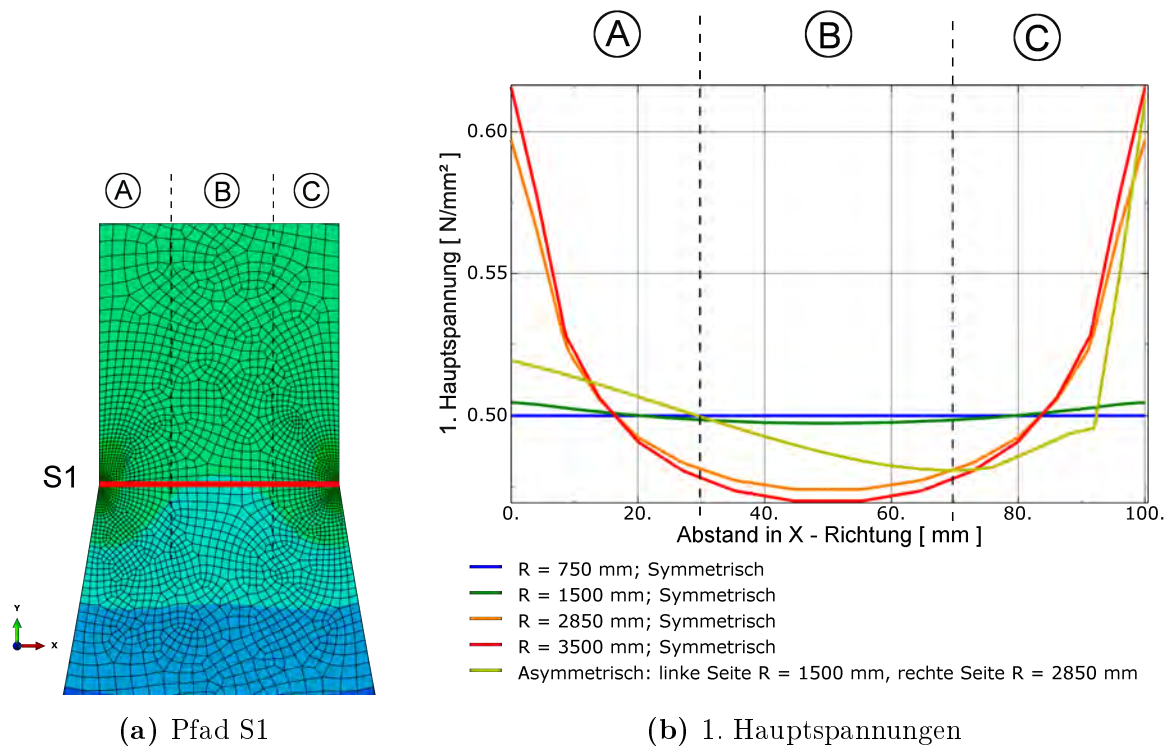


Abbildung 3.53: Variation der Außenradien des Knotenbleches

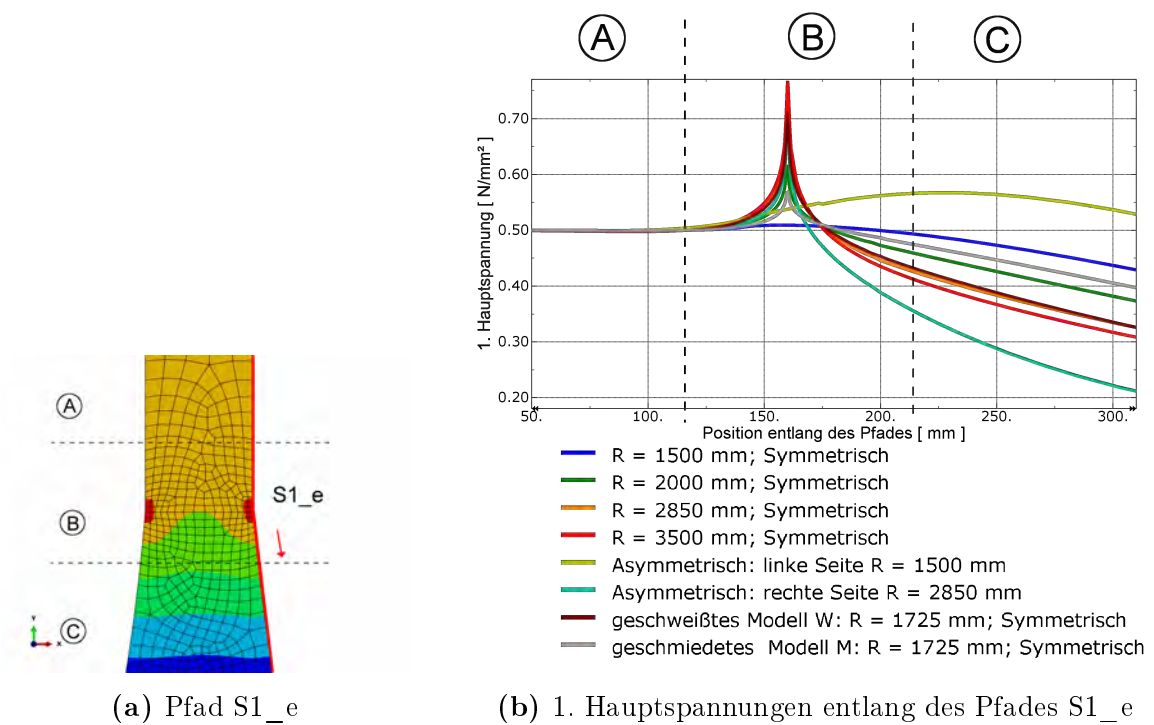
(siehe Abbildung 3.55), erkennt man, dass vor der Kerbe der Wert der 1. Hauptspannung gleich der Nennspannung ( $\sigma_{S1 \text{ Normalkraft}} = \frac{N}{A} = 0,5$ ) ist. Die erwartete Spannungsspitze befindet sich im Übergangsbereich B. Bei genauer Betrachtung fällt auf, dass die Spannungen bei den kleineren Außenradien generell etwas abnehmen. Dies resultiert aus der Steigung, mit der das Knotenblech an den Hänger angeschlossen ist. Danach folgt ein kontinuierliches Abklingen der Spannungen, was aus dem größer werdenden Querschnitt resultiert.



**Abbildung 3.54:** Spannungsverlauf in Abhängigkeit vom Außenradius unter Normalkraftbelastung im Bereich S1

Einen Vergleich zwischen den verschiedenen Modellen kann erst über die Strukturformzahl geführt werden. In der Tabelle 3.9 sind die Spannungen und Strukturformzahlen unter der Normalkraftbelastung in der kritischen Zone S1 dargestellt. Die Nennspannung für den Bereich S1 wurde in Kapitel 3.2.4 berechnet. Die maximalen Strukturspannungen wurden durch Auslesen der Integrationspunkte der Elemente im kritischen Bereich ermittelt. Die Strukturformzahl ergibt sich aus dem Quotient von Strukturspannung und Nennspannung.

Generell ist bei einem größeren Außenradius des Knotenbleches die Strukturformzahl höher. Im Vergleich zu den symmetrischen Modellen verändern sich die Strukturformzahlen beim asymmetrischen Modell. An der rechten Seite mit dem Außenradius von 2850 mm wird die Strukturformzahl kleiner und an der linken Seite mit dem Außenradius von 1500 mm erhöht sie sich. Abbildung 3.56 zeigt, wie sich die Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Außenradius bei der Kerbe verändert. Das geschweißte Modell W weist im Gegensatz zum geschmiedeten Modell M unter Normalkraft eine

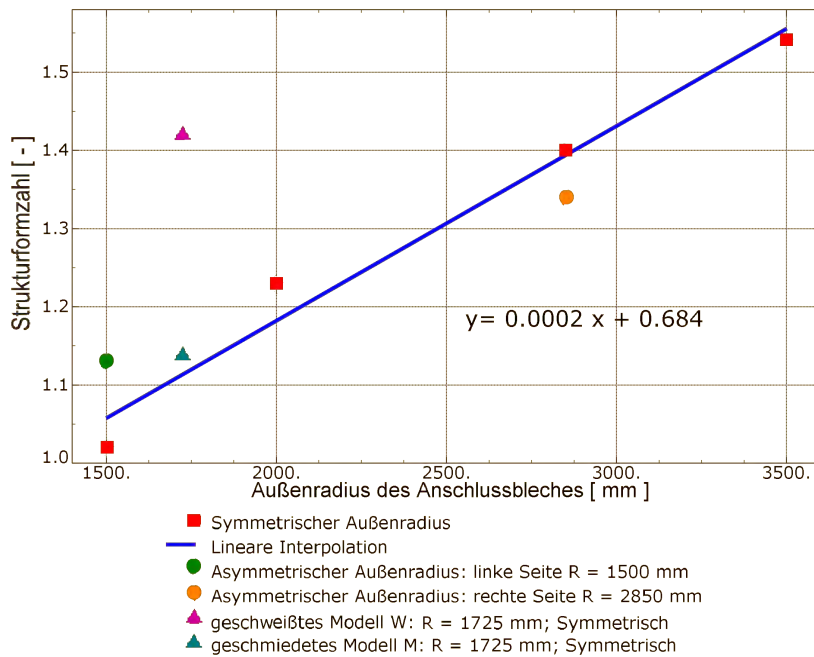


**Abbildung 3.55:** Spannungsverläufe in Abhängigkeit vom Außenradius unter Normkraftbelastung im Bereich S1

25 % höhere Strukturformzahl auf.

**Tabelle 3.9:** Spannungen und Strukturformzahlen unter der Normkraftbelastung im Bereich S1

S1	Einheit	R1500	R2000	R2850	R3500	Asym. R1500	Asym. R2850	R1750 -W	R1750 -M
Nennspannung	[ $N/mm^2$ ]	5,00E-01	5,00E-01	5,00E-01	5,00E-01	5,00E-01	5,00E-01	5,00E-01	5,00E-01
Strukturspannung	[ $N/mm^2$ ]	5,09E-01	6,17E-01	6,99E-01	7,68E-01	5,67E-01	6,71E-01	7,09E-01	5,72E-01
Strukturformzahl	[ - ]	1,02	1,23	1,40	1,54	1,13	1,34	1,42	1,14



**Abbildung 3.56:** Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Außenradius unter Normkraftbelastung im Bereich S1

In Abbildung 3.57 werden die Spannungsverläufe entlang des horizontalen Pfades S2 unter Normkraftbelastung gezeigt. Direkt beim Freischnitt kommt es zu deutlichen Spannungserhöhungen. Man erkennt, dass die Spannungsspitzen lokal begrenzt sind und entlang der Restbreite auf Höhe des Freischnittes sehr schnell abklingen. Beim Betrachten einer halbkreisförmigen Pfadführung entlang der Modellkante am Freischnitt, siehe Abbildung 3.58, ist zu sehen, dass sich die Spannungsverläufe kaum unterscheiden. Die maximalen Spannungsspitzen sind mit einem geringen Winkel von circa  $+2^\circ$  zur Horizontalen entfernt (Bereich C).

In der Tabelle 3.10 sind die Spannungen und Strukturformzahlen unter Normkraftbelastung im Freischnittbereich S2 dargestellt. Die Nennspannung für den Bereich S2 wurde in Kapitel 3.2.4 berechnet. Die maximalen Strukturspannungen wurden durch Auslesen der Integrationspunkte der Elemente im kritischen Bereich S2 ermittelt. Um einen Vergleich von den Spannungsspitzen und Nennspannungen zu bekommen, werden die Strukturformzahlen nach der Gleichung 2.14 berechnet.

Generell gilt, je größer der Außenradius, desto kleiner ist die Strukturformzahl. Bei einem Außenradius von circa 2500 mm erhält man eine Strukturformzahl von 3,04. Dieser Wert ist relativ ähnlich der Strukturformzahl von einer unendlichen Scheibe mit Loch unter Zugkraft, welche 3,0 beträgt. Im Vergleich zu den symmetrischen Modellen verändern sich die Strukturformzahlen beim asymmetrischen Modell. An der rechten Seite mit dem Außenradius von 2850 mm wird die Strukturformzahl größer und an der linken Seite mit dem Außenradius von 1500 mm verkleinert sie sich. Abbildung 3.59 zeigt, wie sich die Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Außenradius beim Freischnitt verändert.

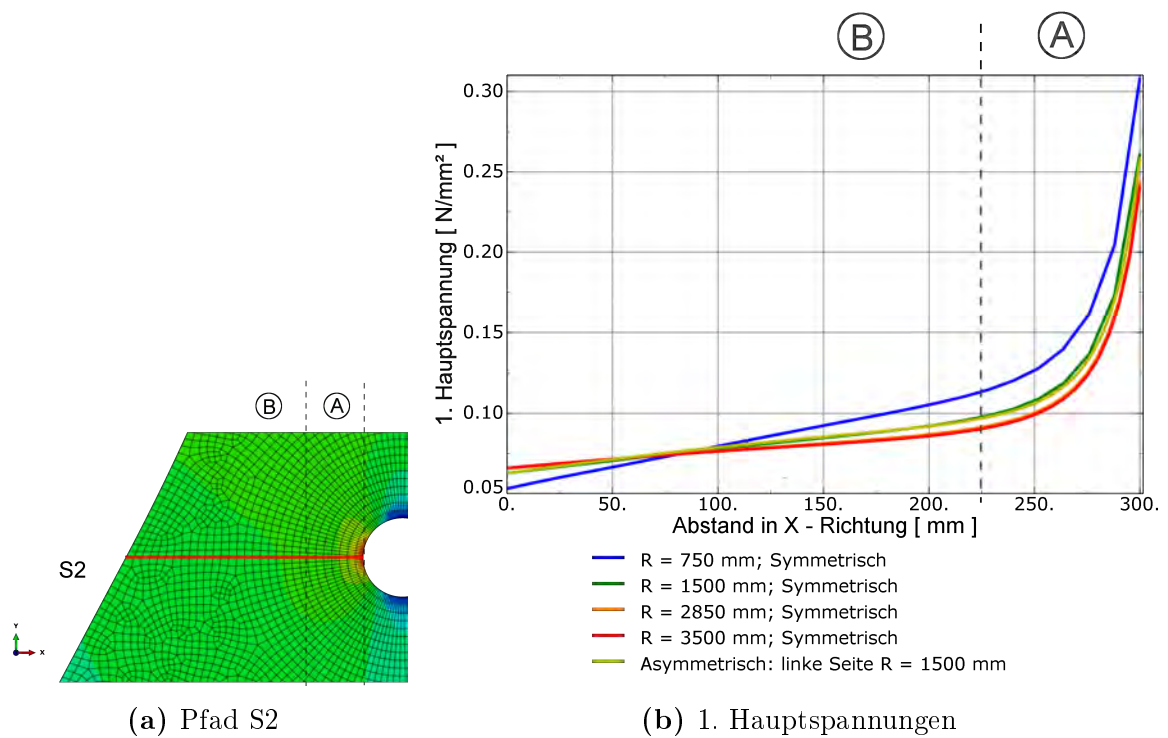


Abbildung 3.57: Spannungsverlauf in Abhängigkeit vom Außenradius unter der Normalkraftbelastung im Freischnittbereich S2

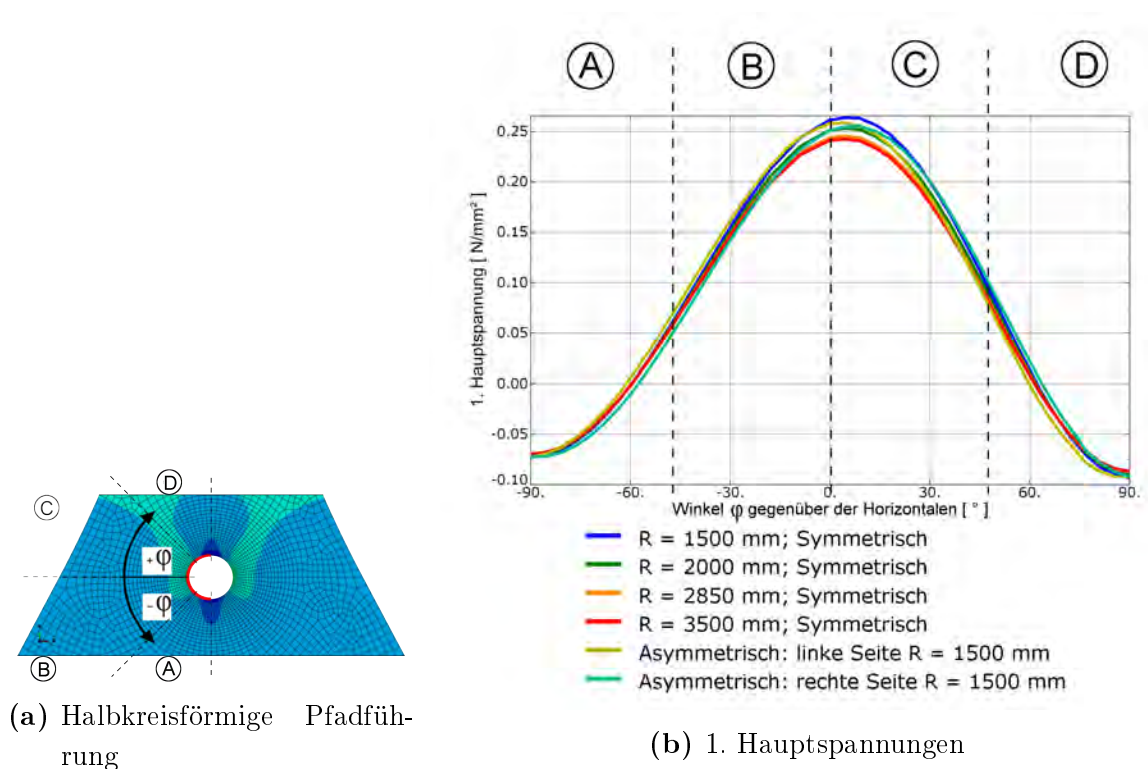
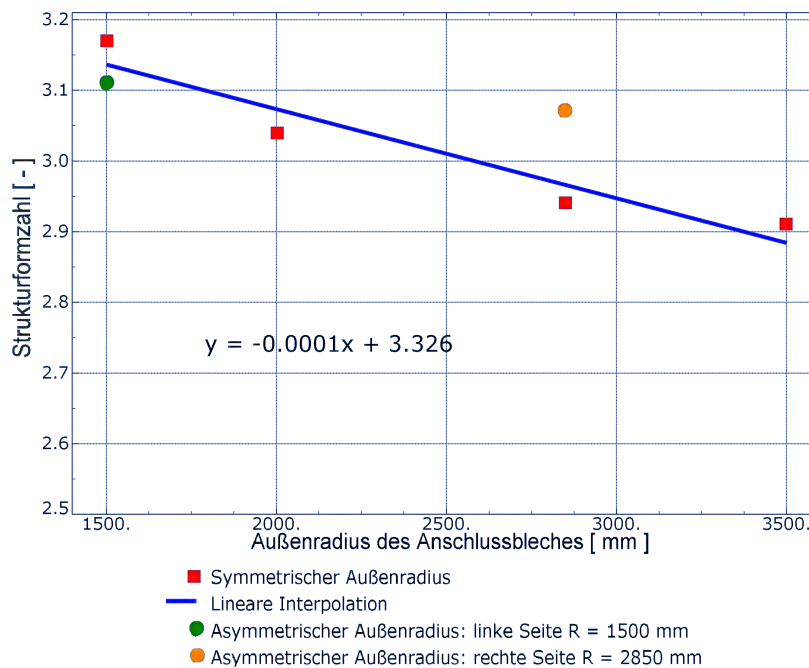


Abbildung 3.58: Spannungsverläufe in Abhängigkeit vom Außenradius unter Normalkraftbelastung im Bereich S2

**Tabelle 3.10:** Spannungen und Strukturformzahlen unter Normalkraftbelastung im Freischnittbereich S2

S2	Einheit	R1500	R2000	R2850	R3500	Asym. R1500	Asym. R2850
Nennspannung	[ $N/mm^2$ ]	8,33E-02	8,33E-02	8,33E-02	8,33E-02	8,33E-02	8,33E-02
Strukturspannung	[ $N/mm^2$ ]	2,64E-01	2,53E-01	2,45E-01	2,42E-01	2,59E-01	2,56E-01
Strukturformzahl	[ - ]	3,17	3,04	2,94	2,91	3,11	3,07

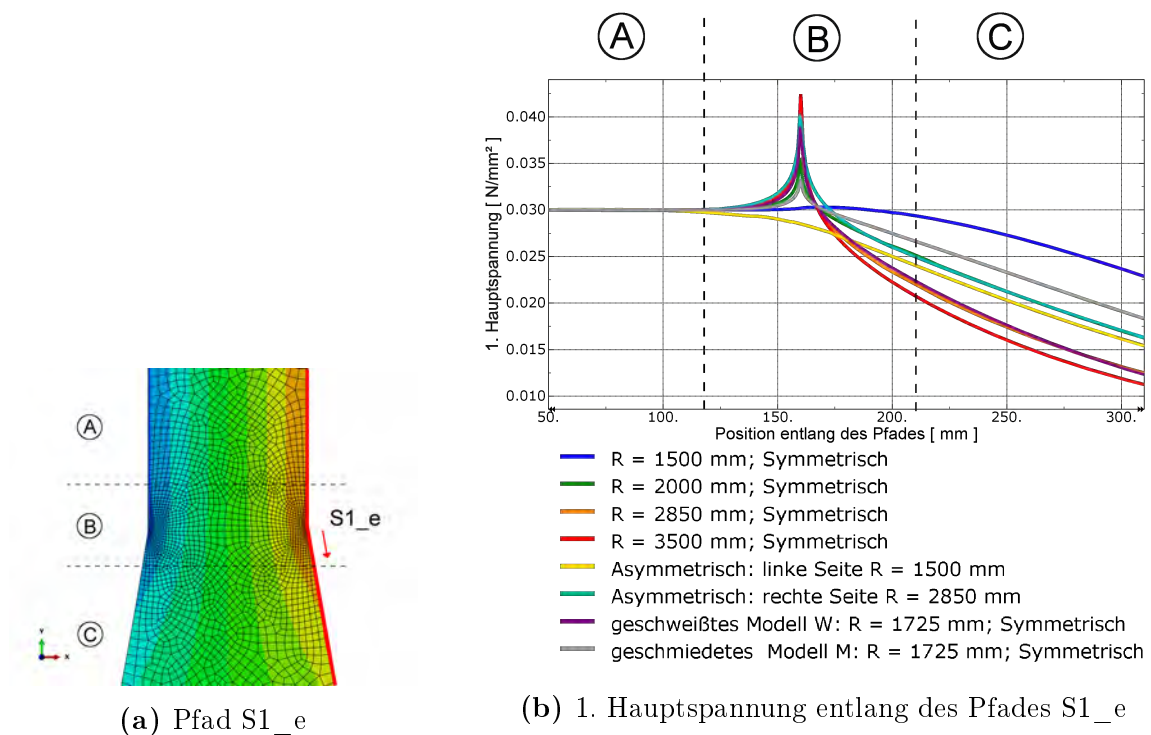


**Abbildung 3.59:** Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Außenradius unter Normalkraftbelastung im Freischnittbereich S2

### Strukturformzahlen bei Momentenbeanspruchung um die Z-Achse

Im Folgenden werden für die zwei kritischen Zonen die Spannungsverläufe unter Momentenbelastung  $M_z$  um die starke Achse beschrieben.

Abbildung 3.60 zeigt die Spannungsverläufe unter der Momentenbelastung  $M_z$  entlang des Pfades S1\_e an, welcher entlang der Modellkante verläuft. Diese Spannungsverläufe sind dem der Normalkraftbeanspruchung sehr ähnlich. Mit abnehmendem Außenradius nehmen auch die Spannungsspitzen ab. Bei einem Außenradius von 1500 mm sind kaum Erhöhungen der Spannungen zu erkennen.

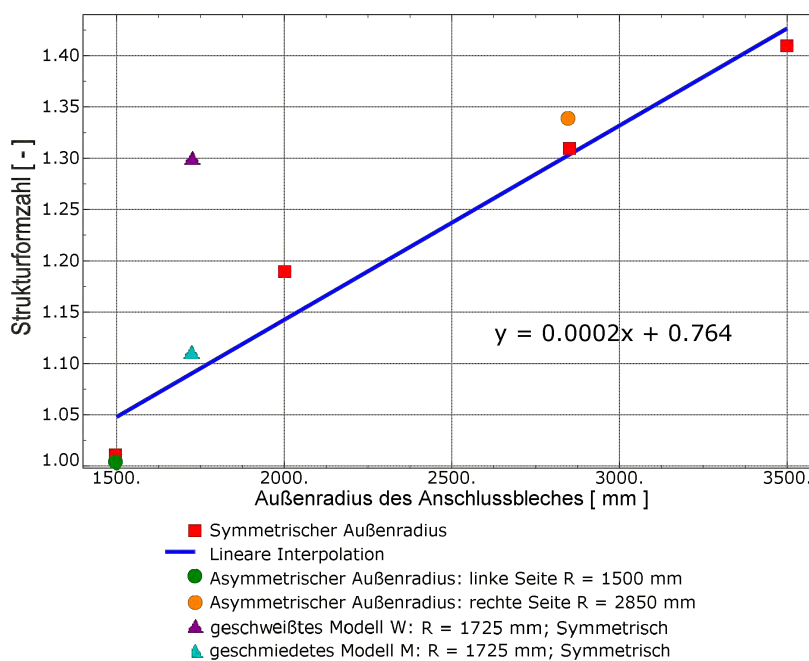


**Abbildung 3.60:** Spannungsverläufe in Abhängigkeit vom Außenradius unter Momentenbelastung  $M_z$  im Bereich S1

In der Tabelle 3.11 sind die Spannungen und Strukturformzahlen unter der Momentenbelastung um die Z-Achse beim Übergangsbereich S1 dargestellt. Im Vergleich mit den Strukturformzahlen unter Normalkraftbelastung verändern sich die Strukturformzahlen bei den kleinen Radien kaum. Bei den größeren Radien sind die Werte unter der Normalkraftbeanspruchung 10 % höher. Abbildung 3.61 zeigt, wie sich die Strukturformzahl in Abhängigkeit des Außenradius im Bereich S1 verändert. Das geschweißte Modell W weist im Vergleich zum geschmiedeten Modell M unter Belastung  $M_z$  eine 17 % höhere Strukturformzahl auf.

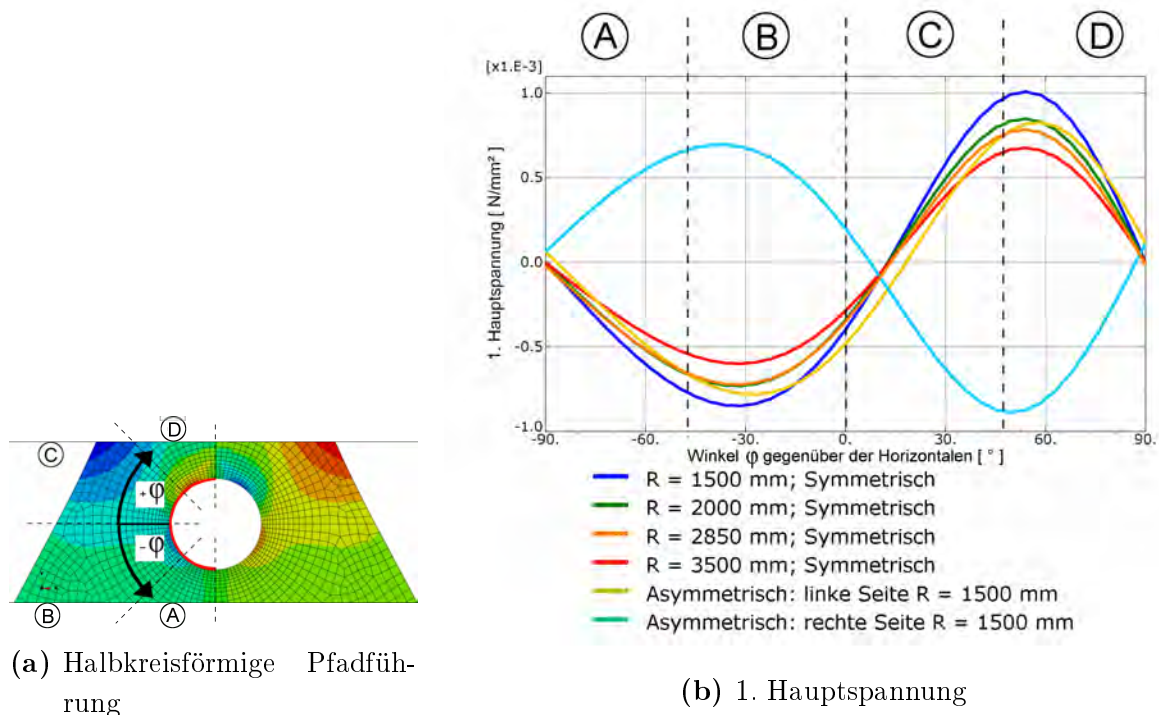
Tabelle 3.11: Spannungen und Strukturformzahlen unter der Belastung  $M_z$  im Bereich S1

S1	Einheit	R1500	R2000	R2850	R3500	Asym. R1500	Asym. R2850	R1750 -W	R1750 -M
Nennspannung	[ $N/mm^2$ ]	3,00E-02	3,00E-02	3,00E-02	3,00E-02	3,00E-02	3,00E-02	3,00E-02	3,00E-02
Strukturspannung	[ $N/mm^2$ ]	3,03E-02	3,56E-02	3,92E-02	4,24E-02	3,00E-02	4,02E-02	3,90E-02	3,34E-02
Strukturformzahl	[ - ]	1,01	1,19	1,31	1,41	1,00	1,34	1,30	1,11

Abbildung 3.61: Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Außenradius bei  $M_z$  im Bereich S1



Die Abbildung 3.62 zeigt die Spannungsverteilungen entlang der halbkreisförmigen Pfadführung an der linken Seite des Freischnittes. Für den asymmetrischen Fall wurde die Schnittführung auch an der rechten Seite des Freischnittes durchgeführt. Wie im Kapitel 3.2.7 beschrieben, verschieben sich die Spannungsspitzen unter der Momentenbeanspruchung um die Z-Achse in den Bereich D. Die maximalen Spannungsspitzen befinden sich in einem Winkel von circa  $+55^\circ$  zur Horizontalen. Bei einem Winkel von circa  $-35^\circ$  treten die minimalen Spannungsspitzen auf. In der Tabelle 3.12 sind die Spannungen und Strukturformzahlen im Bereich des Freischnittes S2 angegeben.

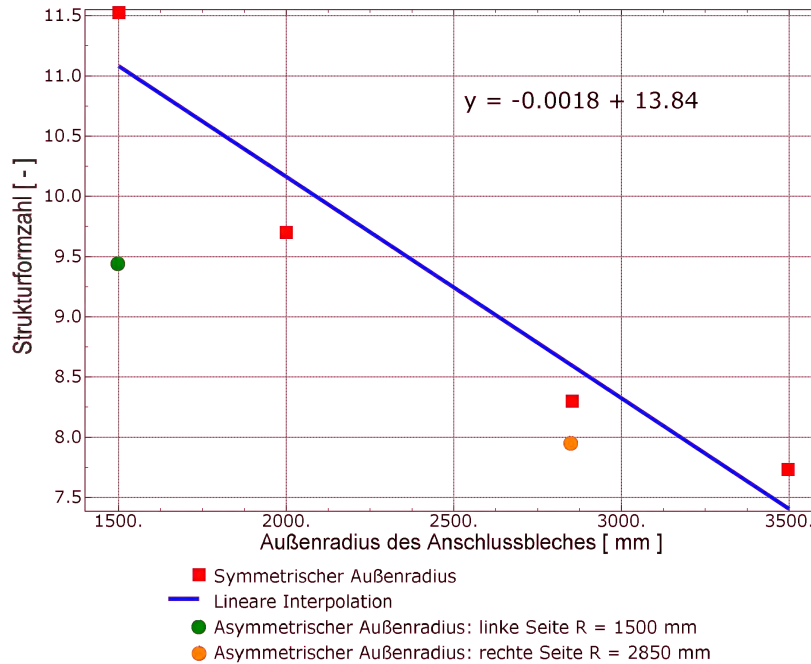


**Abbildung 3.62:** Spannungsverläufe in Abhängigkeit vom Außenradius unter der Belastung  $M_z$  im Bereich S2

**Tabelle 3.12:** Spannungen und Strukturformzahlen unter der Belastung  $M_z$  im Freischnittbereich S2

S2	Einheit	R1500	R2000	R2850	R3500	Asym. R1500	Asym. R2850
Nennspannung	[ $N/mm^2$ ]	8,77E-05	8,77E-05	8,77E-05	8,77E-05	8,77E-05	8,77E-05
Strukturspannung	[ $N/mm^2$ ]	1,01E-03	8,51E-04	7,27E-04	6,78E-04	8,28E-04	6,97E-04
Strukturformzahl	[ - ]	11,53	9,70	8,29	7,73	9,44	7,95

In Abbildung 3.63 erkennt man, dass die Strukturformzahl kleiner wird, je größer der Außenradius ist. Bei einem Radius von 2850 mm erhält man eine Strukturformzahl von 8,29. Diese ist fast dreimal größer als die Strukturformzahl bei Normalkraftbelastung. Der große Wert der Strukturformzahl resultiert aus dem Vergleich mit einer relativ kleinen Nennspannungswert im Freischnittbereich. Das asymmetrische Modell weist im Gegensatz zu den symmetrischen Modellen kleinere Strukturformzahlen auf.



**Abbildung 3.63:** Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Außenradius unter Belastung  $M_z$  im Freischnittbereich S2

### Strukturformzahlen bei Moment um die X-Achse

Im Folgenden werden für die zwei kritischen Zonen die Spannungsverläufe unter der Momentenbelastung  $M_x$  um die schwache Achse beschrieben. Entlang der Pfadführung S1\_e wird die 1. Hauptspannung in Abbildung 3.64 dargestellt. Die Spannungsverläufe unter einer Momentenbelastung um die X-Achse sind ähnlich wie unter einer Momentenbelastung um die Z-Achse.

In der Tabelle 3.13 sind die Spannungen und Strukturformzahlen unter der Belastung  $M_x$  beim Übergangsbereich S1 dargestellt. Im Vergleich mit den Strukturformzahlen unter der Momentenbelastung um die Z-Achse verändern sich die Werte minimal. Das geschweißte Modell W weist im Vergleich zum geschmiedeten Modell M unter Momentenbeanspruchung um die X-Achse eine 15 % höhere Strukturformzahl auf. Abbildung 3.65 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen Außenradius und Strukturformzahl bei der Kerbe.

**Tabelle 3.13:** Spannungen und Strukturformzahlen unter der Belastung  $M_x$  im Bereich S1

S1	Einheit	R1500	R2000	R2850	R3500	Asym. R1500	Asym. R2850	R1750 -W	R1750 -M
Nennspannung	[ $N/mm^2$ ]	1,50E-01	1,50E-01	1,50E-01	1,50E-01	1,50E-01	1,50E-01	1,50E-01	1,50E-01
Strukturspannung	[ $N/mm^2$ ]	1,51E-01	1,74E-01	1,91E-01	2,06E-01	1,50E-01	1,94E-01	1,90E-01	1,65E-01
Strukturformzahl	[ - ]	1,01	1,16	1,27	1,37	1,00	1,29	1,27	1,10

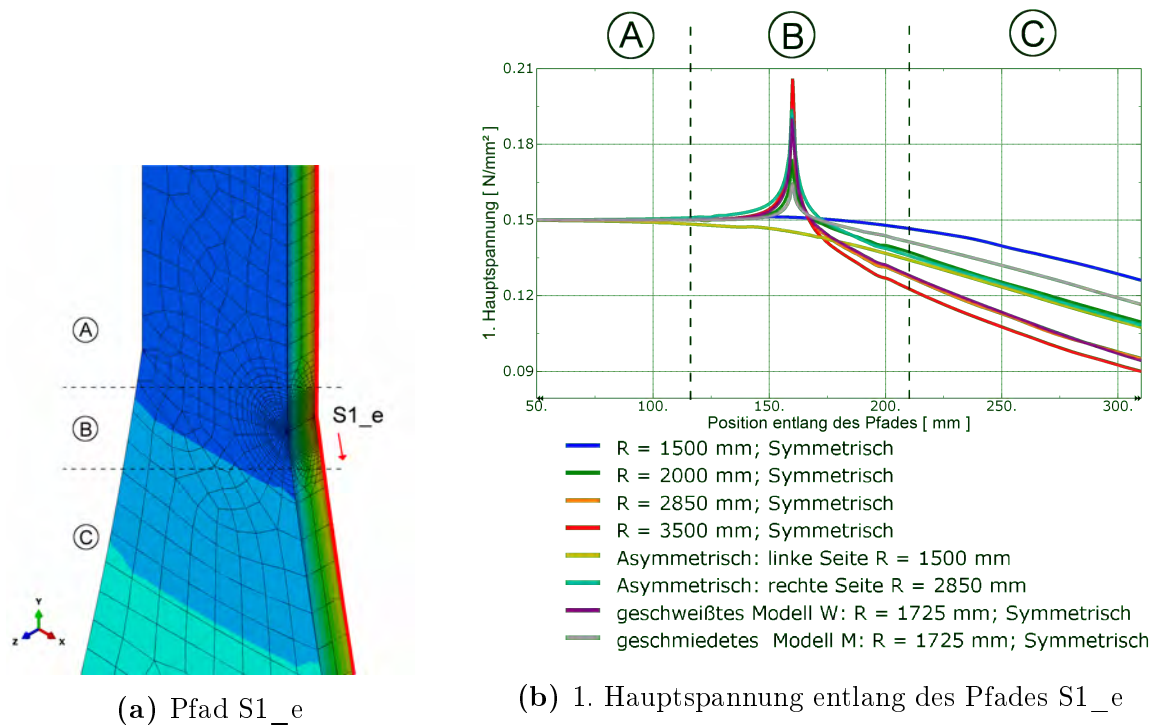


Abbildung 3.64: Spannungsverläufe in Abhängigkeit vom Außenradius unter der Momentenbelastung  $M_x$  im Bereich S1

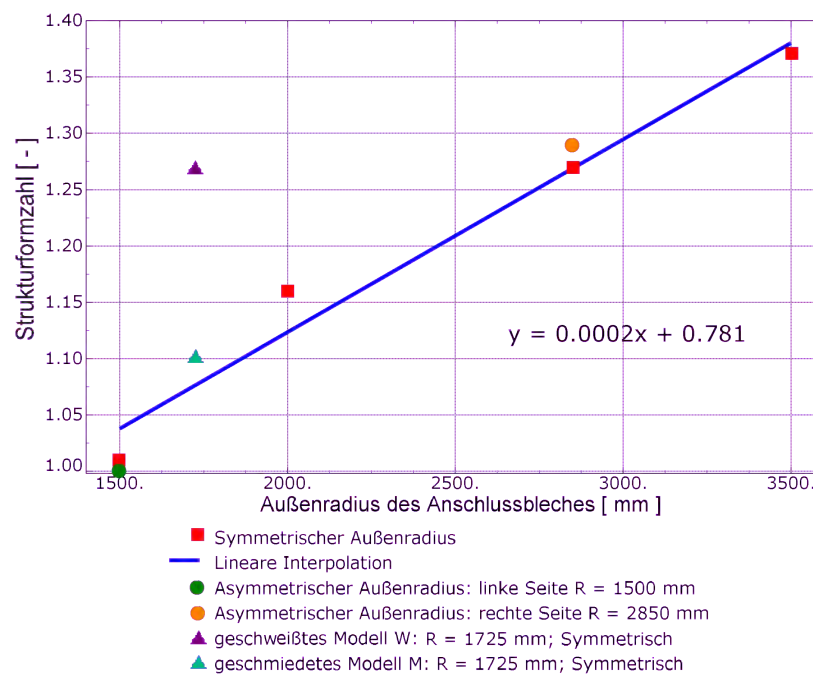
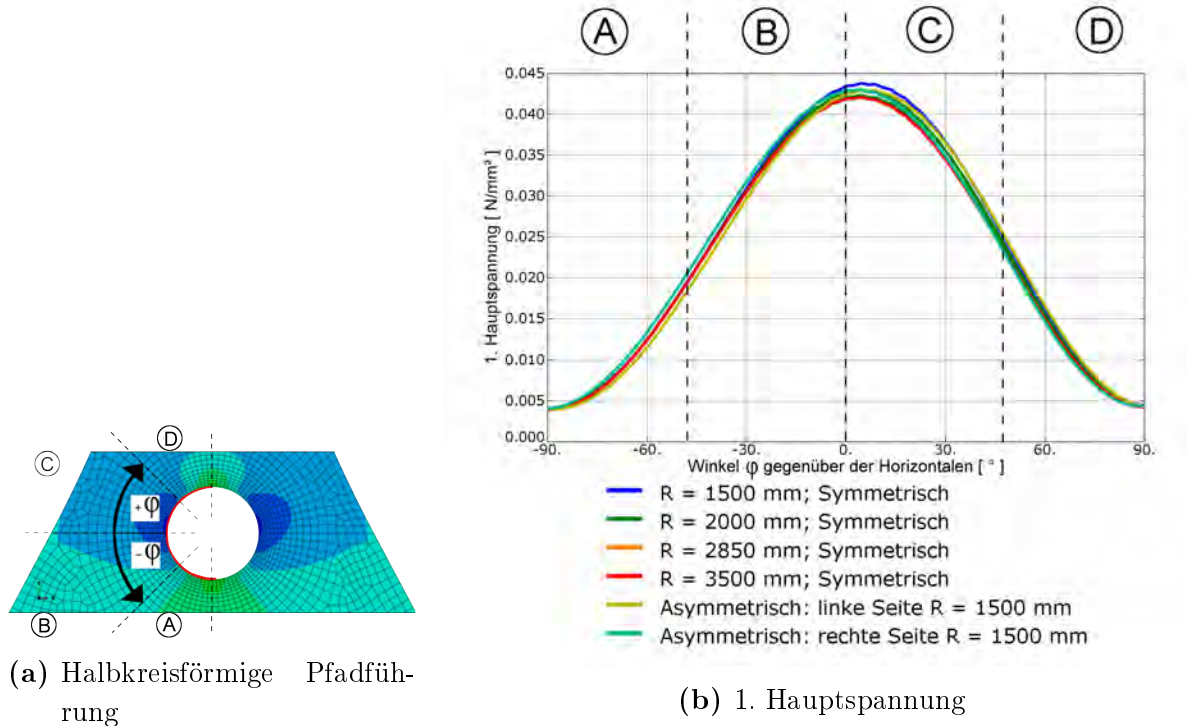


Abbildung 3.65: Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Außenradius bei der Belastung  $M_x$  im Bereich S1

Die Abbildung 3.66 zeigt die Spannungsverteilungen entlang der halbkreisförmigen Pfadführung des Freischnittes. Man erkennt, dass sich die Spannungsverläufe kaum unterscheiden.

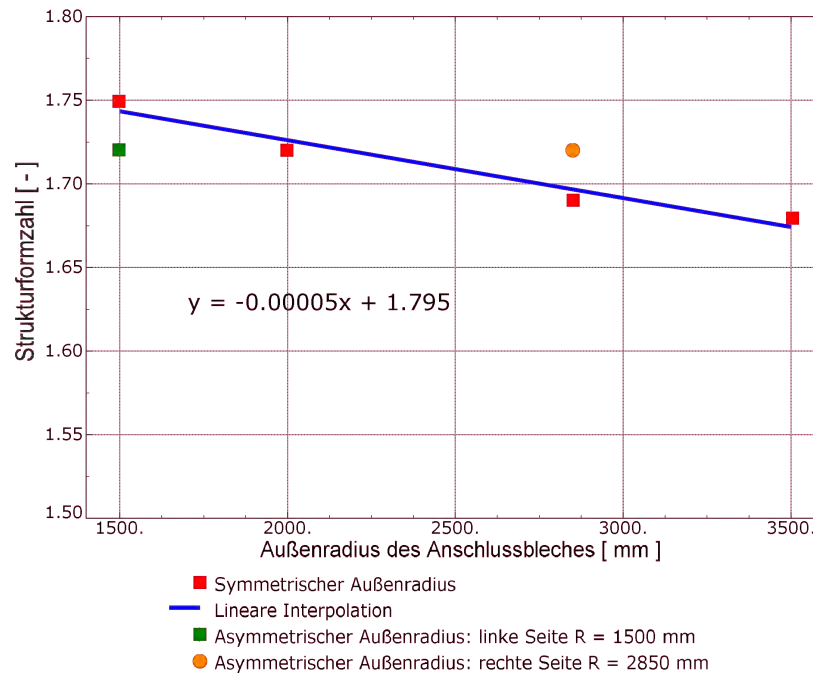


**Abbildung 3.66:** Spannungsverläufe in Abhängigkeit vom Außenradius unter der Belastung  $M_x$  im Bereich S2

In der Tabelle 3.14 sind die Spannungen und Strukturformzahlen unter der Momentenbelastung um die X-Achse beim Freischnittbereich S2 dargestellt. Im Vergleich zu den Ergebnissen unter Normalkraftbelastung sind die Strukturformzahlen wesentlich geringer. Der Faktor beträgt circa 1,7. Im Vergleich zur Momentenbelastung um die Z-Richtung bekommt man einen Faktor von circa 5.

**Tabelle 3.14:** Spannungen und Strukturformzahlen unter der Belastung  $M_x$  im Bereich S2

S2	Einheit	R1500	R2000	R2850	R3500	Asym. R1500	Asym. R2850
Nennspannung	[ $N/mm^2$ ]	2,50E-02	2,50E-02	2,50E-02	2,50E-02	2,50E-02	2,50E-02
Strukturspannung	[ $N/mm^2$ ]	4,38E-02	4,30E-02	4,23E-02	4,21E-02	4,30E-02	4,31E-02
Strukturformzahl	[ - ]	1,75	1,72	1,69	1,68	1,72	1,72



**Abbildung 3.67:** Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Außenradius bei der Belastung  $M_x$  im Freischnittbereich S2

### 3.3.4 Position und Größe des Freischnittes S2

In einem weiteren Schritt wurde die Lage und Größe des Freischnittes variiert. Im Modell nach Kapitel 3.1.1 betrug der Radius des Freischnittes 50 mm. Im Zuge der Parameteruntersuchung wurden zusätzliche Modelle mit einem Radius von 25 mm und 100 mm untersucht. Außerdem wurde der Freischnitt ( $R=50$  mm) in einem Modell um 100 mm versetzt. Eine Skizze der Geometrie dieser Modelle ist in Abbildung 3.68 ersichtlich. Es handelt sich dabei um den Ausschnitt im Bereich S2. Die restliche Hängeranschlusskonstruktion wurde mit den Abmessungen nach Kapitel 3.1.1 modelliert.

#### Strukturformzahlen für Normalkraftbeanspruchung

Unter Normalkraftbelastung (Zugkraft = 1000N) ergibt sich eine Spannungsverteilung nach Abbildung 3.69b. Im Diagramm zeigt sich, dass sich die 1. Hauptspannung direkt beim Freischnitt nur geringfügig verändert.

Speziell die Geometrie nach Abbildung 3.68a ähnelt der einer (unendlich langen) Scheibe mit Loch unter einachsigem Zug. Für die Scheibe mit Loch gibt es eine analytische Lösung. Die Spitzenspannung beim Freischnitt erreicht demnach einen dreifach höheren Wert als die Nennspannung. Der Spannungsverlauf bei dem Knotenblech mit Freischnitt  $R = 25$  mm kommt dem Spannungsverlauf einer Scheibe mit Loch unter einachsigem Zug am nächsten.

Mit Vergrößerung des Freischnittes weicht auch der Spannungsverlauf immer stärker von der analytischen Lösung bei der Scheibe mit Loch ab. Außerdem ist auffällig, dass ein kleinerer Bereich des Querschnittes eine Spannung auf Höhe der Nennspan-

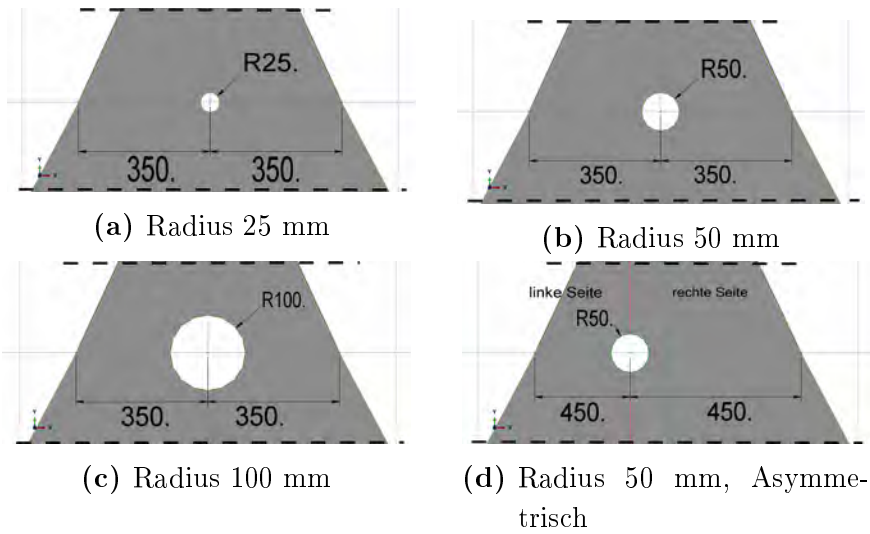


Abbildung 3.68: Variation der Parameter des Freischnittes

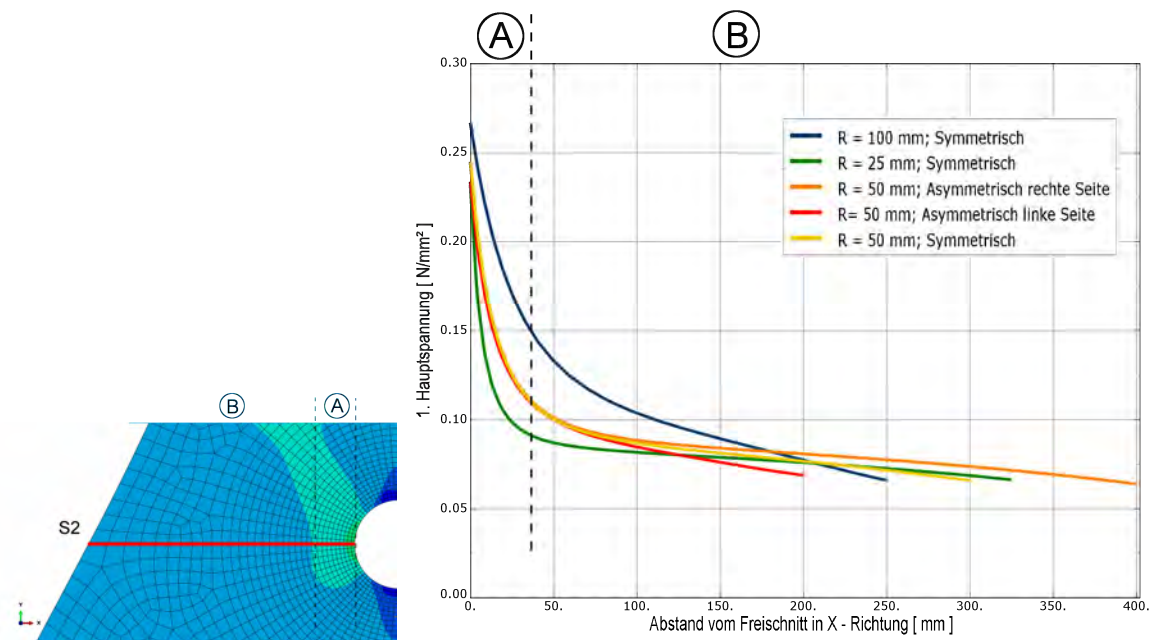


Abbildung 3.69: Spannungsverläufe unter Normalkraft

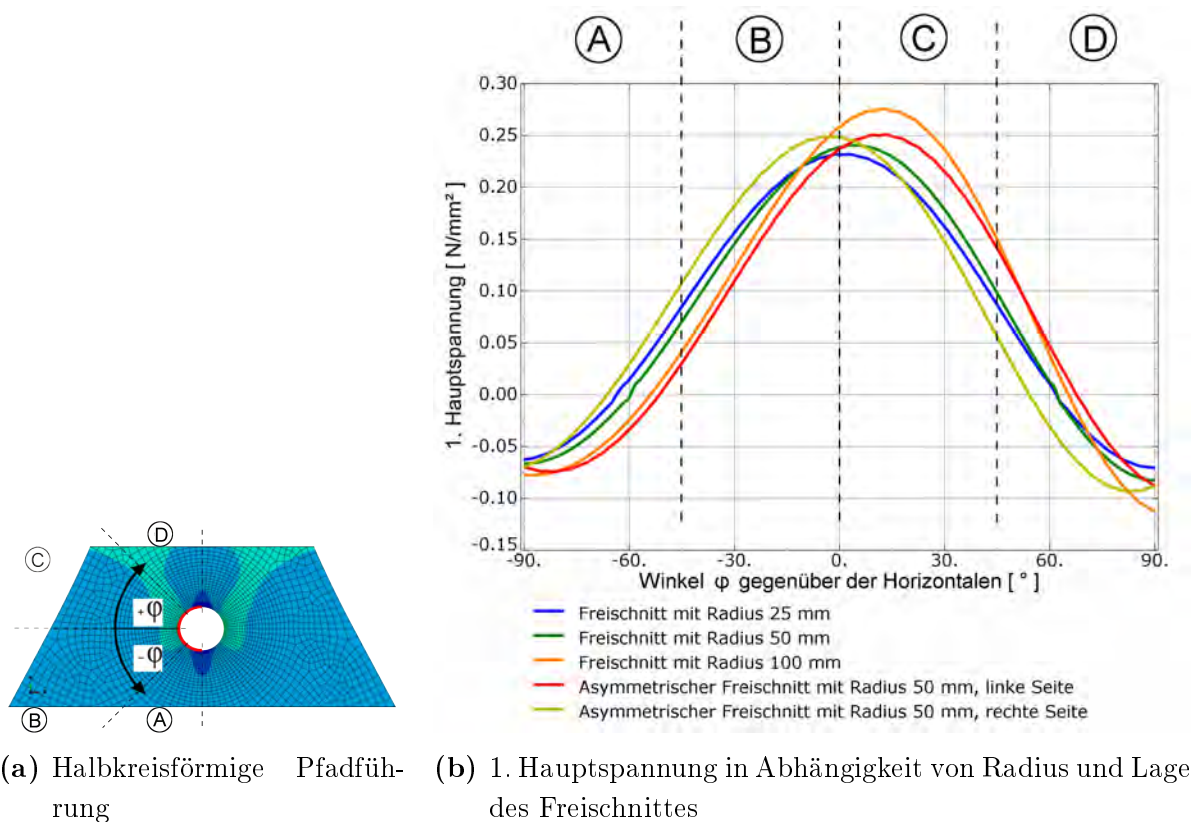


Abbildung 3.70: Spannungsverläufe unter Normalkraft

nung aufweist. Die Spannung steigt schon in größerer Entfernung zum Freischnitt an. Dadurch ist die Spannungsänderung in der Nähe des Freischnittes geringer.

Die Maximalspannungen treten bei allen Modellen direkt beim Freischnitt auf. Tabelle 3.15 stellt diese Spannungen gegenüber.

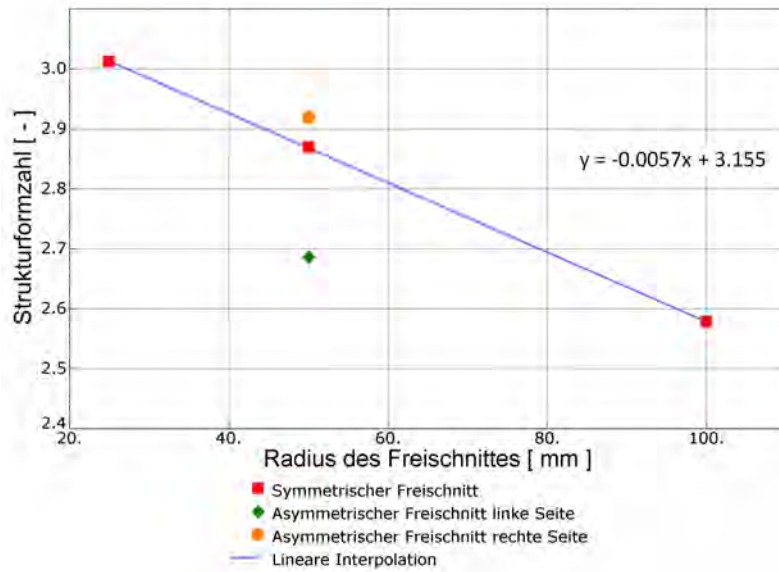
Tabelle 3.15: Spannungen und Strukturformzahl unter Normalkraft

	Einheit	R25	R50	R100	Asym. Links	Asym. Rechts
Nennspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]	7.69E-02	8.33E-02	1.00E-01	8.84E-02	8.54E-02
Strukturspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]	2.32E-01	2.39E-01	2.58E-01	2.38E-01	2.49E-01
Strukturformzahl	[ - ]	3.01	2.87	2.58	2.69	2.92

Bei einem Radius von 25 mm ergibt sich eine Strukturformzahl von 3,0. Mit Vergrößerung des Radius nimmt die Strukturformzahl bis auf 2,6 ab. Bei asymmetrischer Geometrie ist die Spitzenspannung auf der Seite mit größerer Breite (im vorliegenden Fall die rechte Seite) etwas höher.

### Strukturformzahlen bei Momentenbeanspruchung um die Z-Achse

Unter Momentenbeanspruchung um die Z-Achse verschieben sich die lokalen Maxima und Minima der 1. Hauptspannung. In Abbildung 3.72b sind die Spannungen der linken Seite des Freischnittes dargestellt. Eine Ausnahme davon bildet der Spannungsverlauf



**Abbildung 3.71:** Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Freischnitt unter Normalkraft

vom asymmetrischen Hängeranschluss. Hier wurde sowohl die linke als auch die rechte Seite abgebildet.

Die Maxima liegen in einem Winkel von cirka  $+45^\circ$  zur Horizontalen. Bei einem Winkel von  $-45^\circ$  tritt ein lokales Minimum auf. Ist der Freischnitt asymmetrisch angeordnet, vergrößert sich der Winkel zwischen den Extremwerten und der Horizontalen weiter. Tendenziell ergeben sich bei einer Vergrößerung des Freischnittes höhere Spannungen.

**Tabelle 3.16:** Spannungen und Strukturformzahl bei Moment  $M_z$

	Einheit	R25	R50	R100	Asym. Links	Asym. Rechts
Nennspannung	$[N/mm^2]$	4.37E-05	8.77E-05	1.79E-04	3.05E-04	1.22E-04
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	6.24E-04	7.28E-04	9.82E-04	1.06E-03	9.70E-04
Strukturformzahl	[ - ]	14.26	8.30	5.48	3.46	7.95

Ein Blick auf Tabelle 3.16 zeigt, dass die Strukturformzahl mit größerem Radius abnimmt. Die Momentenbelastung in Z-Richtung führt zu einem Spannungszustand im Modell, der weit von der Berechnung nach Balkentheorie ( $\sigma = \frac{M}{W}$ ) abweicht. Der Spannungsverlauf entlang eines horizontalen Schnittes ist erwartungsgemäß nichtlinear (siehe dazu Abbildung 3.18). Im Bereich des Freischnittes weist die Strukturspannung in allen Modellen ähnliche Werte auf. Jedoch ergibt sich aufgrund eines unterschiedlichen Abstandes zur Schwerachse in allen Modellen eine unterschiedliche Nennspannung. Die Nennspannung bei einem Radius des Freischnittes von 100 mm ist viermal größer als bei einem Radius mit 25 mm. Dem gegenüber ist die Strukturspannung lediglich 1,6-mal so groß.

Eine Übersicht über die Strukturformzahlen in Abhängigkeit von der Modellierung findet sich in Abbildung 3.73. Ist der Freischnitt asymmetrisch angeordnet, so ergeben



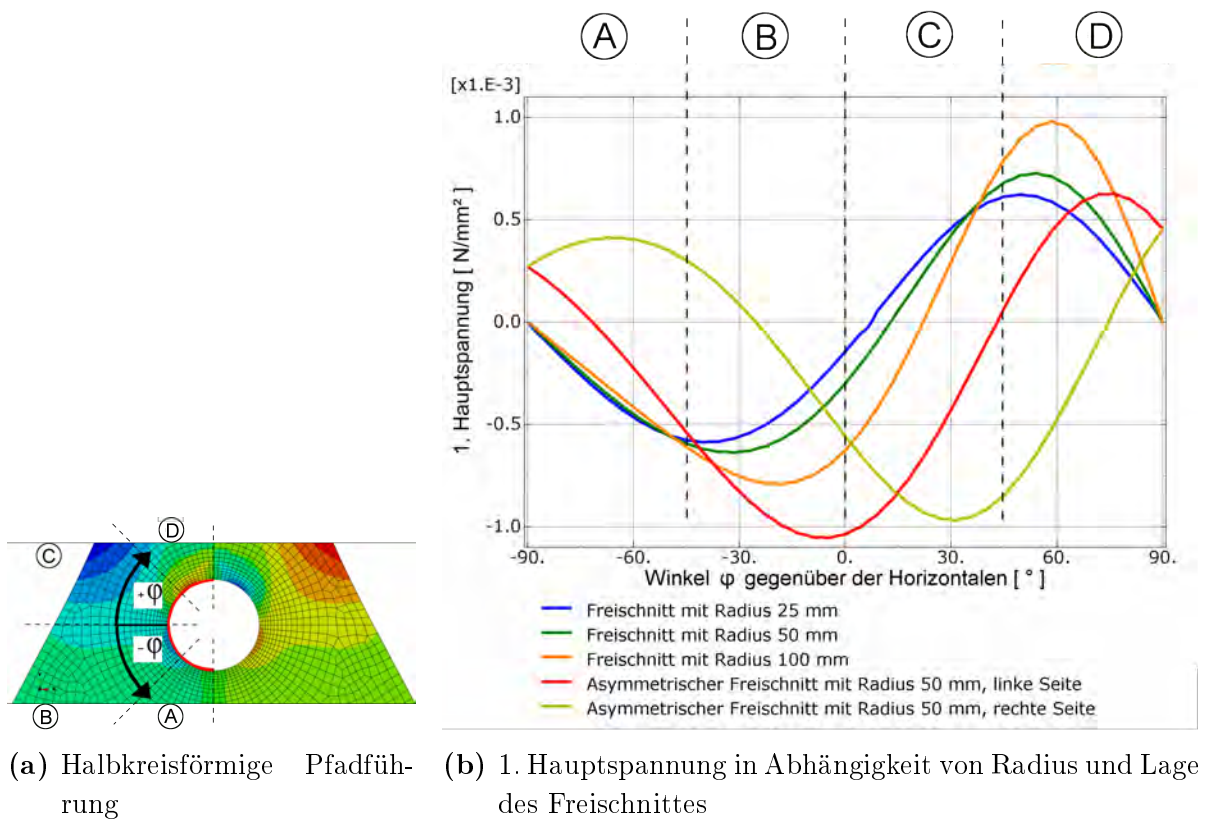


Abbildung 3.72: Spannungsverläufe unter Moment  $M_z$

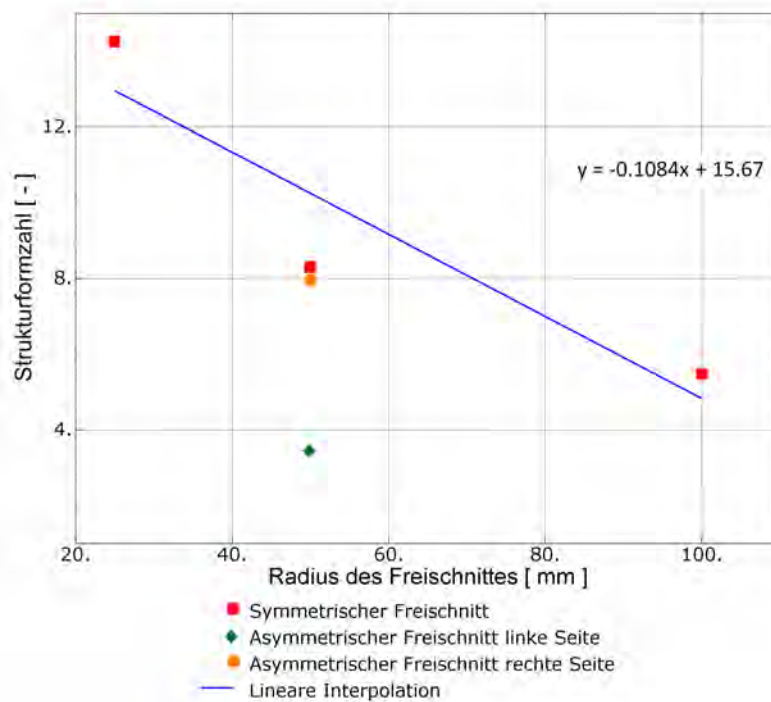


Abbildung 3.73: Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Freischnitt unter Moment  $M_z$

sich in diesem Fall geringere Strukturformzahlen. Auch dies liegt vor allem daran, dass durch den größeren Abstand zur Schwerachse die Nennspannungen bereits höher sind.

### Strukturformzahlen bei Moment um die X-Achse

Unter Momentenbelastung um die X-Achse ergeben sich bei allen untersuchten Modellen ähnliche Spannungen. In Abbildung 3.74 erkennt man die geringen Unterschiede in den Spannungsverläufen. Das Maximum bzw. Minimum der 1. Hauptspannung tritt bei  $\varphi \approx 0$  auf. Hier zeigt sich eine Ähnlichkeit zum Spannungsverlauf unter Normalkraft (siehe Abbildung 3.70b).

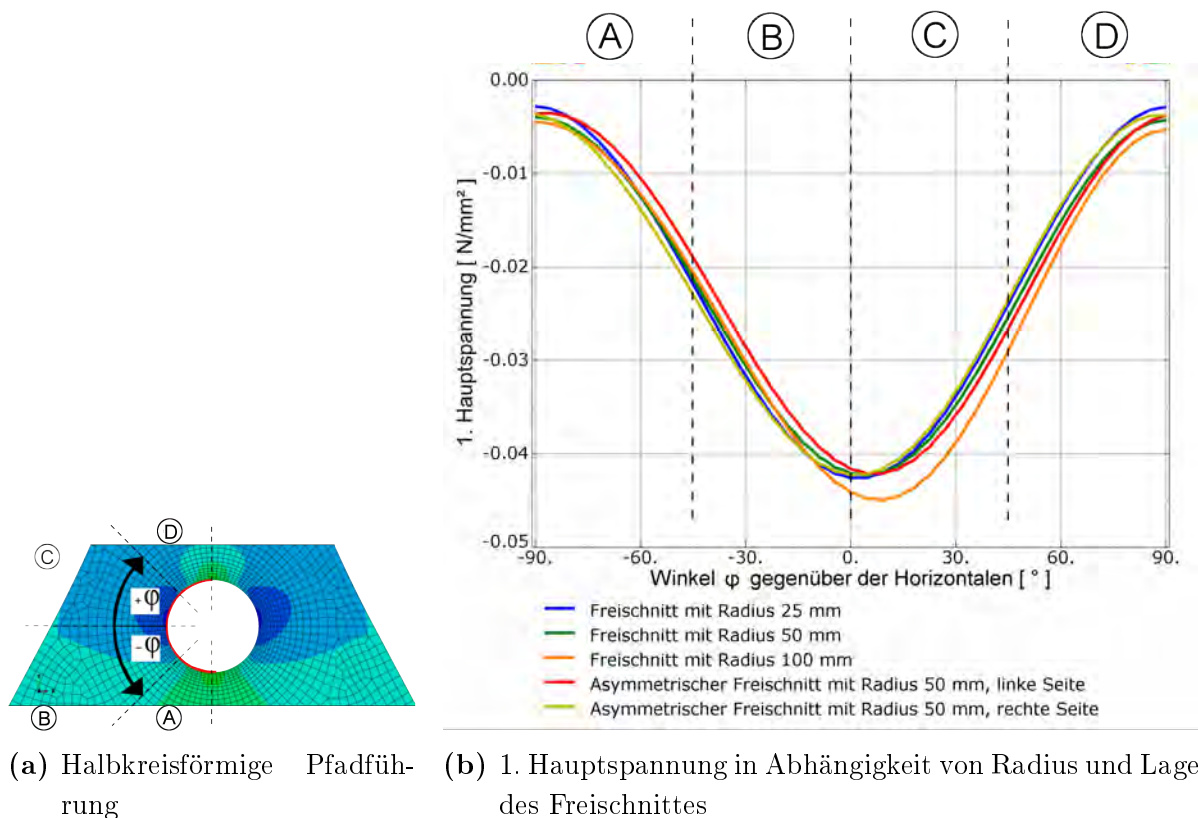


Abbildung 3.74: Spannungsverläufe unter Moment  $M_x$

Die Nennspannung variiert hier nur geringfügig durch die Verkleinerung und Vergrößerung der Restbreite. Das Flächenträgheitsmoment um die X-Achse bleibt dadurch weitgehend unbeeinflusst. Die Schwerachse hat bei allen Modellen die gleiche Lage. Dadurch ergeben sich auch bei einer asymmetrischen Anordnung des Freischnittes keine großen Abweichungen.

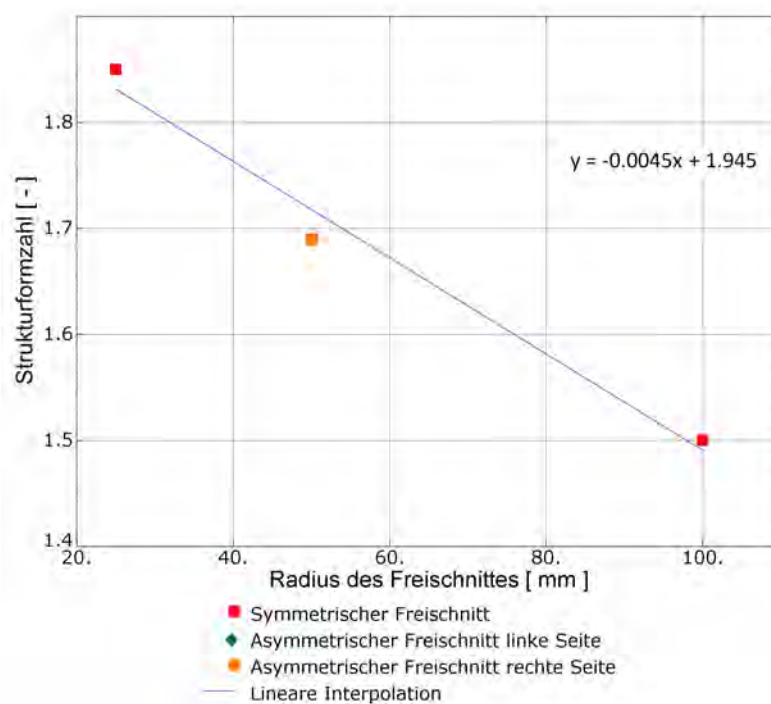
Die Strukturformzahl liefert bei symmetrischer und exzentrischer Anordnung des Freischnittes den gleichen Wert. Bei einem Radius von 25 mm sind etwas höhere Strukturformzahlen zu beobachten. Im Gegensatz dazu sinkt die Strukturformzahl bei einem größeren Radius (100 mm) ab. Eine Übersicht über die Spannungen und Strukturformzahlen ist in Tabelle 3.17 dargestellt.

Im Vergleich zu den Ergebnissen unter Normalkraftbelastung sind die ermittelten Strukturformzahlen geringer. Der Faktor beträgt ca. 1,65 ( $Strukturformzahl_N \approx$

**Tabelle 3.17:** Spannungen und Strukturformzahl bei Moment  $M_x$ 

	Einheit	R25	R50	R100	Asym. Links	Asym. Rechts
Nennspannung	$[N/mm^2]$	2.31E-02	2.50E-02	3.00E-02	2.50E-02	2.50E-02
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	4.26E-02	4.23E-02	4.50E-02	4.22E-02	4.23E-02
Strukturformzahl	$[-]$	1.85	1.69	1.50	1.69	1.69

$1,65 * Strukturformzahl_{M_x}$ ). Der Unterschied zwischen einer Momentenbelastung in Z-Richtung und in X-Richtung fällt deutlich höher aus. Hier sind die Strukturformzahlen bei  $M_z$  um bis zu siebenmal höher.

**Abbildung 3.75:** Strukturformzahl in Abhängigkeit vom Freischnitt unter Moment  $M_x$ 

### 3.3.5 Restbreite auf Höhe des Freischnittes S2

Bei dem vereinfachten Modell wurde symmetrisch eine Restbreite auf Höhe des Freischnittes von  $b_F/2 = 300$  mm gewählt. In Kapitel 2.1 wird die Restbreite als definierte geometrische Größe angegeben, welche maßgeblich zur Formgestaltung des Hängers beiträgt.

Im Zuge der Parameteruntersuchung wurde die Restbreite variiert. Als weitere Modelle wurden Restbreiten mit 200 und 400 mm untersucht. Zusätzlich wurde ein asymmetrisches Modell mit verschiedenen Breiten, 200 bzw. 300 mm, betrachtet. In Abbildung 3.76 sind die unterschiedlichen Geometrien dargestellt.

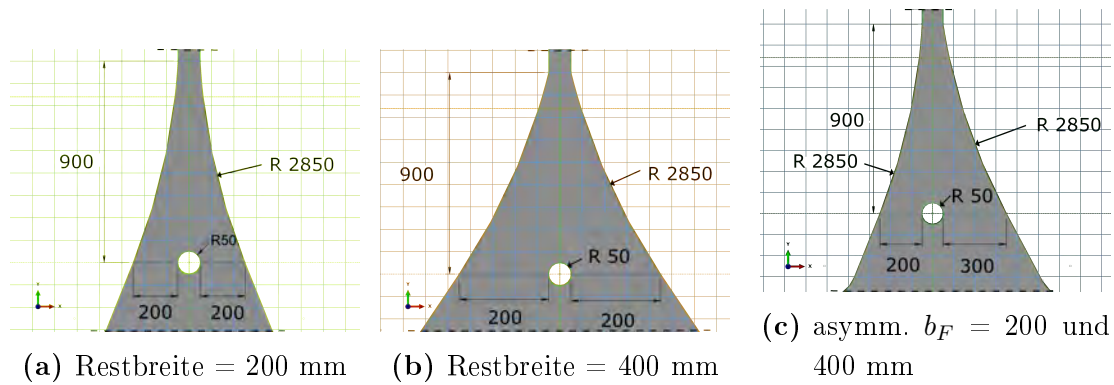


Abbildung 3.76: Variation der Restbreite im Freischnittbereich S2

### Strukturformzahlen für Normkraftbeanspruchung

In Abbildung 3.77 sind die Spannungsverteilungen entlang der horizontalen Pfadführung S2 unter Normkraftbelastung zu sehen. Unabhängig von der Restbreite entstehen am Freischnitt die größten Spannungserhöhungen. Die restliche Spannungsverteilung entlang der Restbreite ist von der Querschnittsfläche abhängig und dementsprechend unterschiedlich groß.

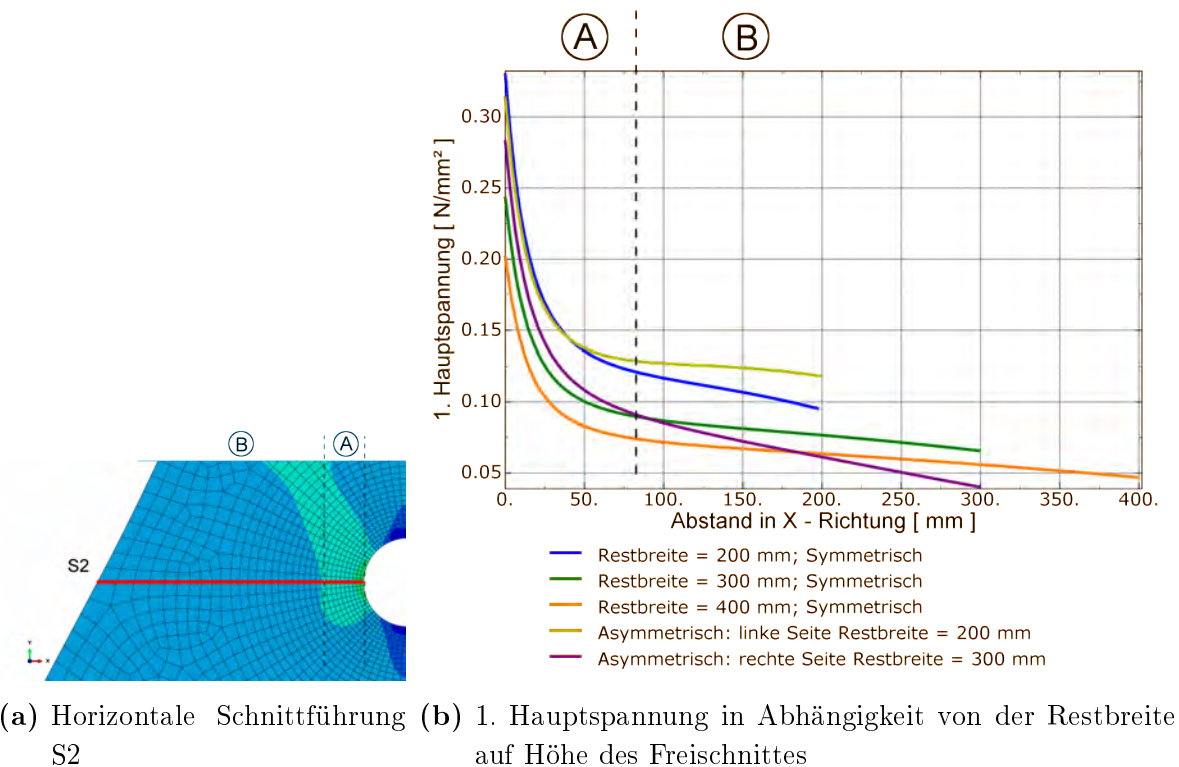


Abbildung 3.77: Spannungsverläufe unter Normkraft

In Abbildung 3.78 erkennt man, dass unabhängig von der Restbreite die Spannungsspitzen einen geringen positiven Winkel von circa  $+2^\circ$  zur Horizontalen besitzen (Bereich C). Um einen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Geometrien zu erzeugen, wurden in der Tabelle 3.18 die Spannungen und Strukturformzahlen angegeben.

Die Nennspannung für den Freischnittbereich S2 wird in Kapitel 3.2.4 berechnet. Die maßgebenden Strukturspannungen wurden durch Auslesen der Integrationspunkte der Elemente im Freischnittbereich ermittelt. Die Strukturformzahl ergibt sich aus dem Quotient von der Strukturspannung und der dazugehörigen Nennspannung.

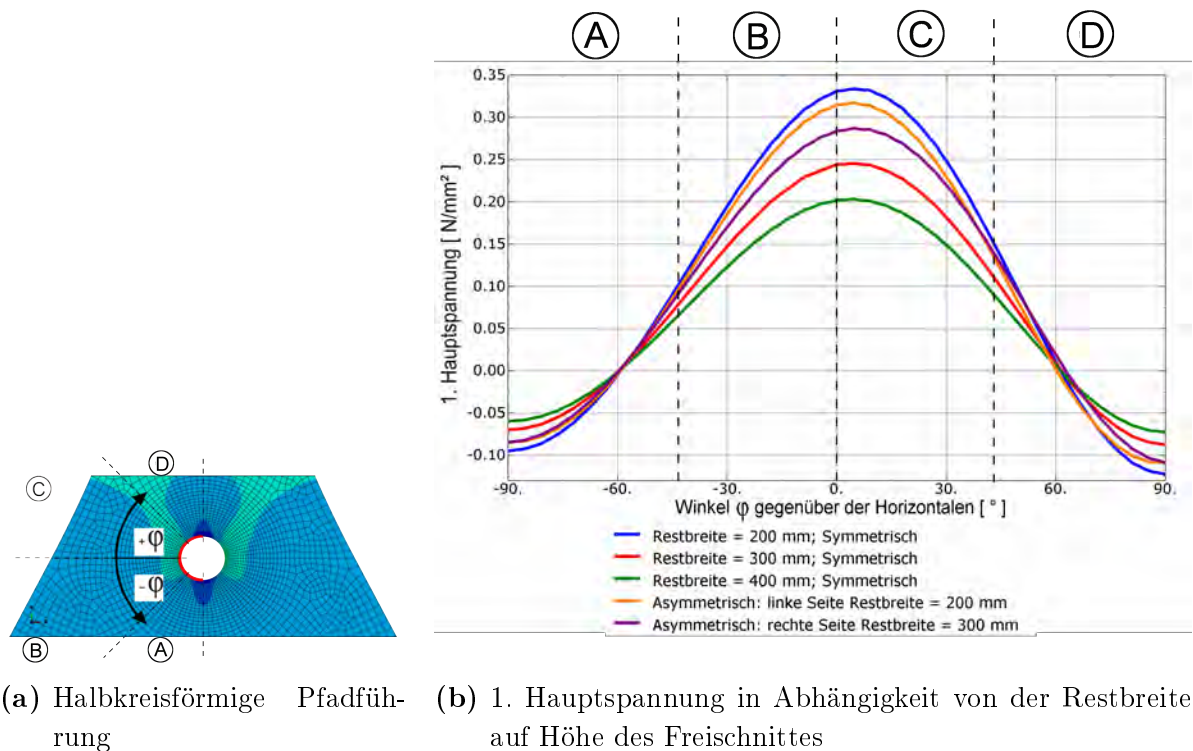
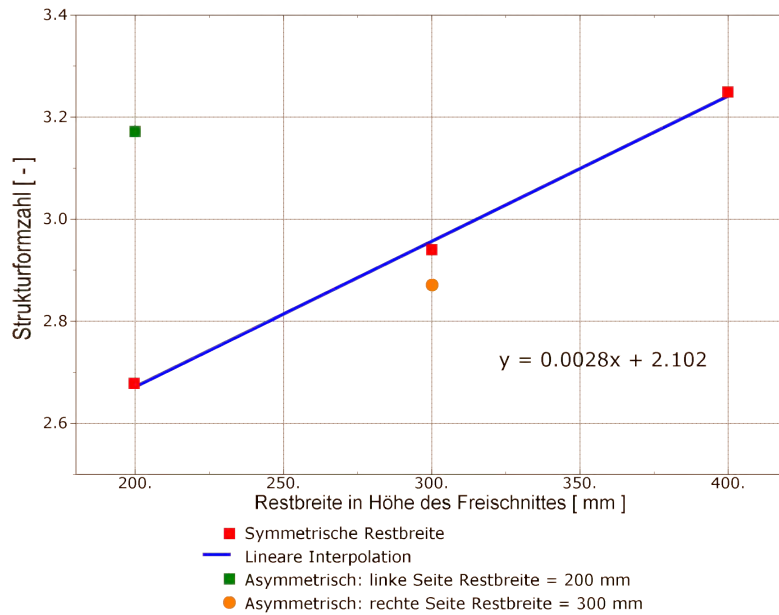


Abbildung 3.78: Spannungsverläufe unter Normalkraft

Tabelle 3.18: Spannungen und Strukturformzahlen unter Normalkraftbelastung im Freischnittbereich S2

S2	Einheit	$b_F$ 200	$b_F$ 300	$b_F$ 400	Asym. $b_F$ 200	Asym. $b_F$ 300
Nennspannung	$[ N/mm^2 ]$	1,25E-01	8,33E-02	6,25E-02	1,00E-01	1,00E-01
Strukturspannung	$[ N/mm^2 ]$	3,34E-01	2,45E-01	2,03E-01	3,17E-01	2,87E-01
Strukturformzahl	$[ - ]$	2,68	2,94	3,25	3,17	2,87

Eine Übersicht über die Strukturformzahl in Abhängigkeit der Restbreite in Höhe des Freischnittes befindet sich in der Abbildung 3.79. Bei einer Restbreite  $b_F/2$  von 300 mm erhält man eine Strukturformzahl von 2,89. Diese ist relativ ähnlich mit der Strukturformzahl einer unendlich langen Scheibe mit Loch unter Zugkraft und beträgt 3,0. Bei größerer Restbreite, und daraus folgenden größeren Querschnitt, nimmt die Strukturformzahl zu. Im Vergleich zu den symmetrischen Modellen verändern sich die Strukturformzahlen beim asymmetrischen Modell unterschiedlich. An der rechten Seite, eine Restbreite von 300 mm, wird die Strukturformzahl kleiner und an der linken Seite, eine Restbreite von 200 mm, erhöht sie sich.



**Abbildung 3.79:** Strukturformzahl in Abhängigkeit von der Restbreite unter Normalkraftbelastung im Freischnittbereich S2

### Strukturformzahlen bei Momentenbeanspruchung um die Z-Achse

In Abbildung 3.80 sind die Spannungsverteilungen entlang der halbkreisförmigen Pfadeführung an der linken Seite des Freischnittes unter Momentenbelastung  $M_z$  zu sehen. Für das asymmetrische Modell wurde die Schnittführung auch an der rechten Seite des Freischnittes durchgeführt. Unter der Momentenbeanspruchung um die Z-Achse verschieben sich die Spannungsspitzen. Die maximalen Spannungsspitzen befinden sich mit einem Winkel von circa  $+55^\circ$  zur Horizontalen (Bereich D). Bei einem Winkel von circa  $-35^\circ$  treten die minimalen Spannungsspitzen auf (Bereich C). In der Tabelle 3.19 sind die Spannungen und deren Strukturformzahlen angegeben.

**Tabelle 3.19:** Spannungen und Strukturformzahlen unter der Belastung  $M_z$  im Freischnittbereich S2

S2	Einheit	$b_F$ 200	$b_F$ 300	$b_F$ 400	Asym. $b_F$ 200	Asym. $b_F$ 300
Nennspannung	[ $N/mm^2$ ]	2,42E-04	8,77E-05	4,12E-05	1,29E-04	1,29E-04
Strukturspannung	[ $N/mm^2$ ]	1,14E-03	7,27E-04	5,44E-04	8,21E-04	5,91E-04
Strukturformzahl	[ - ]	4,73	8,29	13,20	6,37	4,59

In der Abbildung 3.81 sind die Strukturformzahlen in Abhängigkeit der Restbreite dargestellt. Generell erkennt man, dass bei größeren Restbreiten die Strukturformzahl zunimmt. Im Vergleich zu den Ergebnissen unter Normalkraftbelastung sind die Strukturformzahlen fast dreimal größer. Der Faktor beträgt 2,88.

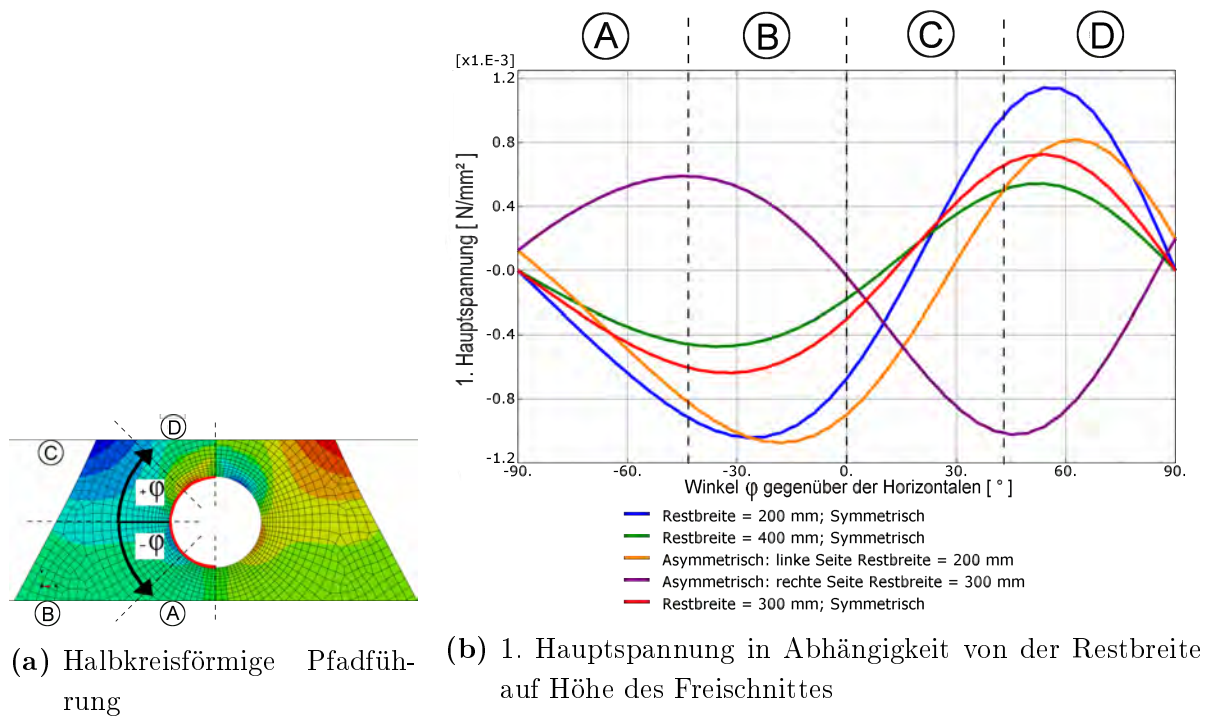


Abbildung 3.80: Spannungsverläufe unter Moment  $M_z$

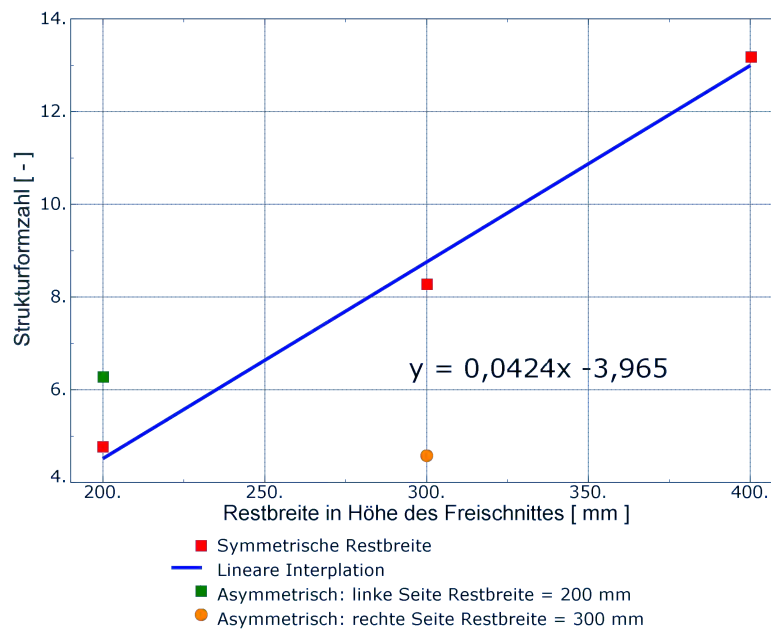


Abbildung 3.81: Strukturformzahl in Abhängigkeit von der Restbreite unter der Belastung Moment um die Z-Achse

### Strukturformzahlen bei Moment um die X-Achse

Unter der Momentenbelastung um die X-Achse (schwache Achse) ergeben sich ähnliche Spannungsverläufe wie unter der Normalkraftbelastung. In Abbildung 3.82 sind die Spannungsverläufe entlang der halbkreisförmigen Pfadführung zu sehen. Die unterschiedlichen Werte der Spannungsspitzen resultieren aus den verschiedenen Querschnittsgrößen. Die Maximale Spannungsspitze befindet sich mit einem geringen Winkel von circa  $+2^\circ$  zur Horizontalen (Bereich C). Da die Nennspannung variiert, wird der Vergleich zwischen den Modellen über die Strukturformzahl geführt, Tabelle 3.20.

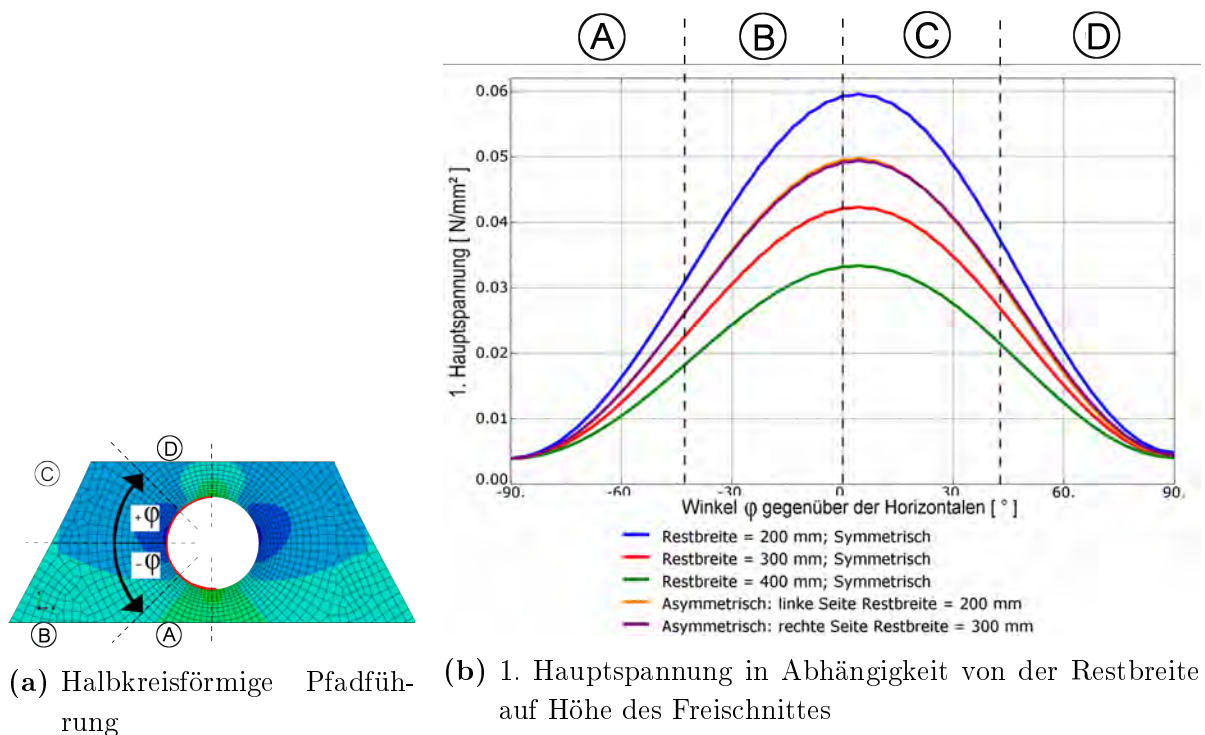


Abbildung 3.82: Spannungsverläufe unter Moment  $M_x$

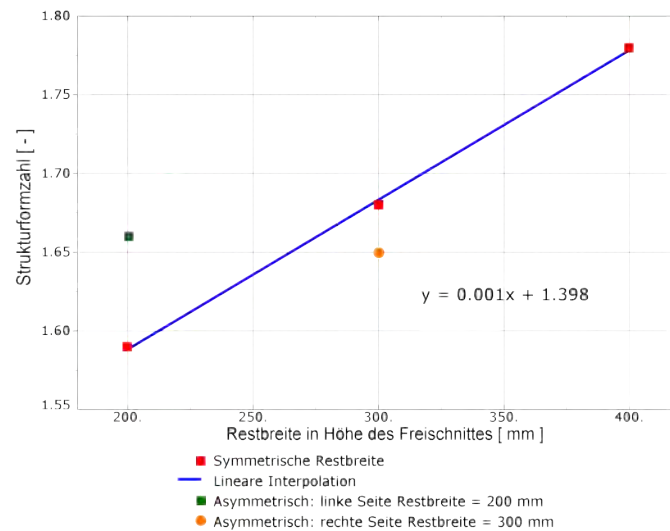
Tabelle 3.20: Spannungen und Strukturformzahlen unter der Belastung  $M_x$  im Freischnittbereich S2

S2	Einheit	$b_F$ 200	$b_F$ 300	$b_F$ 400	Asym. $b_F$ 200	Asym. $b_F$ 300
Nennspannung	[ $N/mm^2$ ]	3,75E-02	2,500E-02	1,88E-02	3,00E-02	3,00E-02
Strukturspannung	[ $N/mm^2$ ]	5,96E-02	4,23E-02	3,34E-02	4,98E-02	4,94E-02
Strukturformzahl	[ - ]	1,59	1,68	1,78	1,66	1,65

In der Abbildung 3.83 sind die Strukturformzahlen in Abhängigkeit der Restbreite unter Momentenbelastung um die X-Achse zu sehen. Bei größeren Restbreiten nimmt die Strukturformzahl zu. Im Vergleich zu den symmetrischen Modellen verändern sich die Strukturformzahlen beim asymmetrischen Modell unterschiedlich. An der rechten Seite, eine Restbreite von 300 mm, wird die Strukturformzahl kleiner und an der linken Seite, eine Restbreite von 200 mm, erhöht sie sich. Im Vergleich zu den Ergebnissen



unter Normalkraftbelastung sind die Strukturformzahlen fast nur halb so groß. Der Faktor beträgt circa 1,70.



**Abbildung 3.83:** Strukturformzahl in Abhängigkeit von der Restbreite unter Momentenbelastung  $M_x$  im Freischnittbereich S2

## 3.4 Zusammenfassung des vereinfachten 2D-Modells

### 3.4.1 Kritischer Bereich S1 - Beginn Knotenblech

Zwei wesentliche Faktoren beeinflussen die Strukturformzahl im Übergangsbereich zwischen dem Regelquerschnitt des Hängers und dem Beginn des Knotenbleches. Ein wichtiger Faktor ist der Ausrundungsradius des Übergangsbereiches. Als zweiter Einflussfaktor gilt die Neigung, mit der das Knotenblech auf den Hänger trifft.

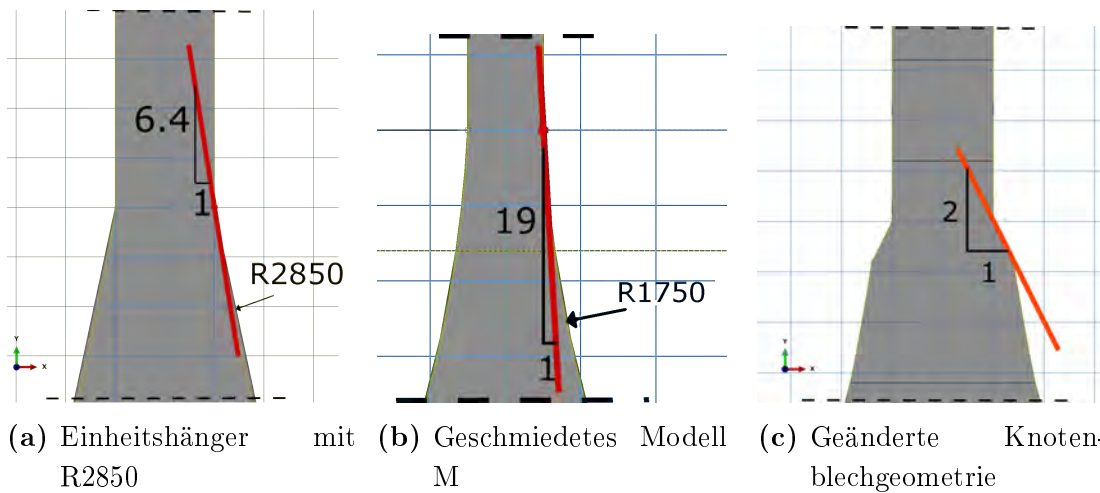
#### Ausrundungsradius des Knotenbleches

Wie bereits in Kapitel 3.3.1 untersucht, zeigt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Größe des Radius und den vorhandenen Spannungsspitzen. Der Verlauf ist sowohl bei kleineren Radien als auch bei großen Ausrundungsradien nahezu linear. Die Steigung der linearen Interpolationslinie ist jedoch bei kleinen Radien deutlich höher (Siehe Abbildung 3.40). Die Strukturspannungen verringern sich demnach in einem höheren Ausmaß, wenn kleine Ausrundungsradien vergrößert werden.

#### Steigung des Knotenbleches

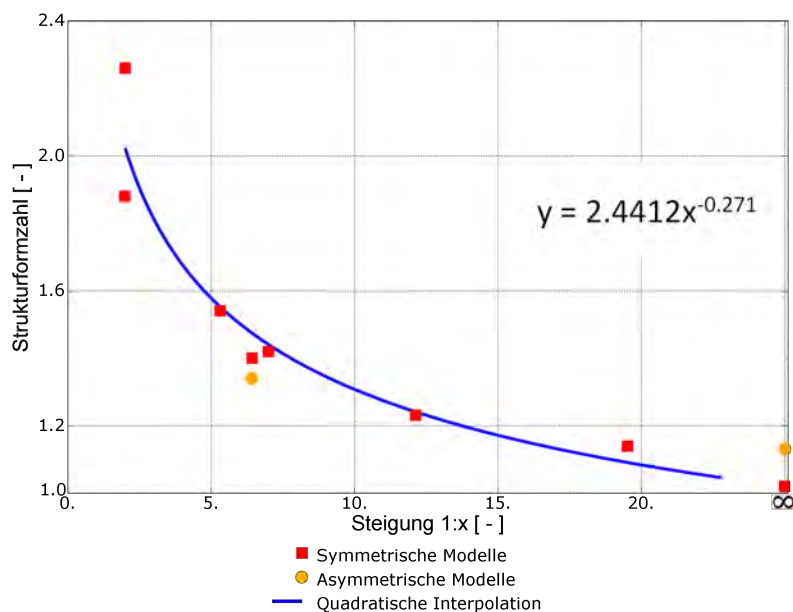
Beim Beginn des Knotenbleches kommt es im Modell zu einem Knick, da das Knotenblech mit einer gewissen Neigung vom Hänger weg verläuft. Dieser Knick wird, um Spannungsspitzen zu verringern, mit einem gewissen Radius ausgerundet. Neben diesem Ausrundungsradius hat die Steigung, mit der das Knotenblech vom Hänger weg verläuft, einen Einfluss auf die maximal auftretenden Spannungen. Um die Steigung zu

ermitteln, wurde eine Tangente an die Außenkante des Knotenbleches im Schnittpunkt mit dem Hänger gelegt. Die Tangentenkonstruktion zeigt Abbildung 3.84.

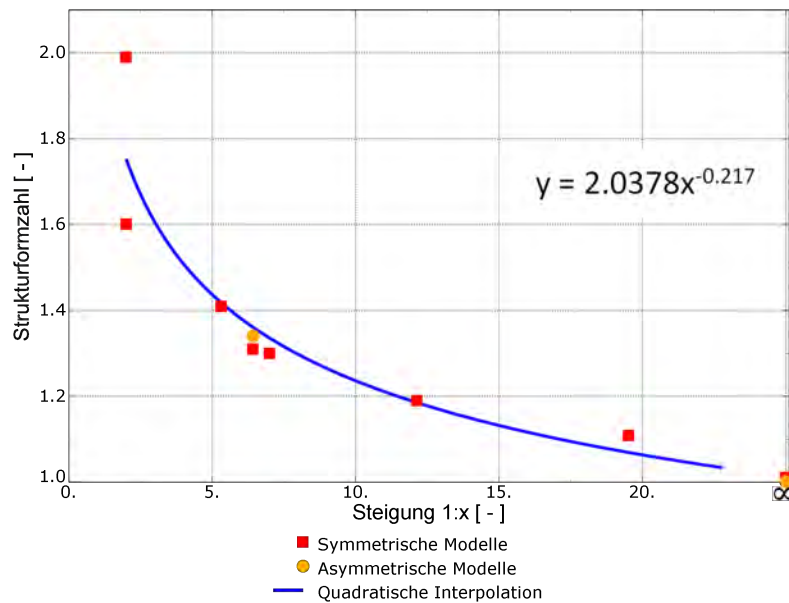


**Abbildung 3.84:** Steigung des Knotenbleches im Übergangsbereich mit dem Hänger

Über die berechnete Steigung alle Modelle wurde die Strukturformzahl aufgetragen. Die Abbildungen 3.85 und 3.86 zeigen die Korrelation. Der Ausrundungsradius wurde mit  $R=5$  mm bei allen Modellen konstant gehalten. Ausgenommen davon sind die zwei Modelle mit einer Steigung von 1 : 2. Hier wurden Ausrundungsradien mit 3 mm und 10 mm gewählt. Wird der Außenradius des Knotenbleches hinreichend klein gewählt, so erfolgt der Übergang auf den Hängerquerschnitt tangential. Dadurch ist kein Knick vorhanden und die Steigung geht gegen unendlich. Dadurch ergibt sich im symmetrischen Fall eine Strukturformzahl von 1,0.



**Abbildung 3.85:** Strukturformzahl in Abhängigkeit von der Steigung des Knotenbleches unter Normalkraft



**Abbildung 3.86:** Strukturformzahl in Abhängigkeit von der Steigung des Knotenbleches unter Moment  $M_z$

### Vergleich der Momentenbelastung um beide Achsen

Unter Momentenbelastung ergeben sich um beide Achsen ähnliche Werte für die Strukturformzahl. Die Abweichungen der Strukturformzahlen wurden nach der Formel 3.14 berechnet.

$$\left(1 - \frac{\text{Strukturformzahl}_{M_z}}{\text{Strukturformzahl}_{M_x}}\right) * 100 = \text{Differenz} [\%] \quad (3.14)$$

Ein negativer Wert bedeutet also, dass die Strukturformzahl für  $M_z$  größer als die Strukturformzahl für  $M_x$  ist. Für den Vergleich wurden die Modelle aus der Parameteruntersuchung für den Ausrundungsradius und den Außenradius des Knotenbleches herangezogen.

In Abbildung 3.87 erkennt man, dass die Differenzen in der Regel unter 4% liegen. Die Geometrie hat demnach bei Momentenwirkungen um beide Achsen einen etwa gleich großen Einfluss.

Bei komplizierteren Geometrien ist der Zusammenhang weniger stark gegeben. So weichen bei der geänderten Knotenblechgeometrie nach Kapitel 3.3.2 die Strukturformzahlen bereits stärker voneinander ab.

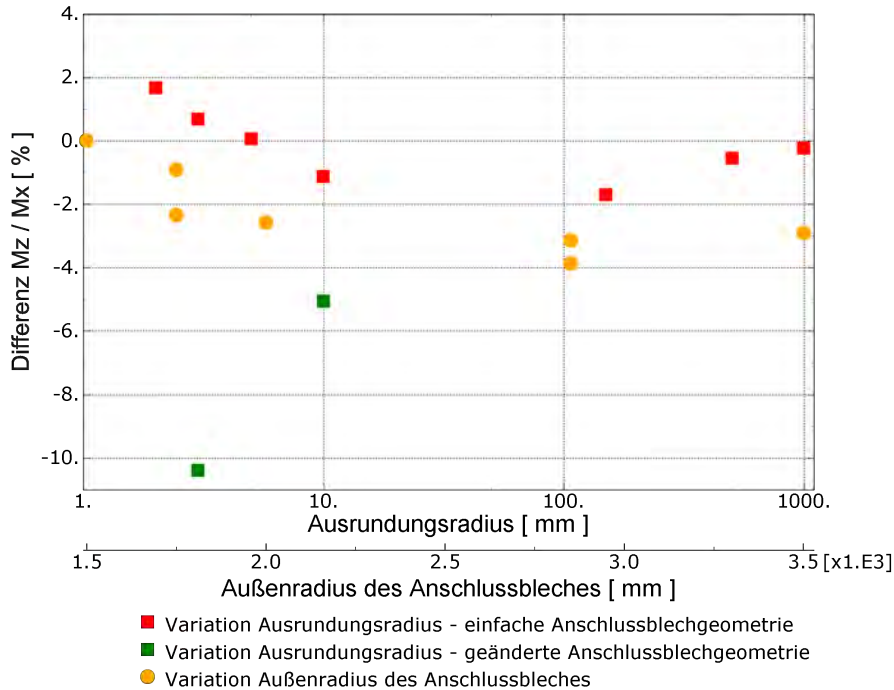


Abbildung 3.87: Prozentuelle Differenz der Strukturformzahlen von  $M_z$  und  $M_x$

### 3.4.2 Kritischer Bereich S2 - Freischnitt

Im Bereich des Freischnittes haben zwei geometrische Faktoren einen Einfluss auf die Strukturformzahl. Auf der einen Seite spielen die Parameter *Größe des Freischnittes* und die dazugehörige *Restbreite auf Höhe des Freischnittes* eine wesentliche Rolle. Andererseits ist der Außenradius des Knotenbleches als zweiter Faktor zu nennen.

#### Außenradius des Knotenbleches

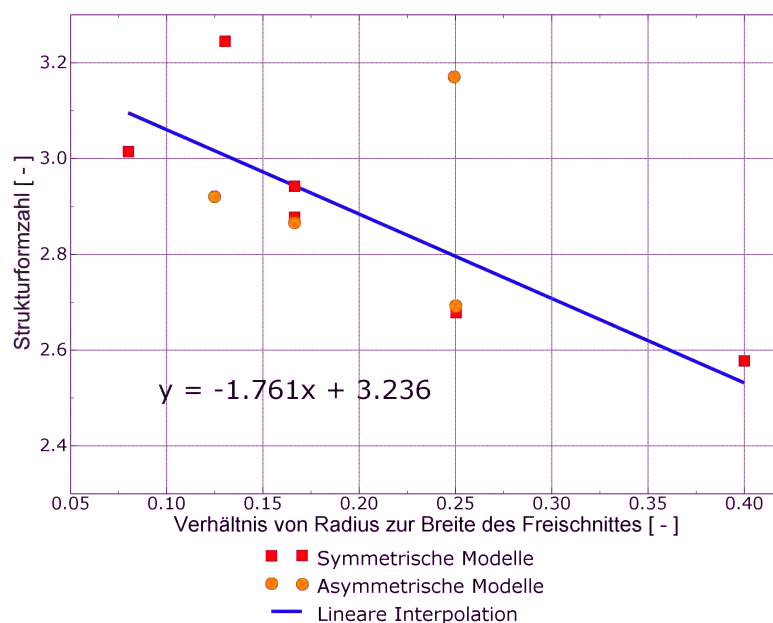
Bei einer Variation des Außenradius des Knotenbleches verändern sich die Strukturspannungen beim Freischnitt. Die in Kapitel 3.3.3 durchgeführte Parameterstudie zeigt, dass die Interpolationslinien eine lineare Steigung besitzen. Bei einer Belastung Normalkraft und Moment um die X-Achse ist die Steigung sehr gering, siehe Abbildung 3.59. Die Größenunterschiede der Strukturformzahlen bei verändertem Außenradius sind weniger als 4 %. Die unter der Belastung Moment um die Z-Achse auftretenden Spannungsspitzen, befinden sich in einem Winkel von  $45^\circ$  zur Horizontalen. Die Nennspannung für diesen Bereich wird auf Höhe des Freischnittes berechnet. Dadurch ergeben sich relativ geringe Nennspannungswerte, die zu sehr hohen Strukturformzahlen führen.

#### Verhältnis Radius zur Breite auf Höhe des Freischnittes

Wie in Kapitel 2.1 ersichtlich, beeinflusst die Wahl des Radius vom Freischnitt die anderen geometrischen Abmessungen des geschweißten Hängers und ist daher wesentlich für die Form des Knotenbleches verantwortlich. Die Größe des Radius des Freischnittes

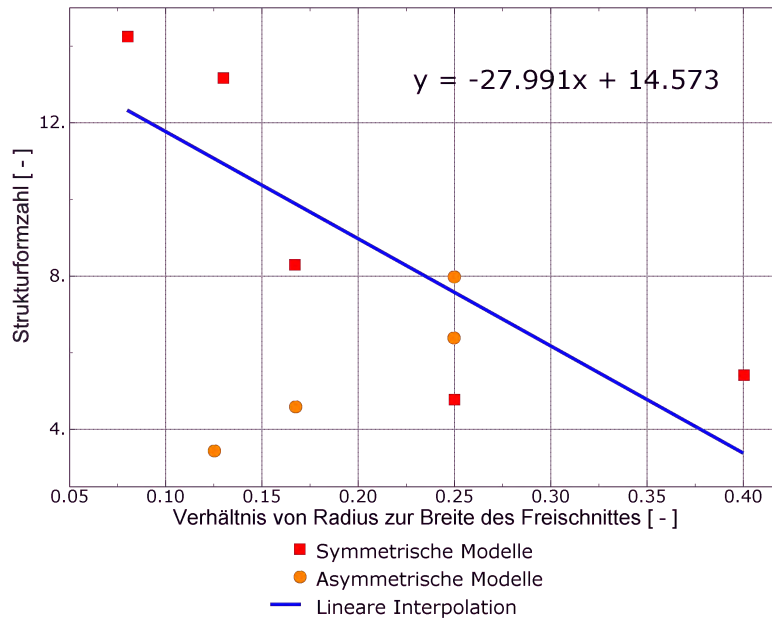
und die Restbreite auf Höhe des Freischnittes hängen unmittelbar zusammen. Um eine Aussage über die Strukturformzahlen in Abhängigkeit dieser zwei Parameter zu treffen, wurden die Radien zu deren Restbreite in Verhältnis gestellt, siehe Formel 3.15. Abbildung 3.88 zeigt diesen Zusammenhang unter Normalkraftbelastung. Hier erkennt man, dass je größer der Radius des Freischnittes ist, die Strukturformzahl kleiner wird. Dabei ist zu beachten, dass wenn der Radius größer wird, die dazugehörige Restbreite auf Höhe des Freischnittes kleiner wird. Auffallend dabei ist, dass die Strukturformzahlen sich um den Wert 3,0 befinden, welcher der Strukturformzahl von einer unendlich langen Scheibe mit Loch unter Zugkraft entspricht.

$$\frac{\text{Radius des Freischnittes}}{\text{Breite auf Höhe des Freischnittes}} \quad (3.15)$$

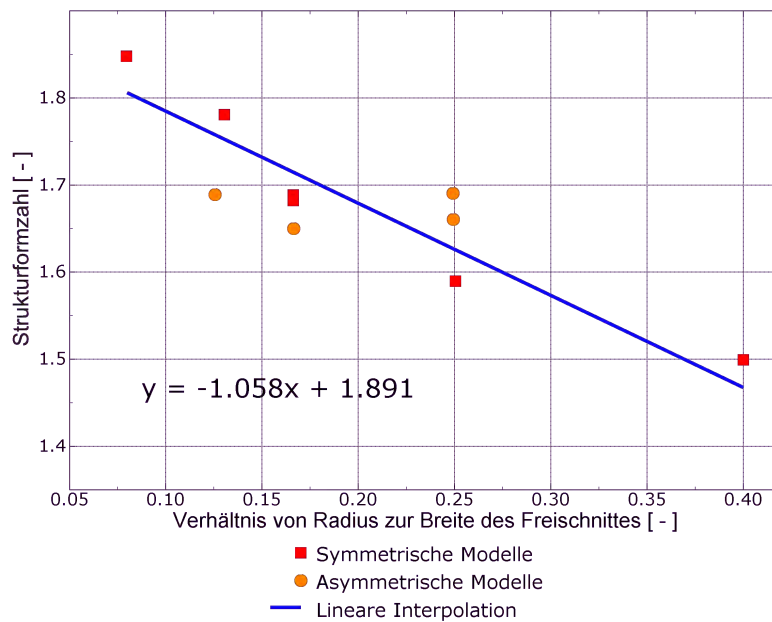


**Abbildung 3.88:** Strukturspannung in Abhängigkeit vom Verhältnis Radius zur Restbreite des Freischnittes unter Normalkraft

In den Abbildungen 3.89 und 3.90 sind die Strukturformzahlen unter der Belastung Moment um die Z- und X-Achse dargestellt. Wie in Abbildungen 3.89 ersichtlich, sind die Werte fast um das dreifache größer als bei Normalkraftbelastung. Dies resultiert aus der Wahl der Nennspannungsberechnung. Weiters erkennt man, dass die Strukturformzahlen bei asymmetrischen Modellen sehr stark abweichen. Unter der Momentenbelastung um die X-Achse ergeben sich halb so große Strukturspannungen wie unter einer Normalkraftbelastung. Auffallend ist, dass die Steigung sehr gering ist.



**Abbildung 3.89:** Strukturspannung in Abhängigkeit vom Verhältnis Radius zur Restbreite des Freischnittes unter Moment  $M_z$



**Abbildung 3.90:** Strukturspannung in Abhängigkeit vom Verhältnis Radius zur Restbreite des Freischnittes unter Moment  $M_x$

## Geschweißter Hängeranschluss

Beim geschweißten Hängeranschluss wird der Rundstahlhänger an ein Knotenblech angeschweißt, welches wiederum mittels einer Schweißnaht mit der Brückenkonstruktion verbunden wird. Hierbei ist es vor allem wichtig, dass es einen kontinuierlichen Spannungsverlauf gibt. Anhand von Erfahrungswerten wurde die geschweißte Hängeranschlusskonstruktion stets weiterentwickelt (Siehe Kapitel 1). Der in diesem Kapitel modellierte Anschluss entspricht dem aktuellen Stand der Technik.

### 4.1 Modellierung in Abaqus FEA

Gegenstand dieses Kapitels ist die Anschlusskonstruktion von einem Rundstahlhänger an ein Knotenblech. Die Verbindung dieser beiden Stahlteile erfolgt mittels zweier Schweißnähte längs des Hängers.

Im Vergleich zur Hängeranschlussgeometrie, wie sie in der Realität auftritt, wurden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Die Schweißnähte werden vereinfacht modelliert.
- Die Modellierung erfolgt nach Planmaßen.
- Herstellungstoleranzen bleiben unberücksichtigt.
- Montageungenauigkeiten werden nicht berücksichtigt.
- Blechunebenheiten bleiben unbeachtet.

Durch das Nichtbeachten von Herstellungstoleranzen und Montageungenauigkeiten entsteht ein ideales, doppelt symmetrisches Modell. Dadurch war es möglich, in Abaqus FEA nur die halbe Hängeranschlusskonstruktion zu modellieren.

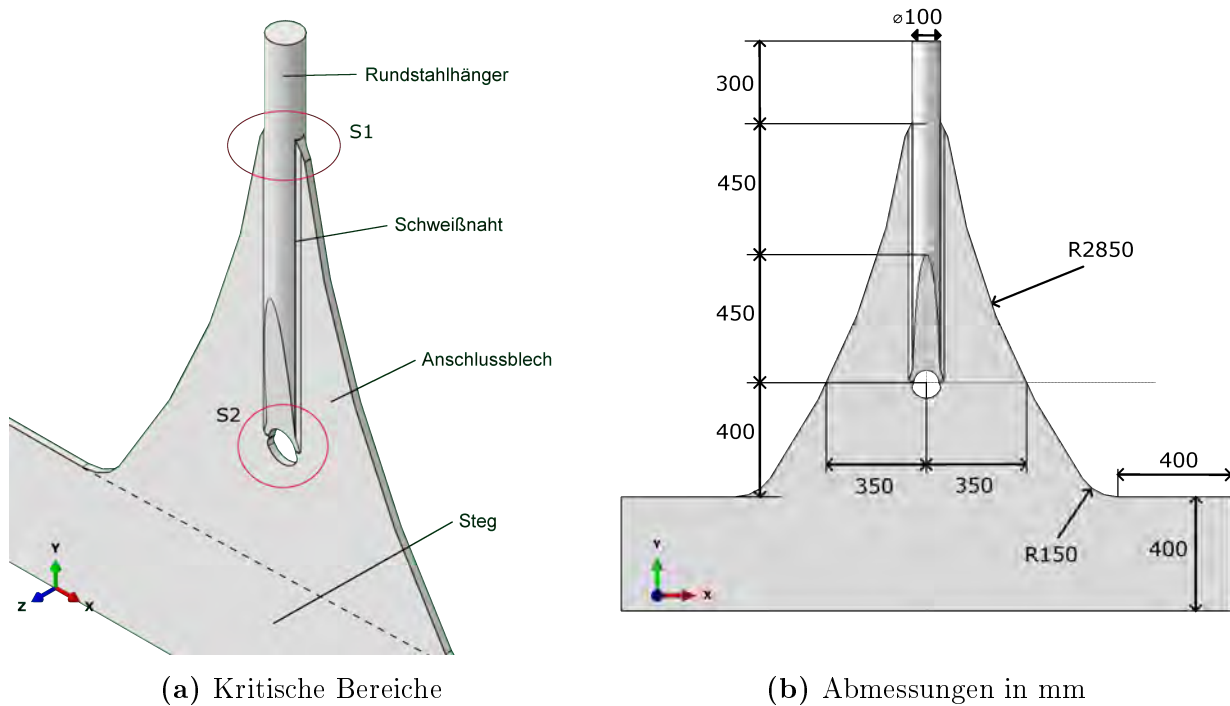
#### 4.1.1 Geometrische Abmessungen

Bei der Modellierung wurde ähnlich wie in Kapitel 3 vorgegangen. Ein Knotenblech mit einer Dicke von 20 mm wurde entsprechend der Abbildung 4.1b modelliert. Der

Freischnitt hatte einen Radius von 54 mm. Der Rundstahlhänger wurde über eine Länge von 450 mm beidseitig zum Freischnitt hin abgeschrägt. Am abgeschrägten Ende befindet sich ein Freischnitt mit einem Radius von 45 mm. Als Hängerdurchmesser wurden 100 mm gewählt.

Als Lasteinleitungsbereich wurde der Rundstahlhänger um 300 mm über das Knotenblech hinaus verlängert. Außerdem wurde ein Teil des Steges mit einer Höhe von 400 mm modelliert. Die Schweißnaht zwischen Steg und Knotenblech wurde nicht dargestellt, da dies nicht Gegenstand der Untersuchung war.

Im Verbindungsbereich von Hänger und Knotenblech wurde eine vereinfachte Schweißnaht modelliert. Diese hatte einen konstanten Querschnitt in Y-Richtung und wurde lediglich in den Zonen S1 und S2 modifiziert.



**Abbildung 4.1:** Geometrie des geschweißten Hängeranschlusses

Die kritischen Bereiche befinden sich bei der geschweißten Hängeranschlusskonstruktion dort, wo das Knotenblech beginnt (S1) und in unmittelbarer Nähe zum Freischnitt (S2) (siehe Abbildung 4.1a). Hier ist mit den höchsten Spannungsspitzen zu rechnen und dementsprechend wurden diese Bereiche exakter modelliert.

Der Leitfaden zum DIN-Fachbericht 103 [2] gibt einige Hinweise, wie die Ausbildung der Anschlussdetails erfolgen sollte. Da dies als geregelter Stand der Technik gilt, wurde darauf bei der Modellierung in Abaqus FEA besondere Rücksicht genommen. Abbildung 3.47 zeigt die Anarbeitung im Bereich S1 und Abbildung 4.3 stellt das Detail im Bereich S2 dar.

Abbildung 4.2 zeigt das Anschlussdetail S1. In beiden Skizzen ist ein Teil des Rundstahlhängers in der linken Bildhälfte ersichtlich. Daran angeschlossen erkennt man die



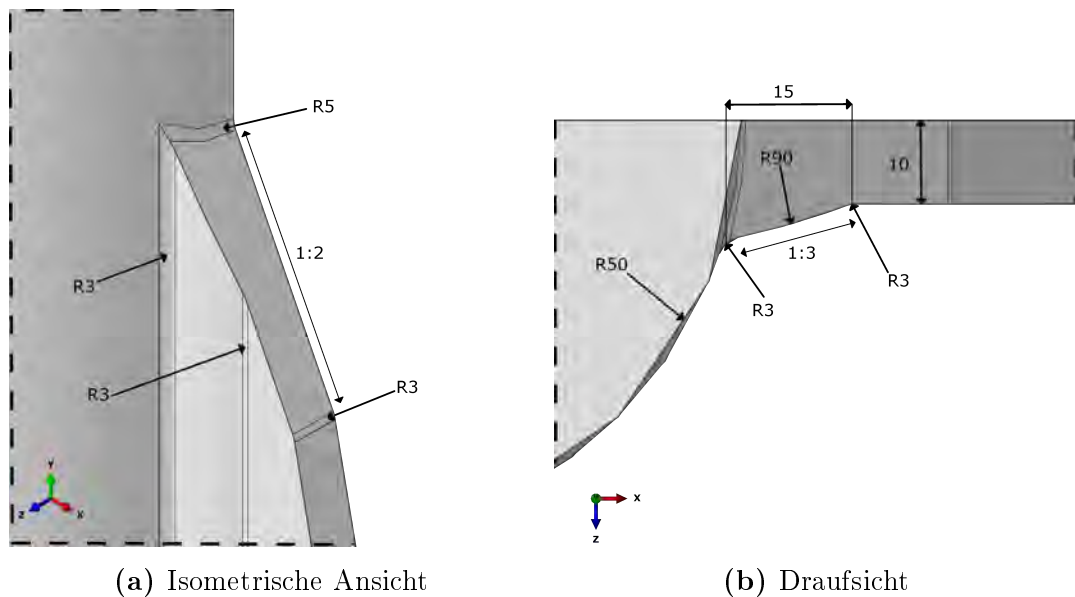


Abbildung 4.2: Detaillierte Modellierung im Bereich S1

Schweißnaht und die obere Spitze des Knotenbleches. Zu beachten ist, dass die Hängeranschlusskonstruktion in der X-Y Symmetrieebene geteilt wurde. Vereinfachend wurde nur eine Hälfte in Abaqus FEA modelliert. Das Knotenblech wurde zwischen Knotenblechbeginn und Freischnitt über die ganze Länge mit einer DHV-Naht mit dem Hänger verbunden. Die Form der Schweißnaht in der Modellbildung ist in Abbildung 4.2b ersichtlich. Die Naht verbreiterte sich mit einer Steigung von 1:3. Am Beginn und Ende der Steigung erfolgte eine Ausrundung mit einem Radius von 3 mm. Ein Ausrundungsradius von 90 mm sorgte für eine leichte Überhöhung der Schweißnaht. Im Bereich S1 wurde das Knotenblech mit einer Steigung von 1:2 abgeschrägt. Der Ausrundungsradius beim Übergang vom Knotenblech auf den Rundstahlhänger betrug 5 mm (siehe Abbildung 4.2a).

Die Ausrundungsradien wurden mit 3 mm und 5 mm klein gewählt, um konservative Ergebnisse zu erzielen. Ausrundungsradien kleiner als 3 mm wurden ausgeschlossen, da bei der Nachbearbeitung der Schweißnähte so kleine Radien nicht entstehen können.

Das Detail S2 im Bereich des Freischnittes zeigt Abbildung 4.4. In diesem Detail trifft der abgeschrägte untere Teil des Rundstahlhängers auf das Knotenblech. Zwischen Hänger und Knotenblech wurde eine DHV-Naht ausgeführt und danach beschliffen. Es ist zu beachten, dass der Rundstahlhänger mit einem Freischnitt  $R = 45 \text{ mm}$  ausgeführt wird, während im Knotenblech der Radius 54 mm beträgt. Dies resultiert aus montage-technischen Gründen. Um einen stetigen Spannungsverlauf zu ermöglichen, wird der Übergang von den beiden Freischnitten beschliffen. In der Modellbildung erfolgte dies durch einen Ausrundungsradius von 20 mm. Daran schloss eine Strecke mit einer Steigung von 1:2 an. Durch eine weitere Ausrundung mit einem Radius von 3 mm erfolgte der Übergang auf den kleineren Freischnitt (siehe Abbildung 4.4a). Das Ende des Hängers wurde mit einem Radius von 10 mm ausgerundet (siehe Abbildung 4.4b).

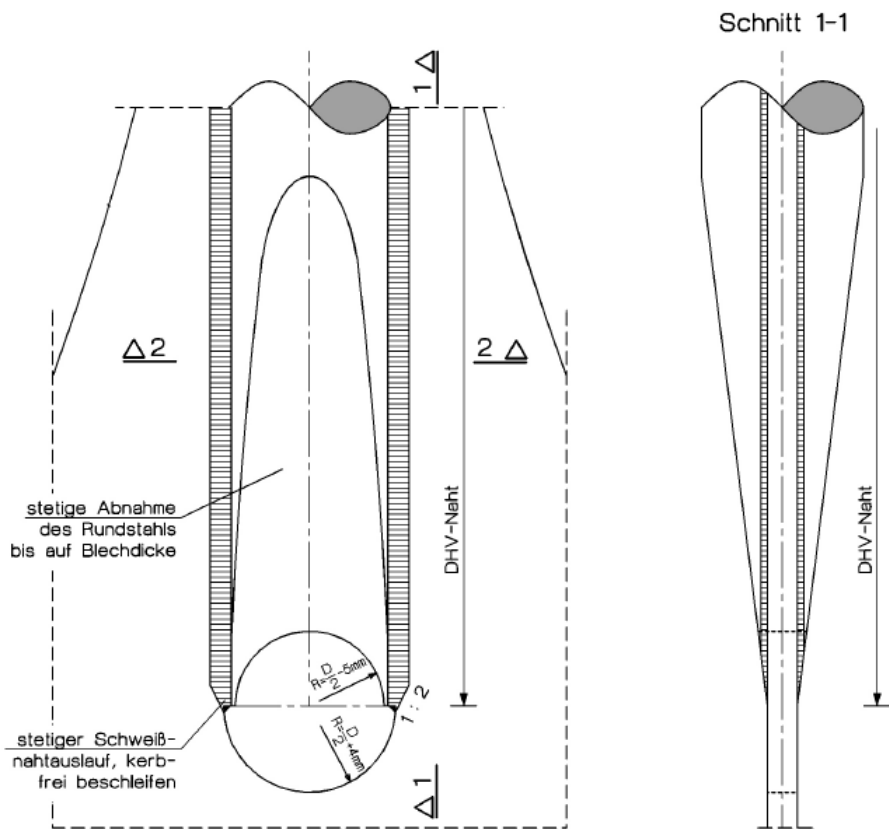
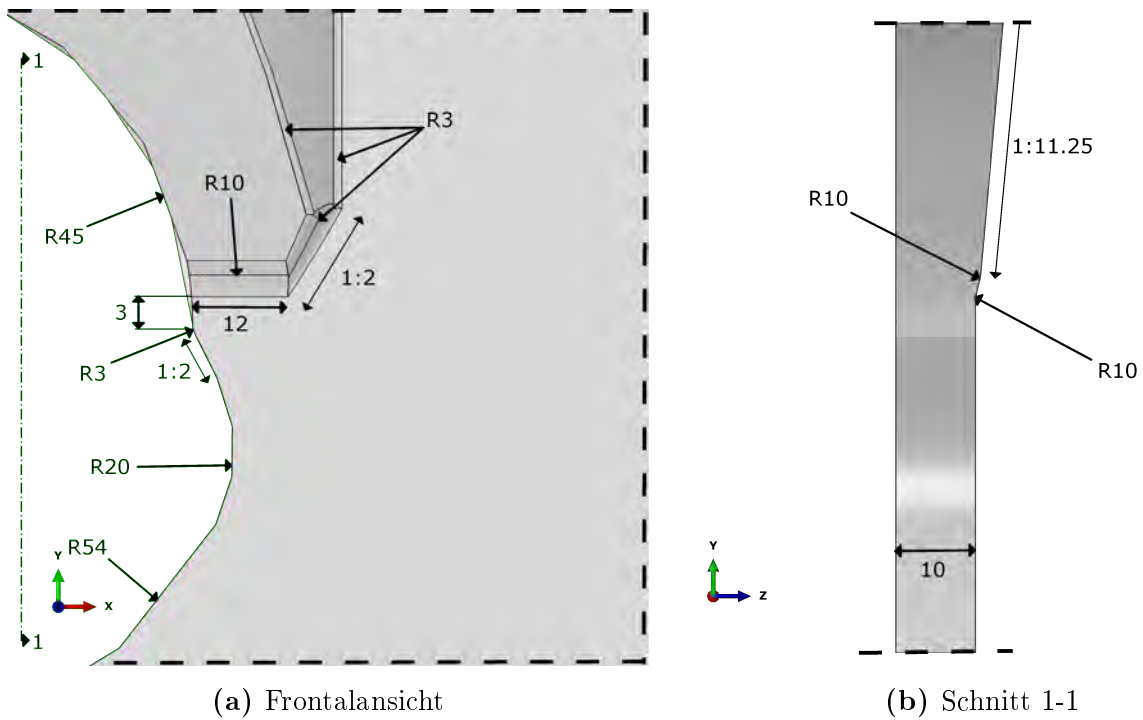


Abbildung 4.3: Anarbeitung von Knotenblech an Rundstahlhänger nach [2]



(a) Frontalansicht

(b) Schnitt 1-1

Abbildung 4.4: Detaillierte Modellierung im Bereich S2

### 4.1.2 Randbedingungen, Lasteinleitung

Das Knotenblech wurde an den unteren drei Flächen mit den Bezeichnungen 1, 2, 3 vollständig eingespannt (Gleichung 4.1). In Abbildung 4.5 sind die Randbedingungen dargestellt. Da nur eine Hälfte der Hängeranschlusskonstruktion modelliert wurde, war es notwendig in der Symmetrieebene (X-Y-Ebene, Fläche 4) zusätzliche Randbedingungen anzubringen. Unter Normalkraft und Moment um die Z-Achse handelte es sich um symmetrische Randbedingungen (Gleichung 4.2). Bei Momentenbeanspruchung um die X-Achse wurden antimetrische Randbedingungen angebracht (Gleichung 4.3).

$$UX = UY = UZ = RX = RY = RZ = 0 \quad (4.1)$$

$$UZ = RX = RY = 0 \quad (4.2)$$

$$UX = UY = RZ = 0 \quad (4.3)$$

Mit  $X, Y, Z$  ... Raumrichtungen  
 $U$  ... Verschiebung  
 $R$  ... Verdrehung

Die Hängerbeanspruchung wurde ähnlich zu Kapitel 3 gewählt. Die Lasteinleitung erfolgte im Regelquerschnitt des Hängers mithilfe von Flächenlasten (siehe Abbildung 4.6). Um eine Normalkraft von 1000 N zu erzeugen, wurde die Halbkreisfläche mit 500 N belastet. Beim Moment um die Z-Achse wurde jeweils ein Viertelkreis mit  $\pm 11.781$  N beansprucht. Dadurch ergab sich eine Momentenbelastung von 1000 Nmm. Ein Moment um die X-Achse mit 1000 Nmm wurde mit einer über den Halbkreis verteilten Flächenlast von 23.562 N erzeugt.

Spätestens nach einer Länge von 150 mm nach der Lasteinleitung stellte sich in allen Modellen ein linearer Spannungsverlauf ein. Dieser war ident mit dem Querschnittsverlauf nach klassischer Biegelehre nach Theorie erster Ordnung.

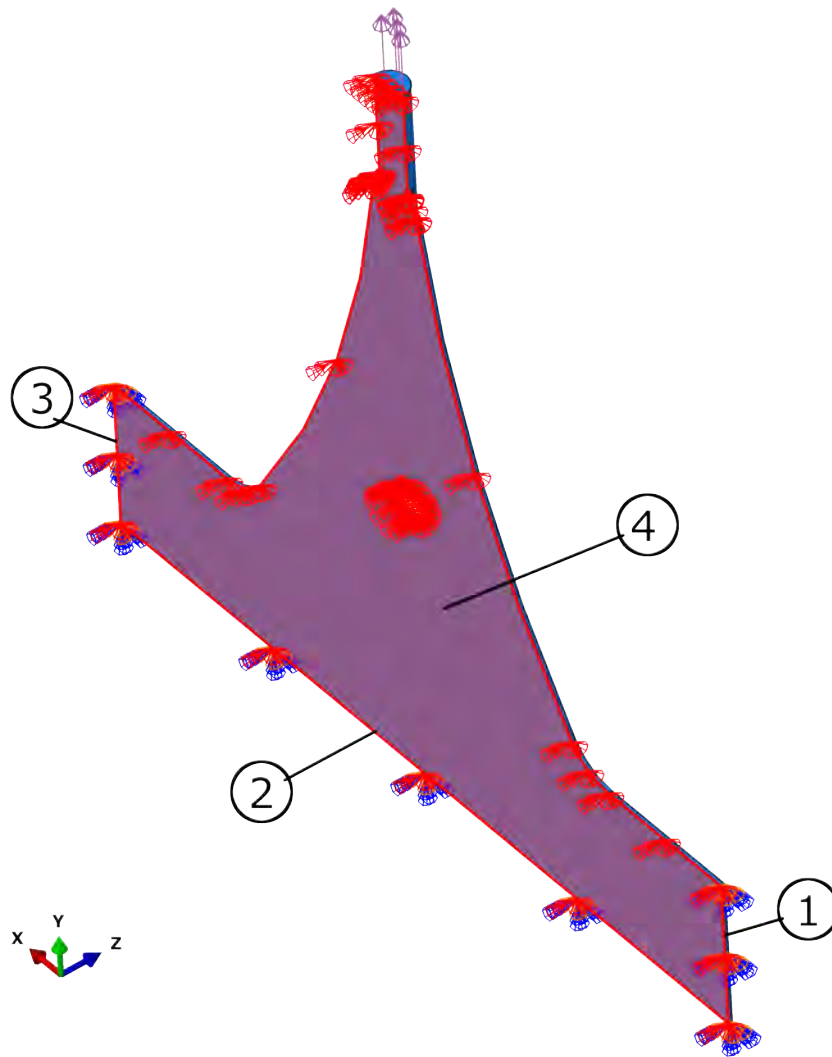
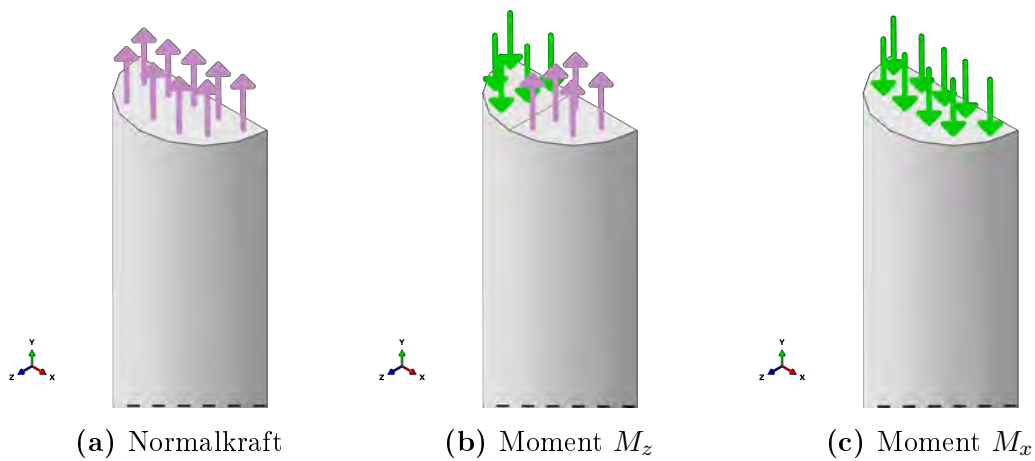


Abbildung 4.5: Auflagerbedingungen



(a) Normalkraft

(b) Moment  $M_z$ (c) Moment  $M_x$ 

Abbildung 4.6: Lasteinleitung mithilfe von Flächenlasten

### 4.1.3 Vernetzung

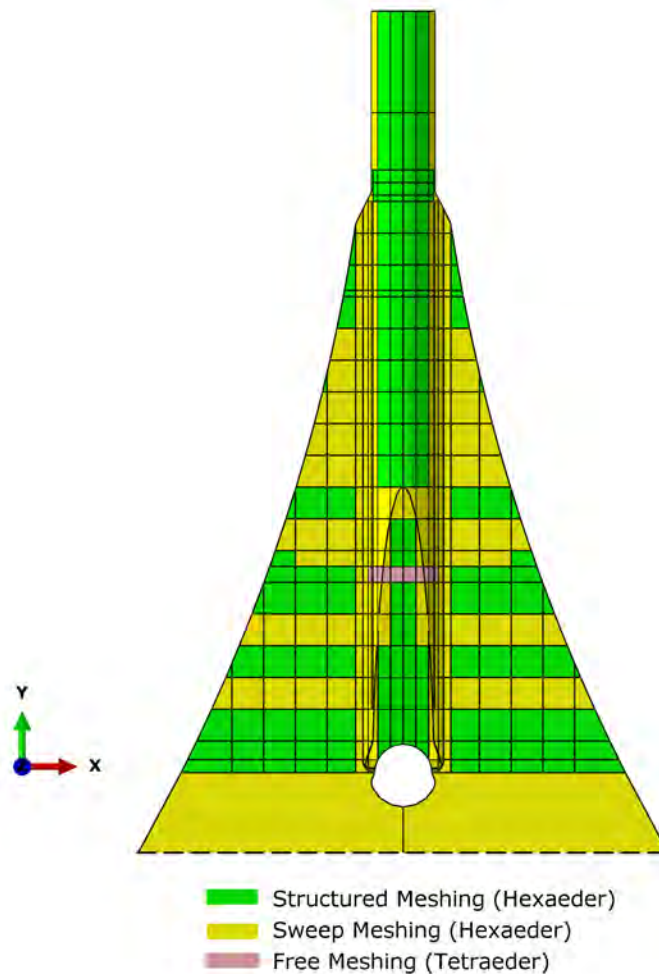
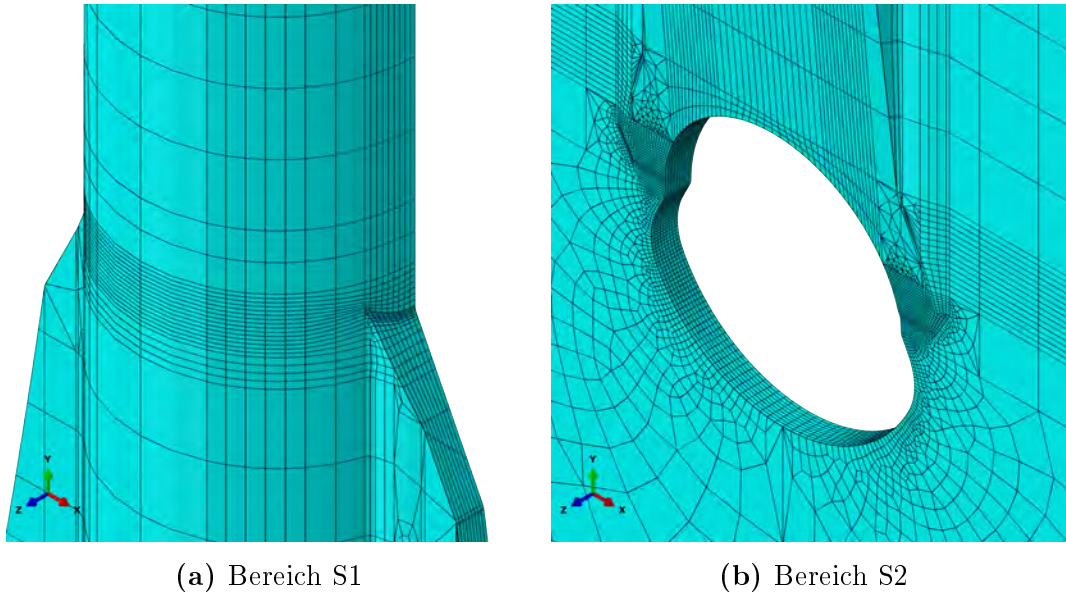


Abbildung 4.7: Verwendete Vernetzungsalgorithmen

Gerade in den kritischen Bereichen war es wichtig, ein entsprechend gutes Netz zu generieren. Die komplizierte Geometrie machte es notwendig, verschiedene Vernetzungstechniken zu verwenden. Dabei wurden mit einer Ausnahme die Kriterien nach Kapitel 3.2.5 eingehalten. Diese Ausnahme bildet der in rosa markierte Bereich in Abbildung 4.7. Hier wurden Tetraederelemente vom Typ *C3D10* verwendet. Da es sich hier jedoch um einen Abschnitt handelt, der weit von den kritischen Bereichen entfernt liegt, kann eine Verfälschung der Ergebnisse jener Bereiche ausgeschlossen werden. Um zu stark deformierte Elemente zu vermeiden, wurden weiters keilförmige Elemente (*wedges*) vom Typ *C3D15* in Kombination mit den Hexaederelementen vom Typ *C3D20R* zugelassen. Wie in Abbildung 4.7 ersichtlich, wurden für die restliche Hängeranschlusskonstruktion die Vernetzungsalgorithmen *Structured Meshing* und *Sweep Meshing* verwendet. Diese beiden Vernetzungstechniken unterscheiden sich nur minimal in der Netzgenerierung. Für genauere Ausführungen hierzu sei auf das Abaqus Handbuch [15] verwiesen.

Das fertig erstellte Netz hatte eine Elementlänge von 1 mm in den Bereichen S1



**Abbildung 4.8:** Netzverfeinerung in den kritischen Bereichen

und S2. In den davon entfernten Gebieten erhöhten sich die Elementabmessungen auf bis zu 25 mm (siehe Abbildung 4.8).

## 4.2 Ergebnisse

Abaqus FEA liefert die Möglichkeit, unterschiedliche Spannungshöhen in unterschiedlicher Farbe darzustellen. Mithilfe dieser Methode folgte eine erste Einschätzung der möglichen Bereiche, wo lokale Maximal- beziehungsweise Minimalspannungen auftreten. In den kritischen Gebieten wurden die Elemente in den Integrationspunkten ausgelesen, um so den maßgebenden Wert zu ermitteln. Zu beachten ist, dass die Farben in den folgenden Grafiken stets so gewählt wurden, dass ein möglichst hoher Kontrast vorhanden ist. Die gleichen Farben in zwei verschiedenen Bildern bedeuten demnach nicht, dass gleich hohe Spannungen vorliegen.

### 4.2.1 Berechnung der Nennspannungen

Die Spitzenspannungen in den kritischen Bereichen wurden den Nennspannungen gegenübergestellt, um so verschiedene Modelle besser vergleichbar zu machen. Es wurde die gleiche Vorgehensweise wie in Kapitel 3 verwendet, welche in Abschnitt 3.2.2 dargestellt ist.

Im Bereich S1 wurde die Nennspannung im Regelquerschnitt des Rundstahlhängers ermittelt. Die Schnittführung erfolgte in hinreichendem Abstand zum Beginn des Knotenbleches. Die Schnittführung ist in Abbildung 4.9a dargestellt. Hier konnten die Nennspannungen, wie in Gleichungen 4.4 bis 4.6 dargestellt, einfach ermittelt werden.

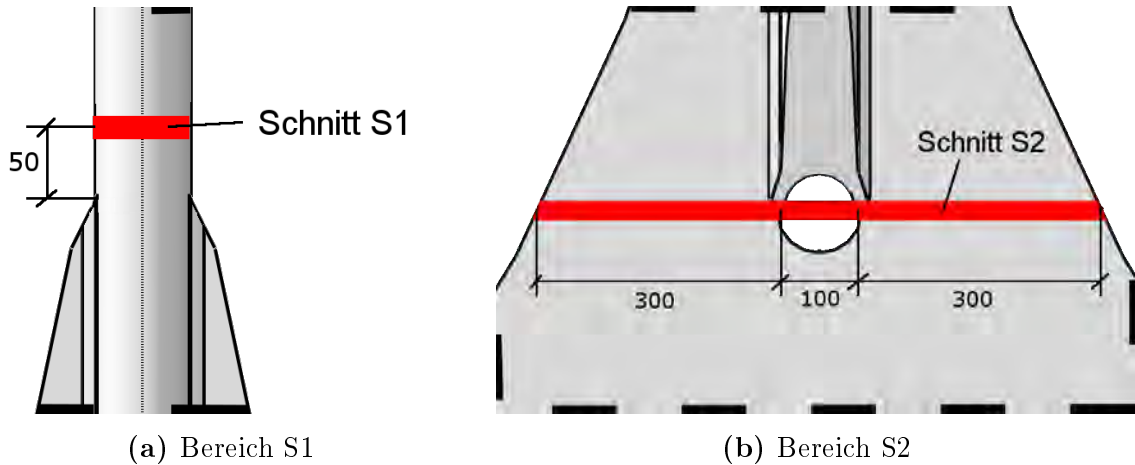


Abbildung 4.9: Schnittführungen zur Ermittlung der Nennspannungen

$$\sigma_{S1 \text{ Normalkraft}} = \frac{N}{A} = \frac{1000 \text{ N}}{7853.98 \text{ mm}^2} = 0.127 \text{ N/mm}^2 \quad (4.4)$$

$$\sigma_{S1 \text{ MomentZ}} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{1000 \text{ Nmm}}{98174.77 \text{ mm}^3} = 0.010 \text{ N/mm}^2 \quad (4.5)$$

$$\sigma_{S1 \text{ MomentX}} = \frac{M_x}{W_x} = \frac{1000 \text{ Nmm}}{98174.77 \text{ mm}^3} = 0.010 \text{ N/mm}^2 \quad (4.6)$$

Die Schnittführung für die Nennspannung im Bereich S2 erfolgte horizontal (siehe Abbildung 4.9b). Der horizontale Schnitt verläuft durch den Kreismittelpunkt, der den Freischnitt bildet. Die genaue Modellierung des Freischnittes wurde dabei nicht berücksichtigt. Es erfolgte eine Abschätzung des Durchmessers des Freischnittes mit 100 mm. Damit ergab sich in Summe eine Restbreite auf Höhe des Freischnitts von 600 mm. Die Gleichungen 4.7 bis 4.9 zeigen, wie die Nennspannungen berechnet wurden. Bei der Ermittlung von  $\sigma_{S2 \text{ MomentZ}}$  ist zu beachten, dass der maßgebende Punkt im Schnitt S2 direkt beim Freischnitt liegt und nicht am Rand des Knotenbleches.

$$\sigma_{S2 \text{ Normalkraft}} = \frac{N}{A} = \frac{1000 \text{ N}}{12000 \text{ mm}^2} = 0.083 \text{ N/mm}^2 \quad (4.7)$$

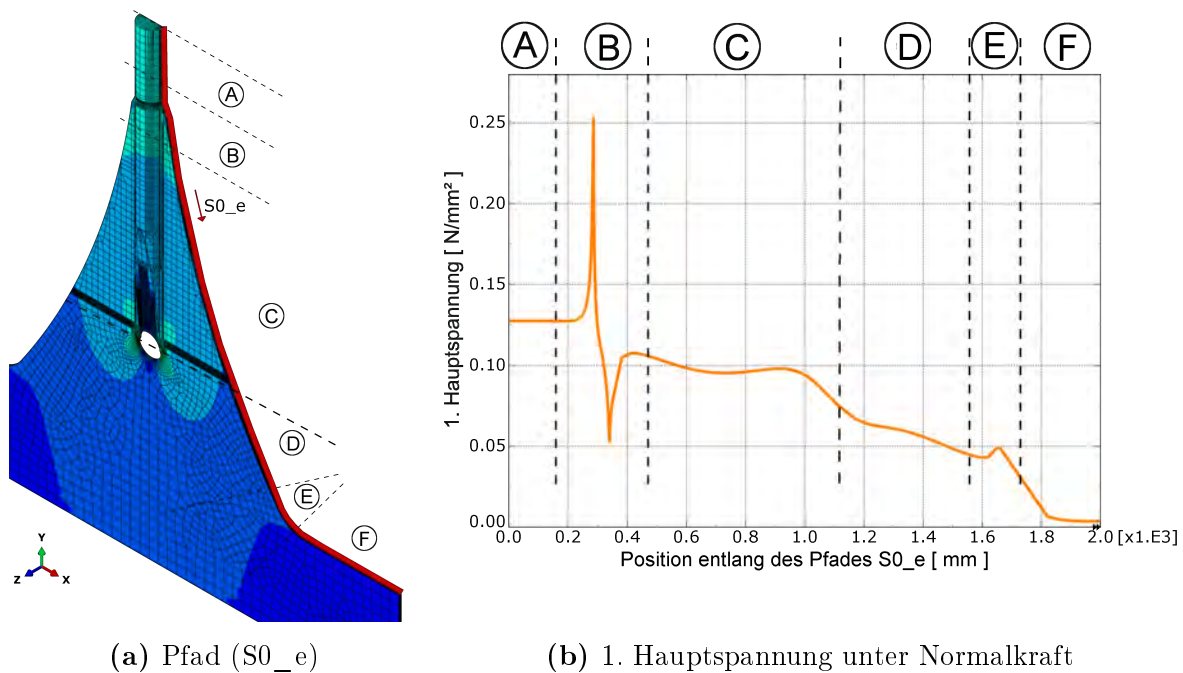
$$\sigma_{S2 \text{ MomentZ}} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{1000 \text{ Nmm}}{1.14 * 10^7 \text{ mm}^3} = 8.77 * 10^{-5} \text{ N/mm}^2 \quad (4.8)$$

$$\sigma_{S2 \text{ MomentX}} = \frac{M_x}{W_x} = \frac{1000 \text{ Nmm}}{40000 \text{ mm}^3} = 0.025 \text{ N/mm}^2 \quad (4.9)$$

### 4.2.2 Spannungsverläufe am Gesamtmodell

Die Darstellung der Spannungsverläufe fand entlang charakteristischer Pfade statt. Dazu wurden die Werte der 1. Hauptspannung der einzelnen Elemente entlang eines Pfades ausgewertet und in einem Diagramm dargestellt. Abhängig von der Belastung sind unterschiedliche Bereiche maßgebend. Alle Pfade liegen auf der Modelloberfläche,

da die Spannungen im Inneren des Bauteils hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit einen geringeren Einfluss haben.



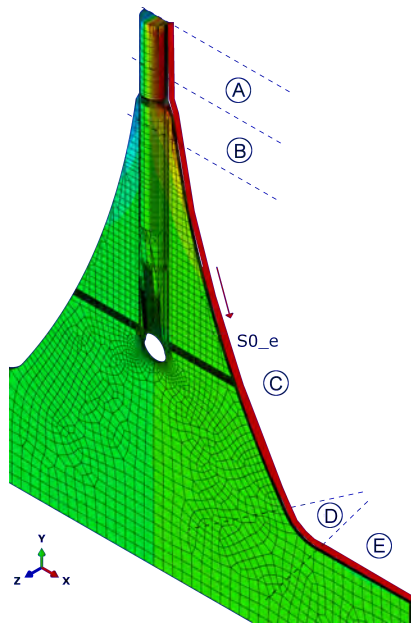
**Abbildung 4.10:** Spannungsverlauf entlang einer Modellkante

In Abbildung 4.10 ist der Spannungsverlauf unter Normalkraftbelastung über das gesamte Modell dargestellt. Der Pfad S0\_e verläuft seitlich entlang des Hängers und geht im Bereich S1 in das Knotenblech über. Somit ist die Spannungsspitze beim Beginn des Knotenbleches im Bereich B deutlich zu erkennen. Danach bleibt die Spannung relativ konstant, da in diesem Bereich C zwar die Knotenblechbreite zunimmt, gleichzeitig jedoch der Hängerquerschnitt abnimmt. Erst nach dem Freischnitt (Bereich D) kommt es zu einem Spannungsabfall, der sich beim Übergang auf das Stegblech (Bereich E) noch einmal kurz erhöht.

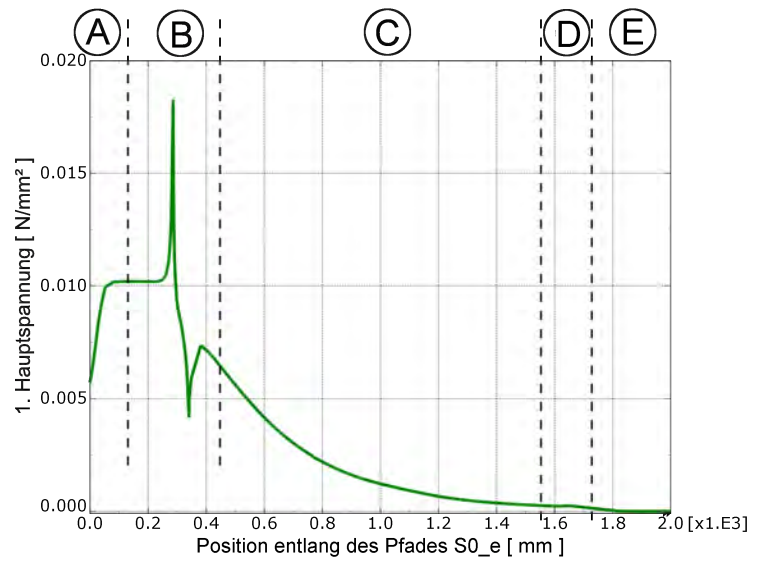
Über den gleichen Pfad wurden die Spannungen bei Momentenbelastung um die Z-Achse ausgewertet. In Abbildung 4.11 zeigt sich, dass sich die Nennspannung erst nach einem längeren Lasteinleitungsbereich einstellt. Danach kommt es zu einer Spannungsspitze im Bereich B. Nun fällt die Spannung ab, da sich das Knotenblech in X-Richtung erweitert. Die Abnahme des Hängerquerschnittes tritt in einem Bereich auf, der keinen großen Einfluss auf die Spannungen hat.

Beim Moment um die X-Achse wurde der Pfad S0\_f ausgewertet, da die Maximalspannungen an anderen Stellen auftreten. Wie Abbildung 4.12 zeigt, kommt es nach dem Lasteinleitungsbereich A zu einem relativ konstanten Spannungsverlauf. Der Beginn des Knotenbleches beeinflusst die Spannungsverteilung kaum (Bereich B). Erst im Bereich D, wo der Hänger abgeschrägt wird, erhöhen sich die Spannungen. Maximalwerte werden in unmittelbarer Nähe zum Freischnitt erreicht. Hier kommt es auch zu großen Spannungssprüngen. Der Pfad S0\_f liegt im Druckbereich des Hängers. Deshalb treten ausschließlich negative Spannungen auf.



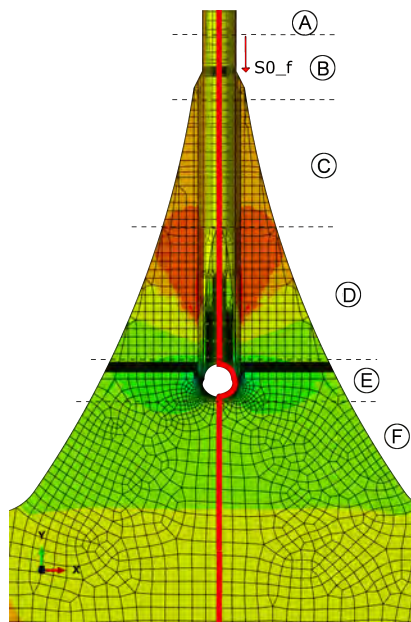


(a) Pfad (S0\_e)

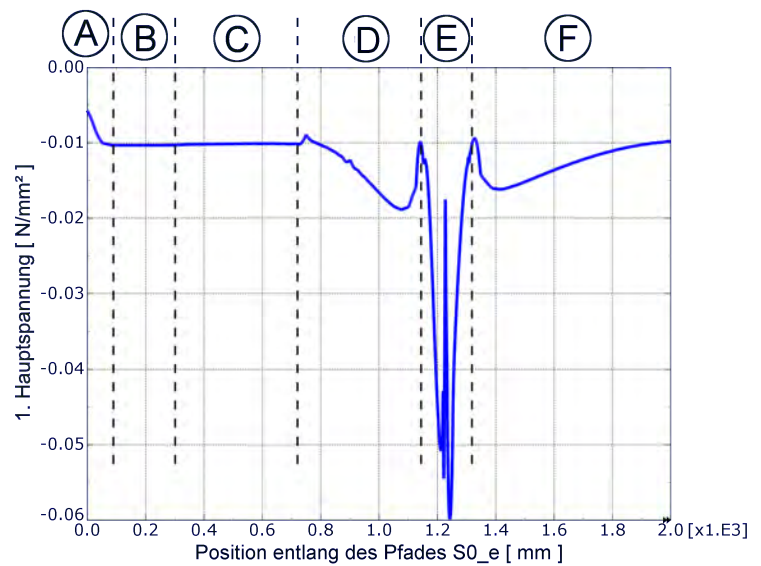


(b) 1. Hauptspannung unter Moment  $M_z$

Abbildung 4.11: Spannungsverlauf entlang einer Modellkante ( $M_z$ )



(a) Pfad (S0\_f)

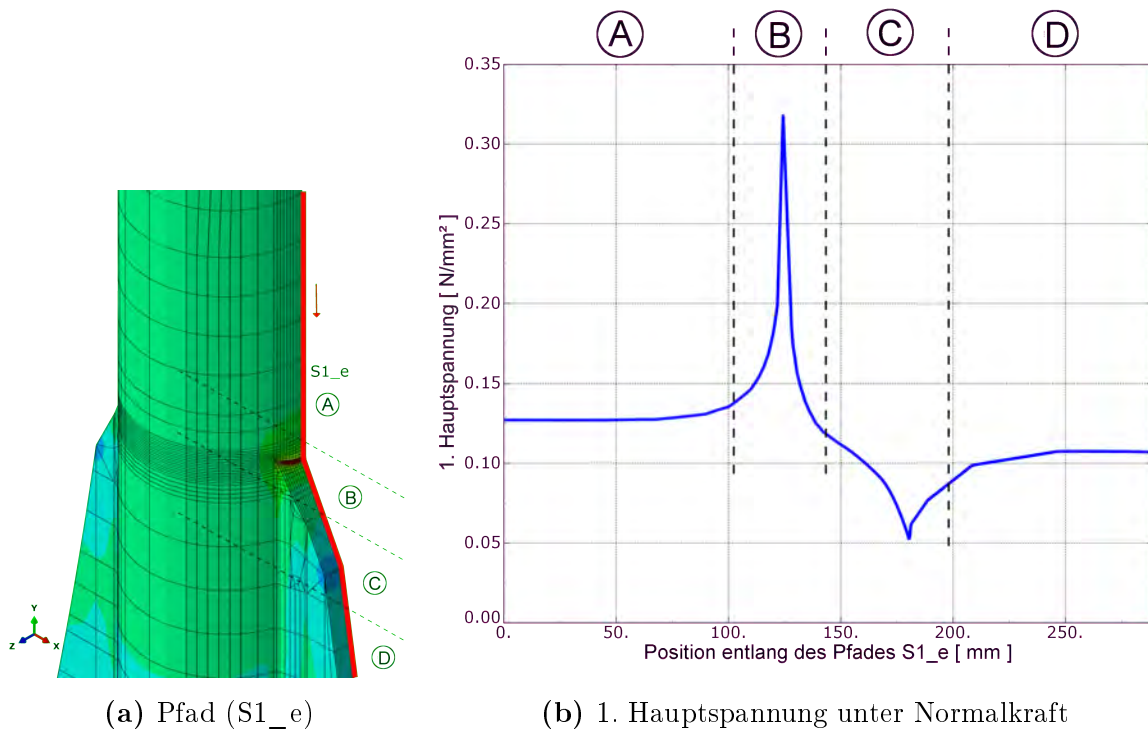


(b) 1. Hauptspannung unter Moment  $M_x$

Abbildung 4.12: Spannungsverlauf entlang einer Modellkante ( $M_x$ )

### 4.2.3 Normalkraft

Die Spannungsverläufe über die gesamte Hängeranschlusskonstruktion geben einen guten Hinweis darauf, welche Abschnitte des Hängers genauer zu untersuchen sind. Es zeigt sich, dass vor allem die Zonen S1 und S2 maßgebende Werte liefern.



**Abbildung 4.13:** Spannungsverlauf im Bereich S1

Die Normalkraftbelastung führt im Bereich S1 zu einem Spannungsverlauf wie er in Abbildung 4.13 dargestellt ist. Die 1. Hauptspannung erhöht sich im Bereich des Überganges stark und fällt bei der zweiten Kante ab. Die Erhöhung beträgt das 2,5-fache der Nennspannung.

Beim Freischnitt kommt es im Bereich A und E zu Druckspannungen. Dazwischen führt die Beanspruchung zu Zugspannungen. Ein erstes Maximum tritt noch im ausgerundeten Bereich B des Hängers auf. Direkt beim Übergang vom Hänger auf das Knotenblech fällt die Spannung etwas ab. Dieser Spannungsabfall entsteht durch die Kante, die in den Freischnitt hineinragt (Bereich C). Danach vergrößert sich der Freischnitt nochmals und es kommt zur Maximalspannung. Die Erhöhung im Vergleich zur Nennspannung beträgt das 4,4-fache.

In Tabelle 4.1 sind die Strukturformzahlen für den Bereich S1 und S2 ersichtlich. Auffällig ist, dass nicht nur die Strukturformzahl sondern auch die Strukturspannung im Bereich S2 größer ist als im Bereich S1.

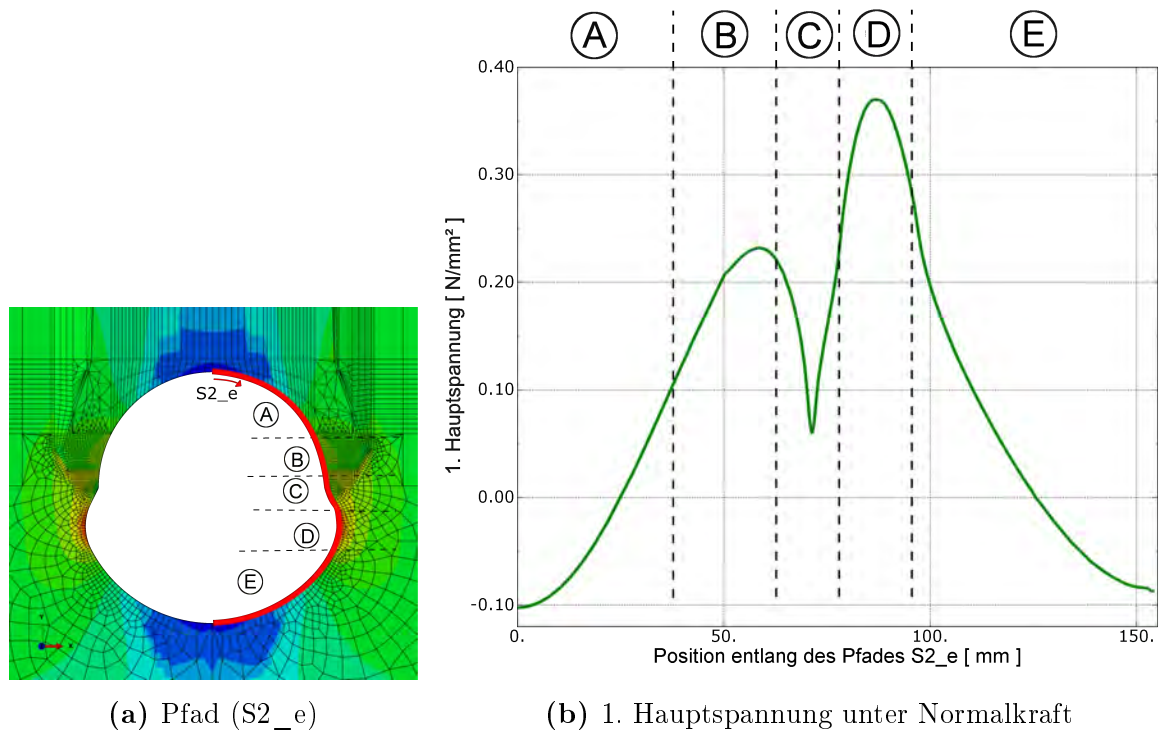


Abbildung 4.14: Spannungsverlauf im Bereich S2

Tabelle 4.1: Spannungen und Strukturformzahl unter Normalkraft

		Bereich S1	Bereich S2
Nennspannung	$[N/mm^2]$	0.13	0.08
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	0.32	0.37
Strukturformzahl	$[-]$	2.50	4.44

#### 4.2.4 Moment um die Z-Achse

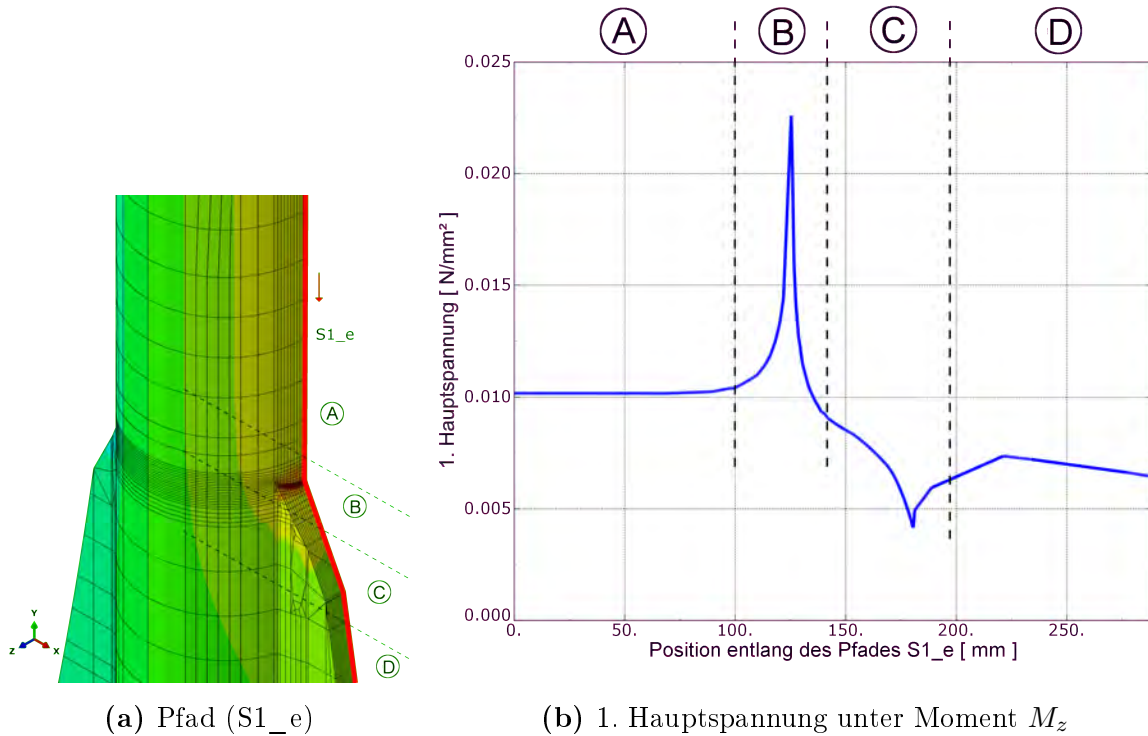


Abbildung 4.15: Spannungsverlauf im Bereich S1

Unter Momentenbelastung um die Z-Achse wurde der gleiche Pfad wie bei Normalkraftbelastung ausgewertet (siehe Abbildung 4.16). Im Bereich B des Überganges vom Hänger auf das Knotenblech kommt es zur Maximalspannung. Danach fällt die Spannung stark ab und erreicht ein lokales Minimum bei der Kante des Knotenbleches (Bereich C). Nach einer weiteren geringen Spannungserhöhung kommt es zu einer kontinuierlichen Spannungsabnahme.

Beim Bereich um den Freischnitt sind die Spannungen bei Momentenbelastung um die Z-Achse deutlich kleiner als im Bereich S1. Der Spannungsverlauf ist in Abbildung 4.16 dargestellt. Wie unter Normalkraftbelastung kommt es im Knotenblech unterhalb der Schweißnaht (Bereich C) zur maximalen Spannung. Im Bereich A kommt es zu einer Druckspannung.

Tabelle 4.2: Spannungen und Strukturformzahl bei Moment  $M_z$

		Bereich S1	Bereich S2
Nennspannung	$[N/mm^2]$	1.02E-02	8.77E-05
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	2.26E-02	6.24E-04
Strukturformzahl	$[-]$	2.22	7.11

Tabelle 4.2 stellt die Spannungen und Strukturformzahlen gegenüber. Hierbei ist zu beachten, dass im Bereich S2 die Nennspannung am Freischnitt verwendet wird (siehe

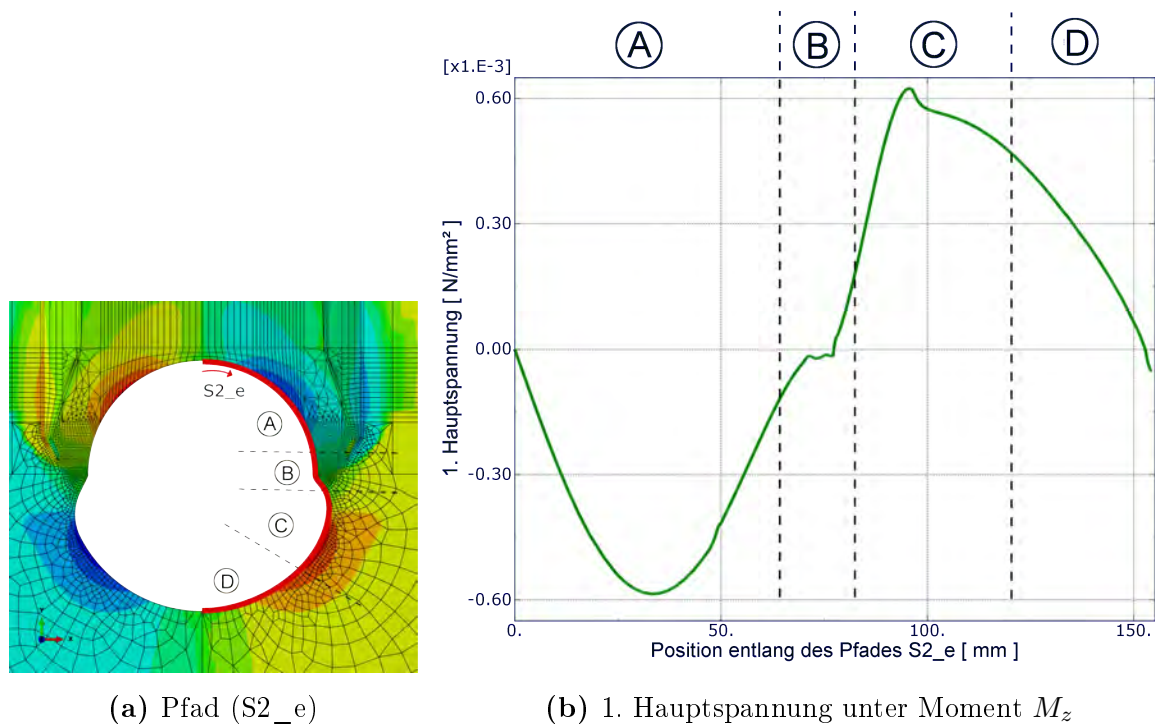


Abbildung 4.16: Spannungsverlauf im Bereich S2

Kapitel 4.2.1). Der Punkt für die Nennspannungsberechnung liegt am Rand des Freischnittes auf Höhe des Kreismittelpunktes. Dadurch ergibt sich für die Nennspannung ein relativ geringer Wert und infolgedessen eine hohe Strukturformzahl.

#### 4.2.5 Moment um die X-Achse

Die Momentenbelastung um die X-Achse erforderte die Wahl eines anderen Pfades, da in der mittleren Ebene (X-Y-Ebene) die Spannungen zu null werden (siehe Abbildung 4.17a). Im Bereich S1 treten die Maximalspannungen unter dieser Einwirkung im Regelquerschnittsbereich A auf. Der Schweißnahtbereich B führt lediglich zu einer geringen Spannungserhöhung, die deutlich unter der Nennspannung liegt. Die Nennspannung wird in dem Punkt mit der größten Z-Koordinate maximal.

Im Bereich S2 gibt es verschiedene geometrische Faktoren, die zu einem komplizierten Spannungsverlauf führen. Auf der Hängerseite mit positiver Z-Koordinate treten ausschließlich Druckspannungen auf. Diese sind am Beginn und am Ende des Pfades am geringsten (siehe Abbildung 4.18). Vor dem Übergang vom Hänger auf das Knotenblech nimmt die Spannung kontinuierlich zu, da sich die Dicke des Hängers verringert. Auf Höhe der Schweißnaht (Bereich B und C) kommt es zuerst zu einer Spannungsabnahme und direkt danach zu einem sprunghaften Spannungsanstieg. Das liegt an der Modellierung mit einer zweifachen Ausrundung nach Abbildung 4.4b. Das darauf folgende lokale Minimum (Bereich D) entsteht aufgrund der Kante, die auch schon bei Normalkraft- und Momentenbelastung um die Z-Achse zu Spannungsverringeringen geführt hat. Mit Vergrößerung des Freischnittes steigt die Spannung erneut an und

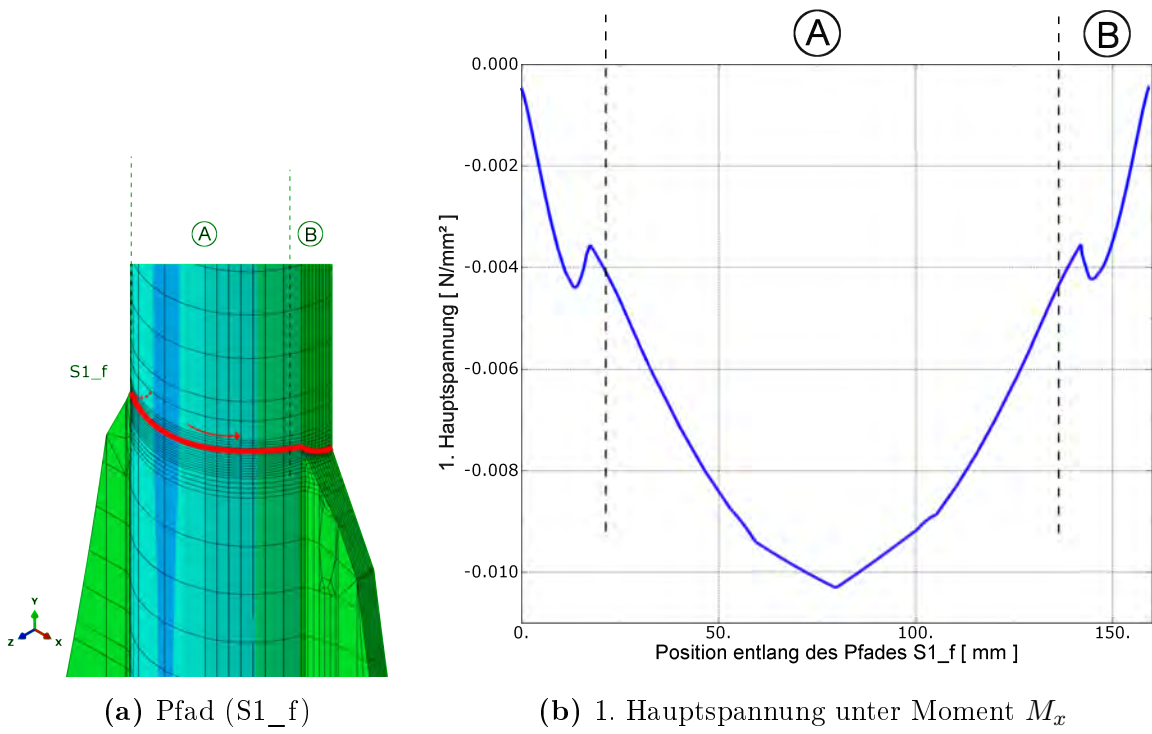


Abbildung 4.17: Spannungsverlauf im Bereich S1

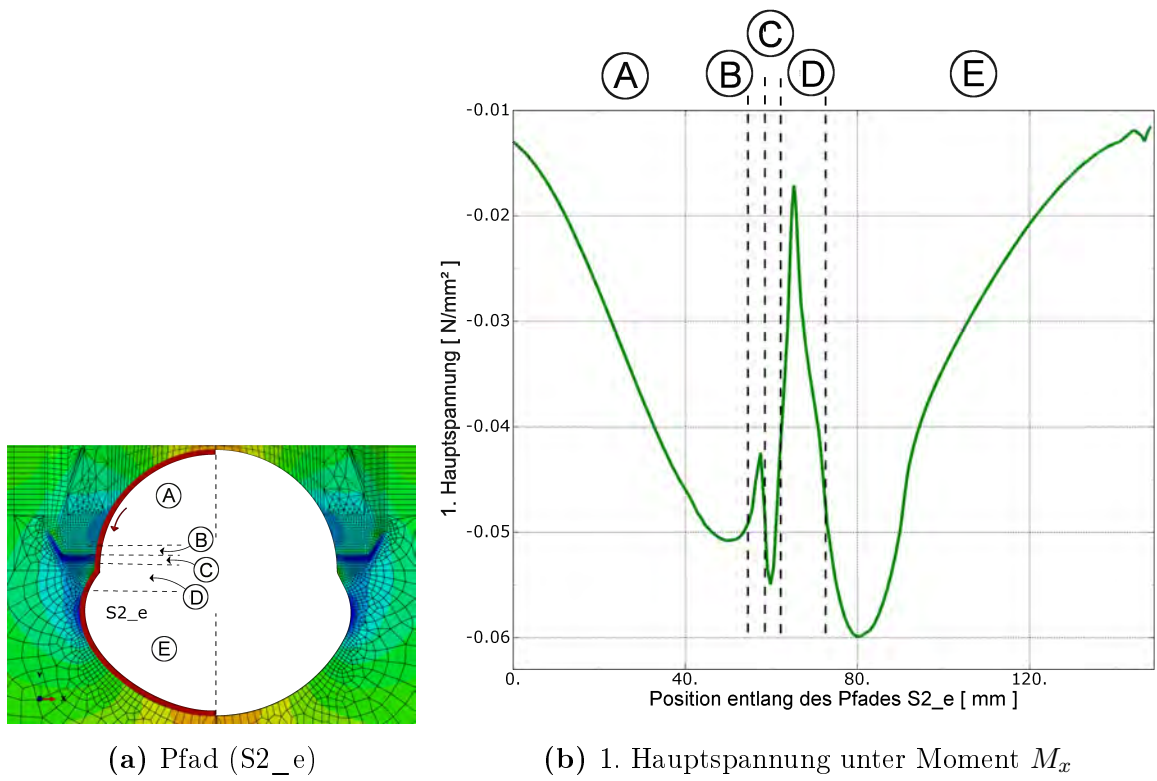


Abbildung 4.18: Spannungsverlauf im Bereich S2

erreicht im Bereich E mit dem Ausrundungsradius von 20 mm das globale Maximum.

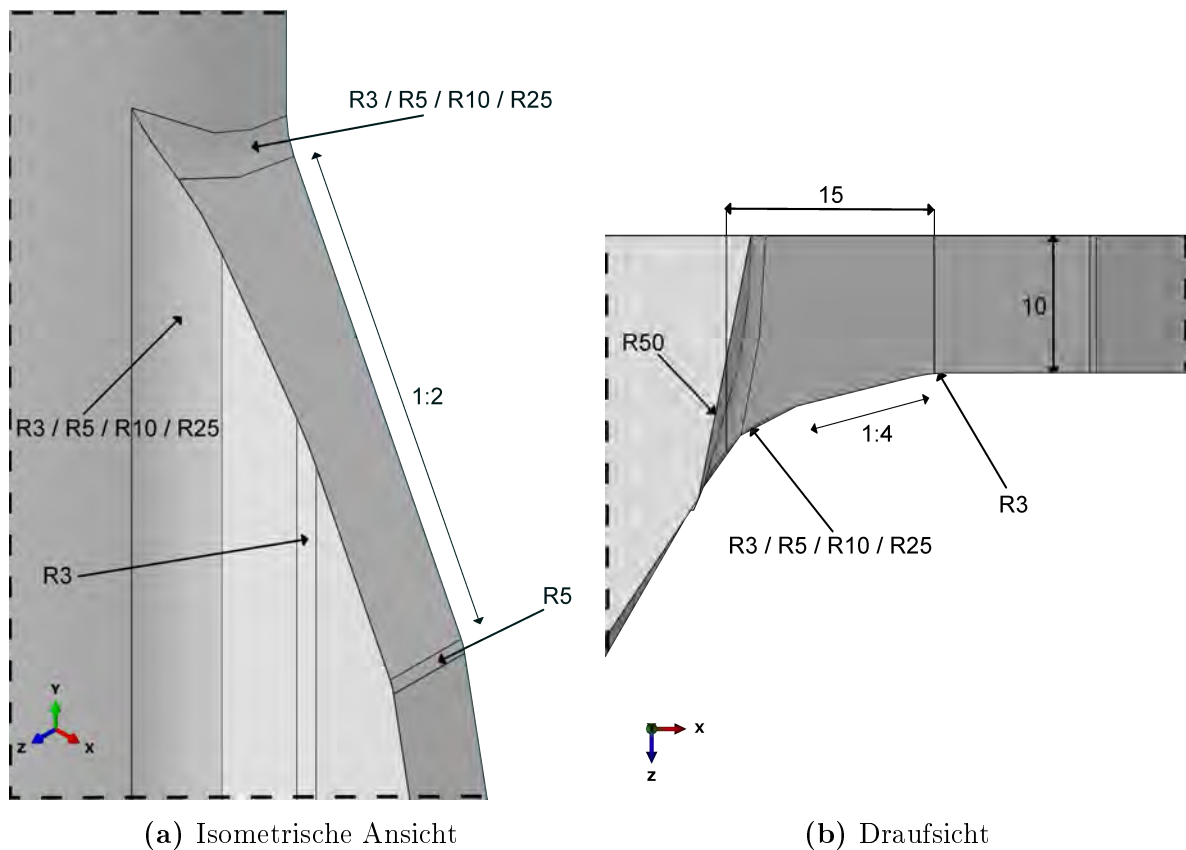
Hohe Spannungen treten unter  $M_x$  nicht nur direkt an der Kante des Freischnittes auf. Sie sind außerdem entlang der Schweißnaht zu erkennen. Diese sind jedoch niedriger als die Maximalspannung entlang des Pfades S2\_e.

**Tabelle 4.3:** Spannungen und Strukturformzahl bei Moment  $M_x$

		Bereich S1	Bereich S2
Nennspannung	$[N/mm^2]$	1.02E-02	2.50E-02
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	1.03E-02	5.99E-02
Strukturformzahl	$[-]$	1.01	2.40

In Tabelle 4.3 ist ersichtlich, dass die Strukturspannungen im Bereich S1 die maximale Nennspannung kaum überschreiten. Im Freischnittbereich erhöht sich die Strukturspannung auf das 2,4-fache.

### 4.3 Geometrische Parameteruntersuchung



**Abbildung 4.19:** Variation der Parameter im Bereich S1

Um den Einfluss der Geometrie auf die Strukturspannung zu untersuchen, wurden in einem nächsten Schritt einige Parameter verändert. Es handelte sich dabei um die

Ausrundungsradien im Bereich S1 und S2. Als Radien wurden 3, 5, 10 und 25 mm gewählt. In Abbildung 4.19 sind die Variationen angedeutet (R3/R5/R10/R25). Des Weiteren wurde der Querschnitt der Schweißnaht etwas vereinfacht. Die Querschnittsvergrößerung aufgrund der Schweißnaht erfolgte mit einer Steigung von 1:4 (siehe Abbildung 4.19b).

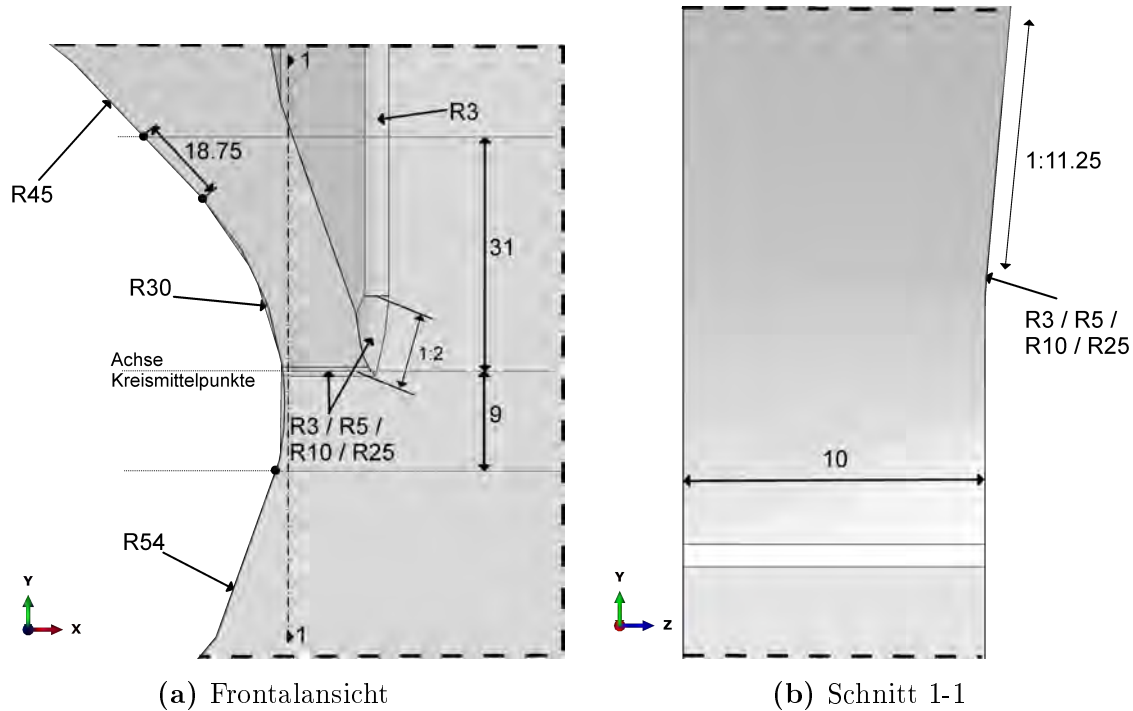


Abbildung 4.20: Variation der Parameter im Bereich S2

Im Freischnittbereich wurde im Vergleich zum ersten Modell die Form des Freischnittes verändert. Der Verschleiß vom Freischnitt mit einem Radius von 45 mm und dem Freischnitt mit  $R=54$  mm erfolgte kontinuierlicher. Außerdem wurde die Kante, wo der Hänger die Blechdicke erreicht, mit unterschiedlichen Radien (R3/R5/R10/R25) ausgerundet (siehe Abbildung 4.20).

Die Parameteruntersuchung wurde für jedes der vier Modelle unter den drei Belastungen Normalkraft, Moment  $M_z$  und Moment  $M_x$  durchgeführt.

### 4.3.1 Strukturformzahlen in Abhängigkeit von den Ausrundungsradien im Bereich S1

Wie in Kapitel 3.4 angemerkt, wurden im Bereich S1 die Steigung des Knotenbleches und der Ausrundungsradius im Übergangsbereich vom Hänger auf das Knotenblech als maßgebende Faktoren für Spitzenspannungen herausgearbeitet. Da die Steigung des Knotenbleches im Bereich S1 durch den Leitfaden zum Anhang NA.F Bemessung von Hängern an Stabbogenbrücken [2] mit 1:2 vorgegeben ist, wurde lediglich der Ausrundungsradius variiert.



### Strukturformzahlen für alleinige Normalkraftbeanspruchung

Abbildung 4.21 stellt den Einfluss des Ausrundungsradius dar. Während vor Beginn des Knotenbleches (Bereich A) in allen Modellen die gleichen Spannungen auftreten, zeigen sich direkt bei der Schweißnaht Unterschiede. Je kleiner der Ausrundungsradius, desto höher werden die Spannungen. Die Spitzenspannung bei einem Ausrundungsradius von 3mm ist um 1,5 Mal höher als bei einem Ausrundungsradius von 25 mm (Bereich B). Die sich dadurch ergebenden Strukturformzahlen sind in Tabelle 4.4 ersichtlich. Nach der Spitzenspannung fällt die Spannung in allen Modellen in gleicher Form ab (Bereich C). Die unterschiedlichen Verläufe der Kurven in Abbildung 4.21b nach dem lokalen Minimum sind den relativ großen Elementen in diesem Bereich D geschuldet. Die Spannungen und Strukturformzahlen sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

**Tabelle 4.4:** Spannungen und Strukturformzahl unter Normalkraft

S1		R3	R5	R10	R25
Nennspannung	$[N/mm^2]$	0.127	0.127	0.127	0.127
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	0.335	0.308	0.276	0.219
Strukturformzahl	$[-]$	2.631	2.418	2.170	1.716

### Strukturformzahlen für alleinige Momentenbeanspruchung um die Z-Achse

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Momentenbelastung um die Z-Achse (siehe Abbildung 4.22). In allen Modellen stellt sich im Hängerquerschnitt die Nennspannung ein. Die erste Hauptspannung erhöht sich im Bereich B des Anschlusses in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius. Der Faktor zwischen einem Ausrundungsradius von 3 mm und 25 mm beträgt wiederum 1,5.

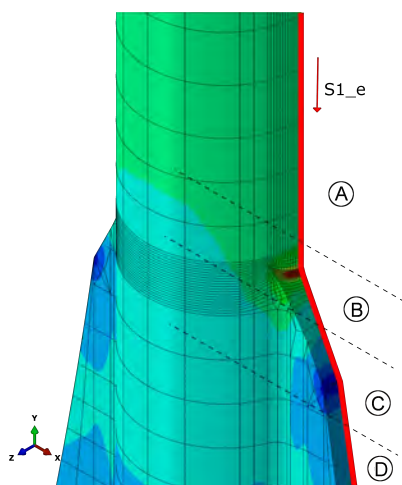
In Tabelle 4.5 sind die Strukturspannungen und zugehörigen Strukturformzahlen ersichtlich. Es zeigt sich, dass die Strukturformzahlen unter Normalkraftbeanspruchung im Durchschnitt um 10 % höher liegen als bei Momentenbeanspruchung  $M_z$ .

**Tabelle 4.5:** Spannungen und Strukturformzahl bei Moment  $M_z$

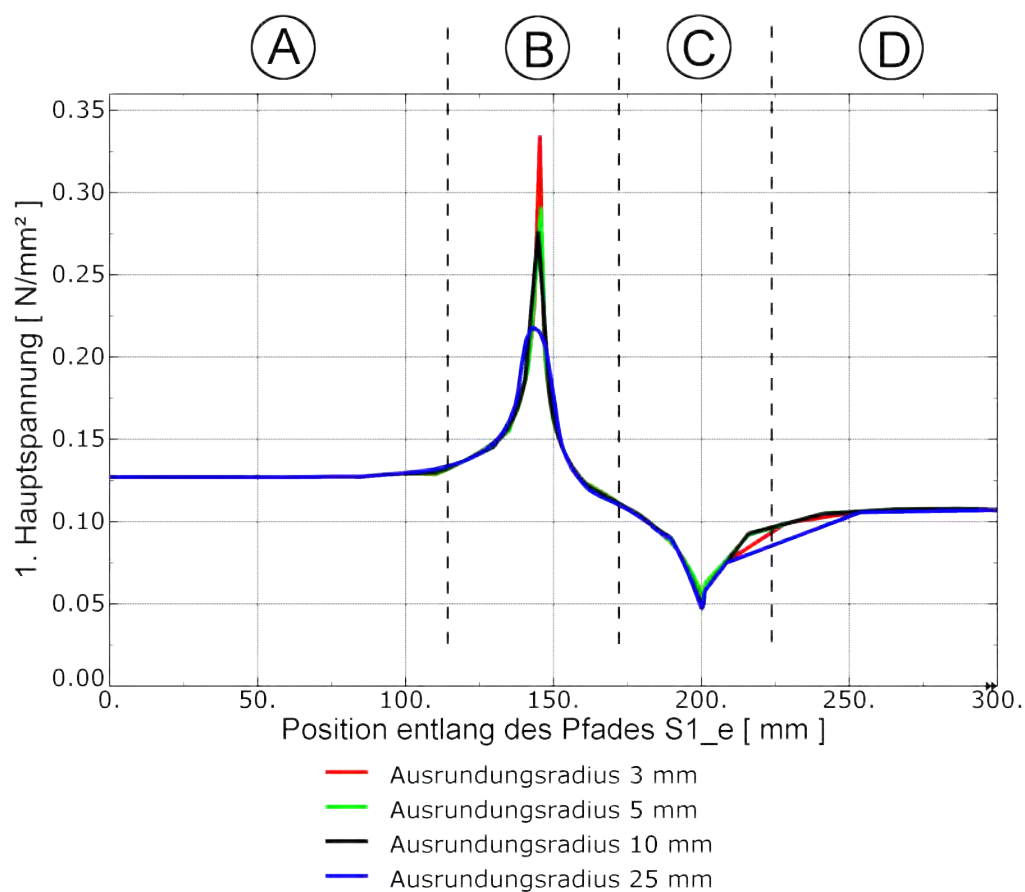
S1		R3	R5	R10	R25
Nennspannung	$[N/mm^2]$	1.02E-02	1.02E-02	1.02E-02	1.02E-02
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	2.44E-02	2.21E-02	1.99E-02	1.57E-02
Strukturformzahl	$[-]$	2.393	2.170	1.951	1.540

### Strukturformzahlen für alleinige Momentenbeanspruchung um die X-Achse

Im Bereich S1 unter Momentenbelastung  $M_x$  ist der Einfluss des Ausrundungsradius vernachlässigbar. Die Spitzenspannung stellt sich außerhalb der Schweißnaht ein. Deshalb wurden hierzu keine genaueren Parameteruntersuchungen durchgeführt.

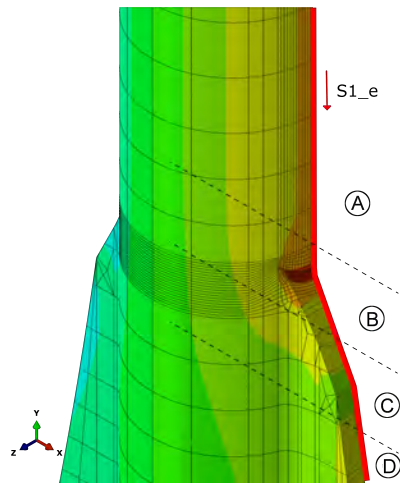


(a) Pfad S1\_e

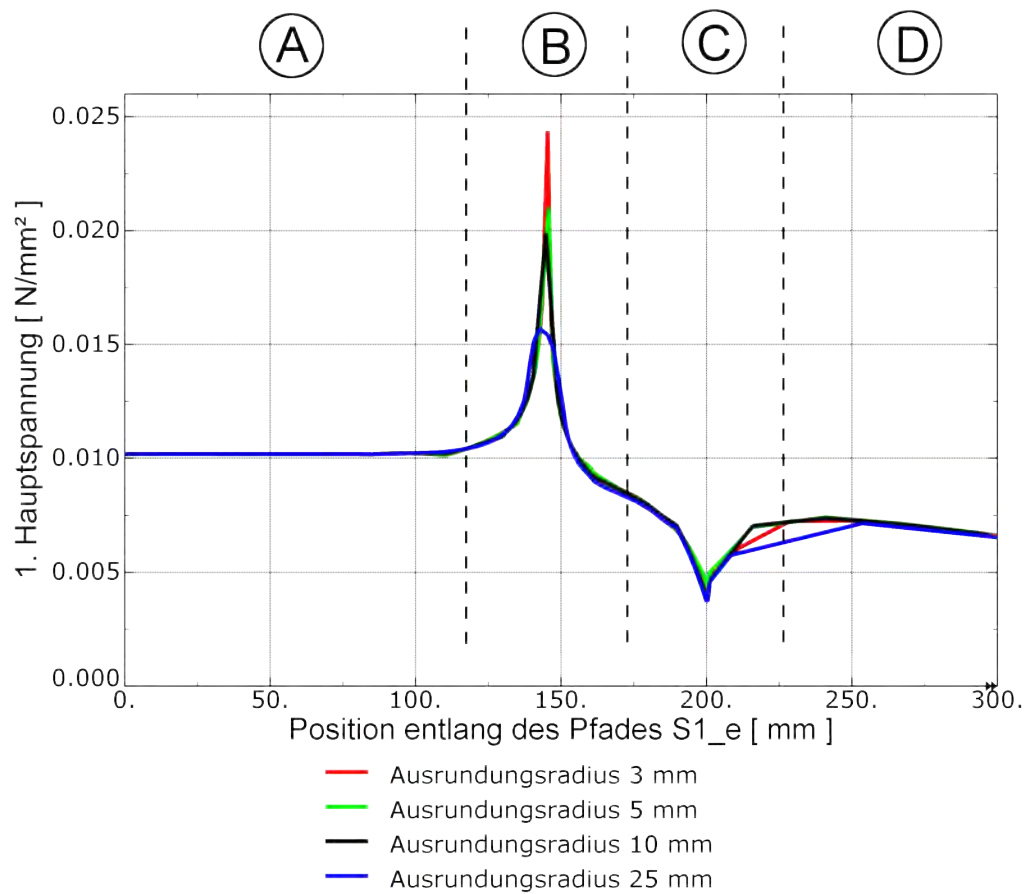


(b) 1. Hauptspannung unter Normalkraft

Abbildung 4.21: Spannungsverlauf in Abhängigkeit von den Ausrundungsradien

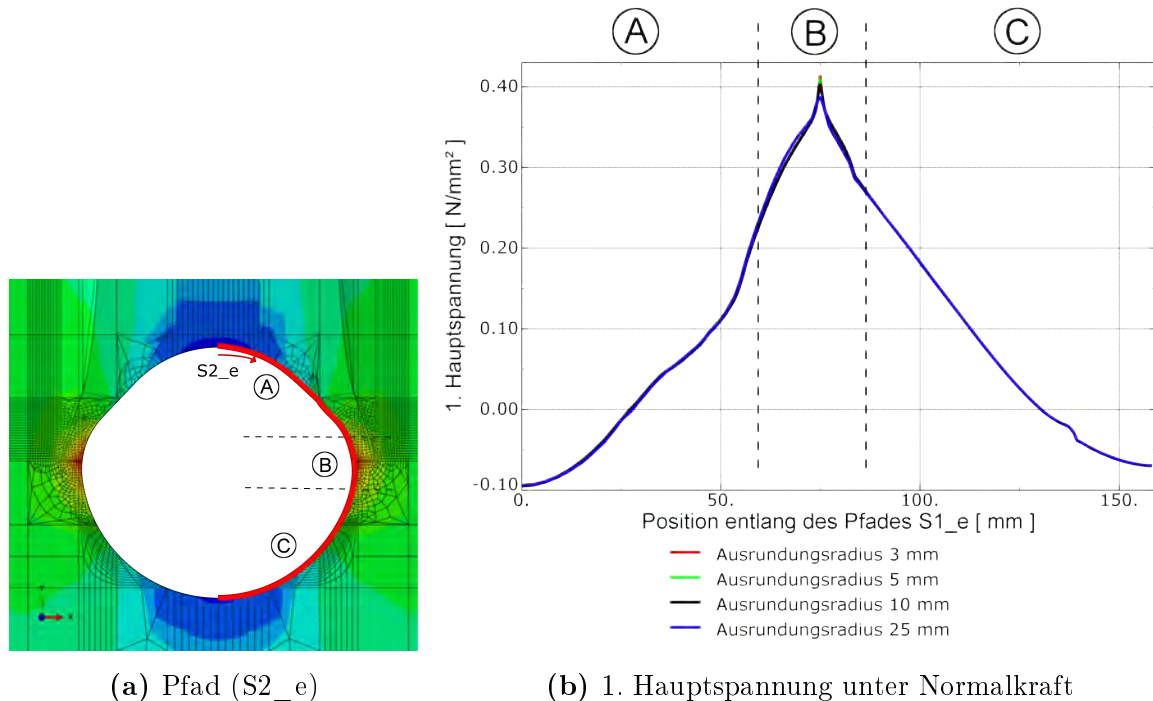


(a) Pfad S1\_e

(b) 1. Hauptspannung unter Moment  $M_z$ **Abbildung 4.22:** Spannungsverlauf in Abhängigkeit von den Ausrundungsradien

### 4.3.2 Ausrundungsradien im Bereich S2

#### Strukturformzahlen für alleinige Normalkraftbeanspruchung



**Abbildung 4.23:** Spannungsverlauf in Abhängigkeit von den Ausrundungsradien

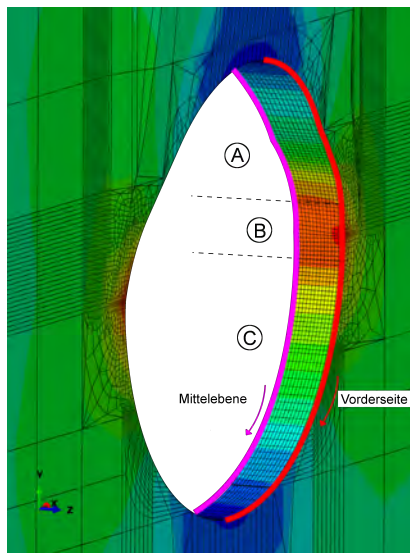
Im Vergleich zum ersten Modell zeigen sich im Bereich um den Freischnitt große Unterschiede im Spannungsverlauf. Wie die Nachbearbeitung von der Schweißnaht beim Freischnitt im Detail auszusehen hat, wird in den vorhandenen Regelwerken nicht vorgegeben. Im Leitfaden zum Anhang NA.F Bemessung von Hängern an Stab-bogenbrücken [2] wird lediglich Kerbfreiheit verlangt. Wie die Schweißnaht im Detail aussieht, lässt sich im Allgemeinen nicht sagen. Deshalb wurde in den beiden Modellen eine unterschiedlich umfassende Nachbearbeitung gewählt. Im zweiten Modell, das für die Parameteruntersuchung verwendet wird, wurde ein größerer Teil des Überganges im Nachhinein als abgeschliffen angenommen. Siehe dazu den Vergleich von Abbildung 4.4a und Abbildung 4.20a.

Der Spannungsverlauf ist in Abbildung 4.23 dargestellt. Die 1. Hauptspannung ist am Beginn und Ende des gewählten Pfades negativ (Bereich A und C). Dazwischen steigt sie an und erreicht beim Übergang vom kleineren Radius auf den Größeren ein Maximum. Anders als im ersten Modell fällt die Spannung dazwischen nicht erneut ab.

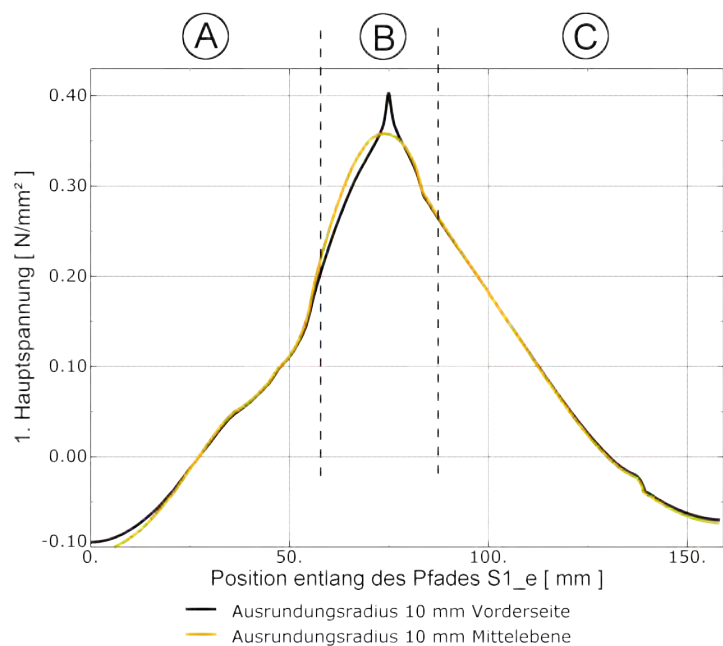
Der Ausrundungsradius, der variiert wurde, hat nur einen geringen Einfluss auf die Spannungen. Lediglich die höchste Spitze ist unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Strukturspannung ist bei einem Ausrundungsradius von 3 mm nur 1,07 Mal so groß wie bei einem Ausrundungsradius von 25 mm. In Tabelle 4.6 wird deutlich, dass die Strukturformzahl in allen Modellen relativ hoch ist.

**Tabelle 4.6:** Spannungen und Strukturformzahl unter Normalkraft

S2		R3	R5	R10	R25
Nennspannung	$[N/mm^2]$	0.083	0.083	0.083	0.083
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	0.414	0.410	0.404	0.388
Strukturformzahl	$[-]$	4.973	4.924	4.849	4.658



(a) Pfade entlang der Vorderseite und Mittlelebene

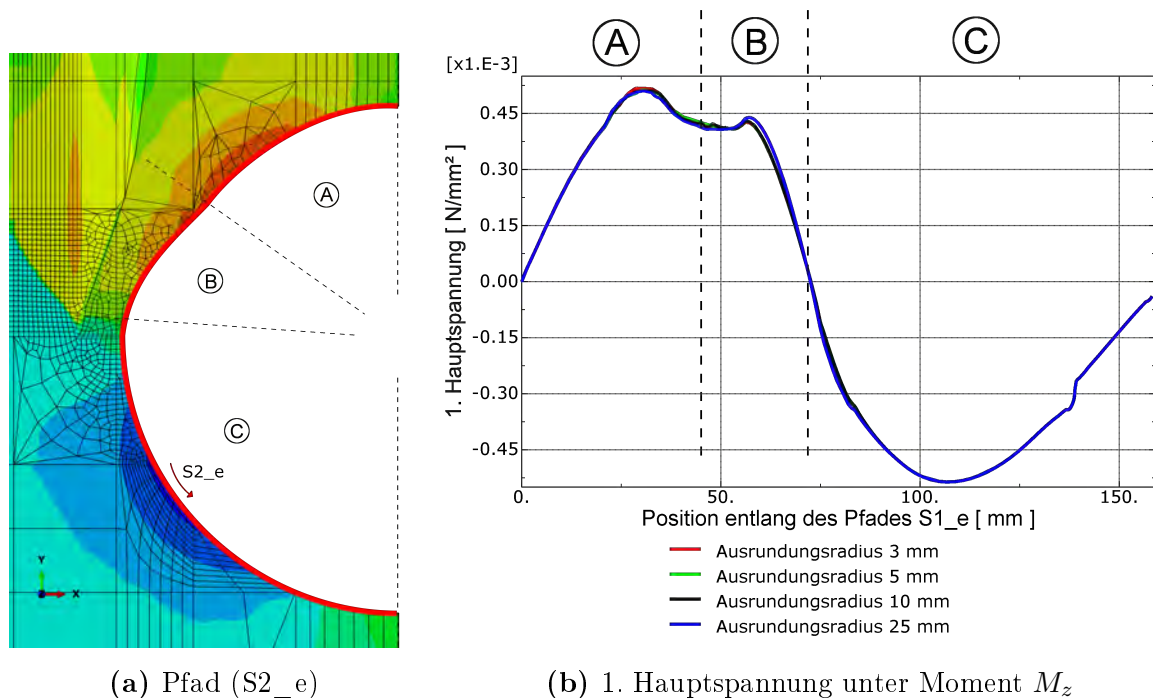


(b) 1. Hauptspannung unter Normalkraft

**Abbildung 4.24:** Spannungsverlauf in Abhängigkeit vom Pfad

Der Einfluss der Schweißnaht ist in Abbildung 4.24b dargestellt. Hier wird der Spannungsverlauf in der Mittelebene des Hängers mit dem Spannungsverlauf entlang der Oberfläche nach Abbildung 4.24a verglichen. Es zeigt sich, dass die höchste Spitze (Bereich B) durch die Schweißnaht des Hängers nach Abbildung 4.20b entsteht. Entlang der Mittelebene verläuft die Kurve runder.

### Strukturformzahlen für alleinige Momentenbeanspruchung um die Z-Achse



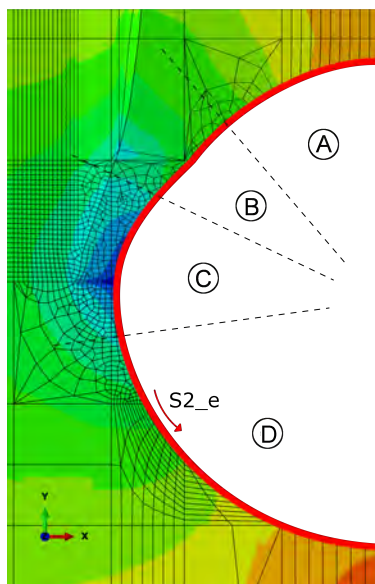
**Abbildung 4.25:** Spannungsverlauf in Abhängigkeit von den Ausrundungsradien

Unter Momentenbelastung um die Z-Achse wurde ein Pfad entlang der Oberfläche des Freischnittes gewählt (siehe Abbildung 4.25a). Im Bereich A und B des Freischnittes kommt es zu zwei Maxima. Dazwischen fällt die Spannung ein wenig ab. Das entsteht dadurch, dass der Freischnitt hier etwas nach innen gebogen ist. Dadurch wird der Maximalwert der Strukturspannung im oberen Bereich verringert. Der absolut größte Wert tritt im Druckbereich auf und bewegt sich zwischen  $5.36 \cdot 10^{-4} \text{ N/mm}^2$  und  $5.11 \cdot 10^{-4} \text{ N/mm}^2$ . Zwischen der größten und der kleinsten Spitzenspannung liegt ein Faktor von 1,05. Der Einfluss der Parameteränderung ist demnach gering. Dies liegt daran, dass dort, wo der Hänger in das Knotenblech einmündet, der Nulldurchgang des Spannungsverlaufes ist. In der Abbildung 4.25 wird nur die linke Seite des Hängers dargestellt und ausgewertet. Auf der rechten Seite entlang des Freischnittes treten die gleichen Spannungen mit umgekehrten Vorzeichen auf.

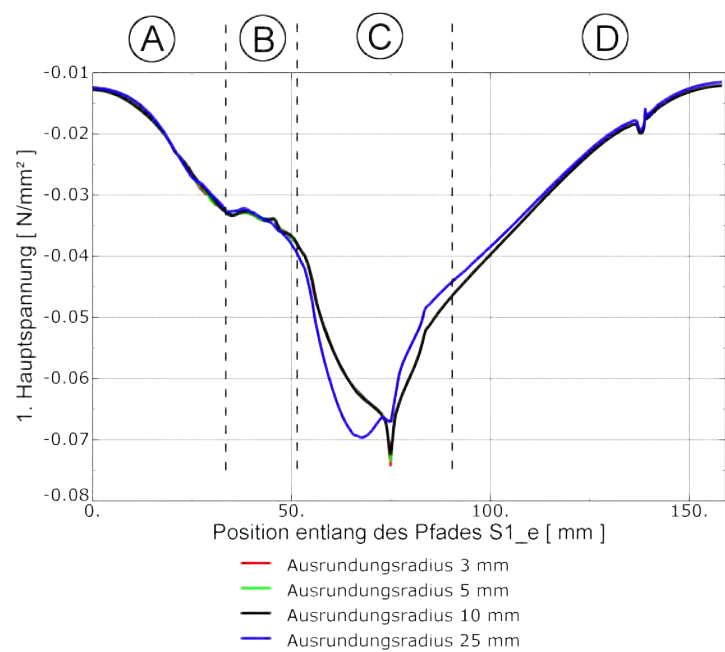
Die Strukturspannungen und zugehörigen Strukturformzahlen sind in Tabelle 4.7 gegenübergestellt.

**Tabelle 4.7:** Spannungen und Strukturformzahl bei Moment  $M_z$ 

S2		R3	R5	R10	R25
Nennspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]	8.77E-05	8.77E-05	8.77E-05	8.77E-05
Strukturspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]	5.36E-04	5.36E-04	5.13E-04	5.11E-04
Strukturformzahl	[ - ]	6.113	6.115	5.843	5.822



(a) Pfad (S2\_e)

(b) 1. Hauptspannung unter Moment  $M_x$ **Abbildung 4.26:** Spannungsverlauf in Abhängigkeit von den Ausrundungsradien

### Strukturformzahlen für alleinige Momentenbeanspruchung um die X-Achse

Der Spannungsverlauf bei Momentenbelastung um die X-Achse ist in Abbildung 4.26 dargestellt. Die Spannungen sind auf der Seite mit positiver Z-Koordinate immer negativ. Auf der anderen Seite der Hängeranschlusskonstruktion treten positive Spannungen auf. Der Verlauf zeigt im Bereich A eine stetige Abnahme der Spannungen, die nur kurz von einer Steigung im Bereich B unterbrochen wird. Dies liegt daran, dass der Freischnitt hier nach innen gebogen ist. Das Minimum befindet sich im Übergangsbereich C von Hänger auf Knotenblech. Hier zeigt sich außerdem, dass sich bei einem Ausrundungsradius von 25 mm der Minimalwert in Richtung Bereich B verschiebt und keine ausgeprägte Spitze vorhanden ist. Bei kleineren Ausrundungsradien kommt es zu einer Spitzenspannung, die sich in den einzelnen Modellen nur geringfügig unterscheidet. Der Faktor zwischen den Spitzenspannungen bei den Ausrundungsradien von 3 mm und 25 mm beträgt 1,07.

Die Spannungen und Strukturformzahlen sind in Tabelle 4.8 dargestellt.

**Tabelle 4.8:** Spannungen und Strukturformzahl bei Moment  $M_x$

	S2	R3	R5	R10	R25
Nennspannung	$[N/mm^2]$	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	7.44E-02	7.35E-02	7.24E-02	6.96E-02
Strukturformzahl	$[-]$	2.974	2.941	2.897	2.785

### 4.3.3 Modell 3 und Kerbspannungsmodell

Im folgenden Abschnitt wurden zwei weitere Modelle untersucht. Bei Modell 3 handelte es sich um einen Hängeranschluss, bei dem die Schweißnähte mit einem Ausrundungsradius von 25 mm ausgerundet wurden. Außerdem wurde der Freischnitt als kreisrundes Loch ausgeführt.

Beim Kerbspannungsmodell (Modell 4) wurden die Schweißnähte mit einem Ausrundungsradius von 1 mm ausgerundet. Die Freischnittform wurde auch hier als Kreis gewählt.

Der Ermüdungsnachweis auf Basis des Kerbspannungskonzeptes wurde bereits in Kapitel 2.2 erläutert. Hierzu ist es notwendig, die Schweißnähte mit einem Radius von 1 mm auszurunden.

Entsprechend den Anforderungen aus Kapitel 3.1.6 wurden im Kerbspannungsmodell Elemente mit einer Seitenlänge von 0.2 mm gewählt. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass das Finite-Elemente Netz nicht zu stark deformiert ist.

#### Bereich S1 - Beginn Knotenblech

Im Bereich S1 wurde der Ausrundungsradius beim Übergang vom Hänger auf das Knotenblech variiert. Eine Skizze der Geometrie des Hängers und die variierten Ausrundungsradien sind in Abbildung 4.27 zu finden. Im Modell 3 wurde ein Radius von



25 mm gewählt. Die Ergebnisse dazu sind in der Parameteruntersuchung von Kapitel 4.3.1 zu finden.

Beim Kerbspannungsmodell wurde der Übergang vom Hänger auf das Knotenblech mit einem Radius von 1 mm ausgerundet.

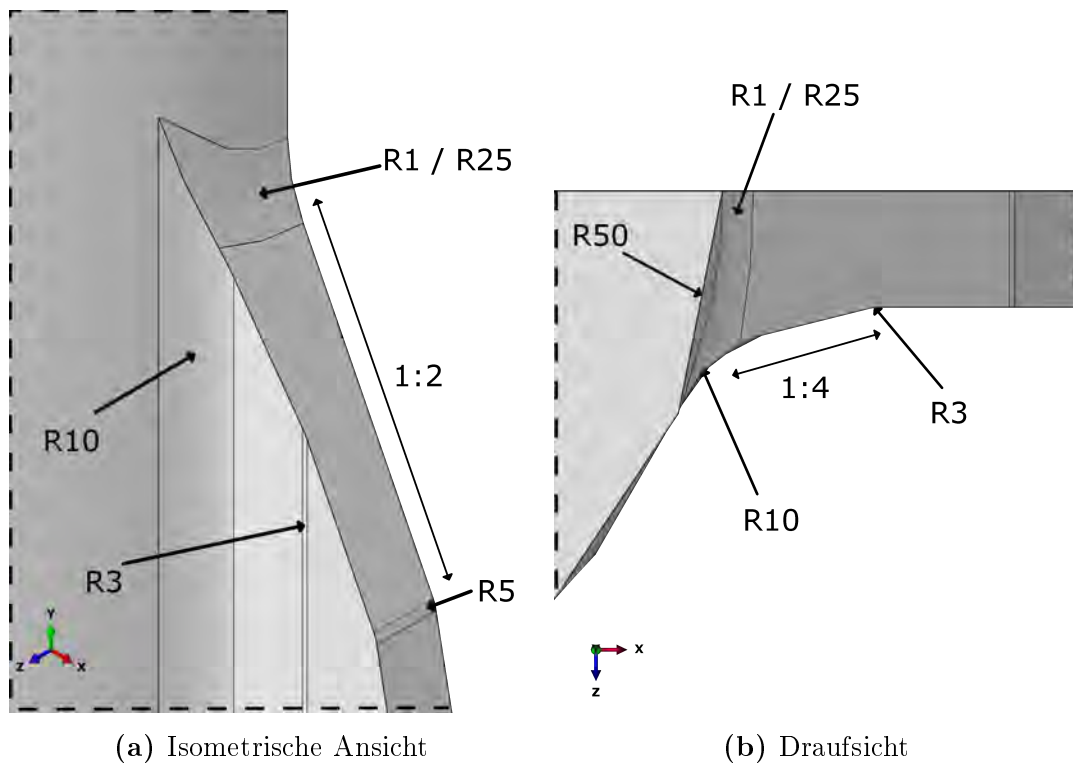


Abbildung 4.27: Variation der Parameter im Bereich S1

### Strukturformzahlen für alleinige Normalkraftbeanspruchung

Der Verlauf der 1. Hauptspannung bei Normalkraftbeanspruchung ist in Abbildung 4.28 dargestellt. Im Bereich A sieht man die konstante Nennspannung, die im Rundstahlhänger wirkt.

Durch den Ausrundungsradius von 1 mm ergibt sich eine hohe Spannungsspitze im Bereich B. Diese liegt um 8 % über den Werten bei einem Ausrundungsradius von 3 mm. Danach kommt es zu einem Spannungsabfall mit einem lokalen Minimum im Bereich C. Dieses Minimum tritt genau bei der Kante auf, die mit einem Ausrundungsradius von 5 mm ausgerundet ist. Im Bereich D stellt sich ein leicht abnehmender Spannungsverlauf ein.

### Strukturformzahlen für alleinige Momentenbeanspruchung um die Z-Achse

Bei Momentenbelastung um die Z-Achse ergibt sich ein ähnlicher Verlauf wie zuvor bei Normalkraftbelastung. Der Spannungsverlauf ist in Abbildung 4.29 dargestellt. Im Bereich A ist die 1. Hauptspannung konstant. Diese nimmt im Bereich B stark zu und fällt danach ab. Im Bereich C tritt ein lokales Minimum auf. Nach einer kurzen

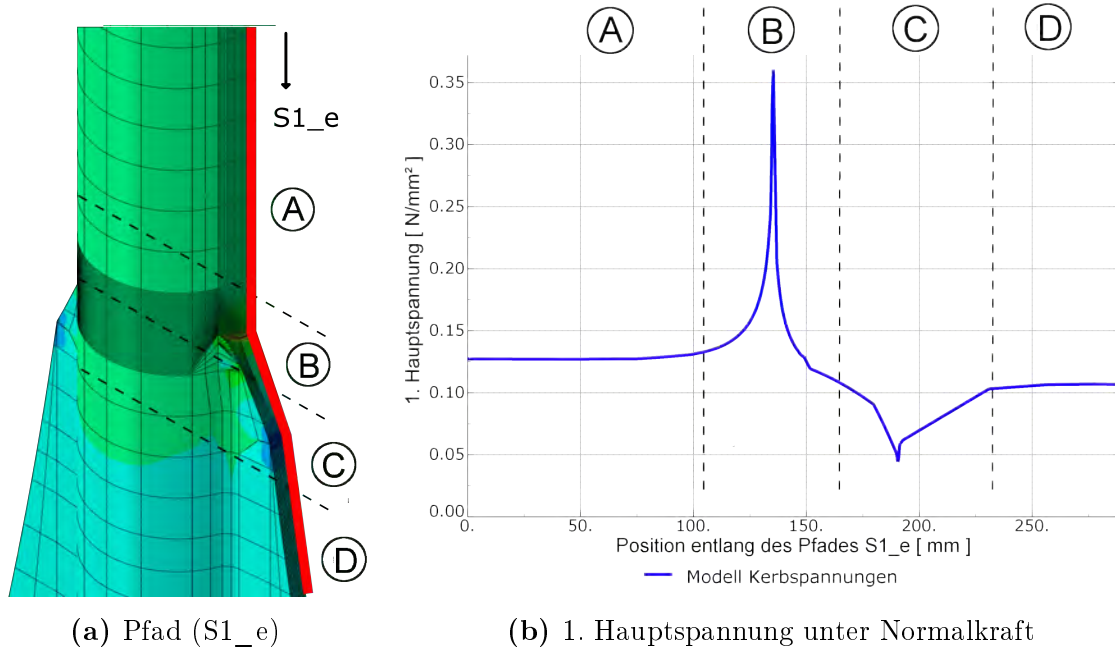


Abbildung 4.28: Spannungsverlauf bei dem Kerbspannungs-Modell

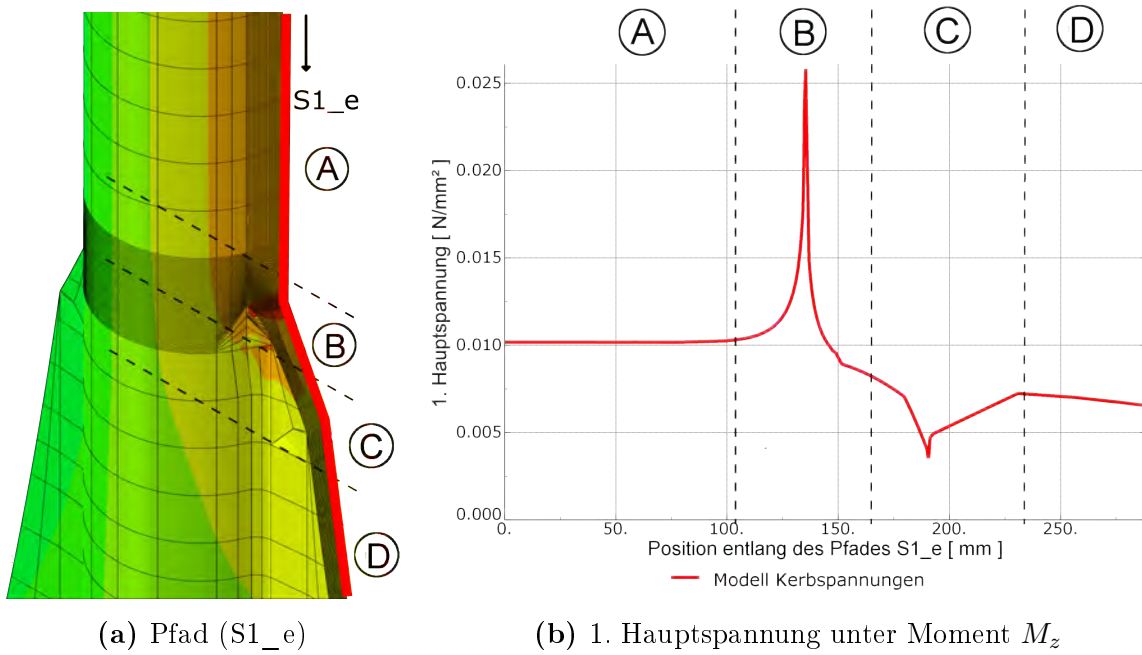


Abbildung 4.29: Spannungsverlauf bei dem Kerbspannungs-Modell

Spannungserhöhung stellt sich im Bereich D ein leichter Spannungsabfall ein. Die maximale 1 Hauptspannung bei dem Kerbspannungsmodell liegt um 6% über jener bei dem vorher untersuchten Modell mit einem Ausrundungsradius von 3 mm.

Eine Übersicht über die Strukturformzahlen und Spannungen ist in Tabelle 4.9 dargestellt.

**Tabelle 4.9:** Spannungen und Strukturformzahlen im Bereich S1

S1		Normalkraft	Moment $M_z$
Nennspannung	$[N/mm^2]$	0.127	1.02E-02
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	0.360	2.58E-02
Strukturformzahl	$[-]$	2.830	2.534

### Strukturformzahlen für alleinige Momentenbeanspruchung um die X-Achse

Die Maximalspannungen im Bereich S1 bei Momentenbelastung um die X-Achse liegen außerhalb des Einflussbereiches der Schweißnaht. Deshalb wurden hierzu keine genaueren Untersuchungen durchgeführt.

### Bereich S2 - Freischnitt

Die Modellierung der Freischnittform hat großen Einfluss auf die entstehenden Spannungsspitzen. Die geänderte Geometrie im Bereich S2 ist in Abbildung 4.30 dargestellt. Der Freischnitt wurde vereinfacht als kreisrundes Loch modelliert. Als Radius wurden 45 mm gewählt. Der Übergang vom Hänger auf das Knotenblech wurde im Modell 3 mit einem Radius von 25 mm ausgerundet. Im Modell Kerbspannungen erfolgte die Ausrundung mit einem Radius von 1 mm.

### Strukturformzahlen für alleinige Normalkraftbeanspruchung

Für Normalkraftbelastung ergeben sich die Spannungsverläufe nach Abbildung 4.31. Hier zeigt sich, dass der Verlauf bei beiden Modellen im Bereich A und C gleich ist. Lediglich im Bereich B kommt es aufgrund des kleineren Ausrundungsradius vom Modell Kerbspannungen zu einer höheren Spannungsspitze als im Modell 3. Diese maximale Spannung ist beim Kerbspannungsmodell um 16% höher als bei Modell 3.

### Strukturformzahlen für alleinige Momentenbeanspruchung um die Z-Achse

Für Momentenbelastung um die Z-Achse zeigt sich, dass der Ausrundungsradius von 1 mm bzw. 25 mm einen vernachlässigbaren Einfluss hat. Die Verläufe der 1 Hauptspannungen, welche in Abbildung 4.32 dargestellt sind, sind entlang des gesamten Freischnittes ident.

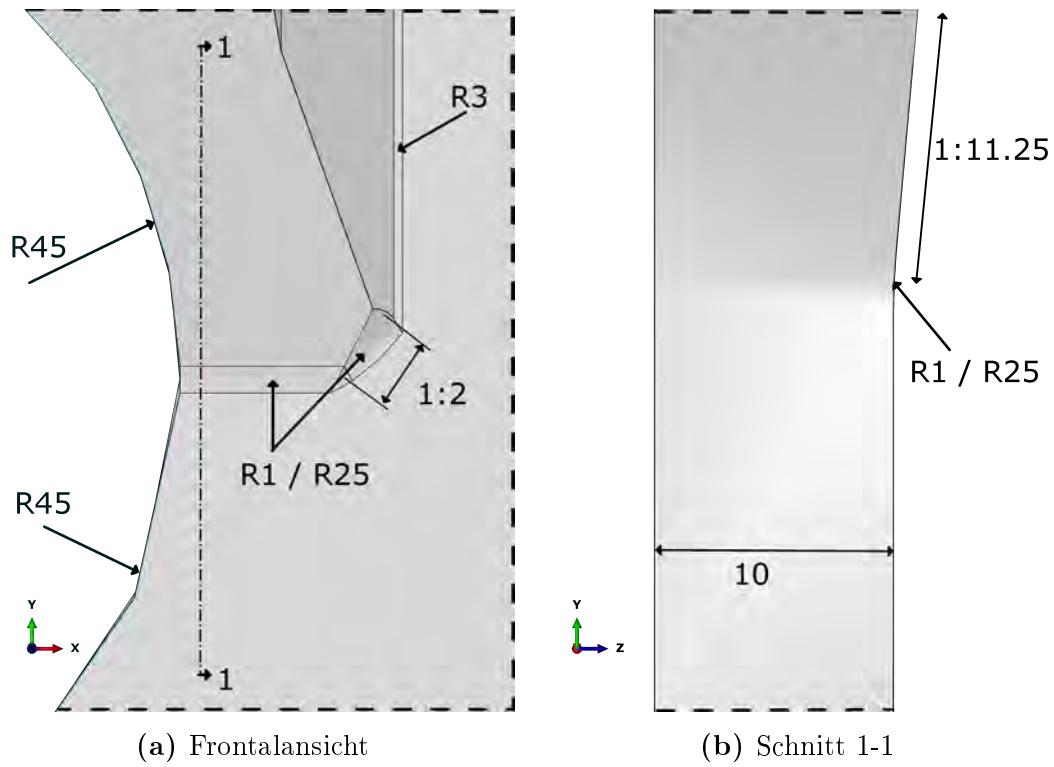


Abbildung 4.30: Variation der Parameter im Bereich S2

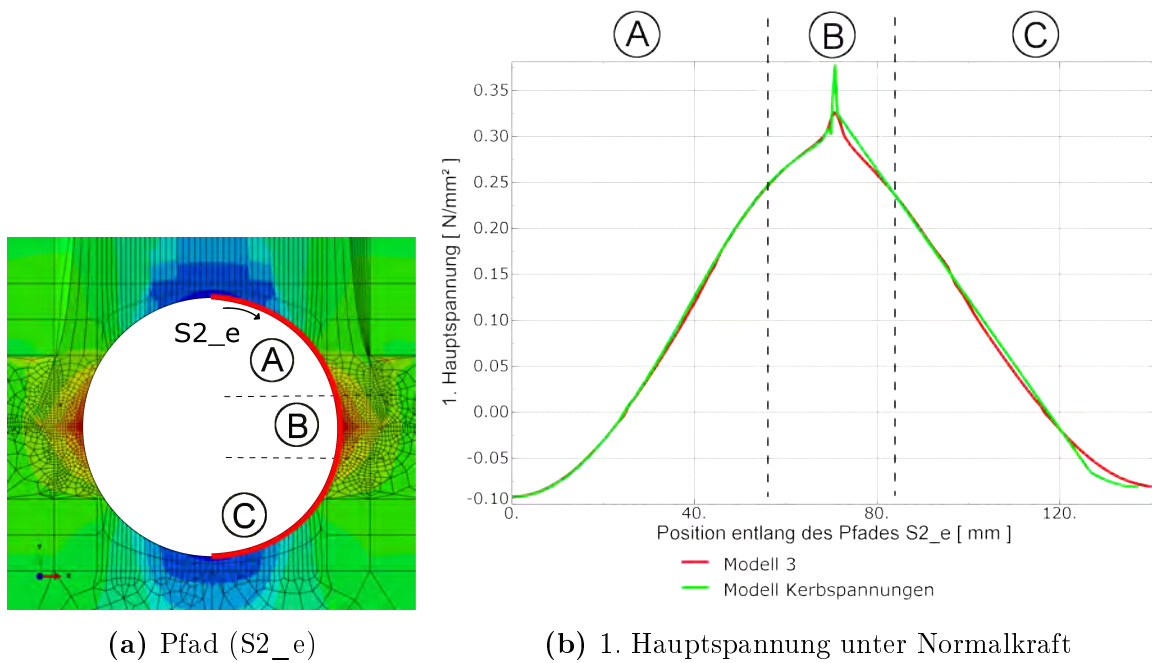
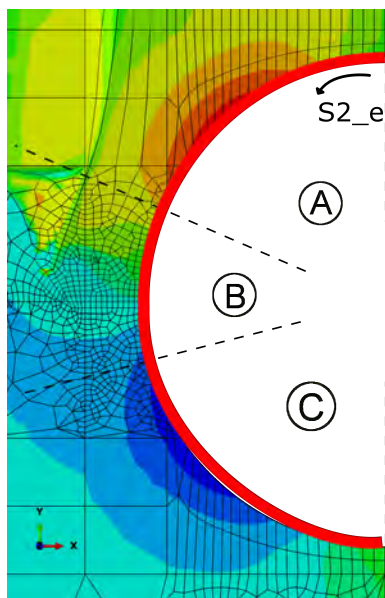
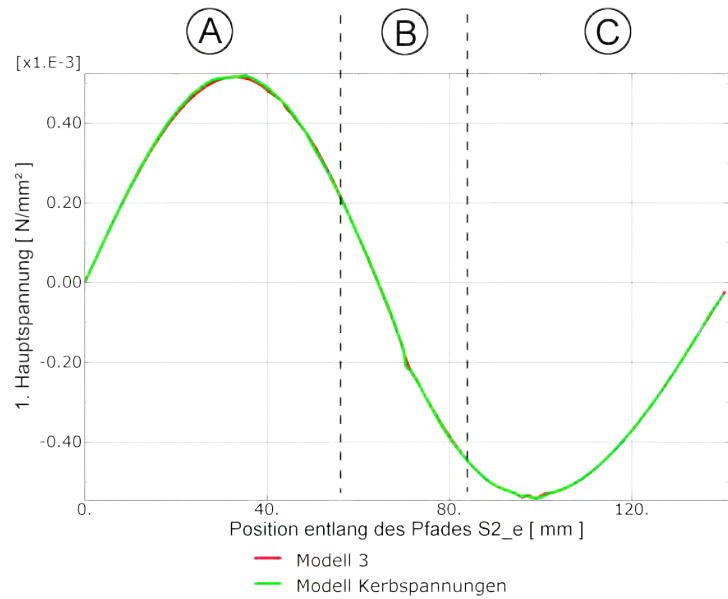


Abbildung 4.31: Spannungsverlauf in Abhängigkeit von der Freischnittmodellierung

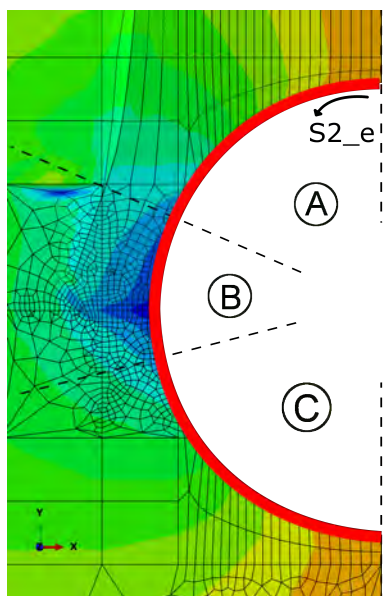


(a) Pfad ( $S2\_e$ )

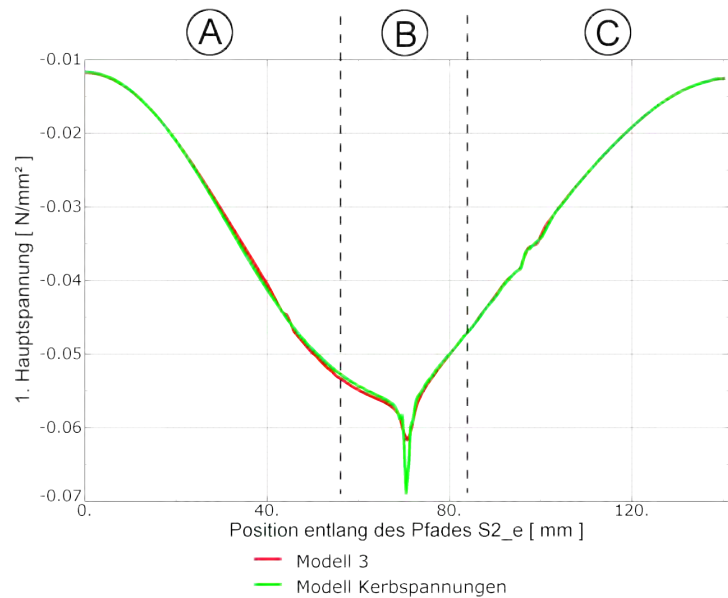


(b) 1. Hauptspannung unter Moment  $M_z$

Abbildung 4.32: Spannungsverlauf in Abhängigkeit von der Freischnittmodellierung



(a) Pfad ( $S2\_e$ )



(b) 1. Hauptspannung unter Moment  $M_x$

Abbildung 4.33: Spannungsverlauf in Abhängigkeit von der Freischnittmodellierung

### Strukturformzahlen für alleinige Momentenbeanspruchung um die X-Achse

Für Momentenbelastung um die X-Achse zeigt sich ein ähnlicher Verlauf wie bei Normalkraftbelastung. Im Bereich A und C sind die 1 Hauptspannungen in beiden Modellen gleich groß. Die Spannungsspitze im Bereich B ist beim Modell mit dem Ausrundungsradius von 1 mm höher als bei der Modellierung mit einem Ausrundungsradius von 25 mm. Der Unterschied beträgt 12%.

Für das Modell 3 sind die Spannungen und Strukturformzahlen in Tabelle 4.10 dargestellt. Die Spannungen und Strukturformzahlen ergeben sich nach Tabelle 4.11.

**Tabelle 4.10:** Spannungen und Strukturformzahlen bei dem Modell 3

S2		Normalkraft	Moment $M_z$	Moment $M_x$
Nennspannung	$[N/mm^2]$	0.083	8.77E-05	2.500E-02
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	0.327	5.40E-04	6.171E-02
Strukturformzahl	$[-]$	3.919	6.161	2.469

**Tabelle 4.11:** Spannungen und Strukturformzahlen bei dem Modell Kerbspannungen

S2		Normalkraft	Moment $M_z$	Moment $M_x$
Nennspannung	$[N/mm^2]$	0.083	8.77E-05	2.50E-02
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	0.379	5.39E-04	6.90E-02
Strukturformzahl	$[-]$	4.548	6.148	2.762

## 4.4 Hot-Spot-Spannungen

Eine Einführung zu den Hot-Spot Spannungen ist in Kapitel 2.2 zu finden. Für die Hot-Spot-Spannung ( $\sigma_{HS}$ ) sind die Werte der 1 Hauptspannungen in einem Abstand von 4 mm, 8 mm und 12 mm von der Maximalspannung nötig. Abbildung 4.34a zeigt eine Übersicht über den Anschlussbereich. Der gelbe Ring deutet an, wie klein der Ausschnitt mit den drei Spannungspunkten ist. In Abbildung 4.34b sind die gewählten Spannungspunkte ersichtlich.

Es wurde die Hot-Spot-Spannung für den Hängeranschluss mit den Ausrundungsradien von 1 mm und 5 mm errechnet.

**Tabelle 4.12:** Hot-Spot-Spannungen für Normalkraftbelastung

Normalkraft	$\sigma_{0 \text{ mm}}$	$\sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_{8 \text{ mm}}$	$\sigma_{12 \text{ mm}}$	$\sigma_{HS}$
Ausrundungsradius 1 mm	0.360	0.167	0.143	0.131	0.204
Ausrundungsradius 5 mm	0.308	0.163	0.142	0.130	0.192

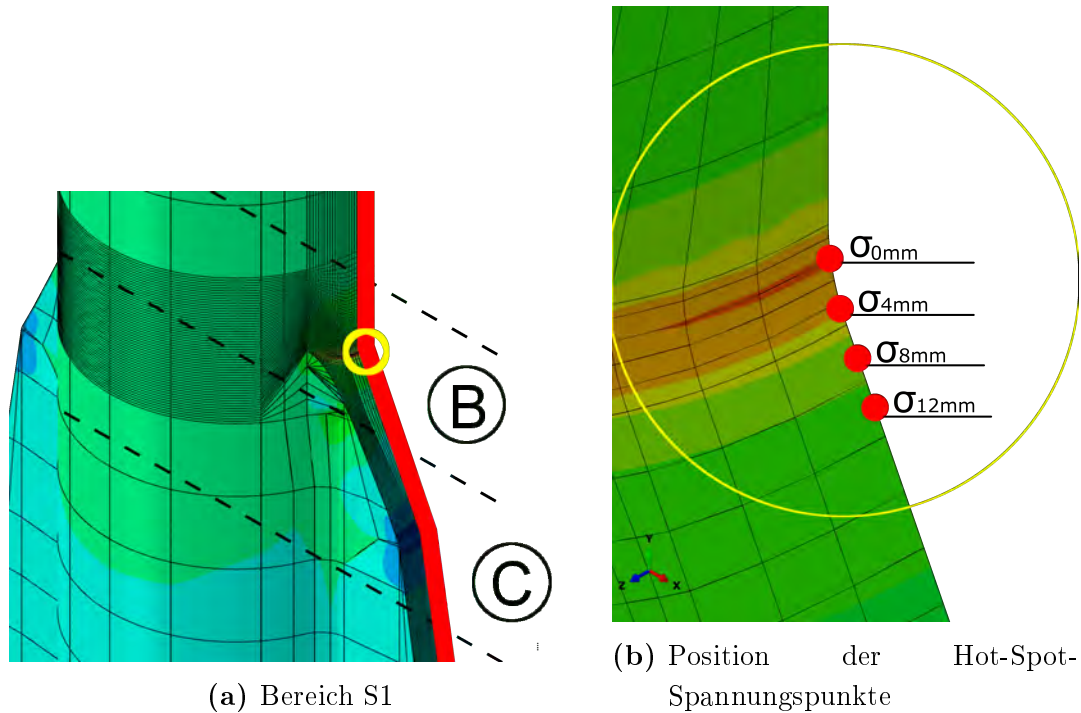


Abbildung 4.34: Hot-Spot-Spannungen

Bei Normalkraftbelastung ergeben sich die Spannungen nach Tabelle 4.12. Es zeigt sich, dass trotz unterschiedlicher Spannungsspitzen ( $\sigma_{0 \text{ mm}}$ ) die Hot-Spot-Spannungen nahezu gleich hoch sind.

Die benötigten Spannungen zur Berechnung der Hot-Spot-Spannung unter Momentenbelastung um die Z-Achse sind in Tabelle 4.13 ersichtlich. Auch hier ist lediglich ein geringer Unterschied bei den Hot-Spot-Spannungen ( $\sigma_{HS}$ ) erkennbar.

Tabelle 4.13: Hot-Spot-Spannungen für Moment  $M_z$ 

Moment $M_z$	$\sigma_{0 \text{ mm}}$	$\sigma_{4 \text{ mm}}$	$\sigma_{8 \text{ mm}}$	$\sigma_{12 \text{ mm}}$	$\sigma_{HS}$
Ausrundungsradius 1	2.58E-02	1.21E-02	1.05E-02	9.71E-03	1.46E-02
Ausrundungsradius 5	2.21E-02	1.19E-02	1.05E-02	9.85E-03	1.40E-02

Tabelle 4.14: Spannungen und Strukturformzahlen mit dem Hot-Spot Verfahren

		Ausrundungsradius 1 mm		Ausrundungsradius 5 mm	
		Normalkraft	Moment $M_z$	Normalkraft	Moment $M_z$
Nennspannung	$[N/mm^2]$	0.127	1.02E-02	0.127	1.02E-02
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	0.204	1.46E-02	0.192	1.40E-02
Strukturformzahl	$[-]$	1.604	1.438	1.508	1.377

Die aus den Hot-Spot-Spannungen berechneten Strukturformzahlen sind in Tabelle 4.14 gegenübergestellt. Für Normalkraftbelastung ergibt sich bei einem Ausrundungsradius von 1 mm ein Wert von 1,60. Mit einem Ausrundungsradius von 5 mm

berechnet sich die Strukturformzahl zu 1,51. Im Vergleich dazu ergeben sich bei Verwendung der Strukturspannungen ( $\sigma_{0 \text{ mm}}$ ) Strukturformzahlen von 2,83 bei einem Ausrundungsradius von 1 mm bzw. 2,42 bei einem Ausrundungsradius von 5 mm.

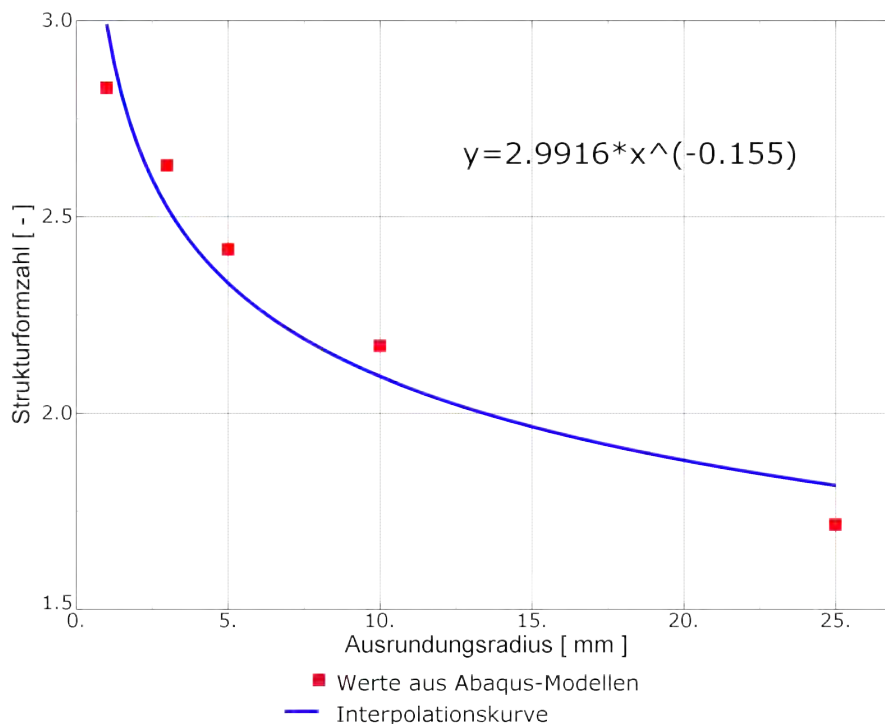
Für Momentenbelastung um die Z-Achse liegen die Hot-Spot-Strukturformzahlen bei 1,44 (Ausrundungsradius 1 mm) und 1,38 (Ausrundungsradius 5 mm). Die aus den Strukturspannungen berechneten Strukturformzahlen betragen 2,53 (Ausrundungsradius 1 mm) und 2,17 (Ausrundungsradius 5 mm).

Bei der Berechnung der Spannungen nach dem Hot-Spot Verfahren sind die Strukturformzahlen auch bei unterschiedlichen Ausrundungsradien annähernd gleich groß.

## 4.5 Zusammenfassung, Kernaussagen

### 4.5.1 Kritischer Bereich S1 - Beginn Knotenblech

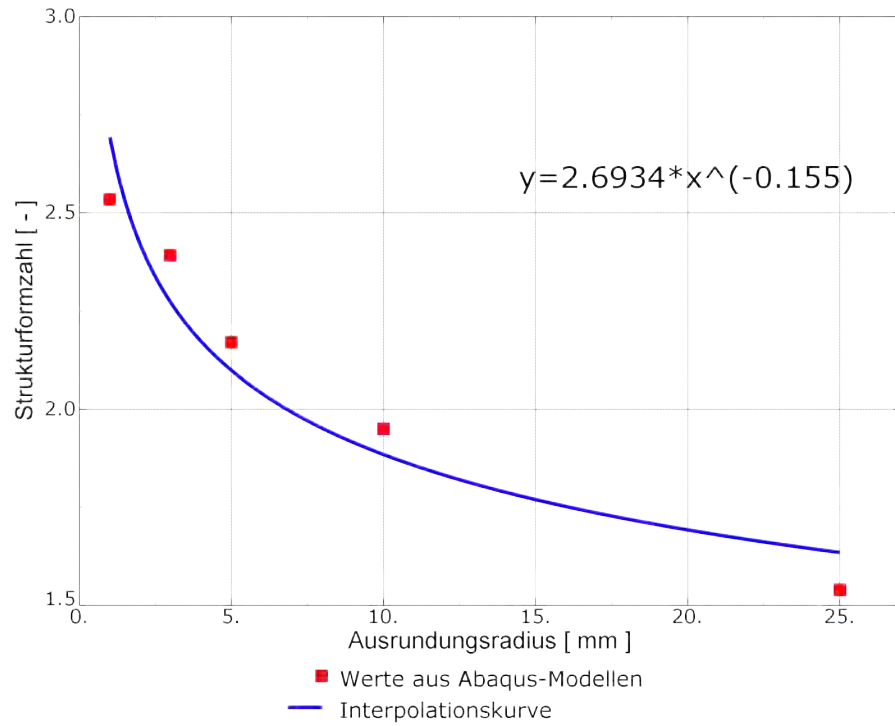
Eine wichtige Einflussgröße im Bereich S1 ist der Ausrundungsradius beim Übergang von Hänger auf Knotenblech. In Abbildung 4.35 sind die Strukturformzahlen und die Interpolationslinie aus den berechneten Modellen für Normalkraftbelastung dargestellt. Es zeigt sich, dass die Strukturformzahl bei kleineren Radien stark zunimmt. Die Potentialfunktion der Interpolationskurve ist in der Abbildung 4.35 ersichtlich.



**Abbildung 4.35:** Strukturformzahlen in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius für Normalkraftbeanspruchung

Bei Momentenbelastung um die Z-Achse ergibt sich ein ähnliches Bild. Mit kleiner werdendem Radius werden die Strukturformzahlen überproportional größer. Um zwischen den einzelnen errechneten Werten zu interpolieren, ist in der Abbildung 4.36 die



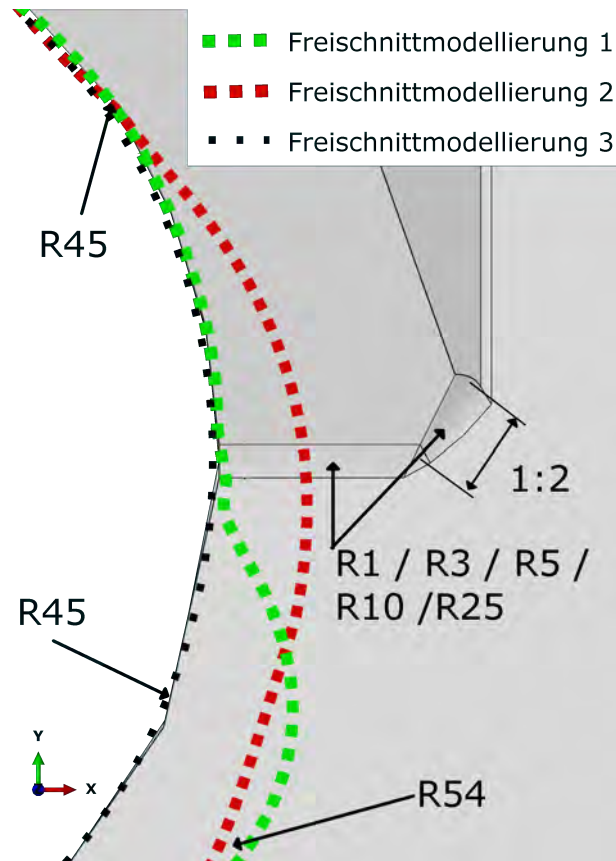


**Abbildung 4.36:** Strukturformzahlen in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius für Momentenbeanspruchung  $M_z$

Funktion der Interpolationskurve dargestellt.

### 4.5.2 Kritischer Bereich S2 - Freischnitt

Im Bereich des Freischnittes stellte sich heraus, dass die Form des Freischnittes einen großen Einfluss auf die auftretenden Strukturspannungen hat. Die Form ergibt sich durch die Nachbearbeitung der Schweißnaht. Um die Bandbreite der Spannungen abschätzen zu können, wurden insgesamt vier unterschiedliche Modelle untersucht. Das erste Modell wurde in Kapitel 4.1 dargestellt. Modell 2 fand Verwendung bei den Parameteruntersuchungen in Kapitel 4.3. Das dritte Modell und das Modell zur Berechnung der Kerbspannungen wurde in Kapitel 4.3.3 beschrieben.



**Abbildung 4.37:** Unterschiede in den verschiedenen Freischnittmodellierungen

In Summe ergaben sich dadurch drei verschiedene Geometrien, die untersucht wurden. Diese sind in Abbildung 4.37 gegenübergestellt.

Bei der ersten Modellierung wurde die Hängeranschlusskonstruktion entlang der grünen Linie nachbearbeitet. Die genauen geometrischen Abmessungen sind in Abbildung 4.4 dargestellt.

Im zweiten Modell wurde eine Nachbearbeitung entlang der roten Linie durchgeführt. In Abbildung 4.20 sind die geometrischen Abmessungen ersichtlich.

Das Modell 3 wurde vereinfacht, indem der Radius im Freischnitt konstant 45 mm betrug. Dafür wurde der Radius des Freischnittes im Knotenblech reduziert. Dadurch ergab sich die geometrisch einfache Form eines kreisförmigen Freischnittes mit den Abmessungen nach Abbildung 4.30.

Abbildung 4.38 stellt die Ergebnisse aller untersuchten Modelle gegenüber.

Bei Normalkraftbelastung liefert das Modell 3 den geringsten Wert. Der Maximalwert ergibt sich im Modell 2 bei einem Ausrundungsradius von 3 mm. Die Differenz zwischen minimaler und maximaler Strukturformzahl beträgt 26.7%.

Die geringsten Strukturformzahlen bei Momentenbelastung um die Z-Achse ergeben sich im Modell 2 bei einem Ausrundungsradius von 25 mm. Der Maximalwert ergibt sich aus Modell 1. Die Differenz zwischen Minimal- und Maximalwert beträgt 22.3%.

Bei Momentenbelastung um die X-Achse kommt es im Modell 1 zur kleinsten Strukturformzahl. Den größten Wert liefert Modell 2 mit einem Ausrundungsradius von 3 mm. Die Differenz errechnet sich zu 23.8%. Die Bandbreite der Strukturformzahlen ist demnach bei Moment  $M_z$  am Geringsten.

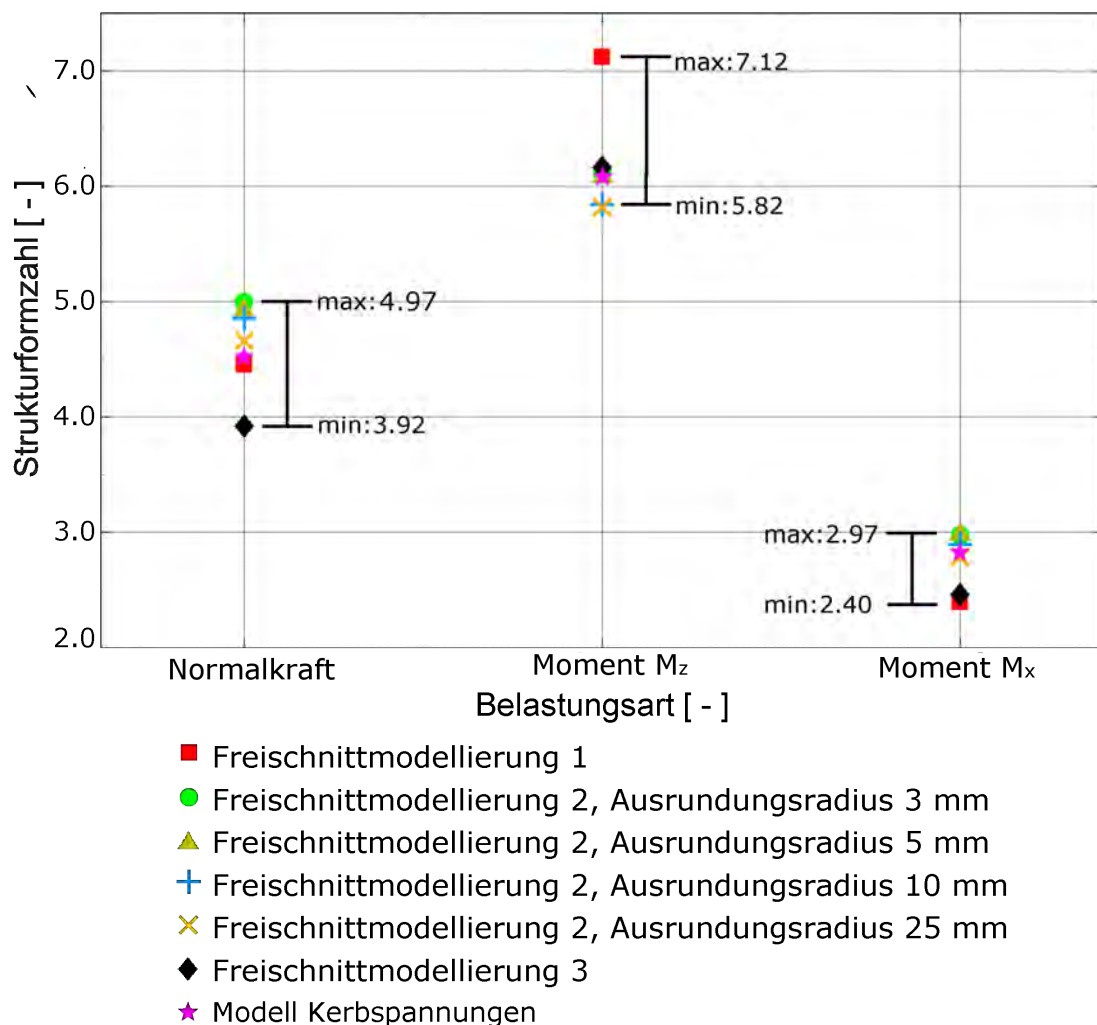


Abbildung 4.38: Strukturformzahlen in Abhängigkeit vom Modell im Freischnittbereich



## Geschmiedeter Hängeranschluss

Bei der stauchgeschmiedeten Hängeranschlusskonstruktion handelt es sich um einen Anschluss, bei dem das Knotenblech aus dem gestauchten Rundstahl geschmiedet wurde. Aufgrund des stetigen Steifigkeitsübergangs im Knotenbereich ist ein kontinuierlicher Kraftfluss gegeben. Dadurch vermeidet man Spannungsspitzen, die durch geometrische Kerbeffekte entstehen würden. Aus ermüdungsrelevanter Sicht ist daher die geschmiedete Konstruktion eine Alternative zur geschweißten Hängerkonstruktion. Bemessungsregeln und geometrische Empfehlungen für den Anschluss sind im Kapitel 2.1 beschrieben. Im folgenden Kapitel werden die Spannungsverläufe über die Hängerkonstruktion unter verschiedenen Belastungen untersucht.

### 5.1 Modellierung in Abaqus FEA

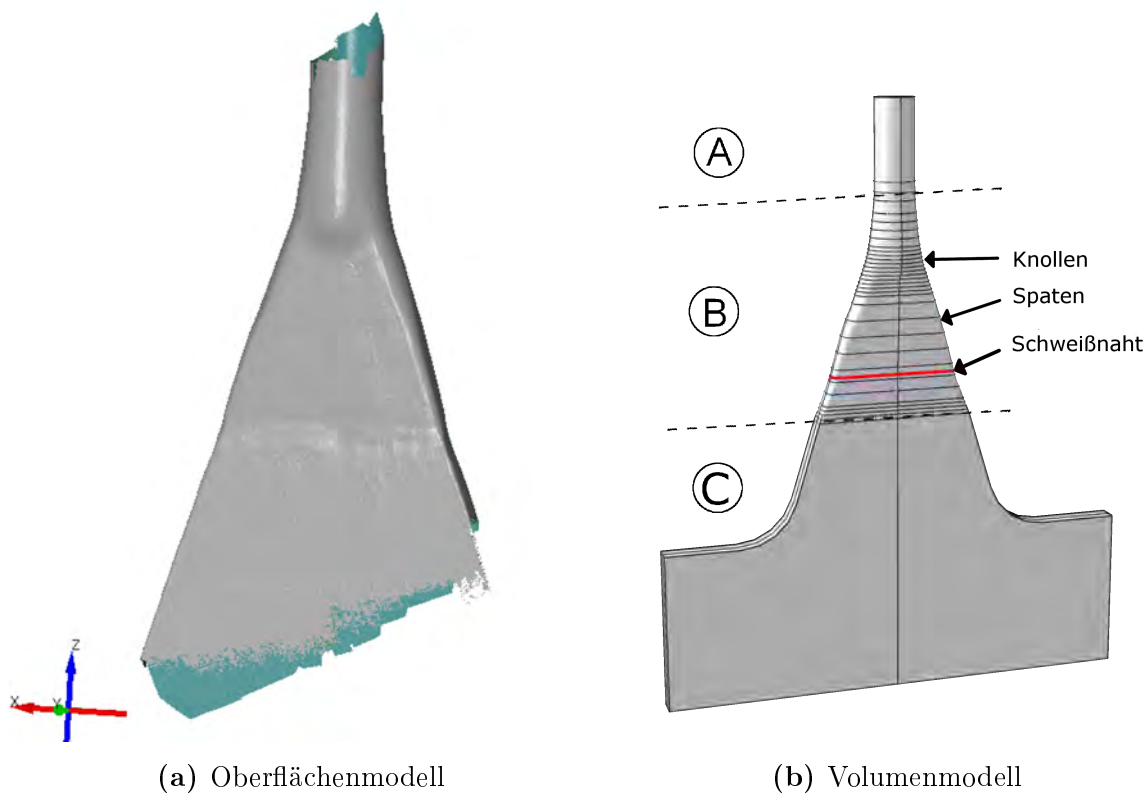
Die Herausforderung bei der Modellbildung eines geschmiedeten Hängeranschlusses ist der Übergang vom Rundstahl zum Spaten. Dieser Abschnitt wird im Weiteren auch als Knollen bezeichnet. Eine exakte Modellierung dieses Knollens, also nach Planmaßen, ist wegen des Herstellungsprozesses nicht möglich. Die endgültig ausgeschnittene Hängerform entsteht nach dem Aufstauchen und Schmieden.

Im Zuge dieser Diplomarbeit gab es die Möglichkeit, an der Netzwerkbogenbrücke Verbindung Ostbahn - Flughafenschnellbahn am Wiener Zentralverschiebebahnhof einen 3-D Scan von einem geschmiedeten Hänger zu erstellen. Der gewählte Hänger befindet sich in der inneren südlichen Hängerebene vom Stahltragwerk S 5.1 und trägt die Hängernummer 1Si4, siehe Abbildung A.1. Bei der Wahl wurde vor allem darauf geachtet, dass er gut zugänglich ist, um ein möglichst exaktes und vollständiges Modell zu erzeugen.

Das 3D-Oberflächenmodell wurde mit Hilfe der Firma GOM - Gesellschaft für Optische Messtechnik angefertigt. Mit dem 3D Scanner ATOS Core und dem 3D Digitalisierungsprogramm ATOS Professional konnten die dreidimensionalen Oberflächendaten gewonnen werden. Die einzelnen Scans sind aus einer Kombination von

Referenzpunkten und dem Abgleich der Oberflächengeometrie automatisch zusammengeführt worden. Bei der Aufnahme wurde vor allem großes Augenmerk auf die Bereiche des Knollens und des Übergangs vom Spaten an das Hauptbauteil über eine Schweißnaht gelegt. Das Aufnahmeverfahren ist in Anhang A ausführlicher dokumentiert. In Abbildung 5.1a ist das Oberflächenmodell des geschmiedeten Hängers zu sehen.

Im nächsten Schritt wurde aus dem Oberflächenmodell das Volumenmodell für die Abaqus Berechnungen erstellt, siehe Abbildung 5.1b. Um Einflüsse der Randbedingungen, wie z.B. Lasteinleitung und Auflager, bei den Ergebnissen zu vermeiden, wurde das Modell im oberen Bereich A durch einen Zylinder erweitert. Im unteren Abschnitt C wurde die weitere Form des Hauptträgers abgebildet. Der Bereich B enthält den durch den 3D Scan erzeugten, geschmiedeten Anschluss.



**Abbildung 5.1:** Übersicht geschmiedeter Hängeranschluss

Durch die Aufnahme der Form eines realen Hängers wurden Herstellungstoleranzen, Montageungenauigkeiten sowie Blechunebenheiten beachtet. Dabei entstand ein Modell mit leicht asymmetrischen Abmessungen. Wie in Kapitel 4 beschrieben, wurden für den geschweißten Hängeranschluss Herstellungstoleranzen, Montageungenauigkeiten und Blechunebenheiten nicht berücksichtigt. Um nun einen Vergleich zwischen den zwei Hängeranschlüssen anzustellen, war es nötig, ein geschmiedetes Hängermmodell quasi nach Planmaßen zu erzeugen. Von dem asymmetrischen Modell wurde ein Viertel des Modells zwei Mal gespiegelt. Dadurch entstand ein doppelt symmetrisches Modell. Jedoch ist zu beachten, dass Blechunebenheiten an der Oberfläche noch vorhanden sind.

### 5.1.1 Geometrische Abmessungen

Wie in Abbildung 5.1b ersichtlich, ist das Modell des geschmiedeten Hängeranschlusses in drei Bereiche eingeteilt. Der Bereich B beinhaltet den durch den 3D-Scan aufgenommenen, geschmiedeten Anschluss. Die Spatenlänge, also die Länge vom Übergang des Rundstahls zum Knotenblech bis zur Schweißnaht, hat einen Wert von 470 mm.

In Abbildung 5.2 und 5.3 ist die Front und Seitenansicht des Modelles zu sehen. Die Schweißnaht besitzt eine Länge von 320 mm und eine Breite von 48 mm. Um einen geometrischen Einfluss bei den Übergängen auf die Spannungsverläufe durch die Modellierung zu vermeiden, wurde die Geometrie aus dem 3D-Scan über die Spatenlänge hinaus verwendet. Durch zwei Erweiterungen im oberen und unteren Bereich des Abschnittes B wurde das geschmiedete Hängeranschlussmodell vervollständigt.

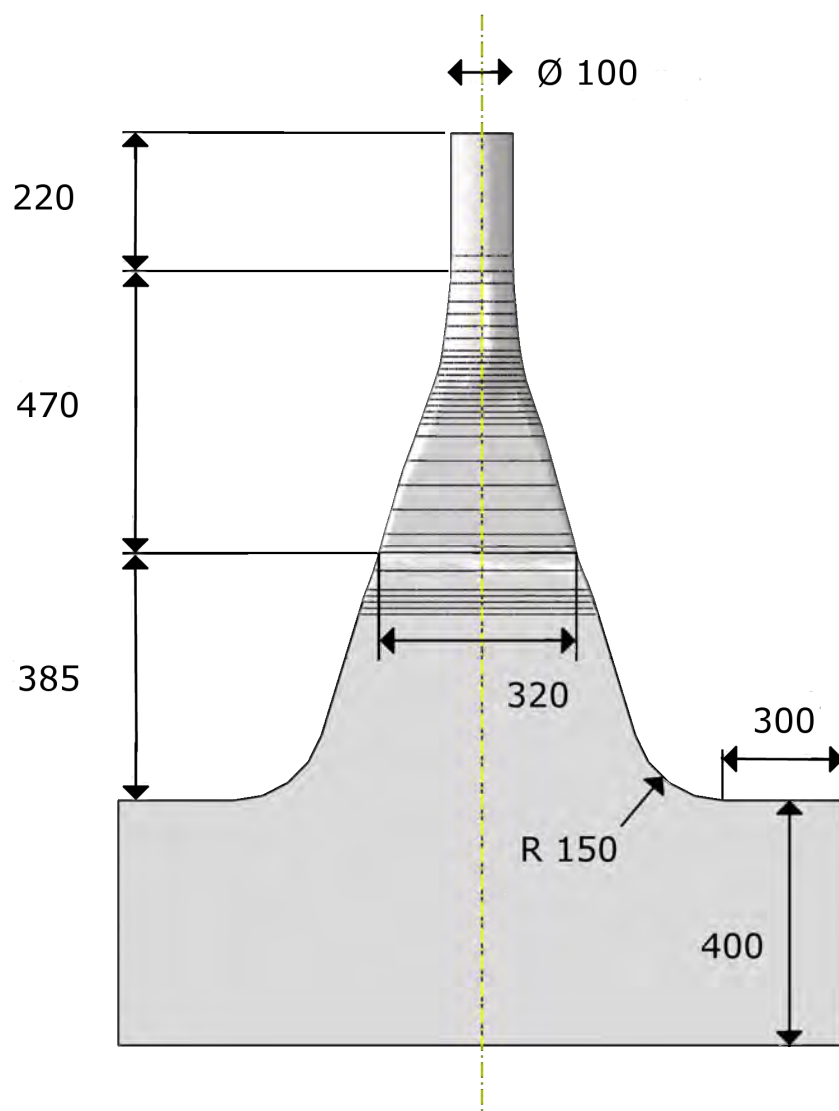


Abbildung 5.2: Frontansicht des geschmiedeten Hängermodells

Für den Lasteinleitungsbereich A wurde der Rundstahlhänger in Form eines Zylinders um 220 mm verlängert. Dieser Wert ergibt sich aus der Überlegung, dass sich erst ab einer gewissen Länge eine konstante Spannungsverteilung über den Querschnitt ein-

stellt. Der Durchmesser des Hängers beträgt 100 mm. Der Abschnitt C wurde ähnlich wie im Kapitel 3 modelliert. Das Knotenblech hat eine Dicke von 50 mm und sollte die Form des weiteren Anschlusses an den Hauptträger wiedergeben. Da der Anschluss der Konstruktion an den Steg keinen Einfluss auf die Hauptspannungen im Bereich B haben sollte, wurde für die freie Knotenblechhöhe, d.h. die Höhe zwischen Steg und Schweißnaht, 385 mm gewählt.

Die Abbildung 5.4 zeigt den Übergang vom Rundstahl zum Spaten in einer vergrößerten Seitenansicht. Hier erkennt man den stetigen Verlauf des Hängers. Auch sind die an der Oberfläche vorhandenen Blechunebenheiten gut sichtbar. Weiters sind die Faktoren der Querschnittflächenerweiterung in Bezug auf die Regelquerschnittfläche des Hängers angegeben.

### 5.1.2 Blechunebenheiten, Krümmungsverlauf

Bei der Strukturspannung gehen neben der Nennspannung alle spannungserhöhenden Effekte aus den Bauteilgeometrien ein. Um den Einfluss der Blechunebenheiten zu untersuchen, wurde die Krümmung der Oberfläche des geschmiedeten Hängers durch eine Krümmungslinie angezeigt. Mithilfe dem CAD Programm Nemetschek Allplan konnten die Krümmungsverläufe entlang des Hängers dargestellt werden. Für eine detaillierte Ausführung zum Krümmungsband sei auf das Allplan Handbuch [17] verwiesen.

In Abbildung 5.5 ist die Krümmungslinie des realen, geschmiedeten Hängeranschlusses zu sehen. Ausgehend vom Bereich A, der den angeschlossenen Zylinder beinhaltet, wird der Krümmungsverlauf dargestellt. Man erkennt, dass der Hänger in den Bereichen B bis F Blechunebenheiten aufweist. Je größer der Radius der Kurve ist, desto kleiner ist der Abstand zwischen Bezugs- und Krümmungslinie. Bei einer Geraden ist die Krümmungslinie deckungsgleich mit der Bezugslinie  $R = \infty$ . Bei Rechtskurven befindet sich die Krümmungslinie oberhalb, bei Linkskurven unterhalb der Bezugslinie. Um so kleiner der Radius ist, desto größer ist die Krümmung. Dies bedeutet, dass große Krümmungen einer geometrischen Kerbe gleich kommen. Beim Knollen kommen minimale Radien bis zu 38,4 mm und im Bereich der Schweißnaht bis zu 66,7 mm vor.

Der Bereich im roten Quadrat wird in Abbildung 5.6 vergrößert dargestellt, um die Unebenheiten besser zu erkennen. In Abbildung 5.7 ist der Krümmungsverlauf des geschmiedeten Hängers ohne Blechunebenheiten abgebildet. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Radien keine Unebenheiten darstellen, sondern die Form des Knollens bzw. des Hängers wiedergeben.



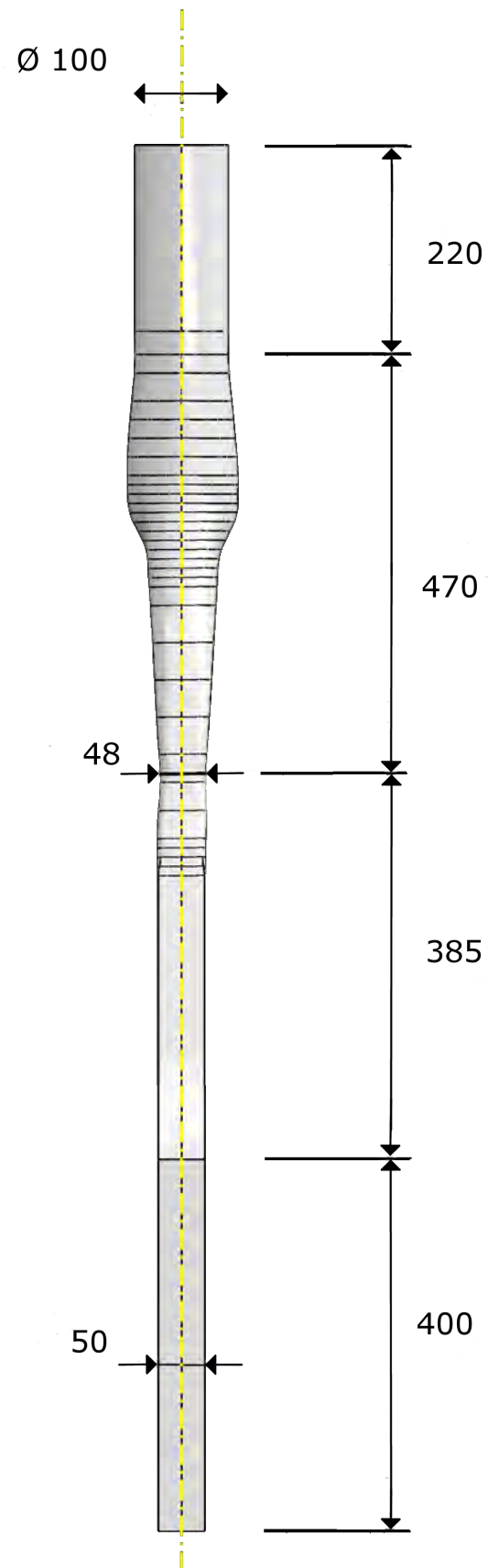


Abbildung 5.3: Seitenansicht vom geschmiedeten Hängermodell

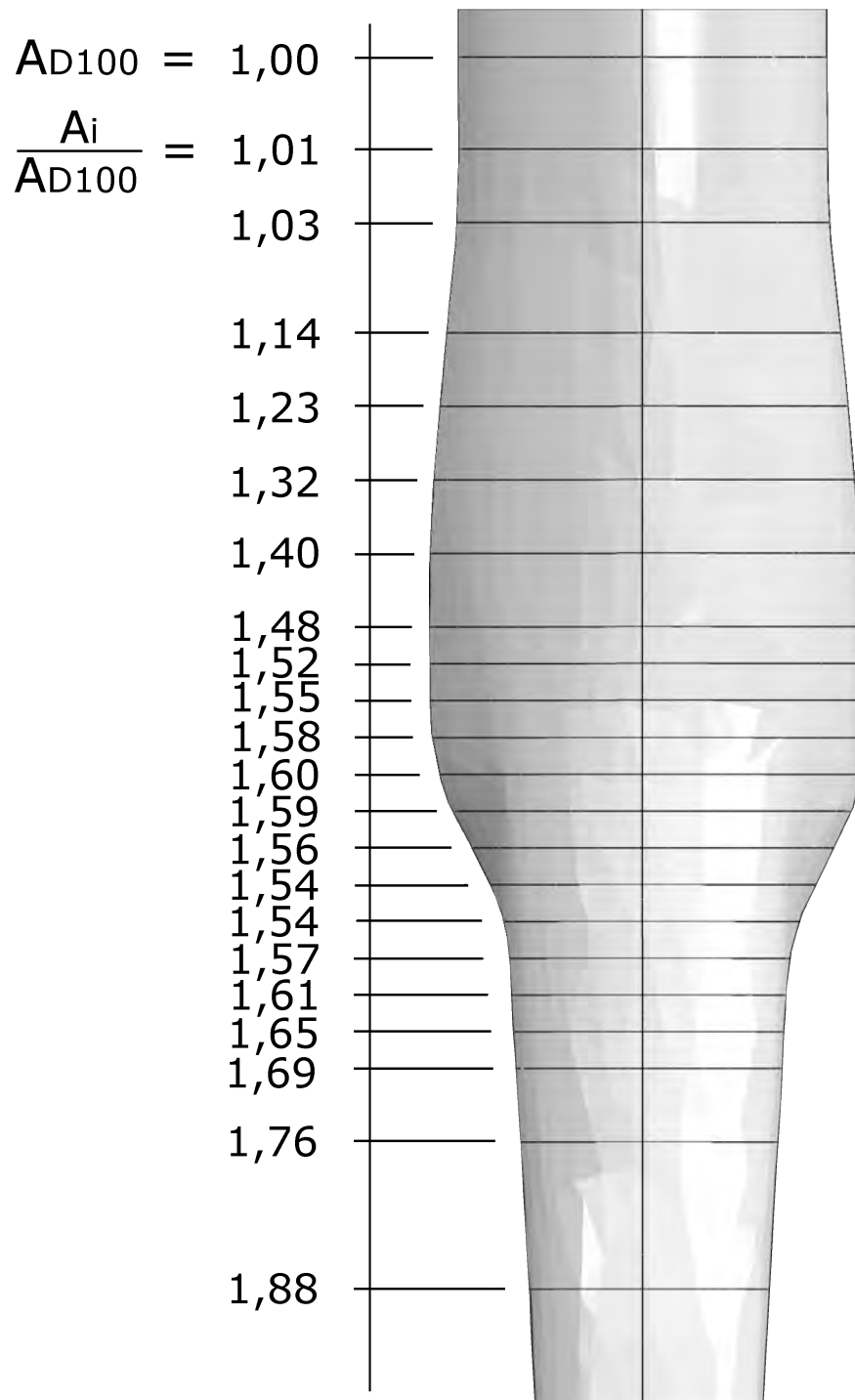


Abbildung 5.4: Übergang vom Rundstahl zum Spaten

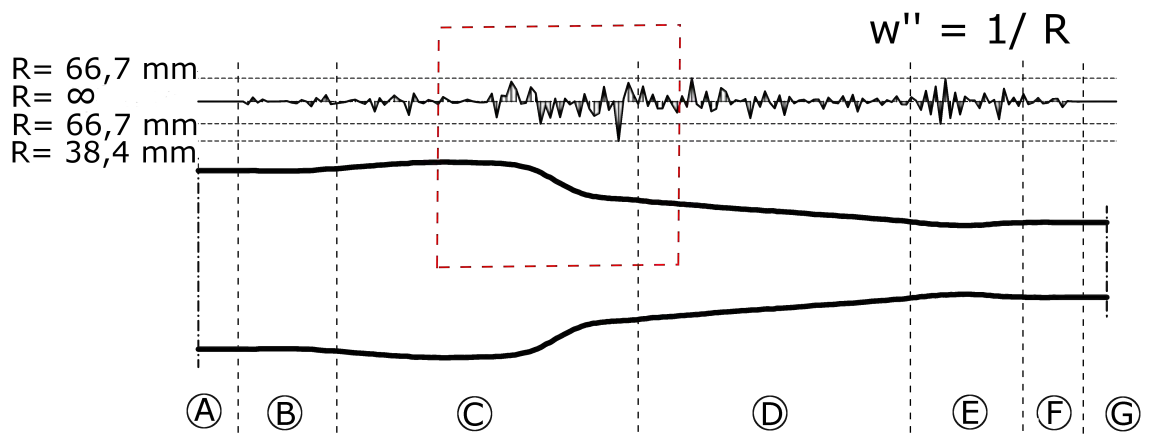


Abbildung 5.5: Realer geschmiedeter Hänger

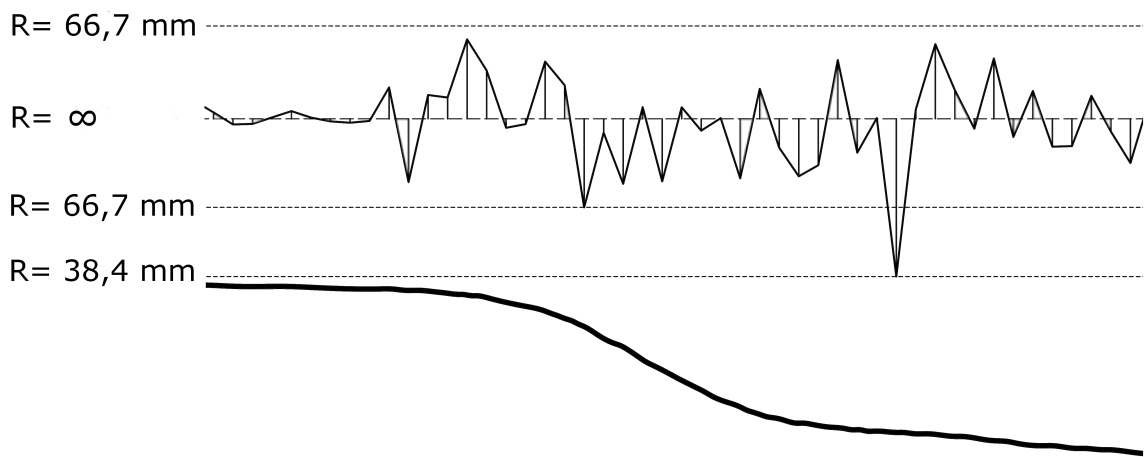


Abbildung 5.6: Ausschnitt des realen geschmiedeten Hängers

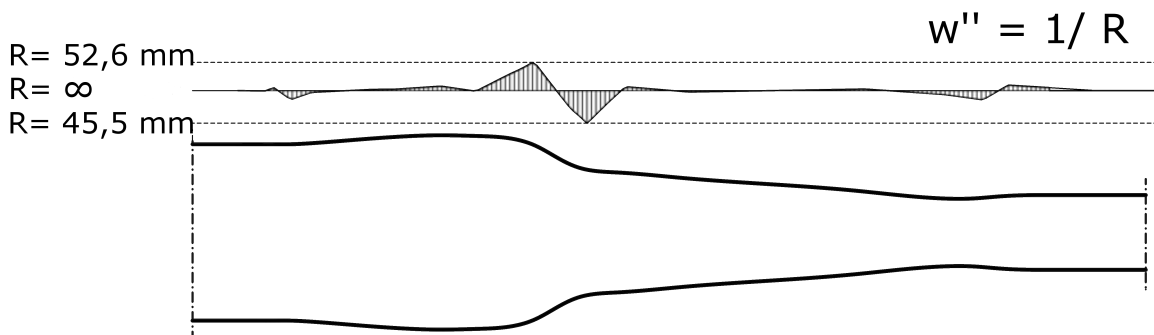
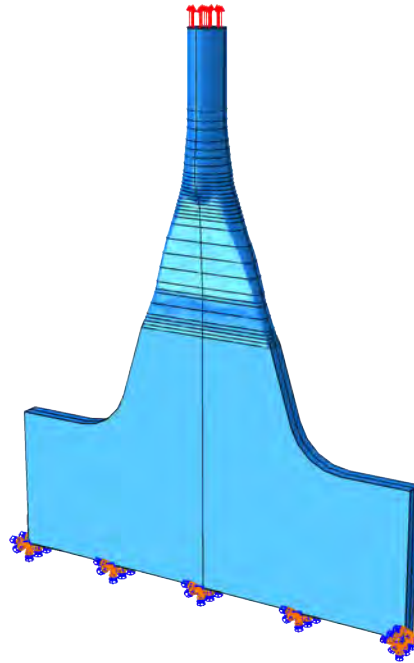


Abbildung 5.7: Geschmiedeter Hänger ohne Blechunebenheiten

### 5.1.3 Randbedingungen, Lasteinleitung

Das Modell wurde an der unteren Fläche vollständig eingespannt, siehe Abbildung 5.8. Das bedeutet, dass die Verschiebungen und Verdrehungen in die Raumrichtungen X, Y und Z gleich null gesetzt wurden. Eine seitliche Einspannung am Steg, wie sie in Kapitel 3 beim vereinfachten Modell angesetzt worden ist, hat keinen Einfluss auf die Hauptspannungen der betrachteten Zonen und wurde daher auch nicht angebracht.



**Abbildung 5.8:** Auflagerbedingungen

Die Lasteinleitung erfolgte über den Regelquerschnitt und wurde ähnlich zu Kapitel 3 gewählt. Unabhängig voneinander wurde eine Normalkraft (Zug) mit 1000 N, ein positives Moment um die starke ( $M_z=1000$  Nmm) sowie ein positives Moment um die schwache Achse ( $M_x=1000$  Nmm) aufgebracht. Die Belastungen wurden über Flächenlasten eingeleitet, siehe Abbildung 5.9. Die Normalkraft greift auf die ganze Kreisfläche an. Die Momente mit 1000 Nmm wurden mit einer über den Halbkreis verteilten Flächenlast von 23,56 N belastet. Dabei wirkt die Flächenlast auf der einen Seite als Druck- und auf der anderen Seite als Zugkraft, siehe Abbildung 5.9b.

Als Lasteinleitungslänge wurden 220 mm gewählt, siehe Kapitel 5.1.1. Im Abschnitt 5.2 sind in den Diagrammen die 1. Hauptspannungen unter verschiedenen Belastungen dargestellt. Die Lasteinleitung wirkt jeweils im Bereich A. Unter einer Normalkraftbelastung stellt sich relativ rasch eine konstante Spannungsverteilung über den Regelquerschnitt ein, siehe zum Beispiel Abbildung 5.13b. Unter den Momentenbelastungen um die Z- und X-Achse stellt sich erst ab einer Länge von circa 90 mm eine konstante Spannungsverteilung über den Querschnitt ein.

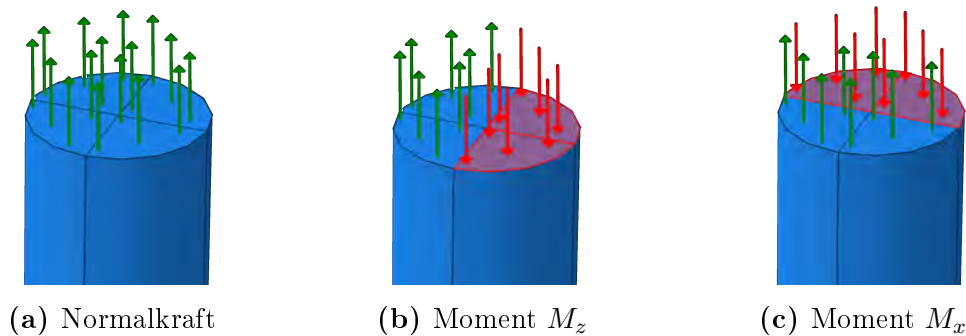


Abbildung 5.9: Lasteinleitung mithilfe von Flächenlasten

#### 5.1.4 Vernetzung

Die Vorgangsweise für die Vernetzung des Volumenmodells ist ähnlich der in Kapitel 3.1.4 beschriebenen. Zuerst wurde der 3D gescannte Bereich in mehrere Teilstücke geteilt. Mit sogenannten *Seeds* entlang den Modelkanten wurden die Elementlängen bestimmt. Für die automatische Vernetzung wurden zwei verschiedene Algorithmen verwendet, siehe Abbildung 5.10. Der gelbe Bereich wurde mit *Sweep Meshing* und die rosaroten Teile mit *Free Meshing* vernetzt. Beim *Sweep Meshing* Algorithmus wurden Hexaederelemente des Typs *C3D20R* verwendet.

Bei den rosaroten Bereichen handelt es sich um die Übergangsbereiche des gescannten Modells und der angeschlossenen Erweiterungen. Durch die komplizierte Geometrie in diesem Bereich musste mit dem *Free Meshing* Algorithmus gearbeitet werden. Dabei wurden Tetraederelemente des Typs *C3D10* verwendet. Da diese Teilstücke weit entfernt von den kritischen Bereichen sind, hat die Modellierung in diesem Bereich keinen Einfluss auf deren Strukturspannungen. Jedoch kommt es in diesen Übergangsbereichen zu Spannungsspitzen, die aufgrund der Wahl der Modellierung entstehen und daher nicht berücksichtigt werden dürfen.

In Abbildung 5.11 sind die Bereiche Knollen S1 und die Schweißnaht S3 mit dem fertig erstellten Netz zu sehen. Bei diesen zwei Bereichen wurde für die Netzverfeinerung eine Elementlänge von 1 mm gewählt. In den anderen Bereichen des Hängers erhöhen sich die Elementlängen auf bis zu 20 mm.

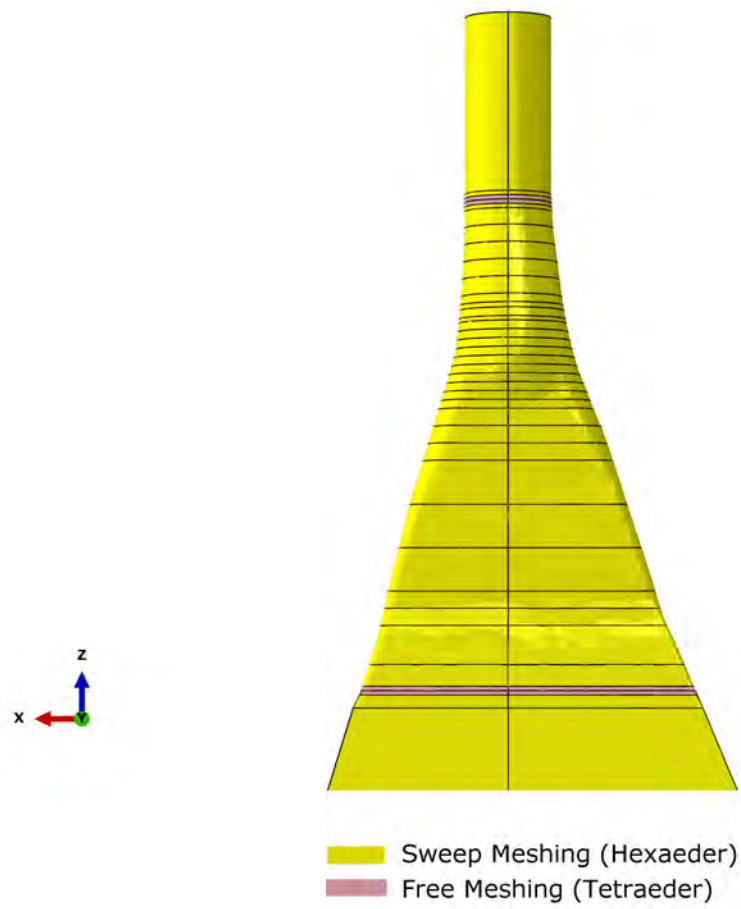


Abbildung 5.10: Verwendete Vernetzungsalgorithmen

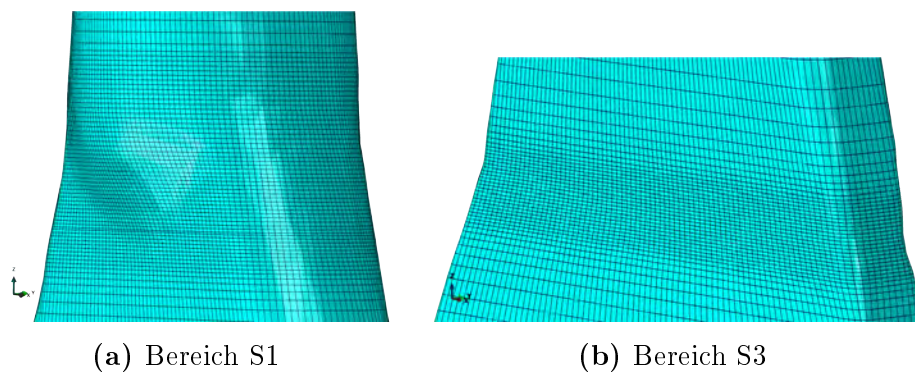


Abbildung 5.11: Netzverfeinerung in den kritischen Bereichen

## 5.2 Ergebnisse

Mit Hilfe des Finite Elemente Programms Abaqus FEA wurden die Strukturspannungen der Hängermodelle ermittelt. Anhand der unterschiedlichen Farben für verschiedene Spannungserhöhungen kann man sich ein erstes Bild der vorkommenden Spannungsspitzen machen.

Im folgenden Kapitel werden die Spannungskurven immer entlang eines bestimmten Pfades angegeben. Die Verläufe geben ein quantitatives Bild der Spannungsverläufe an. Der maximale Strukturspannungswert muss nicht unbedingt auf diesem Pfad liegen. Erst durch das Auslesen der Integrationspunkte der Elemente eines kritischen Bereiches konnten die maßgebenden Werte für die Strukturspannung ermittelt werden. Die maximalen bzw. minimalen Strukturspannungswerte werden in den Tabellen für die Strukturformzahl angegeben.

### 5.2.1 Berechnung der Nennspannungen

Für den geschmiedeten Hängeranschluss wurden vier Bereiche betrachtet, siehe Abbildung 5.12a. Im Bereich des Knollens wurden zwei Gebiete betrachtet. Der Bereich S1 beinhaltet die Zone unterhalb des Knollens. Die Untersuchungen der Randzonen des Knollens werden im Bereich S1\_e angegeben. Um einen Vergleich mit dem geschweißten Hängeranschluss für die kritische Zone des Freischnittes durchführen zu können, wurde beim geschmiedeten Hänger ein äquivalentes Teilstück ausgewählt. Im Bereich des Spatens S2 wurde für den Vergleich ein möglichst neutrales Stück ausgewählt. Dabei wurde besonders darauf geachtet, dass die zwei anderen Bereiche S1 und S3 keinen Einfluss auf die Ergebnisse im gewählten Teilstück haben. Der Bereich S3 enthält die Schweißnaht, die den Übergang vom Spaten zum Knotenblech des Hauptträgers bildet.

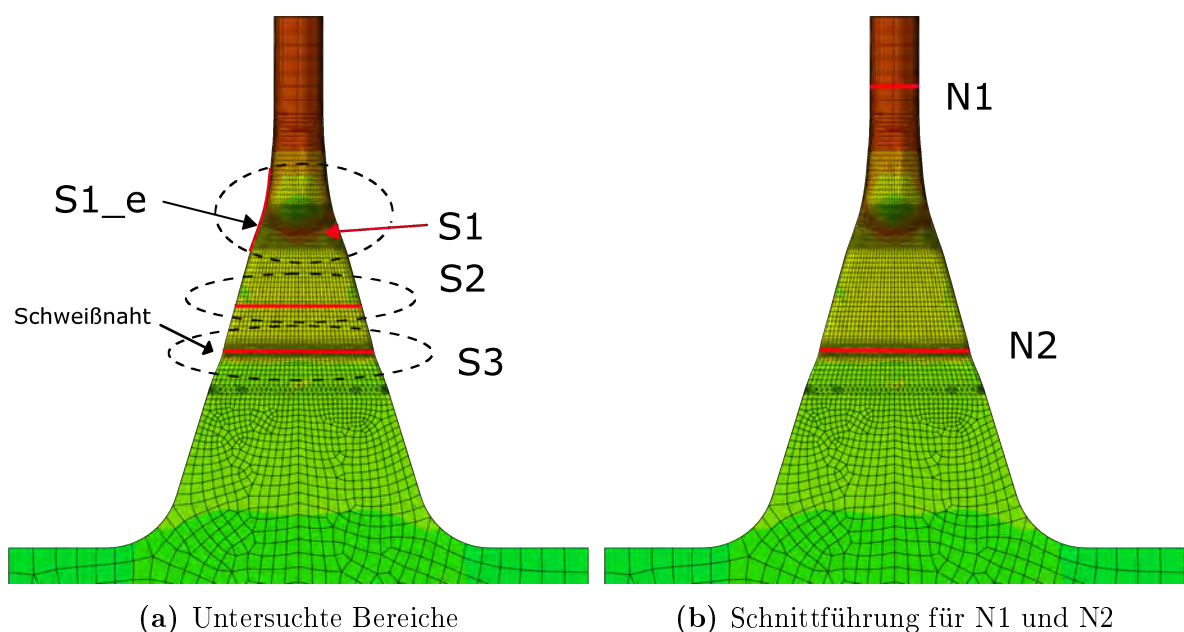


Abbildung 5.12: Nennspannungsberechnung

Für die Strukturformzahl sind neben den ermittelten Strukturspannungen der Abaqus FEA Berechnungen auch die Nennspannungen erforderlich. Für die Bereiche S1 und S1\_e im Knollen wird für die Nennspannung der Regelquerschnitt des Hängers herangezogen, siehe Abbildung 5.12b. Bei dem Hängerquerschnitt handelt es sich um eine Kreisfläche mit einem Durchmesser von 100 mm. Die Nennspannungen N1 werden mit folgenden Formeln berechnet:

$$\sigma_{N1 \text{ Normalkraft}} = \frac{N}{A} = \frac{1000 \text{ N}}{7853.98 \text{ mm}^2} = 1.27 * 10^{-1} \text{ N/mm}^2 \quad (5.1)$$

$$\sigma_{N1 \text{ MomentZ}} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{1000 \text{ Nmm}}{98174.77 \text{ mm}^3} = 1.02 * 10^{-2} \text{ N/mm}^2 \quad (5.2)$$

$$\sigma_{N1 \text{ MomentX}} = \frac{M_x}{W_x} = \frac{1000 \text{ Nmm}}{98174.77 \text{ mm}^3} = 1.02 * 10^{-2} \text{ N/mm}^2 \quad (5.3)$$

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, gibt der Leitfaden zum Anhang NA.F Bemessung von Hängern an Stabbogenbrücken [2] die Abmessungen der Schweißnaht explizit an. Da es sonst keine eindeutigen Querschnittsabmessungen im Bereich des Spatens gibt, werden in den Bereichen S2 und S3 für die Nennspannung die Abmessungen der Schweißnaht herangezogen, siehe Abbildung 5.12b. In diesem Fall hat die Schweißnaht eine Länge von 320 mm und eine Breite von 48 mm. Die Nennspannungen N2 ergeben sich damit zu:

$$\sigma_{N2 \text{ Normalkraft}} = \frac{N}{A} = \frac{1000 \text{ N}}{15600 \text{ mm}^2} = 6.41 * 10^{-2} \text{ N/mm}^2 \quad (5.4)$$

$$\sigma_{N2 \text{ MomentZ}} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{1000 \text{ Nmm}}{845000 \text{ mm}^3} = 1.18 * 10^{-3} \text{ N/mm}^2 \quad (5.5)$$

$$\sigma_{N2 \text{ MomentX}} = \frac{M_x}{W_x} = \frac{1000 \text{ Nmm}}{124800 \text{ mm}^3} = 8.01 * 10^{-3} \text{ N/mm}^2 \quad (5.6)$$

## 5.2.2 Asymmetrischer Hänger

Das asymmetrische Modell ist der 3D gescannte geschmiedete Hänger mit Blechenheiten und Herstellungstoleranzen. Für die Strukturspannungsanalyse wird das Modell mit den unterschiedlichen Belastungen Normalkraft, Moment um die Z-Achse und Moment um die X-Achse belastet. Die Werte der 1. Hauptspannung werden entlang der jeweiligen Pfade an der Modelloberfläche ausgewertet. Die Spannungsverläufe sind entlang des ganzen Hängermodells dargestellt.

### Strukturformzahlen für alleinige Normalkraftbeanspruchung

Bei dem Modell mit leicht asymmetrischer Form führt die Normalkraftbelastung zu Spannungsbildern, wie sie in den Abbildungen 5.13 und 5.14 dargestellt werden. Man erkennt, dass der ganze Hänger zwar unter Zug steht, jedoch sind die Werte der 1. Hauptspannung auf der Vorderseite bzw. Hinterseite unterschiedlich groß. Aufgrund

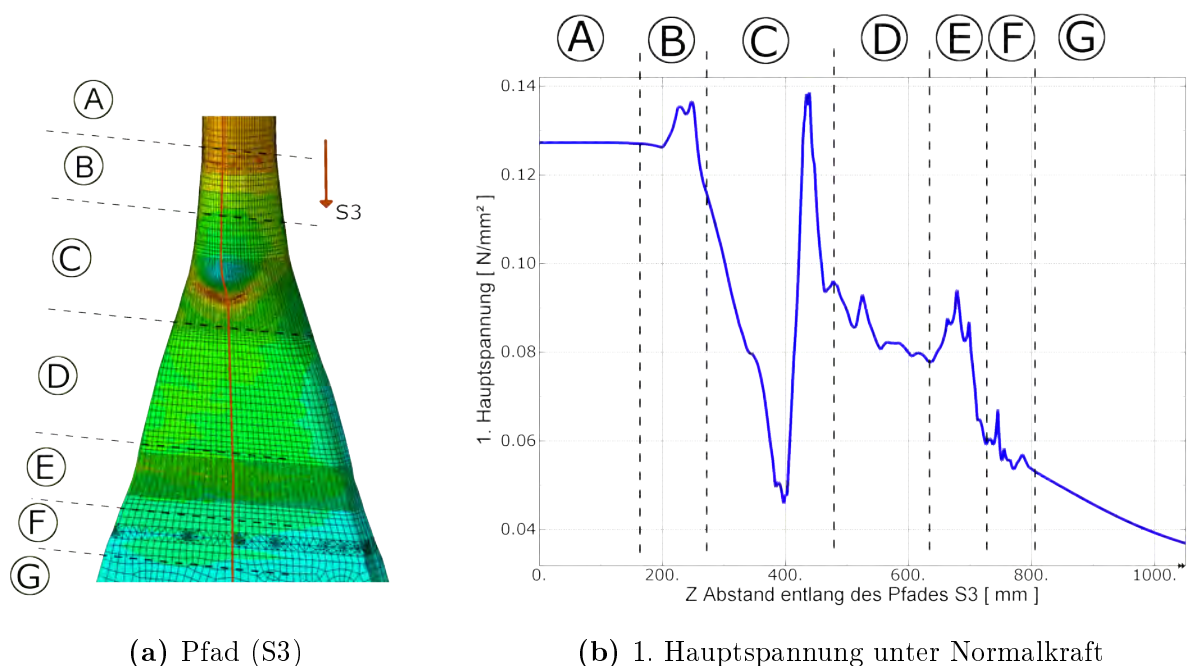


der durch Asymmetrie entstehenden Exzentrizität erzeugt die Normalkraft ein Moment. Durch dieses Moment kommt es zu den verschiedenen Spannungswerten auf beiden Seiten.

Wie eingangs erwähnt, stellen die Spannungsverläufe die 1. Hauptspannungen entlang des Hängers dar. Die maximale Spannungsspitze muss nicht unbedingt auf den angegebenen Pfaden liegen. Erst durch Auslesen der Integrationspunkte der Elemente in den zu untersuchenden Bereichen wurde der maximale Spannungswerte ermittelt.

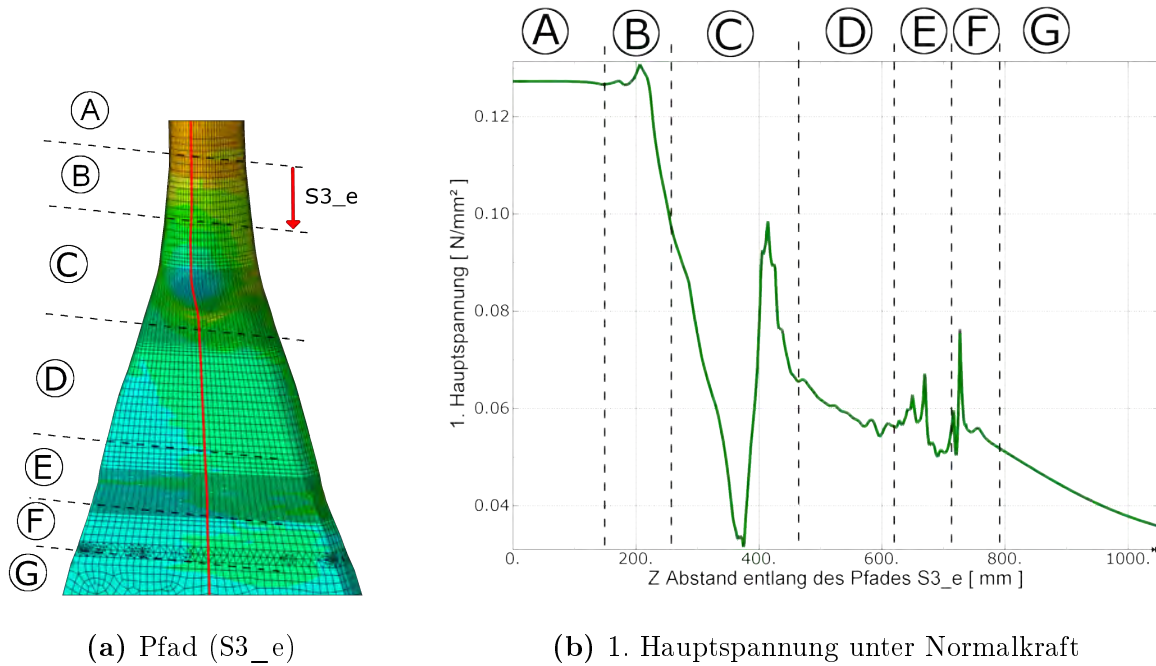
Die Spannungsverläufe in den Abbildungen 5.13 und 5.14 sind entlang den Pfaden S3 auf der Vorderseite und S3\_e entlang der Hinterseite des Hängers dargestellt. Wie in den zwei Abbildungen ersichtlich, stellt sich im Bereich A für 1. Hauptspannung die Nennspannung ( $\sigma_{N1}$ ) des Regelquerschnitts des Hängers ein. Die in Abschnitt B und F auftretenden Spannungsspitzen ergeben sich aus der Modellierung und dürfen nicht für die Strukturformzahl berücksichtigt werden. Der Spannungsverlauf fällt im Abschnitt C stark ab und erreicht ein lokales Minimum am am weitest entfernten Punkt am Knollen in Z-Richtung (Spitze des Knollens). Danach steigt die Spannung stark an und erreicht ein lokales Maximum. Das Maximum befindet sich beim Übergang vom Knollen zum Spaten. Die Erhöhung im Vergleich zur Nennspannung beträgt das 1,18-fache.

Die im Bereich D auftretenden Spannungsspitzen werden durch die Blechunebenheiten im Spaten erzeugt. Der Abschnitt E stellt den Übergang vom Spaten über die Schweißnaht in den Hauptträger dar. Die Werte der Spannungsspitzen haben eine 1,62-fache Erhöhung im Vergleich zur Nennspannung ( $\sigma_{N2}$ ). Danach nimmt die Spannung relativ konstant ab, siehe Bereich G.



**Abbildung 5.13:** Spannungsverlauf auf der Vorderseite des Hängers

Generell ist zu erwähnen, dass die Spannungen am Querschnitttrand um die starke



**Abbildung 5.14:** Spannungsverlauf auf der Hinterseite des Hängers

Achse des Hängers kleiner sind als die Spannungen entlang des Pfades S3. In der Tabelle 5.1 sind die Spannungen und Strukturformzahlen in den Bereichen S1, S1\_e, S2 und S3 angegeben.

**Tabelle 5.1:** Spannungen und Strukturformzahl unter Normalkraft

		Bereich S1	Bereich S1_e	Bereich S2	Bereich S3
Nennspannung	$[N/mm^2]$	1,27E-01	1,27E-01	6,41E-02	6,41E-02
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	1,51E-01	1,30E-01	8,60E-02	1,04E-01
Strukturformzahl	$[-]$	1,18	1,02	1,34	1,62

### Strukturformzahlen für alleinige Momentenbeanspruchung um die Z-Achse

Unter der Momentenbelastung um die Z-Achse wurden die 1. Hauptspannungen entlang der Pfade S4 und S4\_e seitlich des Hängers ausgewertet. In Abbildung 5.15 ist der Spannungsverlauf vom Hänger im Zugbereich und in Abbildung 5.16 der im Druckbereich abgebildet. Die maximalen Spannungswerte werden durch Auslesen der Integrationspunkte der Elemente ermittelt. Der maximale Wert muss nicht unbedingt auf den angegebenen Pfaden liegen. Generell ist zu sagen, dass die Spannungsverläufe Zug- und Druckbereich sehr ähnlich sind. Kleinere lokale Spannungsspitzen im Verlauf resultieren aus den Blechunebenheiten.

In Bereich A ergibt sich für die 1. Hauptspannung nach einer Lasteinleitungsphase die Nennspannung ( $\sigma_{Mz}$ ) des Regelquerschnitts des Hängers. Wie in Kapitel 5.1.4 beschrieben, sind die Spannungsspitzen im Bereich B und F für die Strukturformzahl nicht zu berücksichtigen. Ab dem Übergang vom Rundstahl zum Spaten kommt es

zu einer kontinuierlichen Spannungsabnahme. Die Spannungserhöhung im Bereich E entsteht durch die geometrische Kerbe der Schweißnaht.

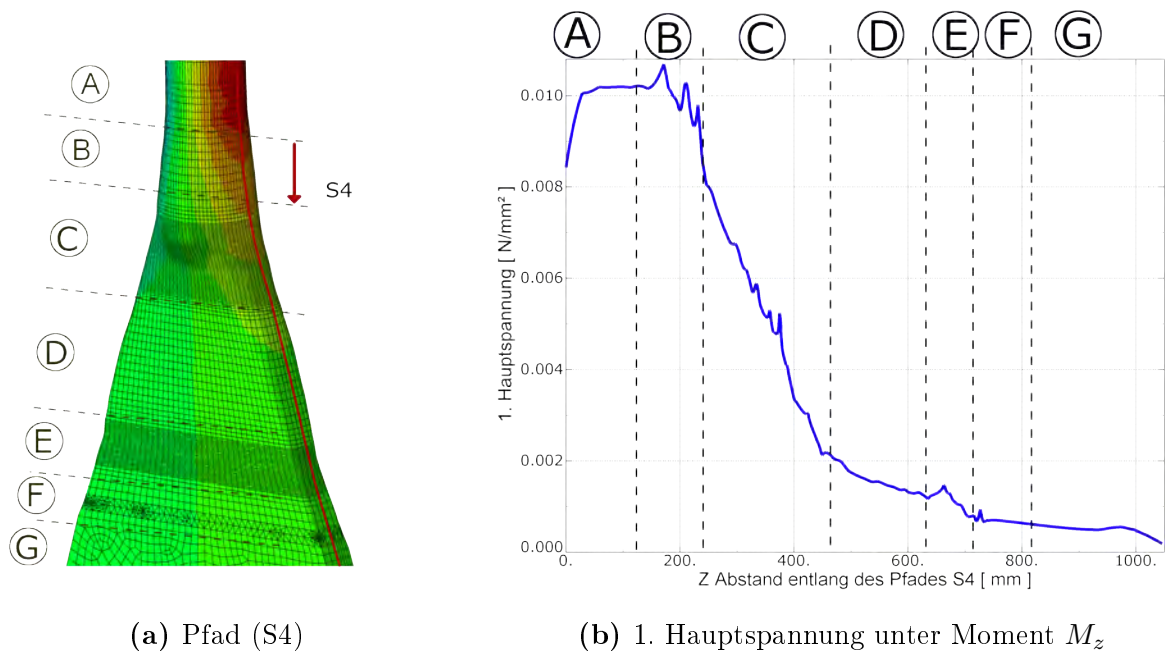


Abbildung 5.15: Spannungsverlauf im Zugbereich

In Tabelle 5.2 sind Strukturformzahlen ersichtlich. Auffällig ist, dass die Strukturformzahl S1 deutlich unter 1 liegt. Dies resultiert aus der größeren Querschnittfläche des Knollens gegenüber dem Rundstahlquerschnitt. Die Spannungserhöhung für S2 und S3 im Vergleich zur Nennspannung beträgt circa das 1,3-fache und liegen im Zugbereich.

Tabelle 5.2: Spannungen und Strukturformzahl bei Moment  $M_z$

		Bereich S1	Bereich S1_e	Bereich S2	Bereich S3
Nennspannung	$[N/mm^2]$	1,02E-02	1,02E-02	1,18E-03	1,18E-03
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	1,50E-03	6,18E-03	1,56E-03	1,53E-03
Strukturformzahl	$[-]$	0,15	0,61	1,32	1,29

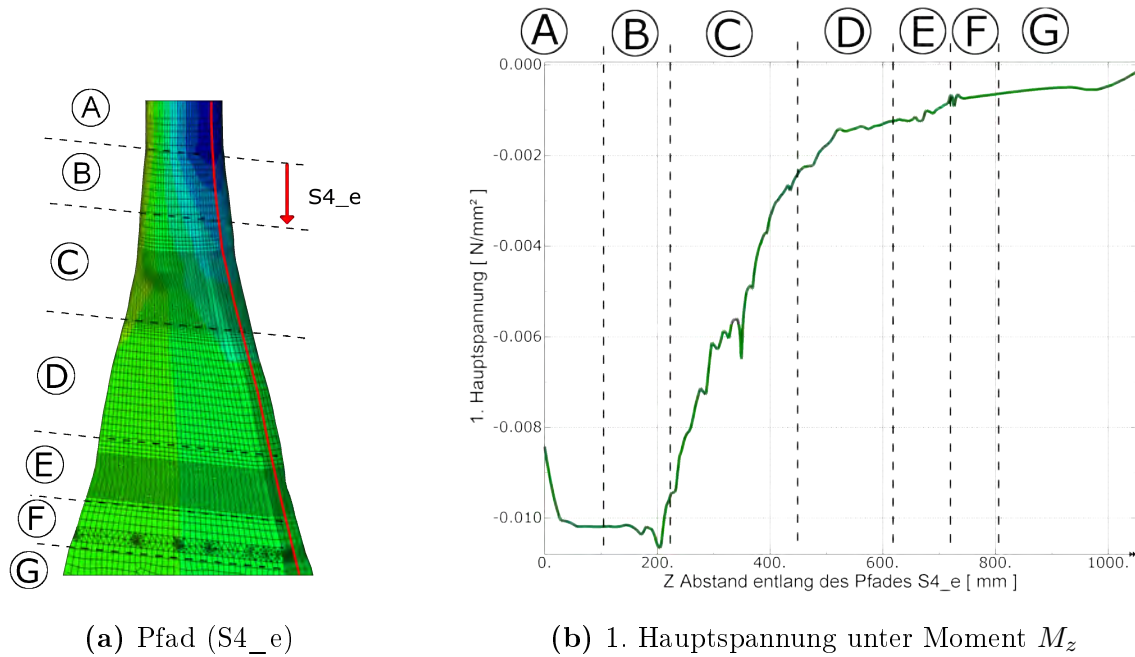


Abbildung 5.16: Spannungsverlauf im Druckbereich

### Strukturformzahlen für alleinige Momentenbeanspruchung um die X-Achse

Für die Momentenbelastung um die X-Achse wurden die gleichen Pfade wie bei der Normalkraft ausgewertet. Die Abbildung 5.17 zeigt den Zugbereich und Abbildung 5.18 den Druckbereich des geschmiedeten Hängers. Die Spannungsverläufe von Zug- und Druckbereich sind ausgenommen vom Vorzeichen der Belastung fast gleich. Weiters ähnelt der Spannungsverlauf dem unter Normalkraft.

Nach einer Lasteinleitungsphase in Bereich A ergibt sich für die 1. Hauptspannung die Nennspannung ( $\sigma_{M_x}$ ) des Regelquerschnitts des Hängers. Wie bereits erwähnt, dürfen die Spannungserhöhungen im Abschnitt B und F nicht berücksichtigt werden. Im Bereich C kommt es zu einem Spannungsabfall. Das lokale Minimum befindet sich an der Spitze des Knollens. Nach dem Minimum steigt der Spannungsverlauf an und es kommt zu einem lokalen Maximum. Die maximale Spannungsspitze befindet sich unterhalb des Knollens. Die für diesen Bereich geltende Strukturformzahl S1 hat einen Wert von 0,99, siehe Tabelle 5.3. Im Bereich D ist der Spannungsverlauf relativ konstant. Die Unregelmäßigkeiten im Verlauf ergeben sich aus den Blechunebenheiten. Die aus diesem Bereich stammende Strukturformzahl S2 lautet 0,9.

Im Abschnitt E kommt es durch die geometrische Kerbe der Schweißnaht zu weiteren Spannungserhöhungen. Die Erhöhung im Vergleich zur Nennspannung beträgt das 1,29-fache. Die Strukturformzahl S3 bei Moment um die X -Achse ist ident mit dem Wert bei Momentenbelastung um die Z-Achse.

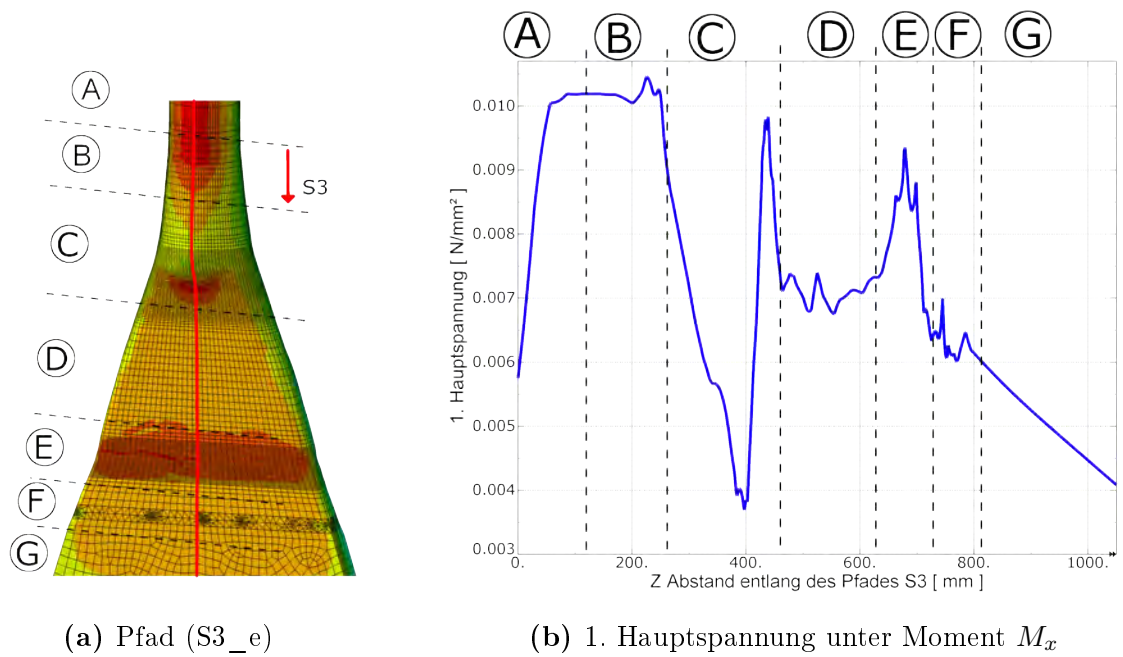


Abbildung 5.17: Spannungsverlauf im Zugbereich

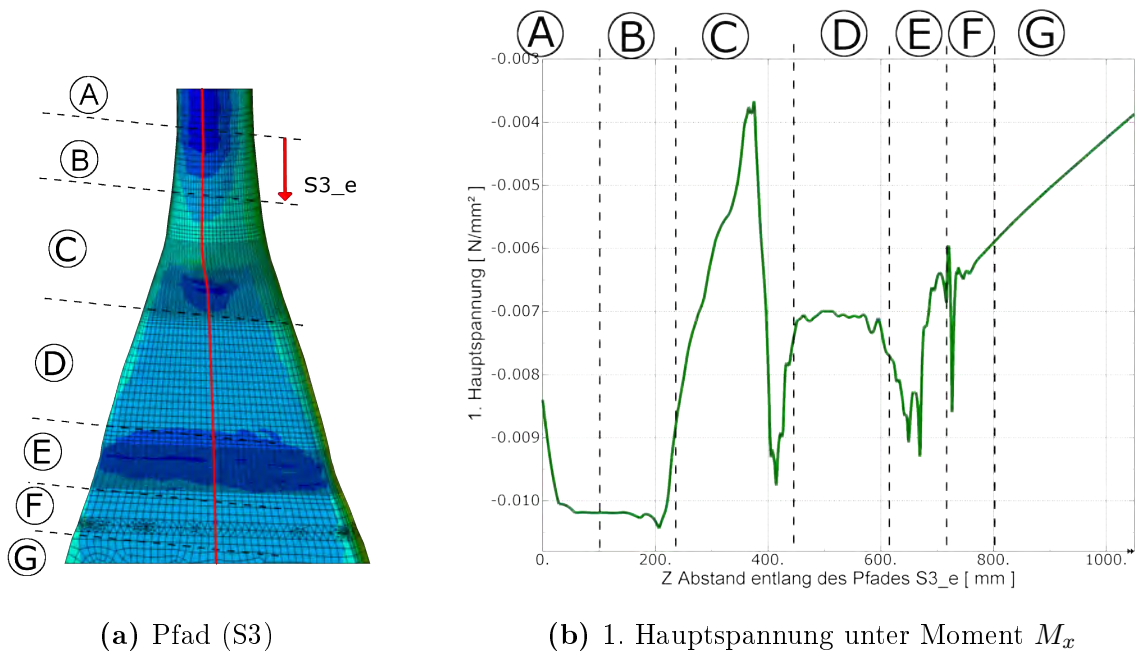


Abbildung 5.18: Spannungsverlauf im Druckbereich

Tabelle 5.3: Spannungen und Strukturformzahl bei Moment  $M_x$

		Bereich S1	Bereich S1_e	Bereich S2	Bereich S3
Nennspannung	$[N/mm^2]$	1,02E-02	1,02E-02	8,01E-03	8,01E-03
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	1,01E-02	6,79E-03	7,18E-03	1,03E-02
Strukturformzahl	$[-]$	0,99	0,67	0,90	1,29

### 5.2.3 Symmetrischer Hänger

Das symmetrische Hängermodell stellt einen quasi planmäßigen hergestellten Hänger dar. Dieses Modell wurde für den Vergleich mit dem nach Planmaßen modellierten geschweißten Hänger hergestellt. Ausgehend von der Schwerachse des asymmetrischen Modells wurde der Körper durch die Ebenen Y-X und Y-Z geschnitten. Daraus entstanden vier Teilkörper. Für das symmetrische Modell wurde das linke Viertel an der Hinterseite des asymmetrischen Modells gewählt. Bei der Wahl des Viertels wurde einerseits auf die Einhaltung der Geometrien geachtet, andererseits wurde ein Viertel mit möglichst geringen Blechunebenheiten verwendet.

Das Viertel wurde zwei Mal gespiegelt. Dadurch entstand ein doppelt symmetrisches Modell. Da es durch die Doppelsymmetrie keine Exzentrizitäten gibt, erzeugt die Normalkraft auch kein Moment. Jedoch ist zu beachten, dass die Blechunebenheiten an der Oberfläche des Hängers vorhanden bleiben. Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen Spannungsverläufe aufgrund unterschiedlicher Belastungen erläutert.

#### Strukturformzahlen für alleinige Normalkraftbeanspruchung

Entlang des Pfades S3 unter der Belastung Normalkraft ergibt sich ein Spannungsverlauf, wie in Abbildung 5.19 dargestellt. Der Verlauf des symmetrischen Modells ist fast gleich dem des asymmetrischen Modells auf der Hinterseite. Die Werte der 1. Hauptspannung vom quasi planmäßig modellierten Hänger liegen zwischen den Spannungswerten des asymmetrischen Modells, siehe Abbildung 5.13 und 5.14. Dies resultiert aus der nicht vorhandene Exzentrizität des symmetrischen Modells.

In Bereich A ist die 1. Hauptspannung gleich der Nennspannung ( $\sigma_{N1}$ ). Die in Abschnitt B und F auftretenden Spannungsspitzen dürfen aufgrund der Modellierung nicht für die Strukturformzahl berücksichtigt werden. Wie beim asymmetrischen Modell kommt es im Bereich C zu einem lokalen Minimum und Maximum. Die Strukturformzahl beim symmetrischen Modell beträgt jedoch statt 1,18 einen Wert von 0,94. Dieser Unterschied resultiert aus der Momentenwirkung von der exzentrisch angreifenden Normalkraft beim asymmetrischen Hänger.

Im Spatenbereich D kommt es zu einer kontinuierlichen Spannungsabnahme. Erst beim Übergang vom Spaten zum Hauptträger im Abschnitt E kommt es zu weiteren Spannungserhöhungen. Diese Erhöhungen ergeben sich aus der geometrischen Kerbe der Schweißnaht. Die Strukturformzahlen S2 und S3 für diese Bereiche sind in der Tabelle 5.4 angegeben. Im Vergleich zu den Strukturformzahlen des asymmetrischen Modelles sind die Werte um circa 20 % geringer.

**Tabelle 5.4:** Spannungen und Strukturformzahl unter Normalkraft

		Bereich S1	Bereich S1_e	Bereich S2	Bereich S3
Nennspannung	$[N/mm^2]$	1,27E-01	1,27E-01	6,41E-02	6,41E-02
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	1,20E-01	1,03E-01	6,93E-02	8,54E-02
Strukturformzahl	$[-]$	0,94	0,81	1,08	1,33

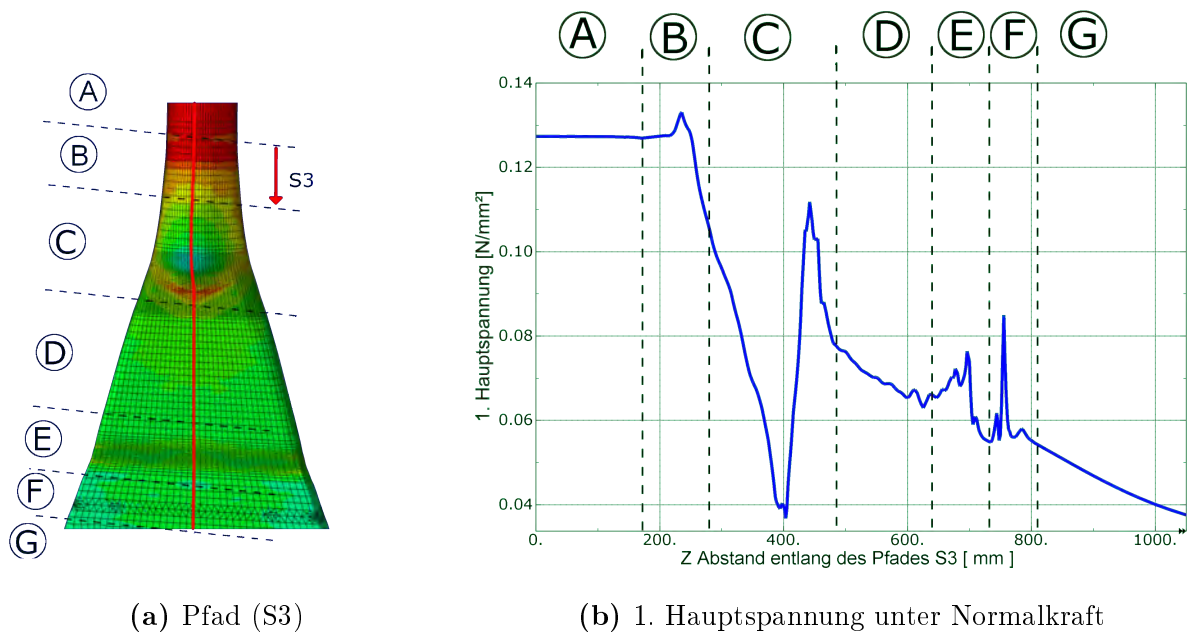


Abbildung 5.19: Spannungsverlauf im Zugbereich

### Strukturformzahlen für alleinige Momentenbeanspruchung um die Z-Achse

Für die Belastung Moment um die Z-Achse sind die Spannungsverläufe in der Abbildung 5.20 für den Zugbereich und in der Abbildung 5.21 für den Druckbereich dargestellt. Man erkennt, dass die Verläufe ähnlich zu den asymmetrischen Spannungsverläufen sind.

In den Diagrammen ist zu erkennen, dass im Bereich A nach der Lasteinleitung der Wert der 1. Hauptspannung gleich dem der Nennspannung ( $\sigma_{M_z}$ ) für den Regelquerschnitt des Hängers ist. Danach kommt es entlang des Hängers zu einer kontinuierlichen Spannungsabnahme. Die lokalen Spannungsspitzen werden durch Blechunebenheiten oder wie im Bereich E durch Unebenheiten der Schweißnaht erzeugt. Die Spannungsspitzen in den Bereichen B und F werden laut Kapitel 5.1.4 nicht berücksichtigt.

Die Tabelle 5.5 zeigt die Strukturspannungen und die zugehörigen Strukturformzahlen. Es zeigt sich, dass im Bereich des Knollens die Strukturformzahl circa 10 % geringer ist als beim asymmetrischen Modell. Im Bereich der Spatens und der Schweißnaht ist die Strukturformzahl fast identisch.

Tabelle 5.5: Spannungen und Strukturformzahl bei Moment  $M_z$ 

		Bereich S1	Bereich S1_e	Bereich S2	Bereich S3
Nennspannung	$[N/mm^2]$	1,02E-02	1,02E-02	1,18E-03	1,18E-03
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	1,00E-03	5,62E-03	1,58E-03	1,58E-03
Strukturformzahl	$[-]$	0,10	0,55	1,33	1,33

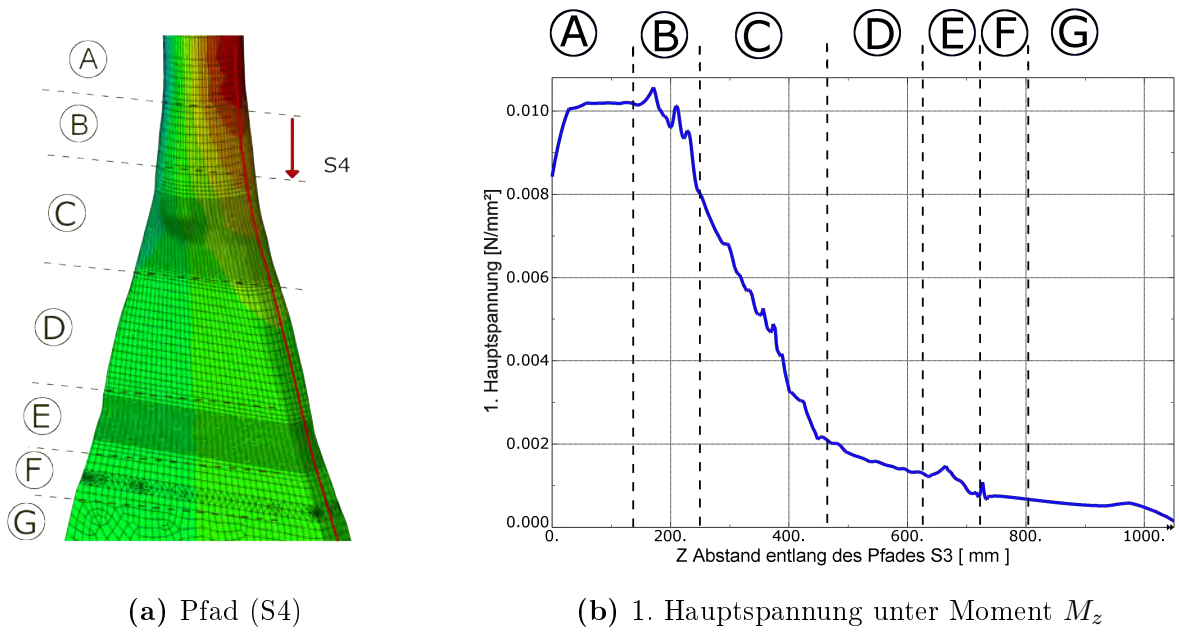


Abbildung 5.20: Spannungsverlauf im Zugbereich

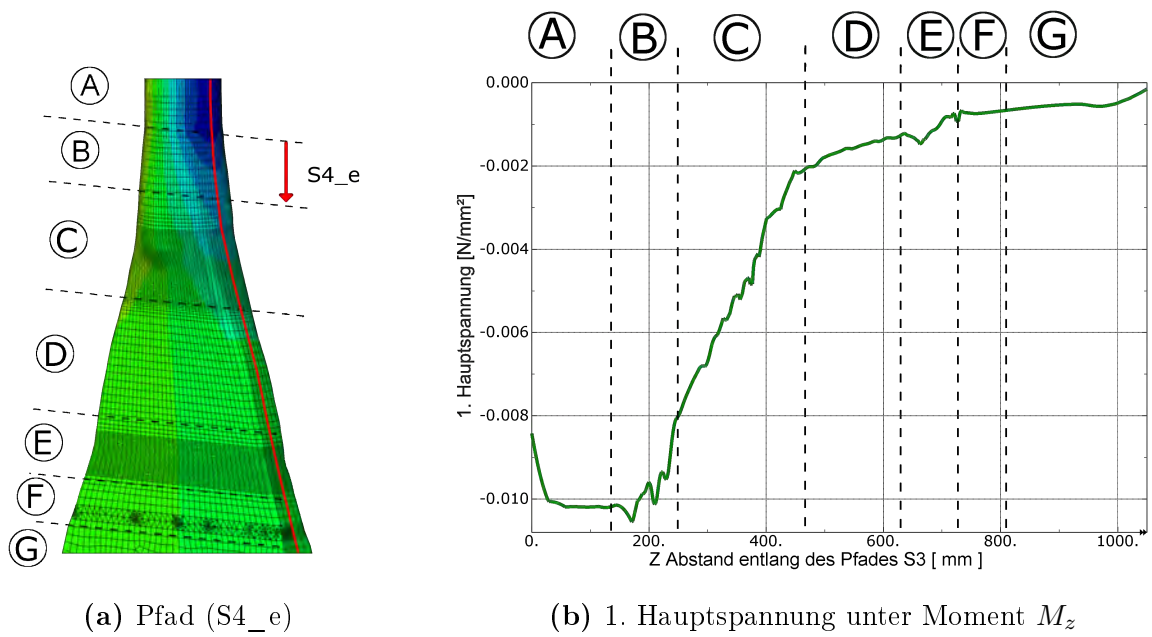
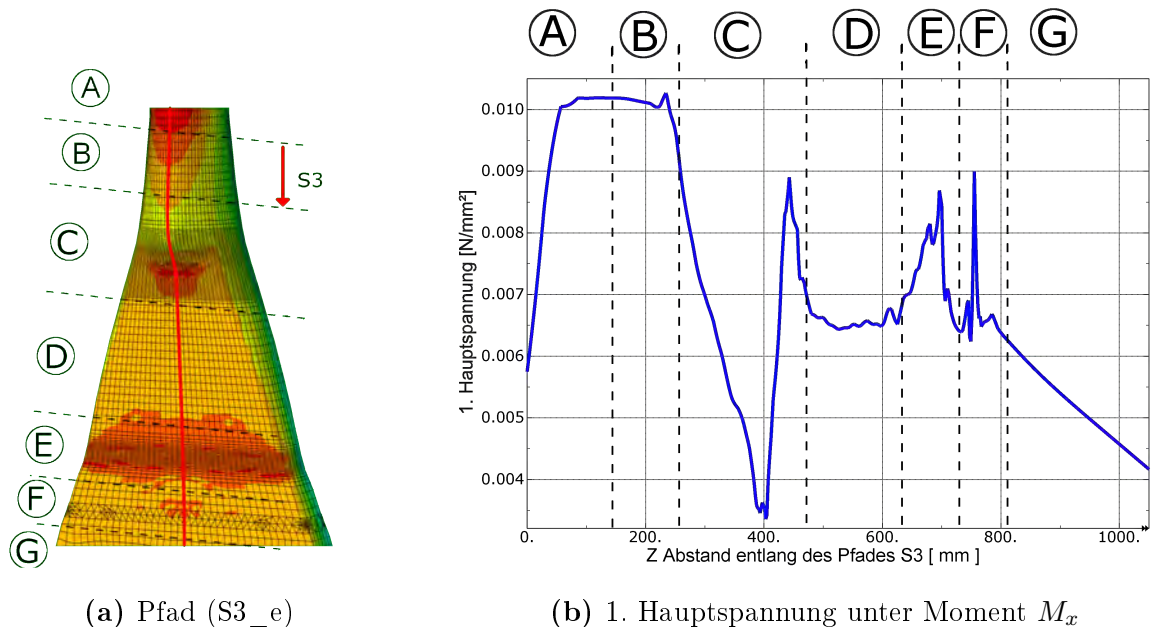


Abbildung 5.21: Spannungsverlauf im Druckbereich



### Strukturformzahlen für alleinige Momentenbeanspruchung um die X-Achse

In den Abbildungen 5.22 und 5.23 sind die Bereiche Zug und Druck des symmetrisch geschmiedeten Hängers unter der Momentenbelastung um die X-Achse zu sehen. Hierbei erkennt man fast identische Spannungsverläufe zum asymmetrischen Modell.



**Abbildung 5.22:** Spannungsverlauf im Zugbereich

Nach der Lasteinleitung im Bereich A ergibt sich eine konstante Spannung, die der Nennspannung des Regelquerschnittes des Hängers entspricht. Die extremen Spannungsspitzen in den Abschnitten B und F sind aus Modellierungsgründen nicht zu berücksichtigen. Der im Bereich C vorhandene Knoten weist wie bei der Normalkraft ein lokales Minimum und Maximum auf. Die maßgebende maximale Spannungsspitze befindet sich unterhalb des Knollens. Im Vergleich zu dem asymmetrischen Hänger ist die Strukturformzahl im Bereich des Knollens S1 und des Spatens S2 um circa 9 % geringer.

Die Strukturspannungen und Strukturformzahlen sind in der Tabelle 5.6 angegeben. Im Bereich E hat die Strukturformzahl S3 einen Wert von 1,29 und ist gegenüber dem asymmetrischen Modell um 15 % geringer.

**Tabelle 5.6:** Spannungen und Strukturformzahl bei Moment  $M_x$

		Bereich S1	Bereich S1_e	Bereich S2	Bereich S3
Nennspannung	$[N/mm^2]$	1,02E-02	1,02E-02	8,01E-03	8,01E-03
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	9,31E-03	6,23E-03	6,63E-03	9,00E-03
Strukturformzahl	$[-]$	0,91	0,61	0,83	1,12

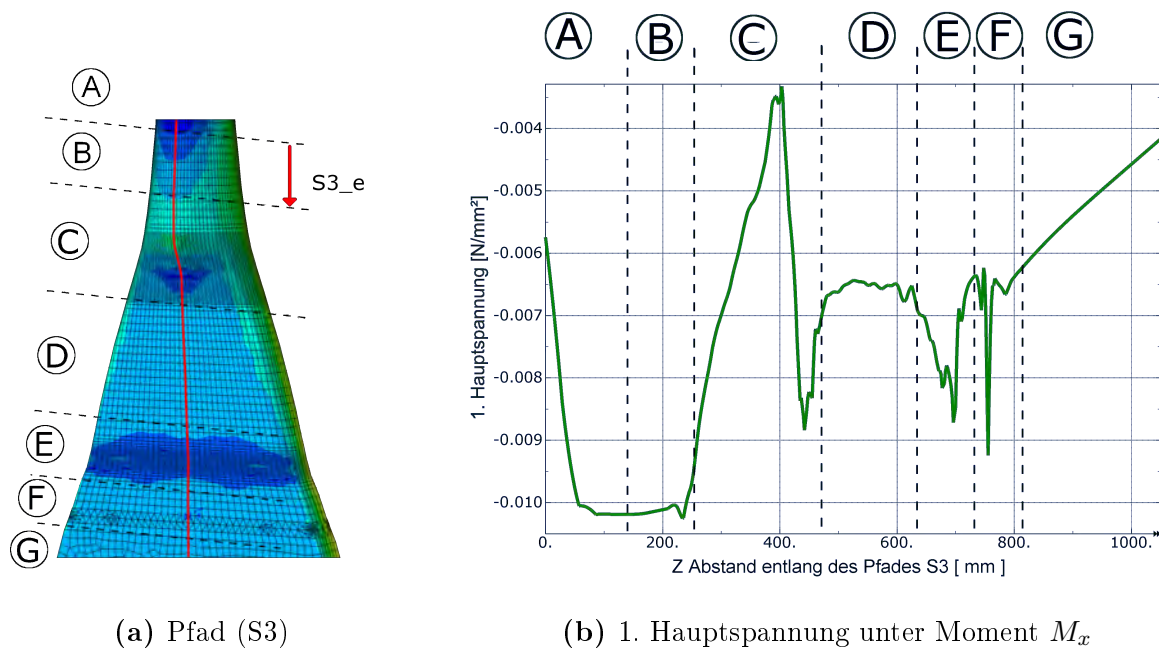


Abbildung 5.23: Spannungsverlauf im Druckbereich

## 5.2.4 Zusammenfassung, Kernaussagen

### Bereich S1 - Knollen

Der Bereich Knollen S1 ist der Übergang vom Rundstahl zum Spaten. In Abbildung 5.24 sind die Strukturformzahlen abhängig von der Belastungsart für das asymmetrische und symmetrische Modell zu sehen. Für die zugehörige Nennspannung wurden die Spannungen am Regelquerschnitt des Hängers gewählt, siehe Kapitel 5.2.1. Generell ist zu erkennen, dass die Strukturformzahlen sehr gering sind. Für das asymmetrische Modell unter Normkraftbelastung ergibt sich ein Wert von 1,18. Gegenüber dem symmetrischen Modell ist das eine Erhöhung von rund 25 %. Dies resultiert aus der vorhandenen Exzentrizität, die unter Normkraftbelastung eine Momentenwirkung erzeugt. Daraus ergeben sich größere Spannungswerte. Die Werte der Strukturformzahlen beider Modelle sind unter Momentenbelastung um die starke Achse  $M_z$  und die schwache Achse  $M_x$  relativ ähnlich.

### Bereich S2 - Spaten

Die Strukturspannungen im Bereich Spaten S2 wurden für den Vergleich mit der kritischen Zone des Freischnitts vom geschweißten Hängeranschluss berechnet. Für die zur Strukturformzahl zugehörigen Nennspannungen, die in Abbildung 5.25 dargestellt sind, wurden die Querschnittsabmessungen der Schweißnaht für die Berechnung verwendet, siehe Kapitel 5.2.1. Unter Normkraftbelastung ist der Wert der Strukturformzahl für das asymmetrische Modell, ähnlich wie beim Knollen, circa 24 % größer als beim symmetrischen Modell. Dies resultiert aus der durch Exzentrizität entstehenden Momentenwirkung. Unter Momentenbelastung um die starke Achse  $M_z$  sind die Strukturformzahlen für beide Modelle fast gleich groß. Der Wert von circa 1,3 ergibt

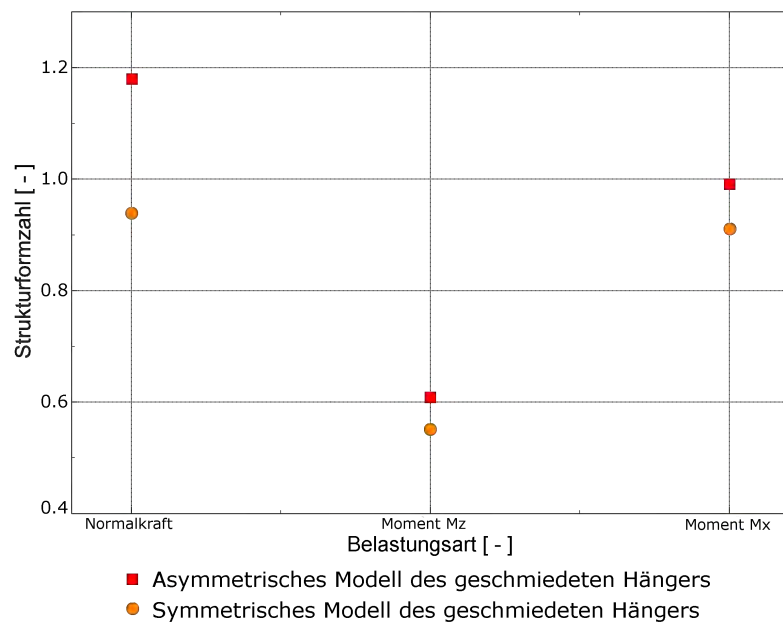


Abbildung 5.24: Strukturformzahlen im Bereich des Knollens

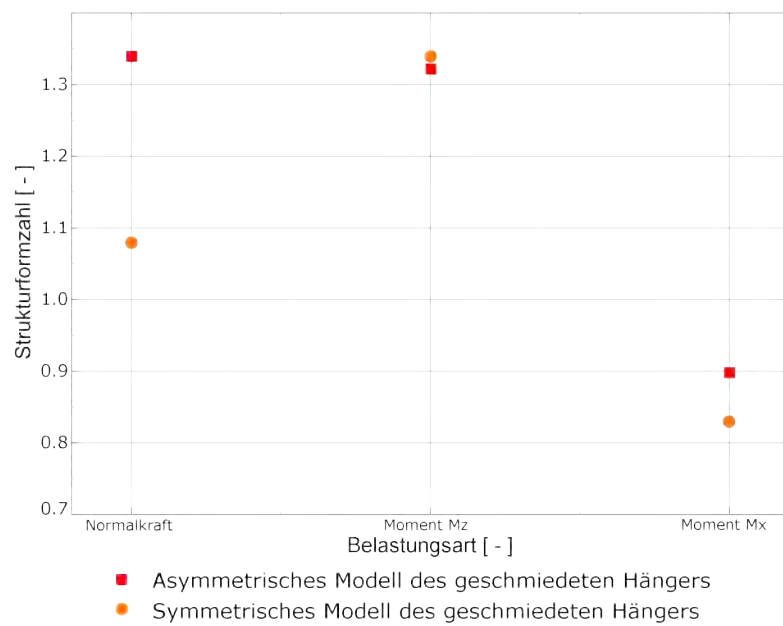


Abbildung 5.25: Strukturformzahlen im Bereich des Spatens

sich einerseits aus der Wahl der zugehörigen Nennspannungsberechnung. Andererseits weist der Spaten Blechunebenheiten auf, die zu Spannungserhöhungen führen.

### Bereich S3 - Schweißnaht

Der Bereich S3 beinhaltet den Übergang des Spatens an das Knotenblech über die Schweißnaht. Die Nennspannungen werden anhand der Abmessungen der Schweißnaht berechnet, siehe Kapitel 5.2.1. Generell ist zu sagen, dass die hohen Strukturformzahlen aufgrund von Unebenheiten der Schweißnaht entstehen. Die Differenz zwischen dem asymmetrischen und symmetrischen Modell unter Normalkraft- und Momentenbelastung um die schwache Achse  $M_x$  resultiert aus der durch Exzentrizität entstehenden Momentenwirkung. Unter Momentenbelastung um die starke Achse  $M_z$  ergeben sich fast die gleichen Strukturformzahlen wie im Bereich S2.

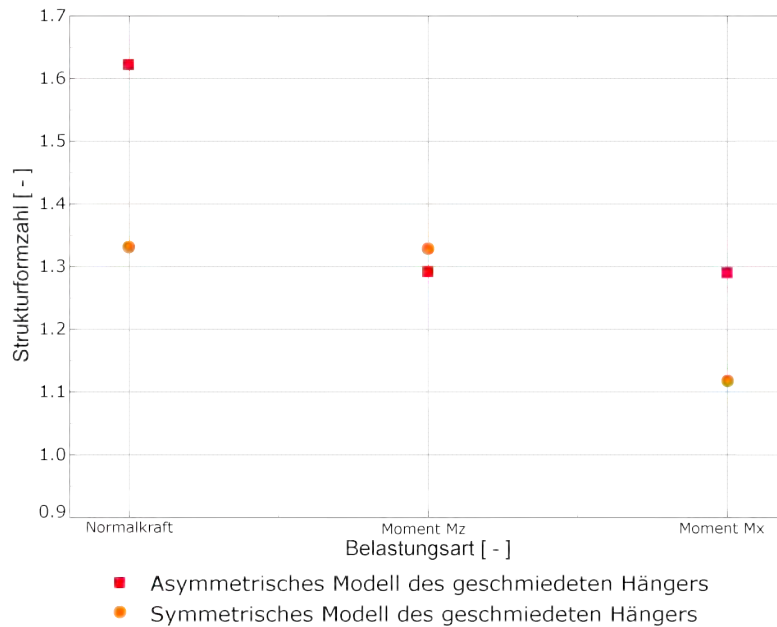


Abbildung 5.26: Strukturformzahlen im Bereich der Schweißnaht

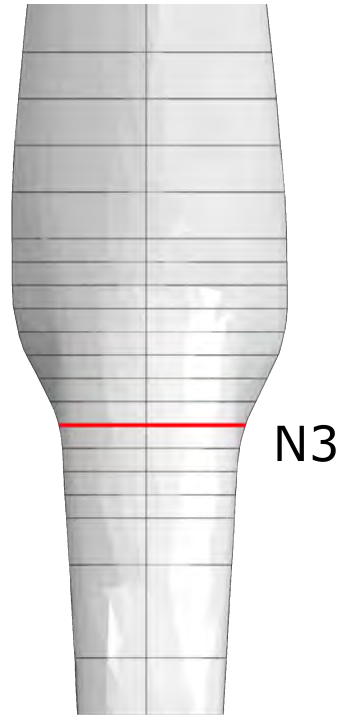
### Formzahl bezogen auf eine andere Nennspannung

Wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, wird die zugehörige Nennspannung  $N1$  für den Knollen mit dem Regelquerschnitt des Hängers berechnet. Dies resultiert aus der Überlegung, dass man einerseits die exakten Querschnittsabmessungen des Knollens nicht nachvollziehen kann. Andererseits kennt man den Durchmesser des Hängers, der für die Hängeranschlussform hauptverantwortlich ist. Jedoch ist zu beachten, dass die Spannungserhöhungen, auf den Regelquerschnitt bezogen kleiner ausfallen, da die Nennspannung auf eine kleinere Fläche berechnet wurde.

Um die genaue Spannungserhöhung an der maximalen Stelle der 1. Hauptspannung im Bereich des Knollens zu bekommen, wurde die Nennspannung mit der Fläche an der maximalen Stelle berechnet. In Abbildung 5.2.1 ist dieser Schnitt mit N3 gekennzeichnet. Die Fläche an dieser Stelle ist um das 1,54 fache größer als der Regelquerschnitt

des Hängers, siehe Abbildung 5.4. Unter Normalkraftbelastung ergibt sich folgende Nennspannung:

$$\sigma_{N3 \text{ Normalkraft}} = \frac{N}{A} = \frac{1000 \text{ N}}{7853.98 \text{ mm}^2 * 1.54} = 8.27 \text{ E} * 10^{-2} \text{ N/mm}^2 \quad (5.7)$$



**Abbildung 5.27:** Bezogene Schnittfläche für die Nennspannungsberechnung N3

In der Tabelle 5.7 sind die Strukturformzahlen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Nennspannungen unter Normalkraftbelastung angegeben. Mit der Nennspannung N1 ergibt sich eine Strukturformzahl von 1,18. Wird die Strukturformzahl mit der Nennspannung N3 berechnet, ergibt sich ein Wert von 1,82.

**Tabelle 5.7:** Spannungen und Strukturformzahlen unter Normalkraftbelastung

		Bereich S1	Bereich S1
Nennspannung N1	$[N/mm^2]$	1,27E-01	
Nennspannung N3	$[N/mm^2]$		8,27E-02
Strukturspannung	$[N/mm^2]$	1,51E-01	1,51E-01
Strukturformzahl	$[-]$	1,18	1,82



## Vergleich geschweißte und geschmiedete Anschlusskonstruktion

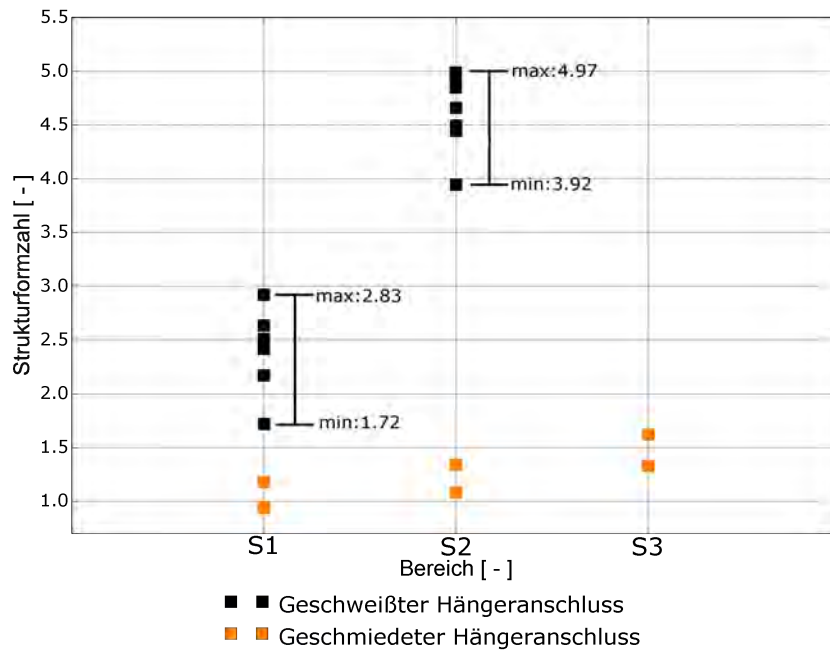
In den vorhergehenden Kapiteln wurden verschiedene Modelle der Hängeranschlusskonstruktion entwickelt, die den Stand der Technik abbilden. Hierbei wurde besonders in den kritischen Bereichen auf eine exakte Modellierung geachtet. Eine feine Vernetzung und Elemente mit quadratischem Verschiebungsansatz ermöglichten genaue Aussagen über die auftretenden Strukturspannungen.

Außerdem wurden die Strukturformzahlen eingeführt, die ein leichtes Umrechnen der Nennspannung in einem definierten Schnitt und der maximalen Strukturspannung ermöglichen.

### 6.1 Übersicht der untersuchten Modelle

Zu Beginn werden alle berechneten Modelle aus Kapitel 4 und Kapitel 5 gegenübergestellt. Dabei ist zu beachten, dass für die Modellierung unterschiedliche Vereinfachungen getroffen wurden. So waren beispielsweise manche Modelle exzentrisch, während bei anderen Hängeranschlusskonstruktionen die Planmaße verwendet wurden. Dieser erste Vergleich gibt daher die Möglichkeit, die Bandbreite, in der sich die Spannungsspitzen bewegen, abzuschätzen. Dadurch kann bereits die Aussage aus der Literatur [1], [9] bestätigt werden, dass bei der geschmiedeten Hängeranschlusskonstruktion geringere Spannungsspitzen auftreten.

Der Vergleich wurde auf Basis von Strukturformzahlen geführt. Diese stellen das Verhältnis von Strukturspannung zu Nennspannung dar. Außerdem wurden ähnliche Bereiche gegenübergestellt. In der Zone S1 beginnt beim geschweißten Anschluss das Knotenblech. Bei der geschmiedeten Konstruktion werden hier die Spannungsspitzen beim Knollen berücksichtigt. Der Bereich S2 stellt die Spannungsspitzen beim Freischnitt dar. Diese werden mit den Spannungen im Spaten des geschmiedeten Hängers verglichen. Der Vollständigkeit halber wurden außerdem die Strukturformzahlen dar-



**Abbildung 6.1:** Strukturformzahl in Abhängigkeit von der Hängeranschlusskonstruktion bei Normalkraft

gestellt, die in der Schweißnaht zwischen dem geschmiedeten Anschluss und dem Knotenblech auftraten (Bereich S3). Diese Schweißnaht wurde bei den geschweißten Modellen nicht modelliert. Deshalb sind dafür auch keine Strukturformzahlen vorhanden. Die Zonenbezeichnungen sind für den geschweißten Hängeranschluss in Abbildung 4.1a dargestellt. Den geschmiedeten Anschluss zeigt Abbildung 5.1a.

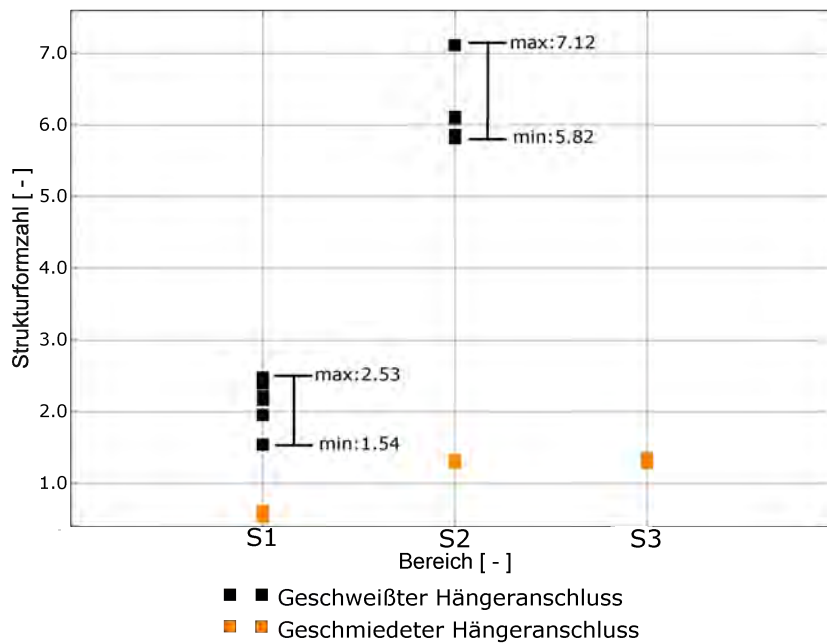
## Strukturformzahlen unter Normalkraft

In Abbildung 6.1 sind die Strukturformzahlen bei Normalkraftbeanspruchung dargestellt. Vom geschmiedeten Hängeranschluss gingen zwei Modelle in die Darstellung ein. Der symmetrische Anschluss liefert konstant etwas niedrigere Werte als der asymmetrische Hängeranschluss. Die Strukturformzahlen vom geschweißten Anschluss wurden aus sieben verschiedenen Modellierungen entnommen. Dadurch wird ersichtlich, in welcher Bandbreite die Strukturformzahlen liegen. Im Bereich S1 bewegen sich die Werte zwischen 1,7 und 2,8. Im Freischnittbereich S2 ergeben sich Werte zwischen 3,9 und 5,0.

## Strukturformzahlen unter Moment um die Z-Achse

Für die Momentenbelastung um die Z-Achse sind die Strukturformzahlen in Abbildung 6.2 dargestellt. Im Bereich S1 liegen die Werte für den geschweißten Hängeranschluss zwischen 1,5 und 2,5. In diesem Bereich kommt es bei der geschmiedeten Hängeranschlusskonstruktion zu Strukturformzahlen unter 1,0. Der geschweißte Hängeranschluss liefert im Bereich des Freischnittes die höchsten Werte. Die Strukturspannungen liegen demnach deutlich über den Nennspannungen, welche aufgrund





**Abbildung 6.2:** Strukturformzahl in Abhängigkeit von der Hängeranschlusskonstruktion bei Moment  $M_z$

der elastischen Berechnung sehr klein sind. Hier gilt es außerdem zu beachten, dass die Spannungen unter reiner Momentenbelastung  $M_z$  am Rand des Knotenbleches größer sind als im Freischnittbereich. Bei der geschmiedeten Hängeranschlusskonstruktion ergeben sich Strukturformzahlen von 1,3 im Bereich S2 sowie im Bereich S3.

### Strukturformzahlen unter Moment um die X-Achse

Bei Momentenbelastung um die X-Achse im Bereich S1 sind die Strukturformzahlen bei allen untersuchten Modellen circa 1,0. Die Strukturspannungen liegen nur unwesentlich über den Nennspannungen. Im Bereich S2 zeigt sich, dass sich der geschweißte Hängeranschluss deutlich ungünstiger verhält. Hier treten Strukturformzahlen zwischen 2,4 und 3,0 auf. Bei der geschmiedeten Hängeranschlusskonstruktion liegen die Werte zwischen 0,8 und 0,9. Im Bereich S3 kommt es beim geschmiedeten Hängeranschluss zu Strukturformzahlen zwischen 1,1 und 1,3.

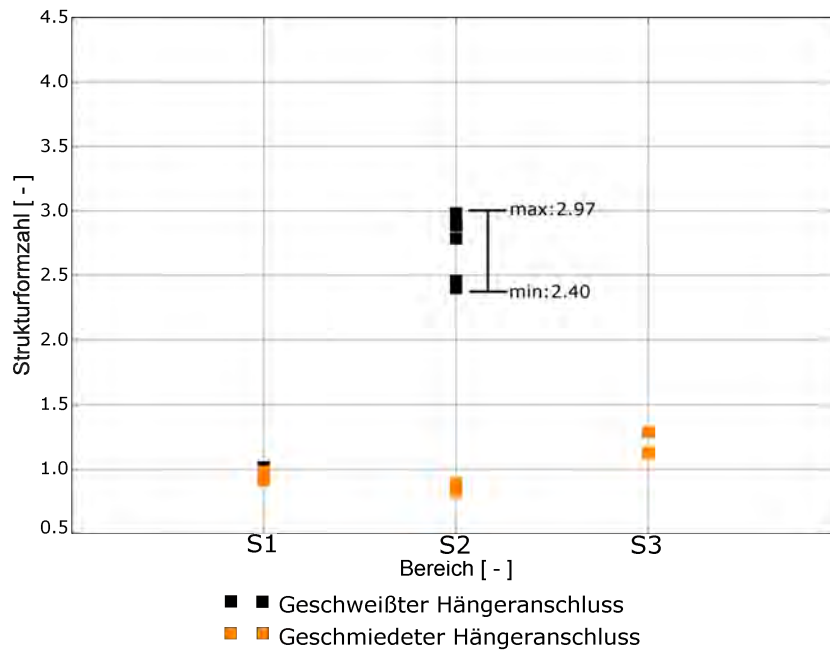


Abbildung 6.3: Strukturformzahl in Abhängigkeit von der Hängeranschlusskonstruktion bei Moment  $M_x$

## 6.2 Vergleichsbasis der Hängeranschlüsse

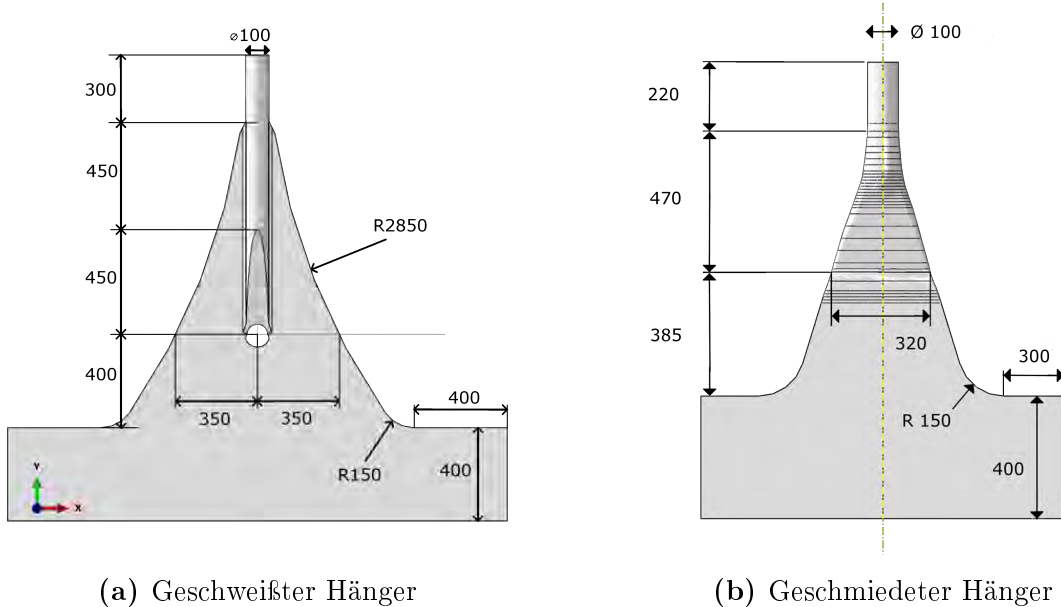
Für die Vergleiche in den folgenden Abschnitten wurden zwei Modelle für den geschweißten und geschmiedeten Hängeranschluss aus den Kapiteln 4 und 5 festgelegt. Um eine vernünftige Vergleichsbasis zu erlangen, wurden jene Modelle gewählt, die möglichst nach Planmaßen modelliert wurden. In Abbildung 6.4 sind die Geometrien der beiden Anschlussarten zu sehen.

### Geschweißter Hängeranschluss

Für den geschweißten Hängeranschluss wurde das Modell mit dem kreisrunden Freischnitt gewählt, siehe Kapitel 4.3.3. Sowohl im Verbindungsbereich S1 vom Hänger und Knotenblech sowie im Freischnittbereich wurden die Schweißnähte mit einem Radius von 25 mm ausgerundet. Der Freischnitt selbst ist kreisförmig und besitzt einen Durchmesser von 90 mm, siehe Abbildung 4.30. Für den geschweißten Hänger wurden folgende Vereinfachungen bei der Modellierung getroffen:

- Die Schweißnähte werden vereinfacht modelliert.
- Die Modellierung erfolgt nach Planmaßen.
- Herstellungstoleranzen bleiben unberücksichtigt.
- Montageungenauigkeiten werden nicht berücksichtigt.
- Blechunebenheiten bleiben unbeachtet.

Die in der Tabelle 6.1 angegebenen Strukturformzahlen wurden in Abhängigkeit unterschiedlicher Belastungen mit dem Finiten Elemente Programm Abaqus FEA be-



(a) Geschweißter Hänger

(b) Geschmiedeter Hänger

**Abbildung 6.4:** Art der Anschlusskonstruktion

rechnet. Der Bereich S1 beinhaltet den Übergang vom Hänger zum Knotenblech und S2 den Freischnittbereich.

**Tabelle 6.1:** Strukturformzahlen des geschweißten Hängeranschlusses

	Strukturformzahl		
	Normalkraft	Moment $M_z$	Moment $M_x$
Bereich S1_R=25	1,72	1,54	1,01
Bereich S2	3,92	6,16	2,47

## Geschmiedeter Hängeranschluss

Beim geschmiedeten Hänger wurde das symmetrische Modell nach Kapitel 5.2.3 ausgewählt. Im Vergleich zum asymmetrischen Hängermodell werden Herstellungstoleranzen und Montageungenauigkeiten nicht berücksichtigt. Das symmetrische Modell stellt quasi einen planmäßigen hergestellten Hänger dar. Quasi planmäßig deswegen, weil Blechunebenheiten an der Oberfläche noch vorhanden sind und zu Spannungserhöhungen führen können.

In der Tabelle 6.2 sind die Strukturformzahlen für das symmetrische Modell ersichtlich. Der Bereich des Knollens wird in zwei Gebiete aufgeteilt. Der Bereich S1 beinhaltet die Zone unterhalb des Knollens. Die Untersuchungen der Randzonen des Knollens werden im Bereich S1\_e angegeben, siehe Abbildung 5.12a. Für einen Vergleich mit dem Freischnitt des geschweißten Hängers wurden die Strukturformzahlen im Bereich des Spatens S2 berechnet.

**Tabelle 6.2:** Strukturformzahlen des geschmiedeten Hängeranschlusses

	Strukturformzahl		
	Normalkraft	Moment $M_z$	Moment $M_x$
Bereich S1	0,94	0,10	0,61
Bereich S1_e	0,81	0,55	0,91
Bereich S2	1,08	1,34	0,83

## 6.3 Vergleichsberechnungen hinsichtlich Ermüdung

Im Rahmen dieser Untersuchung wird der stauchgeschmiedete und der geschweißte Hängeranschluss hinsichtlich ihrer Ermüdungsfestigkeit verglichen. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde uns vom Ziviltechnikerbüro PCD ZT-GmbH für die Netzkorbogenbrücke Verbindung Ostbahn - Flughafenschnellbahn Wien Zentralverschiebebahn- hof eine Vergleichsstatik des Tragwerks S 5.3 zur Verfügung gestellt. Diese Statik beinhaltet Vergleichsberechnungen zwischen dem geschweißten und dem geschmiedeten Hänger bezüglich statischer Belange. Die Vergleiche wurden exemplarisch für einen kürzeren Hänger (3a01) und einen längeren Hänger (3a10) der Brücke durchgeführt.

### 6.3.1 Statik der Hänger

Die Berechnungen der Schnittgrößen wurden anhand separater Stabsysteme, welche die Hänger inklusive Knotenbleche abbilden, unter Berücksichtigung der Stabtheorie II. Ordnung mit dem Programm RSTAB berechnet. In Abbildung 6.5 ist das Stabsystem des geschmiedeten Hängers zu sehen. Dabei entsprechen die Knoten 3 und 7 dem Knollen und in Knoten 2 und 8 dem Übergangsbereich vom Spaten zum Knotenblech.

Die in der Abbildung 6.6 angegebenen Schnittgrößen und Spannungen für den geschmiedeten Hänger sind den Vergleichsberechnungen der PCD ZT-GmbH entnommen. Hierbei gelten die Werte in Abbildung 6.6a für den kürzeren Hänger 3a01 und die Werte in Abbildung 6.6b für den längeren Hänger 3a10.

Für das geschweißte Hängermodell sind die Schnittgrößen und die zugehörigen Spannungen in Abbildung 6.7 ersichtlich. Für den kurzen, geschweißten Hänger 3a01 sind die Werte in Abbildung 6.7a und für den langen Hänger in Abbildung 6.7b zu sehen. Dabei entsprechen die Knoten 4 und 8 dem Übergangsbereich S1 vom Rundstahl zum Knotenblech. Beim geschweißten Hänger liegen die Knoten 2 und 10 auf Höhe des Freischnittbereiches S2.

Die Schnittkräfte wurden aus der PCD-Vergleichsstatik entnommen. Dabei ist zu beachten, dass es sich um keine zugehörigen Schnittgrößen handelt. Die jeweils maximalen und minimalen Werte resultieren aus den verschiedenen Lastfallvarianten unter einer Verkehrsbelastung der Brücke.

Für die Spannungsberechnung zufolge den einzelnen Belastungen werden die Differenzen der minimalen und maximalen Werte verwendet. Nach der linear elastischen Biegelehre werden dann die maximalen Spannungsdifferenzen berechnet. Wobei für die

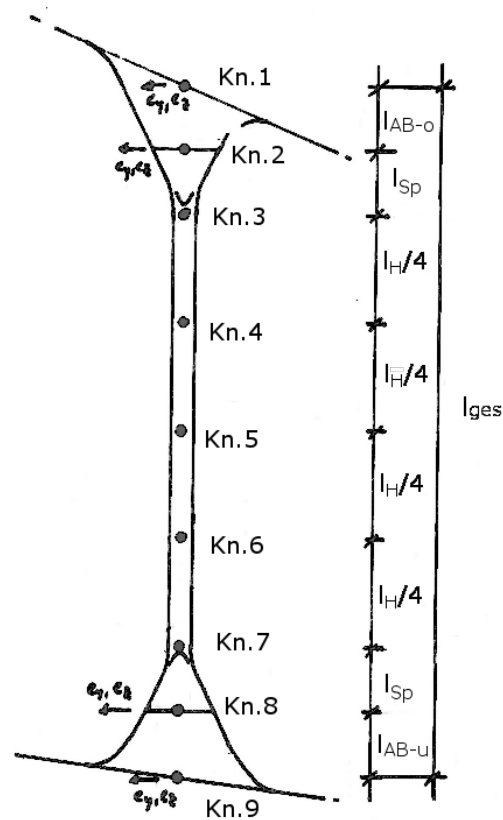


Abbildung 6.5: Stabsystem des geschmiedeten Hängers

Knoten 3 und 7 (Bereich S1) beim geschmiedeten und die Knoten 4 und 8 (Bereich S1) beim geschweißten Hänger der Regelquerschnitt des Hängers verwendet wurde. Bei den Knoten 2 und 8 (Bereich S2) beim geschmiedeten Anschluss wurde die Querschnittswerte der Schweißnaht benutzt. Im Freischnittbereich S2 des geschmiedeten Hängers (Knoten 2 und 10) wurde die Querschnittsfläche für die Spannungsberechnung auf Höhe des Kreismittelpunktes gewählt.

Knoten	Bereich	Schnittgrößen						Spannungen aus Verkehr			
		Max. N	Min. N	Max. M <sub>y</sub>	Min. M <sub>y</sub>	Max. M <sub>z</sub>	Min. M <sub>z</sub>	Δσ <sub>N</sub>	Δσ <sub>M<sub>y</sub></sub>	Δσ <sub>M<sub>z</sub></sub>	
		Maximale Normalkraft (Positiv = Zug)	Minimale Normalkraft	Maximales Moment in y-Richtung (starke Achse)	Minimales Moment in y-Richtung (starke Achse)	Maximales Moment in z-Richtung (schwache Achse)	Minimales Moment in z-Richtung (schwache Achse)	Maximale Spannungsdifferenz z zuzulassende My- starke Achse	Maximale Spannungsdifferenz z zuzulassende My- schwache Achse	Maximale Spannungsdifferenz z zuzulassende Mz- schwache Achse	
[ - ]		[kN]	[kN]	[kNcm]	[kNcm]	[kNcm]	[kNcm]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	
Kn.2	S2	420,0	-16,0	654,0	-51,0	205,0	-61,0	3,35	1,00	3,07	
Kn.3	S1	420,0	-16,0	248,0	-96,0	123,0	-21,0	5,55	3,50	1,47	
Kn.7	S1	420,0	-16,0	289,0	-97,0	164,0	36,0	5,55	3,93	1,30	
Kn.8	S2	420,0	-16,0	643,0	-101,0	242,0	-76,0	3,35	1,06	3,67	

(a) Hänger 3a01

Knoten	Bereich	Schnittgrößen						Spannungen aus Verkehr			
		Max. N	Min. N	Max. M <sub>y</sub>	Min. M <sub>y</sub>	Max. M <sub>z</sub>	Min. M <sub>z</sub>	Δσ <sub>N</sub>	Δσ <sub>M<sub>y</sub></sub>	Δσ <sub>M<sub>z</sub></sub>	
		Maximale Normalkraft (Positiv = Zug)	Minimale Normalkraft	Maximales Moment in y-Richtung (starke Achse)	Minimales Moment in y-Richtung (starke Achse)	Maximales Moment in z-Richtung (schwache Achse)	Minimales Moment in z-Richtung (schwache Achse)	Maximale Spannungsdifferenz z zuzulassende Normalkraft	Maximale Spannungsdifferenz z zuzulassende My- starke Achse	Maximale Spannungsdifferenz z zuzulassende Mz- schwache Achse	
[ - ]		[kN]	[kN]	[kNcm]	[kNcm]	[kNcm]	[kNcm]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	
Kn.2	S2	528,0	-215,0	595,0	121,0	236,0	46,0	5,72	0,67	2,19	
Kn.3	S1	528,0	-215,0	127,0	26,0	105,0	-5,0	9,46	1,03	1,12	
Kn.7	S1	528,0	-215,0	202,0	-28,0	150,0	26,0	9,46	2,34	1,26	
Kn.8	S2	528,0	-215,0	586,0	67,0	203,0	-5,0	5,72	0,74	2,40	

(b) Hänger 3a10

Abbildung 6.6: Schnittgrößen und Spannungen des geschmiedeten Hängers

Knoten	Bereich	Schnittgrößen						Spannungen aus Verkehr			
		Max. N	Min. N	Max. M <sub>y</sub>	Min. M <sub>y</sub>	Max. M <sub>z</sub>	Min. M <sub>z</sub>	Δσ <sub>N</sub>	Δσ <sub>M<sub>y</sub></sub>	Δσ <sub>M<sub>z</sub></sub>	
		Maximale Normalkraft (Positiv = Zug)	Minimale Normalkraft	Maximales Moment in y-Richtung (starke Achse)	Minimales Moment in y-Richtung (starke Achse)	Maximales Moment in z-Richtung (schwache Achse)	Minimales Moment in z-Richtung (schwache Achse)	Maximale Spannungsdifferenz z zutolge My- starke Achse	Maximale Spannungsdifferenz z zutolge My- schwache Achse	Maximale Spannungsdifferenz z zutolge Mz- schwache Achse	
[-]		[kN]	[kN]	[kNcm]	[kNcm]	[kNcm]	[kNcm]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	
Kn.2	S2	420,0	-16,0	1367,0	-1367,0	7,0	-7,0	3,63	0,24	0,35	
Kn.4	S1	420,0	-16,0	446,0	-446,0	1,0	-1,0	5,55	9,09	0,02	
Kn.8	S1	420,0	-16,0	475,0	-446,0	9,0	-9,0	5,55	9,38	0,18	
Kn.10	S2	420,0	-16,0	1396,0	-1367,0	13,0	-13,0	3,63	0,24	0,65	

(a) Hänger 3a01

Knoten	Bereich	Schnittgrößen						Spannungen aus Verkehr			
		Max. N	Min. N	Max. M <sub>y</sub>	Min. M <sub>y</sub>	Max. M <sub>z</sub>	Min. M <sub>z</sub>	Δσ <sub>N</sub>	Δσ <sub>M<sub>y</sub></sub>	Δσ <sub>M<sub>z</sub></sub>	
		Maximale Normalkraft (Positiv = Zug)	Minimale Normalkraft	Maximales Moment in y-Richtung (starke Achse)	Minimales Moment in y-Richtung (starke Achse)	Maximales Moment in z-Richtung (schwache Achse)	Minimales Moment in z-Richtung (schwache Achse)	Maximale Spannungsdifferenz z zutolge Normalkraft	Maximale Spannungsdifferenz z zutolge My- starke Achse	Maximale Spannungsdifferenz z zutolge Mz- schwache Achse	
[-]		[kN]	[kN]	[kNcm]	[kNcm]	[kNcm]	[kNcm]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	
Kn.2	S2	528,0	-215,0	30,0	-30,0	8,0	-8,0	6,19	0,01	0,40	
Kn.4	S1	528,0	-215,0	27,0	-27,0	7,0	-7,0	9,46	0,55	0,14	
Kn.8	S1	528,0	-215,0	35,0	-35,0	10,0	-10,0	9,46	0,71	0,20	
Kn.10	S2	528,0	-215,0	39,0	-39,0	11,0	-11,0	6,19	0,01	0,55	

(b) Hänger 3a10

Abbildung 6.7: Schnittgrößen und Spannungen des geschweißten Hängers

### 6.3.2 Nachweisformate für Ermüdung

Der Ermüdungsnachweis für die Hänger erfolgt nach EN 1993-1, Kapitel 9 Ermüdung [4] und nach dem Leitfaden zum Anhang NA.F Bemessung von Hängern an Stabbogenbrücken nach DIN EN 1993-2 [2]. Als Einwirkung werden nur die Verkehrslasten berücksichtigt. Aus Vereinfachungsgründen werden einerseits ermüdungswirksame Lasten aus windinduzierten Schwingungen der Hänger nicht berücksichtigt. Andererseits werden die maximalen Spannungsdifferenzen zufolge den verschiedenen Belastungen zusammen addiert.

Für den Ermüdungsnachweis gilt generell folgende Bedingung:

$$\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} \quad (6.1)$$

Die Teilsicherheitsbeiwerte, beziehungsweise der Schwingbeiwert für den Ermüdungsnachweis sind für den kürzeren Hänger 3a01 in Tabelle 6.3 angegeben. Für den längeren Hänger 3a10 sind die Werte in der Tabelle 6.4 zu sehen.

**Tabelle 6.3:** Faktoren des Ermüdungsnachweises für den Hänger 3a01

<b>Ermüdungsnachweis nach Leitfaden zum DIN Fachbericht 103</b>		
$\lambda$	0,55	Gesamtbeiwert; $\lambda = \lambda_1 * \lambda_2 * \lambda_3 * \lambda_4$
$\lambda_{Max}$	1,40	Maximalwert gemäß EN 1993/2, Abs. 9.5.3 (9)
$\phi_2$	1,20	Schwingbeiwert gemäß EN 1991/2, Abs. 6.4.5.2
$\gamma_{Ff}$	1,00	Teilsicherheitsbeiwert Einwirkungen
$\gamma_{Mf}$	1,15	Teilsicherheitsbeiwert Materialwiderstand

**Tabelle 6.4:** Faktoren des Ermüdungsnachweises für den Hänger 3a10

<b>Ermüdungsnachweis nach Leitfaden zum DIN Fachbericht 103</b>		
$\lambda$	0,47	Gesamtbeiwert; $\lambda = \lambda_1 * \lambda_2 * \lambda_3 * \lambda_4$
$\lambda_{Max}$	1,40	Maximalwert gemäß EN 1993/2, Abs. 9.5.3 (9)
$\phi_2$	1,04	Schwingbeiwert gemäß EN 1991/2, Abs. 6.4.5.2
$\gamma_{Ff}$	1,00	Teilsicherheitsbeiwert Einwirkungen
$\gamma_{Mf}$	1,15	Teilsicherheitsbeiwert Materialwiderstand

Der aktuelle Stand der Technik gibt für die Ermittlung des Ermüdungswiderstandes vier verschiedene Konzepte an. Für die geschweißte Anschlussart wurden das Nennspannungs-,  $\sigma_1$ -, Strukturspannungs- und Kerbspannungskonzept angewendet. Beim geschmiedeten Hänger wurden das Nennspannungs- und  $\sigma_1$ -Konzept verwendet. Die anderen zwei Konzepte konnten aufgrund der fehlenden Kerbgruppen nicht angewendet werden. Die unterschiedlichen Ermüdungskonzepte wurden an den zwei Hängern 3a01 und 3a10 durchgeführt.

Generell ist zu erwähnen, dass jene Kerbgruppen gewählt wurden, die ein Beschleifen der Schweißnaht voraussetzen.



### Nennspannungskonzept

Die Nachweisführung nach der EN 1993-1-9 [4] erfolgt auf Basis des Nennspannungskonzeptes, welches in Kapitel 2.2 beschrieben ist. Die gesamte Spannung lässt sich nach der Formel 6.2 berechnen.

$$\Delta\sigma_{Ges} = \Delta\sigma_N + \Delta\sigma_{Mz} + \Delta\sigma_{Mx} \quad (6.2)$$

Nach dem Leitfaden zum DIN-Fachbericht [2] sind für das Nennspannungskonzept folgende Kerbgruppen anzusetzen:

- geschweißter Hänger, Bereich S1: FAT 90
- geschweißter Hänger, Bereich S2 (Freischnitt): FAT 112
- geschmiedeter Hänger, freie Länge: FAT 140
- geschmiedeter Hänger, Übergang zum Spaten (Knollen): FAT 140

### $\sigma_1$ - Konzept

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, dürfen bei einer fiktiven, nahezu kerbfreien Schweißnahtmodellierung die ermittelten Spannungen direkt als Strukturspannungen interpretiert werden. Dieses Prinzip wurde bei den geschweißten und geschmiedeten Modellen angewendet. Nach [5] sollten bei mehrachsigen Spannungszuständen beim Ermüdungsnachweis die entsprechenden Hauptnormalspannungen verwendet werden.

Laut EN 1993-1-9 [4] werden für den Ermüdungsnachweis nach dem Strukturspannungskonzept die Nennspannungen mit den Spannungskonzentrationsfaktoren multipliziert. Die gesamte Spannung lässt sich nach der Formel 6.3 berechnen. Die sich aus den Strukturspannungen ergebenden Strukturformzahlen sind in den Tabellen 6.1 und 6.2 angegeben.

$$\Delta\sigma_{Ges} = \Delta\sigma_N * f_N + \Delta\sigma_{Mz} * f_{Mz} + \Delta\sigma_{Mx} * f_{Mx} \quad (6.3)$$

Für das Strukturspannungskonzept sind nach EN 1993-1-9 [4] folgende Kerbgruppen anzusetzen:

- geschweißter Hänger, Bereich S1: FAT 112
- geschweißter Hänger, Bereich S2 (Freischnitt): FAT 112
- geschmiedeter Hänger, wo ein Brennschnitt vorhanden ist: FAT 140
- geschmiedeter Hänger, wo kein Brennschnitt vorhanden ist: FAT 160

### Strukturspannungskonzept

Für den Übergangsbereich S1 des geschweißten Hängers werden die Strukturspannungen nach dem Hot-Spot-Verfahren berechnet. In Kapitel 2.2 ist dieses Verfahren beschrieben. Die interpolierten Strukturspannungen und deren Strukturformzahlen sind

in Kapitel 4.4 ersichtlich. Die gesamte Spannung lässt sich nach der Formel 6.4 berechnen.

$$\Delta\sigma_{Ges} = \Delta\sigma_N * f_{NHS} + \Delta\sigma_{Mz} * f_{MzHS} + \Delta\sigma_{Mx} * f_{MxHS} \quad (6.4)$$

Für eine voll durchgeschweißte Stumpfnahnt im Bereich S1 des geschweißten Hängers ist laut EN 1993-1-9 [4] folgende Kerbgruppe anzusetzen:

- geschweißter Hänger, Bereich S1: FAT 112

Für den Freischnittbereich S2 des geschweißten Hängers wurde der Ermüdungswiderstand nach dem Strukturspannungskonzept zufolge den Empfehlungen des *International Institute of Welding* [6] berechnet. Der Ermüdungswiderstand des zu bewertenden Details wird aus einem konstruktiven ähnlichen Bezugsdetail nach der Gleichung 6.5 errechnet.

$$FAT_{bewert} = \frac{\sigma_{stru,ref}}{\sigma_{stru,bewert}} * FAT_{ref} \quad (6.5)$$

Als Bezugsdetail für den Freischnittbereich wurde die symmetrische, zweischnittige Verbindung mit Passschrauben nach EN 1993-1-9 [4] gewählt, welche einen Kerbfall von 90 besitzt. Mithilfe des Finiten Elemente Programms Abaqus FEA wurde diese Verbindung modelliert und deren Strukturspannungen im Bereich des Loches berechnet. In Tabelle 6.5 sind die Spannungen und die Strukturformzahlen unter Normalkraftbelastung für dieses Bezugsdetail zu sehen.

**Tabelle 6.5:** Spannungen und Strukturformzahl des Bezugsdetails unter Normalkraftbelastung

		Loch
Nennspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,78E-02
Strukturspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]	6,84E-02
Strukturformzahl	[ - ]	2,46

Für den Freischnittbereich unter Normalkraftbelastung ergibt sich eine Strukturformzahl von 3,92, siehe Tabelle 6.1. Nach Gleichung 6.5 ergibt sich folgender Ermüdungswiderstand:

- geschweißter Hänger, Bereich S2 (Freischnitt): FAT 56,47

### Kerbspannungskonzept

In Kapitel 2.2 wird das Kerbspannungskonzept erläutert. Zu beachten ist, dass die effektiven Kerbradien mit 1 mm ausgerundet werden. Im Bereich des 1 mm Radius wurde

bei der Modellierung eine Elementlänge von 0,2 mm gewählt. Das Kerbspannungskonzept kommt nur beim geschweißten Modell zur Verwendung. Die dabei notwendigen Strukturformzahlen sind in Kapitel 4.3.3 angegeben. Nach den Empfehlungen des International Institut of Welding [6] gilt folgender Wert für den Ermüdungswiderstand bei Stahl:

- geschweißter Hänger: FAT 225

### 6.3.3 Ermüdungsnachweis, Berechnung der Lebensdauer

In diesem Abschnitt ist die Nachweisführung der Ermüdung für den geschweißten und geschmiedeten Anschluss in Betrachtung der verschiedenen Nachweiskonzepte angeführt. Die Anzahl der Spannungsschwingspiele  $N$  wird nach dem Eurocode EN 1993-1-9 [4] berechnet. Für den geschweißten Hänger werden die Spannungsschwingspiele nach folgender Gleichung berechnet:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m 2 * 10^6 \quad (6.6)$$

$$\text{Mit } m = 3 \text{ für } N \leq 5 * 10^6$$

Die Spannungsschwingspiele für den geschmiedeten Hängeranschluss werden laut [9] nach der Gleichung 6.7 errechnet.

$$\Delta\sigma_R^m N_R = (0,737 \Delta\sigma_C)^m 5 * 10^6 \quad (6.7)$$

$$\text{Mit } m = 5 \text{ für } 5 * 10^6 \leq N \leq 10^8$$

In den Abbildungen 6.8 und 6.9 sind die Nachweisberechnungen für den Übergangsbereich S1 vom Hänger auf das Knotenblech des geschweißten Hängers zu sehen. Die Nachweisführungen für den Freischnittbereich S2 des geschweißten Hängers sind in den Abbildungen 6.10 und 6.11 zu sehen.

Für den geschmiedeten Hängeranschluss wurde der Ermüdungsnachweis nach dem Nennspannungskonzept und dem  $\sigma_1$ -Konzept, nach Kapitel 6.3.2, durchgeführt, siehe Abbildung 6.12.

Die Bedeutungen der Bezeichnungen, welche in den Abbildungen vorkommen, sind in der Tabelle 6.6 angegeben.

Tabelle 6.6: Bezeichnungen

Bezeichnungen		
Knoten	[-]	Knotenpunkt im Hänger
$\Delta\sigma_N$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	Maximale Spannungsdifferenz zufolge Normalkraft
$\Delta\sigma_{Mz}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	Maximale Spannungsdifferenz zufolge Mz - Starke Achse
$\Delta\sigma_{Mx}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	Maximale Spannungsdifferenz zufolge Mx - Schwache Achse
$\Delta\sigma_{Ges}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	Strukturspannung
$\Delta\sigma_{E,2}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	Schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite
$\Delta\sigma_C$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Kerbfallklasse
Ed/Rd	[-]	Nachweisführung Einwirkung / Widerstand
NR	[-]	Anzahl der Spannungsschwingspiele
$f_N$	[-]	Strukturformzahl zufolge Normalkraft
$f_{Mz}$	[-]	Strukturformzahl zufolge Mz - Starke Achse
$f_{Mx}$	[-]	Strukturformzahl zufolge Mx- Schwache Achse

Bereich	Knoten	$\Delta\sigma_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Ges}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{E,2}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_C$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_d/R_d$ [-]	$N_R$ [-]
Hänger 3a01									
S1	Kn.4	5,55	9,09	0,02	14,66	9,67	90,00	1,24	1,61E+06
S1	Kn.8	5,55	9,38	0,18	15,12	9,98	90,00	1,27	1,47E+06
Hänger 3a10									
S1	Kn.4	9,46	0,55	0,14	10,15	4,96	90,00	0,63	1,19E+07
S1	Kn.8	9,46	0,71	0,20	10,38	5,07	90,00	0,65	1,12E+07

Bereich	Knoten	$\Delta\sigma_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_N$ [-]	$\Delta\sigma_N \cdot f_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{Mz}$ [-]	$\Delta\sigma_{Mz} \cdot f_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mx} \cdot f_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Ges}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{E,2}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_C$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_d/R_d$ [-]	$N_R$ [-]
Hänger 3a01													
S1_R=3	Kn.4	5,55	2,63	14,61	9,09	2,39	21,74	0,02	36,37	24,00	112,00	2,46	2,03E+05
S1_R=5		5,55	2,42	13,42	9,09	2,17	19,72	0,02	33,16	21,89	112,00	2,25	2,68E+05
S1_R=10		5,55	2,17	12,05	9,09	1,95	17,73	0,02	29,79	19,66	112,00	2,02	3,70E+05
S1_R=25		5,55	1,72	9,53	9,09	1,54	13,99	0,02	23,54	15,54	112,00	1,60	7,49E+05
S1_R=3	Kn.8	5,55	2,63	14,61	9,38	2,39	22,45	0,18	37,24	24,58	112,00	2,52	1,89E+05
S1_R=5		5,55	2,42	13,42	9,38	2,17	20,36	0,18	33,97	22,42	112,00	2,30	2,49E+05
S1_R=10		5,55	2,17	12,05	9,38	1,95	18,30	0,18	30,53	20,15	112,00	2,07	3,43E+05
S1_R=25		5,55	1,72	9,53	9,38	1,54	14,45	0,18	24,16	15,94	112,00	1,64	6,93E+05
Hänger 3a10													
S1_R=3	Kn.4	9,46	2,63	24,89	0,55	2,39	1,32	0,14	26,35	12,88	112,00	1,32	1,32E+06
S1_R=5		9,46	2,42	22,87	0,55	2,17	1,19	0,14	24,21	11,83	112,00	1,22	1,70E+06
S1_R=10		9,46	2,17	20,53	0,55	1,95	1,07	0,14	21,75	10,63	112,00	1,09	2,34E+06
S1_R=25		9,46	1,72	16,23	0,55	1,54	0,85	0,14	17,22	8,42	112,00	0,86	4,71E+06
S1_R=3	Kn.8	9,46	2,63	24,89	0,71	2,39	1,71	0,20	26,80	13,10	112,00	1,35	1,25E+06
S1_R=5		9,46	2,42	22,87	0,71	2,17	1,55	0,20	24,63	12,04	112,00	1,24	1,61E+06
S1_R=10		9,46	2,17	20,53	0,71	1,95	1,39	0,20	22,13	10,81	112,00	1,11	2,22E+06
S1_R=25		9,46	1,72	16,23	0,71	1,54	1,10	0,20	17,54	8,57	112,00	0,88	4,46E+06

(a) Nennspannungskonzept

(b)  $\sigma_1$ -Konzept

Abbildung 6.8: Ermüdungsnachweis für den geschweißten Hängeranschluss im Bereich S1

Bereich	Knoten	$\Delta\sigma_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_N$ [-]	$\Delta\sigma_N \cdot f_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{Mz}$ [-]	$\Delta\sigma_{Mz} \cdot f_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz} \cdot f_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{Mx}$ [-]	$\Delta\sigma_{Mx} \cdot f_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Ges}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{E,2}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_C$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_g/R_g$ [-]	$N_R$ [-]
Hänger 3a01																
S1_R=1	Kn.4	5,55	1,60	8,88	9,09	1,44	13,08	0,02	1,01	0,02	21,99	14,51	112,00	1,49	9,20E+05	
S1_R=5		5,55	1,51	8,38	9,09	1,38	12,54	0,02	1,01	0,02	20,94	13,82	112,00	1,42	1,06E+06	
S1_R=1	Kn.8	5,55	1,60	8,88	9,38	1,44	13,51	0,18	1,01	0,19	22,58	14,90	112,00	1,53	8,49E+05	
S1_R=5		5,55	1,51	8,38	9,38	1,38	12,95	0,18	1,01	0,19	21,51	14,20	112,00	1,46	9,82E+05	
Hänger 3a10																
S1_R=1	Kn.4	9,46	1,60	15,14	0,55	1,44	0,79	0,14	1,01	0,14	16,07	7,86	112,00	0,81	5,79E+06	
S1_R=5		9,46	1,51	14,28	0,55	1,38	0,76	0,14	1,01	0,14	15,19	7,42	112,00	0,76	6,87E+06	
S1_R=1	Kn.8	9,46	1,60	15,14	0,71	1,44	1,03	0,20	1,01	0,21	16,37	8,00	112,00	0,82	5,49E+06	
S1_R=5		9,46	1,51	14,28	0,71	1,38	0,98	0,20	1,01	0,21	15,47	7,56	112,00	0,78	6,49E+06	

(a) Hot Spot-Konzept

Bereich	Knoten	$\Delta\sigma_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_N$ [-]	$\Delta\sigma_N \cdot f_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{Mz}$ [-]	$\Delta\sigma_{Mz} \cdot f_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz} \cdot f_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{Mx}$ [-]	$\Delta\sigma_{Mx} \cdot f_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Ges}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{E,2}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_C$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_g/R_g$ [-]	$N_R$ [-]
Hänger 3a01																
S1_R=1	Kn.4	5,55	2,83	15,71	9,09	2,53	22,99	0,02	1,01	0,02	38,72	25,55	225,00	1,31	1,37E+06	
S1_R=1	Kn.8	5,55	2,83	15,71	9,38	2,53	23,73	0,18	1,01	0,19	39,63	26,16	225,00	1,34	1,27E+06	
Hänger 3a10																
S1_R=1	Kn.4	9,46	2,83	26,77	0,55	2,53	1,39	0,14	1,01	0,14	28,31	13,84	225,00	0,71	8,60E+06	
S1_R=1	Kn.8	9,46	2,83	26,77	0,71	2,53	1,80	0,20	1,01	0,21	28,78	14,07	225,00	0,72	8,18E+06	

(b) Kerbspannungskonzept

Abbildung 6.9: Ermüdungsnachweis für den geschweißten Hängeranschluss im Bereich S1

Bereich	Knoten	$\Delta\sigma_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Gas}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{E,2}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_C$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_d/R_d$ [-]	$N_R$ [-]
Hänger 3a01									
S2	Kn.2	3,63	0,24	0,35	4,22	2,79	112,00	0,29	1,30E+08
S2	Kn.10	3,63	0,24	0,65	4,52	2,98	112,00	0,31	1,06E+08
Hänger 3a10									
S2	Kn.2	6,19	0,01	0,40	6,60	3,23	112,00	0,33	8,37E+07
S2	Kn.10	6,19	0,01	0,55	6,75	3,30	112,00	0,34	7,82E+07

(a) Nennspannungskonzept

Bereich	Knoten	$\Delta\sigma_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_N$ [-]	$\Delta\sigma_N \cdot f_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{Mz}$ [-]	$\Delta\sigma_{Mz} \cdot f_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz} \cdot f_{Mz}^*$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{Mx}$ [-]	$\Delta\sigma_{Mx} \cdot f_{Mx}^*$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Gas}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{E,2}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_C$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_d/R_d$ [-]	$N_R$ [-]
Hänger 3a01																
S2	Kn.2	3,63	3,92	14,23	0,24	6,16	1,48	5,36	0,35	2,47	8,85	16,57	10,94	112,00	1,12	2,15E+06
S2	Kn.10	3,63	3,92	14,23	0,24	6,16	1,48	9,04	0,65	2,47	23,67	17,31	11,43	112,00	1,17	1,88E+06
Hänger 3a10																
S2	Kn.2	6,19	3,92	24,26	0,01	6,16	0,06	1,29	0,40	2,47	3,16	25,31	12,37	112,00	1,27	1,48E+06
S2	Kn.10	6,19	3,92	24,26	0,01	6,16	0,06	1,29	0,55	2,47	3,36	25,68	12,55	112,00	1,29	1,42E+06

(b)  $\sigma_1$ -Konzept

Abbildung 6.10: Ermüdungsnachweis für den geschweißten Hängeranschluss im Bereich des Freischnittes S2

Bereich	Knoten	$\Delta\sigma_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Gas}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{E,2}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_C$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_d/R_d$ [-]	$N_R$ [-]
Hänger 3a01									
S2	Kn.2	3,63	0,24	0,35	4,22	2,79	56,48	0,57	1,67E+07
S2	Kn.10	3,63	0,24	0,65	4,52	2,98	56,48	0,61	1,36E+07
Hänger 3a10									
S2	Kn.2	6,19	0,01	0,40	6,60	3,23	56,48	0,66	1,07E+07
S2	Kn.10	6,19	0,01	0,55	6,75	3,30	56,48	0,67	1,00E+07

Bereich	Knoten	$\Delta\sigma_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_N$ [-]	$\Delta\sigma_N^*f_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{Mz}$ [-]	$\Delta\sigma_{Mz}^*f_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{Mx}$ [-]	$\Delta\sigma_{Mx}^*f_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Gas}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{E,2}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_C$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_d/R_d$ [-]	$N_R$ [-]
Hänger 3a01															
S2	Kn.2	3,63	4,55	16,52	0,24	6,15	1,48	0,35	2,76	0,97	18,96	12,51	225,00	0,64	1,16E+07
S2	Kn.10	3,63	3,92	14,23	0,24	6,16	1,48	0,65	2,47	1,61	17,31	11,43	225,00	0,58	1,53E+07
Hänger 3a10															
S2	Kn.2	6,19	3,92	24,26	0,01	6,16	0,06	0,40	2,47	0,99	25,31	12,37	225,00	0,63	1,20E+07
S2	Kn.10	6,19	3,92	24,26	0,01	6,16	0,06	0,55	2,47	1,36	25,68	12,55	225,00	0,64	1,15E+07

(a) Strukturspannungskonzept

(b) Kerbspannungskonzept

Abbildung 6.11: Ermüdungsnachweis für den geschweißten Hängeranschluss im Bereich des Freischnittes S2



Bereich	Knoten	$\Delta\sigma_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Ges}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{E,2}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_C$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_d/R_d$ [-]	$N_R$ [-]
Hänger 3a01									
S2	Kn.2	3,35	1,00	3,07	7,42	4,90	140,00	0,40	2,08E+08
S1	Kn.3	5,55	3,50	1,47	10,52	6,94	140,00	0,57	3,62E+07
S1	Kn.7	5,55	3,93	1,30	10,78	7,11	140,00	0,58	3,21E+07
S2	Kn.8	3,35	1,06	3,67	8,08	5,33	140,00	0,44	1,36E+08
Hänger 3a10									
S2	Kn.2	5,72	0,67	2,19	8,58	4,19	140,00	0,34	4,51E+08
S1	Kn.3	9,46	1,03	1,12	11,61	5,67	140,00	0,47	9,93E+07
S1	Kn.7	9,46	2,34	1,26	13,06	6,38	140,00	0,52	5,52E+07
S2	Kn.8	5,72	0,74	2,40	8,86	4,33	140,00	0,36	3,84E+08

Bereich	Knoten	$\Delta\sigma_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_N$ [-]	$\Delta\sigma_N \cdot f_N$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{Mz}$ [-]	$\Delta\sigma_{Mz} \cdot f_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mz}^* \cdot f_{Mz}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{Mx}$ [-]	$\Delta\sigma_{Mx} \cdot f_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Mx}^* \cdot f_{Mx}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{Ges}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{E,2}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_C$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_d/R_d$ [-]	$N_R$ [-]
Hänger 3a01																	
S2	Kn.2	3,35	1,08	3,62	1,00	1,33	1,33	1,33	3,07	0,83	2,55	2,55	7,50	4,95	160,00	0,36	3,85E+08
S1	Kn.3	5,55	0,94	5,22	3,50	0,10	0,35	0,35	1,47	0,91	1,34	1,34	6,90	4,56	160,00	0,33	5,80E+08
S1_e	Kn.3	5,55	0,81	4,50	3,50	0,55	1,93	1,93	1,47	0,61	0,90	0,90	7,32	4,83	140,00	0,40	2,23E+08
S1_e	Kn.7	5,55	0,81	4,50	3,93	0,55	2,16	2,16	1,30	0,61	0,79	0,79	7,45	4,92	140,00	0,40	2,03E+08
S1	Kn.7	5,55	0,94	5,22	3,93	0,10	0,39	0,39	1,30	0,91	1,18	1,18	6,79	4,48	160,00	0,32	6,29E+08
S2	Kn.8	3,35	1,08	3,62	1,06	1,33	1,41	1,41	3,67	0,83	3,05	3,05	8,07	5,33	160,00	0,38	2,65E+08
Hänger 3a10																	
S2	Kn.2	5,72	1,08	6,18	0,67	1,33	0,89	0,89	2,19	0,83	1,82	1,82	8,89	4,34	160,00	0,31	7,37E+08
S1	Kn.3	9,46	0,94	8,89	1,03	0,10	0,10	0,10	1,12	0,91	1,02	1,02	10,01	4,90	160,00	0,35	4,06E+08
S1_e	Kn.3	9,46	0,81	7,66	1,03	0,55	0,57	0,57	1,12	0,61	0,68	0,68	8,91	4,36	140,00	0,36	3,73E+08
S1_e	Kn.7	9,46	0,81	7,66	2,34	0,55	1,29	1,29	1,26	0,61	0,77	0,77	9,72	4,75	140,00	0,39	2,42E+08
S1	Kn.7	9,46	0,94	8,89	2,34	0,10	0,23	0,23	1,26	0,91	1,15	1,15	10,27	5,02	160,00	0,36	3,57E+08
S2	Kn.8	5,72	1,08	6,18	0,74	1,33	0,98	0,98	2,40	0,83	1,99	1,99	9,15	4,47	160,00	0,32	6,36E+08

(a) Nennspannungskonzept

(b)  $\sigma_1$ - Konzept

Abbildung 6.12: Ermüdungsnachweis für den geschmiedeten Hängeranschluss

### 6.3.4 Vergleich der Ergebnisse

In den folgenden Tabellen sind die maßgebenden Ergebnisse der verschiedenen Konzepte für die Ermüdungsberechnung angegeben.

Hänger $\varnothing$ 100, geschweißter Hängeranschluss - Bereich S1					
	Hänger	Nennspannungs-	$\sigma_1$ - Konzept	Strukturspannungs-	Kerbspannungskonzept
Ed/Rd	3a01	1,27	1,64	1,53	1,34
	3a10	0,65	0,88	0,82	0,72
Lastspiele N	3a01	1,47E+06	6,93E+05	8,49E+05	1,27E+06
	3a10	1,12E+07	4,46E+06	5,49E+06	8,18E+06

Abbildung 6.13: Ergebnisse des geschweißten Hängeranschlusses im Bereich S1

Hänger $\varnothing$ 100, geschweißter Hängeranschluss - Bereich S2 Freischnitt					
	Hänger	Nennspannungs-	$\sigma_1$ - Konzept	Strukturspannungs-	Kerbspannungskonzept
Ed/Rd	3a01	0,31	1,17	0,61	0,64
	3a10	0,34	1,29	0,67	0,64
Lastspiele N	3a01	1,06E+08	1,88E+06	1,36E+07	1,16E+07
	3a10	7,82E+07	1,42E+06	1,00E+07	1,15E+07

Abbildung 6.14: Ergebnisse des geschweißten Hängeranschlusses im Freischnittbereich S2

Hänger $\varnothing$ 100, stauchgeschmiedeter Hängeranschluss			
	Hänger	Nennspannungs-	$\sigma_1$ - Konzept
Ed/Rd	3a01	0,58	0,40
	3a10	0,52	0,39
Lastspiele N	3a01	3,21E+07	2,03E+08
	3a10	5,52E+07	2,42E+08

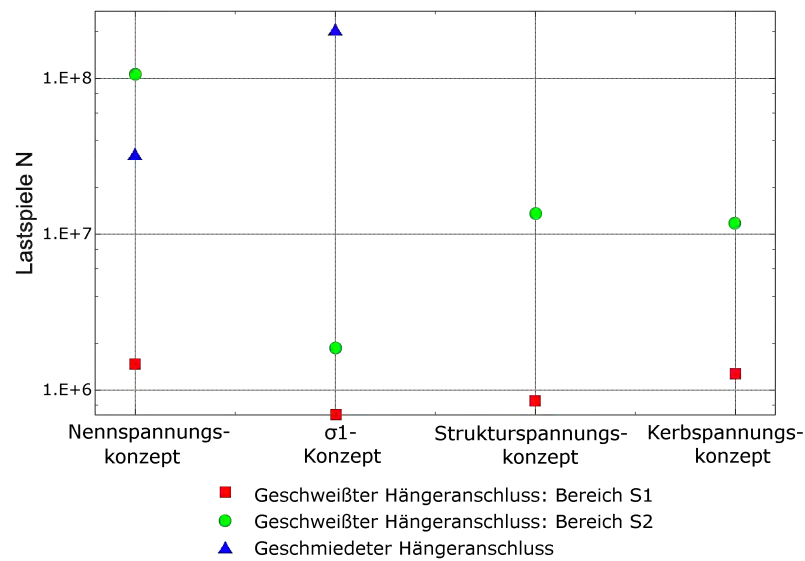
Abbildung 6.15: Ergebnisse des geschmiedeten Hängeranschlusses

Die Ermüdungsnachweise bei der Variante des geschmiedeten Hängeranschlusses werden für den kurzen Hänger 3a01 im Bereich S1 nicht erbracht. Dies resultiert aus den erheblichen Zwängungen aufgrund von Verdrehungen der Hängerenden. Für einen Hängerdurchmesser von 120 mm ist der kurze Hänger nachweisbar.

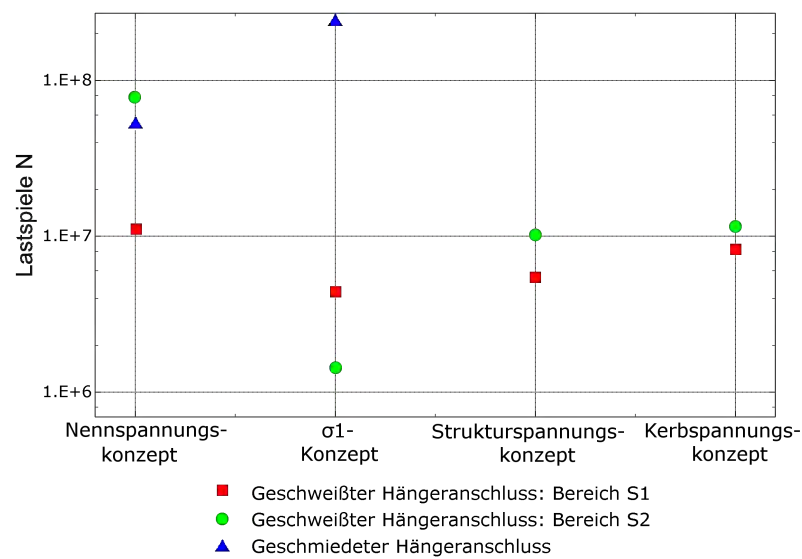
Für den Freischnittbereich S2 vom geschweißten Hängeranschluss kann der Ermüdungsnachweis für die beiden Hänger 3a01 und 3a10 nach dem  $\sigma_1$ -Konzept nicht erbracht werden, siehe Abbildung 6.14. Aufgrund der ermittelten Strukturformzahlen und der Berechnung der gesamten einwirkenden Spannung nach Gleichung 6.3 ist die Strukturspannung um ein vielfaches größer als die Nennspannung. Jedoch ist die Kerbkategorie für das Nennspannungskonzept und das  $\sigma_1$ -Konzept gleich groß.

Anhand der Lastspiele N erkennt man, dass die geschmiedete Variante ermüdungsfreundlicher als die geschweißte Variante ist. In den Abbildungen 6.16 und 6.17 sind die

Lastspiele in Abhängigkeit von den verschiedenen Nachweiskonzepten für den kürzeren Hänger 3a01 und den längeren Hänger 3a10 zu sehen.



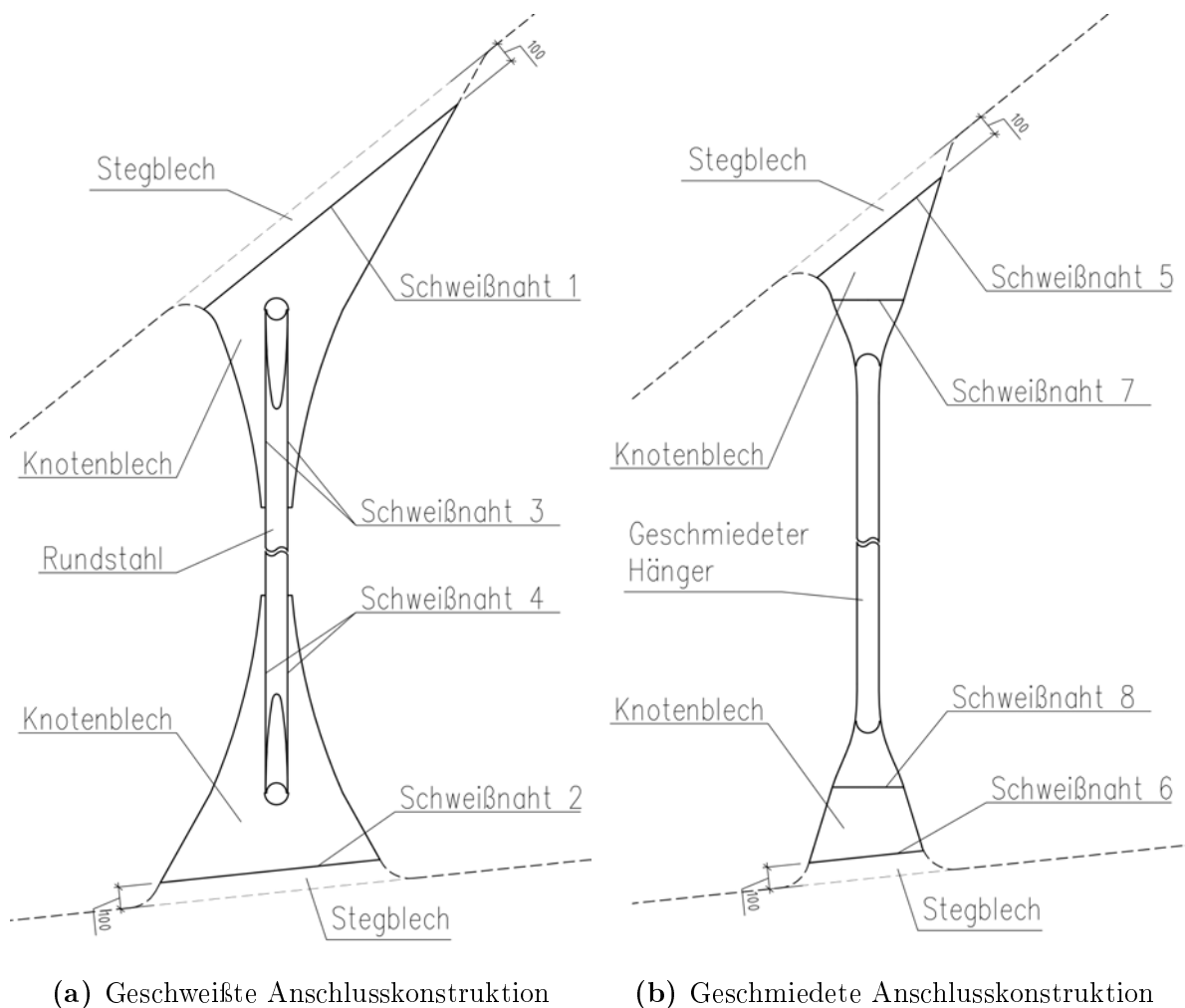
**Abbildung 6.16:** Lastspiele in Abhängigkeit vom Nachweiskonzept für den kürzeren Hänger 3a01



**Abbildung 6.17:** Lastspiele in Abhängigkeit vom Nachweiskonzept für den längeren Hänger 3a10

## 6.4 Kenndaten für eine Kalkulation

Als Grundlage für eine Kalkulation wurden für die geschweißte und die geschmiedete Hängeranschlusskonstruktion die erforderlichen Kenndaten ermittelt. Hierbei handelt es sich um das Gesamtgewicht und die Gesamtoberfläche sowie das erforderliche Schweißnahtvolumen. Ein exemplarischer Vergleich dieser Daten wurde auf Basis zweier Hänger inklusive Knotenbleche der Netzwerkbogenbrücke Verbindung Ostbahn - Flughafenschnellbahn am Wiener Zentralverschiebebahnhof durchgeführt. Die gewählten Hänger mit den Bezeichnungen 3a01 und 3a10 wurden bereits im Kapitel 6.3 hinsichtlich ihrer Ermüdungsfestigkeit untersucht.



**Abbildung 6.18:** Bezeichnung der Bauteile und Schweißnähte

Die Kenndaten der beiden Hängeranschlusskonstruktionen wurden in der geschweißten und geschmiedeten Ausführung untersucht. Als Vergleichsbasis wurden folgende Grundsätze vereinbart:

- Unabhängig von den statischen und ermüdungstechnischen Erfordernissen wurden alle Hänger mit einem Durchmesser von 100 mm ausgebildet.
- Die Neigung der Hänger und des Bogentragwerkes wurden in der Kenndatenermittlung berücksichtigt.

- Das Ende des Knotenbleches wurde um 100 mm vom Bogen bzw. vom Versteifungsträger entfernt angenommen (siehe Abbildung 6.18).

### 6.4.1 Massen- und Oberflächenermittlung

Die für eine Kalkulation erforderliche Gesamtmasse sowie die Gesamtoberfläche wurden in Tabelle B.1 ermittelt. Diese ist im Anhang B.1 zu finden. Die Gesamtmasse einer Hängeranschlusskonstruktion ergibt sich aus der Summe der beiden Knotenbleche und dem Hänger. Hierbei wurde der Verschnitt aus der Herstellung der Knotenbleche nicht berücksichtigt. Für den geschmiedeten Hängerspaten wurde die Oberfläche und das Volumen mithilfe von Abaqus FEA ermittelt.

In Tabelle 6.7 sind die Ergebnisse der Massen- und Oberflächenermittlung gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass das Gewicht der geschweißten Konstruktion größer ist. Dies liegt an den größeren Knotenblechen, die außerdem eine kompliziertere Geometrie aufweisen. Die gezeichneten Knotenbleche sind im Anhang B.2 zu finden.

Beim kürzeren Hänger 3a01 mit einer Gesamtlänge von 3,3 m ergibt sich bei der geschweißten Ausführung im Vergleich zur geschmiedeten Konstruktion das 1,4-fache Gesamtgewicht. Die Oberfläche ist 2,8 Mal so groß.

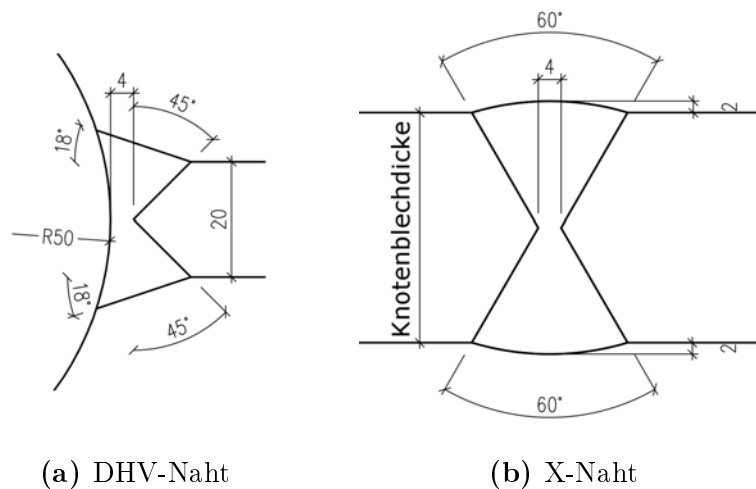
Der Hänger 3a10 befindet sich in Brückenmitte und hat eine Länge von 16,6 m. Hier ist das Gewicht der geschweißten Konstruktion verglichen mit dem geschmiedeten Anschluss 1,1 Mal größer. Die gesamte Oberfläche beträgt bei der geschweißten Hängeranschlusskonstruktion das 1,3-fache.

**Tabelle 6.7:** Übersicht über das Gewicht und die Gesamtoberfläche der geschweißten und geschmiedeten Hängeranschlusskonstruktion

Konstrukt.-Typ	Hängerbez. [ - ]	Bauteil [ - ]	Material [ - ]	Gewicht [kg]	Fläche [m <sup>2</sup> ]
Geschweißt	3a01	Knotenbleche	S355M	149.10	1.90
		Rundstahl	S460NL	202.04	1.03
	3a10	Knotenbleche	S355M	160.63	2.05
		Rundstahl	S460NL	1021.54	5.21
Geschmiedet	3a01	Knotenbleche	S355M	94.72	0.54
		Rundstahl inkl. Spaten	S460NL	148.39	0.51
	3a10	Knotenbleche	S355M	93.81	0.53
		Rundstahl inkl. Spaten	S460NL	964.19	4.89

### 6.4.2 Ermittlung der Schweißnahtvolumina

Eine zweite wichtige Kenngröße zur Kostenberechnung stellt das Schweißnahtvolumen dar. Der vorliegende Vergleich bezieht sich auf die Schweißnähte zwischen Hänger und Knotenblech sowie zwischen Knotenblech und Stegblech (siehe Abbildung 6.18).



**Abbildung 6.19:** Geometrie der verwendeten Schweißnähte

In Tabelle 6.8 sind alle Schweißnähte und deren Volumina gegenübergestellt. Die Schweißnahtlängen je Hänger beim geschweißten Anschluss ergeben sich aus der Einbindelänge von jeweils 0,9 m. Diese Naht wird als DHV-Naht ausgeführt. Die genauen Abmessungen der Schweißnaht sind in Abbildung 6.19a dargestellt. Die Schweißnaht zwischen Knotenblech und Stegblech wird als X-Naht ausgeführt (siehe Abbildung 6.19b). Hier variiert die Nahtlänge in Abhängigkeit von der Neigung des Hängers.

Bei der geschmiedeten Hängeranschlusskonstruktion hat die Schweißnaht zwischen Hängerspaten und Knotenblech eine planmäßige Länge von 0,325 m. Als Nahttyp wird für alle Nähte eine durchgeschweißte X-Naht verwendet (siehe Abbildung 6.19b). Das obere Knotenblech hat eine Dicke von 40 mm, während das untere Knotenblech 50 mm dick ist. Für die Schweißverbindung zwischen Stegblech und Knotenblech ist beim unteren Anschluss die Stegblechdicke von 20 mm maßgebend. Abhängig von der Blechdicke ergibt sich ein unterschiedliches Schweißnahtvolumen je Meter.

Eine Zusammenfassung der Schweißnahtvolumina erfolgt in Tabelle 6.9. Für die geschweißte Hängeranschlusskonstruktion ergibt sich ein Gesamtvolumen von  $1174 \text{ cm}^3$  für den Hänger 3a01 und  $1220 \text{ cm}^3$  für den Hänger 3a10. Beim geschmiedeten Hängeranschluss betragen die Schweißnahtvolumina  $1088 \text{ cm}^3$  (Hänger 3a01) und  $1046 \text{ cm}^3$  (Hänger 3a10).

**Tabelle 6.8:** Schweißnahtvolumina der einzelnen Schweißnähte

Bauteil [ - ]	Hänger-Nr. [ - ]	Schweißnaht-Nr. [ - ]	Nahtlänge [m]	Nahttyp [ - ]	Volumen [cm <sup>3</sup> /m]	SN-Volumen [cm <sup>3</sup> ]
Geschweißt	3a01	1	1.49	X-Naht	248	368
		2	1.00	X-Naht	248	248
		3	1.80	DHV-Naht	155	279
		4	1.80	DHV-Naht	155	279
	3a10	1	1.34	X-Naht	248	331
		2	1.34	X-Naht	248	331
		3	1.80	DHV-Naht	155	279
		4	1.80	DHV-Naht	155	279
Geschmiedet	3a01	5	0.73	X-Naht	694	507
		6	0.52	X-Naht	248	129
		7	0.33	X-Naht	694	226
		8	0.33	X-Naht	694	226
	3a10	5	0.63	X-Naht	694	438
		6	0.63	X-Naht	248	156
		7	0.33	X-Naht	694	226
		8	0.33	X-Naht	694	226

**Tabelle 6.9:** Gesamtes Schweißnahtvolumen je Hängeranschluss

Bauteil [ - ]	Hänger-Nr. [ - ]	SN-Volumen [cm <sup>3</sup> ]
Geschweißt	3a01	1174
	3a10	1220
Geschmiedet	3a01	1088
	3a10	1046

## 6.5 Schlussbetrachtungen

In diesem Kapitel 6 wurde die geschweißte und die geschmiedete Hängeranschlusskonstruktion gegenübergestellt. Zusammenfassend können daraus folgende Kernaussagen abgeleitet werden:

- **Vergleich Lebensdauer:** Bei der geschmiedeten Hängeranschlusskonstruktion ist die Lebensdauer im Vergleich zum geschweißten Anschluss als deutlich höher einzustufen. Die Anzahl der möglichen Spannungsschwingspiele liegt beim geschmiedeten Anschluss immer im Bereich der Dauerfestigkeit. Bei der geschweißten Anschlusskonstruktion ist die Zahl der möglichen Lastspiele in einigen Fällen kleiner als  $2 \cdot 10^6$ , wodurch der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit nicht erbracht werden kann.
- **Vergleich der Kenndaten für eine Kalkulation:** Die Knotenbleche sind beim geschweißten Hänger deutlich größer als bei der geschmiedeten Anschlusskonstruktion. Dadurch ergibt sich ein höheres Gesamtgewicht und eine größere Fläche, die mit Korrosionsschutz zu versehen ist. Das Schweißnahtvolumen ist bei der geschweißten Konstruktion im Vergleich zum geschmiedeten Anschluss größer. Die zu verschweißende Naht ist bei der geschweißten Anschlusskonstruktion länger.

Auf folgende Punkte wird nochmals verwiesen und bedürfen einer weiteren Diskussion:

- Der Ermüdungsnachweis kann nach aktuellem Stand der Technik nach vier verschiedenen Konzepten durchgeführt werden. Da es einen gewissen Spielraum für die Auslegung der Nachweise gibt, kommt es bei der gleichen Konstruktion zu unterschiedlichen Ergebnissen, siehe Kapitel 3.2. Dadurch ist es schwer, eine Prognose für die Lebensdauer des betrachteten Bauteils zu erstellen.
- Für die Strukturspannungen im Bereich der Schweißnaht hat vor allem die Nahtgeometrie einen großen Einfluss. Wie in Kapitel 4.5.1 ersichtlich, ergeben sich bei kleineren Ausrundungsradien der Naht größere Spannungserhöhungen und dadurch auch größere Strukturformzahlen. Der Ausrundungsradius hängt vor allem von der Nachbearbeitung der Schweißnaht ab, welche aber nicht normativ geregelt ist.
- Im Bereich des Freischnittes beim geschweißten Hänger hat vor allem die Freischnittform einen großen Einfluss auf die Spannungserhöhungen. Wesentlich ist die Nachbearbeitung des Überganges vom Freischnitt des Knotenbleches an den Freischnittbereich des Hängers, siehe Abbildung 4.37. Die Gestaltung des Freischnittes bezüglich der Form und deren Nachbearbeitung wird in keinem Normenwerk genau geregelt.



# Literaturverzeichnis

- [1] Fink, J. (2013). *Vergleichende Analyse der Konstruktionsweise der Hängeranschlussbleche*. (unveröffentlicht).
- [2] BAW-BAST (2013). *Leitfaden zum Anhang NA.F Bemessung von Hängern an Stabbogenbrücken der DIN EN 1993-2/NA:2010-12*.
- [3] DIN-Fachbericht 103:2009-03. (2009). *Stahlbrücken*.
- [4] ÖNORM EN 1993-1-9 (2005). *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung*.
- [5] Feldmann, M., Eichler, B., Boos, B., Henkel, J., & Mack, B. (2013). Modellierungsvarianten und Empfehlungen bei der Ermittlung von Struktur- und Kerbspannungen auf Basis Finiter Element-Berechnungen. *Stahlbau*, 82, Heft 4, 289-301.
- [6] Hobbacher, A. (1996). *Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile (IIW, doc. XIII-1539-96/XV-845-96)*. Düsseldorf: Dt. Verl. für Schweißtechnik, DVS-Verlag.
- [7] Mehlhorn, G. (Hrsg.) (2010). *Handbuch Brücken. Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten*. Berlin: Springer.
- [8] Niemi, E., Fricke, W., & Maddox, S. J. (2006). *Fatigue Analysis of Welded Components - Designer's guide to the structural hot-spot stress approach (IIW-1430-00)*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- [9] Ehmann, R. (2012). Überprüfung der Ermüdungsgefährdung von Hängeranschlüssen von Stabbogenbrücken im Bestand. *BAW-Brief*, 1/2012, 5-8.
- [10] Deutscher, M., Gabrys, U. (2012). Ermüdungssicherheit von geschmiedeten Hängeranschlüssen. *BAW-Brief*, 1/2012, 1-4.
- [11] Stelzer, B., & Dorrer, G. (2013). Zwei Netzwerkbogenbrücken: Verbindung zwischen Ostbahn und Flughafenschnellbahn in Wien, Österreich. *Stahlbau*, 82, Heft 5, 326-333.
- [12] Lüsse, G., Ruscheweyh, H., Verwiebe, C., & Günther G.H. (1996). Regen-Wind-induzierte Schwingungserscheinungen an der Elbebrücke Dömitz. *Stahlbau*, 65, Heft 3, 105-114.

- [13] Schmied, B. & Kurmann, S. (2010). Statischer Festigkeitsnachweis von Schweißnähten mit örtlichen Spannungen. *Manuskript zum Vortrag am Schweizer Maschinenelemente Kolloquium (SMK2010)*. Hochschule für Technik Rapperswil, Schweiz.
- [14] Dassault Systèmes. *Abaqus FEA, Finite Element Software*, Version 6.12.
- [15] Dassault Systèmes. (2012). *Abaqus/CAE User's Manual*.
- [16] Dassault Systèmes. (2013). *Abaqus Theory Guide*.
- [17] Nemetschek Allplan Systems GmbH. (2013). *Allplan/CAE Support*.
- [18] Kurzanleitung GOM ATOS M. Maier, I. Seitz, B. Schiefer (2005). *Kurzanleitung GOM ATOS*. GOM - Gesellschaft für Optische Messtechnik

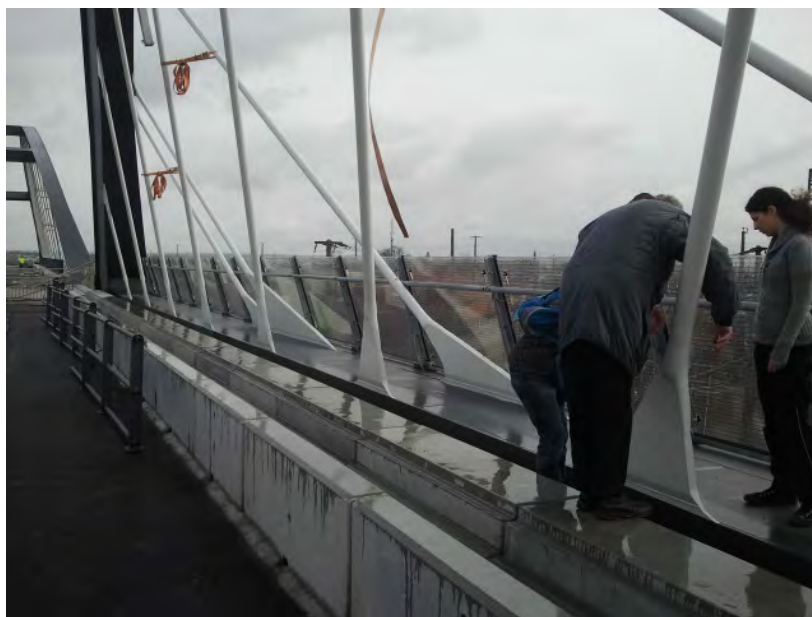
# Anhang **A**

---

## Aufnahmeverfahren des geschmiedeten Hängers

Um eine möglichst genaue Modellbildung des geschmiedeten Hängeranschlusses zu erzeugen, ist es wichtig, die genaue Geometrieform des Hängers zu kennen. Vor allem der Übergang vom Rundstahl zum Spaten ist charakteristisch für den geschmiedeten Hänger. Aufgrund des Herstellungsprozesses ist es jedoch für diesen Abschnitt schwierig, die exakten Geometrien zu erhalten.

Durch optische 3D-Messsysteme gibt es die Möglichkeit, von Bauteilen realitätsgetreue und dreidimensionale Abbildungen in digitaler Form zu erzeugen. Dabei werden komplexe Oberflächenstrukturen und Volumina millimetergenau erfasst und mithilfe von Digitalisierungsprogrammen in 3D-Modelle umgewandelt.



**Abbildung A.1:** Südliche Hängerebenen vom Tragwerk S 5.1

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde ein 3D-Scan von einem geschmiedeten Hänger an der Netzwerkbogenbrücke Verbindung Ostbahn - Flughafenschnellbahn am Wiener Zentralverschiebehof erzeugt. In Abbildung A.1 ist die südliche Hängerebene vom Stahltragwerk S 5.1 zu sehen. Bei der Wahl des Hängers wurde vor allem darauf geachtet, dass er gut zugänglich ist, um ein möglichst exaktes und vollständiges Oberflächenmodell zu erzeugen. Der gewählte Hänger befindet sich in der inneren südlichen Hängerebene und trägt die Plannummer 1Si4. Dieser ist in Abbildung A.1 dadurch ersichtlich, weil an diesem Hänger Vorbereitungen für die Messungen durchgeführt wurden.

Im ersten Schritt wurde der Hänger von Verschmutzungen gesäubert. Um die komplexe Oberflächenstruktur exakt aufnehmen zu können, wurden im zweiten Schritt Referenzpunkte auf den Hänger angebracht und dann die gesamte Oberfläche mit einem speziellen Spray mattiert, damit das Licht des 3D-Scanners nicht zu sehr reflektiert. In Abbildung A.2 ist der geschmiedete Hänger mit den Referenzpunkten zu sehen. Für das Anbringen der Referenzpunkte gelten nach [18] folgende Grundsätze.

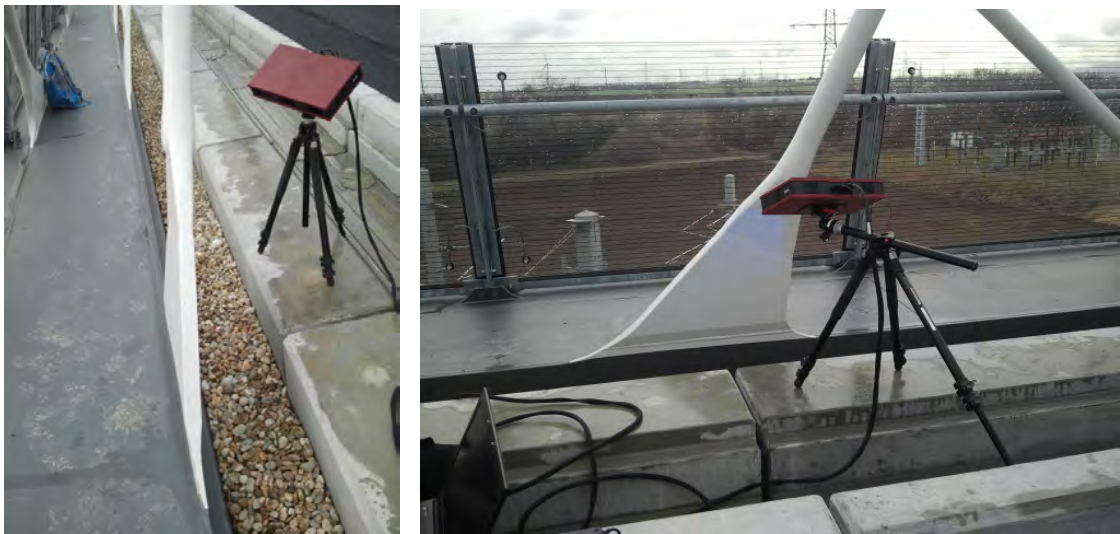
- Die Referenzpunkte möglichst auf ebenen oder nur leicht gewölbten Flächen verteilen.
- Einen entsprechenden Abstand zu den Kanten einhalten.
- Sie sollten aus allen Ansichten sichtbar und im Messvolumen gut verteilt in Länge, Breite und Höhe auftreten.
- Die Anzahl der Referenzpunkte im Messvolumen ist so zu wählen, dass bei nachfolgenden Einzelmessungen immer deutlich mehr als drei Referenzpunkte vorangegangener Messungen erfasst werden.



**Abbildung A.2:** Geschmiedeter Hänger mit Referenzpunkten

Mithilfe der Firma GOM - Gesellschaft für Optische Messtechnik wurde das 3D Oberflächenmodell angefertigt. Wie in Abbildung A.3 ersichtlich, besteht das 3D-Messsystem ATOS Core aus einem Laptop, einem Steuergerät und einem 3D-Scanner. Die Geräte müssen aufgrund des Datenaustausches miteinander verbunden sein.

Nach der Kalibrierung des Messgerätes wurde der Hänger von allen Seiten durch mehrere Scans aufgenommen. Generell war darauf zu achten, dass möglichst viele Referenzpunkte in den Messungen erfasst werden. Großes Augenmerk wurde vor allem auf die Bereiche des Knollens, dem Spaten und die Schweißnaht zwischen Hänger und Knotenblech gelegt.



**Abbildung A.3:** 3D Scan mit Messsystem ATOS Core

Mithilfe dem 3D Digitalisierungsprogramm ATOS Professional konnten die dreidimensionalen Oberflächendaten in ein 3D-Modell umgewandelt werden. Die einzelnen Scans sind aus einer Kombination von Referenzpunkten und dem Abgleich der Oberflächengeometrie automatisch zusammengeführt worden. In Abbildung A.4 ist das aus der Messung gewonnene Oberflächenmodell des geschmiedeten Hängers zu sehen.

Nachdem das Modell auf das gewünschte Koordinatensystem ausgerichtet wurde, konnte für das Oberflächenmodell ein Volumenmodell erstellt werden. Anhand dem Volumenmodell konnten dann im FEM Programm Abaqus Berechnungen durchgeführt werden.



Abbildung A.4: Aufgenommenes Oberflächenmodell

# Anhang **B**

---

## Berechnung der Kalkulationsgrundlagen

### B.1 Tabelle zur Massen- und Oberflächenermittlung

Pos. Nr.	Anzahl	Bauteil Benennung	Bl.Dicke [mm]	Bl.Breite [mm]	Länge [mm]	Material	Gewicht		Fläche		Konstrukt.-Typ	Bemerkung
							1 Stk. [kg]	Gesamt [kg]	1 Stk. [m <sup>2</sup> ]	Gesamt [m <sup>2</sup> ]		
1	1	Blech	20	1155	1839	S355 M	75.74	75.74	0.96	0.96	Geschweißt	Knotenblech oben 3a01
2	1	Blech	20	938	1309	S355 M	73.36	73.36	0.93	0.93	Geschweißt	Knotenblech unten 3a01
3	2	Blech	20	1121	1731	S355 M	80.32	160.63	1.02	2.05	Geschweißt	Knotenblech 3a10
4	1	Rundstahl	DM	100	3277	S460 NL	202.04	202.04	1.03	1.03	Geschweißt	Hänger 3a01
5	1	Rundstahl	DM	100	16569	S460 NL	1021.54	1021.54	5.21	5.21	Geschweißt	Hänger 3a10
6	1	Blech	40	559	567	S355 M	42.17	42.17	0.27	0.27	Geschmiedet	Knotenblech oben 3a01
7	1	Blech	50	345	520	S355 M	52.55	52.55	0.27	0.27	Geschmiedet	Knotenblech unten 3a01
8	1	Blech	40	504	530	S355 M	41.69	41.69	0.27	0.27	Geschmiedet	Knotenblech oben 3a10
9	1	Blech	50	504	530	S355 M	52.11	52.11	0.27	0.27	Geschmiedet	Knotenblech unten 3a10
10	1	Geschm. Hänge	DM	100	2560	S460 NL	148.39	148.39	0.51	0.51	Geschmiedet	Hänger 3a01
11	1	Geschm. Hänge	DM	100	15792	S460 NL	964.19	964.19	4.89	4.89	Geschmiedet	Hänger 3a10

Bauteile Summe			
Konstrukt.-Typ	Hängerbez. [-]	Gewicht [kg]	Fläche [m <sup>2</sup> ]
Geschweißt	3a01	351.14	2.93
	3a10	1342.81	9.30
Geschmiedet	3a01	243.11	1.05
	3a10	1058.00	5.42

Abbildung B.1: Massenermittlung der geschweißten und geschmiedeten Hängeranschlusskonstruktion



## B.2 Plangeometrien der Knotenbleche

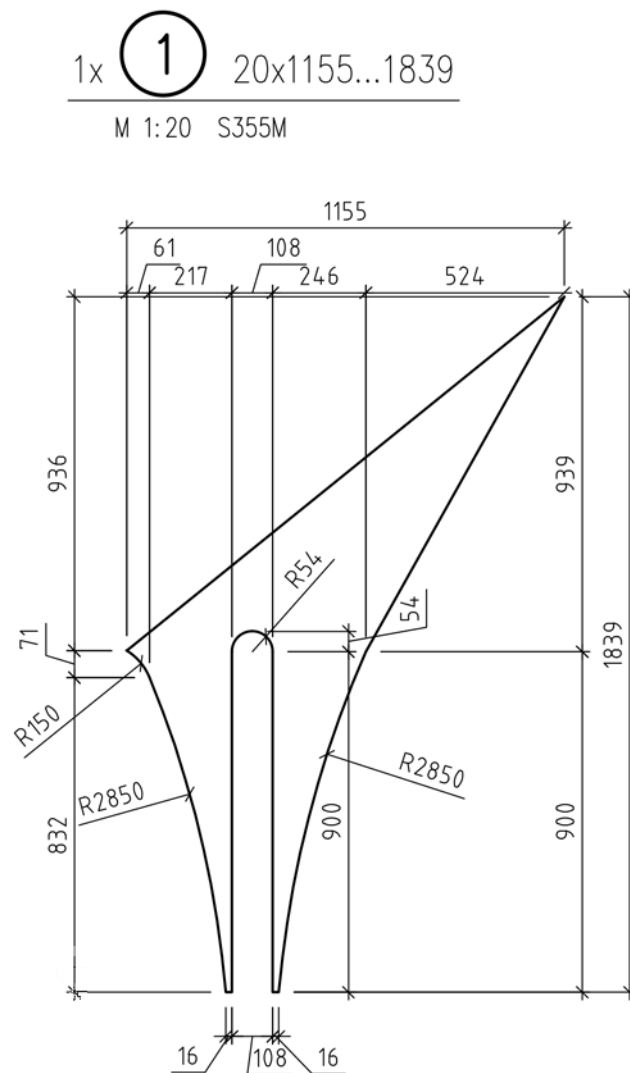


Abbildung B.2: Oberes Knotenblech vom geschweißten Hänger 3a01

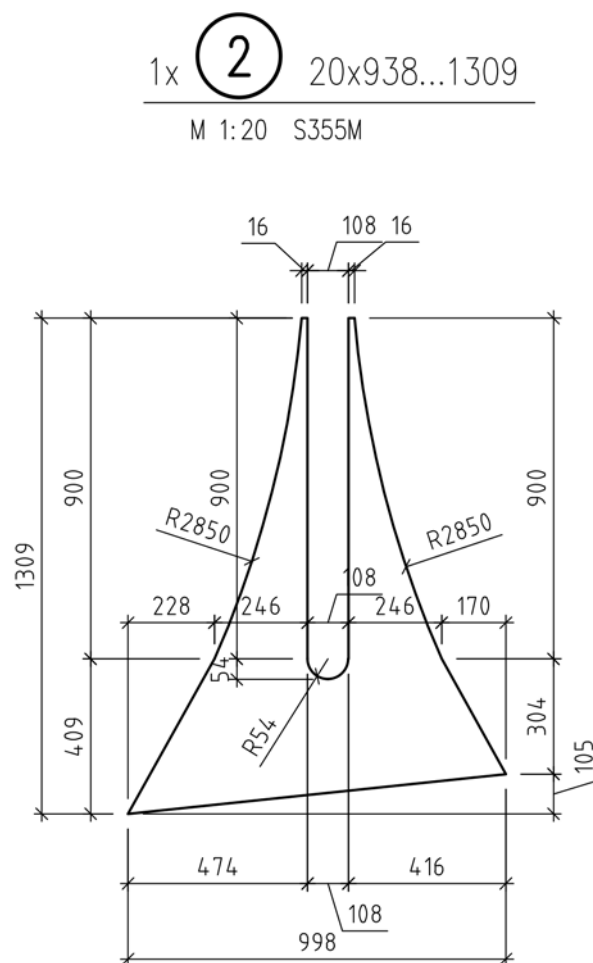


Abbildung B.3: Unteres Knotenblech vom geschweißten Hänger 3a01

2x **3** 20x1121...1731  
M 1:20 S355M

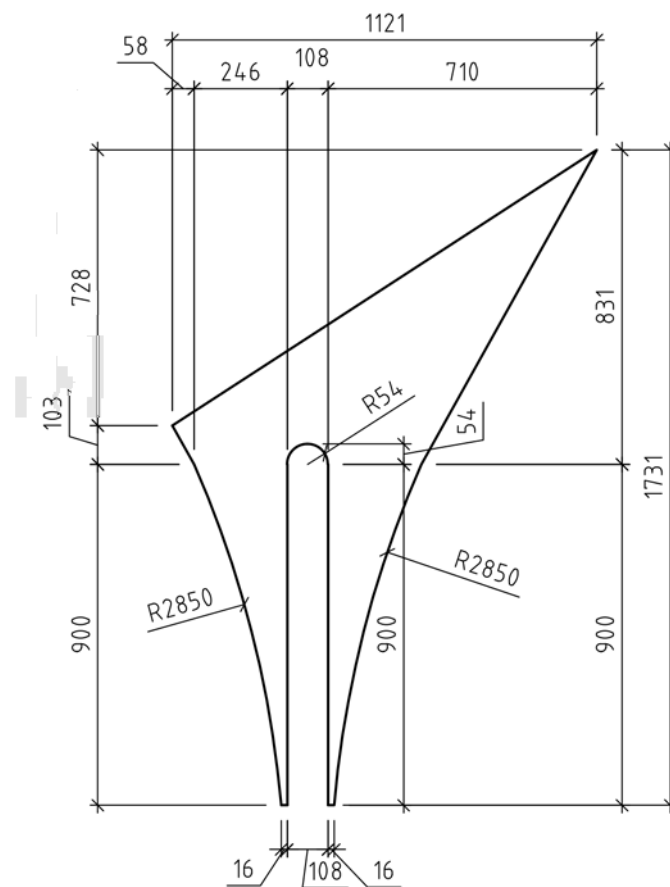


Abbildung B.4: Knotenbleche vom geschweißten Hänger 3a01

1x **4** DM100...3277

M 1:20 S460NL Rundstahl

1x **5** DM100...16569

M 1:20 S460NL Rundstahl

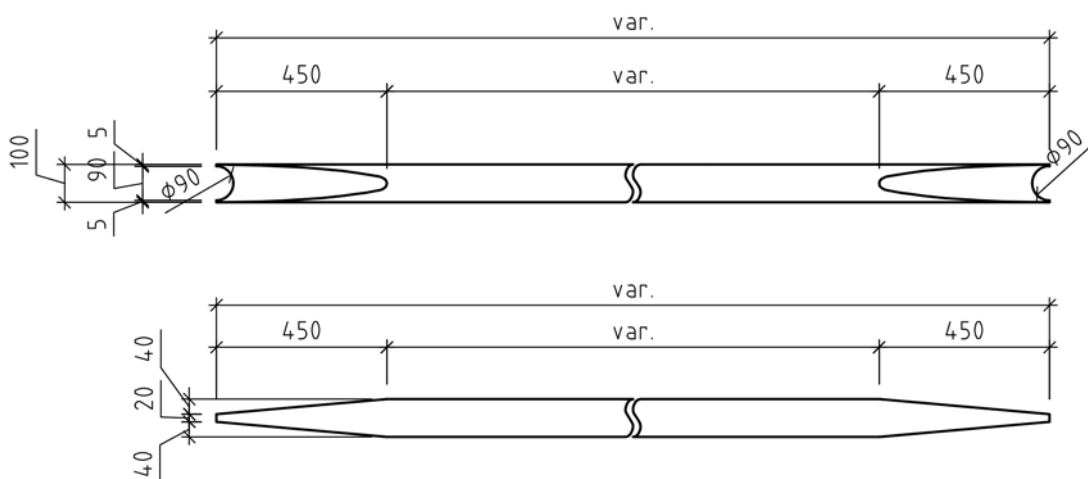
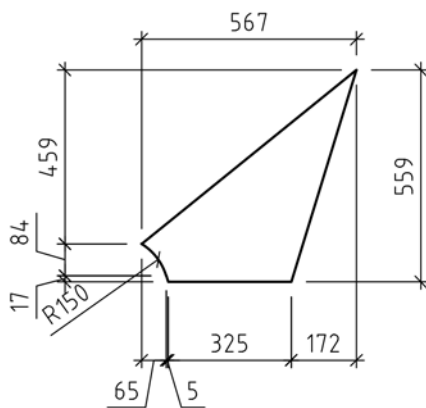
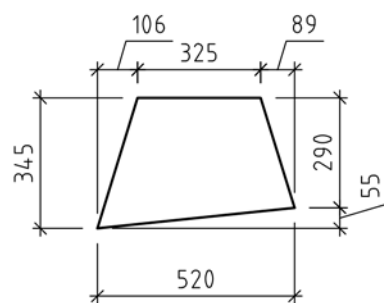


Abbildung B.5: Abgeschrägte Hänger 3a01 und 3a10

1x **6** 40x559...567  
M 1:20 S355M

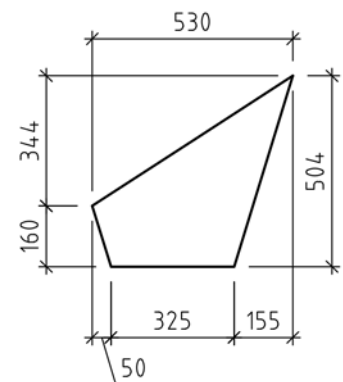


1x **7** 50x345...520  
M 1:20 S355M



1x **8** 40x504...530  
M 1:20 S355M

1x **9** 50x504...530  
M 1:20 S355M



**Abbildung B.6:** Knotenbleche für die geschmiedeten Hänger 3a01 und 3a10



# Autorenliste

<b>Kapitel</b>	<b>Autor</b>
1	Birklbauer, B.
2	Neier, M.
3.1	Birklbauer, B. Neier, M.
3.2	Birklbauer, B. Neier, M.
3.3.1	Birklbauer, B.
3.3.2	Birklbauer, B.
3.3.3	Neier, M.
3.3.4	Birklbauer, B.
3.3.5	Neier, M.
3.4.1	Birklbauer, B.
3.4.2	Neier, M.
4	Birklbauer, B.
5	Neier, M.
6	Birklbauer, B. Neier, M.
A	Neier, M.
B	Birklbauer, B.