



## Diplomarbeit

# Ermüdungsnachweis für Schweißnähte in Behältern – Bestimmung von Strukturspannungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer / eines  
Diplom-Ingenieurin (Dipl.-Ing. oder DI) / Diplom-Ingenieurs (Dipl. Ing oder DI)  
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

**Bernhard OGNAR, BSc**

Mat.Nr.: 01126514

unter der Leitung von

Ao.Univ.- Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Rauscher

Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung, E 307

Getreidemarkt 9, 1060 Wien, Österreich

---

*Bernhard Ognar, BSc*

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

**Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

*Eidesstattliche Erklärung*

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, Juni, 2019

---

*Bernhard Ognar, BSc*

# Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich bei allen Personen, die mich während meines Studiums unterstützt und begleitet haben. Ein großer Dank gebührt meiner Familie, die mir immerzu Rückhalt gegeben hat.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Ao. Univ.- Prof. Dr. Franz Rauscher für die fachkundige Betreuung meiner Diplomarbeit und für die zahlreichen fachlichen Diskussionen, die mir beim Erstellen dieser Arbeit sehr geholfen haben.

# Kurzfassung

Vorschriften für den Ermüdungsnachweis, wie sie in Normen und Regelwerken festgelegt sind, legen Vorgangsweisen für die Bestimmung der zulässigen Lastzyklen fest. In diesem Zusammenhang werden bei der Ermüdungsanalyse nach EN 13445-3 Abschnitt 18 in den Auslegungskurven Strukturspannungen verwendet. Diese Strukturspannungen müssen für den analysierten Bauteil bestimmt werden. Leider hängen die Ergebnisse der Analyse stark von der Methode ab, die zur Bestimmung der Strukturspannungen verwendet wird. Zusätzlich wurden in einem neueren Entwurf der Norm die erlaubten Methoden zur Bestimmung der Strukturspannungen wesentlich erweitert.

Ziel dieser Arbeit ist es anhand von Beispielen verschiedene Varianten der Bestimmung von Strukturspannungen zu testen und die Variationsbreite der Ergebnisse zu ermitteln.

Als gut geeignetes Verfahren erweist sich ein Extrapolationsverfahren an einem Modell mit einem 2mm verrundeten Schweißnahtübergang. Eine Methode zur Bestimmung der Strukturspannungen durch direkte Spannungsauswertung in einer Entfernung von 2mm zur modellierten Schweißnaht liefert keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

Die Modelle in dieser Abhandlung wurden mit ANSYS® Academic Student, Release 19.0 angefertigt.

# Abstract

Requirements for fatigue analysis, as defined in standards and regulations, specify procedures for determining the permissible load cycles. In this context, in the fatigue analysis according to EN 13445-3 part 18, structural stresses are used in the design curves. These structural stresses have to be determined for the analyzed component. Unfortunately, the results of the analysis depend highly on the method used to determine the structural stresses. In addition the allowed methods for determining the structural stresses have been significantly extended in a recent draft of the standard.

The aim of this paper is to test different methods of the determination of structural stresses by examples and to determine the range of variation of the results.

A suitable procedure is an extrapolation method on a model with a 2 mm rounded transition of the weldseam. A method for the determination of the structural stresses by direct stress evaluation at a distance of 2mm from the modelled weld does not provide satisfactory results.

The models in this paper were made using ANSYS® Academic Student, Release 19.0.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ermüdungsfestigkeit geschweißter Bauteile</b>	<b>3</b>
2.1	Verfahren zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit auf Basis von Wöhlerlinien .	4
2.1.1	Nennspannungsverfahren . . . . .	5
2.1.2	Strukturspannungsverfahren . . . . .	7
2.1.3	Verfahren der effektiven Kerbspannungen . . . . .	10
2.2	Ermüdungsnachweis EN 13445-3 Abschnitt 18.6 . . . . .	11
2.2.1	Verfahren der Vergleichsspannungsschwingbreite EN 13445-3 Abschnitt 18.10.1.2 . . . . .	13
2.2.2	Verfahren der Strukturspannungsschwingbreite EN 13445-3 Anhang P . .	14
<b>3</b>	<b>Bestimmung von Strukturspannungen</b>	<b>16</b>
3.1	Modellierungsmöglichkeiten . . . . .	17
3.1.1	CAB Modell . . . . .	17
3.1.2	Modell Schweißnaht . . . . .	19
3.1.3	Modell 2mm Radius . . . . .	20
3.1.4	Modell keine Schweißnaht . . . . .	21
3.1.5	Schalenelemente . . . . .	22
3.2	Methoden zur Bestimmung von Strukturspannungen . . . . .	24
3.2.1	Extrapolationsverfahren . . . . .	24
3.2.2	Haibach Methode . . . . .	26
3.2.3	Linearisierung durch die Wand . . . . .	27
3.2.4	Direkte Ermittlung der Strukturspannung . . . . .	29

3.3	Übersicht der Kombinationen von Modellierungsmöglichkeiten mit den Möglichkeiten der Spannungsermittlung . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Auslegungsrechnung</b>	<b>30</b>
4.1	Ebener Boden . . . . .	32
4.1.1	Betriebszustände ebener Boden . . . . .	32
4.1.2	Auslegung des Bodens nach DIN EN 13445-3 . . . . .	33
4.1.3	Abmessungen ebener Boden . . . . .	38
4.2	Kugelschale . . . . .	41
4.2.1	Betriebszustände Kugelschale . . . . .	41
4.2.2	Auslegung Kugelschale nach EN 13445-3 . . . . .	41
4.2.3	Abmessungen Kugelschale . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Numerische Analyse</b>	<b>50</b>
5.1	Ebener Boden 2D . . . . .	50
5.1.1	Modellierung . . . . .	50
5.1.2	Randbedingungen . . . . .	52
5.1.3	Vernetzung . . . . .	54
5.1.4	Ergebnisse Thermische Analyse . . . . .	59
5.1.5	Auswertung der Spannungen zur Ermüdungsanalyse der Schweißnähte . .	60
5.2	Kugelschale 2D . . . . .	65
5.2.1	Modellierung . . . . .	65
5.2.2	Randbedingungen . . . . .	67
5.2.3	Vernetzung . . . . .	70
5.2.4	Ergebnisse Thermische Analyse . . . . .	75
5.2.5	Auswertung der Spannungen zur Ermüdungsanalyse der Schweißnähte . .	76
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>82</b>
6.1	Extrapolationsverfahren . . . . .	83
6.1.1	Ergebnisse Extrapolationsverfahren $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen)	83
6.1.2	Ergebnisse Extrapolationsverfahren $\sigma_z$ (Umfangsspannungen) . . . . .	86

6.2	Linearisierung durch die Wand . . . . .	88
6.2.1	Ergebnisse Linearisierung durch die Wand $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen) . . . . .	89
6.2.2	Ergebnisse Linearisierung durch die Wand $\sigma_z$ (Umfangsspannungen) . . . . .	92
6.3	Haibach Methode . . . . .	94
6.3.1	Ergebnisse Haibach Methode $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen) . . . . .	95
6.3.2	Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt $\sigma_z$ (Umfangsspannungen) . . . . .	97
6.3.3	Ergebnisse Haibach 0,15t, 1/3z entfernt $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen) . . . . .	99
6.3.4	Ergebnisse Haibach 0,15t, 1/3z entfernt $\sigma_z$ (Umfangsspannungen) . . . . .	102
6.4	Direkte Auswertung . . . . .	104
6.4.1	Ergebnisse Direkte Auswertung CAB Modell $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen) . . . . .	105
6.4.2	Ergebnisse Direkte Auswertung CAB Modell $\sigma_z$ (Umfangsspannungen) . . . . .	107
6.4.3	Ergebnisse Direkte Auswertung 2mm Radius Modell $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen) . . . . .	109
6.4.4	Ergebnisse Direkte Auswertung 2mm Radius Modell $\sigma_z$ (Umfangsspannungen) . . . . .	111
6.5	Extrapolation in den Schnittpunkt am 2mm Radius Modell . . . . .	113
6.5.1	Ergebnisse Erweiterung des Extrapolationsverfahrens am 2mm Modell $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen) . . . . .	114
6.5.2	Ergebnisse Erweiterung des Extrapolationsverfahrens am 2mm Modell $\sigma_z$ (Umfangsspannungen) . . . . .	117
6.6	Vergleich Linearisierung durch die Wand mit dem quadratischen Extrapolationsverfahren im gleichen Modell . . . . .	119
6.6.1	Ergebnisse Vergleich Linearisierung durch die Wand mit dem quadratischen Extrapolationsverfahren $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen) . . . . .	121
6.6.2	Ergebnisse Vergleich Linearisierung durch die Wand mit dem quadratischen Extrapolationsverfahren $\sigma_z$ (Umfangsspannungen) . . . . .	125
<b>7</b>	<b>Diskussion</b> . . . . .	<b>130</b>
7.1	Einfluss der Netzfeinheit auf das Extrapolationsverfahren . . . . .	130
7.2	Problematik am CAB Modell, 2mm Radius Modell . . . . .	132

<b>8 Zusammenfassung</b>	<b>133</b>
<b>A Anhang</b>	<b>135</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Bestimmung der Ermüdungslebensdauer von Schweißnähten in Behältern in der Konstruktionsphase stellt einen wichtigen Teil der lebensdauergerichten Konstruktion dieser Druckgeräte dar. Es werden dabei verschiedenste Methoden zur Bestimmung der zulässigen Lastzyklen festgelegt, wie Verfahren die auf Nenn-, Struktur- oder Kerbspannungen beruhen, auch Ansätze der Bruchmechanik werden angewandt. Zur Bestimmung der zulässigen Lastzyklen legt [1] in Teil 18 als Grundlage für diesen Ermüdungsnachweis mittels Finite Elemente Methoden die Bestimmung von Strukturspannungen am Schweißnahtübergang fest. Speziell an dieser Stelle erweist sich die Berechnung der Strukturspannungen in der Konstruktionsphase als schwierig. [2]

Die Bestimmung dieser Strukturspannungen ist bei der Ermüdungsanalyse von Schweißnähten, für die Berechnung der ertragbaren Lastzyklen, entscheidend. Die jeweilige Methode der Bestimmung dieser Spannungen hat somit einen erheblichen Einfluss auf die Berechnung der Ermüdungslebensdauer. Die Ermüdungsanalyse wird laut [1] Teil 18 auf Grundlage von Strukturspannungen durchgeführt. Die zulässigen Methoden zur Bestimmung mittels Finiter Elemente beschränken sich dabei auf eine Extrapolation von Spannungen an der Oberfläche, vor dem Bereich der Schweißnaht in den Bereich des Schweißnahtübergangs. In [1] wird die Bestimmung von Strukturspannungen mittels Finite Elemente Methoden wie folgt beschrieben:

*Wird die Hauptspannung durch eine detaillierte Spannungsanalyse (z. B. Finite-Elemente-Methode) oder durch Messungen bestimmt, ist sie durch Extrapolation aus der Hauptspannung zu ermitteln, die am nächsten an der Senkrechten zur Schweißnaht wirkt.*

In [3] werden weitere Vorgehensweisen der Strukturspannungsermittlung genannt. Die Möglichkeit der Ergänzung dieser Methode zur Ermittlung der Ermüdungslebensdauer von Schweißnähten durch andere Methoden soll in der folgenden Arbeit untersucht werden. Dabei werden verschiedene Möglichkeiten der Bestimmung dieser Spannungen anhand von Finite Elemente Modellen miteinander verglichen, deren Anwendbarkeit bewertet und die Ergebnisse dargelegt.

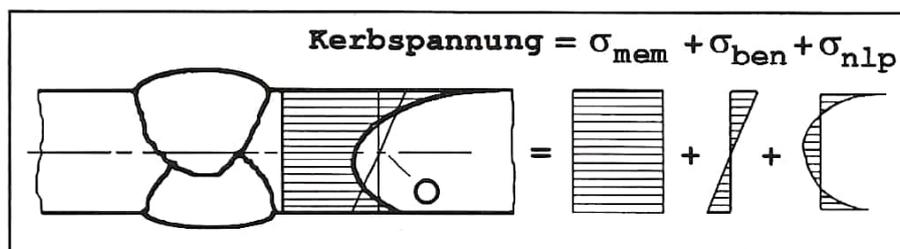
## Kapitel 2

# Ermüdungsfestigkeit geschweißter Bauteile

Der Übergang einer Schweißnaht zum Grundwerkstoff wirkt wie eine Kerbe und bewirkt in ihrer Umgebung einen nichtlinearen Spannungsverlauf über die Blechdicke. Die einzelnen Anteile der Spannungsverteilung können separiert werden. Die Spannungsanteile an der Kerbspannung sind:

- Membranspannungsanteil
- Schalenbiegespannungsanteil
- nichtlineare Spannungsspitze

Diese Anteile an der gesamten Kerbspannung sind in Abb. 2.1 ersichtlich.



**Abb. 2.1:** Spannungsanteile bei nichtlinearem Spannungsverlauf [4]

Diese Anteile können bei einer detaillierten Spannungsanalyse, aus der die nichtlineare Spannungsverteilung ersichtlich ist, durch folgende Methode getrennt werden:

Man betrachtet ein Blech mit der Wanddicke  $t$ , die Variable  $x$  entspricht der Entfernung von einer Seite des Blechs zur anderen. [4]

Die Membranspannungen entsprechen den durchschnittlichen Spannungen im Blech und sind konstant über die Wanddicke verteilt. Die Berechnung erfolgt anhand Gleichung 2.1. [4]

$$\sigma_{mem} = \frac{1}{t} \cdot \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \cdot dx \quad (2.1)$$

Die Schalenbiegespannungen sind linear über die Wanddicke verteilt, wie in Abb. 2.1 ersichtlich. Im Punkt O schneiden die Membranspannungen die Mittellinie des Bleches. Die Steigung der Geraden durch den Punkt O wird so gewählt, dass die nichtlineare Spannungsspitze im Gleichgewicht steht. Gleichung 2.2 zeigt die analytische Berechnung der Schalenbiegespannungen. [4]

$$\sigma_{ben} = \frac{6}{t^2} \cdot \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \cdot \left(\frac{t}{2} - x\right) \cdot dx \quad (2.2)$$

Der restliche Anteil an den Kerbspannungen stellt die nichtlineare Spannungsspitze dar und wird durch Gleichung 2.3 ermittelt. [4]

$$\sigma_{nlp}(x) = \sigma(x) - \sigma_{mem} - \left(1 - \frac{x}{2}\right) \cdot \sigma_{ben} \quad (2.3)$$

## 2.1 Verfahren zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit auf Basis von Wöhlerlinien

Zur Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißstrukturen unterscheidet man drei prinzipielle Verfahren:

- Verfahren, bei denen Ermüdungsversuche an Bauteilen durchgeführt wurden
- Verfahren, die auf der Bruchmechanik aufbauen
- Verfahren, die auf Wöhlerlinien aufbauen

Bei Verfahren, die auf Wöhlerlinien aufbauen, ist zu unterscheiden zwischen Verfahren für ungeschweißte, polierte Stäbe mit Einbeziehung von Kerbfaktoren und Verfahren für typische Schweißnahtkonfigurationen. Da die Ermüdungsberechnung nach [1] auf Wöhlerlinien für typische Schweißnahtkonfigurationen aufbaut, wird im Zuge dieser Arbeit nur auf diese Verfahren eingegangen. Im Folgenden werden Verfahren erläutert die auf Wöhlerlinien aufbauen. Diese sind: [4]

- das Nennspannungsverfahren
- das Strukturspannungsverfahren
- das Kerbspannungsverfahren

### 2.1.1 Nennspannungsverfahren

Beim Nennspannungsverfahren wird die Bauteilbelastung durch die Nennspannungen beschrieben und es wird üblicherweise linearelastisches Verhalten der Struktur angenommen. Bestimmt werden die Nennspannungen meist durch bauteilspezifische analytische Formeln. Diese Spannungen berücksichtigen spannungserhöhende Effekte aufgrund der makrogeometrischen Form des Bauteils in der Nähe der Schweißverbindung wie beispielsweise große Ausschnitte. Diese Effekte können zu erheblichen Spannungsumlagerungen der Membranspannungen im Querschnitt führen. Die Auswirkungen von makrogeometrischen Effekten sind in Abb. 2.2 ersichtlich. [4]

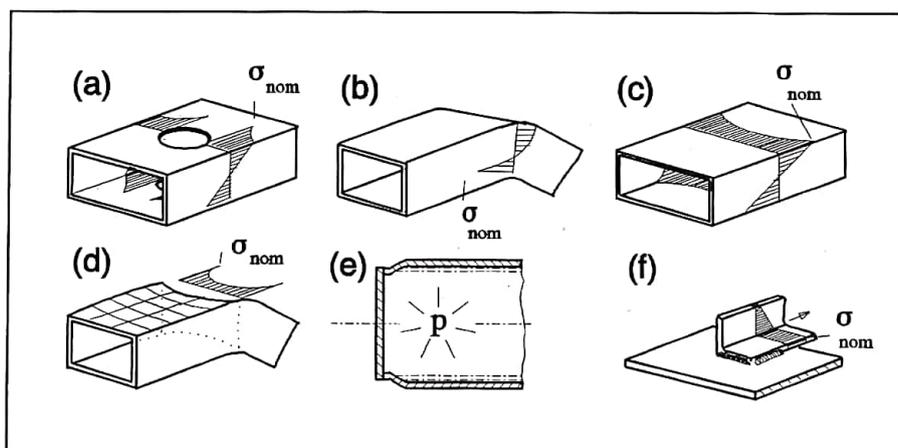


Abb. 2.2: Auswirkungen makrogeometrischer Effekte auf die Nennspannungen [4]

In Abb. 2.3 sind ähnliche spannungserhöhende Effekte in der Nähe von Punktlasten ersichtlich.

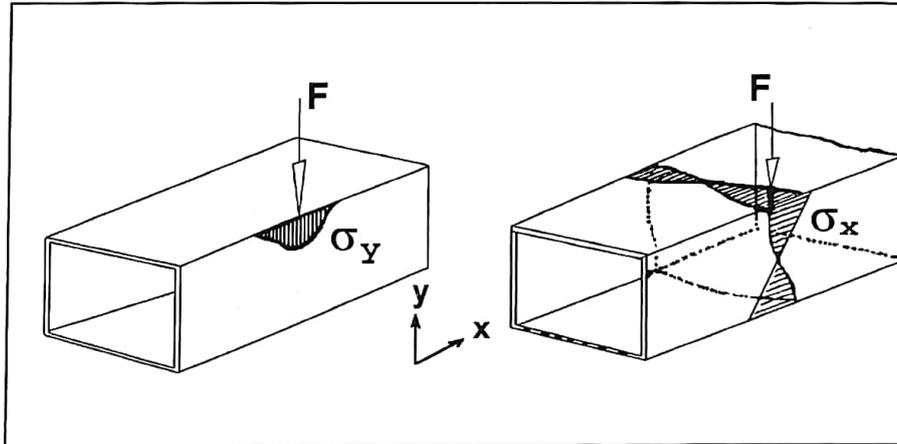


Abb. 2.3: Spannungserhöhende Effekte in der Nähe von Punktlasten [4]

Örtliche spannungserhöhende Effekte aufgrund der Schweißnaht selbst werden in die Berechnung nicht miteinbezogen.

Aufgrund der makrogeometrischen Form oder der Belastung des Bauteils können die Nennspannungen über den Querschnitt variieren. Diese Variation über den Querschnitt anhand eines Biegeträgers ist in Abb. 2.4 ersichtlich und kann durch eine einfache Balkenbiegetheorie bestimmt werden. [4]

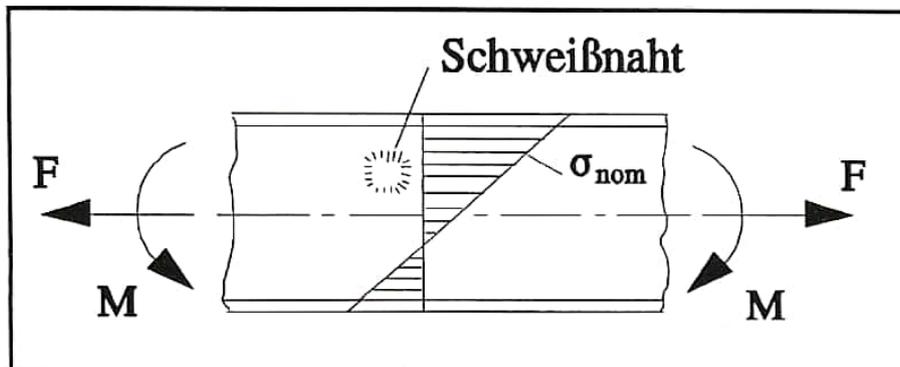


Abb. 2.4: Nennspannungen in einem Biegeträger [4]

Winkel- oder Kantenversatz verursacht sekundäre Biegespannungen, die berücksichtigt werden müssen, sobald der Versatz jenen Betrag überschreitet, der in den Wöhlerlinien bereits berücksichtigt ist. In diesem Fall wird ein zusätzlicher Spannungserhöhungsfaktor in die Berechnung miteinbezogen. Abb. 2.5 zeigt mögliche Konstruktionsdetails mit axialem Versatz bzw. Winkelversatz. [4]

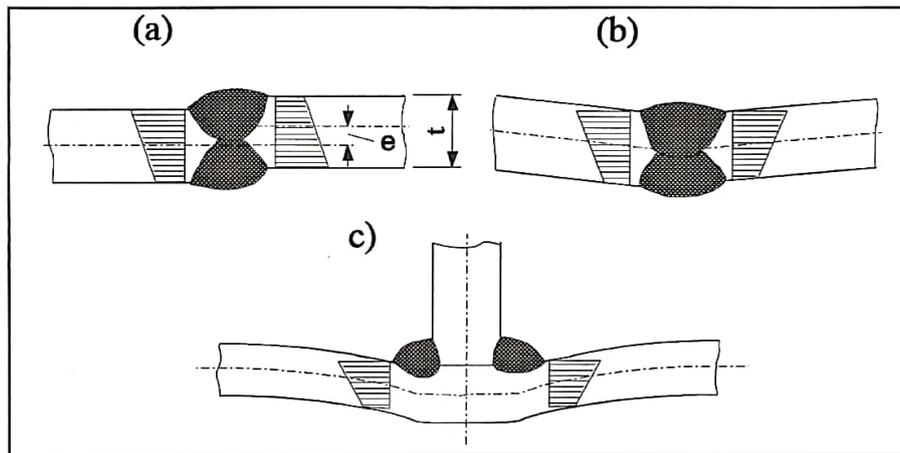


Abb. 2.5: Sekundäre Biegespannungen aufgrund axialem Versatz bzw. Winkelversatz [4]

### 2.1.2 Strukturspannungsverfahren

Die Strukturspannungen berücksichtigen die Membranspannungsanteile sowie den Schalenbiegespannungsanteil, nicht jedoch den nichtlinearen Anteil der Spitzenspannung. Somit umfassen Strukturspannungen die Kerbwirkung aller Strukturdetails, nicht jedoch die Kerbwirkung aufgrund der örtlichen Kerbe, wie z.B. dem Schweißnahtübergang. In Abb. 2.6 ist exemplarisch der Spannungsverlauf entlang der Oberfläche durch Finite Elemente Analyse, sowie die extrapolierten Strukturspannungen, ersichtlich. Die Strukturspannungen werden an jenem Punkt an der Oberfläche des Bauteils bestimmt, welcher bewertet werden soll. [4]

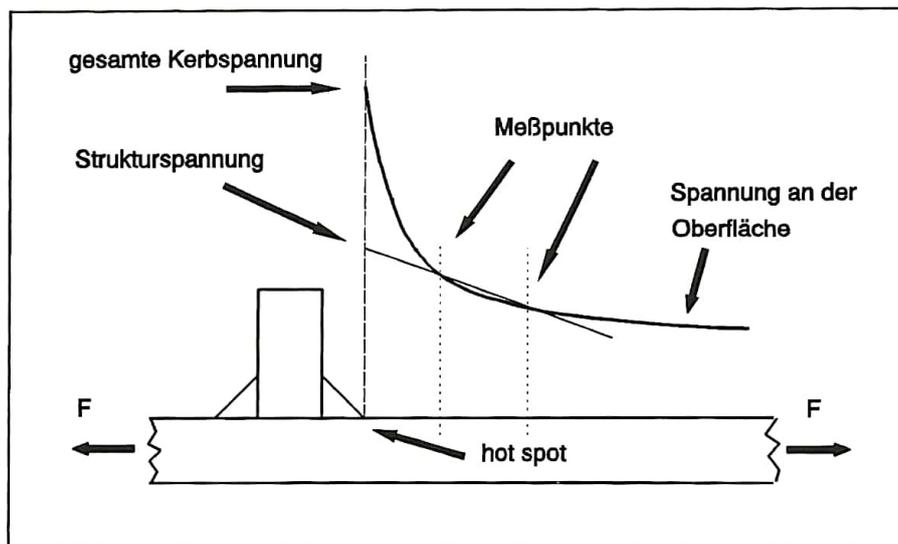
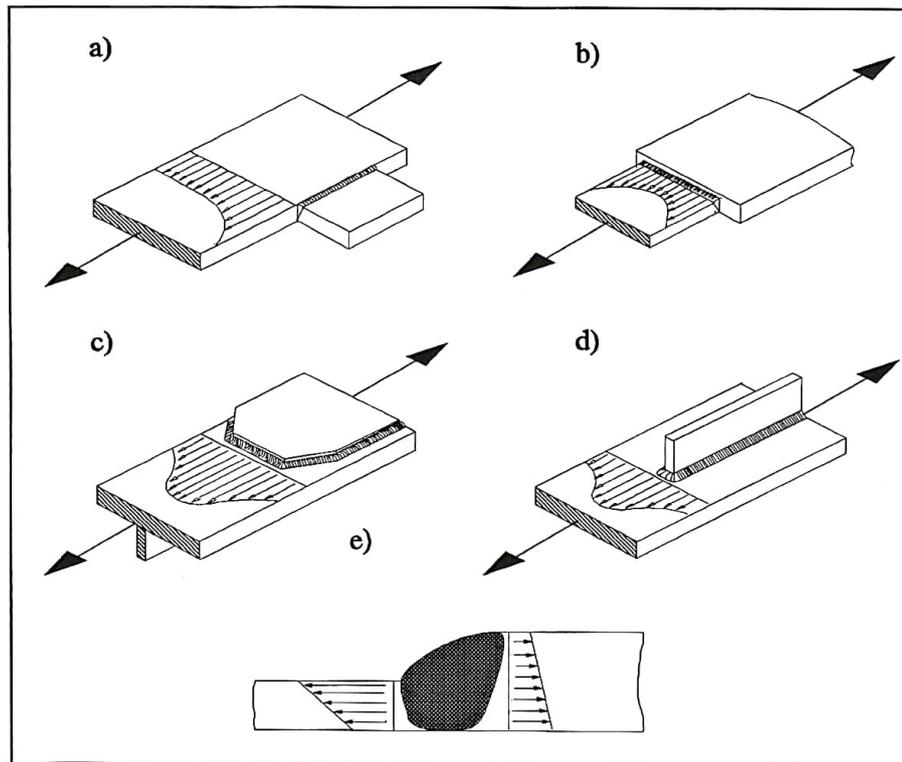


Abb. 2.6: Nichtlinearer Spannungsverlauf entlang der Oberfläche [4]

Im Allgemeinen sind die Strukturspannungen höher als die Nennspannungen, da spannungserhöhende Effekte aus der konstruktiven Kerbe der Schweißverbindung mitberücksichtigt werden. Die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit erfolgt anhand der Strukturspannungen an den kritischen Stellen einer Schweißverbindung, an denen Ermüdungsrisse erwartet werden. Es ist auf die kritische Spannungsrichtung zu achten, dabei wird die größte Hauptnormalspannung als Strukturspannung verwendet. Die Verwendung von Vergleichsspannungen anstatt Hauptnormalspannungen als Strukturspannungen ist auch möglich. In Abb. 2.7 sind einige Konstruktionsdetails sowie die zugehörige exemplarische Spannungsverteilung dargestellt. [4]



**Abb. 2.7:** Konstruktionsdetails mit zugehöriger Strukturspannungsverteilung [4]

Strukturspannungsverfahren werden vor allem empfohlen bei Konstruktionen bei denen:

- die Nennspannungen aufgrund der Geometrie nicht einfach bestimmt werden kann
- die Kerbwirkung nicht mit einem tabellierten Konstruktionsdetail verglichen werden kann

Die Methode beschränkt sich auf die Bewertung des Nahtübergangs. Die Ermittlung der Strukturspannungen erfolgt im Allgemeinen mittels Finite Elemente Methoden, da die analytische Bestimmung von Strukturspannungen aufgrund der Kerbwirkungen von konstruktiven Details im Normalfall nicht möglich ist. Es empfiehlt sich mittels Finite Elemente Methoden die maximalen Hauptnormalspannungen zu ermitteln.

Ein möglicher Kantenversatz ist dann zu berücksichtigen, wenn die Finite Elemente Methoden Berechnung mit einer idealisierten perfekt ausgerichteten Schweißverbindung durchgeführt wurde. Dieser muss im Rahmen der Daten des Ermüdungswiderstandes miteinbezogen werden. [4]

Die Ermittlung der Strukturspannungen erfolgt üblicherweise mittels Extrapolation der Spannungen an den Schweißnahtübergang. Zu beachten ist vor allem eine adäquate Netzverfeinerung an den kritischen Stellen, um Spannungen und Spannungsgradienten an den Extrapolationspunkten ermitteln zu können. Die Erläuterung des Extrapolationsverfahrens erfolgt in Kapitel 3.2.1. [4]

### 2.1.3 Verfahren der effektiven Kerbspannungen

Bei der Berechnung der effektiven Kerbspannungen wird linearelastisches Materialverhalten angenommen. Diese Spannungen umfassen die gesamten im Kerbgrund herrschenden Spannungen. Bei dieser Methode, wird die reale Form der Kerbe an der Schweißnaht durch einen effektiven Kerbradius von  $r = 1\text{mm}$  ersetzt und ist in Abb. 2.8 ersichtlich.

Mithilfe der effektiven Kerbspannungen werden Versagensformen berücksichtigt, bei denen die Schweißnaht vom Nahtübergang her oder der Nahtwurzel aus versagen. Nicht berücksichtigt wird beispielsweise ein Ermüdungsversagen aufgrund von Schweißnahtfehlern, sowie ausgehend von Oberflächenrauigkeiten. Nicht geeignet ist diese Methode für Fälle bei denen größere Spannungskomponenten parallel zur Schweißnaht oder der Wurzelkerbe auftreten. Als geeignet erweist sich diese Methode zum Vergleich verschiedener Schweißnahtgeometrien. Es wird empfohlen, bei Kehlnähten einen Flankenwinkel von  $45^\circ$  und für Stumpfnähte einen Winkel von  $30^\circ$  anzunehmen. Die Methode der effektiven Kerbspannung ist auf Wanddicken von  $t \geq 5\text{mm}$  begrenzt. [4]

Die Ermittlung der effektiven Kerbspannungen kann aus parametrischen Formeln, vorhandenen Diagrammen oder mittels Finite Elemente Methoden erfolgen. [4]

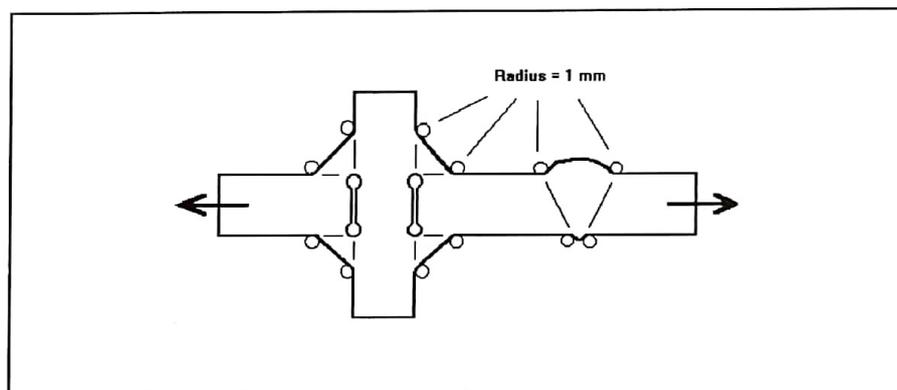
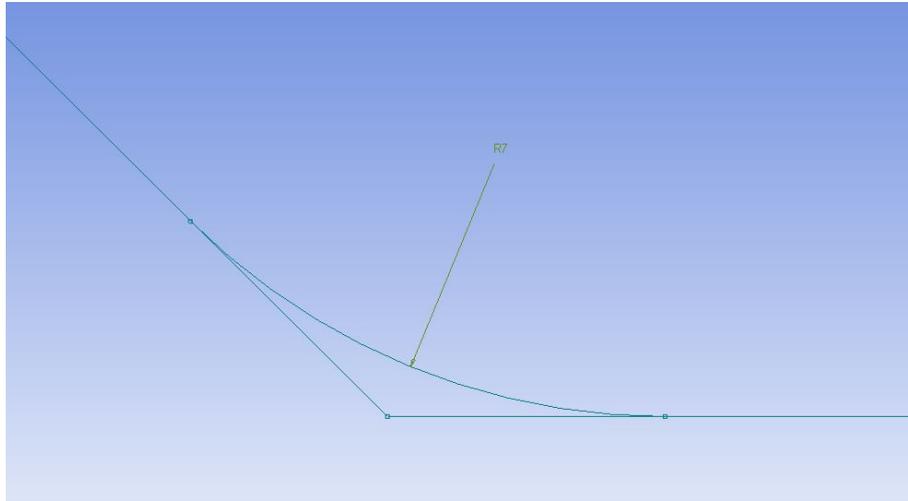


Abb. 2.8: Kerbspannungskonzept mit effektiven Kerbradius von  $r = 1\text{mm}$  [4]

Der effektive Kerbradius wird so konstruiert, dass der Radius mit der Kontur tangential abschließt, entsprechend Abb. 2.9. [4]



**Abb. 2.9:** Konstruktion des Radius

## 2.2 Ermüdungsnachweis EN 13445-3 Abschnitt 18.6

Der Ermüdungsnachweis des Nahtwurzelbereichs nach [1] Abschnitt 18.6 erfolgt für durchgeschweißte Nähte durch Bestimmung der Strukturspannungen. Diese Ermittlung der Hauptnormalspannungen kann entweder durch Messungen oder eine detaillierte Spannungsanalyse wie die Finite Elemente Methode bestimmt werden. Die Ermittlung der Strukturspannungen erfolgt durch Extrapolation der Hauptnormalspannungen, welche am nächsten an der Senkrechten zur Schweißnaht wirken.

Die Norm [1] sieht bei der Ermüdungsberechnung von Kehlkehlen zwei Optionen vor: Eine auf Grundlage von Hauptnormalspannungen, die andere auf Grundlage von Vergleichsspannungen. Die Schweißnähte werden bei beiden Methoden anhand von Tabellen klassifiziert, abhängig davon, ob Vergleichs- oder Hauptnormalspannungen verwendet wurden. [1] [5]

Im Folgenden wird überblicksmäßig eine mögliche Vorgehensweise des Ermüdungsnachweises für Schweißnähte nach [1] Abschnitt 18 erläutert.

1.
  - Option 1: Ermittlung des Verlaufs der Hauptstrukturspannungen  $\sigma_{struc1}$  und  $\sigma_{struc2}$  nach [1] 18.6.2.3 für einen Nachweis mittels Hauptnormalspannungen nach Anhang P.
  - Option 2: Ermittlung des Verlaufs der Hauptspannungsdifferenzen  $S_{12}, S_{23}$  und  $S_{31}$  nach [1] 18.6.2.2 für einen Nachweis mittels Vergleichsspannungen nach [1] 18.10.1.2
2. Aus diesem zeitlichen Verlauf wird entweder die Strukturspannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{struc}$  oder die Vergleichsspannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{eq}$  berechnet.
3. Vereinfachtes Lastzyklenzählverfahren nach [1] 18.9.2 oder Reservoir Lastzyklenzählverfahren nach [1] 18.9.3
4. Klassifizierung der Schweißnähte nach [1] Anhang P bei Verwendung der Strukturspannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{struc}$  (Option 1) oder nach [1] 18.10.1.2 bei Verwendung der Vergleichsspannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{eq}$  (Option 2)
5. Plastizitätskorrektur nach [1] 18.8 falls  $\Delta\sigma \geq 2 * R_{0,2t} \rightarrow$  Ermittlung der korrigierten Spannungsschwingbreite
6. Dickenkorrektur nach [1] 18.10.6.1
7. Temperaturkorrekturfaktor nach [1] 18.10.6.2
8. Berechnung des Gesamtkorrekturfaktor [1] 18.10.6.3
9. Ermittlung der zulässigen Lastzyklenanzahl aus den Ermüdungskurven für geschweißte Bauteile nach [1] 18.10.7
10. Ermittlung der zulässigen Betriebszyklen durch Lineare Schadensakkumulation nach [1] 18.5.6

## 2.2.1 Verfahren der Vergleichsspannungsschwingbreite EN 13445-3 Abschnitt 18.10.1.2

Das Verfahren nach [1] Abschnitt 18.10.1.2 erfolgt auf Grundlage der Vergleichsspannungsschwingbreite. Bei dieser Klassifizierung werden sowohl Ermüdungsrisse ausgehend vom Schweißnahtübergang, als auch Ermüdungsrisse in der Naht selbst berücksichtigt.

Im Fall mit zeitlich konstanten Hauptspannungsrichtungen wird die Vergleichsspannungsschwingbreite nach [1] 18.10.1.2. wie folgt berechnet: Es werden die drei Normal- und drei Schubspannungskomponenten ermittelt. Anschließend wird die Differenz zwischen jeweils zwei Hauptnormalspannungsrichtungen gebildet. Diese 3 Spannungsdifferenzen sind in den Gleichungen 2.4 - 2.6 ersichtlich.  $\sigma_{struc1}, \sigma_{struc2}$  und  $\sigma_{struc3}$  bezeichnen die Hauptstrukturspannungen (Indizes 1, 2 und 3 bezeichnen die Hauptachsen) zu einem gegebenen Zeitpunkt. [5]

$$S_{12} = \sigma_{struc1} - \sigma_{struc2} \quad (2.4)$$

$$S_{23} = \sigma_{struc2} - \sigma_{struc3} \quad (2.5)$$

$$S_{31} = \sigma_{struc3} - \sigma_{struc1} \quad (2.6)$$

Abb. 2.10 zeigt den Verlauf dieser Hauptnormalspannungsdifferenzen über der Zeit, sowie die grafische Ermittlung der Vergleichsspannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{eq}$ . [1]

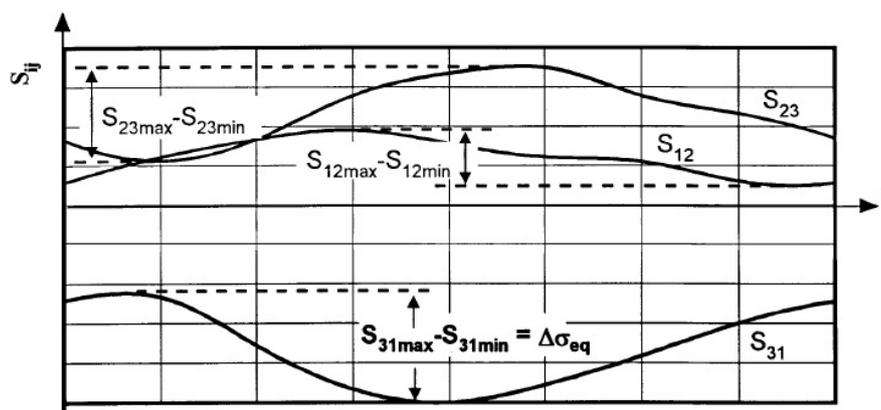


Abb. 2.10: Verlauf der Hauptnormalspannungsdifferenzen und Ermittlung von  $\Delta\sigma_{eq}$  [1]

Die Vergleichsspannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{eq}$  ergibt sich anhand Gleichung 2.7. [1]

$$\Delta\sigma_{eq} = \max(|S_{12max} - S_{12min}|; |S_{23max} - S_{23min}|; |S_{31max} - S_{31min}|) \quad (2.7)$$

### 2.2.2 Verfahren der Strukturspannungsschwingbreite EN 13445-3 Anhang P

Der Ermüdungsnachweis nach [1] Anhang P erfolgt auf Basis von Hauptnormalspannungsschwingbreiten. Diese Schwingbreite berechnet sich für veränderliche Hauptspannungsrichtungen zwischen Zuständen wie folgt: Es werden die zwei Normal- und eine Schubspannungskomponente berechnet. Anschließend wird für jede dieser Spannungskomponenten die Spannungsdifferenz für die jeweiligen Betriebszustände berechnet, um daraus die Hauptspannungen zu ermitteln.

Für konstante Hauptspannungsrichtungen ergeben sich die Strukturspannungsschwingbreiten  $\Delta\sigma_{struc1}$  und  $\Delta\sigma_{struc2}$  entsprechend der Gleichungen 2.8 - 2.9. Die Indizes 1 und 2 bezeichnen die jeweilige Hauptnormalspannungsrichtung. Die Schwingbreite ergibt sich durch Subtraktion des kleinsten Wertes der Spannungskomponenten vom größten Wert der jeweiligen Spannungskomponente. [1] [5]

$$\Delta\sigma_{struc1} = \sigma_{struc1max} - \sigma_{struc1min} \quad (2.8)$$

$$\Delta\sigma_{struc2} = \sigma_{struc2max} - \sigma_{struc2min} \quad (2.9)$$

Konstante Hauptspannungsrichtungen zwischen 2 Belastungszuständen treten auf bei:

- Proportionalen Belastungen
- An der Oberfläche von Symmetrieebenen und rotationssymmetrischen Modellen

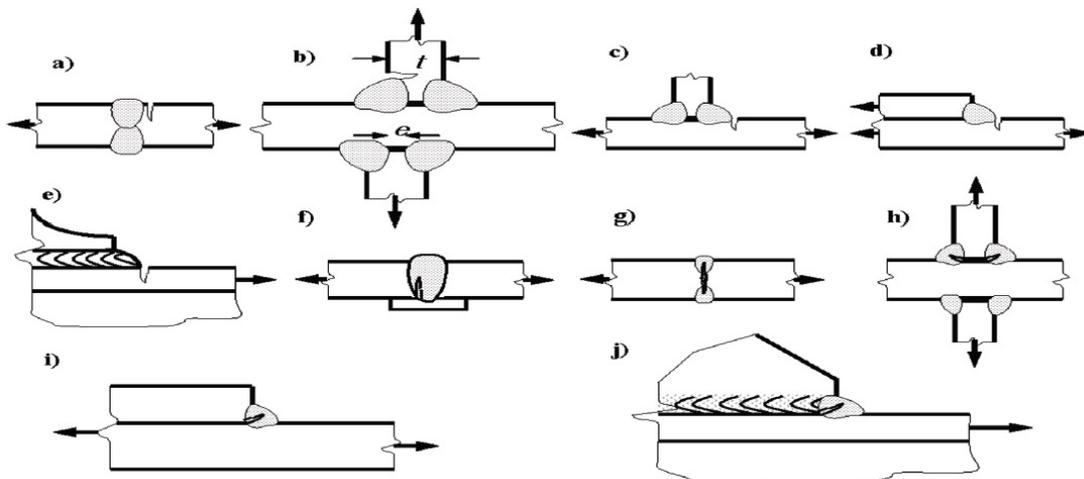
Anhand dieser Gleichungen ist ersichtlich, dass gegebenenfalls beide Hauptnormalspannungsrichtungen ausgewertet werden müssen. Dies erweist sich, aufgrund des zusätzlichen Aufwandes, als Nachteil dieser Berechnungsmethode. Der Vorteil dieser Methode liegt in der einfacheren Handhabung der Hauptnormalspannungen, sowie an der Tatsache, dass diese Spannungen bei den zugrunde liegenden Versuchen verwendet wurden. [5]

Die Klassifizierung der Schweißnähte nach [1] Anhang P erfolgt in Abhängigkeit des jeweiligen Schweißdetails, der verwendeten Prüfklasse, sowie der Richtung der Hauptnormalspannungen. In den Tabellen finden sich außerdem Hinweise zur Spannungsermittlung, als auch Angaben zur Ausführungsqualität der Schweißnaht. [1]

## Kapitel 3

### Bestimmung von Strukturspannungen

Der Schweißnahtübergang ist jene kritische Stelle bei geschweißten Bauteilen, an welcher die Gefahr von Ermüdungsrissen am größten ist. In Abb. 3.1 sind mögliche Varianten der Rissausbreitung von geschweißten Bauteilen ersichtlich. Man unterscheidet hierbei Risse, welche vom Schweißnahtübergang ausgehen (Abb. 3.1a-e) und jene, bei denen der Riss von der Schweißnahtwurzel aus durch das Schweißnahtmaterial geht (Abb. 3.1f-i). Die folgenden Methoden sind auf die Beurteilung von Rissen beschränkt, welche vom Schweißnahtübergang ausgehen. [6]



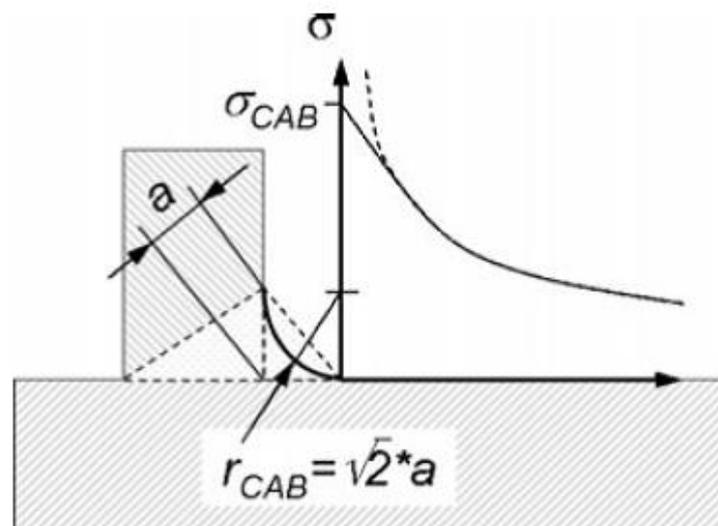
**Abb. 3.1:** Verschiedene Stellen der Rissausbreitung in geschweißten Verbindungen [6]

Im folgenden Kapitel werden Modellierungsmöglichkeiten vorgestellt, sowie Methoden zur Bestimmung von Strukturspannungen erläutert. In den Kapiteln 3.1.1 - 3.1.4 wird auf die Modellierung mithilfe von 2D/3D Elementen und in Kapitel 3.1.5 mittels Schalenelementen eingegangen. In den Kapiteln 3.2.1 - 3.2.4 werden verschiedene Methoden zur Bestimmung von Strukturspannungen vorgestellt.

### 3.1 Modellierungsmöglichkeiten

#### 3.1.1 CAB Modell

Bei dieser Modellierungart wird zur Vermeidung der Spannungssingularität am Schweißnahtübergang im 2D/3D Modell eine fiktive Hohlkehle der Schweißnaht modelliert, wie in Abb. 3.2 ersichtlich. Die Spannungen werden direkt an der Position der Schweißnahtübergänge, als Strukturspannungen, ausgewertet. Die Hohlkehle kann dabei mittels Spline-Interpolation der Schweißnahtkontur oder durch Modellierung eines Radius  $r_{CAB}$  im Falle eines Flankenwinkels von  $45^\circ$  entsprechend Abb. 3.2 modelliert werden, wobei der Wert  $a$  die Kehlnahtdicke (a-Maß) bezeichnet.

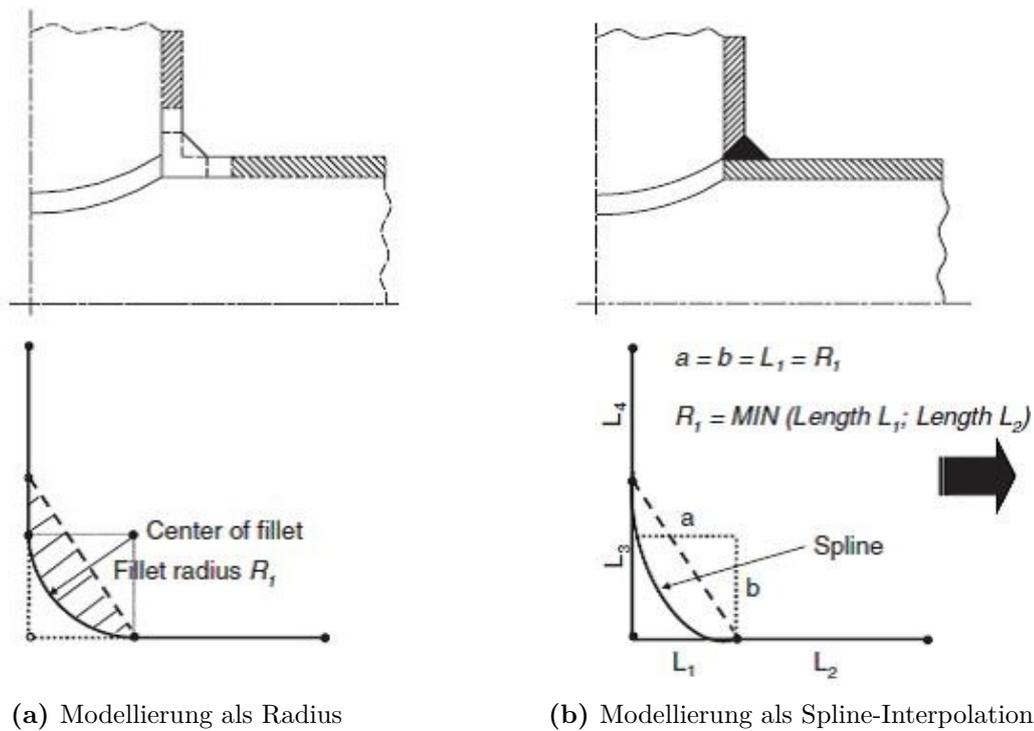


**Abb. 3.2:** Vermeidung von Spannungssingularitäten am Schweißnahtübergang durch Modellierung eines Radius: strichliert Spannungsverlauf mit Singularität, durchgezogene Linie Strukturspannung CAB [7]

Aufgrund des relativ geringen Aufwandes dieser Methode bietet sie sich vor allem für die Analyse kritischer Bereiche großer Strukturen an.

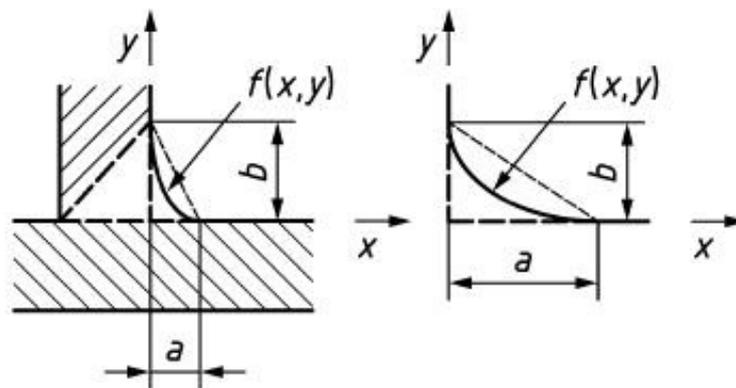
Betreffend der Finiten Elemente Analyse benötigt dieses Modell lediglich Knotenpunkte am Ort der Schweißnahtübergänge zur Bestimmung der Strukturspannungen. Kein Postprozessor wird hierfür benötigt. Deshalb eignet sich diese Methode sehr gut für eine effektive Bewertung der Strukturspannungen von geschweißten Bauteilen.

Wie in Abb. 3.3 ersichtlich wird die Schweißnahtkontur durch einen flachen Abrundungsradius (Abb. 3.3a) oder eine Spline-Interpolation (Abb. 3.3b) modelliert, sodass keine scharfen Übergänge am Schweißnahtübergang vorhanden sind.



**Abb. 3.3:** Möglichkeiten der Modellierung des Schweißnahtübergangs nach CAB Methode [7]

Eine weitere Möglichkeit der Modellierung der Schweißnaht, bei einem Flankenwinkel ungleich  $45^\circ$ , ist die Modellierung der Kontur durch eine Ellipsengleichung entsprechend Abb. 3.4. [7]



**Abb. 3.4:** Vermeidung von Spannungssingularitäten am Schweißnahtübergang durch Modellierung einer Ellipse [3]

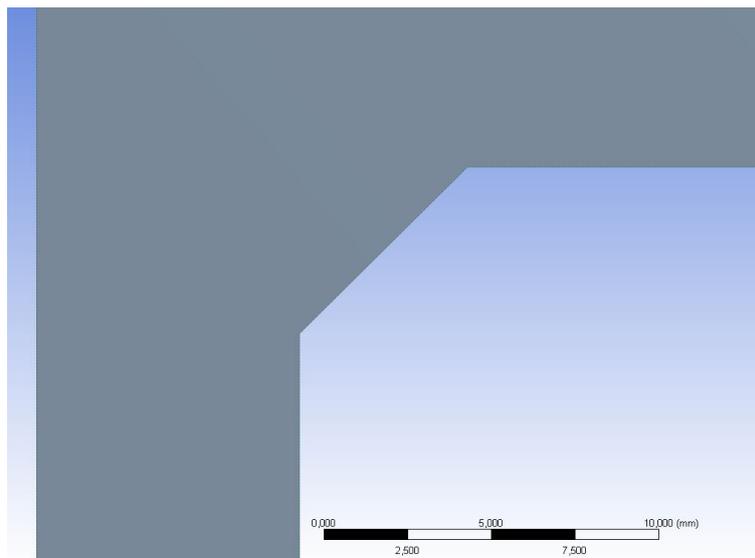
Die Kontur der modellierten Schweißnaht ist gegeben durch die allgemeine Ellipsengleichung. In Bezug auf obiges Koordinatensystem, aus Abb. 3.4, lautet diese entsprechend Gleichung 3.1: [3]

$$\frac{(x - a)^2}{a^2} + \frac{(y - b)^2}{b^2} = 1 \quad (3.1)$$

Zur Bestimmung von Strukturspannungen anhand eines CAB Modells bietet sich das Extrapolationsverfahren aus Kapitel 3.2.1, die Linearisierung durch die Wand aus Kapitel 3.2.3, als auch die direkte Ermittlung der Spannungen am Schweißnahtübergang aus Kapitel 3.2.4 an.

### 3.1.2 Modell Schweißnaht

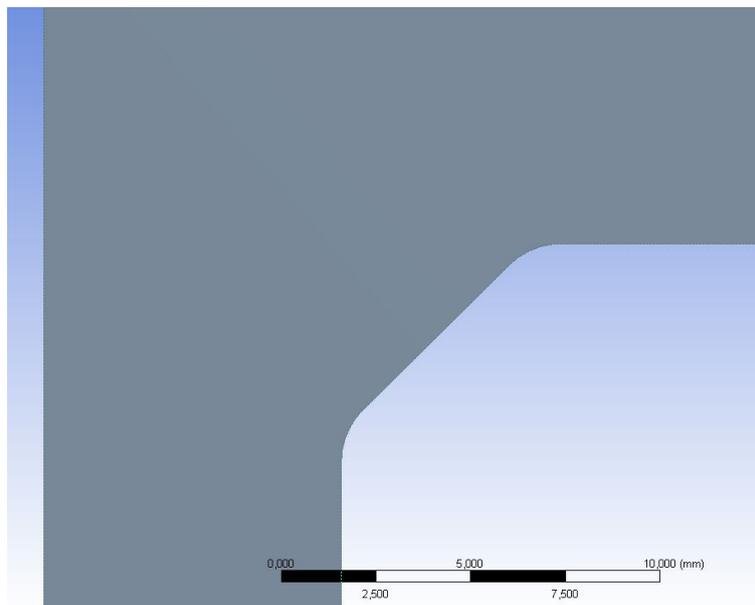
Eine weitere Möglichkeit stellt die Modellierung einer Schweißnaht entsprechend Abb. 3.5 im 2D/3D Modell dar. Die Auswertung der Spannungen erfolgt an den Schweißnahtübergängen, wie auch bei dem CAB Modell aus Kapitel 3.1.1. Im Gegensatz zur CAB Methode kommt es bei dieser Methode jedoch zu einer Spannungssingularität an den Schweißnahtübergängen. Daher können die Spannungen am Übergang nicht direkt verwendet werden und ein Verfahren zur Ermittlung von Strukturspannungen muss eingesetzt werden. Mögliche Methoden zur Ermittlung der Strukturspannungen bei dieser Modellierung sind das Extrapolationsverfahren aus Kapitel 3.2.1, die Haibach Methode aus Kapitel 3.2.2, sowie die Linearisierung durch die Wand aus Kapitel 3.2.3.



**Abb. 3.5:** Modell Schweißnaht

### 3.1.3 Modell 2mm Radius

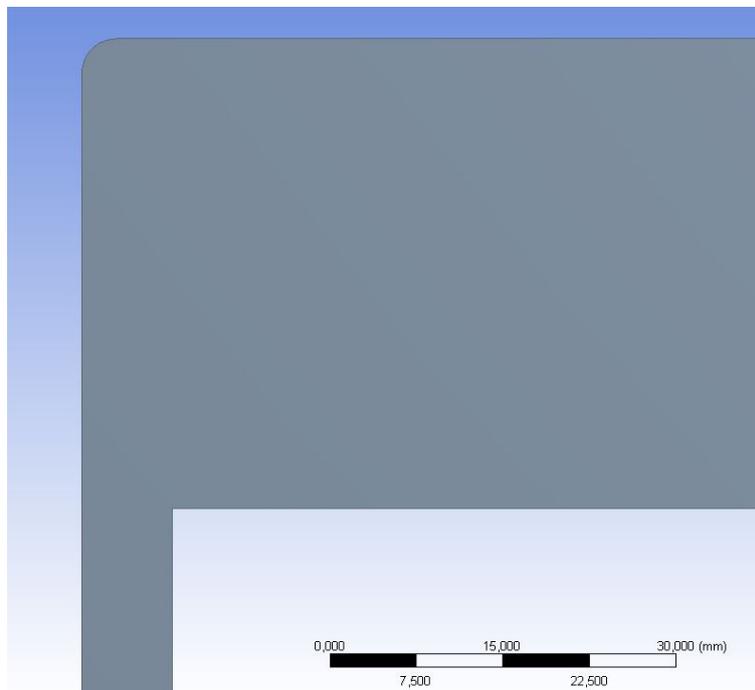
Die Modellierungsmethode baut auf der oben genannten Ausführung der Schweißnaht auf. Die Spannungssingularität am Schweißnahtübergang wird jedoch durch die Modellierung eines 2mm Radius an dieser Stelle vermieden. Eine mögliche Ausführung ist in Abb. 3.6 ersichtlich. Bei dieser Modellierungsmöglichkeit bietet sich das Extrapolationsverfahren aus Kapitel 3.2.1, die Linearisierung durch die Wand aus Kapitel 3.2.3, als auch die direkte Ermittlung der Spannungen am Schweißnahtübergang aus Kapitel 3.2.4 an.



**Abb. 3.6:** Modell mit 2mm Radius

### 3.1.4 Modell keine Schweißnaht

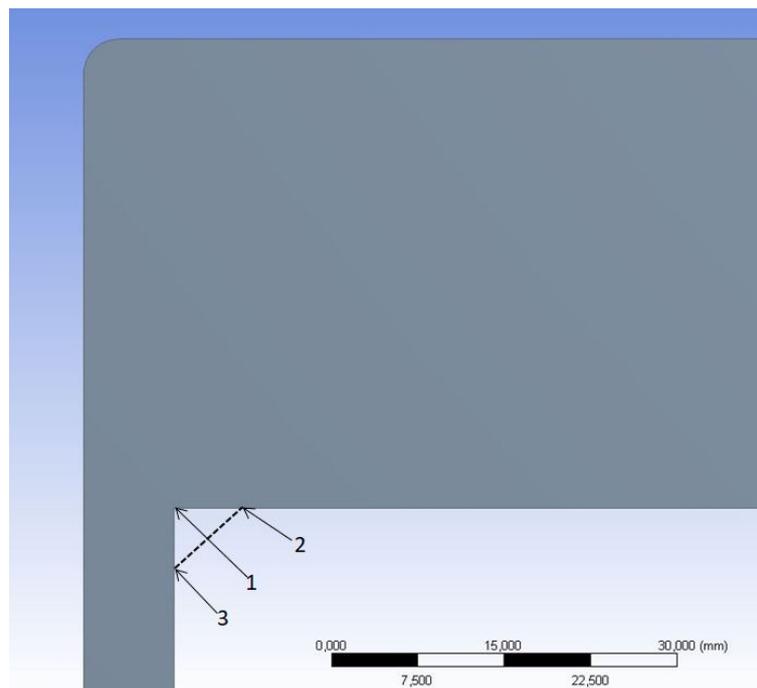
Dies stellt die einfachste Art der Modellierung im 2D/3D Modell dar. Der Schweißnahtübergang wird, wie in Abb. 3.7 ersichtlich, nicht modelliert.



**Abb. 3.7:** Modell Keine Schweißnaht

Die Auswertung der Strukturspannungen kann direkt in der Ecke entsprechend Abb. 3.8 Punkt 1 oder auch nach außen versetzt, am fiktiven Schweißnahtübergang entsprechend den Punkten 2 und 3 in Abb. 3.8 erfolgen. Dabei stellt die strichlierte Linie die fiktive Schweißnahtkontur dar. Bei Auswertung der Spannungen direkt in der Ecke kommt es zu einer Spannungssingularität, weswegen eine geeignete Methode zur Berechnung der Strukturspannung gefunden werden muss. Mögliche Methoden sind das Extrapolationsverfahren aus Kapitel 3.2.1, sowie die Linearisierung durch die Wand aus Kapitel 3.2.3.

Eine weitere Möglichkeit stellt eine Auswertung an den fiktiven Schweißnahtübergängen dar. Als Methoden der Spannungsermittlung kommen bei Auswertung an den fiktiven Schweißnahtübergängen entsprechend den Punkten 2 und 3 in Abb. 3.8 das Extrapolationsverfahren aus Kapitel 3.2.1, sowie die Linearisierung durch die Wand aus Kapitel 3.2.3 in Frage.

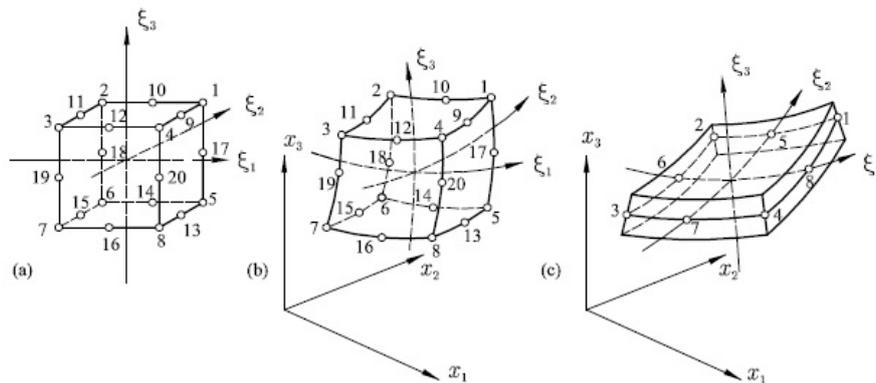


**Abb. 3.8:** Mögliche Auswertungspunkte

### 3.1.5 Schalenelemente

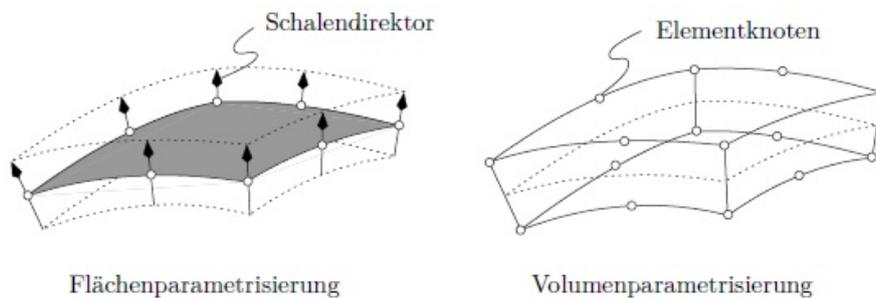
Schalenelemente zählen zu den Strukturelementen. Diese erhält man durch Degeneration des 3D Kontinuums. Dabei werden bestimmte Annahmen getroffen, welche im Folgenden erläutert werden.

Wie in Abb. 3.9 (c) ersichtlich liegen die lokalen Koordinaten  $\xi_1$  und  $\xi_2$  in der Mittelfläche der Schale. Die beiden Deckflächen der Schale sind durch  $\xi_3 = -1$  bzw.  $\xi_3 = +1$  gegeben. Es wird die Mindlin-Reissner'sche Hypothese zugrunde gelegt, welche besagt, dass alle Punkte mit identen Werten  $\xi_1$  und  $\xi_2$  jedoch unterschiedlichen  $\xi_3$  Werten auf einer Geraden liegen. Somit werden über die Schalendicke konstante Schubverzerrungen angenommen. Bei vielen Schalenmodellen wird eine konstante Schalendicke zugrunde gelegt und die Verzerrung in Dickenrichtung  $\varepsilon_{33}$  vernachlässigt. [8]



**Abb. 3.9:** 3D Kontinuums- und Schalelement: (a) 20 knotiges 3D Stammelement, (b) 20 knotiges isoparametrisches 3D Kontinuums-Element, (c) 8 knotiges Schalelement [8]

Die Parametrisierung hat einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Schalelementen. Die Elemente können flächen- oder volumenparametrisiert sein. Diese beiden Varianten sind in Abb. 3.10 ersichtlich. Die Art der Parametrisierung beeinflusst dabei die Zahl und Art der Freiheitsgrade pro Elementknoten. Flächenparametrisierung führt zu Rotations- und Verschiebungsfreiheitsgraden an den Knoten. Erfolgt die Diskretisierung mittels flächenartigen Schalenmodellen, so muss die Mittelfläche im zugehörigen Geometriemodell zur Vernetzung explizit vorhanden sein.



**Abb. 3.10:** Parametrisierungsvarianten von 3D Schalelementen [9]

Volumenparametrisierte Elemente weisen ausschließlich Verschiebungsfreiheitsgrade auf und sind vergleichbar mit Kontinuums-Elementen. Bei volumenbasierten Schalelementen kann auf die Einführung einer Mittelfläche verzichtet werden und die Volumengeometrie direkt vernetzt werden.

Strukturspannungsbestimmung auf Basis von Schalelementen wird vor allem für plattenartige Strukturen im Schiffsbau sowie für Schalen im Apparatebau eingesetzt. [9]

## 3.2 Methoden zur Bestimmung von Strukturspannungen

### 3.2.1 Extrapolationsverfahren

Die Extrapolationsmethode ist in [1] zur Strukturspannungsermittlung, im Zuge der Ermüdungsrechnung, vorgeschrieben. In Abb. 3.11 ist exemplarisch der Spannungsverlauf entlang der Oberfläche durch Finite Elemente Analyse (strichliert) sowie der extrapolierte Spannungsverlauf nach dem Extrapolationsverfahren (durchgezogene Linie) ersichtlich. [10]

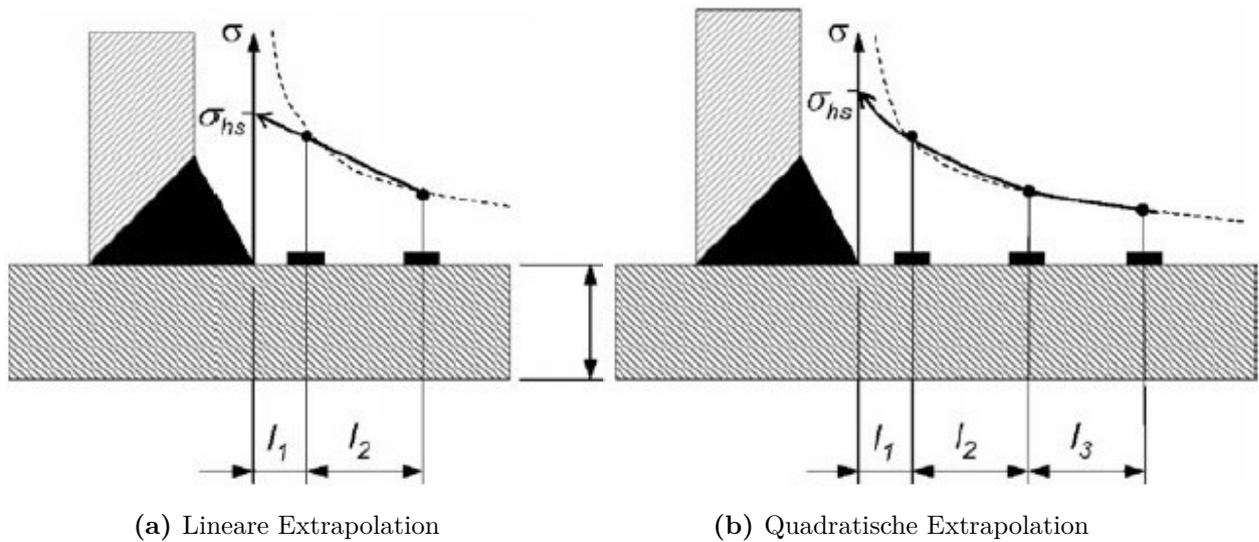


Abb. 3.11: Prinzip der Extrapolation an den Schweißnahtübergang [7]

Die Empfehlung von [11] für die Berechnung der Strukturspannungen ist es, die Werte der Spannungen mittels Finite Elemente Verfahren zu ermitteln. Diese werden anschließend durch ein Extrapolationsverfahren an den Ort des Schweißnahtübergangs extrapoliert.

Bei der Verwendung von zwei Extrapolationspunkten werden die Strukturspannungen durch lineare Extrapolation ermittelt. Dabei befinden sich die beiden Extrapolationspunkte, wie in Abb. 3.11a ersichtlich, in einem Abstand von  $l_1=0,4t$  und  $l_1+l_2=1,0t$  vom Schweißnahtübergang entfernt, wobei  $t$  die Dicke der beanspruchten Platte bezeichnet. Der linear extrapolierte Wert der Strukturspannungen ergibt sich aus Gleichung 3.2 zu: [6]

$$\sigma_{HS} = 1,67\sigma(0,4t) - 0,67\sigma(1,0t) \quad (3.2)$$

In Fällen, in denen die beanspruchte Platte z.B. auf einem relativ steifen elastischen Fundament ruht, verläuft der Anstieg der Spannungen zum Schweißnahtübergang hin nichtlinear. In diesen

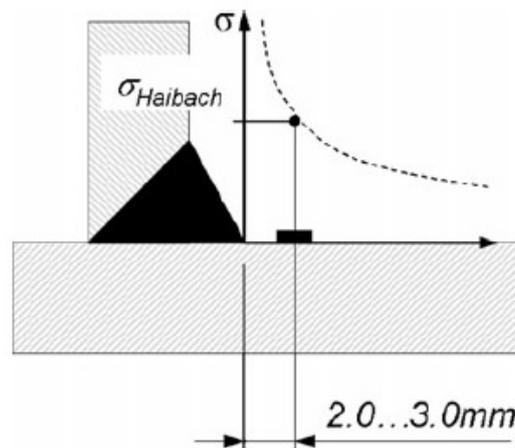
Fällen würde eine lineare Extrapolation die Strukturspannungen unterbewerten und somit wird eine quadratische Extrapolation angewendet. Dabei wird empfohlen, die Spannungen an drei Punkten entsprechend Abb. 3.11b auszuwerten, in einem Abstand von  $l_1=0,4t$ ,  $l_1+l_2=0,9t$  und  $l_1+l_2+l_3=1,4t$  vom Schweißnahtübergang entfernt. Die Strukturspannungen ergeben sich somit aus Gleichung 3.3 zu: [6]

$$\sigma_{HS} = 2,52\sigma(0,4t) - 2,24\sigma(0,9t) + 0,72\sigma(1,4t) \quad (3.3)$$

Als größter Nachteil dieser Methode erweist sich die Beschränkung auf Oberflächenrisse, wie auch die Unsicherheit des Extrapolationsverfahrens. Des Weiteren wird eine konstante Wanddicke des Bauteils, entlang des Extrapolationspfades, vorausgesetzt. Der Konstrukteur muss im Vorfeld überprüfen, ob das Bauteil nicht, aufgrund innerer Defekte, oder von der Schweißnahtwurzel aus, versagt. Abgesehen von diesen Einschränkungen ist diese Methode, vor allem im Schiffsbau und bei Rohrkonstruktionen, etabliert und wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Mögliche Modellierungsmöglichkeiten zur Strukturspannungsbestimmung mittels Extrapolationsmethode sind das CAB Modell aus Kapitel 3.1.1, das Modell Schweißnaht aus Kapitel 3.1.2, die Modellierung des 2mm Radius aus Kapitel 3.1.3, sowie das Modell keine Schweißnaht aus Kapitel 3.1.4. [10]

### 3.2.2 Haibach Methode

Dieses Konzept geht auf umfassende Versuchsreihen von E. Haibach aus den 1960er Jahren zurück. Er konnte durch Versuche zeigen, dass die lokale Kerbwirkung der Schweißnaht bei einem Abstand von 2 - 3mm zum Schweißnahtübergang weitestgehend abgeklungen ist. Die Vernetzung in der Finiten Elemente Analyse sollte dabei so gewählt werden, dass die Knotenpunkte in einem Abstand von 2 - 3mm um die Schweißnaht angeordnet sind. Das prinzipielle Konzept dieser Strukturspannungsmethode beruht darauf, den Spannungswert aus der Finiten Elemente Analyse, in einem Abstand von 2-3mm Entfernung zum Schweißnahtübergang, als Strukturspannungen zu definieren. Die Bestimmung dieser Strukturspannungen ist exemplarisch in Abb. 3.12 ersichtlich. [7]



**Abb. 3.12:** Bestimmung der Strukturspannungen nach Haibach [7]

Zur einfachen Anwendung dieser Methode kann das Modell durch Linien an der Oberfläche für die weitere Analyse vorbereitet werden. Diese werden am besten, entsprechend Abb. 3.13, in einem Abstand von 2 - 3mm parallel zum Schweißnahtübergang konstruiert. Dadurch ist es möglich, besagte Linien in einfacher Weise in der Finiten Elemente Analyse mit den Knotenpunkten zu vernetzen, um die Spannungswerte an diesen Stellen direkt auswerten zu können.

Als Modellierungsmöglichkeiten zur Strukturspannungsbestimmung durch die Haibach Methode kommt das Modell Schweißnaht aus Kapitel 3.1.2 in Frage. [3]

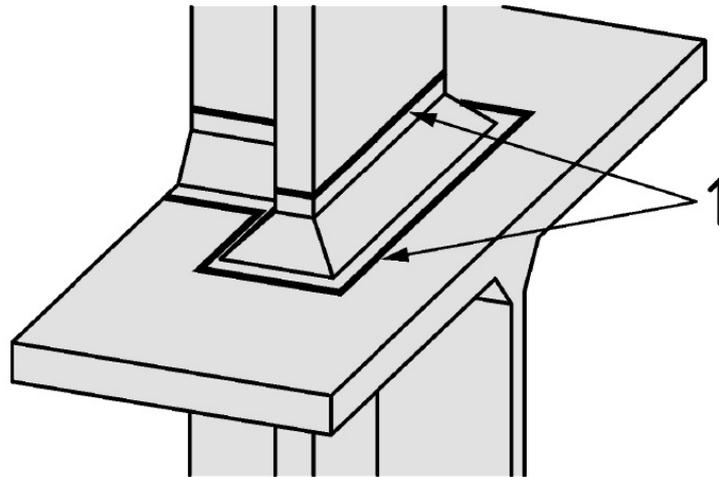


Abb. 3.13: Zusätzliche Linien zur einfachen Bestimmung der Strukturspannung nach Haibach [3]

### 3.2.3 Linearisierung durch die Wand

Bei der Methode der Linearisierung durch die Wand nach [12] ergeben sich die Strukturspannungen an der Stelle des Schweißnahtübergangs entsprechend Abb. 3.14, aus den Membranspannungen sowie den linearen Biegespannungen an dieser Stelle. Die überlagerten Kerbspannungen werden bei dieser Methode herausgefiltert, die maßgebenden Strukturspannungen sind somit nicht direkt aus der Finiten Elemente Simulation ersichtlich. Die Berechnung der Membran- und Biegespannungen erfolgt entsprechend der Gleichungen 2.1 und 2.2 aus Kapitel 2. In Abb. 3.14 stellt  $\sigma_{notch}$  die Kerbspannungen dar und  $\sigma_{hs}$  die ermittelten Strukturspannungen durch die Methode der Linearisierung durch die Wand.

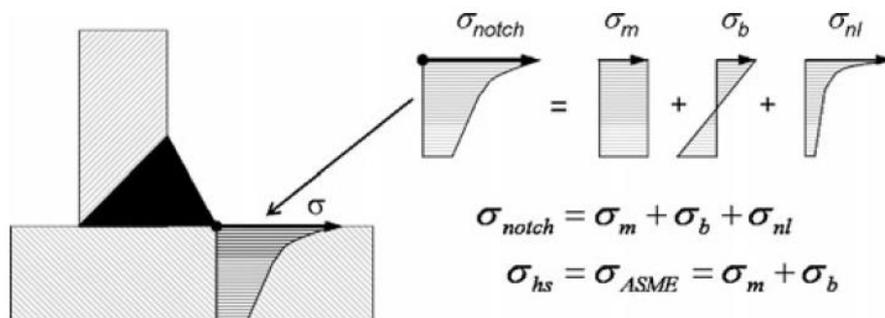


Abb. 3.14: Kerbspannung und Strukturspannung [7]

Die Strukturspannungen nach der Linearisierung durch die Wand werden an der Position des Schweißnahtübergangs ermittelt, wie in Abb. 3.15 ersichtlich. Diese Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke ist nichtlinear, die nichtlinearen Anteile können jedoch linearisiert werden und dann wird der lineare Anteil verwendet. Integriert man diese lineare Spannungsverteilung, erzeugt sie die identen Membran- und Biegekräfte wie die ursprüngliche nichtlineare Spannungsverteilung. Durch das Problem der Knotenspannungsmittelung, welche hauptsächlich bei grob diskretisierten Modellen auftritt, wird der Spannungswert an der Stelle des Schweißnahtübergangs unterschätzt, denn Postprozessoren ermitteln einen Durchschnittswert zwischen den geringeren Spannungswerten im Schweißmaterial und den höheren Werten direkt vor dem Schweißnahtübergang. Durch diese Vorgehensweise in der Finiten Elemente Analyse kann der Wert der Spannungen an dieser Stelle unterschätzt werden. Dem kann durch Auswahl der für die Spannungsberechnung im Postprocessing herangezogenen Elemente entgegengewirkt werden, um diese nichtkonservative Art der Spannungsermittlung zu verhindern. Als Modellierungsmöglichkeiten kommen das CAB Modell aus Kapitel 3.1.1, das Modell Schweißnaht aus Kapitel 3.1.2, das Modell 2mm Radius aus Kapitel 3.1.3, sowie das Modell keine Schweißnaht aus Kapitel 3.1.4 in Betracht. [13]

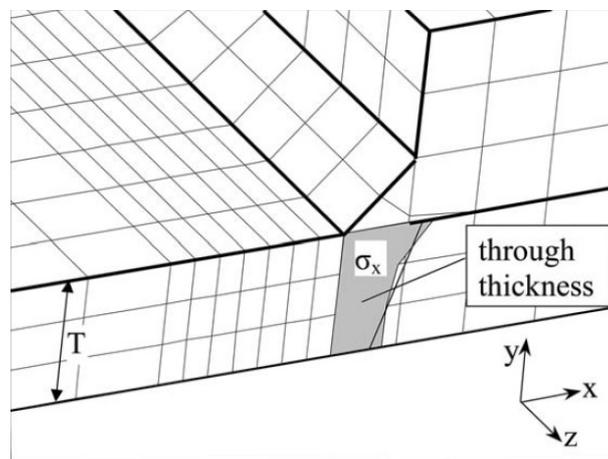


Abb. 3.15: Linearisierung über den Querschnitt [13]

### 3.2.4 Direkte Ermittlung der Strukturspannung

Eine weitere Möglichkeit der Spannungsermittlung stellt die direkte Auswertung der Spannungen am Schweißnahtübergang dar. Diese Methode der Spannungsermittlung empfiehlt sich lediglich bei Modellen, bei denen keine Spannungssingularitäten am Schweißnahtübergang auftreten, wie dies bei dem CAB Modell aus Kapitel 3.1.1, sowie der Modellierung des 2mm Radius aus Kapitel 3.1.3. der Fall ist.

## 3.3 Übersicht der Kombinationen von Modellierungsmöglichkeiten mit den Möglichkeiten der Spannungsermittlung

In Tab. 3.1 sind zusammenfassend die Kombinationen der Modellierungsmöglichkeiten mit den Methoden der Strukturspannungsermittlung ersichtlich.

**Tab. 3.1:** Daten Schale und Stutzen

	CAB	keine Schweißnaht	Schweißnaht	2mm Radius
Extrapolationsverfahren	✓	✓	✓	✓
Haibach Methode	✗	✗	✓	✗
Linearisierung durch die Wand	✓	✓	✓	✓
Direkte Ermittlung	✓	✗	✗	✓

✓ Kombination möglich    ✗ Kombination nicht möglich

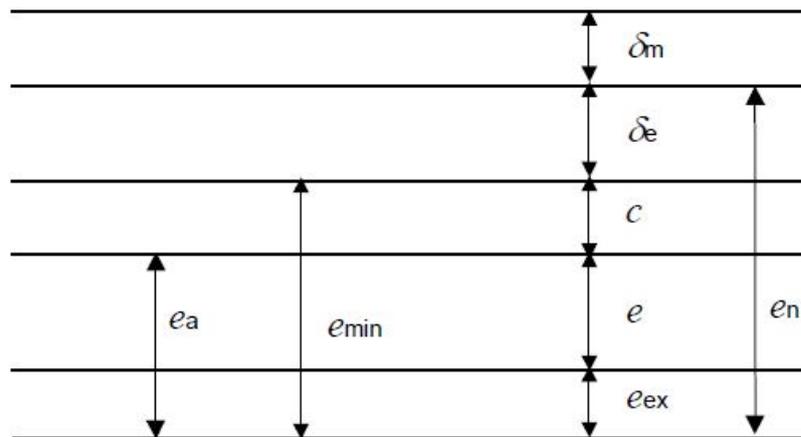
# Kapitel 4

## Auslegungsrechnung

Bei den in diesem Kapitel verwendeten Geometriedaten handelt es sich um Berechnungswanddicken wie in [1] definiert. Diese erhält man entsprechend Glg. 4.1 aus den Nennwanddicken durch Subtraktion des Korrosionszuschlags  $c$ , sowie der negativen Wanddickentoleranz  $\delta_e$ .

$$e_a = e_n - \delta_e - c \quad (4.1)$$

Die Berechnungswanddicke  $e_a$  bezeichnet also jene Dicke des Bauteils, welche im ungünstigsten Fall noch vorhanden ist. Die Nennwanddicke  $e_n$  bezeichnet jene Dicke, welche auf technischen Zeichnungen des Bauteils angegeben wird. Bei den in diesen Kapiteln folgenden Zeichnungen mit Wanddicken bzw. Abmessungen handelt es sich um Abmessungen des Berechnungsmodells, nicht um Nennabmessungen entsprechend einer technischen Zeichnung. Diese Definitionen der Wanddicken sind in Abb. 4.1 ersichtlich.



## Legende

$e$  Erforderliche Wanddicke

$e_n$  Nennwanddicke

$e_{\min}$  Mindestfertigungsdicke ( $e_{\min} = e_n - \delta_e$ )

$e_a$  Berechnungswanddicke ( $e_a = e_{\min} - c$ )

$c$  Korrosionszuschlag

$\delta_e$  Absolutwert der negativen Toleranz der Nenndicke des Bauteils (beispielsweise aus den Werkstoffnormen entnommen)

$\delta_m$  Zuschlag für die mögliche Dickenabnahme beim Formen

$e_{ex}$  Dickenzuschlag bis zur Nennwanddicke

**Abb. 4.1:** Zusammenhänge der Wanddicken [1]

## 4.1 Ebener Boden

Im Folgenden wird die Auslegungsrechnung eines ebenen Bodens mit aufgeschweißtem Stutzen durchgeführt. Zuerst wird eine Innendruckberechnung der Zylinderschale und des Stutzens nach [1] Kapitel 7 durchgeführt. Im Anschluss folgt die Berechnung des Ausschnitts dieser Konstruktion nach [1] Kapitel 10.

### 4.1.1 Betriebszustände ebener Boden

Betriebszustand 1: Konstante Temperatur von  $95^{\circ}\text{C}$  und Druck von  $5\text{MPa}$  in der gesamten Konstruktion.

Betriebszustand 2: Temperatur von  $95^{\circ}\text{C}$  an der Zylinderwand und dem ebenen Boden, Einspritzung von kühlem Medium mit  $80^{\circ}\text{C}$  über den Stutzen und Druck von  $5\text{MPa}$  in der gesamten Konstruktion.

Die Betriebszustände sind in Tab. 4.1 und Tab. 4.2 ersichtlich.

**Tab. 4.1:** Betriebszustand 1 ebener Boden

Minimaltemperatur	$T_{min} = 95^{\circ}\text{C}$
Maximaltemperatur	$T_{max} = 95^{\circ}\text{C}$
Druck	$p = 5\text{MPa}$

**Tab. 4.2:** Betriebszustand 2 ebener Boden

Minimaltemperatur	$T_{min} = 80^{\circ}\text{C}$
Maximaltemperatur	$T_{max} = 95^{\circ}\text{C}$
Druck	$p = 5\text{MPa}$

### 4.1.2 Auslegung des Bodens nach DIN EN 13445-3

In Abb. 4.2 ist eine Konstruktion mit ebenem Boden mit Innendurchmesser  $D_i$  der Zylinderschale sowie Innendurchmesser  $d_i$  des Stutzens ersichtlich. Die Geometriedaten zu Abb. 4.2 sind in Tab. 4.3 dargestellt. Tab. 4.4 enthält die Materialdaten der Zylinderschale und des Stutzens und Tab. 4.5 die Materialdaten des ebenen Bodens.

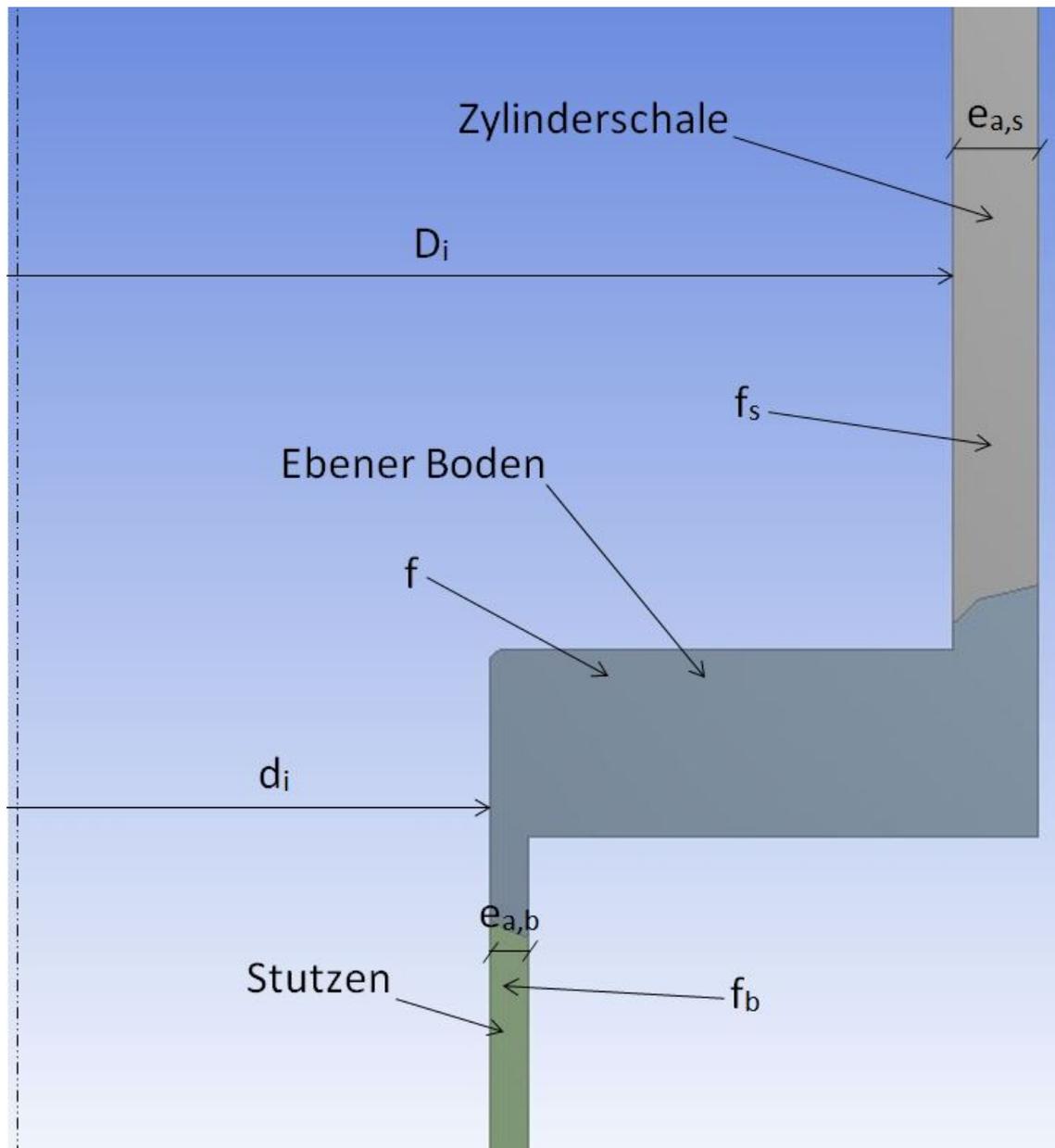


Abb. 4.2: Ebener Boden

**Tab. 4.3:** Geometriedaten

Innendurchmesser Zylinderschale	$D_i = 404mm$
Innendurchmesser Stutzen	$d_i = 202mm$

**Tab. 4.4:** Materialdaten Zylinderschale und Stutzen

Materialnorm	EN10216-2
Material	P265GH
Bauteile	Schale, Stutzen
Auslegungstemperatur	95°C
Berechnungsnennspannung Schale	$f_s = 152,29MPa$
Berechnungsnennspannung Stutzen	$f_b = 152,29MPa$
Poissonzahl	$\nu = 0,3$

**Tab. 4.5:** Materialdaten Ebener Boden

Materialnorm	EN10028-2
Material	P265GH
Bauteile	Ebener Boden
Auslegungstemperatur	95°C
Berechnungsnennspannung	$f = 149,6MPa$
Poissonzahl	$\nu = 0,3$

Schweißnahtfaktor für Prüfgruppe 3 nach [1] 5.6

$$z = 1 \quad (4.2)$$

Mindestwanddicke der Zylinderschale unter Innendruck nach [1] 7.4.2.

$$e_{Schale} = \frac{p \cdot D_i}{2 \cdot f_s \cdot z - p} = \frac{5MPa \cdot 404mm}{2 \cdot 152,29MPa \cdot 1 - 5MPa} = 6,74mm \quad (4.3)$$

Annahme der Berechnungswanddicke der Zylinderschale (überdimensioniert)

$$e_{a,s} = 18,5mm \quad (4.4)$$

Mindestwanddicke des Stutzens unter Innendruck nach [1] 7.4.2.

$$e_{Stutzen} = \frac{p \cdot d_i}{2 \cdot f_s \cdot z - p} = \frac{5MPa \cdot 202mm}{2 \cdot 152,29MPa \cdot 1 - 5MPa} = 3,37mm \quad (4.5)$$

Annahme der Berechnungswanddicke des Stutzens (überdimensioniert)

$$e_{a,b} = 8,6mm \quad (4.6)$$

Berechnung des Beiwerts  $C_1$  für die Auslegung eines ebenen Bodens nach [1] 10.4.3

$$f_{min} = \min \{f, f_s\} = 149,6MPa \quad (4.7)$$

$$B_1 = 1 - \frac{3 \cdot f}{p} \left( \frac{e_{a,s}}{D_i + e_{a,s}} \right)^2 + \frac{3}{16} \left( \frac{D_i}{D_i + e_{a,s}} \right)^4 \frac{p}{f} - \frac{3}{4} \frac{(2D_i + e_{a,s})e_{a,s}^2}{(D_i + e_{a,s})^3} = 0,83 \quad (4.8)$$

$$A_1 = B_1 \left[ 1 - B_1 \cdot \frac{e_{a,s}}{2(D_i + e_{a,s})} \right] = 0,815 \quad (4.9)$$

$$C_1 = \max \left\{ \left[ 0,40825A_1 \frac{D_i + e_{a,s}}{D_i} \right]; \left[ 0,299 \left( 1 + 1,7 \frac{e_{a,s}}{D_i} \right) \right] \right\} = 0,348 \quad (4.10)$$

Berechnung des Beiwerts  $C_2$  nach [1] 10.4.6

$$H = \sqrt[4]{12(1 - \nu^2)} \cdot \sqrt{\frac{e_{a,s}}{D_i + e_s}} = 0,38 \quad (4.11)$$

$$J = \frac{3 \cdot f_{min}}{p} - \frac{D_i^2}{4 \cdot (D_i + e_{a,s}) \cdot e_{a,s}} - 1 = 83,54 \quad (4.12)$$

$$g = \frac{D_i}{D_i + e_{a,s}} = 0,956 \quad (4.13)$$

$$U = \frac{2 \cdot (2 - \nu \cdot g)}{\sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} = 2,074 \quad (4.14)$$

$$f_1 = 2 \cdot g^2 - g^4 = 0,993 \quad (4.15)$$

$$A = \left( \frac{3}{4} \cdot \frac{U \cdot D_i}{e_{a,s}} - 2 \cdot J \right) \cdot (1 + \nu) \cdot \left[ 1 + (1 - \nu) \cdot \frac{e_{a,s}}{D_i + e_{a,s}} \right] = -178,355 \quad (4.16)$$

$$B = \left[ \left( \frac{3}{8} \cdot \frac{U \cdot D_i}{e_{a,s}} - J \right) \cdot H^2 - \frac{3}{2} \cdot (2 - \nu \cdot g) \cdot g \right] \cdot H = -4,598 \quad (4.17)$$

$$F = \left( \frac{3}{8} \cdot U \cdot g + \frac{3}{16} \cdot f_1 \cdot \frac{D_i + e_{a,s}}{e_{a,s}} - 2 \cdot J \cdot \frac{e_{a,s}}{D_i + e_{a,s}} \right) \cdot H^2 - 3 \cdot (2 - \nu \cdot g) \cdot g \cdot \frac{e_{a,s}}{D_i + e_{a,s}} = -0,551 \quad (4.18)$$

$$G = \left[ \frac{3}{8} \cdot f_1 - 2 \cdot J \cdot \left( \frac{e_{a,s}}{D_i + e_{a,s}} \right)^2 \right] \cdot H = 0,02 \quad (4.19)$$

$$a = \frac{B}{A} = 0,026 \quad (4.20)$$

$$b = \frac{F}{A} = 0,003 \quad (4.21)$$

$$c = \frac{G}{A} = -1,107 \cdot 10^{-4} \quad (4.22)$$

$$N = \frac{b}{3} - \frac{a^2}{9} = 9,562 \cdot 10^{-4} \quad (4.23)$$

$$Q = \frac{c}{2} - \frac{a \cdot b}{6} + \frac{a^3}{27} = -6,8 \cdot 10^{-4} \quad (4.24)$$

$$K = \frac{N^3}{Q^2} = 0,189 \quad (4.25)$$

S ergibt sich für  $Q \leq 0$

$$S = -\sqrt[3]{|Q| \cdot \left[ 1 + (1 + K)^{1/2} \right]} = -0,052 \quad (4.26)$$

$$C_2 = \frac{(D_i + e_{a,s}) \cdot \left( \frac{N}{S} - S - \frac{a}{3} \right)}{D_i \cdot \sqrt{\frac{p}{f_{min}}}} = 0,145 \quad (4.27)$$

Erforderliche Dicke eines Bodens ohne Ausschnitte

$$e_0 = \max \left\{ \left( C_1 \cdot D_i \cdot \sqrt{\frac{p}{f}} \right); \left( C_2 \cdot D_i \cdot \sqrt{\frac{p}{f_{min}}} \right) \right\} = 25,707mm \quad (4.28)$$

Berechnung des äquivalenten Stutzendurchmessers  $d$  für einen aufgesetzten Stutzen nach [1]

10.6.2.2

$$e_b = \frac{p \cdot D_i}{2 \cdot f_b \cdot z - p} = 3,98mm \quad (4.29)$$

$$l = 0,8 \sqrt{(d_i + e_{a,b}) \cdot e_{a,b}} = 34,05mm \quad (4.30)$$

$$A = l \cdot (e_{a,b} - e_b) = 157,31mm^2 \quad (4.31)$$

$$A' = \min \left( A; A \cdot \frac{f_b}{f} \right) = 157,31mm^2 \quad (4.32)$$

Für Aufschweißstutzen gilt nach [1] 10.6.2.2

$$d = d_i - \frac{2 \cdot A'}{e_0} = 189,76mm \quad (4.33)$$

$$Y_1 = \min \left( 2; \sqrt[3]{\frac{D_i}{D_i - d}} \right) = 1,2355 \quad (4.34)$$

$$Y_2 = \sqrt{\frac{D_i}{D_i - d}} = 1,3732 \quad (4.35)$$

Erforderliche Dicke des ebenen Bodens mit Ausschnitt

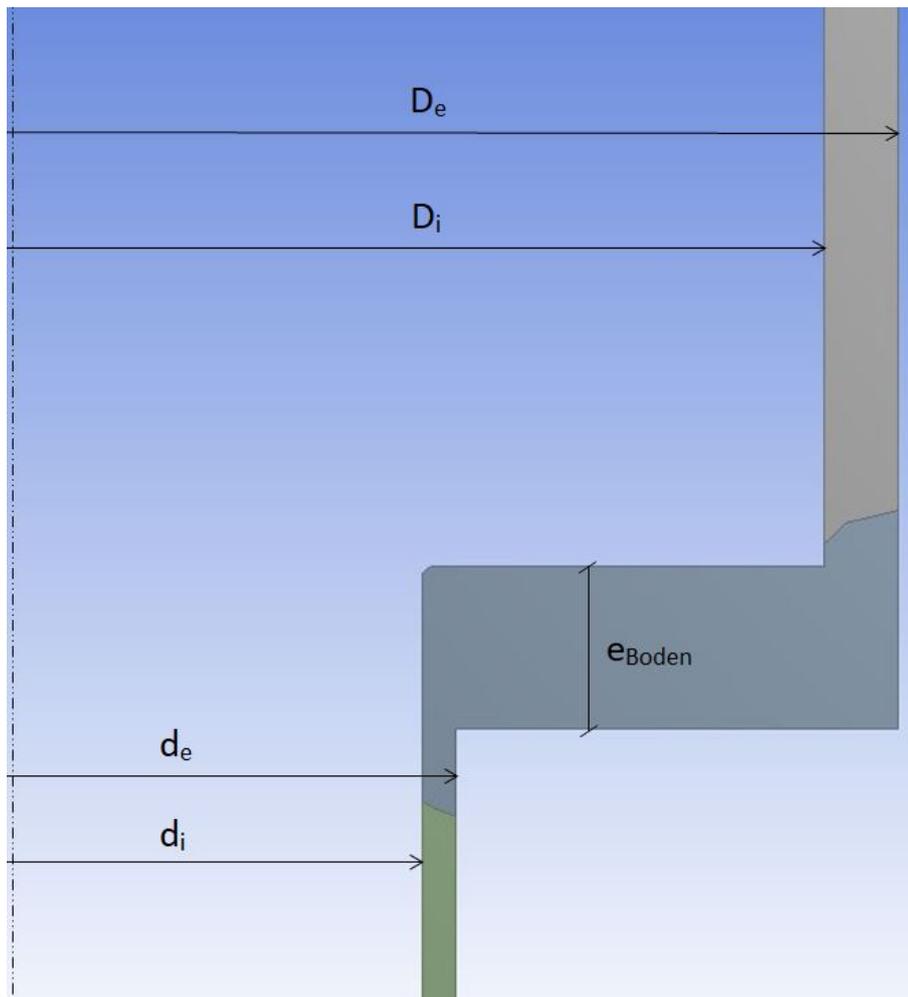
$$e = \max \left( Y_1 \cdot e_0; C_1 \cdot Y_2 \cdot D_i \cdot \sqrt{\frac{p}{f}} \right) = 35,295mm \quad (4.36)$$

Annahme der Wanddicke des Bodens

$$e_{\text{Boden}} = 41\text{mm} \quad (4.37)$$

### 4.1.3 Abmessungen ebener Bodens

Anhand Abb. 4.3 sowie Tab. 4.6 sind die Modellabmessungen des oben ausgelegten ebenen Bodens ersichtlich.



**Abb. 4.3:** Abmessungen des ebenen Bodens

Tab. 4.6: Daten Schale und Stutzen

$D_i$	404mm
$D_e$	441mm
$d_i$	202mm
$d_e$	219,2mm
$e_{Boden}$	41mm

In Abb. 4.4 ist die Definition des a Maßes einer Schweißnaht sowie die Schenkellänge z einer Schweißnaht dargestellt.

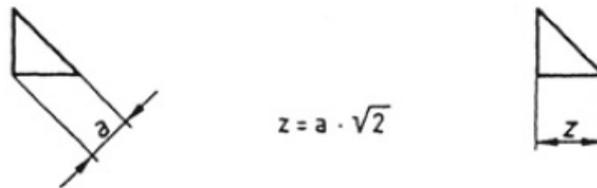


Abb. 4.4: Definition des a-Maß und der Schenkellänge z [14]

Im Folgenden wird eine Auslegung der Schweißnahtabmessungen am ebenen Boden durchgeführt. Es handelt sich um eine HV Naht, an welcher der Schweißnahtübergang wie eine Kehlnaht ausgeführt wird.

$$5mm \leq a \leq 0,7 \cdot t_{min} \quad (4.38)$$

$$5mm \leq a \leq 0,7 \cdot 8,6mm \quad (4.39)$$

$$5mm \leq a \leq 6,02mm \quad (4.40)$$

$$a \geq \sqrt{t_{max}} - 0,5 \quad (4.41)$$

$$a \geq \sqrt{41mm} - 0,5 = 5,9031mm \quad (4.42)$$

$$a_{Berechnung} = 6mm \quad (4.43)$$

$$z_{Berechnung} = \sqrt{2} \cdot a_{Berechnung} = 8,4853mm \quad (4.44)$$

Im Modell angenommener Wert für die Schenkellänge der Schweißnaht.

$$z = 8,5mm \quad (4.45)$$

Kontrolle ob a Maß innerhalb der Grenze

$$a = \frac{z}{\sqrt{2}} = 6,0104mm \quad (4.46)$$

Bedingung erfüllt!

## 4.2 Kugelschale

Im Folgenden wird die Auslegungsrechnung einer geschweißten Kugel-Stutzen Verbindung durchgeführt. Zuerst wird eine Innendruckberechnung der Kugelschale und des Stutzens nach [1] Kapitel 7 durchgeführt. Im Anschluss folgt die Berechnung des Ausschnitts dieser Konstruktion nach [1] Kapitel 9.

### 4.2.1 Betriebszustände Kugelschale

Betriebszustand 1: Konstante Temperatur von 285°C und Druck von 2MPa in der gesamten Konstruktion.

Betriebszustand 2: Temperatur von 285°C in der Kugelschale, Einspritzung von kühlem Medium mit 60°C über den Stutzen und Druck von 2MPa in der gesamten Konstruktion.

Die Betriebszustände sind in Tab. 4.7 und Tab. 4.8 ersichtlich.

**Tab. 4.7:** Kugelschale Betriebszustand 1

Minimaltemperatur	$T_{min} = 285^{\circ}\text{C}$
Maximaltemperatur	$T_{max} = 285^{\circ}\text{C}$
Druck	$p = 2\text{MPa}$

**Tab. 4.8:** Kugelschale Betriebszustand 2

Minimaltemperatur	$T_{min} = 60^{\circ}\text{C}$
Maximaltemperatur	$T_{max} = 285^{\circ}\text{C}$
Druck	$p = 2\text{MPa}$

### 4.2.2 Auslegung Kugelschale nach EN 13445-3

In Tab. 4.9 sind die Geometriedaten für die Innendruckberechnung der Kugelschale und des Stutzens ersichtlich.

**Tab. 4.9:** Geometriedaten zur Innendruckberechnung

Innendurchmesser Kugelschale	$D_i = 2192\text{mm}$
Innendurchmesser Stutzen	$d_i = 196,1\text{mm}$

In Tab. 4.10 sind die Materialdaten der Kugelschale und in Tab. 4.11 die Materialdaten des Stutzens aufgelistet.

**Tab. 4.10:** Materialdaten Kugelschale

Materialnorm	EN 10028-2
Material	10CrMo9-10
Bauteile	Kugelschale
Auslegungstemperatur	285°C
Berechnungsnennspannung des Schalenwerkstoffs	$f_s = 194,06MPa$
Querkontraktionszahl	$\nu = 0,3$

**Tab. 4.11:** Materialdaten Stutzen

Materialnorm	EN 10216-2
Material	11CrMo9-10+QT
Bauteile	Stutzen
Auslegungstemperatur	285°C
Berechnungsnennspannung des Stutzenwerkstoffs	$f_b = 158,73MPa$
Querkontraktionszahl	$\nu = 0,3$

Schweißnahtfaktor für Prüfgruppe 3 nach [1] 5.6 für die Kugelschale

$$z = 0,85 \quad (4.47)$$

Erforderliche Wanddicke der Kugelschale unter Innendruck (Schale) nach [1] 7.4.2.

$$e_{Kugel} = \frac{p \cdot D_i}{4 \cdot f_s \cdot z - p} = \frac{2MPa \cdot 2192mm}{4 \cdot 194,06MPa \cdot 1 - 2MPa} = 6,67mm \quad (4.48)$$

Schweißnahtfaktor für Prüfgruppe 3 nach [1] 5.6 für das ungeschweißte Stutzenrohr

$$z = 1 \quad (4.49)$$

Erforderliche Wanddicke der Zylinderschale unter Innendruck (Stutzen) nach [1] 7.4.2.

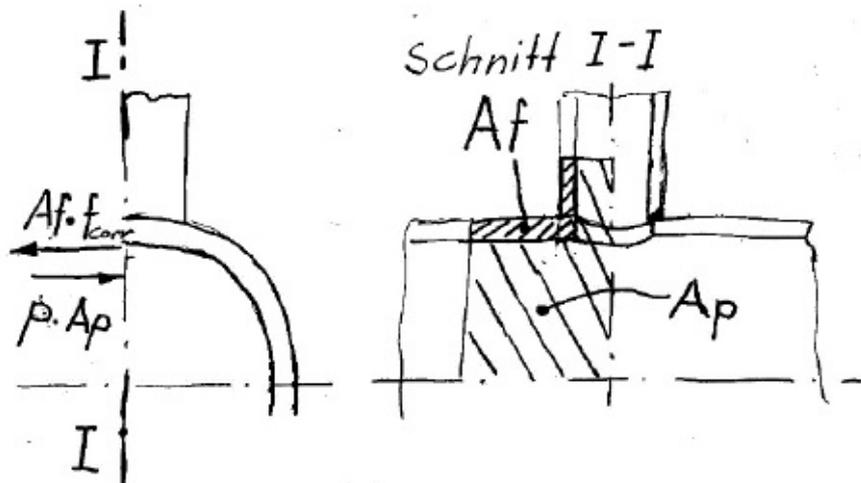
$$e_{Stutzen} = \frac{p \cdot d_{ib}}{2 \cdot f_b \cdot z - p} = \frac{2MPa \cdot 196,1mm}{2 \cdot 158,73MPa \cdot 1 - 2MPa} = 1,24mm \quad (4.50)$$

In Tab. 4.12 sind die Berechnungswanddicken der Konstruktion ersichtlich.

**Tab. 4.12:** Geometriedaten der Konstruktion

Berechnungswanddicke Kugelschale	$e_{a,s} = 11mm$
Außendurchmesser Kugelschale	$D_e = 2214mm$
Berechnungswanddicke Stutzen	$e_{a,b} = 11mm$
Außendurchmesser Stutzen	$d_{eb} = 218,1mm$

Der Berechnungsmethode von [1] Kapitel 9 wird eine globale Gleichgewichtsbetrachtung zugrunde gelegt. Dies ist in Abb. 4.5 ersichtlich. Bei dieser Kräftevergleichsmethode ist eine Spannungsfläche multipliziert mit einer korrigierten Berechnungsnennspannung zumindest so groß wie der in der Konstruktion herrschende Druck multipliziert mit der Druckfläche. Glg. 4.51 stellt diese Kräftevergleichsmethode dar. [5]



**Abb. 4.5:** Globale Gleichgewichtsbetrachtung - Kräftevergleichsmethode [5]

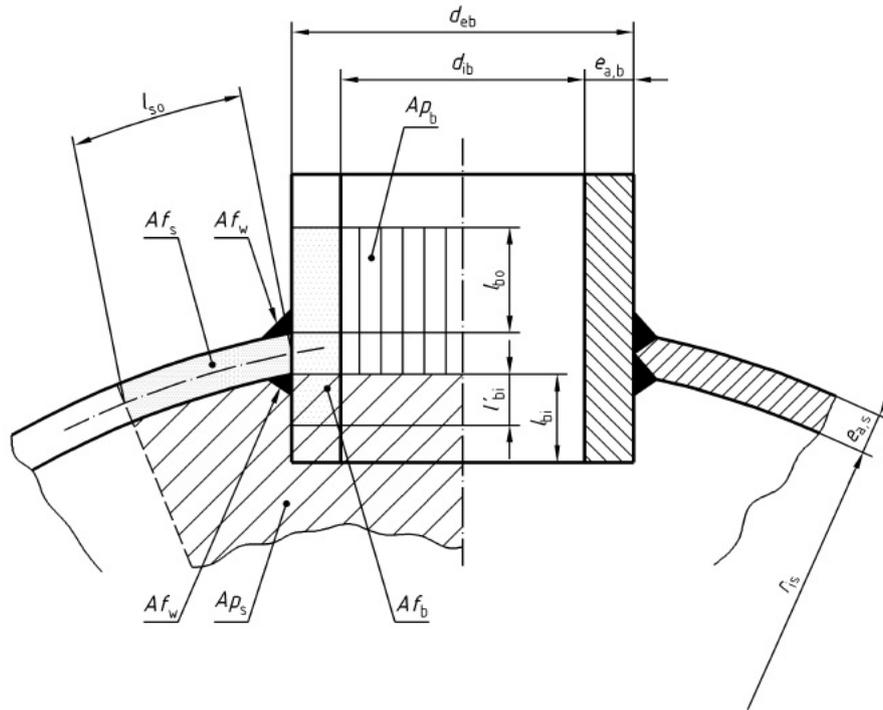
$$Af \cdot f_{corr} \geq p \cdot Ap \quad (4.51)$$

In Tab. 4.13 sind die für die folgende Ausschnittsberechnung benötigten Symbole, deren Beschreibung sowie die jeweilige Einheit des Symbols dargestellt.

**Tab. 4.13:** Symbole Ausschnittsberechnung Kugelschale [1]

Symbol	Beschreibung	Einheit
$Af_b$	Verstärkungsrelevante spannungsbeanspruchte Querschnittsfläche des Stutzens	$mm^2$
$Af_s$	Verstärkungsrelevante spannungsbeanspruchte Querschnittsfläche der Schale	$mm^2$
$Ap_b$	Druckbeanspruchte Fläche des Stutzens	$mm^2$
$Ap_s$	Druckbeanspruchte Fläche der Schale	$mm^2$
$d_{eb}$	Außendurchmesser des Stutzens	$mm$
$d_{ib}$	Innendurchmesser des Stutzens	$mm$
$D_e$	Außendurchmesser der Kugelschale	$mm$
$D_i$	Innendurchmesser der Kugelschale	$mm$
$e_{a,b}$	Berechnungswanddicke des Stutzens	$mm$
$e_{a,s}$	Berechnungswanddicke der Kugelschale	$mm$
$e'_s$	Einstecktiefe des Stutzens in der Schalenwand	$mm$
$l_b$	Aus der Schale herausragende Länge des Stutzens	$mm$
$l'_b$	Aus der Schale herausragende mittragende Länge eines Stutzens zur Verstärkungsberechnung	$mm$
$l_{bi}$	In die Schale hineinragende Länge eines Stutzens	$mm$
$l'_{bi}$	In die Schale hineinragende mittragende Länge eines Stutzens zur Verstärkungsberechnung	$mm$
$l_{bo}$	Größe aus der Schale herausragende Länge eines Stutzens zur Verstärkungsberechnung	$mm$
$r_{is}$	Innerer Krümmungsradius der Schale im Ausschnittmittelpunkt	$mm$

In Abb. 4.6 ist eine Kugelschale mit eingestecktem Stutzen und Ausschnitt dargestellt. Außerdem ist die Definition aller für die Berechnung benötigten Längen und Drückflächen ersichtlich. Die Ausschnittsberechnung wird entsprechend [1] Kapitel 9 für eine Kugelschale mit eingestecktem, nicht in die Schale hereinragenden Stutzen durchgeführt.



**Abb. 4.6:** Kugelschale mit Einzelausschnitt [1]

Allgemeine Gleichung für die Verstärkung eines Einzelausschnitts nach [1] 9.5.2.1.1. Dabei wurde die zusätzliche Verstärkung durch die Schweißnaht nicht mitberücksichtigt. Somit reduziert sich die allgemeine Gleichung aus [1] 9.5.2.1.1. zu Glg. 4.52.

$$A_{f_s} \cdot (f_s - 0,5p) + A_{f_b} \cdot (f_b - 0,5p) \geq p \cdot (A_{p_s} + A_{p_b}) \quad (4.52)$$

$$r_{i,s} = \frac{D_e}{2} - e_{a,s} = \frac{2214\text{mm}}{2} - 11\text{mm} = 1096\text{mm} \quad (4.53)$$

$$l_{so} = \sqrt{(2 \cdot r_{i,s} + e_{a,s}) \cdot e_{a,s}} = \sqrt{(2 \cdot 1096\text{mm} + 11\text{mm}) \cdot 11\text{mm}} = 155,67\text{mm} \quad (4.54)$$

$$l'_s = \min(l_{so}; l_s) = l_{so} = 155,67mm \quad (4.55)$$

$$Af_s = l'_s \cdot e_{a,s} = 155,67mm \cdot 11mm = 1712,37mm^2 \quad (4.56)$$

$$l_{bo} = \sqrt{(d_{eb} - e_{a,b}) \cdot e_{a,b}} = \sqrt{(218,1mm - 11mm) \cdot 11mm} = 47,73mm \quad (4.57)$$

$$l'_b = \min(l_{bo}; l_b) = l_{bo} = 47,73mm \quad (4.58)$$

$$\frac{d_{ib}}{2} = \frac{d_{eb}}{2} - e_{a,b} = 98,05mm \quad (4.59)$$

$$Ap_b = \frac{d_{ib}}{2} \cdot (l'_b + e_{a,s}) = 98,05mm \cdot (47,73mm + 11mm) = 5758,42mm^2 \quad (4.60)$$

Für Einschweißstutzen gilt:

$$l'_{bi} = \min(l_{bi}; 0,5 \cdot l_{bo}) = l_{bi} = 0mm \quad (4.61)$$

$$e'_s = e_{a,s} = 11mm \quad (4.62)$$

$$Af_b = e_{a,b} \cdot (l'_b + l'_{bi} + e'_s) = 11mm \cdot (47,73mm + 0mm + 11mm) = 646,03mm^2 \quad (4.63)$$

$$r_{ms} = r_{is} + 0,5 \cdot e_{a,s} = 1096mm + 0,5 \cdot 11mm = 1101,5mm \quad (4.64)$$

$$\delta = \frac{d_{eb}}{2 \cdot r_{ms}} = \frac{218,1mm}{2 \cdot 1101,5mm} = 0,099 \quad (4.65)$$

$$a = r_{ms} \cdot \arcsin \delta = 1101,5mm \cdot \arcsin 0,099 = 109,23mm \quad (4.66)$$

$$Ap_s = 0,5 \cdot r_{is}^2 \cdot \frac{l'_s + a}{0,5 \cdot e_{a,s} + r_{is}} = 0,5 \cdot (1096mm)^2 \cdot \frac{155,67mm + 109,23mm}{0,5 \cdot 11mm + 1096mm} = 144440,36mm^2 \quad (4.67)$$

$$Af_s \cdot (f_s - 0,5p) + Af_b \cdot (f_b - 0,5p) \geq p \cdot (Ap_s + Ap_b) \quad (4.68)$$

$$\begin{aligned} 1712,37mm^2 \cdot (194,06MPa - 0,5 \cdot 2MPa) + 646,03mm^2 \cdot (158,73MPa - 0,5 \cdot 2MPa) \\ \geq 2MPa \cdot (144440,36mm^2 + 5758,42mm^2) \quad (4.69) \end{aligned}$$

$$432486,46 \geq 300397,56 \quad (4.70)$$

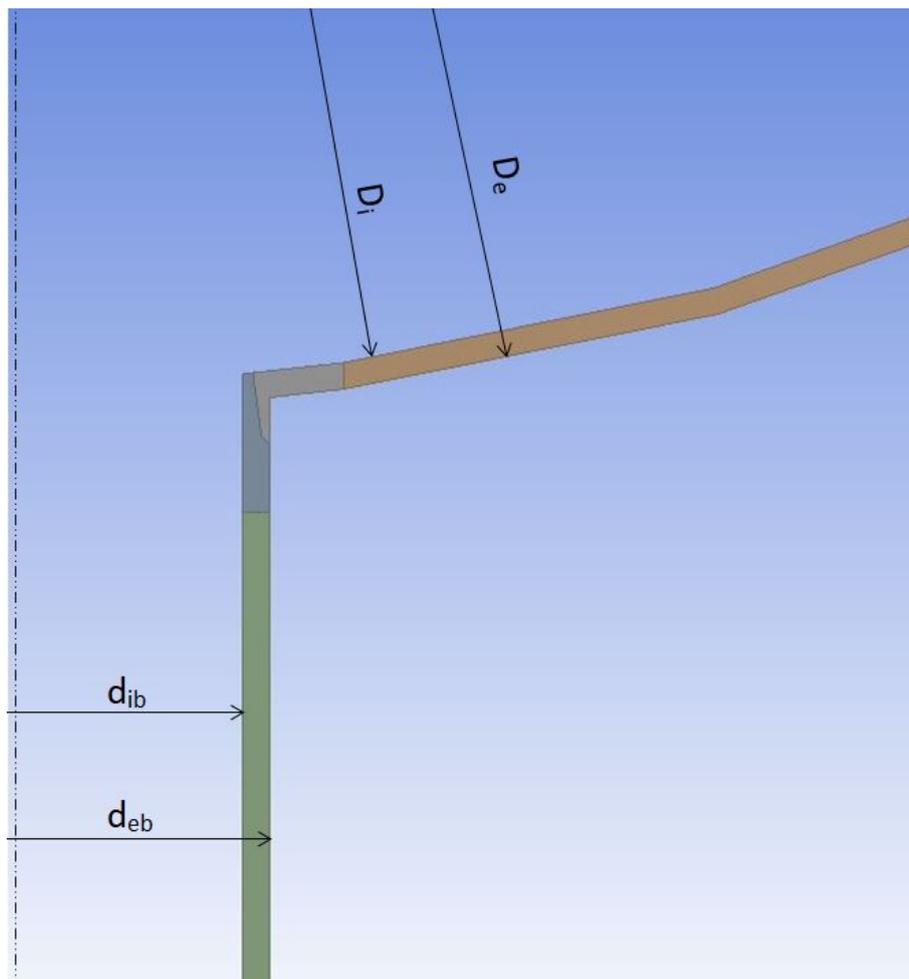
Der Ausschnitt ist zulässig.

### 4.2.3 Abmessungen Kugelschale

Anhand Abb. 4.7 sowie Tab. 4.14 sind die Abmessungen der oben ausgelegten Kugelschale ersichtlich.

**Tab. 4.14:** Daten Schale und Stutzen

$D_i$	2192mm
$D_e$	2214mm
$d_{ib}$	196,1mm
$d_{eb}$	218,1mm



**Abb. 4.7:** Abmessungen der Kugelschale

Im Folgenden wird eine Auslegung der Schweißnahtabmessungen an der Kugelschale durchgeführt. Es handelt sich wie auch am ebenen Boden um eine HV Naht an welcher der Schweißnahtübergang wie eine Kehlnaht ausgeführt wird.

$$2\text{mm} \leq a \leq 0,7 \cdot t_{\min} \quad (4.71)$$

$$2\text{mm} \leq a \leq 0,7 \cdot 11\text{mm} \quad (4.72)$$

$$2\text{mm} \leq a \leq 7,7\text{mm} \quad (4.73)$$

$$a \geq \sqrt{t_{max}} - 0,5 \quad (4.74)$$

$$a \geq \sqrt{11mm} - 0,5 = 2,8166mm \quad (4.75)$$

$$a_{Berechnung} = 3mm \quad (4.76)$$

$$z_{Berechnung} = \sqrt{2} \cdot a_{Berechnung} = 4,2426mm \quad (4.77)$$

Im Modell angenommener Wert für die Schenkellänge der Schweißnaht.

$$z = 4,3mm \quad (4.78)$$

Kontrolle ob a Maß innerhalb der Grenze

$$a = \frac{z}{\sqrt{2}} = 3,0406mm \quad (4.79)$$

Bedingung erfüllt!

# Kapitel 5

## Numerische Analyse

### 5.1 Ebener Boden 2D

#### 5.1.1 Modellierung

In Abb. 5.1 (Modell mit Schweißnaht) und Abb. 5.2 (CAB Modell) sind die Detailansichten des modellierten Schweißnahtbereichs des ebenen Bodens mit den jeweiligen Abmessungen ersichtlich.

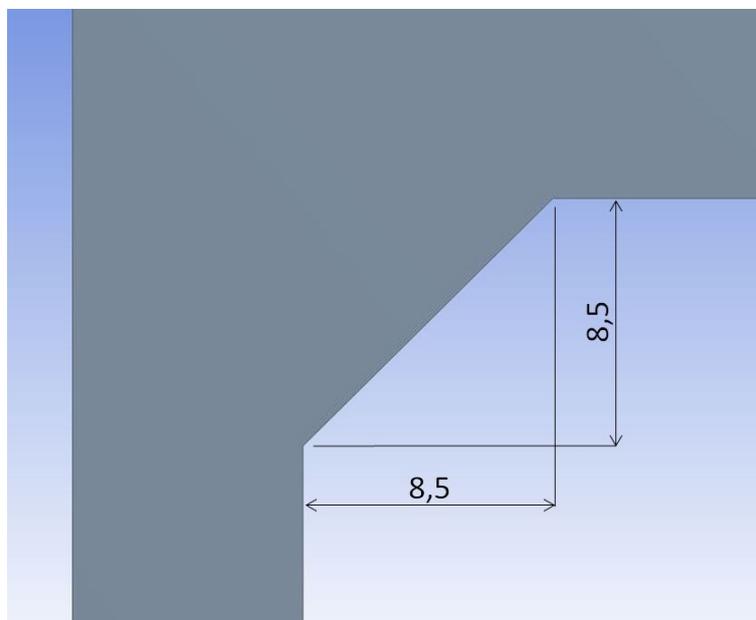
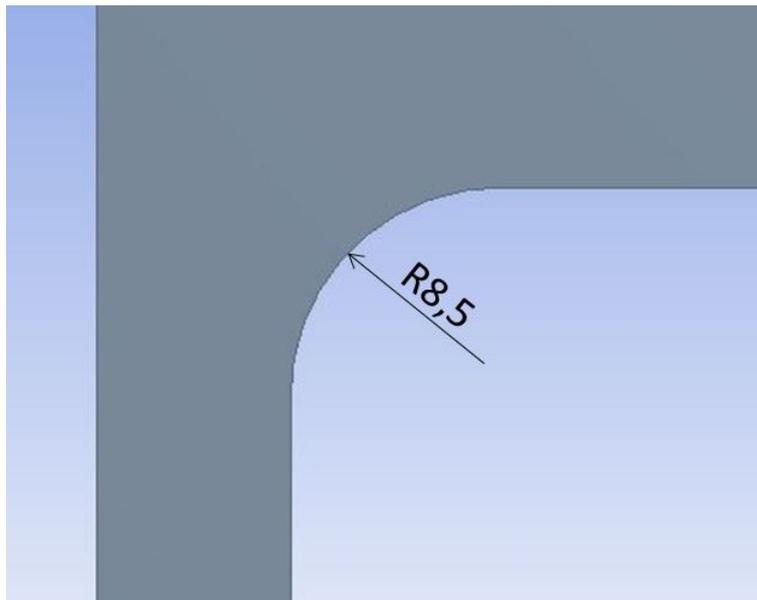
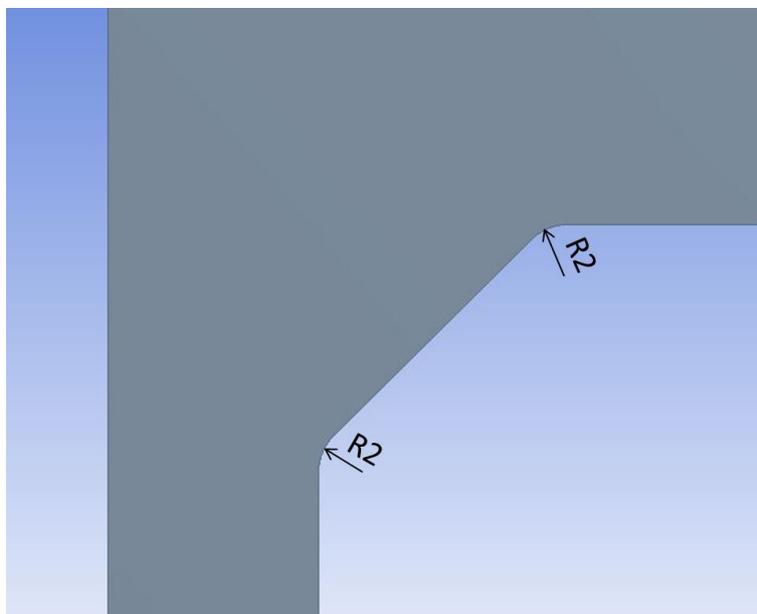


Abb. 5.1: Detailansicht des Modells mit Schweißnaht



**Abb. 5.2:** Detailansicht des CAB Modells

In Abb. 5.3 ist das Modell mit 2mm Radius abgebildet. Die Schweißnahtübergänge wurden hier im Vergleich zu Abb. 5.1 mit einem 2mm Radius verrundet und schließen tangential ab, um eine Spannungssingularität an dieser Stelle zu vermeiden.



**Abb. 5.3:** Detailansicht des Modells mit 2mm Radius

### 5.1.2 Randbedingungen

An der Zylinderschale gibt es am oberen Ende keine Verschiebungen in y Richtung, jedoch freie Verschiebungen in x Richtung. Die Implementierung dieser Randbedingungen im Berechnungsprogramm sind in Abb. 5.4 ersichtlich.

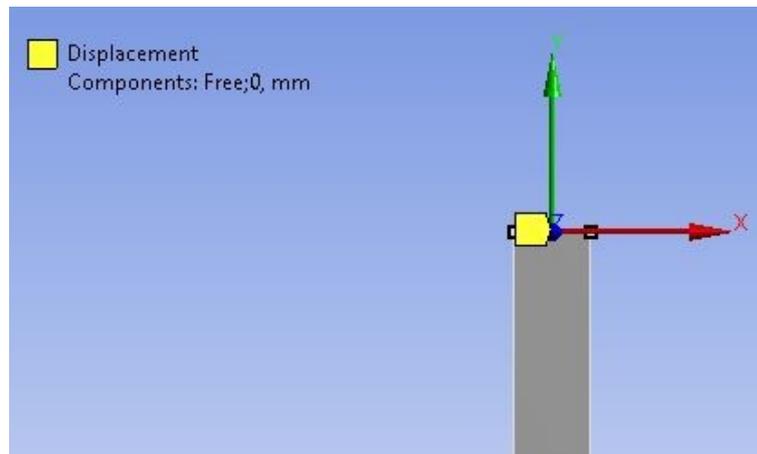


Abb. 5.4: Randbedingung an der Zylinderschale

Im gesamten Modell herrscht ein Betriebsdruck von 5 MPa, entsprechend Abb. 5.5.

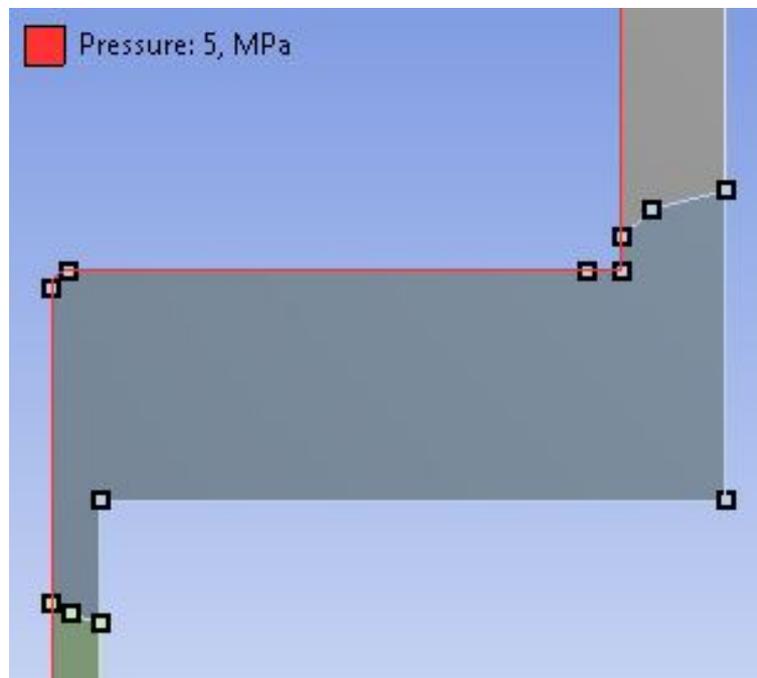
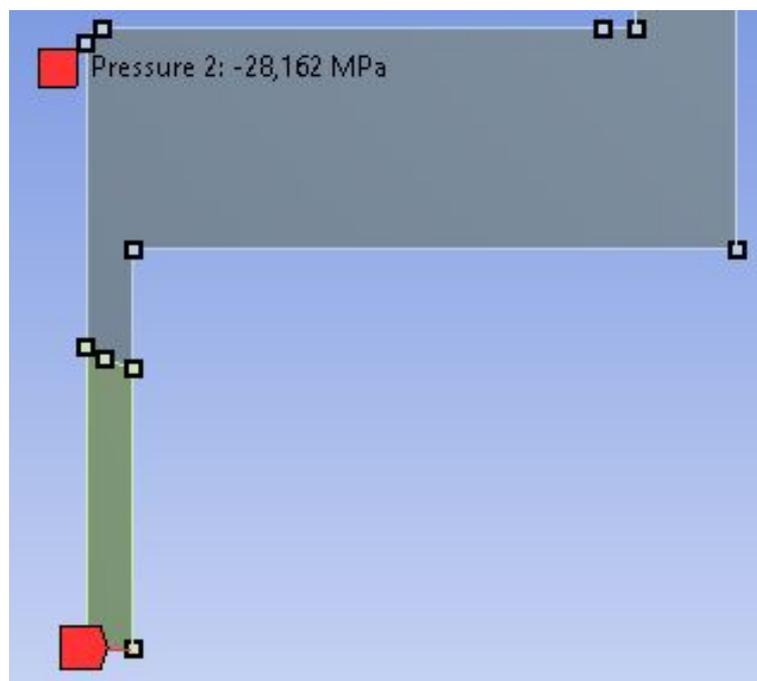


Abb. 5.5: Beaufschlagung des Modells mit Innendruck

Ein Kräftegleichgewicht am Stutzenrohr liefert die äquivalenten Längsspannungen im Stutzenrohr. Die Berechnung erfolgt anhand Glg. 5.1 und Glg. 5.2. In Abb. 5.6 ist die Aufbringung der berechneten Längsspannungen an der unteren Stutzenquerschnittsfläche im Berechnungsmodell ersichtlich.

$$\sigma_l = p \frac{d_i^2}{d_e^2 - d_i^2} \quad (5.1)$$

$$\sigma_l = 5 \text{ MPa} \frac{(202 \text{ mm})^2}{(219,2 \text{ mm})^2 - (202 \text{ mm})^2} = 28,1615 \text{ MPa} \quad (5.2)$$



**Abb. 5.6:** Äquivalente Längsspannungen im Stutzenrohr

Sowohl Zylinderschale als auch Stutzen werden außen wärmegeämmt angenommen. Für den Betriebszustand ohne Einspritzung und Temperatur von  $95^\circ\text{C}$  herrscht ein Wärmeübergangskoeffizient von  $1,16 \text{ kW/m}^2\text{K}$  an der gesamten Innenoberfläche. Im Falle einer Einspritzung von kühlem Medium mit  $80^\circ\text{C}$  über den Stutzen und einer Temperatur von  $95^\circ\text{C}$  in der Zylinderschale hat das Stutzenmaterial einen Wärmeübergangskoeffizienten von  $10,8 \text{ kW/m}^2\text{K}$ , der Wärmeübergangskoeffizient an der Zylinderinnenfläche bleibt bei  $1,16 \text{ kW/m}^2\text{K}$ . Diese Bedingungen wurden im Modell durch unterschiedliche Konvektionen an Stutzen und Zylinderschale entsprechend Abb. 5.7 und Abb. 5.8 berücksichtigt.

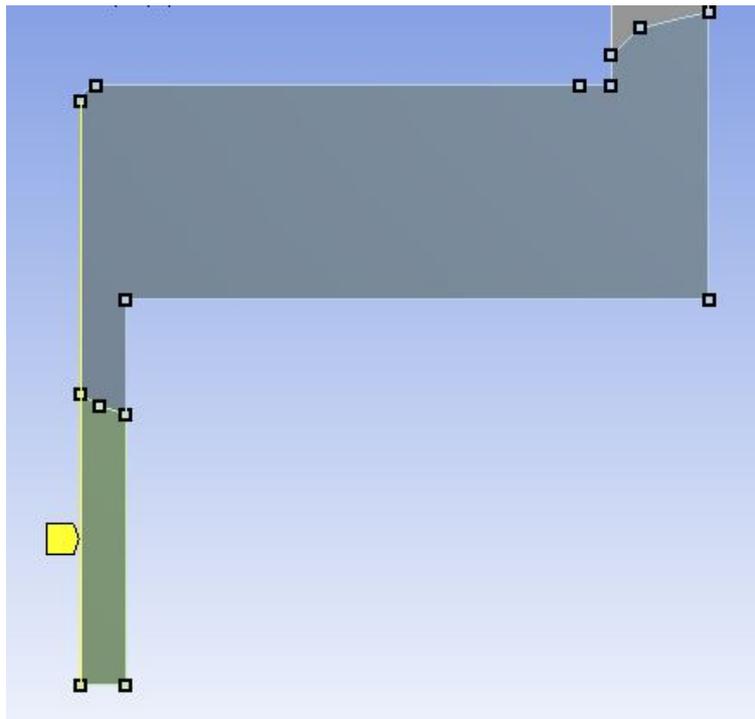


Abb. 5.7: Konvektion im Stutzenrohr

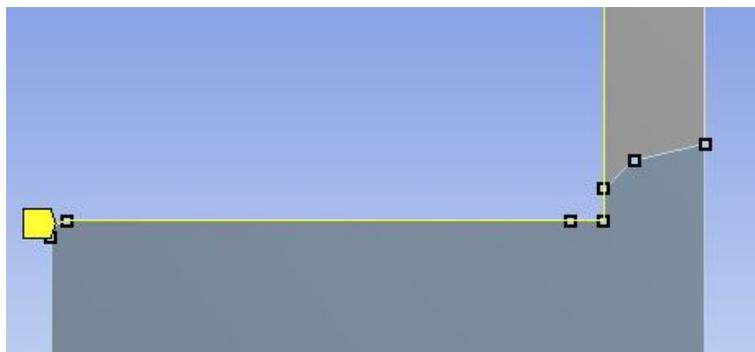
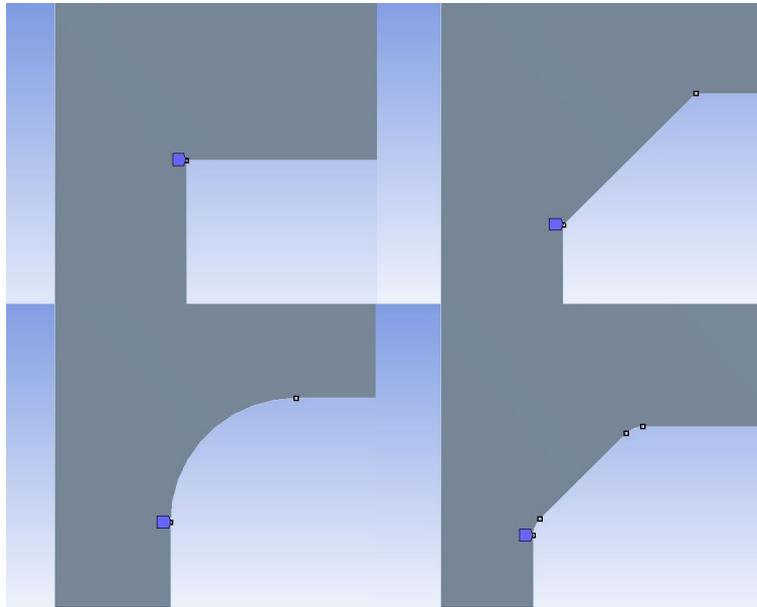


Abb. 5.8: Konvektion ebener Boden und Zylinderschale

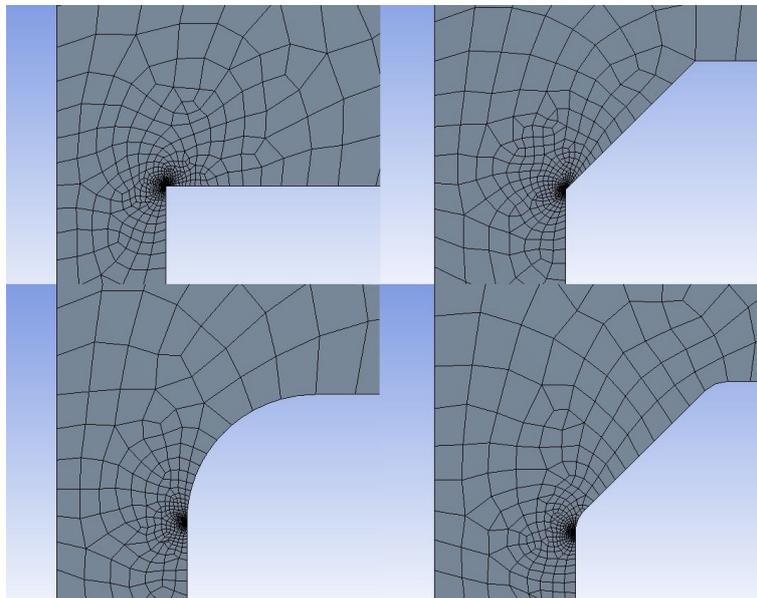
### 5.1.3 Vernetzung

Das Finite Elemente-Netz wird an allen Modellen an den in Abb. 5.9 blau markierten Stellen schrittweise verfeinert. Die Modelle werden mit einer Netzfeinheit von 0,002 mm (Abb. 5.10), 0,02 mm (Abb. 5.11), 0,1 mm (Abb. 5.12), 0,5 mm (Abb. 5.13), 0,75 mm (Abb. 5.14), 1 mm (Abb. 5.15), 2 mm (Abb. 5.16) sowie 5 mm (Abb. 5.17) durchgeführt. In den Abbildungen 5.9-5.17 befinden sich jeweils links oben das Modell ohne Schweißnaht, rechts oben das Modell

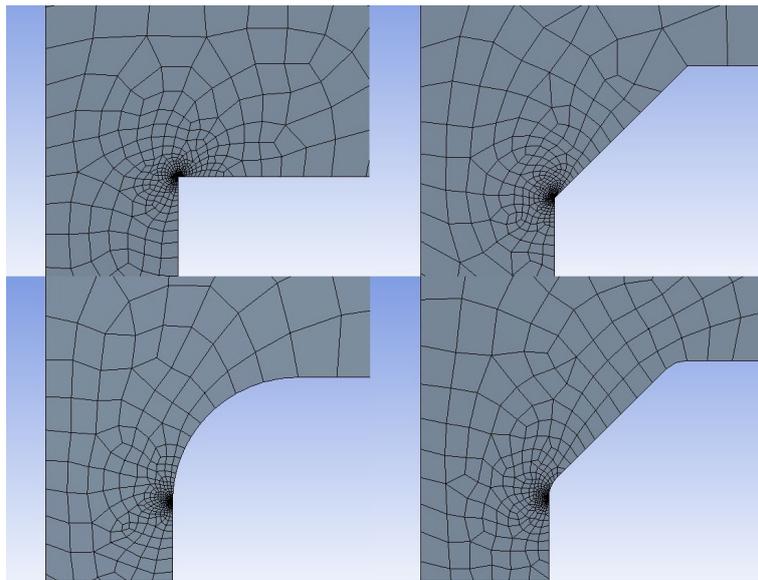
Schweißnaht, links unten das CAB Modell sowie rechts unten das 2mm Radius Modell mit der jeweiligen Netzauflösung.



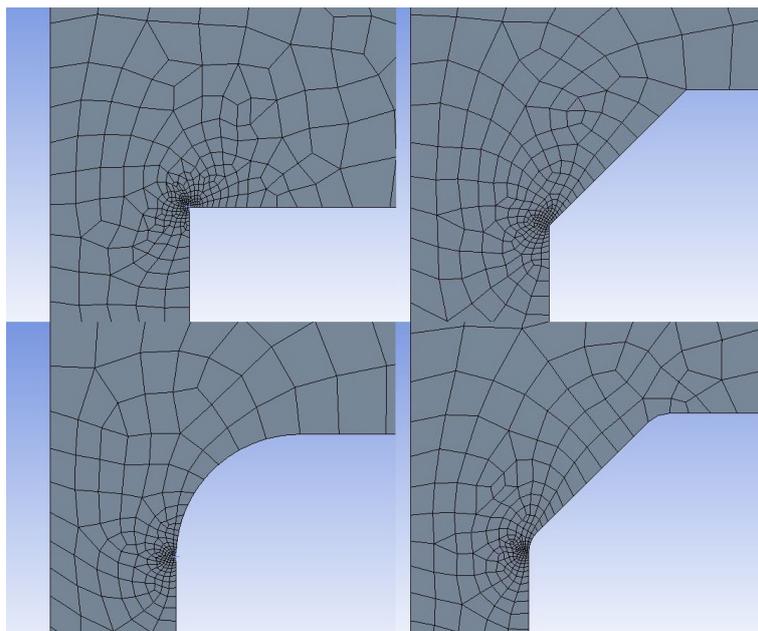
**Abb. 5.9:** Vernetzung an den Modellen



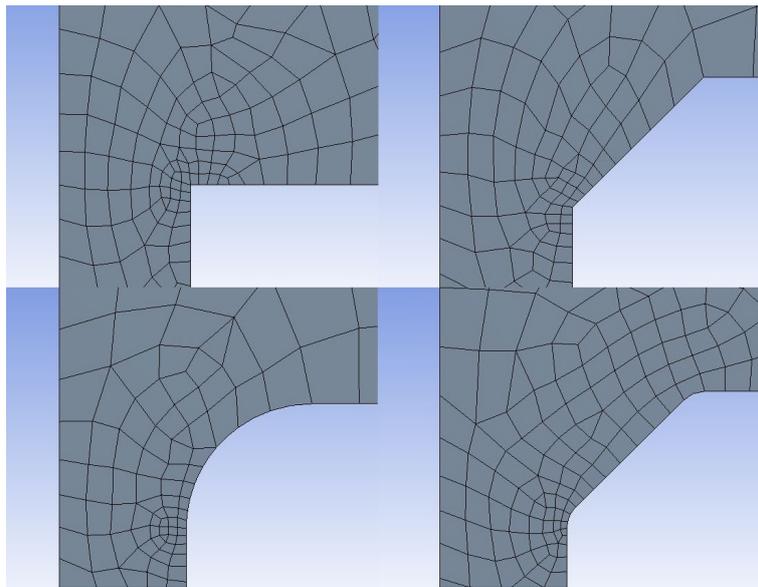
**Abb. 5.10:** Modelle mit Netzfeinheit 0,002 mm



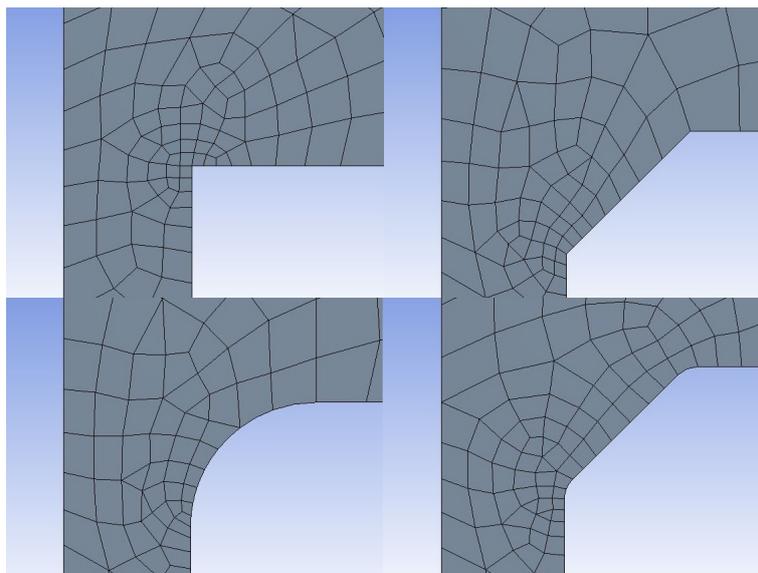
**Abb. 5.11:** Modelle mit Netzfeinheit 0,02 mm



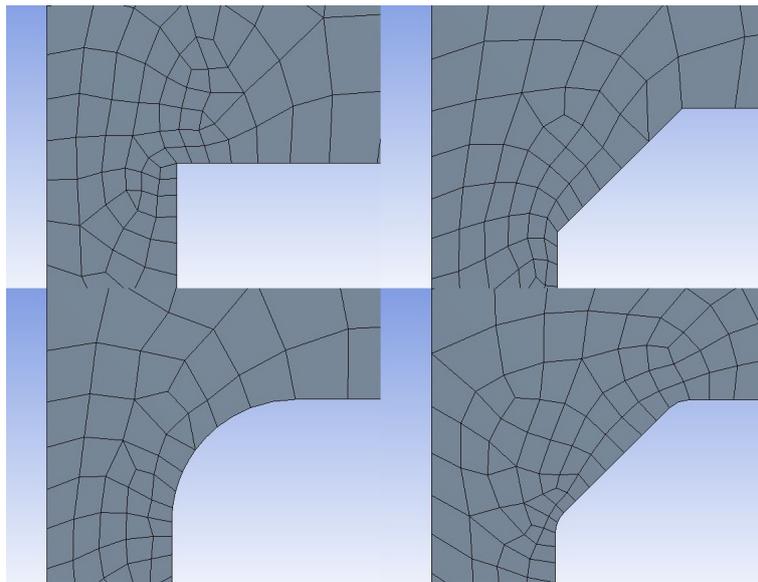
**Abb. 5.12:** Modelle mit Netzfeinheit 0,1 mm



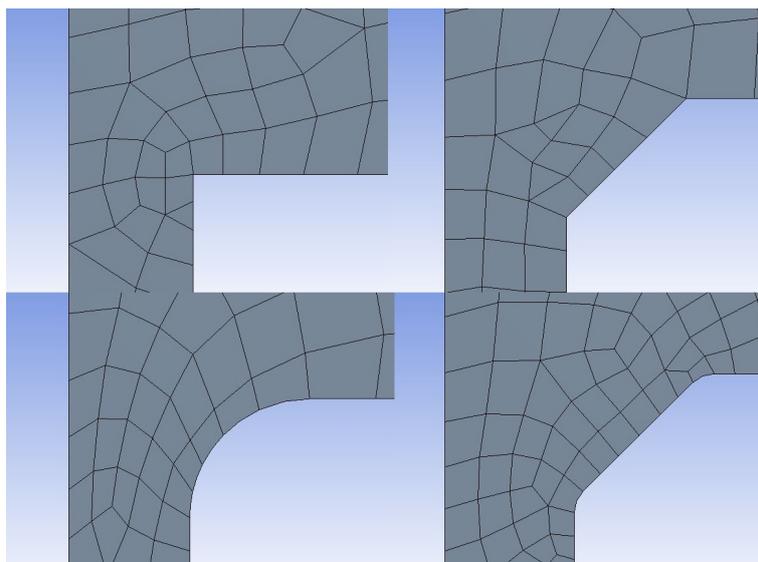
**Abb. 5.13:** Modelle mit Netzfeinheit 0,5 mm



**Abb. 5.14:** Modelle mit Netzfeinheit 0,75 mm



**Abb. 5.15:** Modelle mit Netzfeinheit 1 mm



**Abb. 5.16:** Modelle mit Netzfeinheit 2 mm

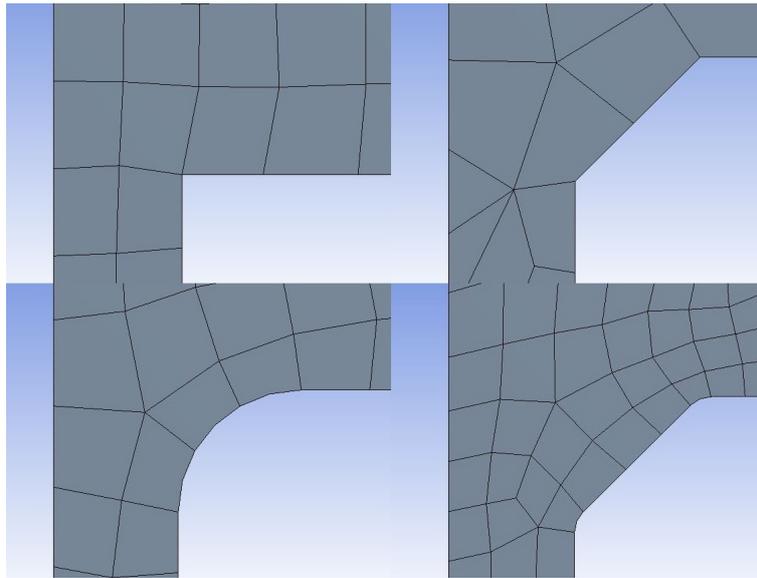


Abb. 5.17: Modelle mit Netzfeinheit 5 mm

#### 5.1.4 Ergebnisse Thermische Analyse

Die Ergebnisse der thermischen Analyse des Modells sind anhand der Abb. 5.18 und Abb. 5.19 ersichtlich. Für den Betriebszustand 1 herrscht eine konstante Temperatur von 95°C im gesamten Modell entsprechend Abb. 5.18. Im Betriebszustand 2 ergibt sich durch die Einspritzung von kühlem Medium mit 80°C über den Stützen eine Temperaturverteilung entsprechend Abb. 5.19.

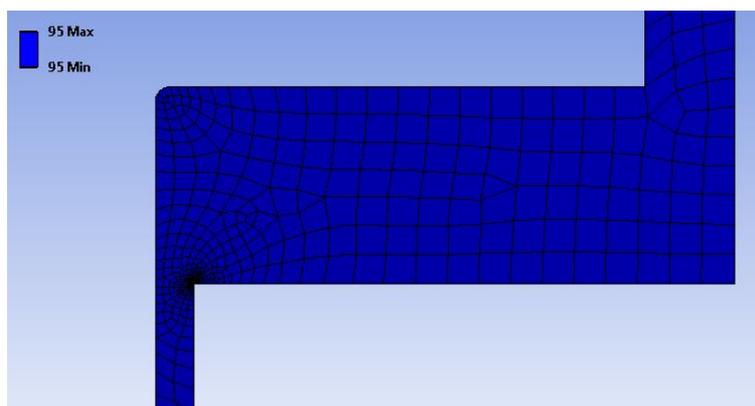


Abb. 5.18: Temperaturverteilung Zustand 1

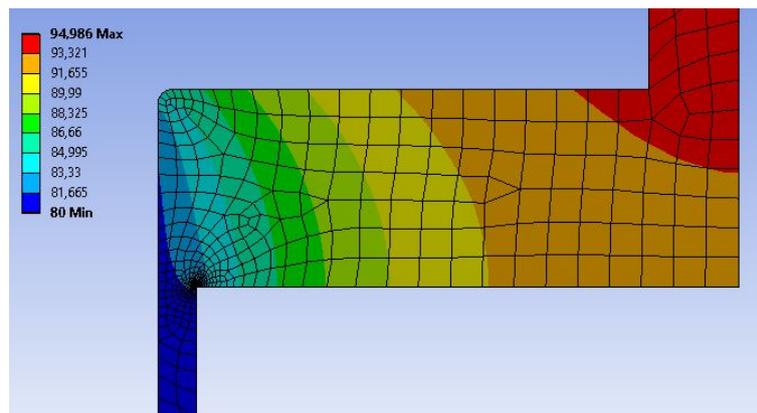


Abb. 5.19: Temperaturverteilung Zustand 2

### 5.1.5 Auswertung der Spannungen zur Ermüdungsanalyse der Schweißnähte

In den Modellen werden Pfade in 2 Richtungen gelegt. Der erste Pfad entsprechend den Abbildungen 5.20 - 5.23 vom Schweißnahtübergang beginnend an der Außenkontur des Stutzens entlang. Diese Pfade dienen der Ermittlung der Längsstrukturspannungen im Stutzenrohr (y Richtung) sowie der Umfangsstrukturspannungen (z Richtung) an der Oberfläche. Auf Grundlage dieser Werte wird an den jeweiligen Modellen das Extrapolationsverfahren aus Kapitel 3.2.1, die Haibach Methode aus Kapitel 3.2.2, der Spannungswert  $0,15t$  entfernt, sowie  $1/3z$  der Ecke entfernt ausgewertet.

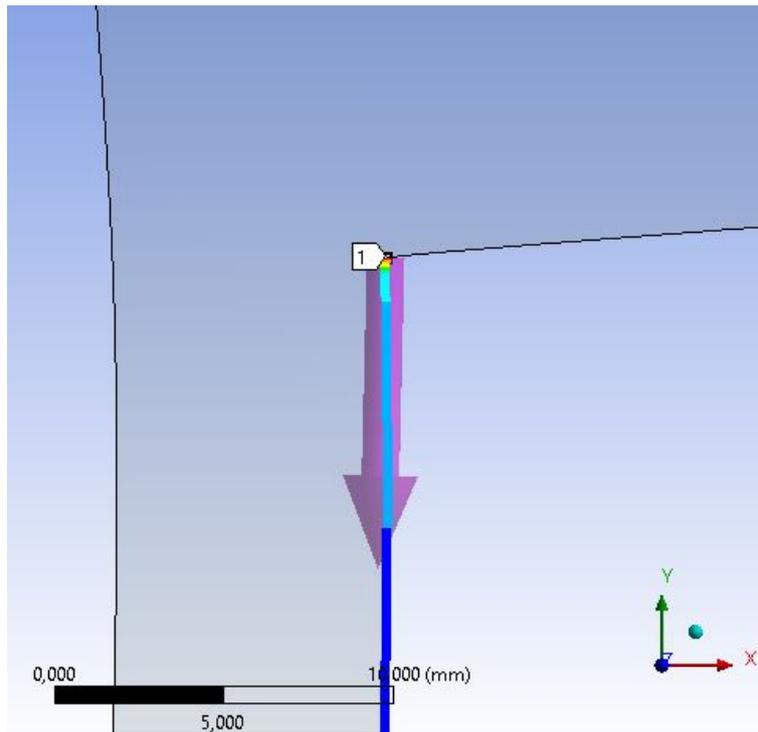


Abb. 5.20: Auswertungspfad Extrapolation Modell keine Schweißnaht

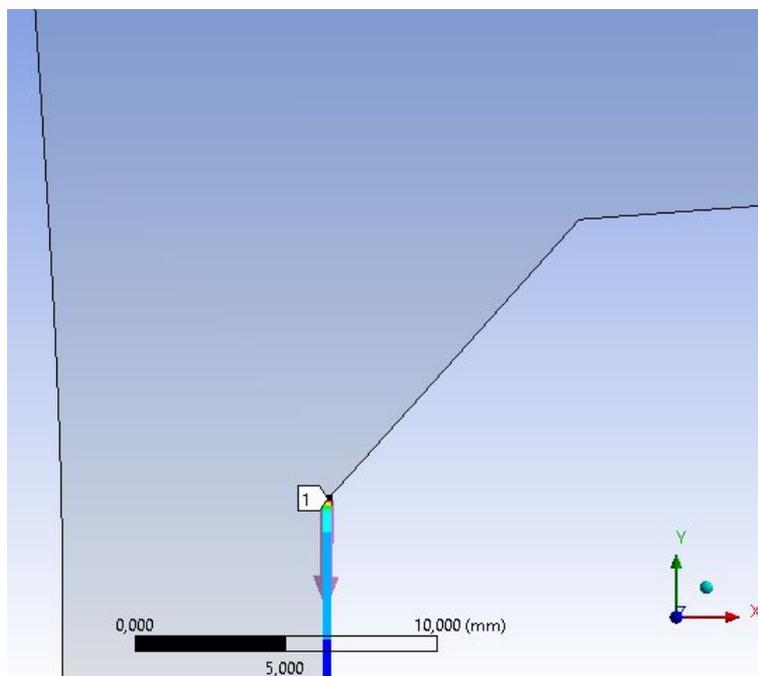


Abb. 5.21: Auswertungspfad Extrapolation Modell Schweißnaht

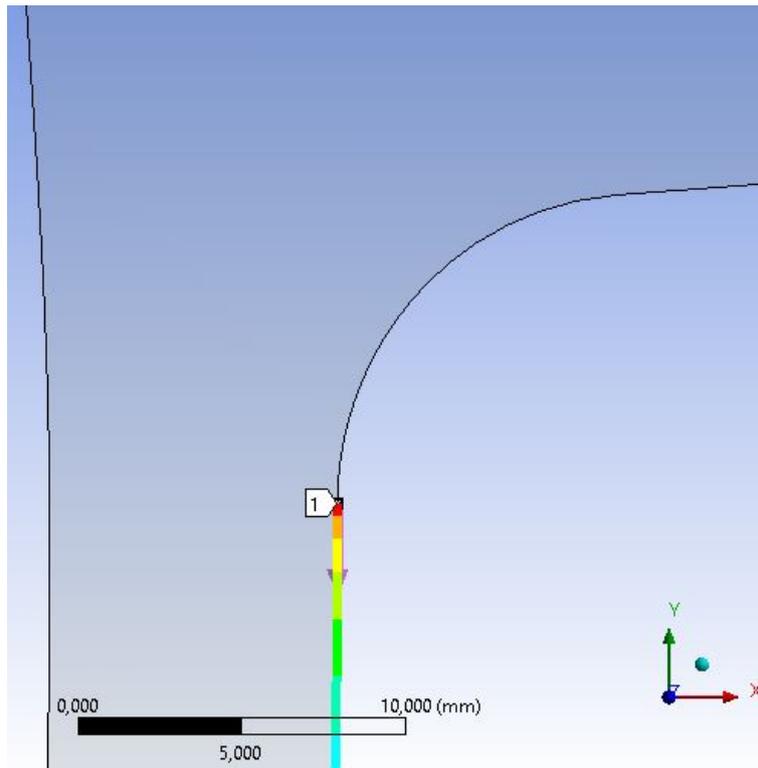


Abb. 5.22: Auswertungspfad Extrapolation am CAB Modell

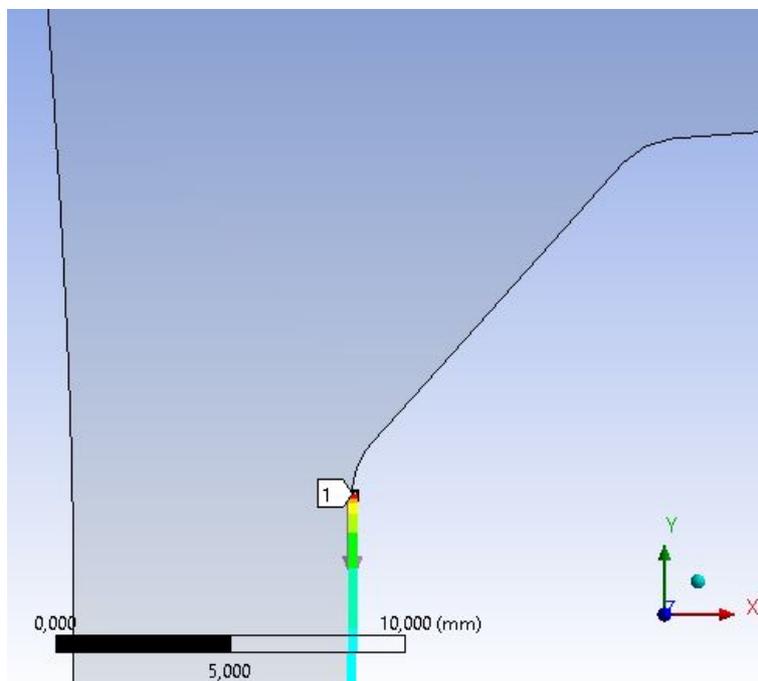
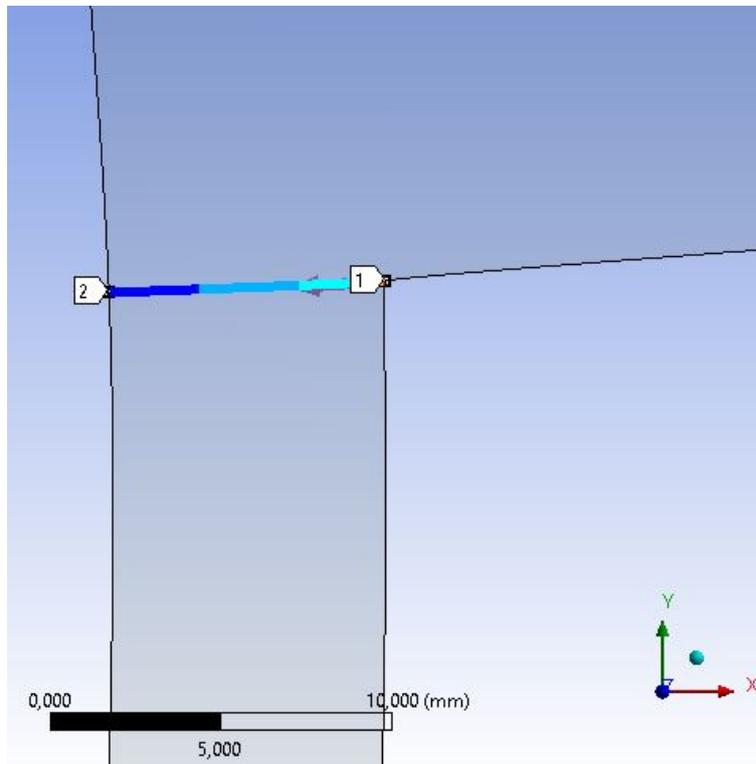
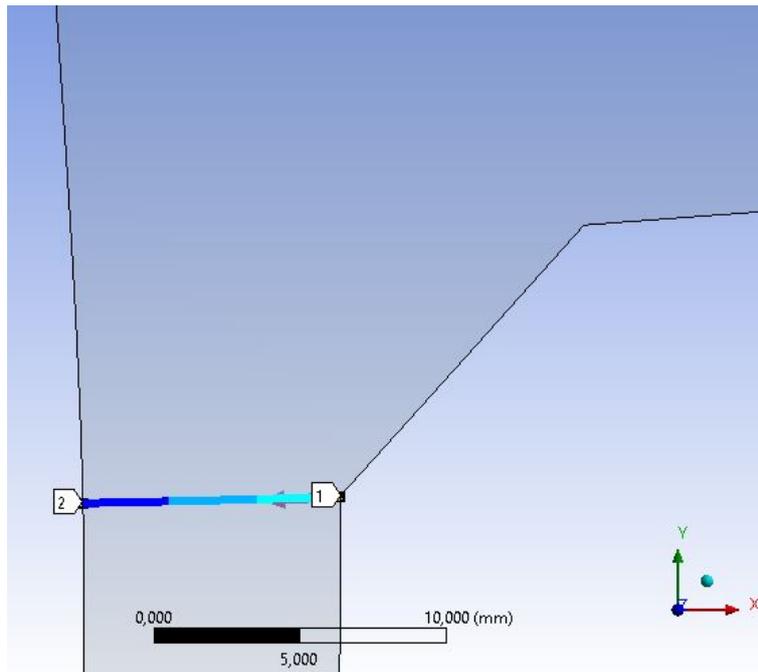


Abb. 5.23: Auswertungspfad Extrapolation 2mm Radius Modell

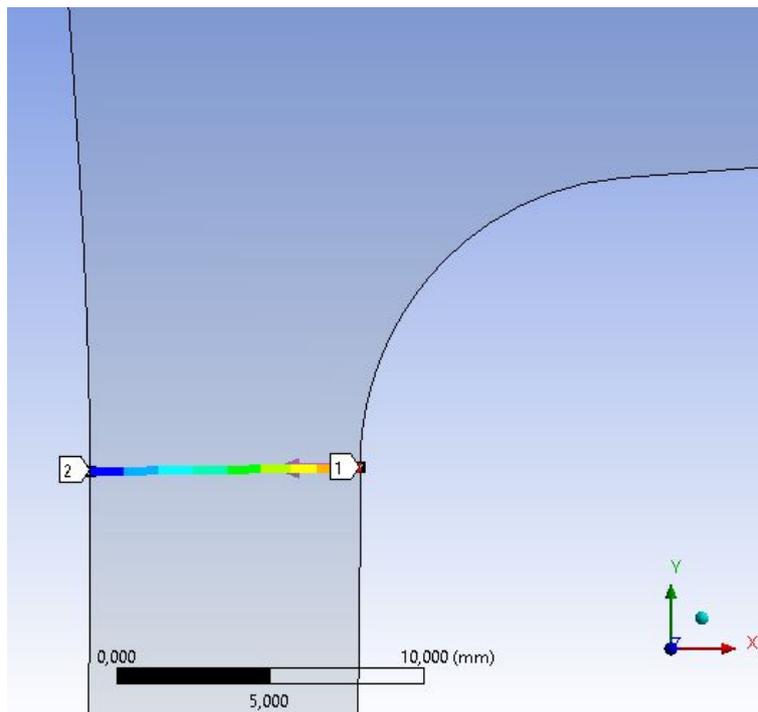
Der zweite Pfad dient der Ermittlung der Spannungen (in  $y$ - und  $z$  Richtung) mithilfe der Linearisierung durch die Wand, beginnend am Schweißnahtübergang bis zur Innenkontur des Stutzen auf einem Pfad in  $x$  Richtung durch die Wanddicke des Stutzenrohrs. Diese Pfade an den verschiedenen Modellierungsarten sind in den Abbildungen 5.24- 5.27 ersichtlich.



**Abb. 5.24:** Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand Modell keine Schweißnaht



**Abb. 5.25:** Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand Modell Schweißnaht



**Abb. 5.26:** Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand am CAB Modell

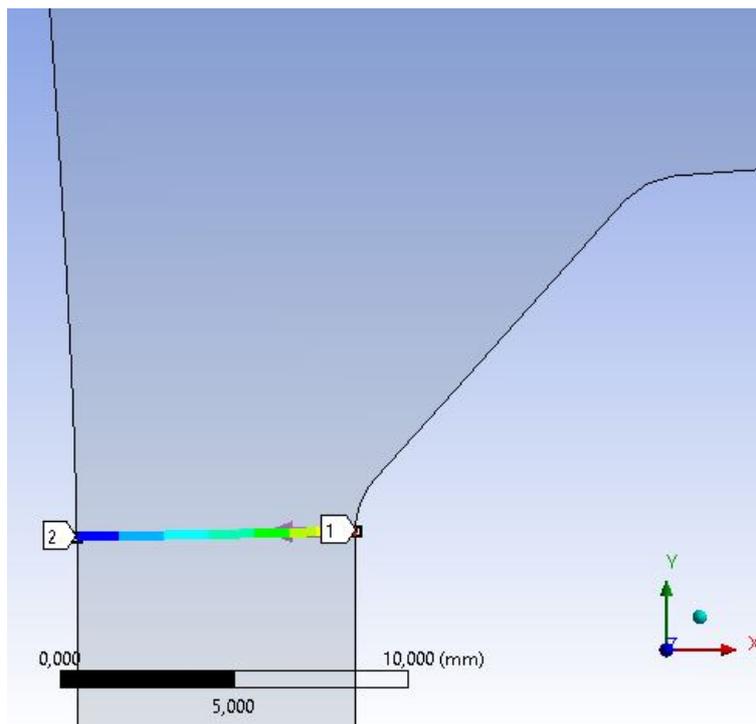
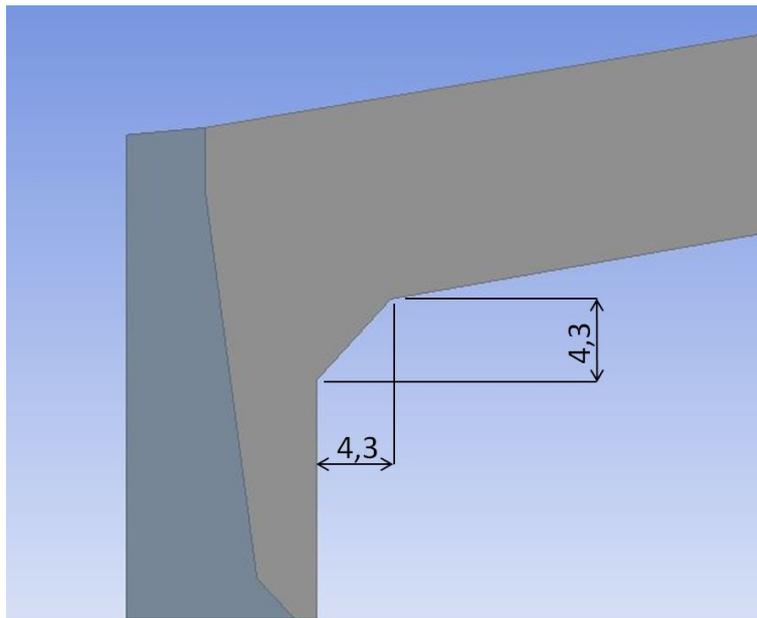


Abb. 5.27: Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand am 2mm Radius Modell

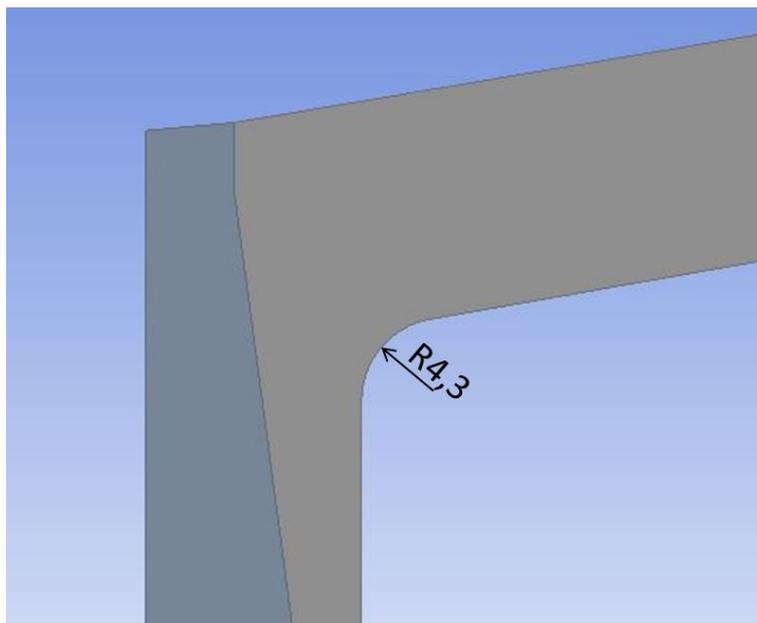
## 5.2 Kugelschale 2D

### 5.2.1 Modellierung

In Abb. 5.28 (Modell Schweißnaht) und Abb. 5.29 (CAB Modell) sind die Detailansichten des modellierten Schweißnahtbereichs der Kugelschale mit den jeweiligen Abmessungen ersichtlich.



**Abb. 5.28:** Detailansicht des Modells Schweißnaht



**Abb. 5.29:** Detailansicht des CAB Modells

In Abb. 5.30 ist das Modell mit 2mm Radius abgebildet. Im Vergleich zum Modell mit Schweißnaht wurden die Ecken hier mit einem 2mm Radius verrundet und schließen tangential ab, um eine Spannungssingularität an dieser Stelle zu vermeiden.

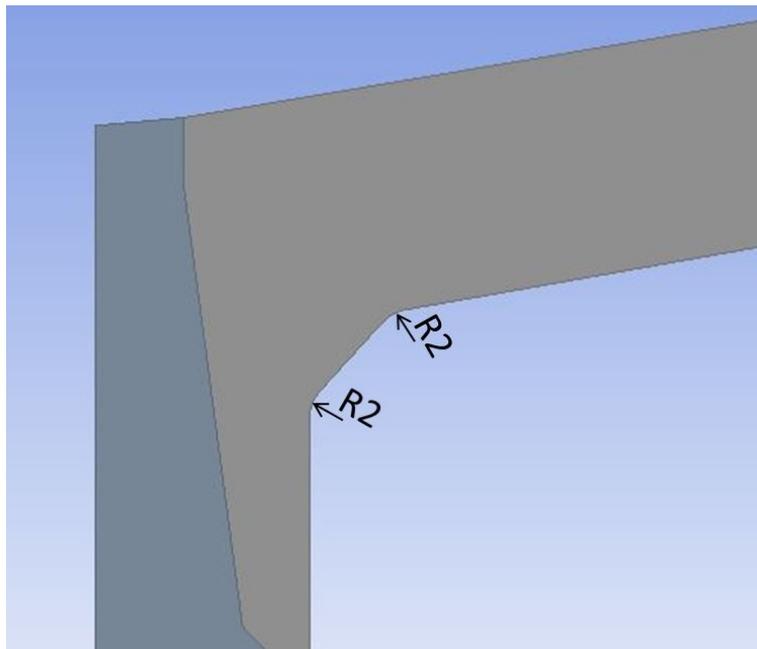


Abb. 5.30: Detailansicht des Modells mit 2mm Radius

### 5.2.2 Randbedingungen

An der Kugelschale gibt es am oberen Ende keine Verschiebungen in y Richtung, jedoch freie Verschiebungen in x Richtung. Die Implementierung dieser Randbedingungen im Berechnungsprogramm sind in Abb. 5.31 ersichtlich. In Abb. 5.32 ist die Aufbringung des Innendrucks von 2 MPa für beide Betriebszustände an der gesamten Kugel- und Stutzeninnenfläche ersichtlich.

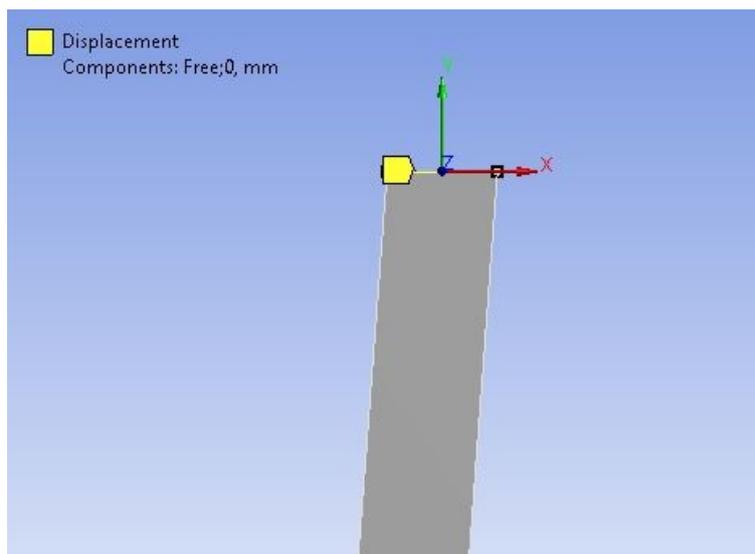
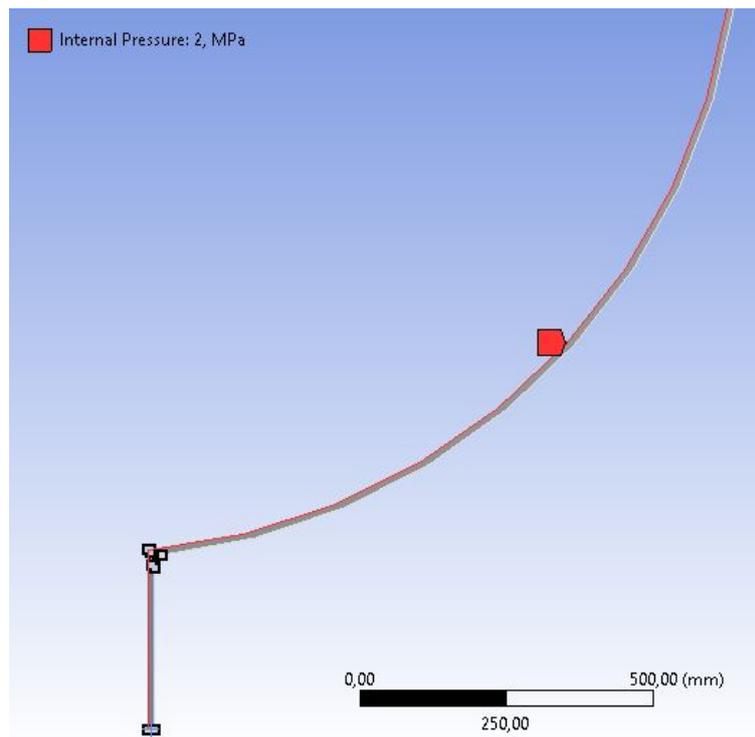


Abb. 5.31: Randbedingung an der Zylinderschale

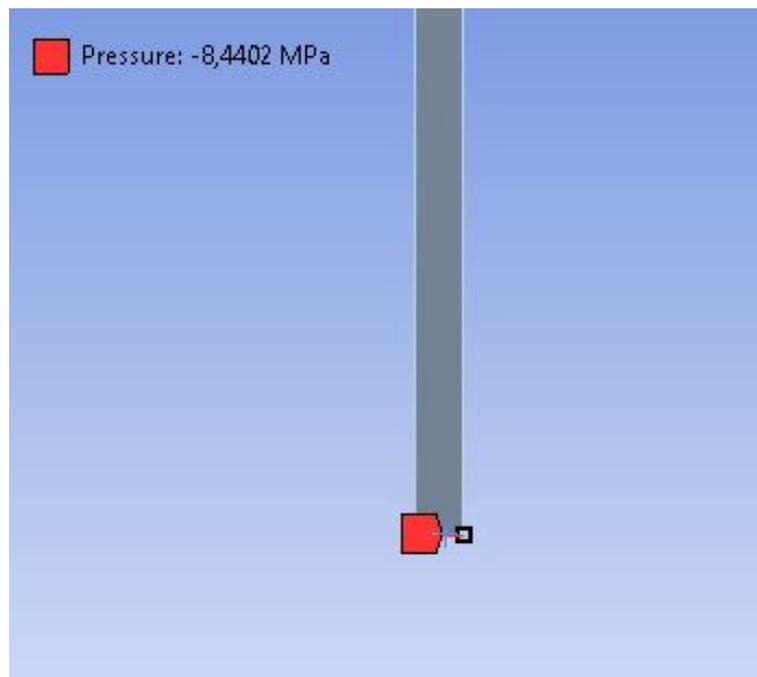


**Abb. 5.32:** Beaufschlagung des Modells mit Innendruck

Ein Kräftegleichgewicht am Stutzenrohr liefert die äquivalenten Längsspannungen im Stutzenrohr. Die Berechnung erfolgt anhand Glg. 5.3 und Glg. 5.4. Die Aufbringung dieser Längsspannungen an der unteren Stutzenquerschnittsfläche ist in Abb. 5.33 ersichtlich.

$$\sigma_l = p \frac{d_{ib}^2}{d_{eb}^2 - d_{ib}^2} \quad (5.3)$$

$$\sigma_l = 2 \text{ MPa} \frac{(196,1 \text{ mm})^2}{(218,1 \text{ mm})^2 - (196,1 \text{ mm})^2} = 8,44 \text{ MPa} \quad (5.4)$$



**Abb. 5.33:** Äquivalente Langspannungen im Stützenrohr

Es wird angenommen, dass sowohl Kugelschale als auch Stützen außen wärmedämmend sind. Für den Betriebszustand ohne Einspritzung und Temperatur von  $285^{\circ}\text{C}$  herrscht ein Wärmeübergangskoeffizient von  $1,16\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$  an der gesamten Innenoberfläche. Im Falle einer Einspritzung von kühlem Medium mit  $60^{\circ}\text{C}$  und einer Temperatur von  $285^{\circ}\text{C}$  in der Kugelschale hat das Stützenmaterial einen Wärmeübergangskoeffizienten von  $10,8\text{ kW}/\text{m}^2\text{K}$ , der Wärmeübergangskoeffizient an der Kugelinnenfläche bleibt bei  $1,16\text{ kW}/\text{m}^2\text{K}$ . Diese Bedingungen wurden im Modell durch unterschiedliche Konvektionen an Stützen und Kugelschale entsprechend Abb. 5.34 und Abb. 5.35 berücksichtigt.

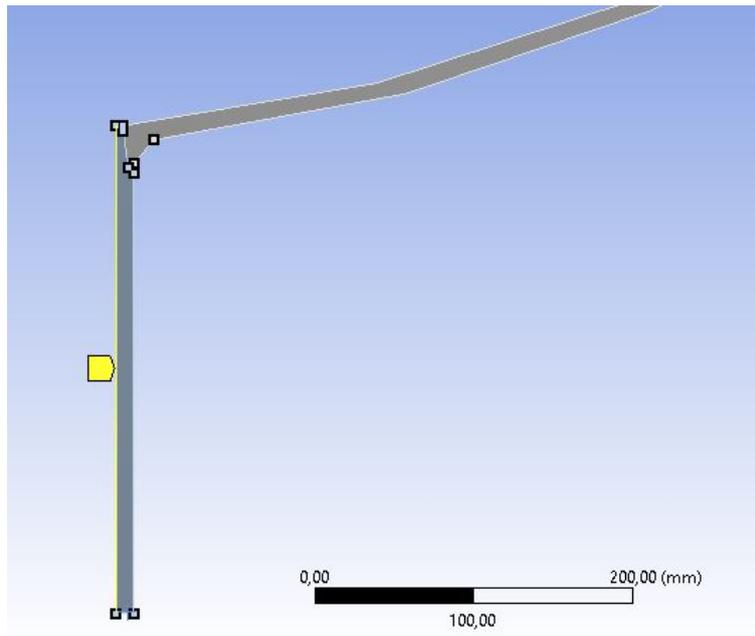


Abb. 5.34: Konvektion im Stutzenrohr

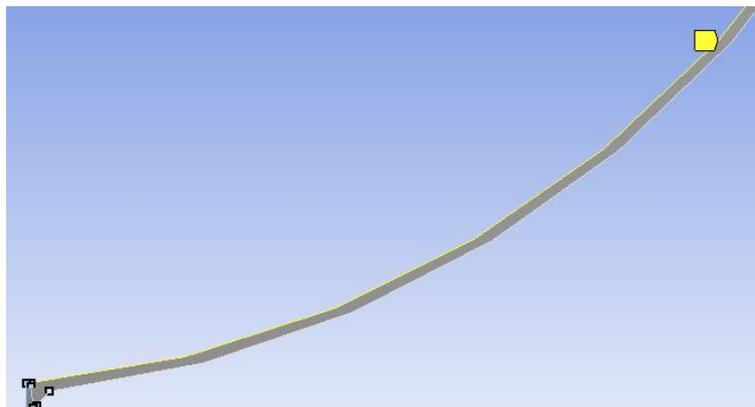
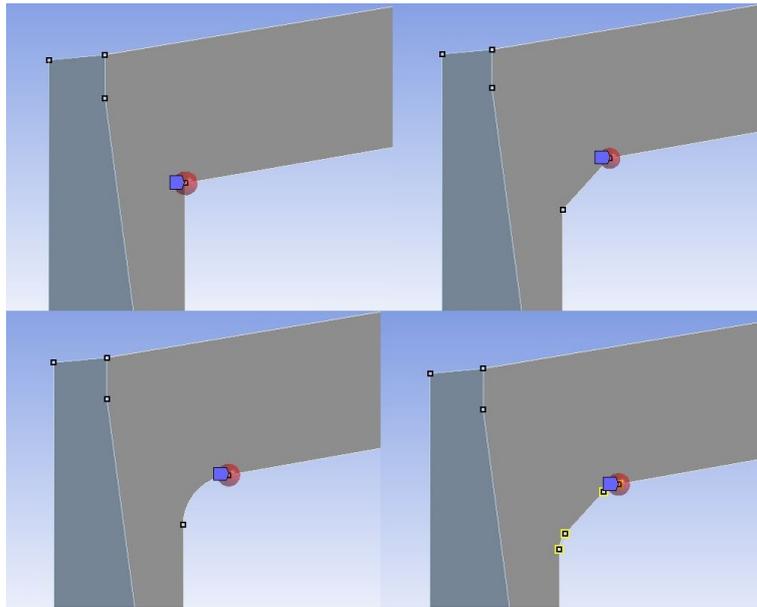


Abb. 5.35: Konvektion in der Kugelschale

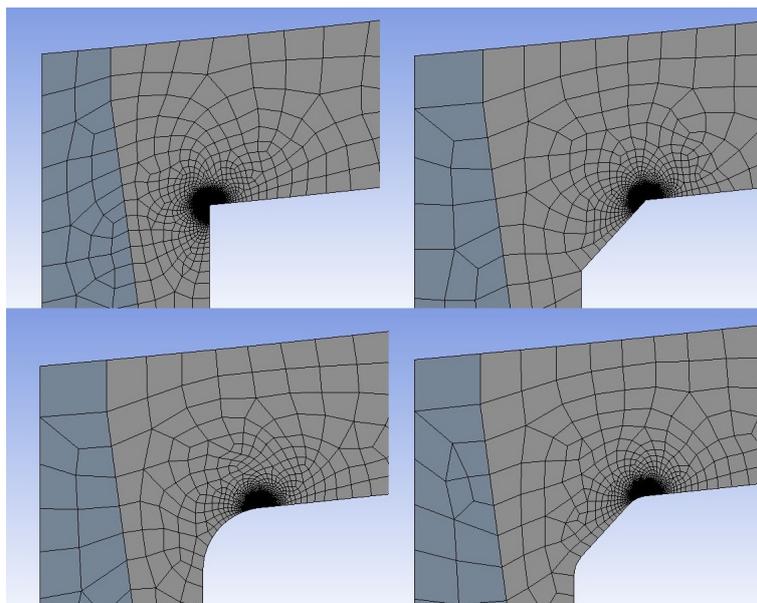
### 5.2.3 Vernetzung

In Abb. 5.36 wird die Vorgehensweise der Netzverfeinerung der Modelle dargestellt. An den in blau hervorgehobenen Stellen am Übergang an die Außenkontur der Kugelschale bzw. in der Ecke des Modells wird das Finite Elemente-Netz schrittweise verfeinert.

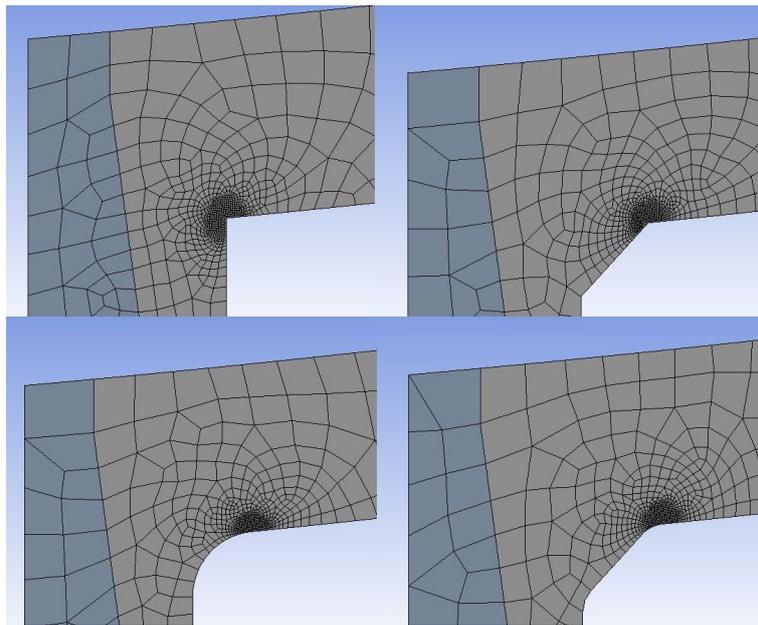


**Abb. 5.36:** Vernetzung an den Modellen

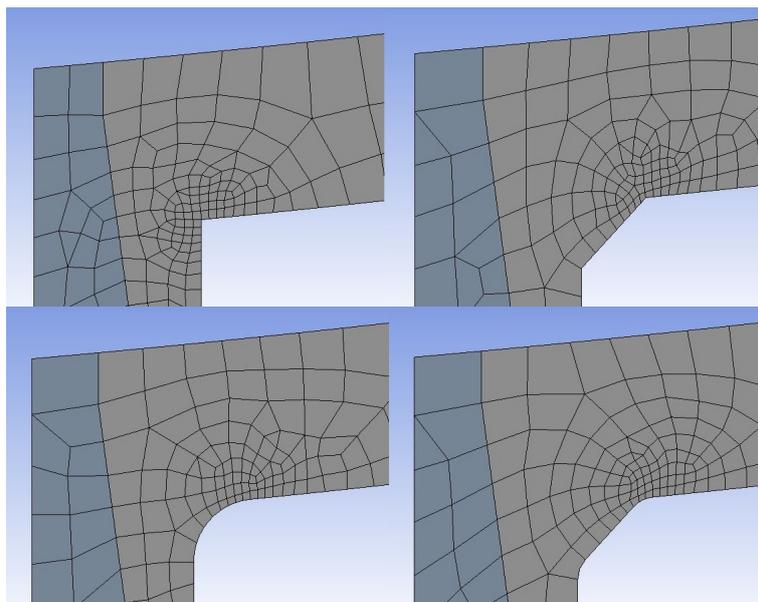
Die Vernetzung wurde an allen Modellen mit einer Netzfeinheit von 0,02 mm (Abb. 5.37), 0,1 mm (Abb. 5.38), 0,5 mm (Abb. 5.39), 0,75 mm (Abb. 5.40), 1 mm (Abb. 5.41), 2 mm (Abb. 5.42) sowie 5 mm (Abb. 5.43) durchgeführt. In den Abbildungen 5.37- 5.43 befinden sich jeweils links oben das Modell ohne Schweißnaht, rechts oben das Modell mit Schweißnaht, links unten das CAB Modell, sowie rechts unten das 2mm Radius Modell mit der jeweiligen Netzauflösung.



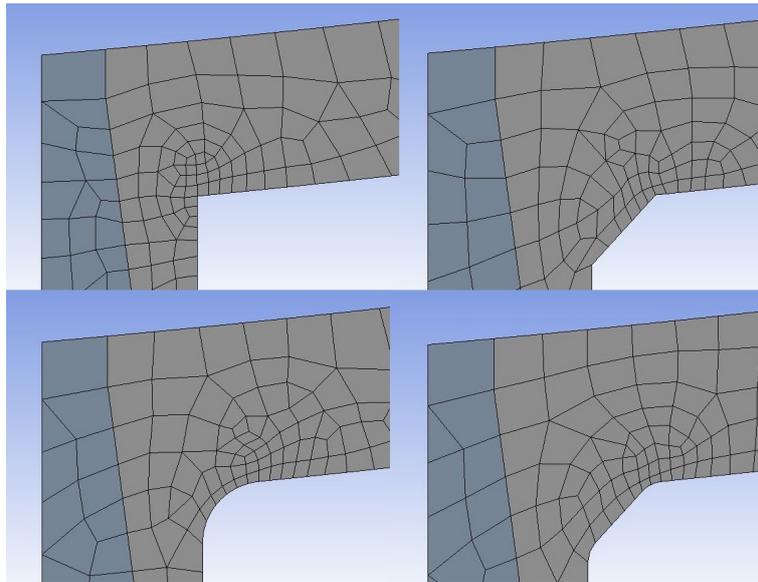
**Abb. 5.37:** Modelle mit Netzfeinheit 0,02 mm



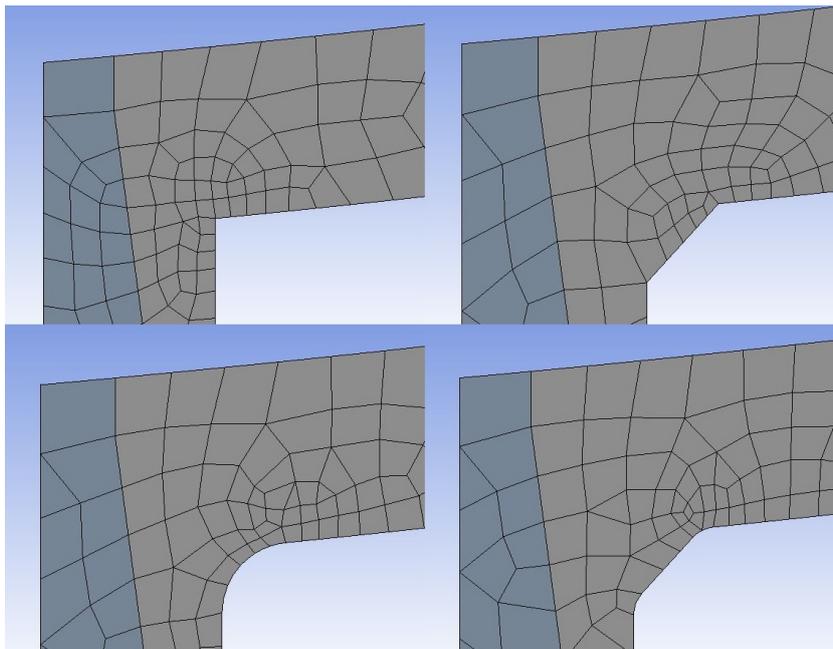
**Abb. 5.38:** Modelle mit Netzfeinheit 0,1 mm



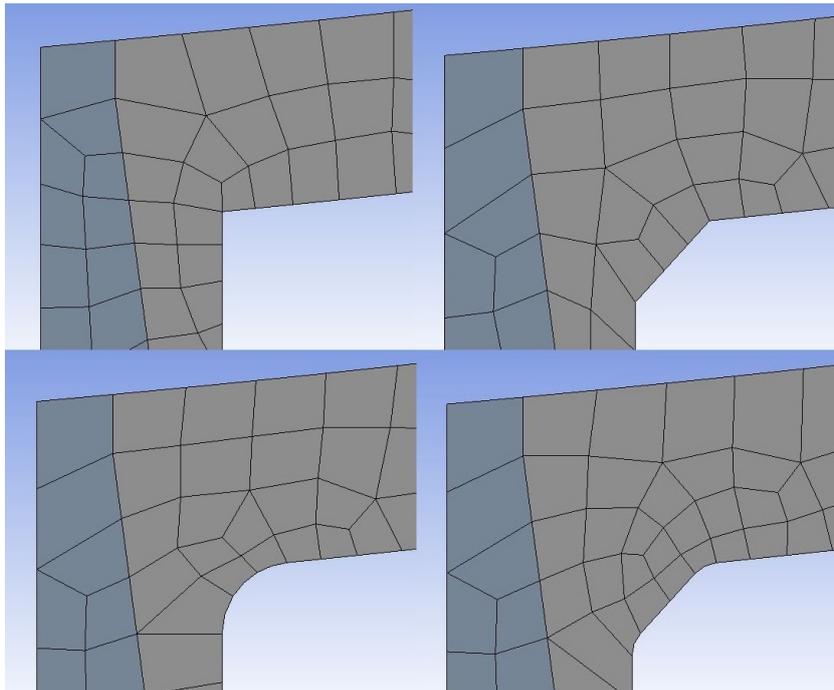
**Abb. 5.39:** Modelle mit Netzfeinheit 0,5 mm



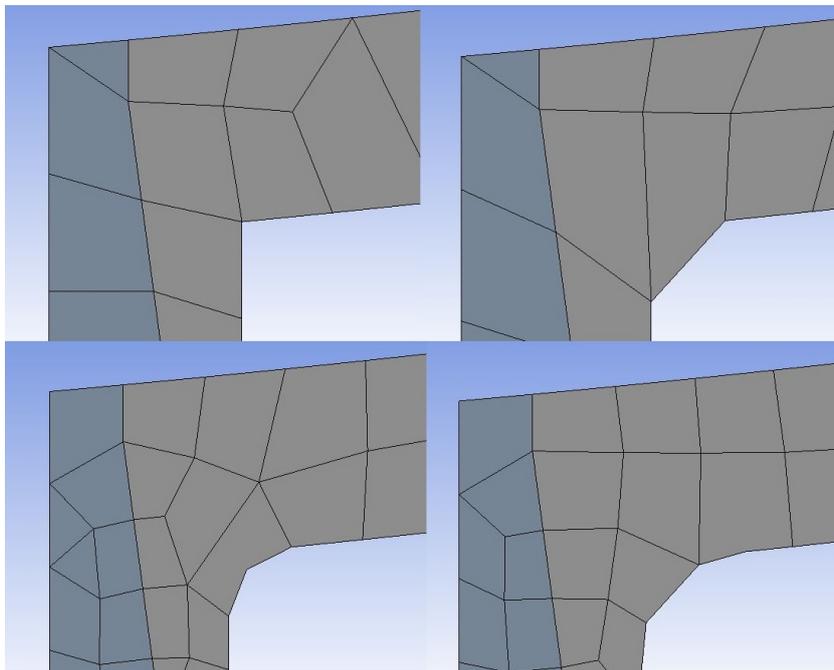
**Abb. 5.40:** Modelle mit Netzfeinheit 0,75 mm



**Abb. 5.41:** Modelle mit Netzfeinheit 1 mm



**Abb. 5.42:** Modelle mit Netzfeinheit 2 mm



**Abb. 5.43:** Modelle mit Netzfeinheit 5 mm

### 5.2.4 Ergebnisse Thermische Analyse

Für den Betriebszustand 1 herrscht eine konstante Temperatur von 285°C im gesamten Modell entsprechend Abb. 5.44. Im Betriebszustand 2 ergibt sich durch die Einspritzung von kühlem Medium mit 60°C über den Stutzen eine Temperaturverteilung entsprechend Abb. 5.45.

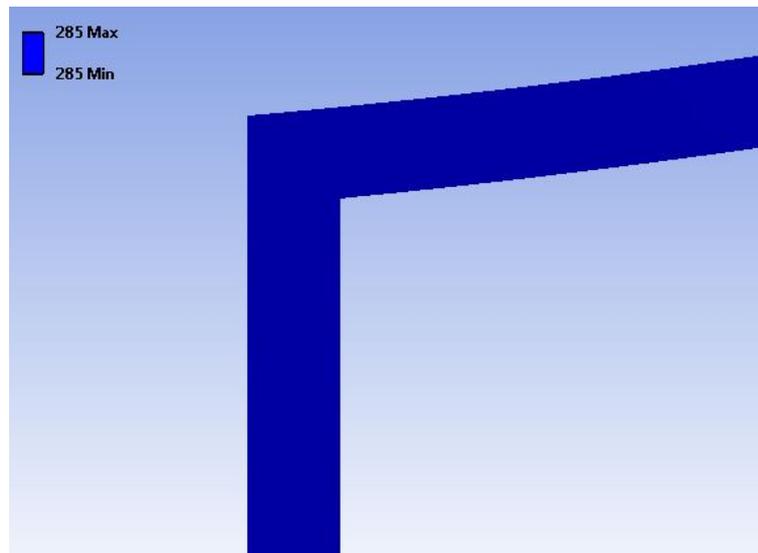


Abb. 5.44: Temperaturverteilung Zustand 1

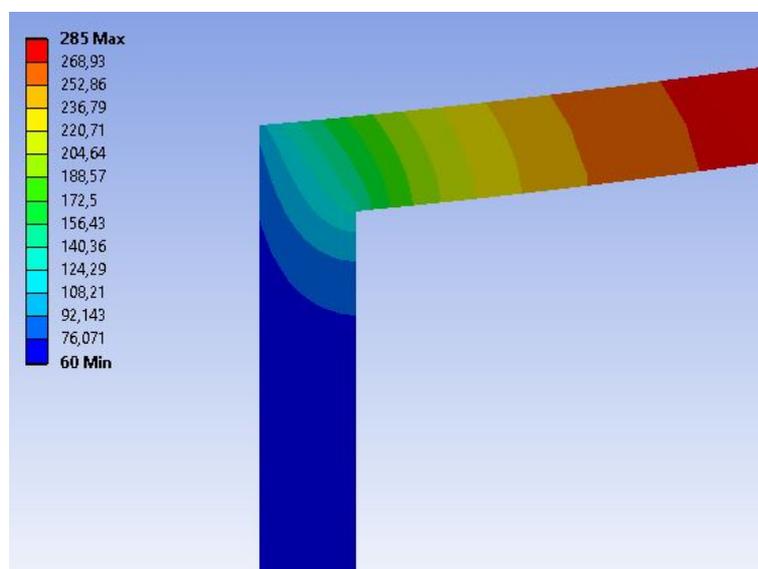


Abb. 5.45: Temperaturverteilung Zustand 2

### 5.2.5 Auswertung der Spannungen zur Ermüdungsanalyse der Schweißnähte

Zur Auswertung der Spannungen entlang der Oberfläche der Kugelschale wird ein Zylinderkoordinatensystem mit Ursprung im Mittelpunkt der Kugelschale gelegt, wie in Abb. 5.46 ersichtlich. In den Modellen werden Pfade in 2 Richtungen gelegt. Der erste Pfad entsprechend den Abbildungen 5.47 - 5.50 vom Schweißnahtübergang bzw. an der Ecke beginnend an der Außenkontur der Kugelschale entlang. Diese Pfade dienen der Ermittlung der Meridianspannungen (y Richtung) sowie der Umfangsspannungen (z Richtung) entlang der Oberfläche für die Anwendung des Extrapolationsverfahrens aus Kapitel 3.2.1, der Haibach Methode aus Kapitel 3.2.2, der Spannungswert  $0,15t$  entfernt, sowie  $1/3z$  der Ecke entfernt.

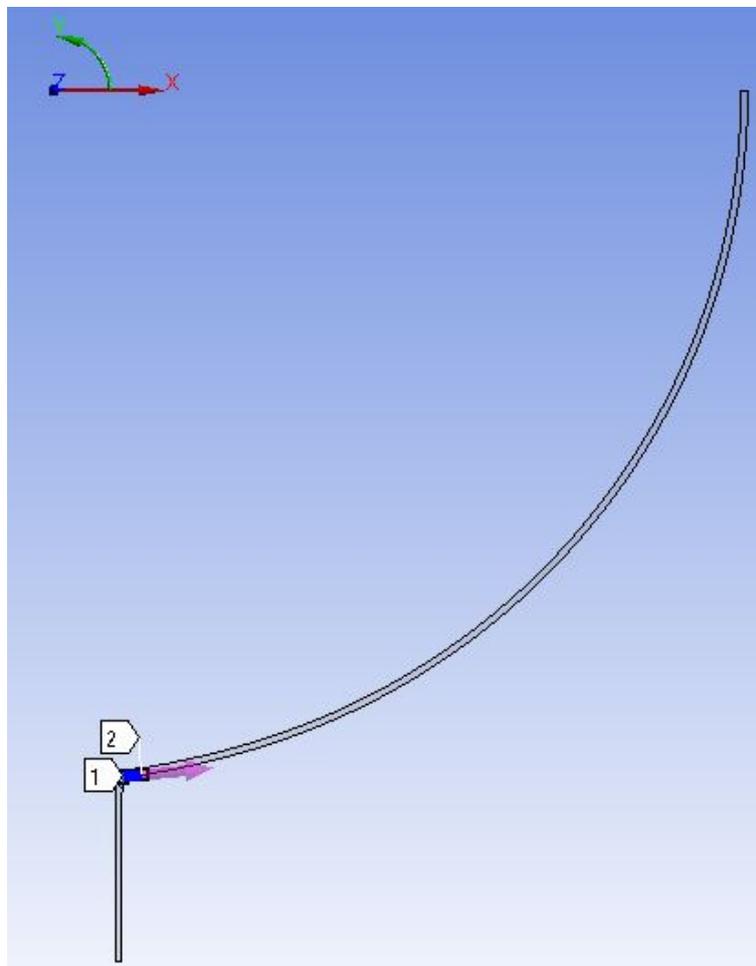


Abb. 5.46: Koordinatensystem zur Auswertung der Spannungen

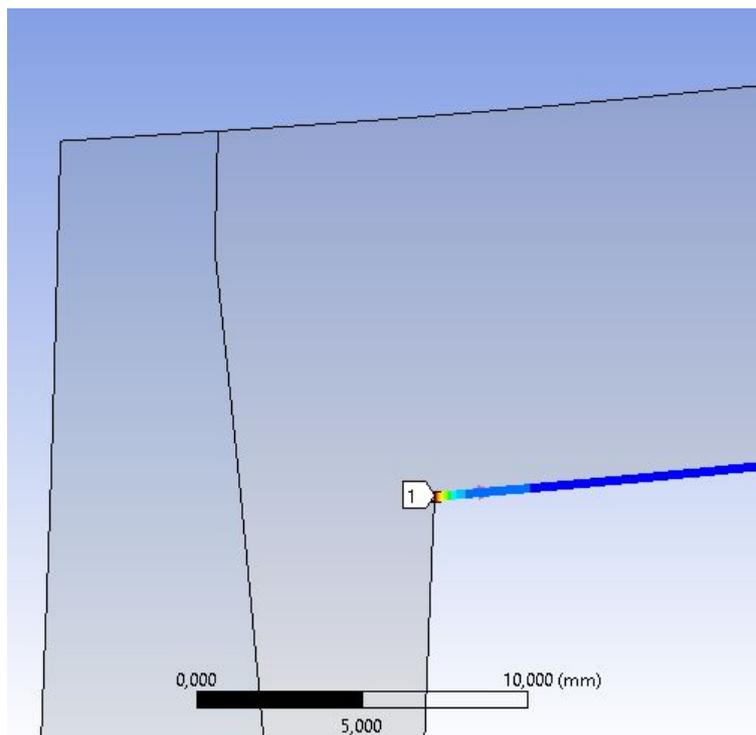


Abb. 5.47: Auswertungspfad Extrapolation Modell keine Schweißnaht

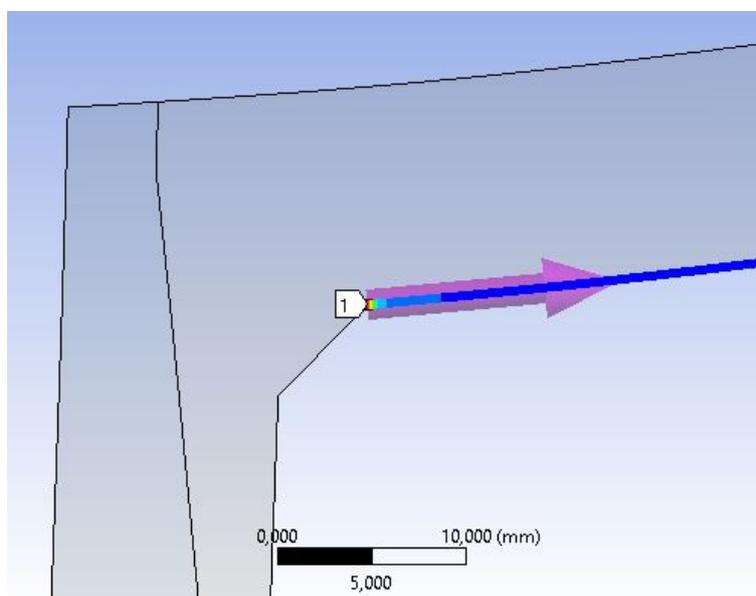
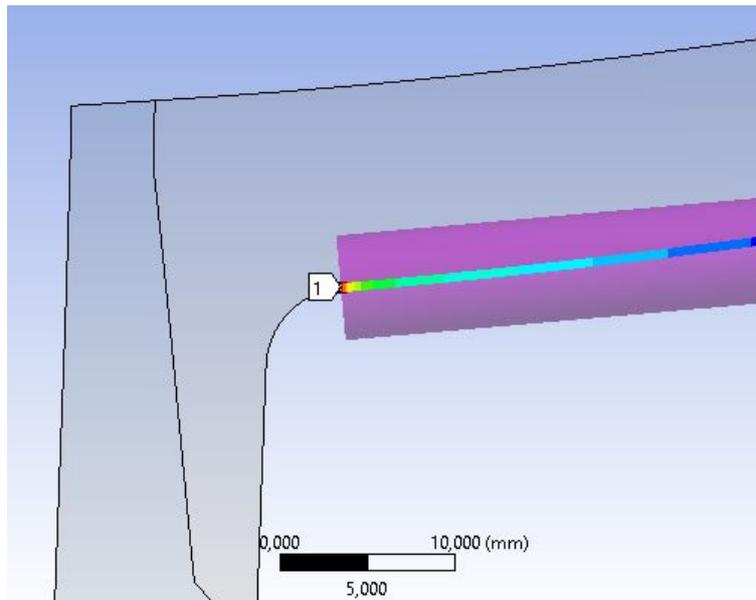
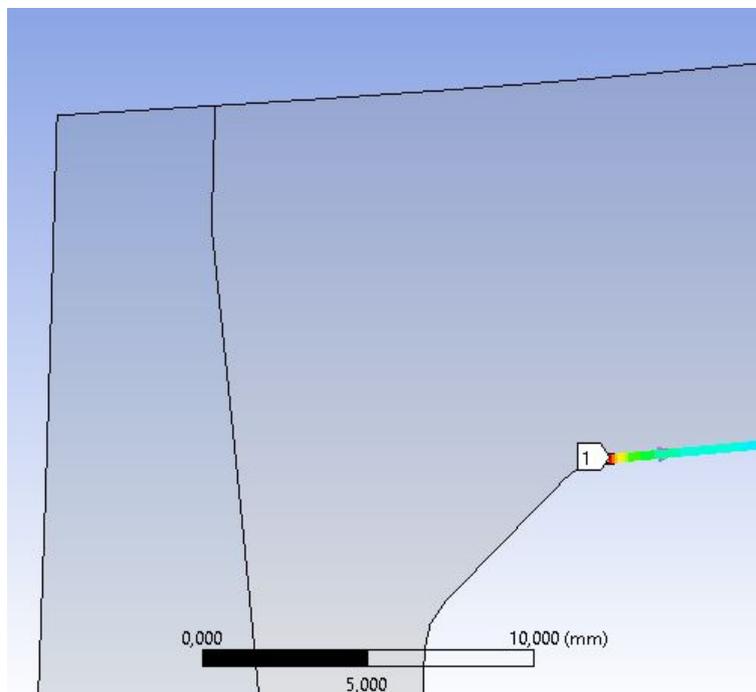


Abb. 5.48: Auswertungspfad Extrapolation Modell Schweißnaht



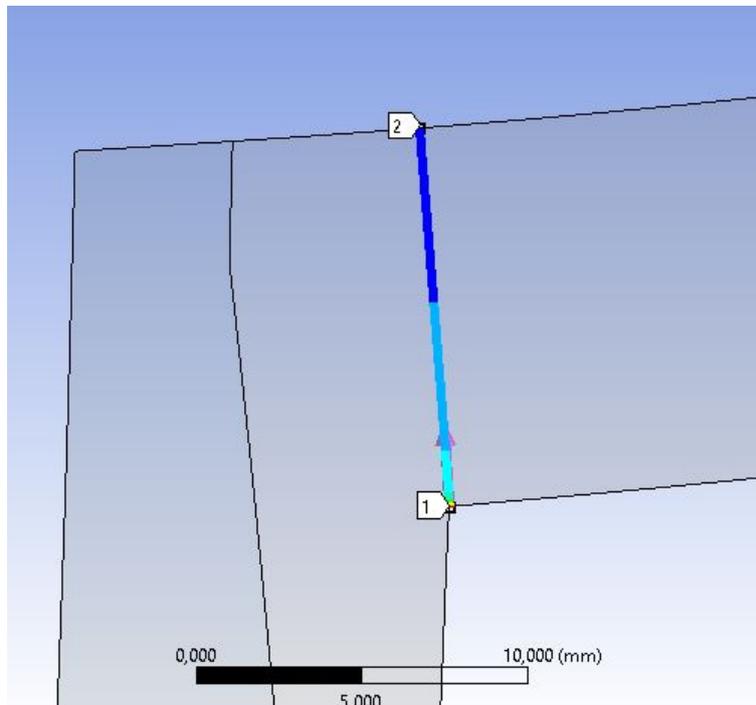
**Abb. 5.49:** Auswertungspfad Extrapolation CAB Modell

Punkt 1 in Abb. 5.50 befindet sich am Übergang des modellierten Radius zur Außenkontur der Kugelschale.



**Abb. 5.50:** Auswertungspfad Extrapolation des 2mm Radius Modells

In den Abbildungen 5.51- 5.54 erkennt man die Pfade zur Ermittlung der Strukturspannungen (in y- und z Richtung) mithilfe der Linearisierung durch die Wand. Diese Pfade beginnen am Schweißnahtübergang bzw. in der Ecke (Abb. 5.51) und laufen radial bis zur Innenkontur der Kugelschale.



**Abb. 5.51:** Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand Modell keine Schweißnaht

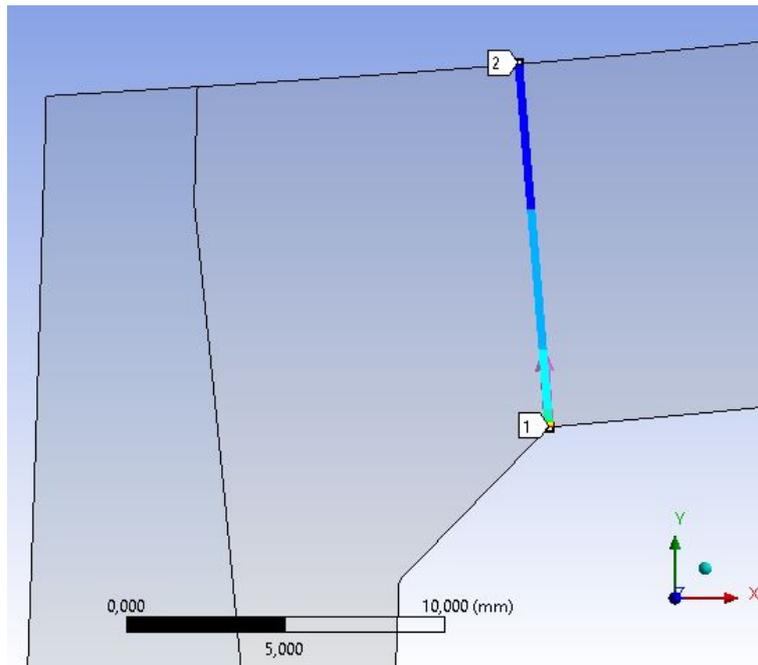


Abb. 5.52: Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand Modell Schweißnaht

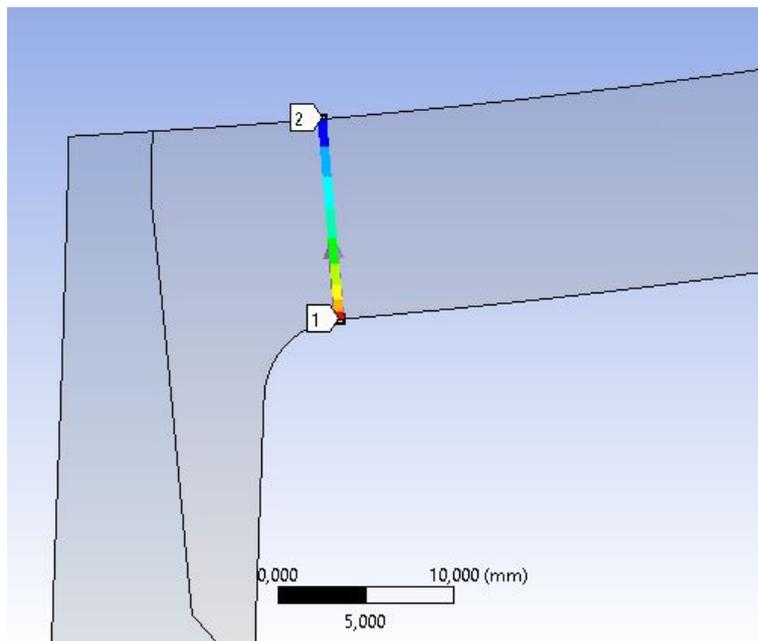
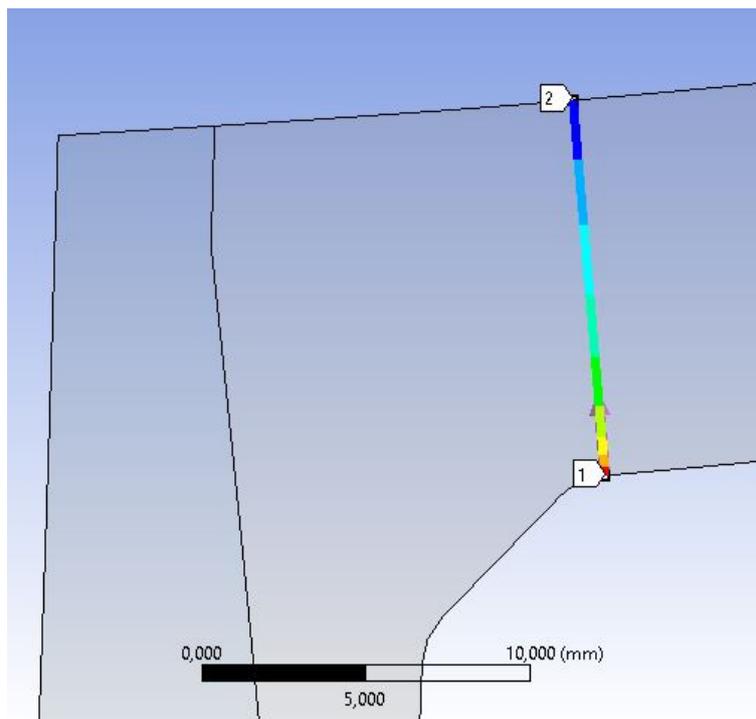


Abb. 5.53: Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand CAB-Modell



**Abb. 5.54:** Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand 2mm Radius Modells

# Kapitel 6

## Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Strukturspannungsberechnung präsentiert. Um die verschiedenen Methoden der Strukturspannungsermittlung vergleichen zu können, und den Modelleinfluss herauszufinden, wird ein ermittelter Strukturspannungswert als Referenzwert herangezogen. Da in [1] das Extrapolationsverfahren zur Berechnung der Strukturspannungen verwendet wird, dient die quadratische Extrapolation am Modell mit Schweißnaht bei der feinsten Netzauflösung als Strukturspannungsreferenz. Alle in den Kapiteln 6.1 - 6.5 erwähnten Abweichungen beziehen sich somit auf das quadratische Extrapolationsverfahren am Modell Schweißnaht bei der jeweils feinsten Netzauflösung.

In Kapitel 6.6 beziehen sich die Abweichungen jedoch auf das quadratische Extrapolationsverfahren am jeweiligen Modell (CAB oder 2mm Radius Modell) für die feinste Netzauflösung.

Das lineare Extrapolationsverfahren am Modell Schweißnaht wurde auch ausgewertet, ist jedoch in den Abbildungen der Kapitel 6.1 - 6.4 nicht enthalten. Zu Vergleichszwecken wurde nur der Wert des linearen Extrapolationsverfahrens am Modell Schweißnaht in die Tabellen integriert, nicht jedoch in die Abbildungen. Das lineare Extrapolationsverfahren konvergiert in allen der folgenden Anwendungsfälle. Die gesamten ausgewerteten Daten sind im Anhang ersichtlich.

## 6.1 Extrapolationsverfahren

Im folgenden Abschnitt wird der Einfluss der unterschiedlichen Modelle auf das Extrapolationsverfahren untersucht. Es wird die Abweichung des quadratischen Extrapolationsverfahrens am jeweiligen Modell (keine Schweißnaht, CAB, 2mm Radius) mit der quadratischen Extrapolation am Modell Schweißnaht verglichen.

Das quadratische Extrapolationsverfahren am 2mm Radius Modell weist in 4 von 8 Messungen absolut gesehen die geringsten Abweichungen auf, so oft wie keines der anderen Modelle. Die erzielten Abweichungen bewegen sich von -5,77% bis -0,46% und sind somit nicht konservativ. Die wesentliche Veränderung der Struktur durch die Modellierung des CAB Radius zeigt sich in einer Verminderung der Strukturspannungen. In 3 der 8 Messungen liefert die quadratische Extrapolation am CAB Modell die höchsten negativen Abweichungen, öfter als jedes andere der untersuchten Modelle.

Die Modelle keine Schweißnaht und keine Schweißnaht 1/3z ( $z =$  Schenkellänge der Schweißnaht) erweisen sich aufgrund der sehr hohen Schwankungsbreite der Ergebnisse als unzuverlässig.

### 6.1.1 Ergebnisse Extrapolationsverfahren $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen)

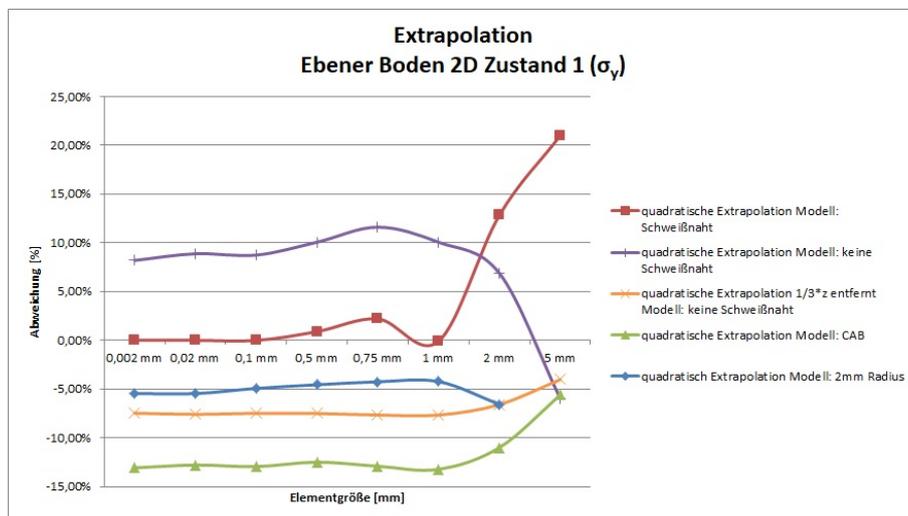


Abb. 6.1: Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren am ebenen Boden für Zustand 1 ( $\sigma_y$ )

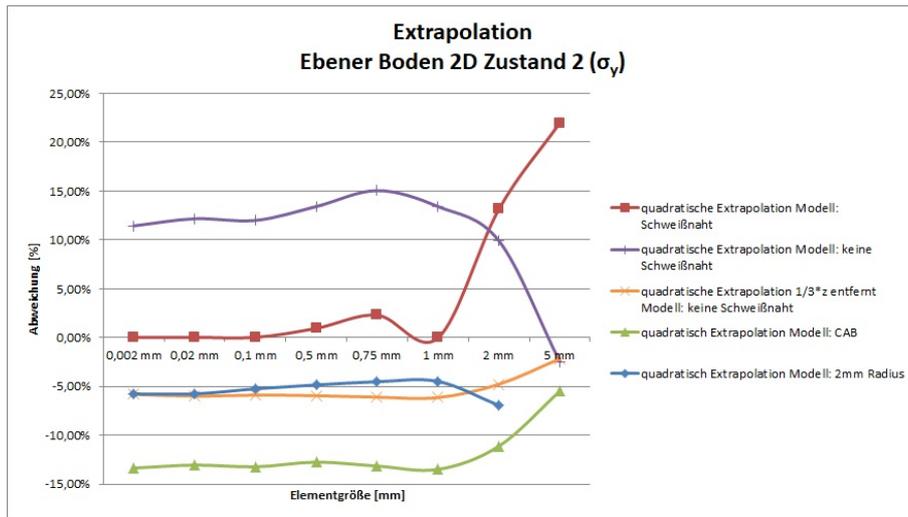


Abb. 6.2: Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren am ebenen Boden für Zustand 2 ( $\sigma_y$ )

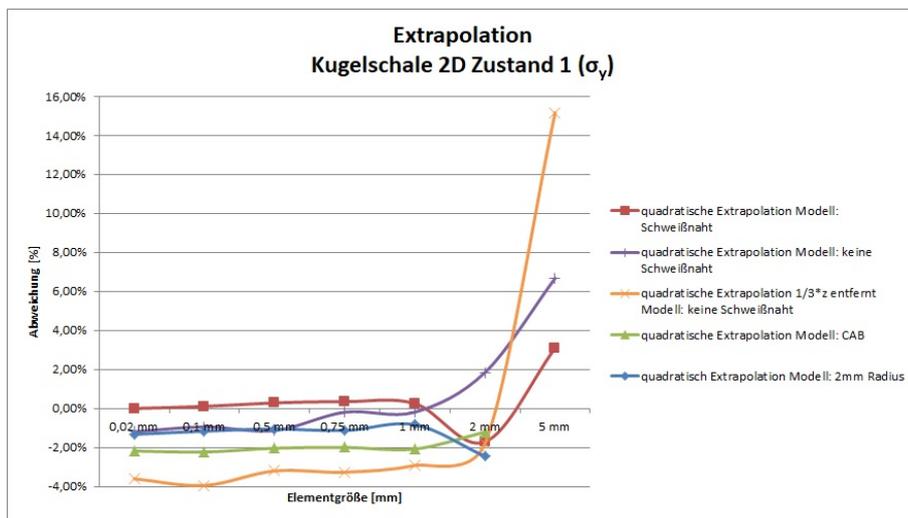


Abb. 6.3: Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren an der Kugelschale für Zustand 1 ( $\sigma_y$ )

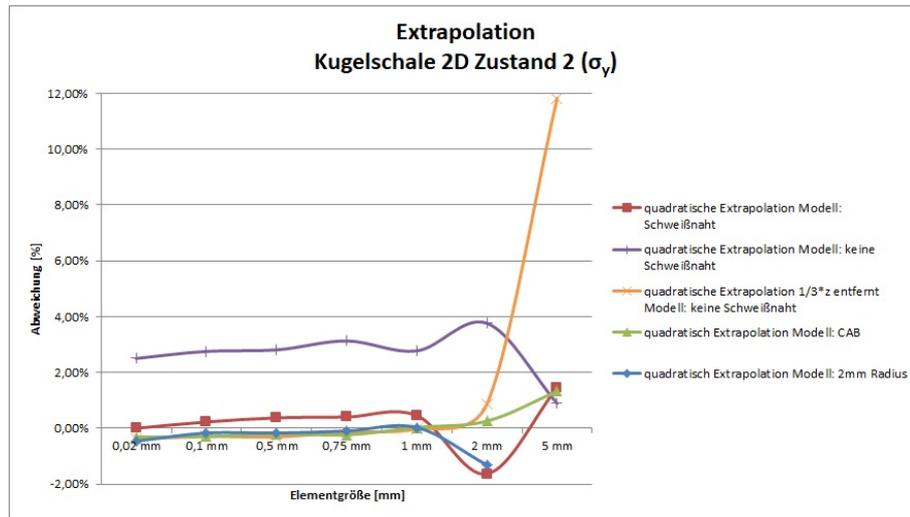


Abb. 6.4: Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren an der Kugelschale für Zustand 2 ( $\sigma_y$ )

Tab. 6.1: Quadratisches Extrapolationsverfahren bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-3,45%	-3,78%	-3,62%
Modell keine Schweißnaht	8,20%	11,44%	9,82%
Modell keine Schweißnaht 1/3z entfernt	-7,47%	-5,83%	-6,65%
Modell CAB	-13,08%	-13,36%	-13,22%
Modell 2mm Radius	-5,46%	-5,77%	-5,62%

Tab. 6.2: Quadratisches Extrapolationsverfahren bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-0,72%	-0,25%	-0,49%
Modell keine Schweißnaht	-1,20%	2,50%	0,65%
Modell keine Schweißnaht 1/3z entfernt	-3,61%	-0,39%	-2,00%
Modell CAB	-2,18%	-0,31%	-1,25%
Modell 2mm Radius	-1,33%	-0,46%	-0,9%

### 6.1.2 Ergebnisse Extrapolationsverfahren $\sigma_z$ (Umfangsspannungen)

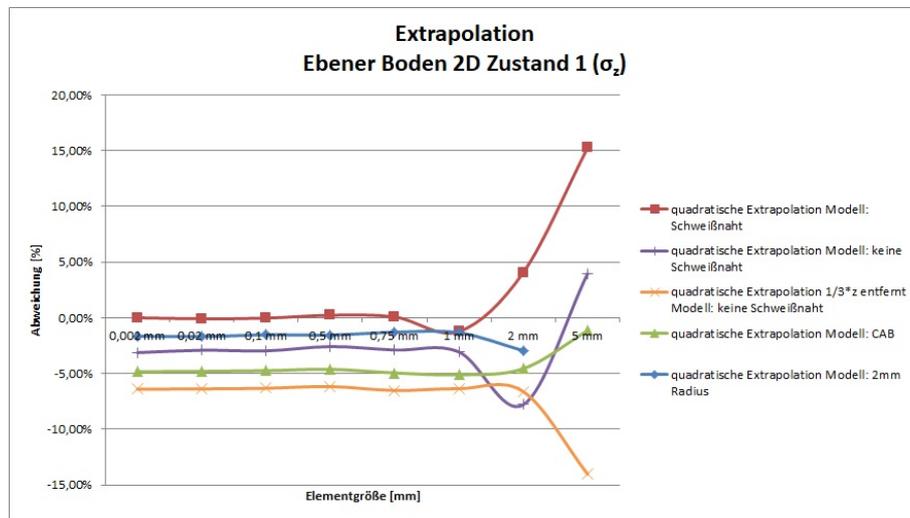


Abb. 6.5: Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren am ebenen Boden Zustand 1  $\sigma_z$

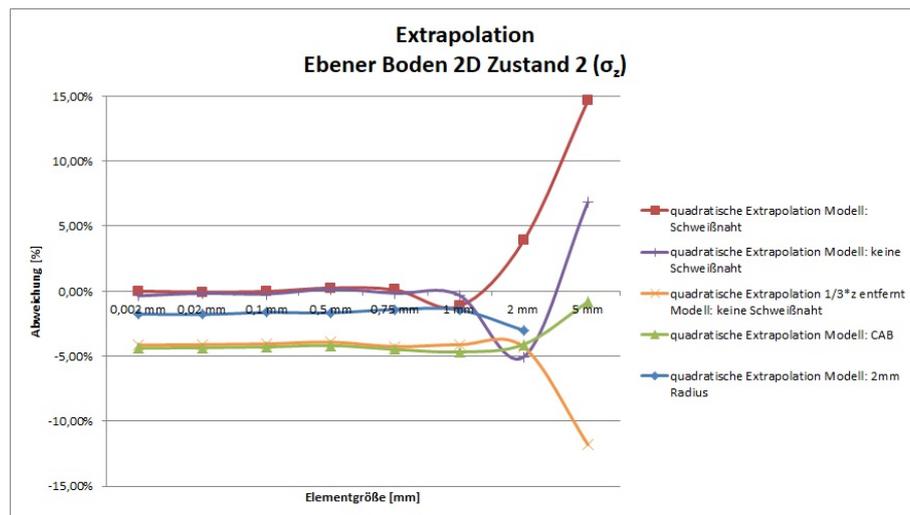


Abb. 6.6: Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren am ebenen Boden Zustand 2  $\sigma_z$

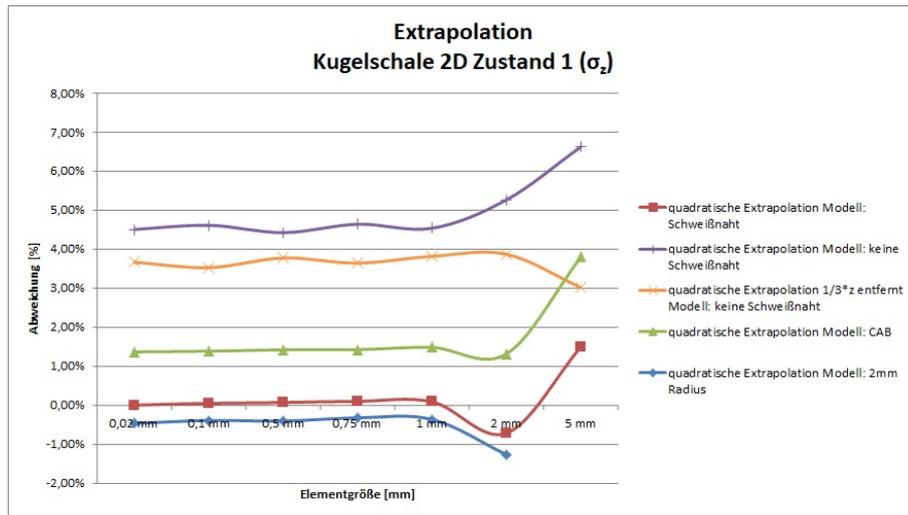


Abb. 6.7: Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren an der Kugelschale Zustand 1  $\sigma_z$

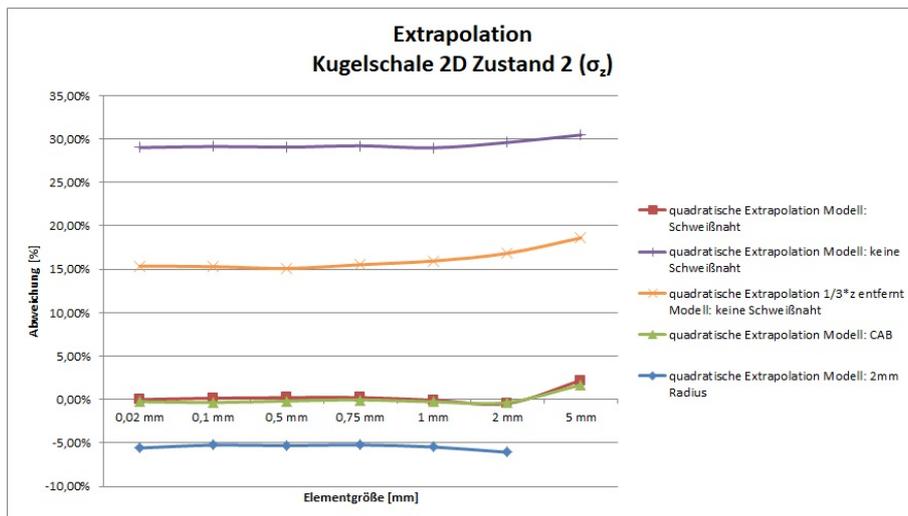


Abb. 6.8: Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren an der Kugelschale Zustand 2  $\sigma_z$

Tab. 6.3: Quadratisches Extrapolationsverfahren bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,17%	0,11%	0,14%
Modell keine Schweißnaht	-3,13%	-0,36%	-1,75%
Modell keine Schweißnaht 1/3z entfernt	-6,41%	-4,14%	-5,28%
Modell CAB	-4,84%	-4,38%	-4,61%
Modell 2mm Radius	-1,65%	-1,76%	-1,71%

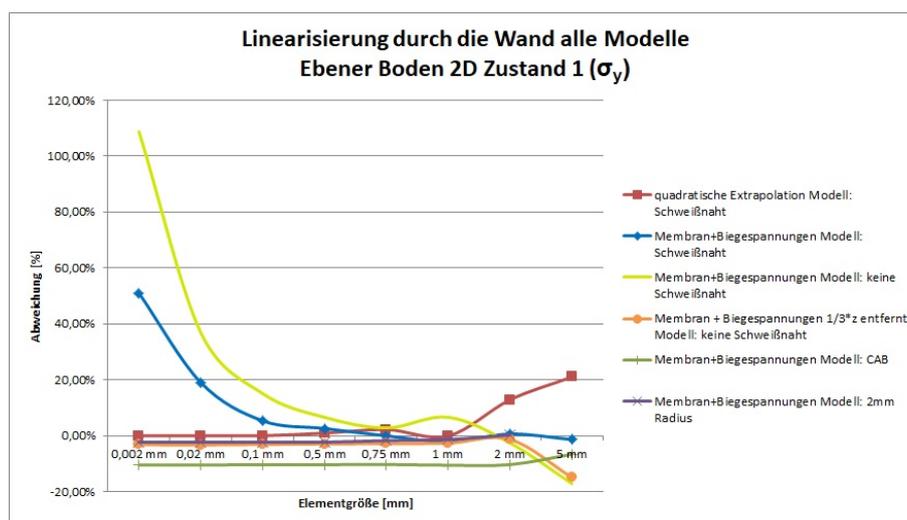
**Tab. 6.4:** Quadratisches Extrapolationsverfahren bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,08%	-6,92%	-3,42%
Modell keine Schweißnaht	4,51%	29,01%	16,76%
Modell keine Schweißnaht 1/3z entfernt	3,67%	15,37%	9,52%
Modell CAB	1,37%	-0,26%	0,56%
Modell 2mm Radius	-0,47%	-5,58%	-3,03%

## 6.2 Linearisierung durch die Wand

Anhand Abb. 6.9 sind die Probleme mit Spannungssingularitäten an dem Modell keine Schweißnaht sowie dem Modell Schweißnaht ersichtlich. Die in ANSYS® Academic Student, Release 19.0 angewandte Methode zur Berechnung der linearisierten Spannungen konvergiert bei Netzverfeinerung aufgrund der Singularitäten nicht. Die Methode aus [15] ausgehend von Knotenkräften könnte eventuell angewandt werden, diese ist hier nicht verfügbar. Deshalb werden diese Modelle für die Linearisierung durch die Wand nicht weiter betrachtet.

Eine detailliertere Darstellung der Ergebnisse dieser Art der Ermittlung von Strukturspannungen, in denen die Modelle mit Spannungssingularitäten aus der Grafik entfernt wurden, ist in den Abb. 6.10 - 6.17 ersichtlich.

**Abb. 6.9:** Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für alle Modelle Ebener Boden Zustand 1  $\sigma_y$

Das CAB Modell liefert bei Linearisierung durch die Wand in 6 der 8 untersuchten Messpunkte nicht konservative Strukturspannungswerte. Die maximale Abweichung ist mit -10,49% hoch.

Das Modell keine Schweißnaht bei Auswertung  $1/3z$  entfernt der Ecke zeigt in 5 der 8 Messpunkte nicht konservative Strukturspannungswerte. Die maximale Abweichung ist mit +25,52% enorm hoch.

Am 2mm Radius Modell zeigen sich in 5 von 8 Messpunkten konservative Strukturspannungswerte. An den verbleibenden 3 Messpunkten mit nicht konservativen Strukturspannungswerten beträgt die maximale Abweichung -2,3%.

Das 2mm Radius Modell erweist sich unter den hier untersuchten Modellen aufgrund der hauptsächlich konservativen Strukturspannungswerte sowie der geringen Abweichungen an den 3 verbleibenden Messpunkten als am geeignetsten.

### 6.2.1 Ergebnisse Linearisierung durch die Wand $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen)

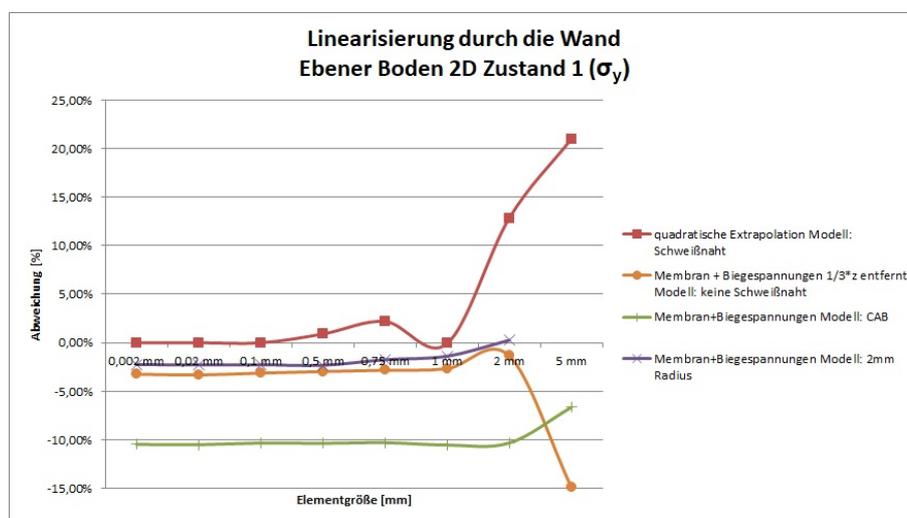


Abb. 6.10: Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für den ebenen Boden Zustand 1  $\sigma_y$

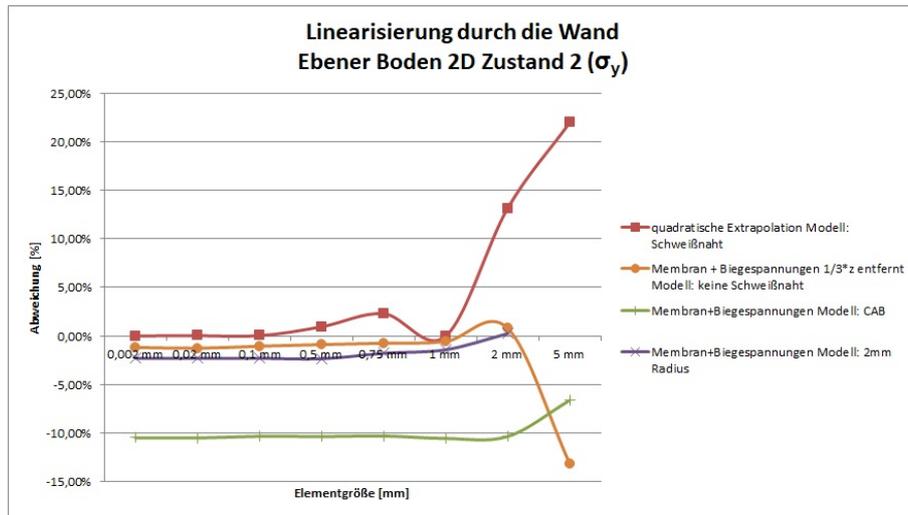


Abb. 6.11: Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für den ebenen Boden Zustand 2  $\sigma_y$

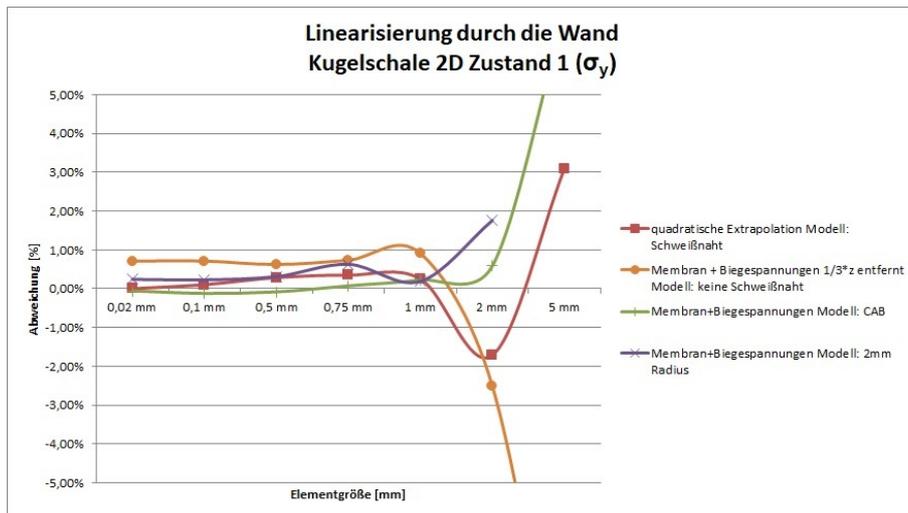
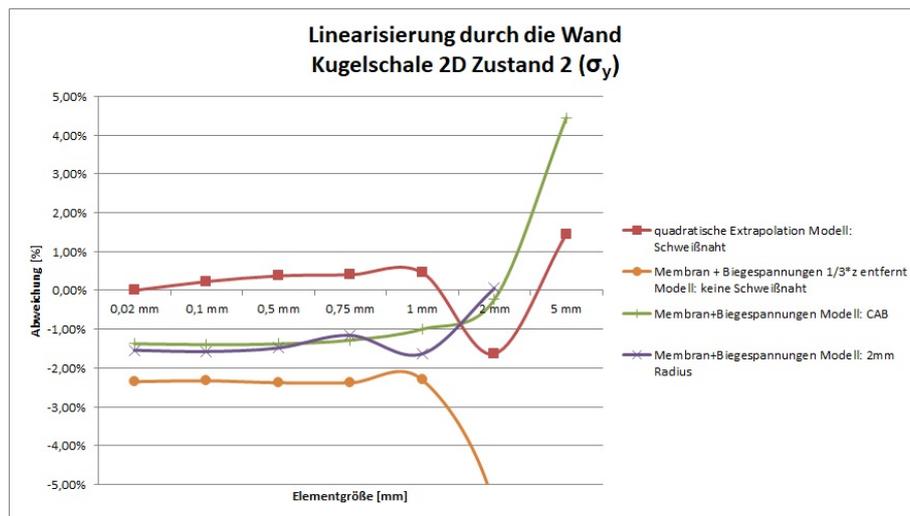


Abb. 6.12: Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für die Kugelschale Zustand 1  $\sigma_y$



**Abb. 6.13:** Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für die Kugelschale Zustand 2  $\sigma_y$

**Tab. 6.5:** Linearisierung durch die Wand bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-3,45%	-3,78%	-3,62%
Modell keine Schweißnaht 1/3z entfernt	-3,25%	-1,18%	-2,22%
Modell CAB	-10,48%	-10,49%	-10,49%
Modell 2mm Radius	-2,26%	-2,30%	-2,28%

**Tab. 6.6:** Linearisierung durch die Wand bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-0,72%	-0,25%	-0,49%
Modell keine Schweißnaht 1/3z entfernt	0,71%	-2,35%	-0,82%
Modell CAB	-0,06%	-1,37%	-0,72%
Modell 2mm Radius	0,24%	-1,54%	-0,65%

## 6.2.2 Ergebnisse Linearisierung durch die Wand $\sigma_z$ (Umfangsspannungen)

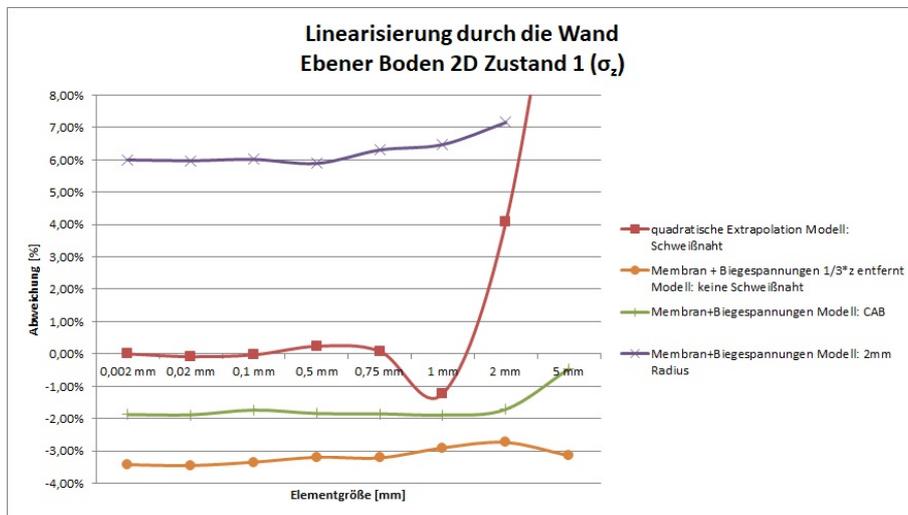


Abb. 6.14: Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für den ebenen Boden Zustand 1  $\sigma_z$

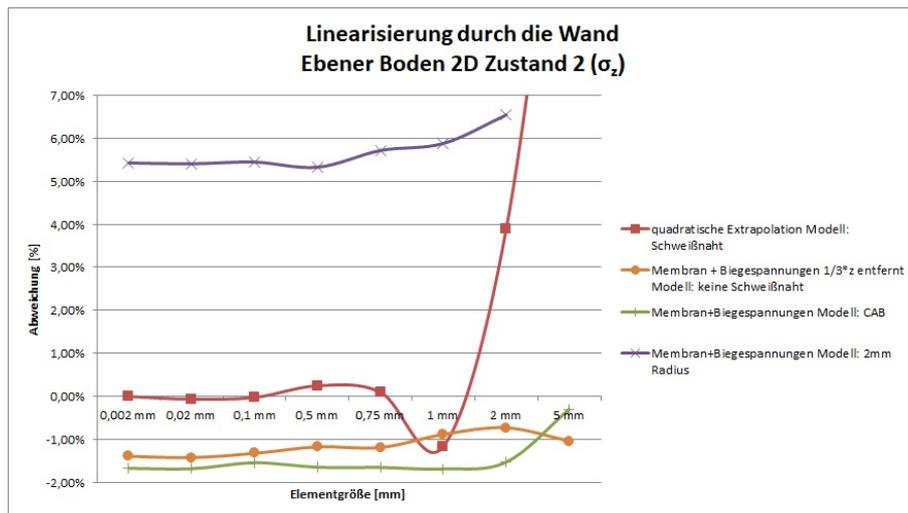


Abb. 6.15: Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für den ebenen Boden Zustand 2  $\sigma_z$

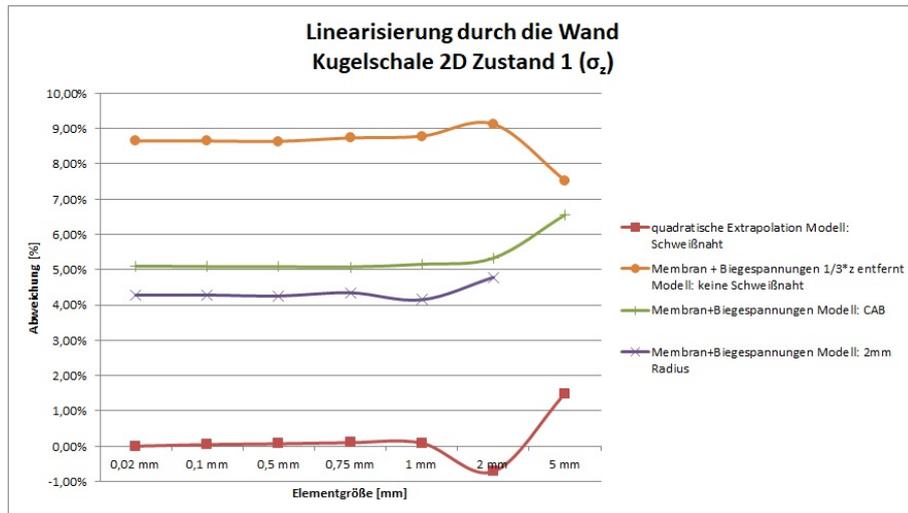


Abb. 6.16: Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für die Kugelschale Zustand 1  $\sigma_z$

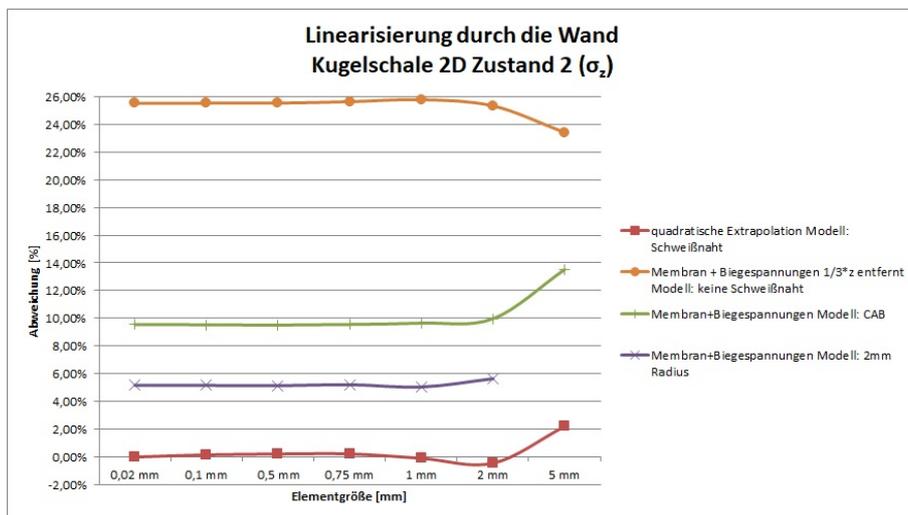


Abb. 6.17: Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für die Kugelschale Zustand 2  $\sigma_z$

Tab. 6.7: Linearisierung durch die Wand bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,17%	0,11%	0,14%
Modell keine Schweißnaht 1/3z entfernt	-3,43%	-1,39%	-2,41%
Modell CAB	-1,88%	-1,67%	-1,78%
Modell 2mm Radius	6,00%	5,43%	5,72%

**Tab. 6.8:** Linearisierung durch die Wand bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,08%	-6,92%	-3,42%
Modell keine Schweißnaht 1/3z entfernt	8,65%	25,52%	17,09%
Modell CAB	5,10%	9,56%	7,33%
Modell 2mm Radius	4,28%	5,17%	4,73%

### 6.3 Haibach Methode

Da die Haibach Methode darauf beruht, dass Spannungssingularitäten in einer Entfernung von 2 - 3mm nach der Schweißnaht abgeklungen sind, erscheinen Modelle als nicht sinnvoll, an denen keine Spannungssingularitäten auftreten. Daher wird lediglich das Modell Schweißnaht betrachtet, da bei diesem Modell im Vergleich mit dem Modell keine Schweißnaht die grundsätzliche Struktur erhalten bleibt. Die übrigen Modelle wurden dennoch ausgewertet und werden in den folgenden Abbildungen strichliert dargestellt (Abb. 6.18 - 6.33). Kritisch anzumerken an dieser Methode ist der Absolutwert der Entfernung ohne Relation zur Bauteilgröße. Daher wurde das Verfahren in der Form erweitert, dass der Abstand vom Schweißnahtübergang proportional der Bauteildicke  $t$  an dieser Stelle ist (0,15t entfernt). Diese Daten sind in den Abbildungen 6.26 - 6.33 ersichtlich. Die Haibach Methode am Modell Schweißnaht mit 2mm Entfernung liefert keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Für lediglich drei der 8 Messpunkte ergeben sich konservative Strukturspannungswerte und für 3 Messpunkte eine Abweichung von ca. -8%.

Die Methode der Spannungsauswertung 0,15t entfernt des Schweißnahtübergangs liefert hier bessere Ergebnisse und konservativere Werte. Die 0,15t Methode am Modell Schweißnaht liefert in 7 der 8 untersuchten Messpunkte konservative Strukturspannungen. Die maximale positive Abweichung beträgt +7,96% und die maximale negative Abweichung -5,87%.

### 6.3.1 Ergebnisse Haibach Methode $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen)

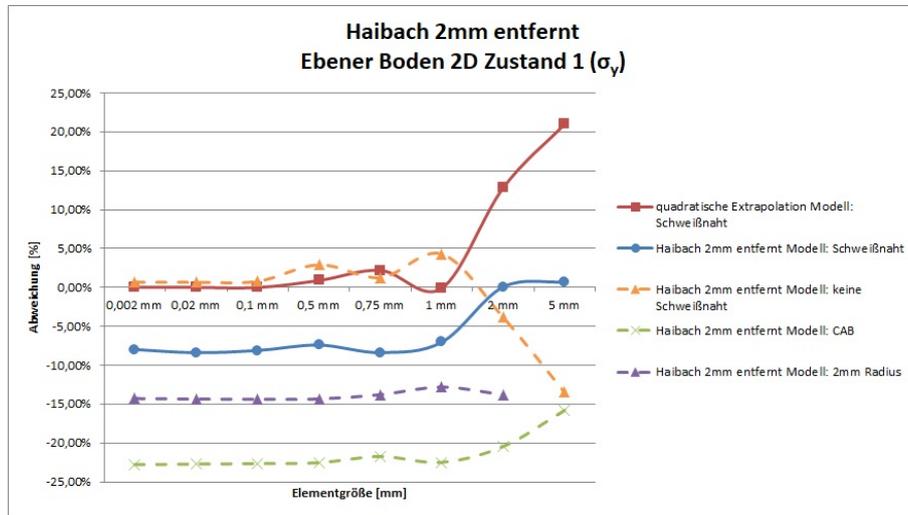


Abb. 6.18: Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für den ebenen Boden Zustand 1  $\sigma_y$

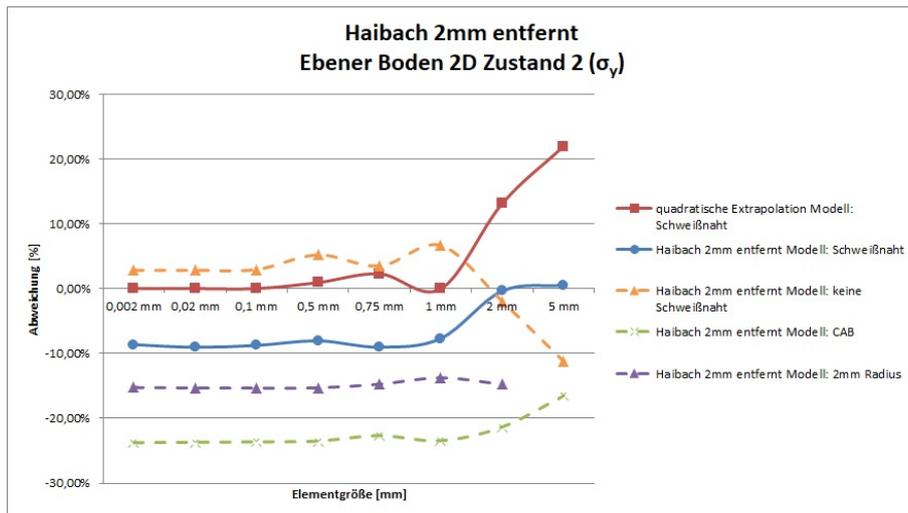


Abb. 6.19: Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für den ebenen Boden Zustand 2  $\sigma_y$

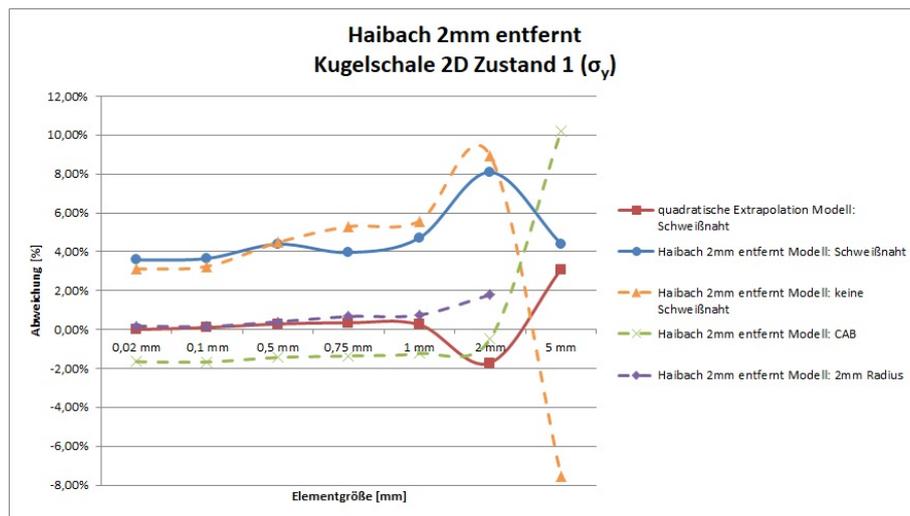


Abb. 6.20: Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für die Kugelschale Zustand 1  $\sigma_y$

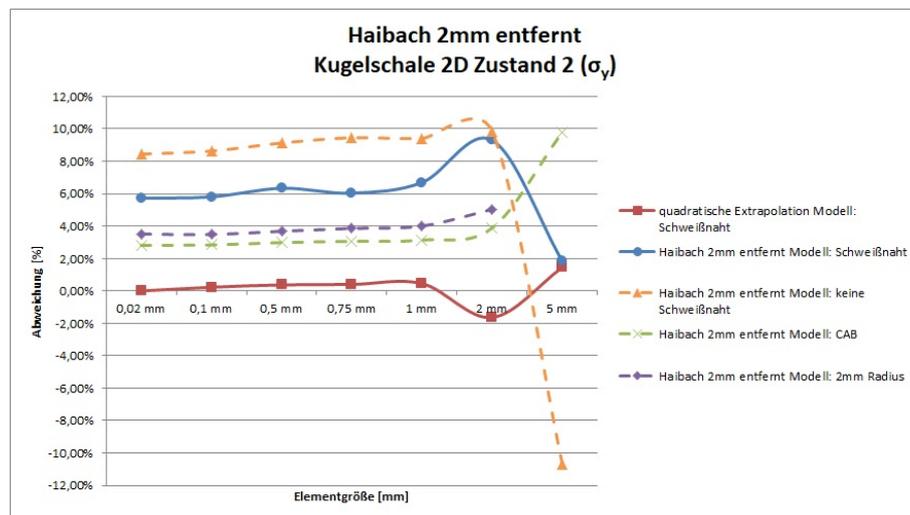


Abb. 6.21: Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für die Kugelschale Zustand 2  $\sigma_y$

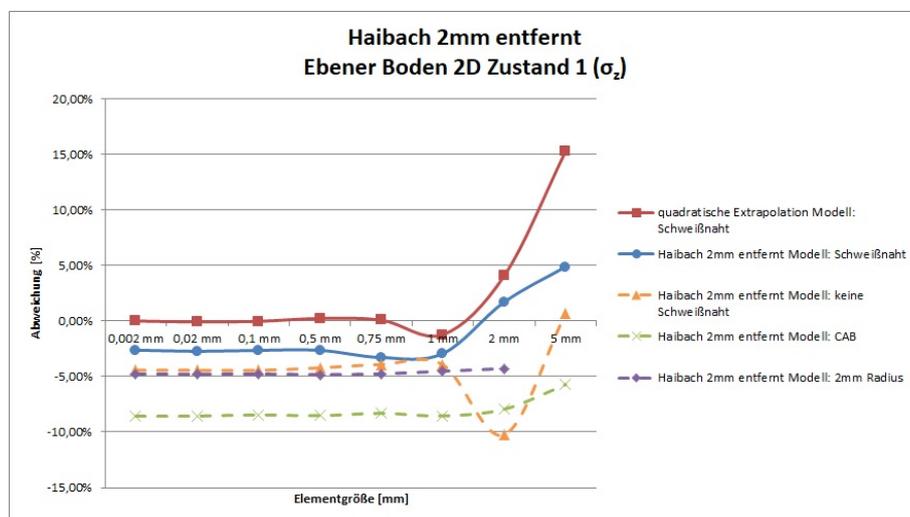
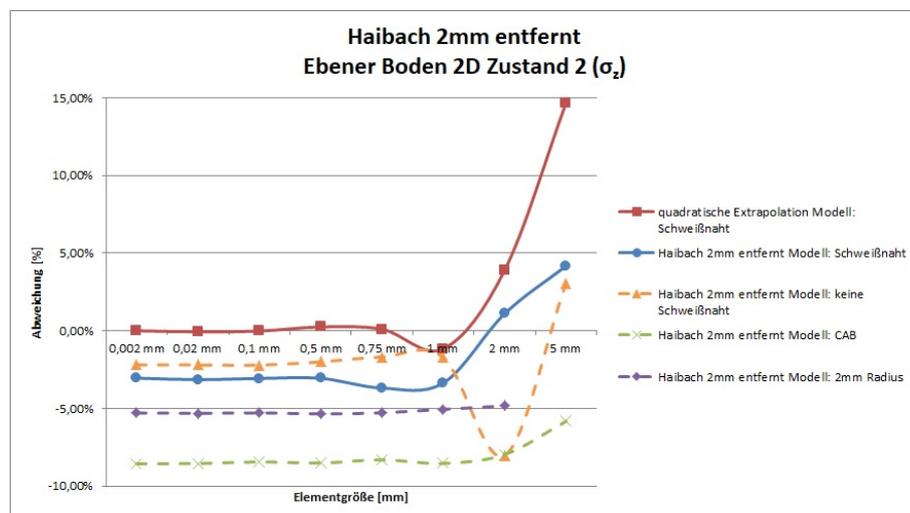
Tab. 6.9: Haibach Methode 2mm entfernt bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-3,45%	-3,78%	-3,62%
Modell Schweißnaht	-7,97%	-8,61%	-8,29%
Modell keine Schweißnaht	0,68%	2,86%	1,77%
Modell CAB	-22,77%	-23,75%	-23,26%
Modell 2mm Radius	-14,28%	-15,24%	-14,76%

**Tab. 6.10:** Haibach Methode 2mm entfernt bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-0,72%	-0,25%	-0,49%
Modell Schweißnaht	3,58%	5,73%	4,66%
Modell keine Schweißnaht	3,11%	8,45%	5,78%
Modell CAB	-1,65%	-1,37%	-1,51%
Modell 2mm Radius	0,18%	-1,54%	-0,68%

### 6.3.2 Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt $\sigma_z$ (Umfangsspannungen)

**Abb. 6.22:** Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für den ebenen Boden Zustand 1  $\sigma_z$ **Abb. 6.23:** Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für den ebenen Boden Zustand 2  $\sigma_z$

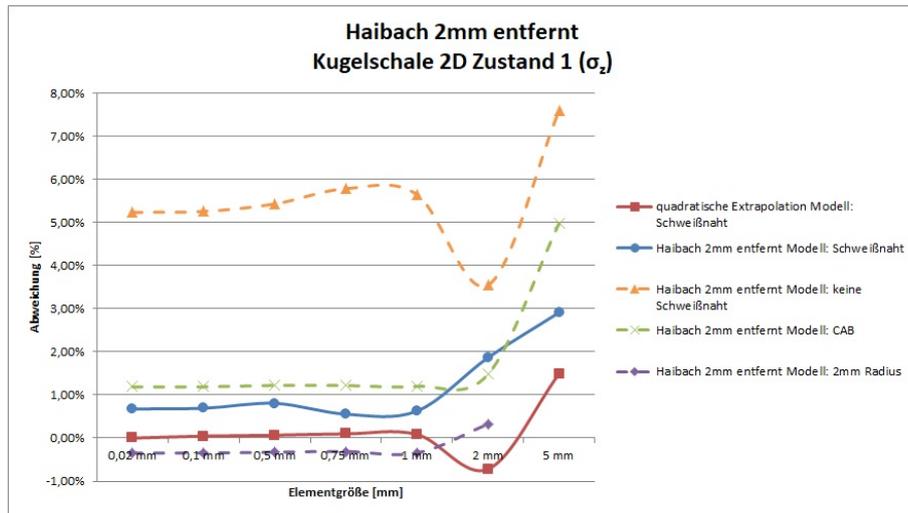


Abb. 6.24: Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für die Kugelschale Zustand 1  $\sigma_z$

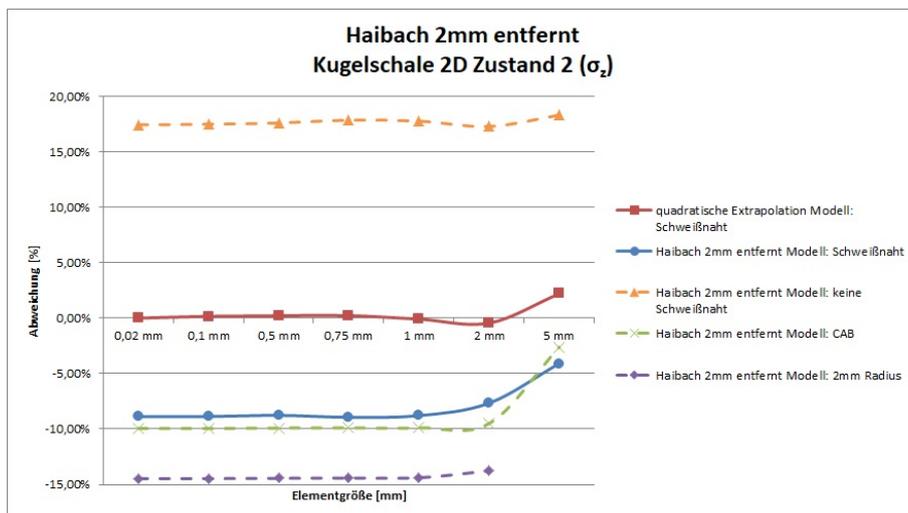


Abb. 6.25: Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für die Kugelschale Zustand 2  $\sigma_z$

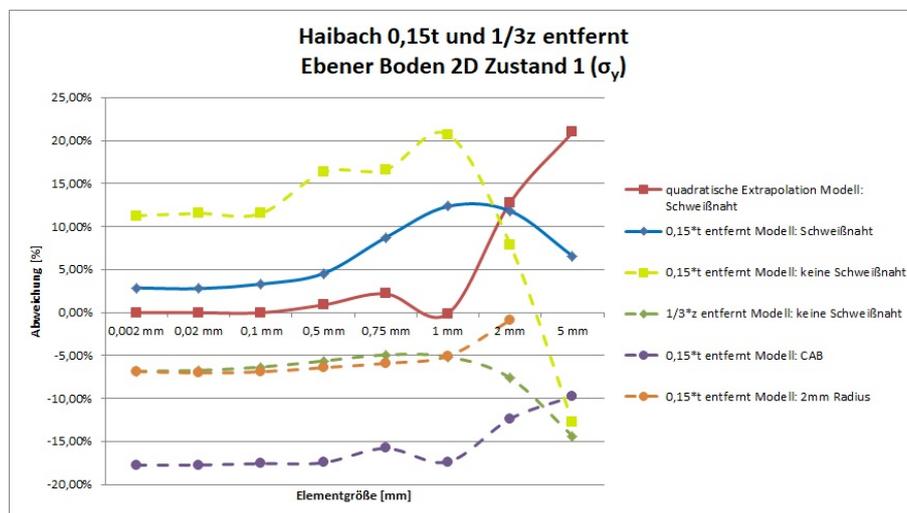
Tab. 6.11: Haibach Methode 2mm entfernt bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,17%	0,11%	0,14%
Modell Schweißnaht	-2,62%	-3,05%	-2,84%
Modell keine Schweißnaht	-4,43%	-2,19%	-3,31%
Modell CAB	-8,56%	-8,56%	-8,56%
Modell 2mm Radius	-4,76%	-5,29%	-5,03%

**Tab. 6.12:** Haibach Methode 2mm entfernt bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,08%	-6,92%	-3,42%
Modell Schweißnaht	0,68%	-8,89%	-4,11%
Modell keine Schweißnaht	5,23%	17,43%	11,33%
Modell CAB	1,19%	-9,95%	-4,38%
Modell 2mm Radius	-0,35%	-14,46%	-7,41%

### 6.3.3 Ergebnisse Haibach 0,15t, 1/3z entfernt $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen)

**Abb. 6.26:** Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für den ebenen Boden Zustand 1  $\sigma_y$

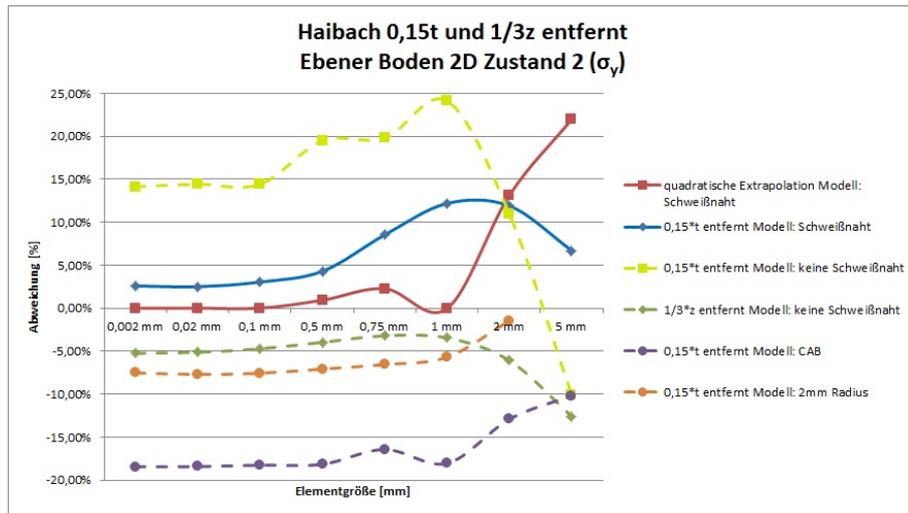


Abb. 6.27: Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für den ebenen Boden Zustand 2  $\sigma_y$

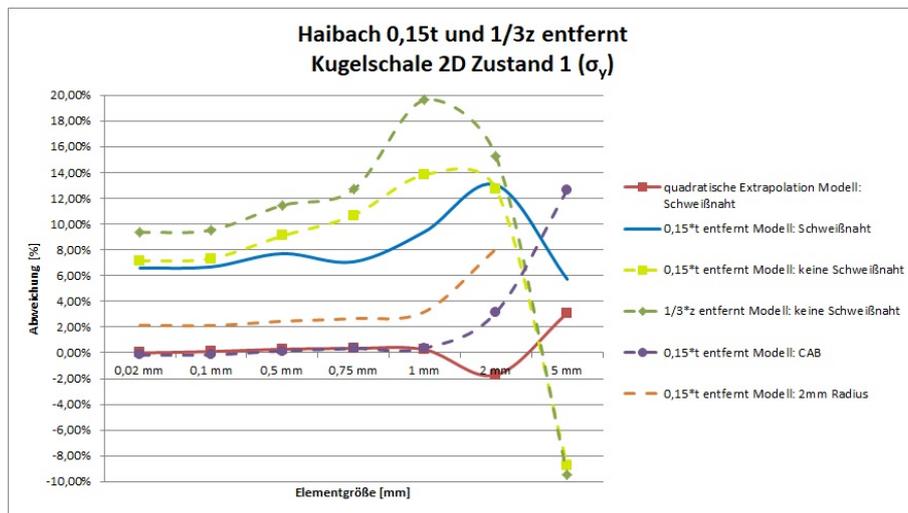
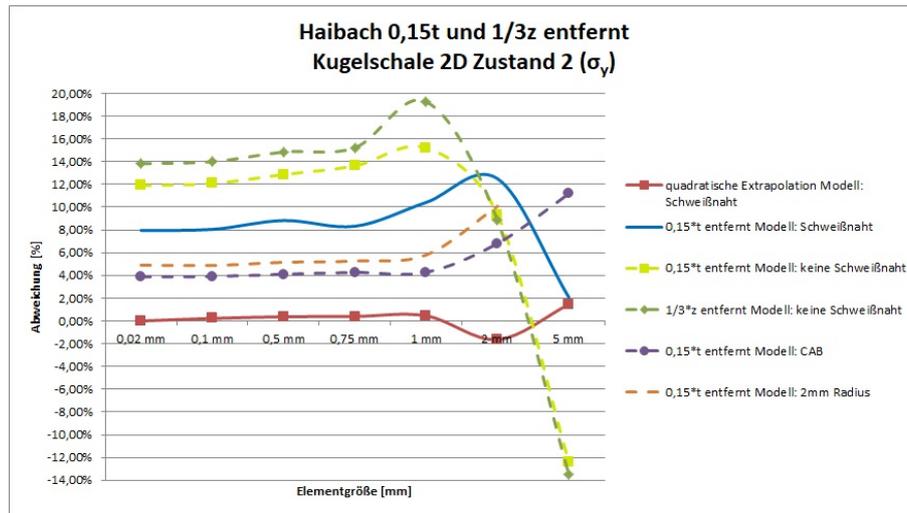


Abb. 6.28: Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für die Kugelschale Zustand 1  $\sigma_y$



**Abb. 6.29:** Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für die Kugelschale Zustand 2  $\sigma_y$

**Tab. 6.13:** Haibach 0,15t und 1/3z entfernt bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-3,45%	-3,78%	-3,62%
Modell Schweißnaht 0,15t entfernt	2,89%	2,61%	2,75%
Modell keine Schweißnaht 0,15t entfernt	11,27%	14,15%	12,71%
Modell keine Schweißnaht 1/3z entfernt	-6,82%	-5,22%	-6,02%
Modell CAB 0,15t entfernt	-17,73%	-18,43%	-18,08%
Modell 2mm Radius 0,15t entfernt	-6,83%	-7,51%	-7,17%

**Tab. 6.14:** Haibach 0,15t und 1/3z entfernt bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-0,72%	-0,25%	-0,49%
Modell Schweißnaht 0,15t entfernt	6,59%	7,96%	7,28%
Modell keine Schweißnaht 0,15t entfernt	7,15%	11,90%	9,53%
Modell keine Schweißnaht 1/3z entfernt	9,37%	13,83%	11,60%
Modell CAB 0,15t entfernt	-0,15%	3,88%	1,87%
Modell 2mm Radius 0,15t entfernt	2,15%	4,91%	3,53%

### 6.3.4 Ergebnisse Haibach 0,15t, 1/3z entfernt $\sigma_z$ (Umfangsspannungen)

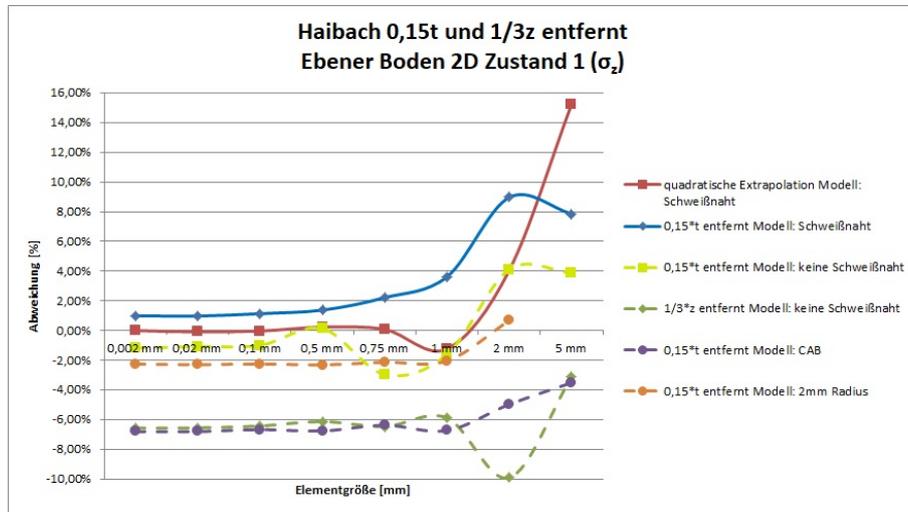


Abb. 6.30: Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für den ebenen Boden Zustand 1  $\sigma_z$

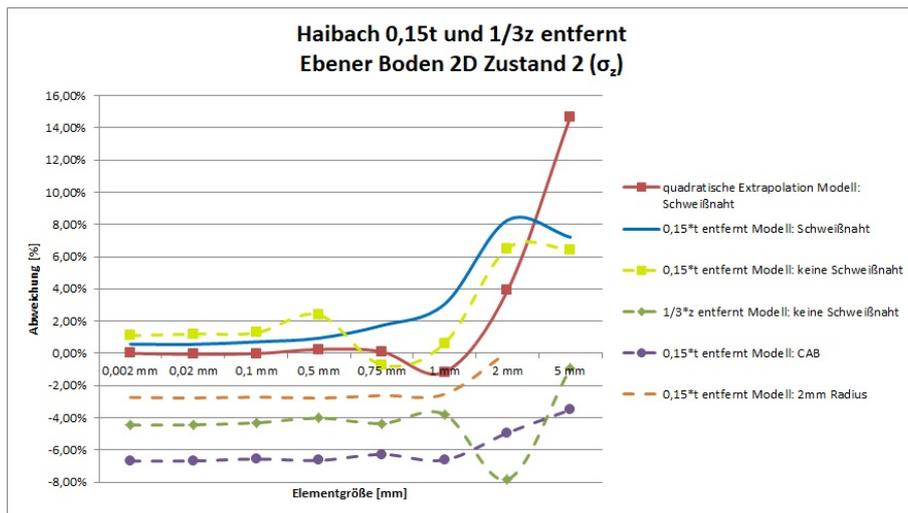


Abb. 6.31: Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für den ebenen Boden Zustand 2  $\sigma_z$

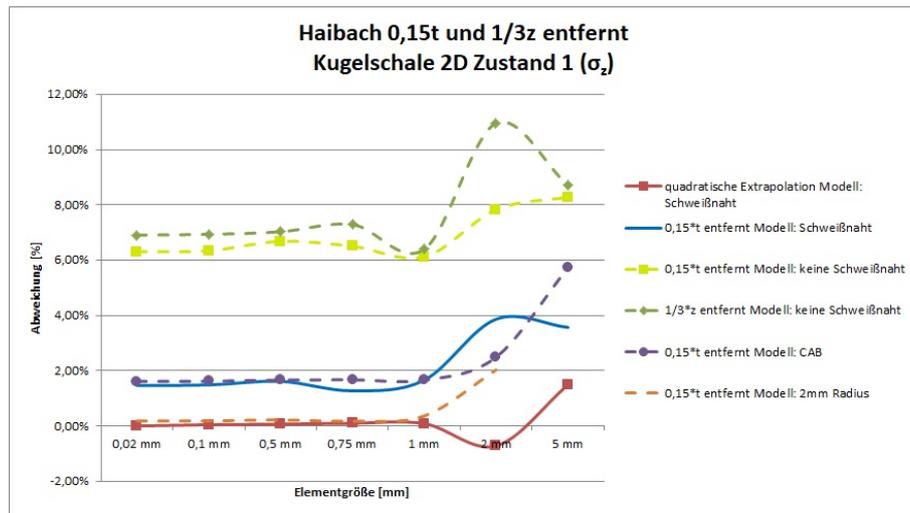


Abb. 6.32: Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für die Kugelschale Zustand 1  $\sigma_z$

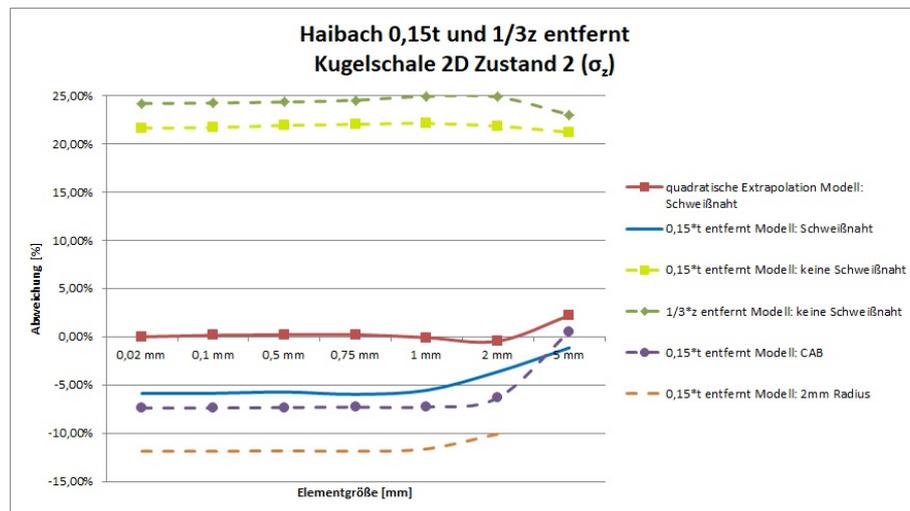


Abb. 6.33: Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für die Kugelschale Zustand 2  $\sigma_z$

Tab. 6.15: Haibach 0,15t und 1/3z entfernt bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,17%	0,11%	0,14%
Modell Schweißnaht 0,15t entfernt	1,00%	0,58%	0,79%
Modell keine Schweißnaht 0,15t entfernt	-1,17%	-2,19%	-1,68%
Modell keine Schweißnaht 1/3z entfernt	-6,57%	-4,46%	-5,52%
Modell CAB 0,15t entfernt	-6,80%	-6,68%	-6,74%
Modell 2mm Radius 0,15t entfernt	-2,25%	-2,73%	-2,49%

**Tab. 6.16:** Haibach 0,15t und 1/3z entfernt bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,08%	-6,92%	-3,42%
Modell Schweißnaht 0,15t entfernt	1,47%	-5,87%	-2,20%
Modell keine Schweißnaht 0,15t entfernt	6,31%	21,63%	13,97%
Modell keine Schweißnaht 1/3z entfernt	6,91%	24,18%	15,55%
Modell CAB 0,15t entfernt	1,62%	-7,37%	-2,88%
Modell 2mm Radius 0,15t entfernt	0,19%	-11,85%	-5,83%

## 6.4 Direkte Auswertung

Am 2mm Radius Modell zeigen sich konservative Strukturspannungswerte für alle untersuchten Fälle. Die Struktur des Modells wird durch den 2mm Radius nicht wesentlich verändert. Die Kerbspannungen am Schweißnahtübergang sind jedoch sehr hoch. Somit ergeben sich konservative Werte mit sehr hohen Abweichungen. Diese Methode ist aufgrund der hohen Abweichungen wenig geeignet.

Beim CAB Modell ergibt sich eine wesentliche Veränderung der Steifigkeit und damit eine Verminderung der Strukturspannungen. Die Kerbspannungen sind aufgrund des großen Radius gering. Die im CAB Modell angewandte Methode weist durch die wechselseitigen Einflüsse sehr hohe Schwankungen auf und ist wenig geeignet.

Bei dieser Auswertungsmethode sind aufgrund der enthaltenen Kerbwirkung andere Wöhlerkurven erforderlich.

### 6.4.1 Ergebnisse Direkte Auswertung CAB Modell $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen)

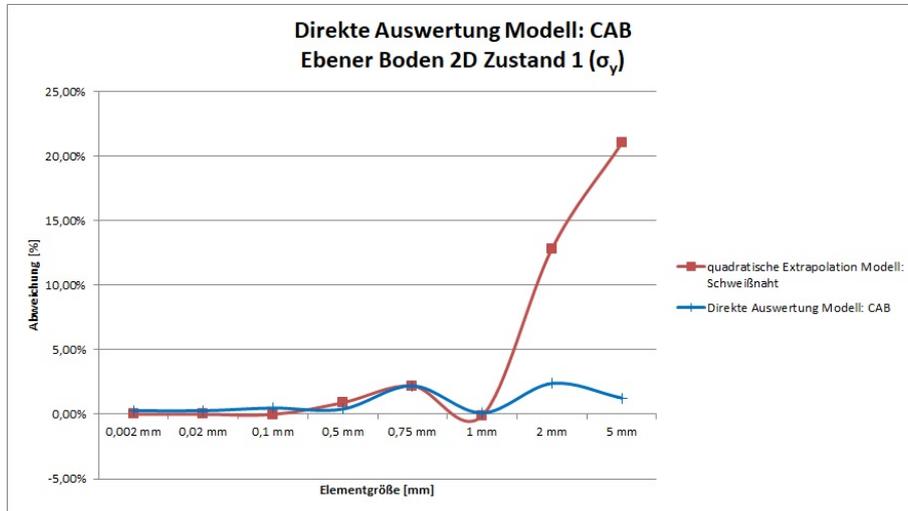


Abb. 6.34: Ergebnis ebener Boden CAB Modell direkte Auswertung Zustand 1  $\sigma_y$

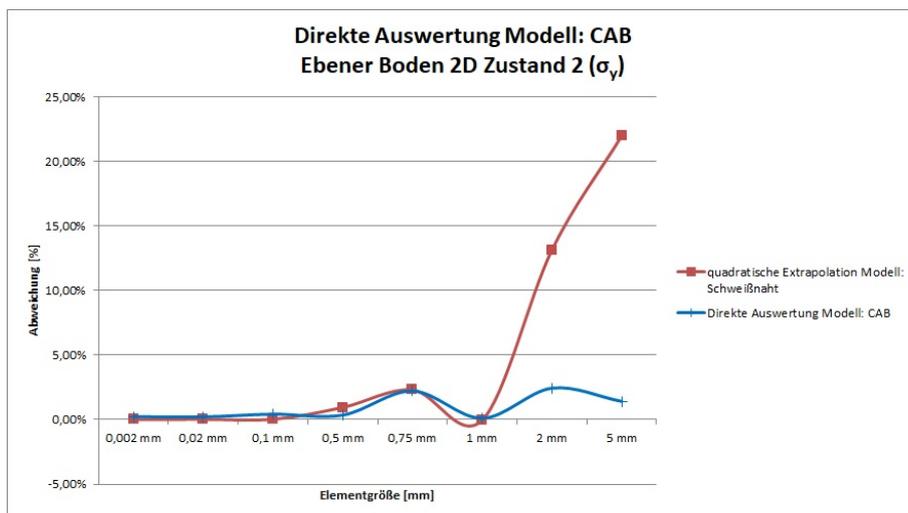


Abb. 6.35: Ergebnis ebener Boden CAB Modell direkte Auswertung Zustand 2  $\sigma_y$

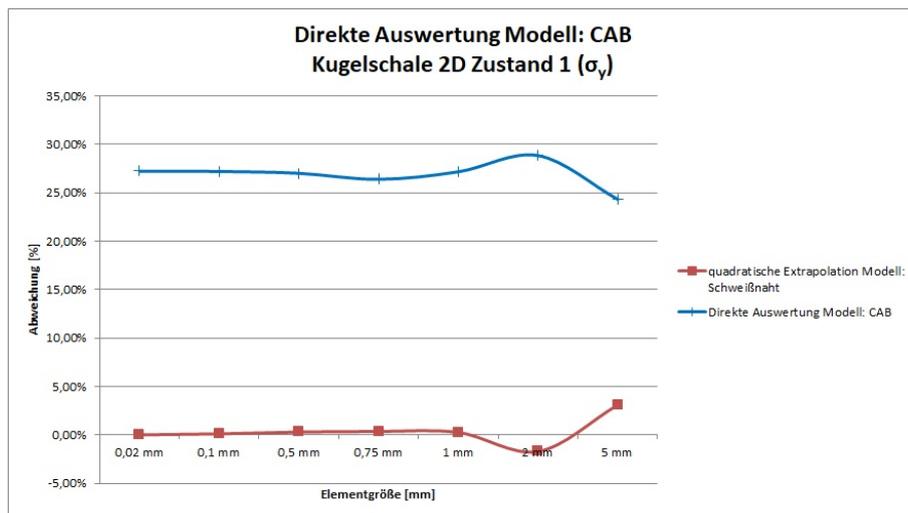


Abb. 6.36: Ergebnis Kugelschale CAB Modell direkte Auswertung Zustand 1  $\sigma_y$

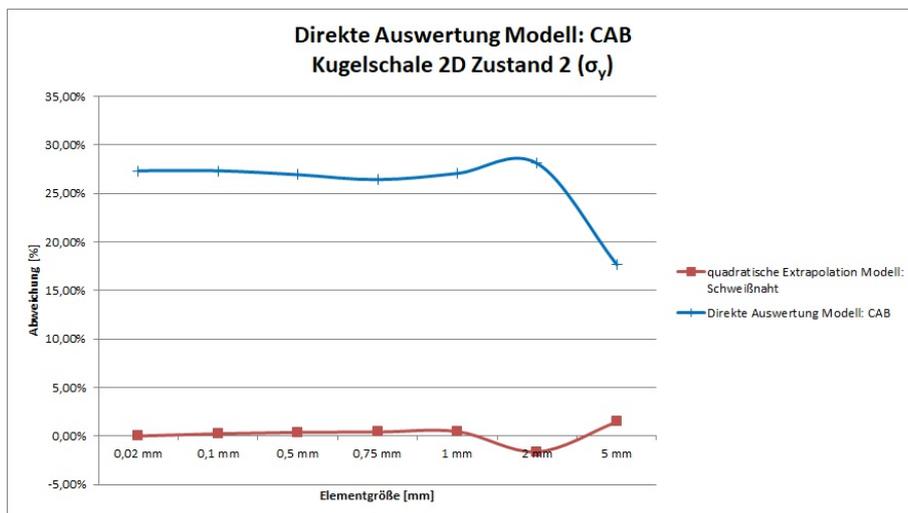


Abb. 6.37: Ergebnis Kugelschale CAB Modell direkte Auswertung Zustand 2  $\sigma_y$

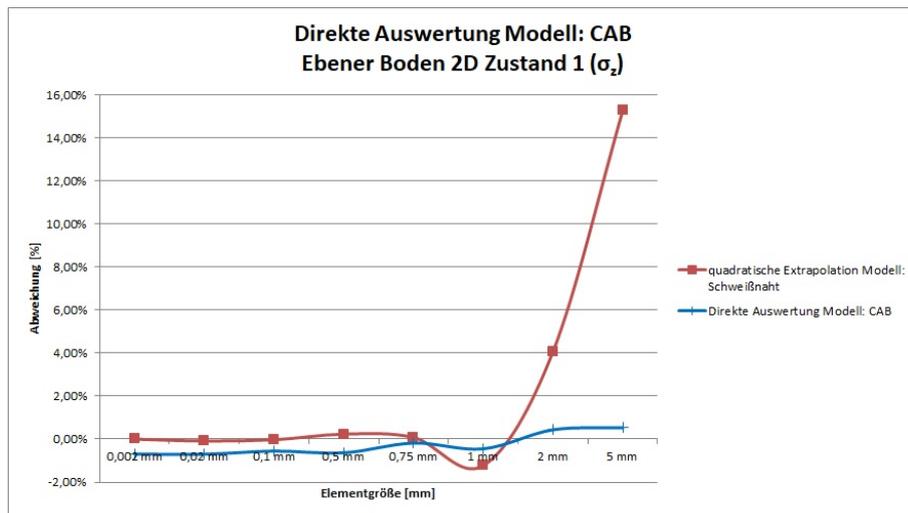
Tab. 6.17: Direkte Auswertung am CAB Modell bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-3,45%	-3,78%	-3,62%
Modell CAB	0,29%	0,22%	0,26%

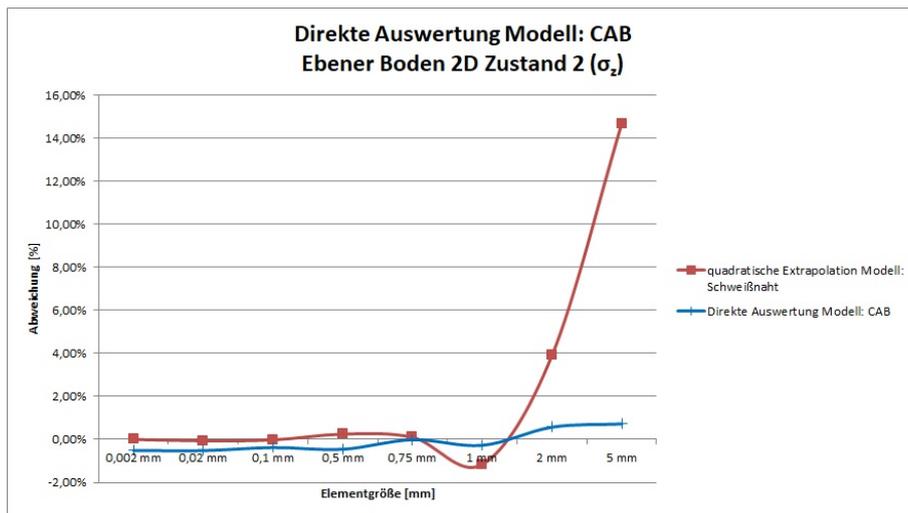
**Tab. 6.18:** Direkte Auswertung am CAB Modell bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-0,72%	-0,25%	-0,49%
Modell CAB	27,23%	27,33%	27,28%

#### 6.4.2 Ergebnisse Direkte Auswertung CAB Modell $\sigma_z$ (Umfangsspannungen)



**Abb. 6.38:** Ergebnis ebener Boden CAB Modell direkte Auswertung Zustand 1  $\sigma_z$



**Abb. 6.39:** Ergebnis ebener Boden CAB Modell direkte Auswertung Zustand 2  $\sigma_z$

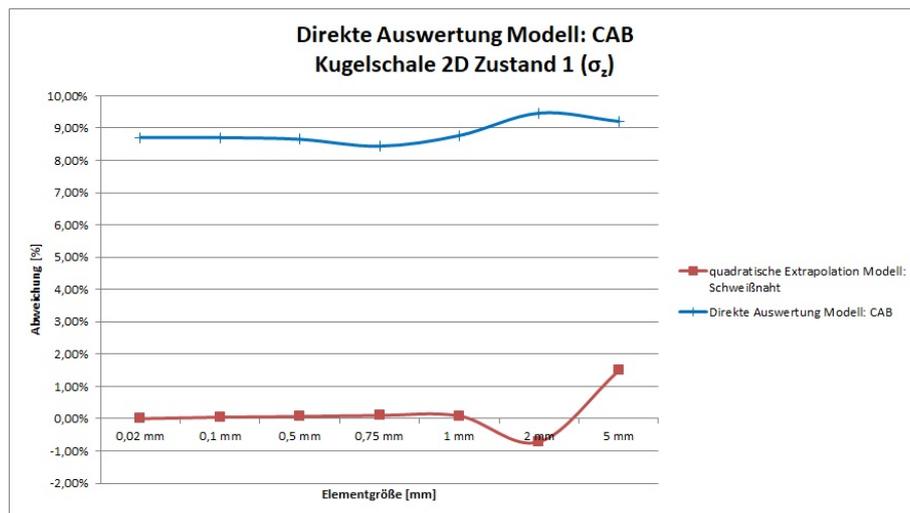


Abb. 6.40: Ergebnis Kugelschale CAB Modell direkte Auswertung Zustand 1  $\sigma_z$

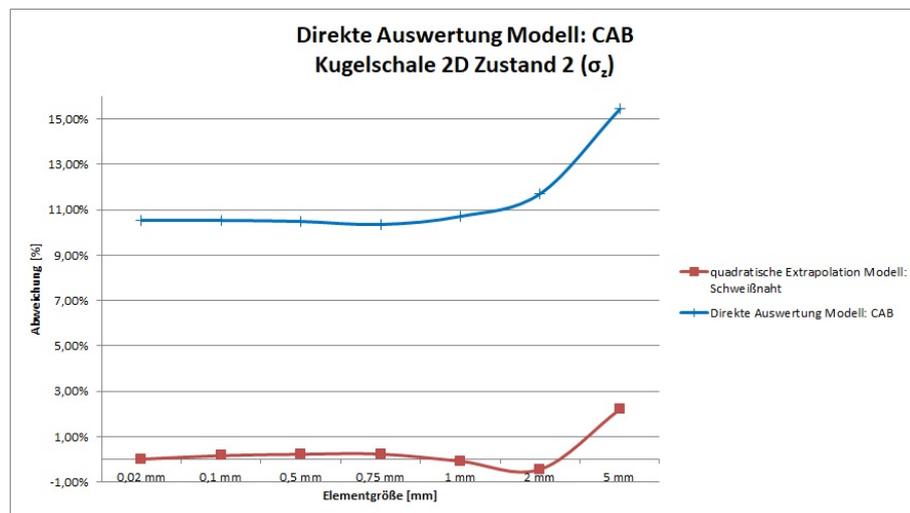


Abb. 6.41: Ergebnis Kugelschale CAB Modell direkte Auswertung Zustand 2  $\sigma_z$

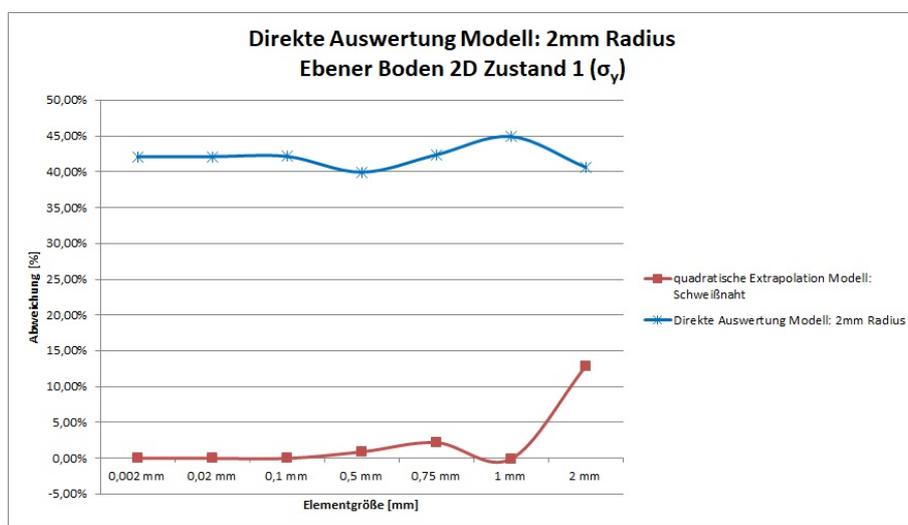
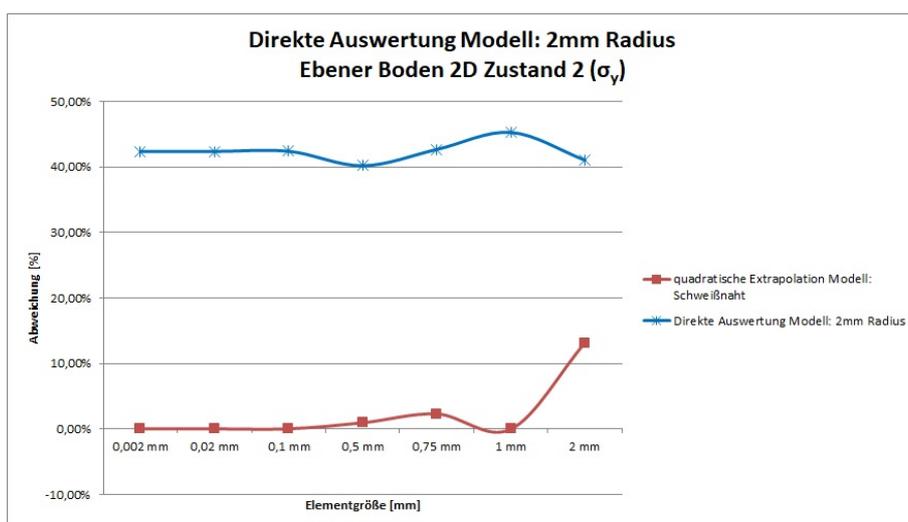
Tab. 6.19: Direkte Auswertung am CAB Modell bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,17%	0,11%	0,14%
Modell CAB	-0,69%	-0,51%	-0,60%

**Tab. 6.20:** Direkte Auswertung am CAB Modell bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,08%	-6,92%	-3,42%
Modell CAB	8,71%	10,53%	9,62%

### 6.4.3 Ergebnisse Direkte Auswertung 2mm Radius Modell $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen)

**Abb. 6.42:** Ergebnis ebener Boden 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 1  $\sigma_y$ **Abb. 6.43:** Ergebnis ebener Boden 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 2  $\sigma_y$

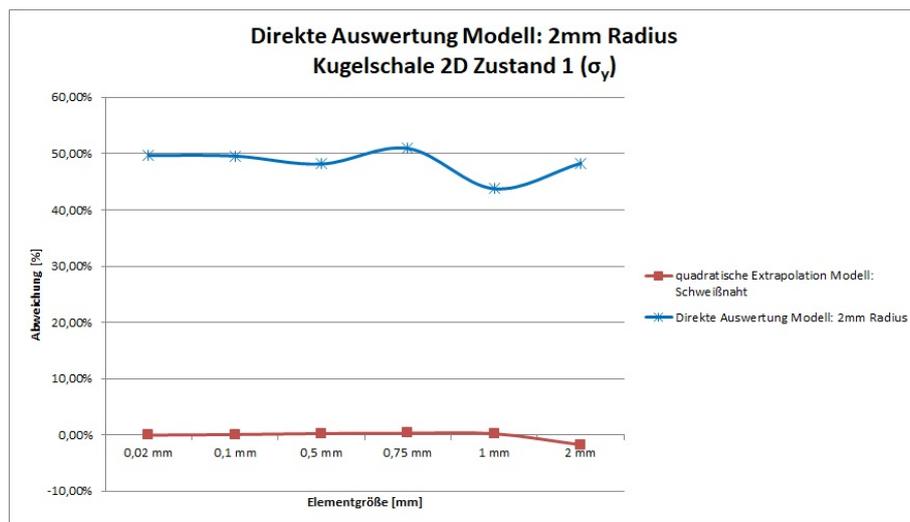


Abb. 6.44: Ergebnis Kugelschale 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 1  $\sigma_y$

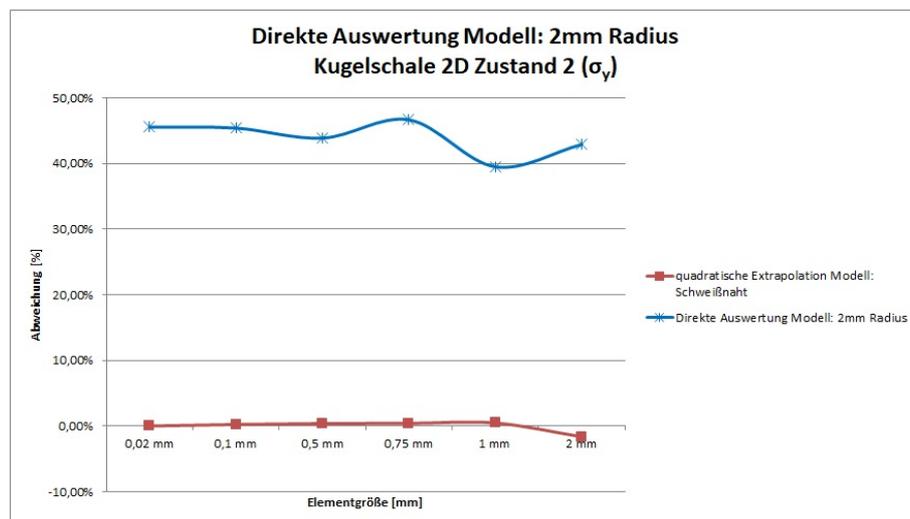


Abb. 6.45: Ergebnis Kugelschale 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 2  $\sigma_y$

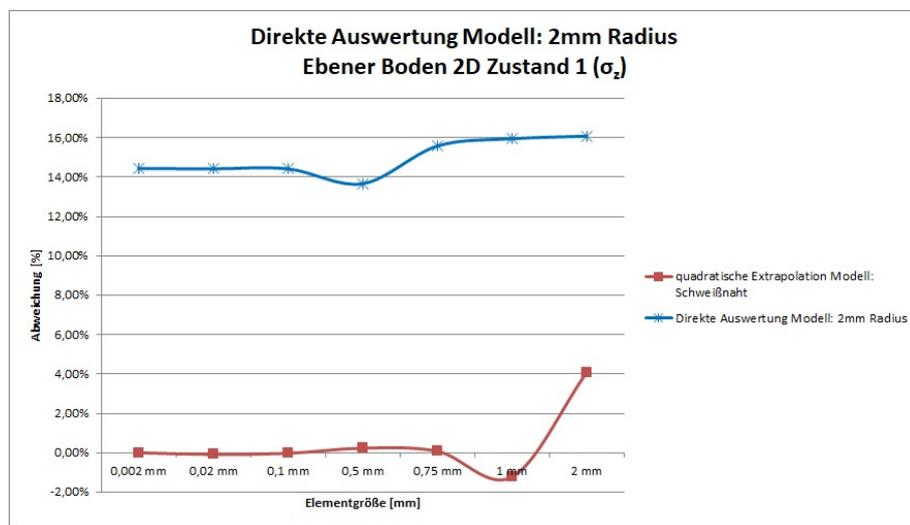
Tab. 6.21: Direkte Auswertung am 2mm Radius Modell bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-3,45%	-3,78%	-3,62%
Modell 2mm Radius	42,14%	42,35%	42,25%

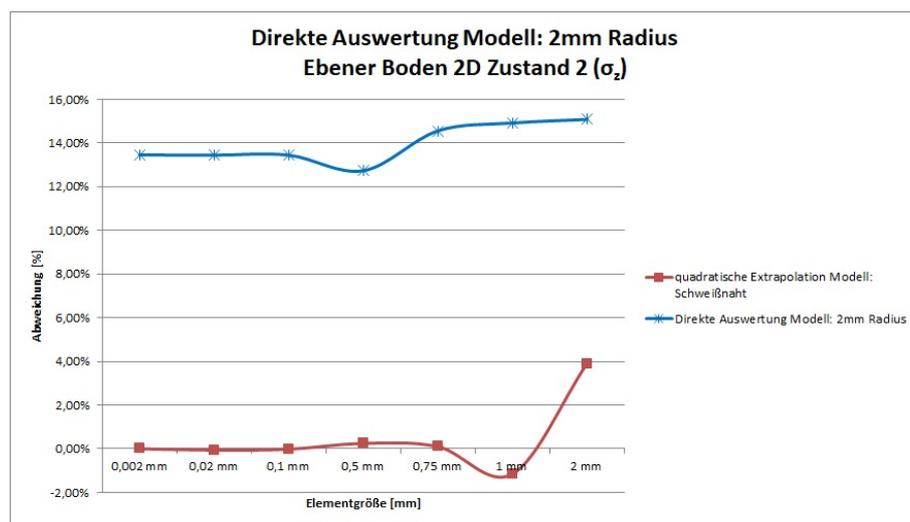
**Tab. 6.22:** Direkte Auswertung am 2mm Radius Modell bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-0,72%	-0,25%	-0,49%
Modell 2mm Radius	49,72%	45,53%	47,63%

#### 6.4.4 Ergebnisse Direkte Auswertung 2mm Radius Modell $\sigma_z$ (Umfangsspannungen)



**Abb. 6.46:** Ergebnis ebener Boden 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 1  $\sigma_z$



**Abb. 6.47:** Ergebnis ebener Boden 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 2  $\sigma_z$

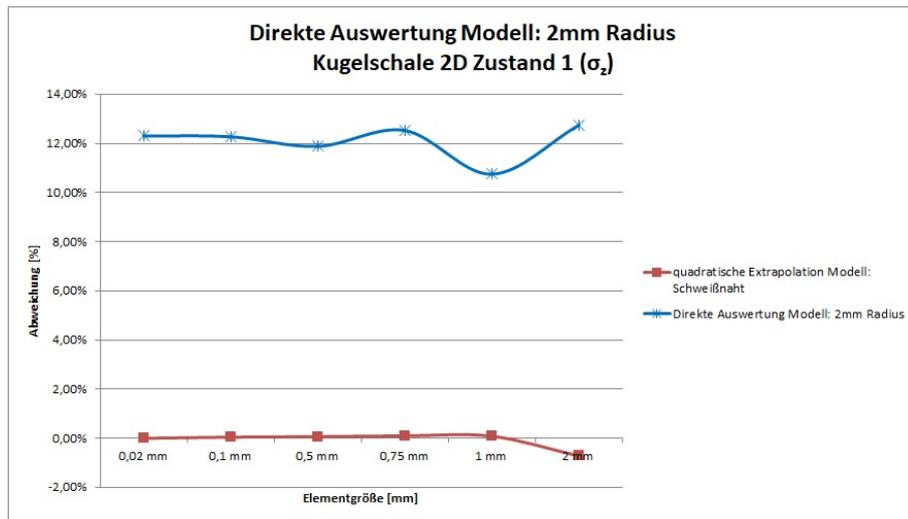


Abb. 6.48: Ergebnis Kugelschale 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 1  $\sigma_z$

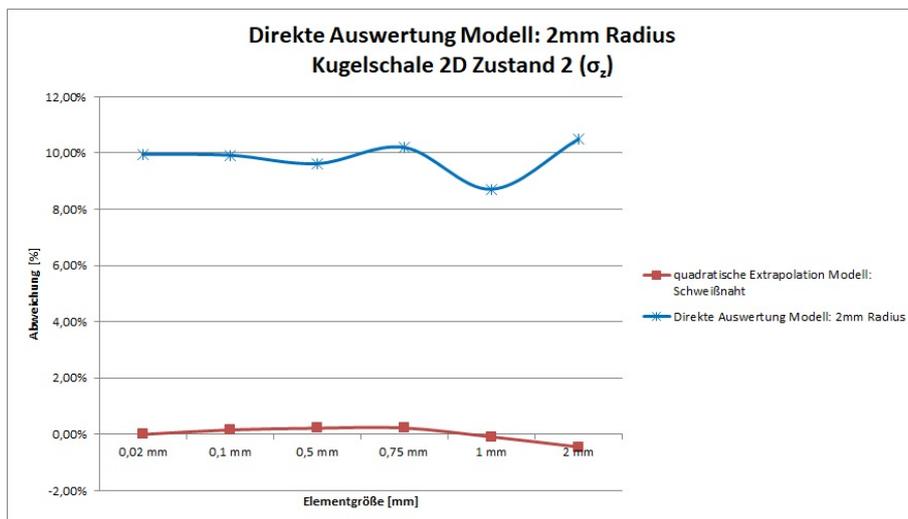


Abb. 6.49: Ergebnis Kugelschale 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 2  $\sigma_z$

**Tab. 6.23:** Direkte Auswertung am 2mm Radius Modell bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ )

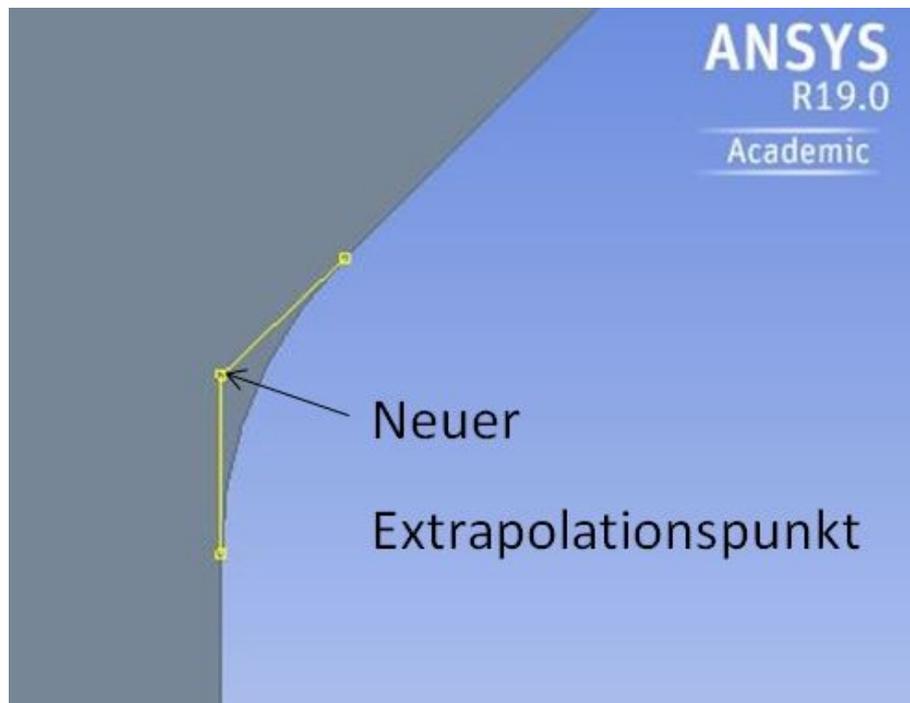
	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,17%	0,11%	0,14%
Modell 2mm Radius	14,43%	13,46%	13,95%

**Tab. 6.24:** Direkte Auswertung am 2mm Radius Modell bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,08%	-6,92%	-3,42%
Modell 2mm Radius	12,31%	9,96%	11,14%

## 6.5 Extrapolation in den Schnittpunkt am 2mm Radius Modell

Der Extrapolationspunkt am 2mm Modell wird nun an den fiktiven Schnittpunkt der beiden gelb markierten Geraden am 2mm Radius gelegt, entsprechend Abb. 6.50. Dadurch liegt im Gegensatz zu dem Verfahren in Kapitel 6.1 am Modell 2mm Radius, beiden Auswertungsverfahren der gleiche Ort der Rissinitiierung zu Grunde (Extrapolationspunkt).

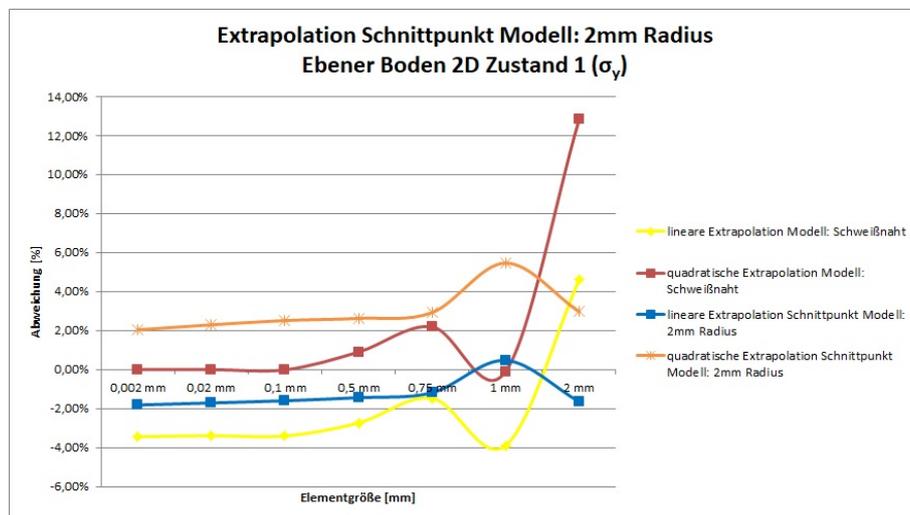
**Abb. 6.50:** Neuer Extrapolationspunkt am 2mm Radius Modell

Das quadratische Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell liefert durchwegs konservative Strukturspannungswerte sowohl für den ebenen Boden als auch die Kugelschale. Die maximale Abweichung an den 8 Messungen beträgt lediglich +2,12%, die minimale Abweichung beträgt +0,16%.

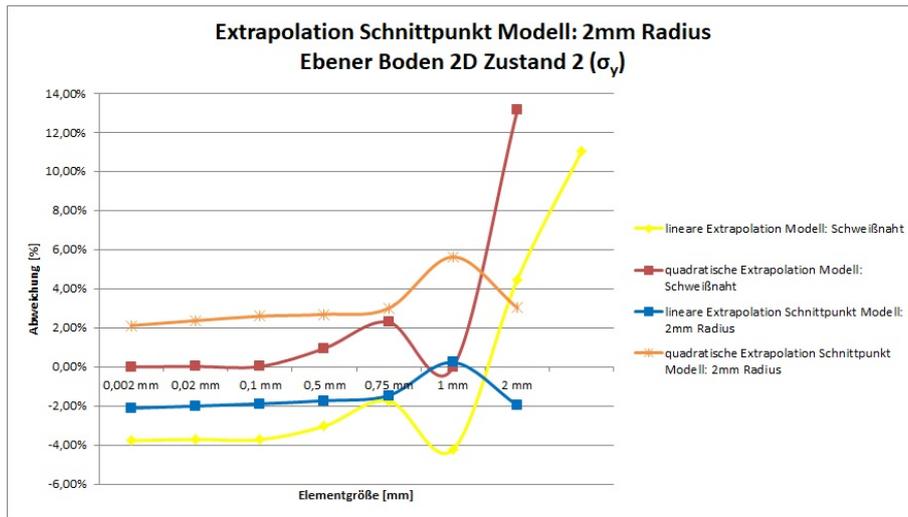
Das Modell/Verfahren ist sehr gut zur Bestimmung von Strukturspannungen geeignet.

Das lineare Extrapolationsverfahren am 2mm Radius Modell mit Extrapolation in den Schnittpunkt liefert sehr ähnliche Werte zum linearen Extrapolationsverfahren am Modell Schweißnaht.

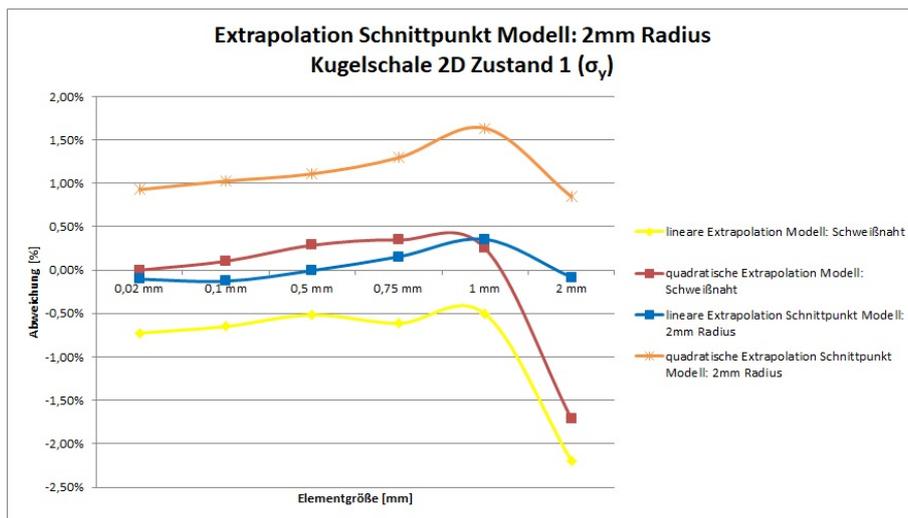
### 6.5.1 Ergebnisse Erweiterung des Extrapolationsverfahrens am 2mm Modell $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen)



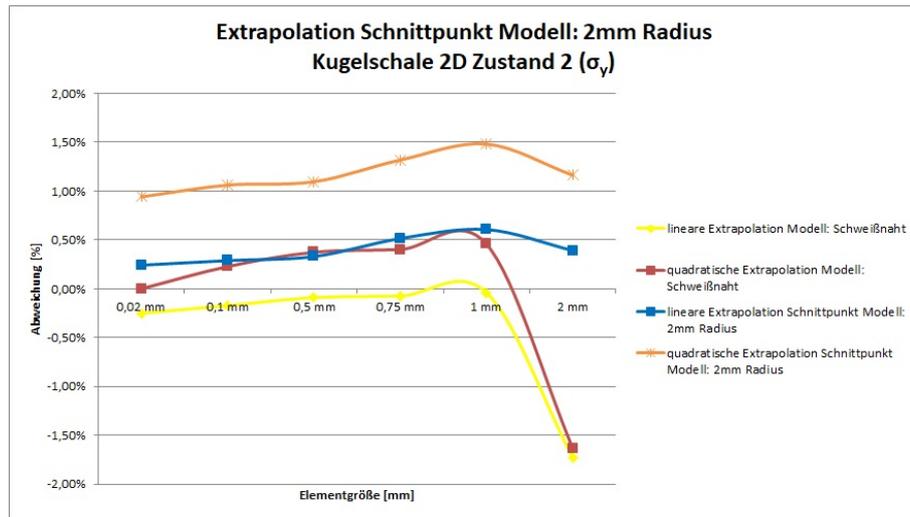
**Abb. 6.51:** Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell am ebenen Boden für Zustand 1 ( $\sigma_y$ )



**Abb. 6.52:** Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell am ebenen Boden für Zustand 2 ( $\sigma_y$ )



**Abb. 6.53:** Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell an der Kugelschale für Zustand 1 ( $\sigma_y$ )



**Abb. 6.54:** Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell an der Kugelschale für Zustand 2 ( $\sigma_y$ )

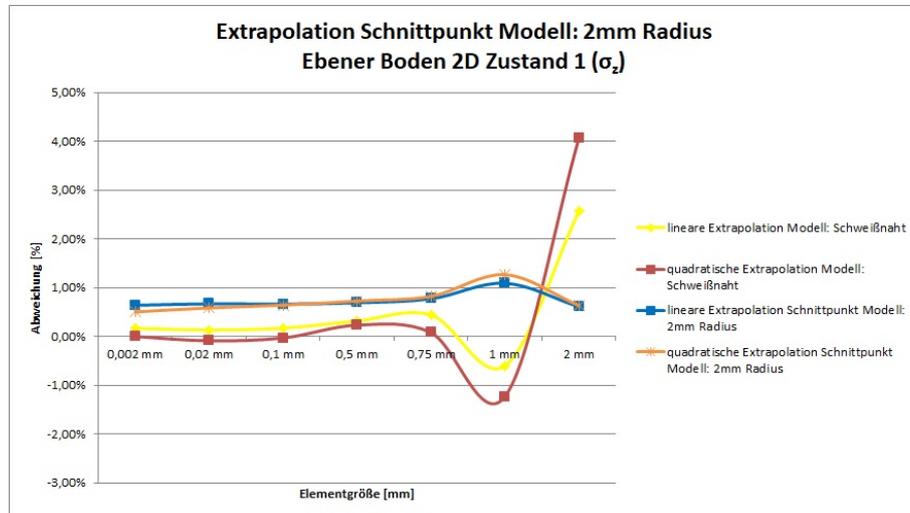
**Tab. 6.25:** Extrapolation in den Schnittpunkt am 2mm Radius Modell bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-3,45%	-3,78%	-3,62%
linear Schnittpunkt Modell 2mm Radius	-1,82%	-2,12%	-1,97%
quadratisch Schnittpunkt Modell 2mm Radius	2,04%	2,12%	2,08%

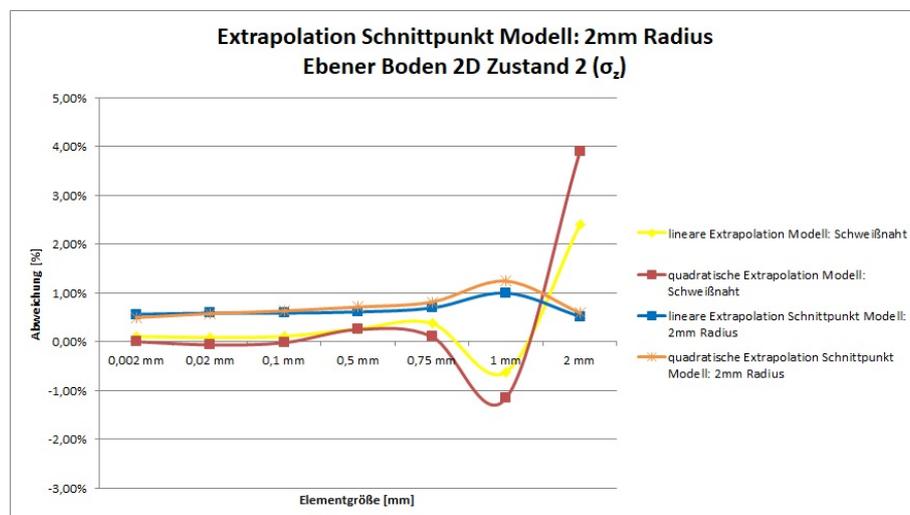
**Tab. 6.26:** Extrapolation in den Schnittpunkt am 2mm Radius Modell bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	-0,72%	-0,25%	-0,49%
linear Schnittpunkt Modell 2mm Radius	-0,1%	0,24%	0,07%
quadratisch Schnittpunkt Modell 2mm Radius	0,93%	0,94%	0,94%

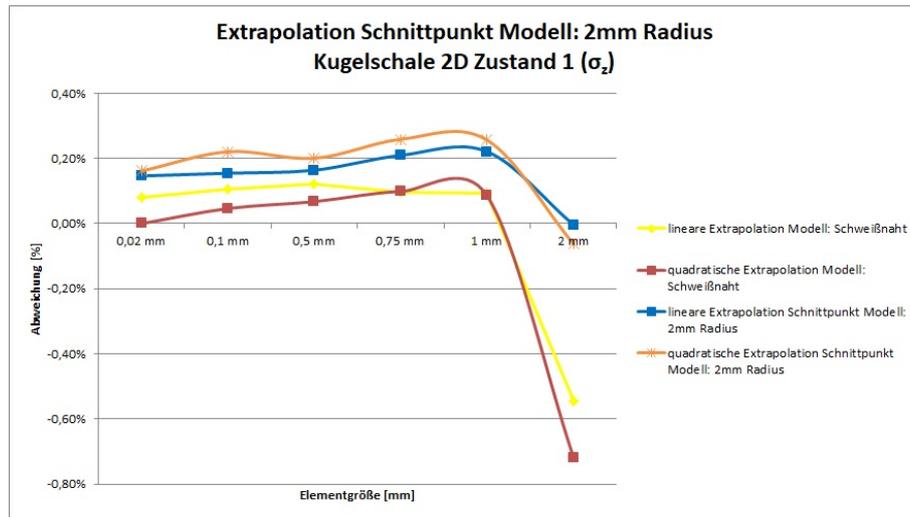
### 6.5.2 Ergebnisse Erweiterung des Extrapolationsverfahrens am 2mm Modell $\sigma_z$ (Umfangsspannungen)



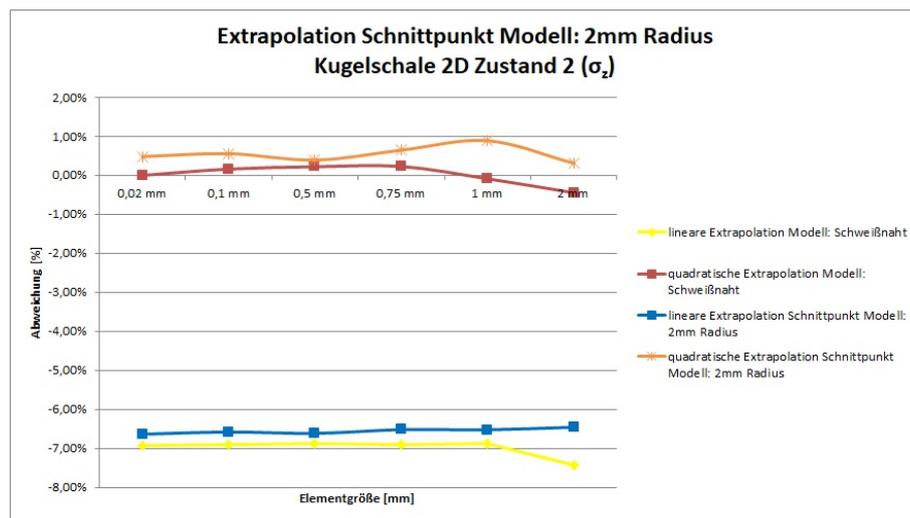
**Abb. 6.55:** Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell am ebenen Boden für Zustand 1 ( $\sigma_z$ )



**Abb. 6.56:** Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell am ebenen Boden für Zustand 2 ( $\sigma_z$ )



**Abb. 6.57:** Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell an der Kugelschale für Zustand 1 ( $\sigma_z$ )



**Abb. 6.58:** Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell an der Kugelschale für Zustand 2 ( $\sigma_z$ )

**Tab. 6.27:** Extrapolation in den Schnittpunkt am 2mm Radius Modell bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ )

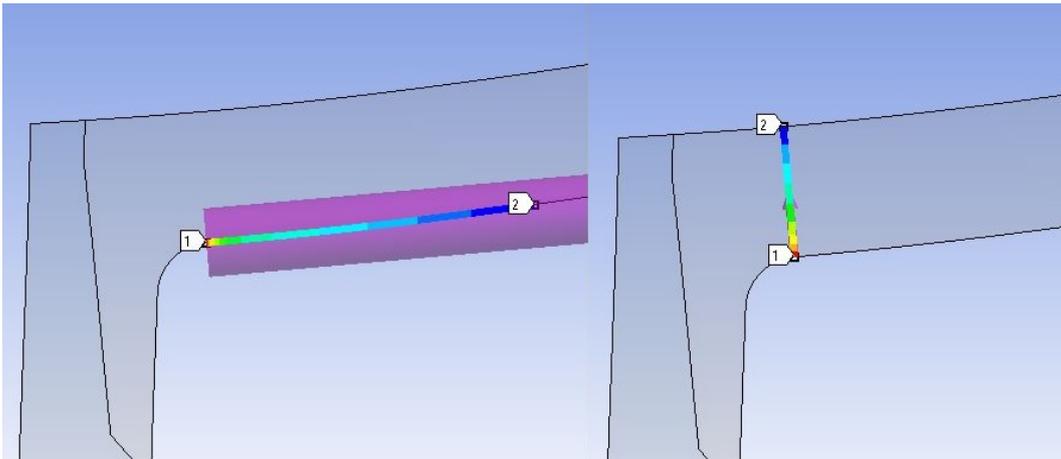
	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,17%	0,11%	0,14%
linear Schnittpunkt Modell 2mm Radius	0,64%	0,56%	0,6%
quadratisch Schnittpunkt Modell 2mm Radius	0,5%	0,49%	0,5%

**Tab. 6.28:** Extrapolation in den Schnittpunkt am 2mm Radius Modell bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ )

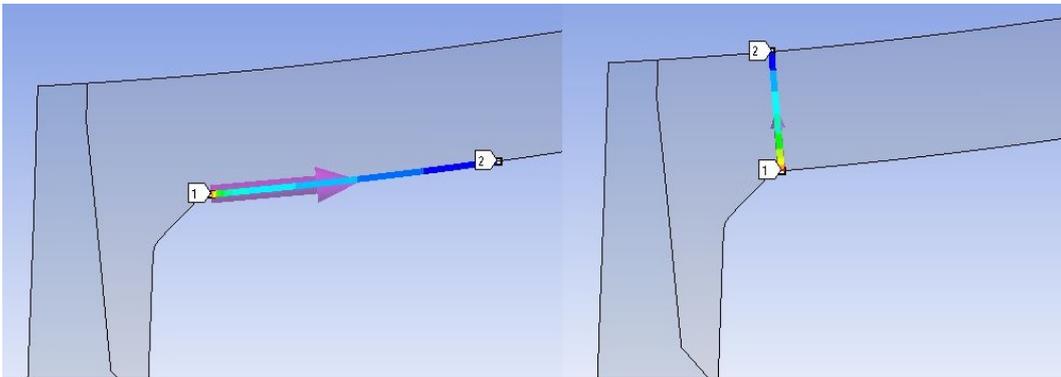
	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
lineare Extrapolation Modell Schweißnaht	0,08%	-6,92%	-3,42%
linear Schnittpunkt Modell 2mm Radius	0,15%	-6,64%	-3,25%
quadratisch Schnittpunkt Modell 2mm Radius	0,16%	0,48%	0,32%

## 6.6 Vergleich Linearisierung durch die Wand mit dem quadratischen Extrapolationsverfahren im gleichen Modell

Die Linearisierung durch die Wand am Modell Schweißnaht ist aufgrund der Spannungssingularität am Schweißnahtübergang nicht möglich, wie in Kapitel 6.2 ersichtlich. Ein Vergleich zwischen der Linearisierung durch die Wand und dem quadratischen Extrapolationsverfahren ist nur am Ansatz der Rundungsradien möglich. Deswegen werden in diesem Kapitel die Abweichungen vom quadratischen Extrapolationsverfahren am jeweiligen Modell (Modell CAB oder Modell 2mm Radius) ermittelt. Die Auswertungspfade an den Modellen werden entsprechend den Abbildungen 6.59 sowie 6.60 gelegt. In diesen Abbildungen ist im linken Bild jeweils der Extrapolationspfad und im rechten Bild der Pfad der Linearisierung durch die Wand erkennbar. Für die Punkte am Ansatz der Rundungsradien liefert die Linearisierung durch die Wand ähnliche Werte wie die quadratische Extrapolation, in lediglich zwei der 16 untersuchten Messungen ergeben sich nicht konservative Strukturspannungswerte (-1,07% bzw. -1,09% Abweichung). Die Untersuchung der Modelle zeigt geringere Abweichungen in y Richtung von maximal +3,68% im Vergleich zu den höheren Abweichungen in z Richtung von maximal +11,4%.



**Abb. 6.59:** Auswertungspfade für den Vergleich des Extrapolationsverfahrens mit der Linearisierung durch die Wand am CAB Modell



**Abb. 6.60:** Auswertungspfade für den Vergleich des Extrapolationsverfahrens mit der Linearisierung durch die Wand am 2mm Radius Modell

### 6.6.1 Ergebnisse Vergleich Linearisierung durch die Wand mit dem quadratischen Extrapolationsverfahren $\sigma_y$ (Längs- bzw. Meridianspannungen)

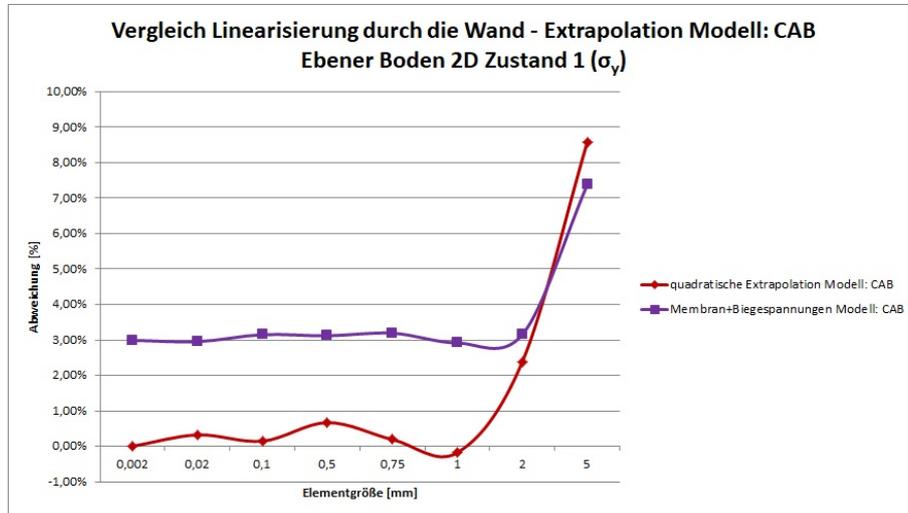


Abb. 6.61: Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden CAB Modell für Zustand 1 ( $\sigma_y$ )

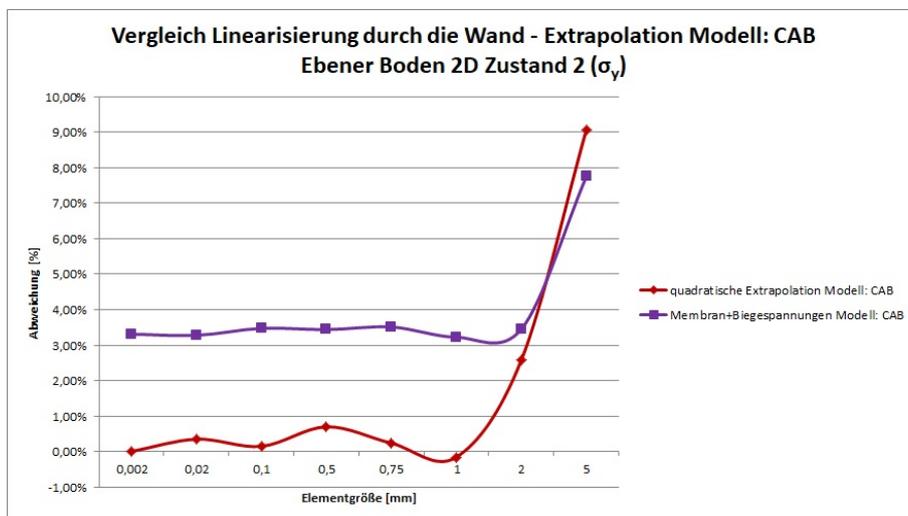


Abb. 6.62: Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden CAB Modell für Zustand 2 ( $\sigma_y$ )

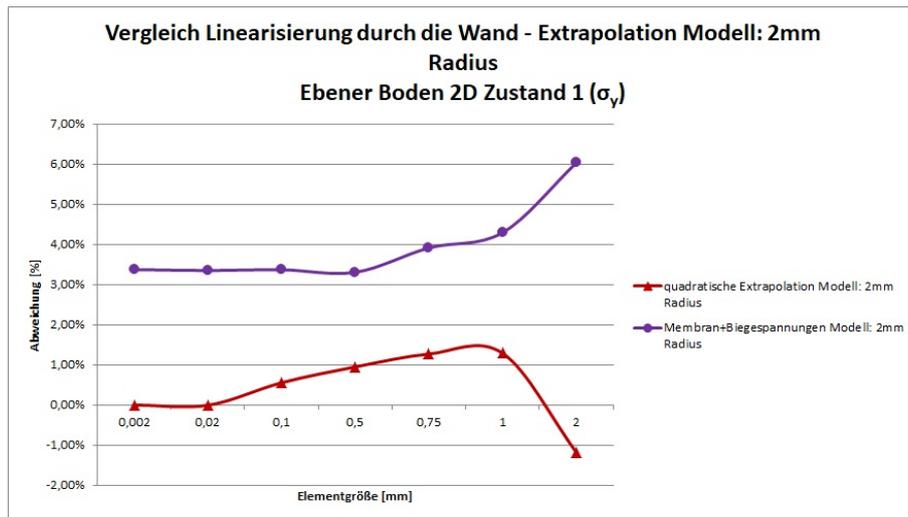


Abb. 6.63: Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden 2mm Radius Modell für Zustand 1 ( $\sigma_y$ )

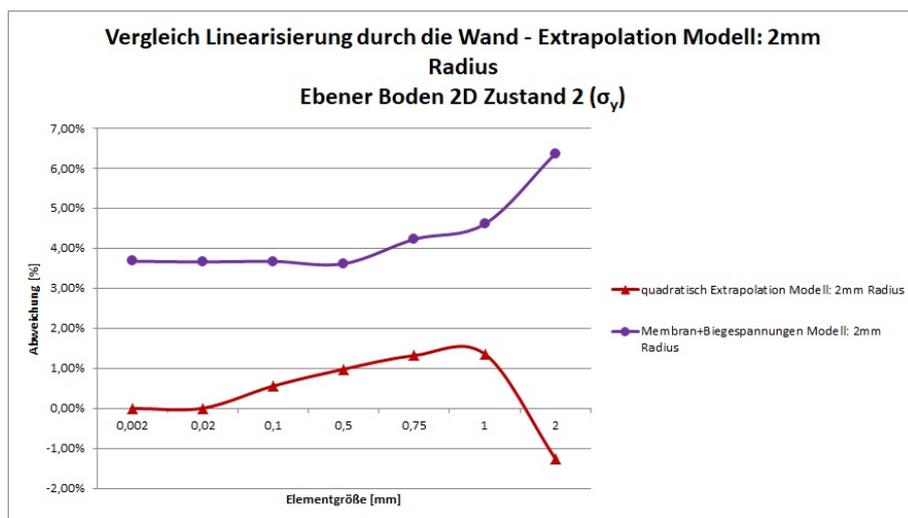
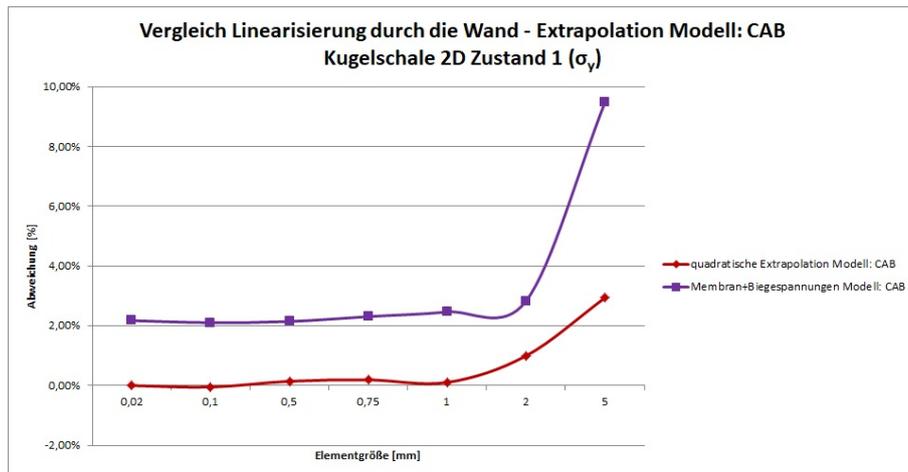
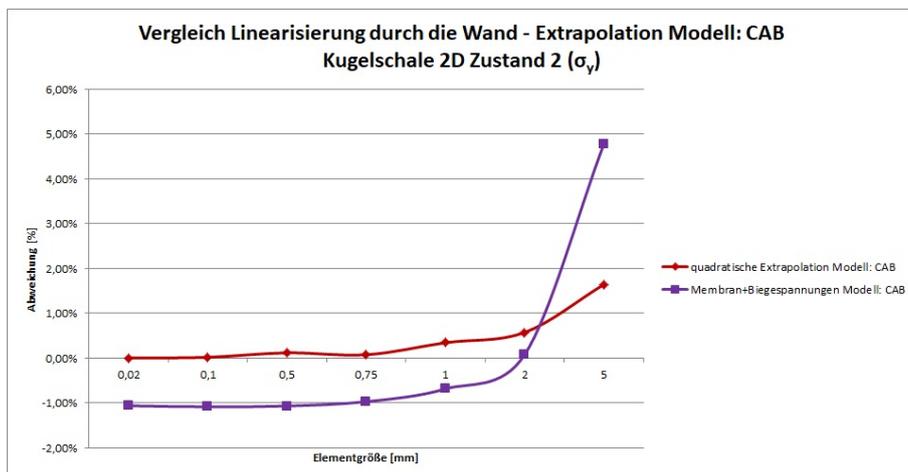


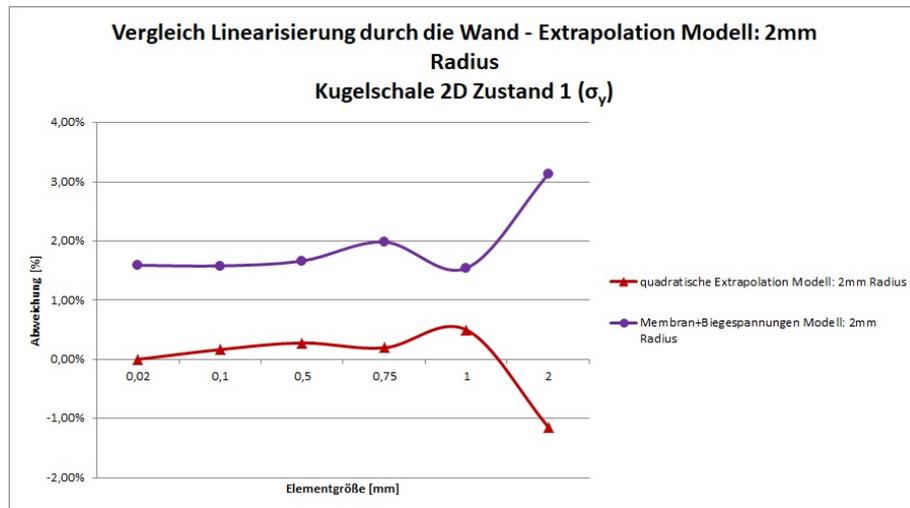
Abb. 6.64: Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden 2mm Radius Modell für Zustand 2 ( $\sigma_y$ )



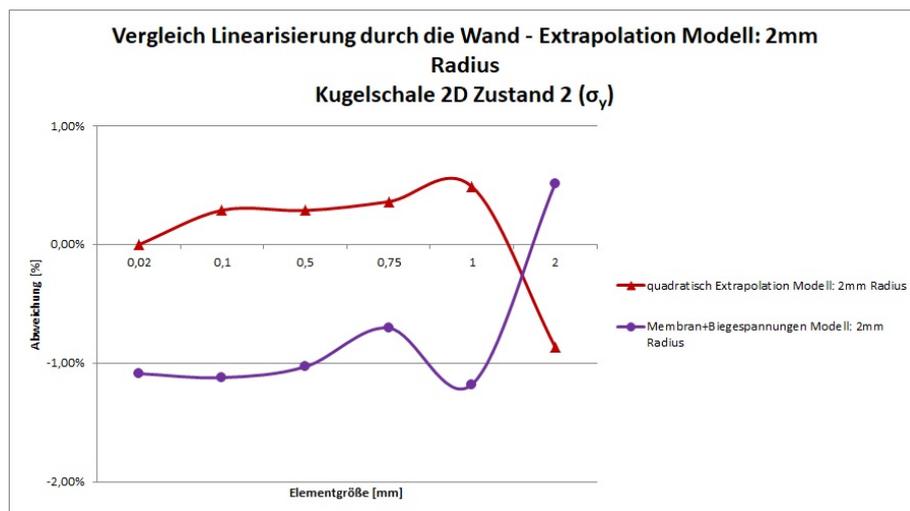
**Abb. 6.65:** Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale CAB Modell für Zustand 1 ( $\sigma_y$ )



**Abb. 6.66:** Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale CAB Modell für Zustand 2 ( $\sigma_y$ )



**Abb. 6.67:** Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale 2mm Radius Modell für Zustand 1 ( $\sigma_y$ )



**Abb. 6.68:** Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale 2mm Radius Modell für Zustand 2 ( $\sigma_y$ )

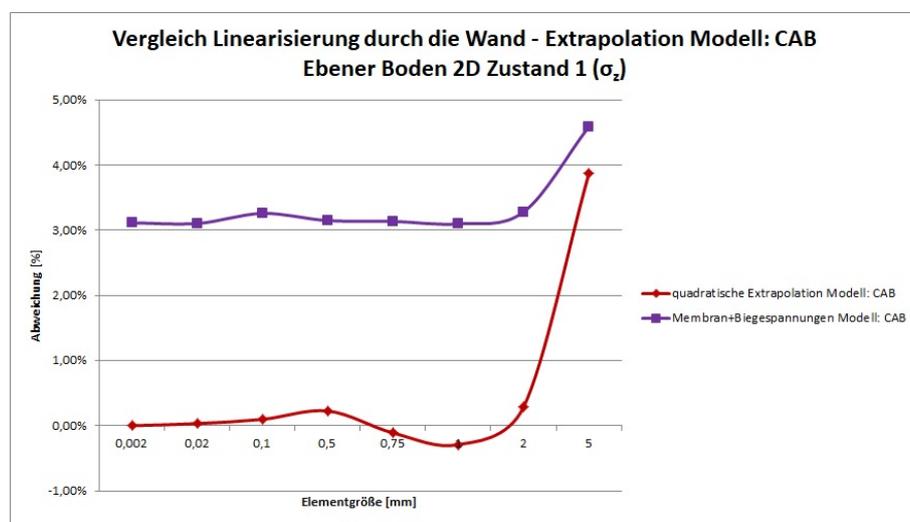
**Tab. 6.29:** Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	2,99%	3,31%	3,15%
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	3,38%	3,68%	3,53%

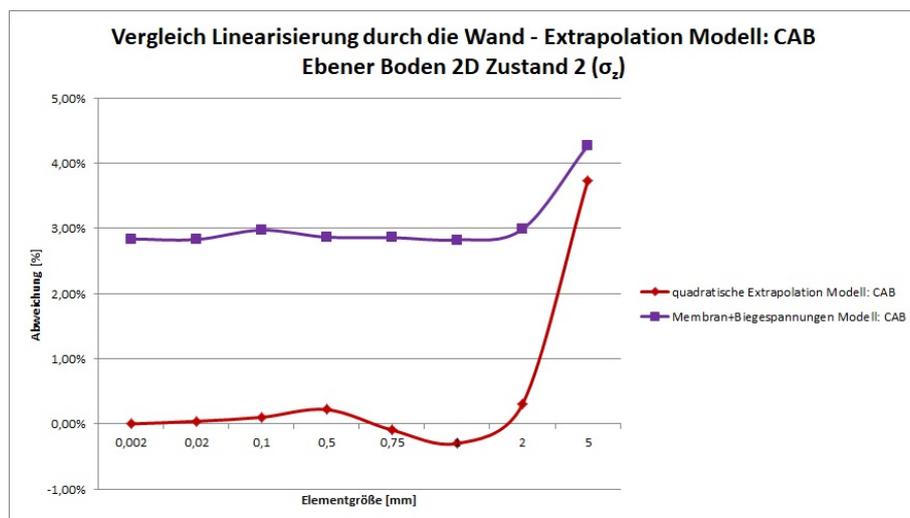
**Tab. 6.30:** Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	2,17%	-1,07%	0,55%
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	1,59%	-1,09%	0,25%

### 6.6.2 Ergebnisse Vergleich Linearisierung durch die Wand mit dem quadratischen Extrapolationsverfahren $\sigma_z$ (Umfangsspannungen)



**Abb. 6.69:** Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden CAB Modell für Zustand 1 ( $\sigma_z$ )



**Abb. 6.70:** Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden CAB Modell für Zustand 2 ( $\sigma_z$ )

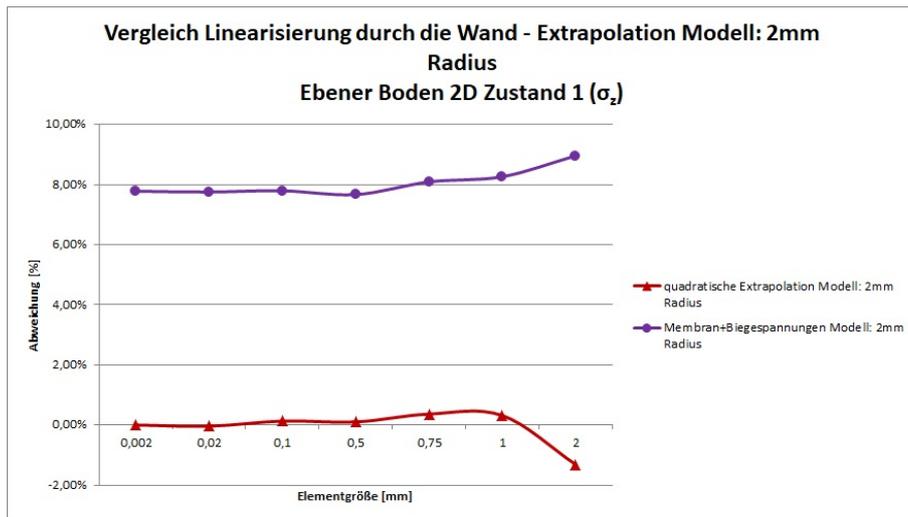


Abb. 6.71: Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden 2mm Radius Modell für Zustand 1 ( $\sigma_z$ )

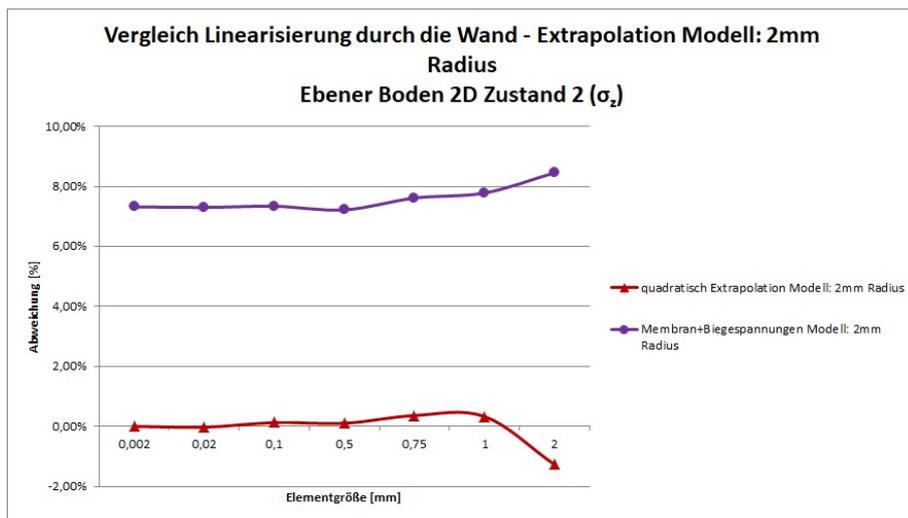


Abb. 6.72: Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden 2mm Radius Modell für Zustand 2 ( $\sigma_z$ )

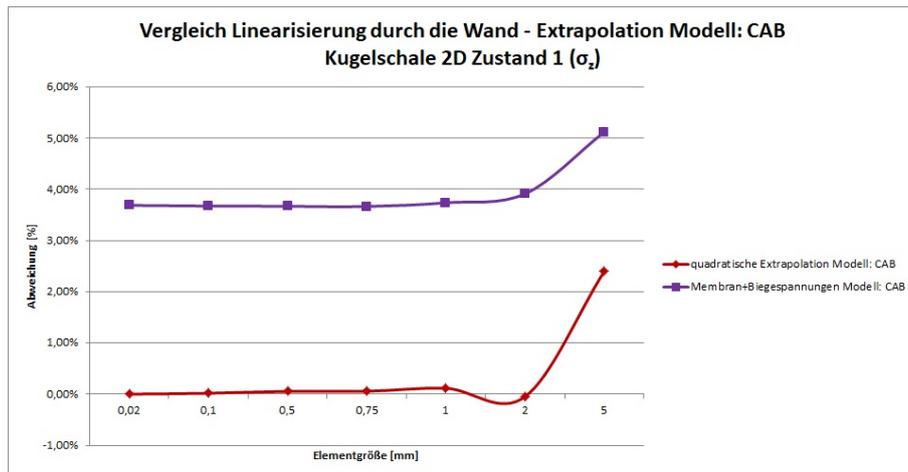


Abb. 6.73: Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale CAB Modell für Zustand 1 ( $\sigma_z$ )

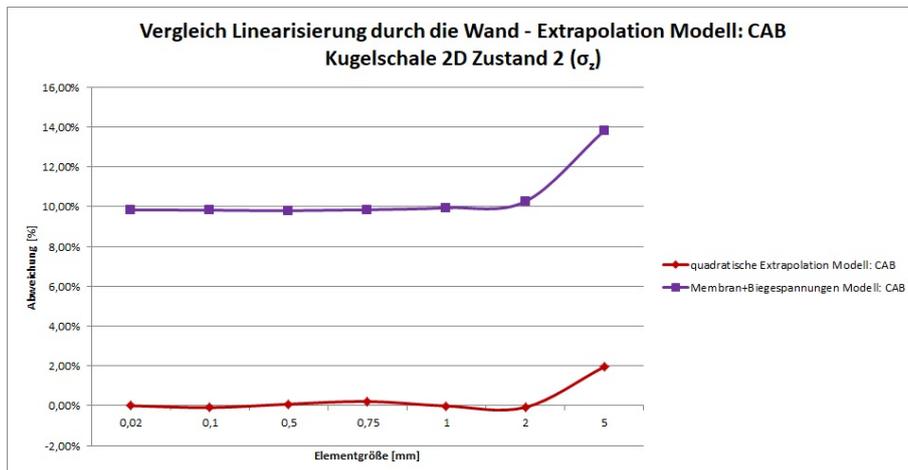
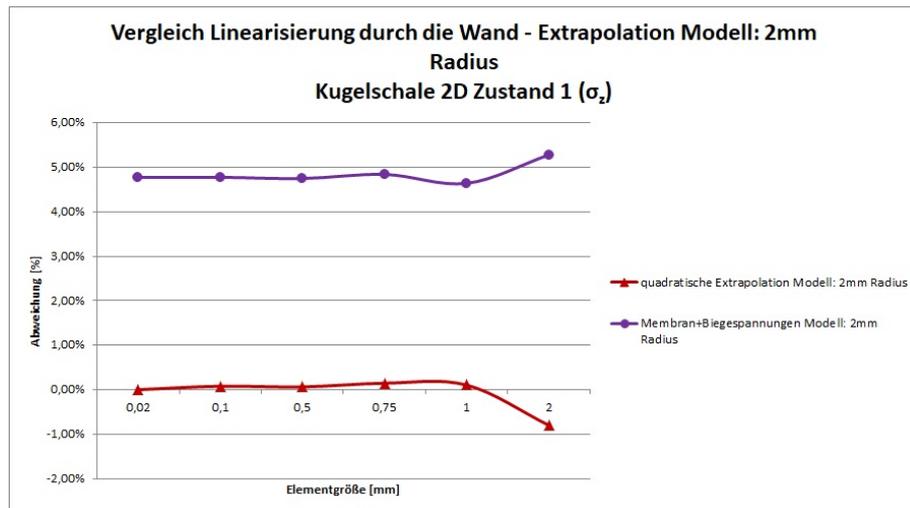
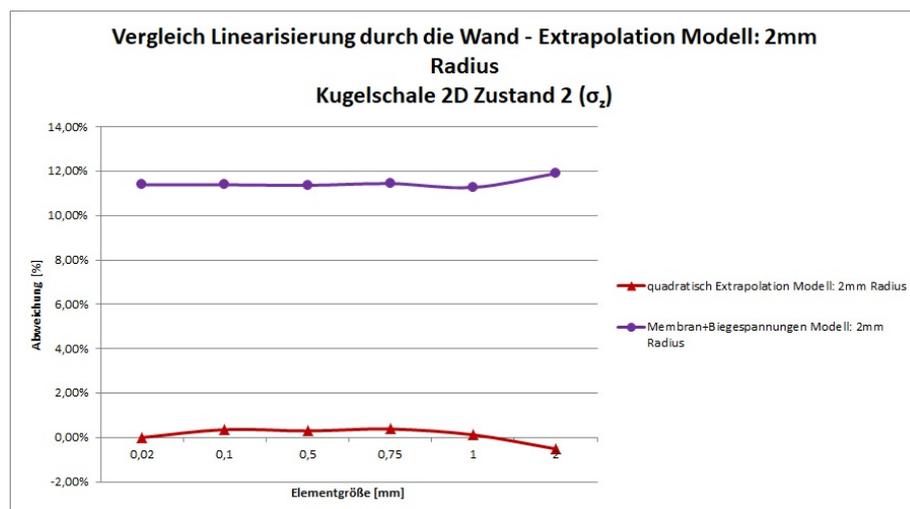


Abb. 6.74: Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale CAB Modell für Zustand 2 ( $\sigma_z$ )



**Abb. 6.75:** Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale 2mm Radius Modell für Zustand 1 ( $\sigma_z$ )



**Abb. 6.76:** Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale 2mm Radius Modell für Zustand 2 ( $\sigma_z$ )

**Tab. 6.31:** Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	3,12%	2,84%	2,98%
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	7,78%	7,32%	7,55%

**Tab. 6.32:** Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ )

	Zustand 1	Zustand 2	Arithmetisches Mittel $\bar{x}$
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	3,69%	9,84%	6,77%
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	4,77%	11,4%	8,09%

# Kapitel 7

## Diskussion

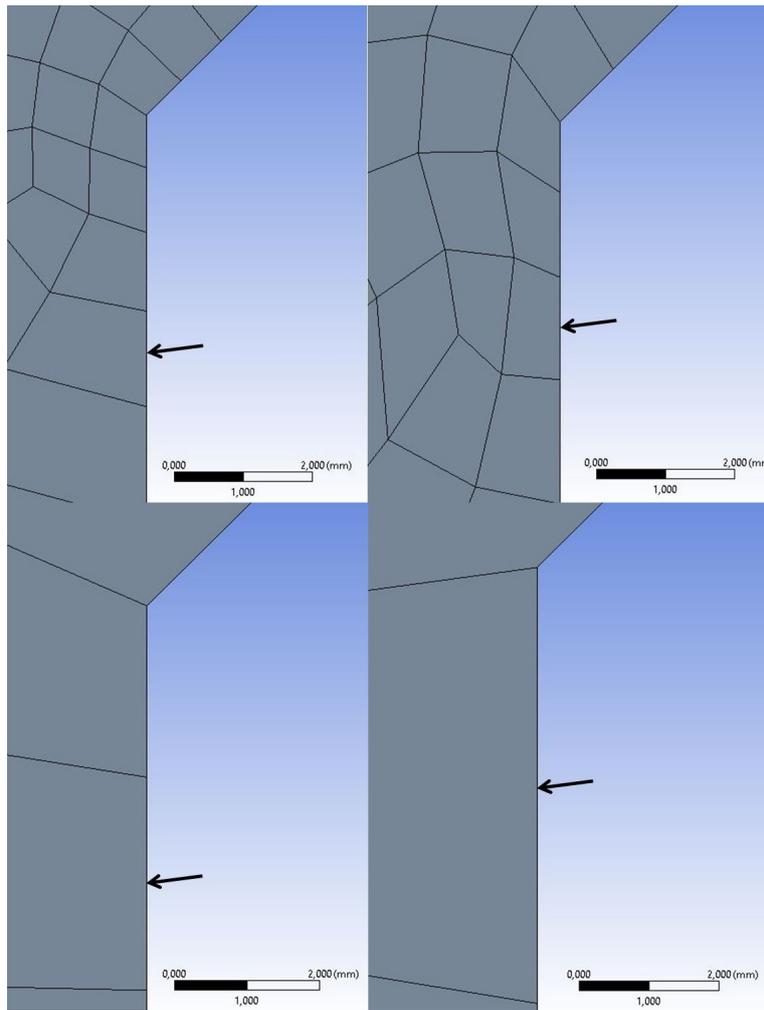
### 7.1 Einfluss der Netzfeinheit auf das Extrapolationsverfahren

Im folgenden Kapitel wird der Einfluss der Netzfeinheit auf das Extrapolationsverfahren untersucht. Als Konvergenzkriterium wird die Netzfeinheit im unteren Extremum der Abweichungskurven für das quadratische Extrapolationsverfahren am Modell Schweißnaht in den Abbildungen 6.1 - 6.8 festgelegt, da bei größerem Netz unmittelbare Divergenz auftritt. In den Abbildungen 7.1 und 7.2 ist das Element mit dem ersten Extrapolationspunkt durch einen Pfeil gekennzeichnet, links oben mit 0,75mm, rechts oben mit 1mm, links unten mit 2mm und rechts unten mit 5mm Netzfeinheit.

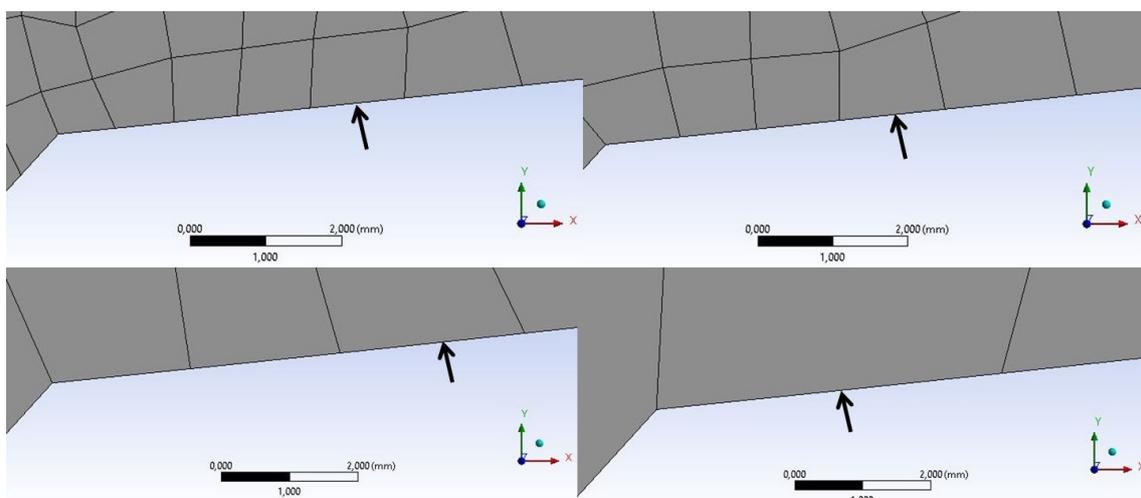
Am ebenen Boden befindet sich der erste Extrapolationspunkt in einer Entfernung von 3,44mm (0,4t) des Schweißnahtübergangs. Es zeigt sich eine gute Konvergenz des Verfahrens ab einer Netzfeinheit von 1mm. Dies entspricht dem ersten Extrapolationspunkt im 3. Element, gemessen vom Schweißnahtübergang aus, entsprechend Abb. 7.1.

An der Kugelschale befindet sich der erste Extrapolationspunkt in einer Entfernung von 4,4mm (0,4t) vom Schweißnahtübergang und es zeigt eine gute Konvergenz des Verfahrens ab einer Netzfeinheit von 2mm. Dies entspricht dem ersten Extrapolationspunkt im 3. Element nach dem Schweißnahtübergang und ist in Abb. 7.2 ersichtlich.

Die Lage des ersten Extrapolationspunktes in Abhängigkeit der Netzfeinheit geht aus Tab. 7.1 hervor.



**Abb. 7.1:** Kennzeichnung des ersten Extrapolationspunktes am ebenen Boden bei unterschiedlichen Netzfeinheiten



**Abb. 7.2:** Kennzeichnung des ersten Extrapolationspunktes an der Kugelschale bei unterschiedlichen Netzfeinheiten

**Tab. 7.1:** Lage des ersten Extrapolationspunkt bei unterschiedlichen Netzfeinheiten am ebenen Boden und der Kugelschale

	0,75mm	1mm	2mm	5mm
Ebener Boden	4. Element	3. Element	2. Element	1. Element
Kugelschale	5. Element	4. Element	3. Element	1. Element

## 7.2 Problematik am CAB Modell, 2mm Radius Modell

Anhand der in Kapitel 6.1.1 und 6.1.2 ermittelten Daten für das CAB Modell ist die Absenkung der Strukturspannungen durch die Modellierung des CAB Radius ersichtlich.

Bei Modellierung des 2mm Radius bleibt die grundsätzliche Struktur des Modells erhalten. Die Strukturspannungen ändern sich daher auch nicht wesentlich. Eine Erweiterung des Extrapolationsverfahrens von Kapitel 6.1 für das 2mm Radius Modell wird in Kapitel 6.5 vorgestellt. Außerdem ist anzumerken, dass das 2mm Radius Modell durch die Modellierung eines Absolutradius ungeeignet für sehr kleine bzw. sehr große Bauteile ist.

Eine Problematik in Verbindung mit dem CAB sowie dem 2mm Radius Modell ist, dass die Ermüdungskurven in [1] auf dem Extrapolationsverfahren für das Modell Schweißnaht beruhen. Es liegen somit in [1] keine Ermüdungskurven für die so erhaltenen Spannungen vor, die auch einen Teil der Kerbwirkung enthalten.

# Kapitel 8

## Zusammenfassung

Das quadratische Extrapolationsverfahren am 2mm Radius Modell liefert in 4 von 8 Messungen die geringsten Abweichungen und in drei weiteren Messungen die zweitniedrigsten Abweichungen. Es weist so oft wie kein anderes der untersuchten Modelle die geringsten Abweichungen auf.

Das Extrapolationsverfahren am 2mm Radius Modell wurde erweitert, um den gleichen Ort für die Rissinitiierung wie bei den anderen Verfahren zu Grunde zu legen. Es zeigen sich in allen 8 Messungen konservative Strukturspannungswerte sowie eine geringe Schwankungsbreite von +0,16% bis +2,12%.

Die Untersuchung der Abhängigkeit der Ergebnisse des quadratischen Extrapolationsverfahrens von der Netzfeinheit zeigt folgendes: Gute Ergebnisse erhält man, wenn sich zwischen dem Element mit dem ersten Extrapolationspunkt und dem Schweißnahtübergang mindestens 2 Elemente befinden.

Ausgehend von der Spannungssingularität am Schweißnahtübergang ist mit ANSYS® Academic Student, Release 19.0 keine Auswertung mit der Methode der Linearisierung durch die Wand möglich. Daher konnte diese Methode für die Modelle Schweißnaht sowie keine Schweißnaht nicht angewandt werden.

Das Modell 2mm Radius hat mit der Linearisierung durch die Wand in drei von 8 Messungen die geringsten Abweichungen und in drei weiteren die zweitniedrigsten Abweichungen. Das 2mm Radius Modell weist den geringsten Schwankungsbereich der untersuchten Modelle auf.

Ein Vergleich der Linearisierung durch die Wand mit dem quadratischen Extrapolationsverfahren am jeweiligen Modell zeigt konservative Strukturspannungswerte für 14 von 16 Messungen. Die Untersuchung zeigt geringere Abweichungen in y Richtung als in z Richtung.

Die Haibach Methode 2mm entfernt liefert in 5 von 8 Messungen nicht konservative Strukturspannungswerte, davon 3 mit circa -8% Abweichung. Es tritt bei diesem Verfahren das Problem auf, dass aufgrund der Angabe eines Absolutwertes für den Abstand kein Bezug zur Werkstückgröße besteht und ist somit ungeeignet für sehr kleine bzw. sehr große Bauteile. Bei der Methode 0,15t gibt es im Gegensatz zur Haibach Methode einen Größenbezug und es zeigen sich in 7 von 8 Messungen konservative Strukturspannungswerte.

Am 2mm Radius Modell bleibt die grundsätzliche Struktur des Modells erhalten. Dies zeigt sich in keiner wesentlichen Veränderung der Strukturspannungen. Die Problematik an dieser Modellierungsart liegt an dem Absolutwert des Radius, wodurch kein Bezug zur Werkstückgröße besteht und die Methode ebenfalls ungeeignet für sehr kleine bzw. sehr große Werkstücke macht. Am CAB Modell ist eine Absenkung der Strukturspannungen anhand der in Kapitel 6.1.1 und 6.2.2 enthaltenen Daten ersichtlich.

Da sich die Ermüdungskurven in [1] auf das Extrapolationsverfahren am Modell Schweißnaht beziehen, liegen keine Ermüdungskurven für das CAB- sowie 2mm Radius Modell vor.

Bei der Methode der direkten Spannungsauswertung sollten aufgrund verfahrensbedingter Berücksichtigung der Kerbwirkung entsprechend angepasste Wöhlerkurven verwendet werden. Am 2mm Modell wird die Struktur des Modells nicht wesentlich verändert. Deswegen, sowie aufgrund der höheren Kerbwirkung durch den 2mm Radius, ergeben sich hohe konservative Abweichungen. Am CAB Modell ergibt sich eine wesentliche Veränderung der Steifigkeit, welche sich in einer Verminderung der Strukturspannungen zeigt. Das CAB Modell mit direkter Spannungsauswertung weist hohe Schwankungen auf. Grund dafür sind wechselseitige Einflüsse: Einerseits die im Verfahren enthaltene Kerbwirkung und andererseits die Verminderung der Strukturspannungen.

## **A Anhang**

Ebener Boden 2D Zustand 1.0v	Abweichung 0,002 mm	Abweichung 0,02 mm	Abweichung 0,1 mm	Abweichung 0,5 mm	Abweichung 0,75 mm	Abweichung 1 mm	Abweichung 2 mm	Abweichung 5 mm
lineare Extrapolation Modell: Schweißnaht	-3,45%	-3,99%	-3,41%	-2,74%	-1,47%	-3,90%	4,61%	10,79%
quadratische Extrapolation Modell: Schweißnaht	0,00%	0,00%	-0,01%	0,90%	2,19%	-0,10%	12,83%	20,99%
Membran+Biegespannungen Modell: Schweißnaht	50,37%	19,00%	5,33%	2,99%	-0,04%	-2,22%	0,60%	-1,39%
Halbach 2mm entfernt Modell: Schweißnaht	-7,97%	-8,99%	-8,10%	-7,40%	-8,37%	-7,03%	0,06%	0,72%
0,15* entfernt Modell: Schweißnaht	2,89%	2,79%	3,33%	4,56%	8,74%	12,37%	11,82%	6,59%
lineare Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	5,99%	6,07%	6,35%	6,93%	8,06%	7,06%	5,72%	-2,47%
quadratische Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	8,20%	8,88%	8,74%	10,07%	11,60%	10,06%	6,87%	-5,96%
lineare Extrapolation 1/3* entfernt Modell: keine Schweißnaht	-9,92%	-10,28%	-9,87%	-9,42%	-9,42%	-9,62%	-8,33%	-7,35%
quadratische Extrapolation 1/3* entfernt Modell: keine Schweißnaht	-7,47%	-7,60%	-7,48%	-7,51%	-7,66%	-7,67%	-6,59%	-4,03%
Membran+Biegespannungen Modell: keine Schweißnaht	108,74%	36,82%	15,06%	6,57%	2,78%	6,59%	-2,61%	-17,13%
Membran + Biegespannungen 1/3* entfernt Modell: keine Schweißnaht	-3,25%	-3,33%	-3,14%	-2,97%	-2,84%	-2,68%	-1,35%	-14,89%
Halbach 2mm entfernt Modell: keine Schweißnaht	0,68%	0,66%	0,79%	2,92%	1,26%	4,28%	-3,86%	-13,50%
0,15* entfernt Modell: keine Schweißnaht	11,27%	11,54%	11,54%	16,32%	16,63%	20,73%	7,88%	-12,77%
1/3* entfernt Modell: keine Schweißnaht	-6,82%	-6,71%	-6,33%	-5,62%	-4,91%	-5,14%	-7,60%	-14,36%
Direkte Auswertung Modell: CAB	0,29%	0,28%	0,48%	0,40%	2,20%	0,11%	2,39%	1,26%
lineare Extrapolation Modell: CAB	-16,00%	-15,86%	-15,79%	-15,55%	-15,59%	-16,48%	-14,76%	-11,03%
quadratische Extrapolation Modell: CAB	-13,08%	-12,80%	-12,95%	-12,50%	-12,92%	-13,24%	-11,00%	-5,62%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	-10,48%	-10,51%	-10,34%	-10,37%	-10,31%	-10,55%	-10,34%	-6,66%
Halbach 2mm entfernt Modell: CAB	-22,77%	-22,71%	-22,64%	-22,53%	-21,72%	-22,49%	-20,44%	-15,79%
0,15* entfernt Modell: CAB	-17,73%	-17,71%	-17,55%	-17,45%	-15,78%	-17,35%	-12,33%	-9,74%
Direkte Auswertung Modell: 2mm Radius	42,14%	42,13%	42,16%	39,96%	42,39%	44,93%	40,64%	kein Wert
lineare Extrapolation Modell: 2mm Radius	-8,40%	-8,50%	-8,18%	-7,98%	-7,84%	-7,57%	-9,43%	kein Wert
quadratische Extrapolation Modell: 2mm Radius	-5,46%	-5,47%	-4,93%	-4,56%	-4,26%	-4,24%	-6,58%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	-2,96%	-2,29%	-2,27%	-2,33%	-1,75%	-1,39%	0,25%	kein Wert
Halbach 2mm entfernt Modell: 2mm Radius	-14,28%	-14,35%	-14,37%	-14,33%	-13,78%	-12,80%	-13,79%	kein Wert
0,15* entfernt Modell: 2mm Radius	-6,83%	-7,01%	-6,88%	-6,39%	-5,89%	-5,03%	-0,87%	kein Wert
lineare Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	-1,82%	-1,71%	-1,60%	-1,44%	-1,19%	0,47%	-1,65%	kein Wert
quadratische Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	2,04%	2,29%	2,52%	2,62%	2,96%	5,46%	2,96%	kein Wert

Abb. A.1: Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 des ebenen Bodens  $\sigma_y$  Zustand 1

Ebener Boden 2D Zustand $2\sigma_y$	Abweichung 0,002 mm	Abweichung 0,02 mm	Abweichung 0,1 mm	Abweichung 0,5 mm	Abweichung 0,75 mm	Abweichung 1 mm	Abweichung 2 mm	Abweichung 5 mm
lineare Extrapolation Modell: Schweißnaht	-3,78%	-3,72%	-3,73%	-3,04%	-1,74%	-4,23%	4,48%	11,04%
quadratische Extrapolation Modell: Schweißnaht	0,00%	0,02%	0,02%	0,94%	2,29%	-0,03%	13,14%	21,98%
Membran+Biegespannungen Modell: Schweißnaht	51,78%	19,50%	5,69%	2,92%	0,27%	-1,92%	0,92%	-1,07%
Halbach 2mm entfernt Modell: Schweißnaht	-8,61%	-9,03%	-8,75%	-8,03%	-9,01%	-7,66%	-0,36%	0,54%
0,15* entfernt Modell: Schweißnaht	2,61%	2,52%	3,06%	4,31%	8,54%	12,19%	11,91%	6,72%
lineare Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	8,81%	8,90%	9,19%	9,80%	10,99%	9,93%	8,50%	0,59%
quadratische Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	11,44%	12,16%	12,00%	13,41%	15,04%	13,41%	9,89%	-2,48%
lineare Extrapolation 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	-8,75%	-9,13%	-8,70%	-8,81%	-8,23%	-8,47%	-6,98%	-6,02%
quadratische Extrapolation 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	-5,83%	-6,00%	-5,89%	-5,95%	-6,10%	-6,14%	-4,78%	-2,17%
Membran+Biegespannungen Modell: keine Schweißnaht	117,88%	42,11%	19,20%	10,30%	6,34%	10,36%	0,80%	-14,24%
Membran + Biegespannungen 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	-1,18%	-1,27%	-1,06%	-0,89%	-0,75%	-0,58%	0,80%	-13,16%
Halbach 2mm entfernt Modell: keine Schweißnaht	2,86%	2,84%	2,97%	5,22%	3,49%	6,66%	-1,94%	-11,21%
0,15* entfernt Modell: keine Schweißnaht	14,15%	14,44%	14,42%	19,48%	19,79%	24,12%	10,98%	-10,06%
1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	-5,22%	-5,11%	-4,70%	-3,95%	-3,20%	-3,45%	-6,08%	-12,56%
Direkte Auswertung Modell: CAB	0,22%	0,21%	0,42%	0,35%	2,22%	0,11%	2,43%	1,41%
lineare Extrapolation Modell: CAB	-16,63%	-16,49%	-16,42%	-16,16%	-16,20%	-17,15%	-15,28%	-11,42%
quadratische Extrapolation Modell: CAB	-13,36%	-13,06%	-13,23%	-12,75%	-13,15%	-13,49%	-11,12%	-5,50%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	-10,49%	-10,52%	-10,35%	-10,38%	-10,31%	-10,56%	-10,36%	-6,64%
Halbach 2mm entfernt Modell: CAB	-23,75%	-23,68%	-23,61%	-23,49%	-22,66%	-23,45%	-21,35%	-16,52%
0,15* entfernt Modell: CAB	-18,43%	-18,40%	-18,24%	-18,14%	-16,41%	-18,03%	-12,90%	-10,15%
Direkte Auswertung Modell: 2mm Radius	42,35%	42,35%	42,38%	40,17%	42,66%	45,26%	41,04%	kein Wert
lineare Extrapolation Modell: 2mm Radius	-9,05%	-9,14%	-8,83%	-8,62%	-8,48%	-8,20%	-10,13%	kein Wert
quadratische Extrapolation Modell: 2mm Radius	-5,77%	-5,76%	-5,24%	-4,84%	-4,52%	-4,49%	-6,95%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	-2,30%	-2,32%	-2,30%	-2,36%	-1,78%	-1,42%	0,23%	kein Wert
Halbach 2mm entfernt Modell: 2mm Radius	-15,24%	-15,31%	-15,33%	-15,29%	-14,73%	-13,73%	-14,75%	kein Wert
0,15* entfernt Modell: 2mm Radius	-7,51%	-7,69%	-7,55%	-7,06%	-6,54%	-5,68%	-1,45%	kein Wert
lineare Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	-2,12%	-2,01%	-1,89%	-1,73%	-1,47%	0,23%	-1,98%	kein Wert
quadratische Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	2,12%	2,37%	2,59%	2,69%	3,00%	5,63%	3,02%	kein Wert

Abb. A.2: Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 des ebenen Bodens  $\sigma_y$  Zustand 2

Ebener Boden_2D Zustand 1_oz	Abweichung 0,002 mm	Abweichung 0,02 mm	Abweichung 0,1 mm	Abweichung 0,5 mm	Abweichung 0,75 mm	Abweichung 1mm	Abweichung 2 mm	Abweichung 5 mm
lineare Extrapolation Modell: Schweißnaht	0,17%	0,13%	0,17%	0,32%	0,44%	-0,60%	2,57%	9,82%
quadratische Extrapolation Modell: Schweißnaht	0,00%	-0,09%	-0,93%	0,23%	0,08%	-1,23%	4,07%	15,26%
Membran+Biegespannungen Modell: Schweißnaht	34,96%	21,67%	15,98%	13,74%	11,47%	9,30%	8,74%	6,91%
Halbach 2mm entfernt Modell: Schweißnaht	-2,62%	-2,73%	-2,04%	-2,04%	-3,25%	-2,93%	1,71%	4,88%
0,15* entfernt Modell: Schweißnaht	1,00%	0,98%	1,14%	1,38%	2,22%	3,63%	8,97%	7,86%
lineare Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	-2,13%	-2,11%	-2,01%	-1,85%	-1,93%	-2,08%	-5,26%	0,78%
quadratische Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	-3,13%	-2,91%	-2,97%	-2,58%	-2,89%	-3,07%	-7,80%	3,96%
lineare Extrapolation 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	-5,87%	-5,94%	-5,82%	-5,70%	-5,69%	-5,64%	-5,64%	-9,94%
quadratische Extrapolation 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	-6,41%	-6,38%	-6,41%	-6,32%	-6,17%	-6,36%	-6,63%	-14,03%
Membran+Biegespannungen Modell: keine Schweißnaht	92,65%	43,65%	28,94%	21,75%	21,47%	20,24%	15,14%	4,69%
Membran + Biegespannungen 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	-3,43%	-3,45%	-3,35%	-3,20%	-3,22%	-2,91%	-2,74%	-3,15%
Halbach 2mm entfernt Modell: keine Schweißnaht	-4,43%	-4,43%	-4,44%	-4,22%	-3,91%	-3,93%	-10,24%	0,67%
0,15* entfernt Modell: keine Schweißnaht	-1,17%	-1,07%	-0,99%	0,13%	-2,96%	-1,60%	4,11%	3,89%
1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	-6,57%	-6,55%	-6,42%	-6,12%	-6,46%	-5,88%	-9,91%	-3,11%
Direkte Auswertung Modell: CAB	-0,69%	-0,70%	-0,55%	-0,63%	-0,18%	-0,45%	0,43%	0,53%
lineare Extrapolation Modell: CAB	-4,72%	-4,71%	-4,59%	-4,61%	-4,67%	-4,88%	-4,70%	-2,30%
quadratische Extrapolation Modell: CAB	-4,84%	-4,81%	-4,75%	-4,63%	-4,95%	-5,12%	-4,57%	-1,16%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	-1,88%	-1,89%	-1,74%	-1,84%	-1,85%	-1,89%	-1,72%	-0,47%
Halbach 2mm entfernt Modell: CAB	-8,56%	-8,56%	-8,45%	-8,52%	-8,30%	-8,54%	-7,94%	-5,73%
0,15* entfernt Modell: CAB	-6,80%	-6,80%	-6,67%	-6,76%	-6,37%	-6,73%	-4,97%	-3,51%
Direkte Auswertung Modell: 2mm Radius	14,43%	14,42%	14,42%	13,67%	15,58%	15,94%	16,08%	kein Wert
lineare Extrapolation Modell: 2mm Radius	-1,39%	-1,45%	-1,34%	-1,32%	-1,20%	-1,17%	-2,30%	kein Wert
quadratische Extrapolation Modell: 2mm Radius	-1,65%	-1,69%	-1,52%	-1,55%	-1,30%	-1,34%	-2,95%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	6,00%	5,97%	6,01%	5,89%	6,30%	6,47%	7,16%	kein Wert
Halbach 2mm entfernt Modell: 2mm Radius	-4,76%	-4,79%	-4,76%	-4,83%	-4,75%	-4,52%	-4,28%	kein Wert
0,15* entfernt Modell: 2mm Radius	-2,25%	-2,29%	-2,24%	-2,31%	-2,13%	-2,04%	0,69%	kein Wert
lineare Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	0,64%	0,67%	0,67%	0,69%	0,77%	1,09%	0,61%	kein Wert
quadratische Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	0,50%	0,59%	0,64%	0,73%	0,83%	1,27%	0,63%	kein Wert

Abb. A.3: Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 des ebenen Bodens  $\sigma_z$  Zustand 1

Ebener Boden 2D Zustand 2 oz	Abweichung 0,002 mm	Abweichung 0,02 mm	Abweichung 0,1 mm	Abweichung 0,5 mm	Abweichung 0,75 mm	Abweichung 1 mm	Abweichung 2 mm	Abweichung 5 mm
lineare Extrapolation Modell: Schweißnaht	0,11%	0,08%	-0,11%	0,26%	0,37%	-0,62%	2,40%	9,35%
quadratische Extrapolation Modell: Schweißnaht	0,00%	-0,06%	-0,02%	0,25%	0,10%	-1,16%	3,90%	14,67%
Membran+Biegespannungen Modell: Schweißnaht	33,34%	20,65%	15,21%	13,08%	10,90%	8,83%	8,31%	6,56%
Halbach 2mm entfernt Modell: Schweißnaht	-3,05%	-3,15%	-3,07%	-3,06%	-3,69%	-3,36%	1,10%	4,17%
0,15* $\pi$ entfernt Modell: Schweißnaht	0,58%	0,56%	0,71%	0,94%	1,73%	3,06%	8,26%	7,21%
lineare Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	0,65%	0,68%	0,76%	0,92%	0,84%	0,70%	-2,49%	3,63%
quadratische Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	-0,36%	-0,16%	-0,22%	0,16%	-0,16%	-0,32%	-5,05%	6,85%
lineare Extrapolation 1/3* $\pi$ entfernt Modell: keine Schweißnaht	-3,68%	-3,74%	-3,62%	-3,52%	-3,45%	-3,47%	-3,44%	-7,80%
quadratische Extrapolation 1/3* $\pi$ entfernt Modell: keine Schweißnaht	-4,14%	-4,11%	-4,05%	-3,91%	-4,26%	-4,11%	-4,31%	-11,81%
Membran+Biegespannungen Modell: keine Schweißnaht	95,02%	46,21%	31,56%	24,43%	24,16%	22,91%	17,87%	7,53%
Membran + Biegespannungen 1/3* $\pi$ entfernt Modell: keine Schweißnaht	-1,39%	-1,42%	-1,32%	-1,17%	-1,18%	-0,88%	-0,73%	-1,04%
Halbach 2mm entfernt Modell: keine Schweißnaht	-2,19%	-2,20%	-2,21%	-2,00%	-1,69%	-1,73%	-8,02%	3,05%
0,15* $\pi$ entfernt Modell: keine Schweißnaht	1,10%	1,20%	1,28%	2,38%	2,38%	0,62%	6,51%	6,45%
1/3* $\pi$ entfernt Modell: keine Schweißnaht	-4,46%	-4,43%	-4,31%	-4,02%	-4,35%	-3,78%	-7,83%	-0,93%
Direkte Auswertung Modell: CAB	-0,51%	-0,52%	-0,38%	-0,46%	-0,01%	-0,27%	0,57%	0,72%
lineare Extrapolation Modell: CAB	-4,37%	-4,36%	-4,25%	-4,26%	-4,33%	-4,54%	-4,33%	-2,04%
quadratische Extrapolation Modell: CAB	-4,38%	-4,35%	-4,29%	-4,17%	-4,47%	-4,67%	-4,10%	-0,81%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	-1,67%	-1,68%	-1,54%	-1,64%	-1,65%	-1,68%	-1,52%	-0,30%
Halbach 2mm entfernt Modell: CAB	-8,56%	-8,55%	-8,45%	-8,52%	-8,31%	-8,54%	-7,96%	-5,83%
0,15* $\pi$ entfernt Modell: CAB	-6,68%	-6,68%	-6,55%	-6,64%	-6,27%	-6,61%	-4,93%	-3,51%
Direkte Auswertung Modell: 2mm Radius	13,46%	13,45%	13,45%	12,73%	14,56%	14,92%	15,08%	kein Wert
lineare Extrapolation Modell: 2mm Radius	-1,59%	-1,64%	-1,54%	-1,53%	-1,42%	-1,38%	-2,48%	kein Wert
quadratische Extrapolation Modell: 2mm Radius	-1,76%	-1,79%	-1,64%	-1,66%	-1,41%	-1,44%	-3,02%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	5,43%	5,41%	5,45%	5,33%	5,72%	5,88%	6,54%	kein Wert
Halbach 2mm entfernt Modell: 2mm Radius	-5,29%	-5,31%	-5,29%	-5,35%	-5,28%	-5,06%	-4,84%	kein Wert
0,15* $\pi$ entfernt Modell: 2mm Radius	-2,79%	-2,77%	-2,72%	-2,78%	-2,62%	-2,53%	0,08%	kein Wert
lineare Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	0,56%	0,59%	0,59%	0,61%	0,69%	1,00%	0,52%	kein Wert
quadratische Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	0,49%	0,58%	0,63%	0,71%	0,81%	1,24%	0,59%	kein Wert

Abb. A.4: Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 des ebenen Bodens  $\sigma_z$  Zustand 2

Kugelschale 2D Zustand 1 $\sigma_y$	Abweichung 0,02 mm	Abweichung 0,1 mm	Abweichung 0,5 mm	Abweichung 0,75 mm	Abweichung 1 mm	Abweichung 2 mm	Abweichung 5 mm
lineare Extrapolation Modell: Schweißnaht	-0,72%	-0,65%	-0,51%	-0,61%	-0,50%	-2,20%	0,93%
quadratische Extrapolation Modell: Schweißnaht	0,00%	0,10%	0,29%	0,35%	0,25%	-1,71%	3,09%
Membran+Biegespannungen Modell: Schweißnaht	16,47%	6,76%	0,83%	0,11%	-0,16%	-1,22%	-4,04%
Halbach 2mm entfernt Modell: Schweißnaht	3,58%	3,65%	4,39%	3,96%	4,71%	8,09%	4,41%
0,15*t entfernt Modell: Schweißnaht	6,59%	6,69%	7,72%	7,08%	9,42%	13,05%	5,73%
lineare Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	-1,23%	-1,13%	-1,16%	-0,69%	-0,58%	0,39%	6,88%
quadratische Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	-1,20%	-0,95%	-1,14%	-0,19%	-0,19%	1,85%	6,68%
lineare Extrapolation 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	-3,23%	-3,39%	-3,04%	-3,11%	-2,82%	-2,48%	10,10%
quadratische Extrapolation 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	-3,61%	-3,95%	-3,20%	-3,27%	-2,9%	-1,79%	15,17%
Membran+Biegespannungen Modell: keine Schweißnaht	24,71%	6,50%	-2,63%	-4,70%	-5,45%	-12,52%	-17,27%
Membran + Biegespannungen 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	0,71%	0,71%	0,62%	0,7%	0,91%	-2,51%	-11,74%
Halbach 2mm entfernt Modell: keine Schweißnaht	3,11%	3,25%	4,48%	5,30%	5,58%	8,94%	-7,54%
0,15*t entfernt Modell: keine Schweißnaht	7,15%	7,34%	9,10%	10,69%	13,84%	12,72%	-8,72%
1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	9,37%	9,54%	11,47%	12,70%	19,66%	15,27%	-9,45%
Direkte Auswertung Modell: CAB	27,23%	27,20%	27,00%	26,38%	27,16%	28,83%	24,31%
lineare Extrapolation Modell: CAB	-2,47%	-2,52%	-2,40%	-2,60%	-2,45%	-2,31%	-1,28%
quadratische Extrapolation Modell: CAB	-2,18%	-2,23%	-2,04%	-1,99%	-2,08%	-1,21%	0,69%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	-0,06%	-0,12%	-0,08%	0,08%	0,23%	0,59%	7,09%
Halbach 2mm entfernt Modell: CAB	-1,65%	-1,67%	-1,44%	-1,36%	-1,23%	-0,49%	10,19%
0,15*t entfernt Modell: CAB	-0,15%	-0,15%	0,15%	0,33%	0,38%	3,15%	12,67%
Direkte Auswertung Modell: 2mm Radius	49,72%	49,60%	48,18%	50,95%	43,78%	48,31%	kein Wert
lineare Extrapolation Modell: 2mm Radius	-1,84%	-1,85%	-1,71%	-1,67%	-1,53%	-2,46%	kein Wert
quadratische Extrapolation Modell: 2mm Radius	-1,33%	-1,17%	-1,05%	-1,14%	-0,84%	-2,46%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	0,24%	0,23%	0,31%	0,63%	0,19%	1,76%	kein Wert
Halbach 2mm entfernt Modell: 2mm Radius	0,18%	0,16%	0,40%	0,67%	0,75%	1,79%	kein Wert
0,15*t entfernt Modell: 2mm Radius	2,15%	2,12%	2,46%	2,68%	3,20%	8,08%	kein Wert
lineare Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	-0,10%	-0,13%	0,00%	0,15%	0,36%	-0,08%	kein Wert
quadratische Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	0,93%	1,03%	1,11%	1,30%	1,64%	0,85%	kein Wert

Abb. A.5: Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 der Kugelschale  $\sigma_y$  Zustand 1

Kugelschale 2D Zustand $2\sigma_y$	Abweichung 0,02 mm	Abweichung 0,1 mm	Abweichung 0,5 mm	Abweichung 0,75 mm	Abweichung 1 mm	Abweichung 2 mm	Abweichung 5 mm
lineare Extrapolation Modell: Schweißnaht	-0,25%	-0,17%	-0,09%	-0,07%	-0,04%	-1,73%	0,46%
quadratische Extrapolation Modell: Schweißnaht	0,00%	0,23%	0,37%	0,40%	0,46%	-1,63%	1,45%
Membran+Biegespannungen Modell: Schweißnaht	11,67%	3,00%	-2,98%	-2,98%	-3,12%	-4,15%	-8,92%
Halbach 2mm entfernt Modell: Schweißnaht	5,73%	5,80%	6,34%	6,03%	6,69%	9,30%	1,85%
0,15*t entfernt Modell: Schweißnaht	7,96%	8,05%	8,83%	8,33%	10,42%	12,50%	2,08%
lineare Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	1,15%	1,27%	1,30%	1,52%	1,44%	1,76%	1,78%
quadratische Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	2,50%	2,76%	2,81%	3,13%	2,77%	3,76%	0,89%
lineare Extrapolation 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	-0,60%	-0,55%	-0,62%	-0,43%	-0,30%	0,03%	7,41%
quadratische Extrapolation 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	-0,39%	-0,30%	-0,31%	-0,14%	-0,03%	0,87%	11,83%
Membran+Biegespannungen Modell: keine Schweißnaht	8,33%	-1,52%	-7,29%	-8,89%	-9,79%	-14,82%	-21,69%
Membran + Biegespannungen 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	-2,35%	-2,33%	-2,38%	-2,38%	-2,31%	-5,54%	-14,85%
Halbach 2mm entfernt Modell: keine Schweißnaht	8,45%	8,63%	9,13%	9,45%	9,41%	9,84%	-10,67%
0,15*t entfernt Modell: keine Schweißnaht	11,90%	12,08%	12,87%	13,62%	15,21%	9,33%	-12,40%
1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	13,83%	14,00%	14,85%	15,23%	19,26%	8,82%	-13,50%
Direkte Auswertung Modell: CAB	27,33%	27,33%	26,92%	26,41%	27,05%	28,09%	17,66%
lineare Extrapolation Modell: CAB	-0,38%	-0,37%	-0,30%	-0,29%	-0,18%	-0,27%	0,57%
quadratisch Extrapolation Modell: CAB	-0,31%	-0,30%	-0,20%	-0,24%	0,03%	0,26%	1,33%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	-1,37%	-1,40%	-1,38%	-1,28%	-1,00%	-0,24%	4,45%
Halbach 2mm entfernt Modell: CAB	2,81%	2,84%	2,99%	3,06%	3,14%	3,89%	9,79%
0,15*t entfernt Modell: CAB	3,88%	3,91%	4,11%	4,26%	4,28%	6,81%	11,18%
Direkte Auswertung Modell: 2mm Radius	45,53%	45,38%	43,86%	46,64%	39,49%	42,89%	kein Wert
lineare Extrapolation Modell: 2mm Radius	-0,53%	-0,48%	-0,41%	-0,33%	-0,27%	-1,05%	kein Wert
quadratisch Extrapolation Modell: 2mm Radius	-0,46%	-0,17%	-0,17%	-0,10%	0,03%	-1,32%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	-1,54%	-1,57%	-1,48%	-1,16%	-1,63%	0,05%	kein Wert
Halbach 2mm entfernt Modell: 2mm Radius	3,51%	3,48%	3,68%	3,86%	4,00%	5,03%	kein Wert
0,15*t entfernt Modell: 2mm Radius	4,91%	4,87%	5,16%	5,26%	5,80%	10,09%	kein Wert
lineare Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	0,24%	0,29%	0,33%	0,51%	0,61%	0,39%	kein Wert
quadratische Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	0,94%	1,06%	1,09%	1,32%	1,48%	1,16%	kein Wert

Abb. A.6: Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 der Kugelschale  $\sigma_y$  Zustand 2

Kugelschale 2D Zustand 1 $\sigma_z$	Abweichung 0,02 mm	Abweichung 0,1 mm	Abweichung 0,5 mm	Abweichung 0,75 mm	Abweichung 1 mm	Abweichung 2 mm	Abweichung 5 mm
lineare Extrapolation Modell: Schweißnaht	0,08%	0,11%	0,12%	0,10%	0,09%	-0,54%	0,83%
quadratische Extrapolation Modell: Schweißnaht	0,00%	0,05%	0,07%	0,10%	0,09%	-0,72%	1,49%
Membran+Biegespannungen Modell: Schweißnaht	12,93%	9,91%	7,89%	7,06%	6,18%	5,23%	2,71%
Halbach 2mm entfernt Modell: Schweißnaht	0,68%	0,69%	0,81%	0,56%	0,63%	1,87%	2,91%
0,15*t entfernt Modell: Schweißnaht	1,47%	1,49%	1,62%	1,28%	1,66%	3,87%	3,57%
lineare Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	4,72%	4,76%	4,67%	4,76%	4,67%	4,93%	5,70%
quadratische Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	4,51%	4,61%	4,42%	4,64%	4,54%	5,26%	6,63%
lineare Extrapolation 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	3,98%	3,90%	4,00%	3,93%	4,04%	3,90%	3,11%
quadratische Extrapolation 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	3,67%	3,53%	3,77%	3,64%	3,82%	3,87%	3,01%
Membran+Biegespannungen Modell: keine Schweißnaht	32,93%	24,15%	20,05%	18,56%	18,15%	13,55%	9,62%
Membran + Biegespannungen 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	8,65%	8,65%	8,64%	8,74%	8,78%	9,13%	7,55%
Halbach 2mm entfernt Modell: keine Schweißnaht	5,23%	5,26%	5,43%	5,78%	5,65%	3,55%	7,60%
0,15*t entfernt Modell: keine Schweißnaht	6,31%	6,34%	6,68%	6,50%	6,12%	7,83%	8,28%
1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	6,91%	6,94%	7,03%	7,29%	6,39%	10,95%	8,71%
Direkte Auswertung Modell: CAB	8,71%	8,71%	8,65%	8,44%	8,77%	9,47%	9,21%
lineare Extrapolation Modell: CAB	1,52%	1,53%	1,55%	1,52%	1,57%	1,36%	2,74%
quadratische Extrapolation Modell: CAB	1,37%	1,38%	1,42%	1,42%	1,48%	1,32%	3,80%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	5,10%	5,09%	5,09%	5,08%	5,16%	5,33%	6,56%
Halbach 2mm entfernt Modell: CAB	1,19%	1,19%	1,22%	1,22%	1,20%	1,48%	4,99%
0,15*t entfernt Modell: CAB	1,62%	1,62%	1,66%	1,67%	1,66%	2,49%	5,73%
Direkte Auswertung Modell: 2mm Radius	12,31%	12,27%	11,88%	12,53%	10,75%	12,74%	kein Wert
lineare Extrapolation Modell: 2mm Radius	-0,36%	-0,35%	-0,33%	-0,30%	-0,30%	-0,86%	kein Wert
quadratische Extrapolation Modell: 2mm Radius	-0,47%	-0,39%	-0,41%	-0,33%	-0,37%	-1,27%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	4,28%	4,28%	4,26%	4,35%	4,15%	4,79%	kein Wert
Halbach 2mm entfernt Modell: 2mm Radius	-0,35%	-0,35%	-0,33%	-0,31%	-0,34%	0,33%	kein Wert
0,15*t entfernt Modell: 2mm Radius	0,19%	0,19%	0,22%	0,18%	0,36%	2,03%	kein Wert
lineare Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	0,15%	0,15%	0,16%	0,21%	0,22%	0,00%	kein Wert
quadratische Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	0,16%	0,22%	0,20%	0,26%	0,26%	-0,06%	kein Wert

Abb. A.7: Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 der Kugelschale  $\sigma_z$  Zustand 1

Kugelschale 2D Zustand 2 az	Abweichung 0,02 mm	Abweichung 0,1 mm	Abweichung 0,5 mm	Abweichung 0,75 mm	Abweichung 1mm	Abweichung 2 mm	Abweichung 5 mm
lineare Extrapolation Modell: Schweißnaht	-6,92%	-6,90%	-6,88%	-6,90%	-6,87%	-7,43%	-5,45%
quadratische Extrapolation Modell: Schweißnaht	0,00%	0,16%	0,22%	0,23%	-0,09%	-0,45%	2,20%
Membran+Biegespannungen Modell: Schweißnaht	16,98%	14,69%	13,13%	12,54%	11,87%	11,12%	9,80%
Halbach 2mm entfernt Modell: Schweißnaht	-8,89%	-8,88%	-8,76%	-8,95%	-8,79%	-7,66%	-4,09%
0,15*1 entfernt Modell: Schweißnaht	-5,87%	-5,85%	-5,72%	-5,96%	-5,54%	-3,62%	-1,14%
lineare Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	20,08%	20,21%	20,02%	20,31%	20,29%	20,75%	22,49%
quadratische Extrapolation Modell: keine Schweißnaht	29,01%	29,14%	29,07%	29,22%	28,99%	29,61%	30,47%
lineare Extrapolation 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	7,76%	7,72%	7,76%	7,86%	7,91%	8,63%	9,71%
quadratische Extrapolation 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	15,37%	15,30%	15,10%	15,53%	15,96%	16,85%	18,62%
Membran+Biegespannungen Modell: keine Schweißnaht	47,10%	43,16%	41,06%	40,31%	39,86%	37,61%	34,59%
Membran + Biegespannungen 1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	25,52%	25,53%	25,54%	25,64%	25,78%	25,34%	23,42%
Halbach 2mm entfernt Modell: keine Schweißnaht	17,43%	17,48%	17,60%	17,85%	17,77%	17,28%	18,31%
0,15*1 entfernt Modell: keine Schweißnaht	21,63%	21,67%	21,89%	22,01%	22,10%	21,82%	21,19%
1/3*z entfernt Modell: keine Schweißnaht	24,18%	24,22%	24,32%	24,51%	24,97%	24,83%	23,00%
Direkte Auswertung Modell: CAB	10,53%	10,53%	10,48%	10,35%	10,71%	11,70%	15,43%
lineare Extrapolation Modell: CAB	-6,90%	-6,99%	-6,84%	-6,91%	-6,90%	-7,17%	-5,81%
quadratische Extrapolation Modell: CAB	-0,26%	-0,35%	-0,18%	-0,04%	-0,27%	-0,34%	-1,69%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	9,56%	9,54%	9,52%	9,56%	9,66%	9,98%	13,52%
Halbach 2mm entfernt Modell: CAB	-9,95%	-9,95%	-9,91%	-9,89%	-9,88%	-9,51%	-2,61%
0,15*1 entfernt Modell: CAB	-7,37%	-7,37%	-7,32%	-7,28%	-7,27%	-6,31%	0,55%
Direkte Auswertung Modell: 2mm Radius	9,96%	9,92%	9,62%	10,20%	8,72%	10,49%	kein Wert
lineare Extrapolation Modell: 2mm Radius	-12,02%	-11,98%	-11,95%	-11,80%	-11,90%	-12,57%	kein Wert
quadratische Extrapolation Modell: 2mm Radius	-5,58%	-5,25%	-5,31%	-5,23%	-5,47%	-6,07%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	5,17%	5,17%	5,15%	5,22%	5,06%	5,65%	kein Wert
Halbach 2mm entfernt Modell: 2mm Radius	-14,46%	-14,47%	-14,44%	-14,41%	-14,39%	-13,77%	kein Wert
0,15*1 entfernt Modell: 2mm Radius	-11,85%	-11,86%	-11,80%	-11,84%	-11,60%	-10,05%	kein Wert
lineare Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	-6,64%	-6,58%	-6,62%	-6,52%	-6,53%	-6,46%	kein Wert
quadratische Extrapolation Schnittpunkt Modell: 2mm Radius	0,48%	0,56%	0,39%	0,65%	0,89%	0,31%	kein Wert

Abb. A.8: Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 der Kugelschale  $\sigma_z$  Zustand 2

	Abweichung 0,002 mm	Abweichung 0,02 mm	Abweichung 0,1 mm	Abweichung 0,5 mm	Abweichung 0,75 mm	Abweichung 1 mm	Abweichung 2 mm	Abweichung 5 mm
Ebener Boden 2D Zustand 1 oy								
quadratische Extrapolation Modell: CAB	0,00%	0,32%	0,15%	0,67%	0,19%	-0,18%	2,39%	8,59%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	2,99%	2,95%	3,15%	3,12%	3,19%	2,92%	3,15%	7,38%
quadratische Extrapolation Modell: 2mm Radius	0,00%	-0,01%	0,56%	0,95%	1,27%	1,29%	-1,18%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	3,38%	3,36%	3,37%	3,31%	3,92%	4,30%	6,04%	kein Wert
Ebener Boden 2D Zustand 2 oy								
quadratische Extrapolation Modell: CAB	0,00%	0,35%	0,15%	0,70%	0,23%	-0,16%	2,58%	9,07%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	3,31%	3,28%	3,47%	3,44%	3,51%	3,22%	3,45%	7,75%
quadratisch Extrapolation Modell: 2mm Radius	0,00%	0,00%	0,56%	0,98%	1,32%	1,36%	-1,25%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	3,68%	3,66%	3,68%	3,62%	4,23%	4,61%	6,37%	kein Wert
Ebener Boden 2D Zustand 1 oz								
quadratische Extrapolation Modell: CAB	0,00%	0,03%	0,10%	0,23%	-0,11%	-0,29%	0,29%	3,87%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	3,12%	3,11%	3,26%	3,15%	3,14%	3,10%	3,28%	4,59%
quadratische Extrapolation Modell: 2mm Radius	0,00%	-0,04%	0,13%	0,10%	0,37%	0,32%	-1,31%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	7,78%	7,75%	7,80%	7,67%	8,09%	8,26%	8,96%	kein Wert
Ebener Boden 2D Zustand 2 oz								
quadratische Extrapolation Modell: CAB	0,00%	0,04%	0,10%	0,22%	-0,09%	-0,30%	0,30%	3,73%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	2,84%	2,83%	2,98%	2,87%	2,86%	2,82%	2,99%	4,27%
quadratisch Extrapolation Modell: 2mm Radius	0,00%	-0,03%	0,13%	0,10%	0,36%	0,33%	-1,28%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	7,32%	7,30%	7,34%	7,22%	7,61%	7,78%	8,46%	kein Wert

Abb. A.9: Daten zu Grafiken aus Kapitel 6.6 des ebenen Bodens

	Abweichung 0,02 mm	Abweichung 0,1 mm	Abweichung 0,5 mm	Abweichung 0,75 mm	Abweichung 1 mm	Abweichung 2 mm	Abweichung 5 mm
Kugelschale 2D Zustand 1 $\sigma_y$							
quadratische Extrapolation Modell: CAB	0,00%	-0,05%	0,14%	0,19%	0,11%	1,00%	2,94%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	2,17%	2,11%	2,15%	2,31%	2,47%	2,83%	9,48%
quadratische Extrapolation Modell: 2mm Radius	0,00%	0,16%	0,28%	0,19%	0,50%	-1,15%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	1,59%	1,58%	1,66%	1,98%	1,54%	3,13%	kein Wert
Kugelschale 2D Zustand 2 $\sigma_y$							
quadratische Extrapolation Modell: CAB	0,00%	0,02%	0,12%	0,07%	0,34%	0,57%	1,64%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	-1,07%	-1,09%	-1,07%	-0,98%	-0,69%	0,07%	4,78%
quadratisch Extrapolation Modell: 2mm Radius	0,00%	0,29%	0,29%	0,36%	0,49%	-0,86%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	-1,09%	-1,12%	-1,03%	-0,70%	-1,18%	0,51%	kein Wert
Kugelschale 2D Zustand 1 $\sigma_z$							
quadratische Extrapolation Modell: CAB	0,00%	0,02%	0,05%	0,06%	0,11%	-0,05%	2,40%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	3,69%	3,67%	3,67%	3,66%	3,74%	3,91%	5,12%
quadratische Extrapolation Modell: 2mm Radius	0,00%	0,08%	0,06%	0,15%	0,10%	-0,80%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	4,77%	4,78%	4,75%	4,84%	4,64%	5,28%	kein Wert
Kugelschale 2D Zustand 2 $\sigma_z$							
quadratische Extrapolation Modell: CAB	0,00%	-0,10%	0,08%	0,21%	-0,01%	-0,08%	1,95%
Membran+Biegespannungen Modell: CAB	9,84%	9,83%	9,80%	9,85%	9,95%	10,26%	13,82%
quadratisch Extrapolation Modell: 2mm Radius	0,00%	0,36%	0,30%	0,38%	0,12%	-0,51%	kein Wert
Membran+Biegespannungen Modell: 2mm Radius	11,40%	11,39%	11,37%	11,44%	11,27%	11,90%	kein Wert

Abb. A.10: Daten zu Grafiken aus Kapitel 6.6 der Kugelschale

## Literaturverzeichnis

- [1] *DIN EN 13445-3:2017-12*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Dez. 2017.
- [2] M. Muscart, K. Degiorgio und J. Wood. „COMPARISON BETWEEN DIFFERENT APPROACHES FOR THE EVALUATION OF THE HOT SPOT STRUCTURAL STRESS IN WELDED PRESSURE VESSEL COMPONENTS Zürich“. In: ASME Pressure Vessels and Piping Conference. (26.–30. Juli 2009). Prague, Czech Republic, 2009, S. 1–9.
- [3] *ENTWURF ÖNORM EN 13445-3/A3: Unbefeuerte Druckbehälter Teil 3: Konstruktion (Änderung)*. Wien: Austrian Standards, März 2017.
- [4] A. Hobbacher. *Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile*. 1. Aufl. DVS Verlag, 1997. ISBN: 3-87155-496-0.
- [5] F. Rauscher. *Skriptum zur Vorlesung Apparatebau*. Technische Universität Wien: Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik, 2016.
- [6] J.-M. Lee, J.-K. Seo, M.-H. Kim, S.-B. Shin, M.-S. Han, J.-S. Park und M. Mahendran. „Comparison of hot spot stress evaluation methods for welded structures“. In: *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 11 (2010), S. 200–210.
- [7] K. Rother und J. Rudolph. „Fatigue assessment of welded structures: practical aspects for stress analysis and fatigue assessment“. In: *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 34 28 (2010), S. 177–204.
- [8] U. Innsbruck. „Kurze Einführung in die Methode der finiten Elemente“. In: Ergänzung zum Skriptum zur Vorlesung Baustatik 1. (). 2018.
- [9] J. Irsigler. „Mechanische Grundlagen und Numerik dreidimensionaler Schalenelemente“. In: (). 2013.

- [10] A. F. Hobbacher. „The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components – A comprehensive code recently updated“. In: *International Journal of Fatigue* 31 9 (2009), S. 50–58.
- [11] E. Niemi. *Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components*. 1. Aufl. Woodhead Publishing Limited, 1995. ISBN: 0-85709-320-7.
- [12] J. L. Gordon. „OUTCUR: An Automated Evaluation of Two-Dimensional Finite Element Stresses.“ In: ASME Winter Annual Meeting. 1976.
- [13] I. Poutiainen, P. Tanskanen und G. Marquis. „Finite Element methods for structural hot spot stress determination-a comparison of procedures“. In: *International Journal of Fatigue* 26 11 (2004), S. 1147–1157.
- [14] H. Fahrenwaldt und V. Schuler. *Praxiswissen Schweißtechnik - Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2006. ISBN: 978-3-87155-970-9.
- [15] P. Dong, J. Hong, D. Osage und M. Prager. „Fatigue of piping and vessel welds: ASME’S FSRF rules revisited“. In: Bd. 439. Jan. 2002. DOI: 10.1115/PVP2002-1234.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Spannungsanteile bei nichtlinearen Spannungsverlauf [4] . . . . .	3
2.2	Auswirkungen makrogeometrischer Effekte auf die Nennspannungen [4] . . . . .	5
2.3	Spannungserhöhende Effekte in der Nähe von Punktlasten [4] . . . . .	6
2.4	Nennspannungen in einem Biegeträger [4] . . . . .	6
2.5	Sekundäre Biegespannungen aufgrund axialem Versatz bzw. Winkelversatz [4] . .	7
2.6	Nichtlinearer Spannungsverlauf entlang der Oberfläche [4] . . . . .	8
2.7	Konstruktionsdetails mit zugehöriger Strukturspannungsverteilung [4] . . . . .	9
2.8	Kerbspannungskonzept mit effektiven Kerbradius von $r = 1mm$ [4] . . . . .	10
2.9	Konstruktion des Radius . . . . .	11
2.10	Verlauf der Hauptnormalspannungsdifferenzen und Ermittlung von $\Delta\sigma_{eq}$ [1] . . .	13
3.1	Verschiedene Stellen der Rissausbreitung in geschweißten Verbindungen [6] . . . .	16
3.2	Vermeidung von Spannungssingularitäten am Schweißnahtübergang durch Modellierung eines Radius: strichliert Spannungsverlauf mit Singularität, durchgezogene Linie Strukturspannung CAB [7] . . . . .	17
3.3	Möglichkeiten der Modellierung des Schweißnahtübergangs nach CAB Methode [7]	18
a	Modellierung als Radius . . . . .	18
b	Modellierung als Spline-Interpolation . . . . .	18
3.4	Vermeidung von Spannungssingularitäten am Schweißnahtübergang durch Modellierung einer Ellipse [3] . . . . .	18
3.5	Modell Schweißnaht . . . . .	19
3.6	Modell mit 2mm Radius . . . . .	20
3.7	Modell Keine Schweißnaht . . . . .	21
3.8	Mögliche Auswertungspunkte . . . . .	22

---

3.9	3D Kontinuumselement und Schalenelement: (a) 20 knotiges 3D Stammelement, (b) 20 knotiges isoparametrisches 3D Kontinuumselement, (c) 8 knotiges Schalenelement [8] . . . . .	23
3.10	Parametrisierungsvarianten von 3D Schalenelementen [9] . . . . .	23
3.11	Prinzip der Extrapolation an den Schweißnahtübergang [7] . . . . .	24
a	Lineare Extrapolation . . . . .	24
b	Quadratische Extrapolation . . . . .	24
3.12	Bestimmung der Strukturspannungen nach Haibach [7] . . . . .	26
3.13	Zusätzliche Linien zur einfachen Bestimmung der Strukturspannung nach Haibach [3] . . . . .	27
3.14	Kerbspannung und Strukturspannung [7] . . . . .	27
3.15	Linearisierung über den Querschnitt [13] . . . . .	28
4.1	Zusammenhänge der Wanddicken [1] . . . . .	31
4.2	Ebener Boden . . . . .	33
4.3	Abmessungen des ebenen Bodens . . . . .	38
4.4	Definition des a-Maß und der Schenkellänge z [14] . . . . .	39
4.5	Globale Gleichgewichtsbetrachtung - Kräftevergleichsmethode [5] . . . . .	43
4.6	Kugelschale mit Einzelausschnitt [1] . . . . .	45
4.7	Abmessungen der Kugelschale . . . . .	48
5.1	Detailansicht des Modells mit Schweißnaht . . . . .	50
5.2	Detailansicht des CAB Modells . . . . .	51
5.3	Detailansicht des Modells mit 2mm Radius . . . . .	51
5.4	Randbedingung an der Zylinderschale . . . . .	52
5.5	Beaufschlagung des Modells mit Innendruck . . . . .	52
5.6	Äquivalente Langspannungen im Stutzenrohr . . . . .	53
5.7	Konvektion im Stutzenrohr . . . . .	54
5.8	Konvektion Ebener Boden und Zylinderschale . . . . .	54
5.9	Vernetzung an den Modellen . . . . .	55
5.10	Modelle mit Netzfeinheit 0,002 mm . . . . .	55
5.11	Modelle mit Netzfeinheit 0,02 mm . . . . .	56

---

5.12 Modelle mit Netzfeinheit 0,1 mm . . . . .	56
5.13 Modelle mit Netzfeinheit 0,5 mm . . . . .	57
5.14 Modelle mit Netzfeinheit 0,75 mm . . . . .	57
5.15 Modelle mit Netzfeinheit 1 mm . . . . .	58
5.16 Modelle mit Netzfeinheit 2 mm . . . . .	58
5.17 Modelle mit Netzfeinheit 5 mm . . . . .	59
5.18 Temperaturverteilung Zustand 1 . . . . .	59
5.19 Temperaturverteilung Zustand 2 . . . . .	60
5.20 Auswertungspfad Extrapolation Modell keine Schweißnaht . . . . .	61
5.21 Auswertungspfad Extrapolation Modell Schweißnaht . . . . .	61
5.22 Auswertungspfad Extrapolation am CAB Modell . . . . .	62
5.23 Auswertungspfad Extrapolation 2mm Radius Modell . . . . .	62
5.24 Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand Modell keine Schweißnaht . . . . .	63
5.25 Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand Modell Schweißnaht . . . . .	64
5.26 Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand am CAB Modell . . . . .	64
5.27 Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand am 2mm Radius Modell . . . . .	65
5.28 Detailansicht des Modells Schweißnaht . . . . .	66
5.29 Detailansicht des CAB Modells . . . . .	66
5.30 Detailansicht des Modells mit 2mm Radius . . . . .	67
5.31 Randbedingung an der Zylinderschale . . . . .	67
5.32 Beaufschlagung des Modells mit Innendruck . . . . .	68
5.33 Äquivalente Langspannungen im Stutzenrohr . . . . .	69
5.34 Konvektion im Stutzenrohr . . . . .	70
5.35 Konvektion in der Kugelschale . . . . .	70
5.36 Vernetzung an den Modellen . . . . .	71
5.37 Modelle mit Netzfeinheit 0,02 mm . . . . .	71
5.38 Modelle mit Netzfeinheit 0,1 mm . . . . .	72
5.39 Modelle mit Netzfeinheit 0,5 mm . . . . .	72
5.40 Modelle mit Netzfeinheit 0,75 mm . . . . .	73
5.41 Modelle mit Netzfeinheit 1 mm . . . . .	73

5.42	Modelle mit Netzfeinheit 2 mm . . . . .	74
5.43	Modelle mit Netzfeinheit 5 mm . . . . .	74
5.44	Temperaturverteilung Zustand 1 . . . . .	75
5.45	Temperaturverteilung Zustand 2 . . . . .	75
5.46	Koordinatensystem zur Auswertung der Spannungen . . . . .	76
5.47	Auswertungspfad Extrapolation Modell keine Schweißnaht . . . . .	77
5.48	Auswertungspfad Extrapolation Modell Schweißnaht . . . . .	77
5.49	Auswertungspfad Extrapolation CAB Modell . . . . .	78
5.50	Auswertungspfad Extrapolation des 2mm Radius Modells . . . . .	78
5.51	Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand Modell keine Schweißnaht . . .	79
5.52	Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand Modell Schweißnaht . . . . .	80
5.53	Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand CAB-Modell . . . . .	80
5.54	Auswertungspfad Linearisierung durch die Wand 2mm Radius Modells . . . . .	81
6.1	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren am ebenen Boden für Zustand 1 ( $\sigma_y$ )	83
6.2	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren am ebenen Boden für Zustand 2 ( $\sigma_y$ )	84
6.3	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren an der Kugelschale für Zustand 1 ( $\sigma_y$ )	84
6.4	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren an der Kugelschale für Zustand 2 ( $\sigma_y$ )	85
6.5	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren am ebenen Boden Zustand 1 $\sigma_z$ . . .	86
6.6	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren am ebenen Boden Zustand 2 $\sigma_z$ . . .	86
6.7	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren an der Kugelschale Zustand 1 $\sigma_z$ . .	87
6.8	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren an der Kugelschale Zustand 2 $\sigma_z$ . .	87
6.9	Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für alle Modelle Ebener Boden Zustand 1 $\sigma_y$ . . . . .	88
6.10	Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für den ebenen Boden Zustand 1 $\sigma_y$ .	89
6.11	Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für den ebenen Boden Zustand 2 $\sigma_y$ .	90
6.12	Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für die Kugelschale Zustand 1 $\sigma_y$ . . .	90
6.13	Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für die Kugelschale Zustand 2 $\sigma_y$ . . .	91
6.14	Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für den ebenen Boden Zustand 1 $\sigma_z$ .	92
6.15	Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für den ebenen Boden Zustand 2 $\sigma_z$ .	92
6.16	Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für die Kugelschale Zustand 1 $\sigma_z$ . . .	93

---

6.17	Ergebnisse Linearisierung durch die Wand für die Kugelschale Zustand 2 $\sigma_z$ . . .	93
6.18	Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für den ebenen Boden Zustand 1 $\sigma_y$ .	95
6.19	Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für den ebenen Boden Zustand 2 $\sigma_y$ .	95
6.20	Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für die Kugelschale Zustand 1 $\sigma_y$ . .	96
6.21	Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für die Kugelschale Zustand 2 $\sigma_y$ . .	96
6.22	Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für den ebenen Boden Zustand 1 $\sigma_z$ .	97
6.23	Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für den ebenen Boden Zustand 2 $\sigma_z$ .	97
6.24	Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für die Kugelschale Zustand 1 $\sigma_z$ . .	98
6.25	Ergebnisse Haibach Methode 2mm entfernt für die Kugelschale Zustand 2 $\sigma_z$ . .	98
6.26	Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für den ebenen Boden Zustand 1 $\sigma_y$ .	99
6.27	Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für den ebenen Boden Zustand 2 $\sigma_y$ .	100
6.28	Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für die Kugelschale Zustand 1 $\sigma_y$ . .	100
6.29	Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für die Kugelschale Zustand 2 $\sigma_y$ . .	101
6.30	Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für den ebenen Boden Zustand 1 $\sigma_z$ .	102
6.31	Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für den ebenen Boden Zustand 2 $\sigma_z$ .	102
6.32	Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für die Kugelschale Zustand 1 $\sigma_z$ . .	103
6.33	Ergebnisse Haibach Methode 0,15t entfernt für die Kugelschale Zustand 2 $\sigma_z$ . .	103
6.34	Ergebnis ebener Boden CAB Modell direkte Auswertung Zustand 1 $\sigma_y$ . . . . .	105
6.35	Ergebnis ebener Boden CAB Modell direkte Auswertung Zustand 2 $\sigma_y$ . . . . .	105
6.36	Ergebnis Kugelschale CAB Modell direkte Auswertung Zustand 1 $\sigma_y$ . . . . .	106
6.37	Ergebnis Kugelschale CAB Modell direkte Auswertung Zustand 2 $\sigma_y$ . . . . .	106
6.38	Ergebnis ebener Boden CAB Modell direkte Auswertung Zustand 1 $\sigma_z$ . . . . .	107
6.39	Ergebnis ebener Boden CAB Modell direkte Auswertung Zustand 2 $\sigma_z$ . . . . .	107
6.40	Ergebnis Kugelschale CAB Modell direkte Auswertung Zustand 1 $\sigma_z$ . . . . .	108
6.41	Ergebnis Kugelschale CAB Modell direkte Auswertung Zustand 2 $\sigma_z$ . . . . .	108
6.42	Ergebnis ebener Boden 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 1 $\sigma_y$ . .	109
6.43	Ergebnis ebener Boden 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 2 $\sigma_y$ . .	109
6.44	Ergebnis Kugelschale 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 1 $\sigma_y$ . . .	110
6.45	Ergebnis Kugelschale 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 2 $\sigma_y$ . . .	110
6.46	Ergebnis ebener Boden 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 1 $\sigma_z$ . .	111

6.47	Ergebnis ebener Boden 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 2 $\sigma_z$ . . .	111
6.48	Ergebnis Kugelschale 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 1 $\sigma_z$ . . .	112
6.49	Ergebnis Kugelschale 2mm Radius Modell direkte Auswertung Zustand 2 $\sigma_z$ . . .	112
6.50	Neuer Extrapolationspunkt am 2mm Radius Modell . . . . .	113
6.51	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell am ebenen Boden für Zustand 1 ( $\sigma_y$ ) . . . . .	114
6.52	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell am ebenen Boden für Zustand 2 ( $\sigma_y$ ) . . . . .	115
6.53	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell an der Kugelschale für Zustand 1 ( $\sigma_y$ ) . . . . .	115
6.54	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell an der Kugelschale für Zustand 2 ( $\sigma_y$ ) . . . . .	116
6.55	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell am ebenen Boden für Zustand 1 ( $\sigma_z$ ) . . . . .	117
6.56	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell am ebenen Boden für Zustand 2 ( $\sigma_z$ ) . . . . .	117
6.57	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell an der Kugelschale für Zustand 1 ( $\sigma_z$ ) . . . . .	118
6.58	Ergebnisse für das Extrapolationsverfahren in den Schnittpunkt am 2mm Modell an der Kugelschale für Zustand 2 ( $\sigma_z$ ) . . . . .	118
6.59	Auswertungspfade für den Vergleich des Extrapolationsverfahrens mit der Linea- risierung durch die Wand am CAB Modell . . . . .	120
6.60	Auswertungspfade für den Vergleich des Extrapolationsverfahrens mit der Linea- risierung durch die Wand am 2mm Radius Modell . . . . .	120
6.61	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden CAB Modell für Zustand 1 ( $\sigma_y$ ) . . . . .	121
6.62	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden CAB Modell für Zustand 2 ( $\sigma_y$ ) . . . . .	121
6.63	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden 2mm Radius Modell für Zustand 1 ( $\sigma_y$ ) . . . . .	122

6.64	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden 2mm Radius Modell für Zustand 2 ( $\sigma_y$ ) . . . . .	122
6.65	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale CAB Modell für Zustand 1 ( $\sigma_y$ ) . . . . .	123
6.66	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale CAB Modell für Zustand 2 ( $\sigma_y$ ) . . . . .	123
6.67	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale 2mm Radius Modell für Zustand 1 ( $\sigma_y$ ) . . . . .	124
6.68	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale 2mm Radius Modell für Zustand 2 ( $\sigma_y$ ) . . . . .	124
6.69	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden CAB Modell für Zustand 1 ( $\sigma_z$ ) . . . . .	125
6.70	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden CAB Modell für Zustand 2 ( $\sigma_z$ ) . . . . .	125
6.71	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden 2mm Radius Modell für Zustand 1 ( $\sigma_z$ ) . . . . .	126
6.72	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation am ebenen Boden 2mm Radius Modell für Zustand 2 ( $\sigma_z$ ) . . . . .	126
6.73	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale CAB Modell für Zustand 1 ( $\sigma_z$ ) . . . . .	127
6.74	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale CAB Modell für Zustand 2 ( $\sigma_z$ ) . . . . .	127
6.75	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale 2mm Radius Modell für Zustand 1 ( $\sigma_z$ ) . . . . .	128
6.76	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation an der Kugelschale 2mm Radius Modell für Zustand 2 ( $\sigma_z$ ) . . . . .	128
7.1	Kennzeichnung des ersten Extrapolationspunktes am ebenen Boden bei unterschiedlichen Netzfeinheiten . . . . .	131
7.2	Kennzeichnung des ersten Extrapolationspunktes an der Kugelschale bei unterschiedlichen Netzfeinheiten . . . . .	131

---

A.1	Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 des ebenen Bodens $\sigma_y$ Zustand 1	. 136
A.2	Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 des ebenen Bodens $\sigma_y$ Zustand 2	. 137
A.3	Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 des ebenen Bodens $\sigma_z$ Zustand 1	. 138
A.4	Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 des ebenen Bodens $\sigma_z$ Zustand 2	. 139
A.5	Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 der Kugelschale $\sigma_y$ Zustand 1	. . . 140
A.6	Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 der Kugelschale $\sigma_y$ Zustand 2	. . . 141
A.7	Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 der Kugelschale $\sigma_z$ Zustand 1	. . . 142
A.8	Daten zu Grafiken aus den Kapiteln 6.1 - 6.5 der Kugelschale $\sigma_z$ Zustand 2	. . . 143
A.9	Daten zu Grafiken aus Kapitel 6.6 des ebenen Bodens	. . . . . 144
A.10	Daten zu Grafiken aus Kapitel 6.6 der Kugelschale	. . . . . 145

# Tabellenverzeichnis

3.1	Daten Schale und Stutzen . . . . .	29
4.1	Betriebszustand 1 ebener Boden . . . . .	32
4.2	Betriebszustand 2 ebener Boden . . . . .	32
4.3	Geometriedaten . . . . .	34
4.4	Materialdaten Zylinderschale und Stutzen . . . . .	34
4.5	Materialdaten Ebener Boden . . . . .	34
4.6	Daten Schale und Stutzen . . . . .	39
4.7	Kugelschale Betriebszustand 1 . . . . .	41
4.8	Kugelschale Betriebszustand 2 . . . . .	41
4.9	Geometriedaten zur Innendruckberechnung . . . . .	41
4.10	Materialdaten Kugelschale . . . . .	42
4.11	Materialdaten Stutzen . . . . .	42
4.12	Geometriedaten der Konstruktion . . . . .	43
4.13	Symbole Ausschnittsberechnung Kugelschale [1] . . . . .	44
4.14	Daten Schale und Stutzen . . . . .	47
6.1	Quadratisches Extrapolationsverfahren bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ ) . . . . .	85
6.2	Quadratisches Extrapolationsverfahren bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ ) . . . . .	85
6.3	Quadratisches Extrapolationsverfahren bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ ) . . . . .	87
6.4	Quadratisches Extrapolationsverfahren bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ ) . . . . .	88

6.5	Linearisierung durch die Wand bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ )	91
6.6	Linearisierung durch die Wand bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ )	91
6.7	Linearisierung durch die Wand bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ )	93
6.8	Linearisierung durch die Wand bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ )	94
6.9	Haibach Methode 2mm entfernt bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ )	96
6.10	Haibach Methode 2mm entfernt bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ )	97
6.11	Haibach Methode 2mm entfernt bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ )	98
6.12	Haibach Methode 2mm entfernt bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ )	99
6.13	Haibach 0,15t und 1/3z entfernt bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ )	101
6.14	Haibach 0,15t und 1/3z entfernt bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ )	101
6.15	Haibach 0,15t und 1/3z entfernt bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ )	103
6.16	Haibach 0,15t und 1/3z entfernt bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ )	104
6.17	Direkte Auswertung am CAB Modell bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ ) . . . . .	106
6.18	Direkte Auswertung am CAB Modell bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ ) . . . . .	107
6.19	Direkte Auswertung am CAB Modell bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ ) . . . . .	108
6.20	Direkte Auswertung am CAB Modell bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ ) . . . . .	109
6.21	Direkte Auswertung am 2mm Radius Modell bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ ) . . . . .	110
6.22	Direkte Auswertung am 2mm Radius Modell bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ ) . . . . .	111
6.23	Direkte Auswertung am 2mm Radius Modell bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ ) . . . . .	113
6.24	Direkte Auswertung am 2mm Radius Modell bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ ) . . . . .	113
6.25	Extrapolation in den Schnittpunkt am 2mm Radius Modell bei 0,002mm Netz- feinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ ) . . . . .	116

---

6.26	Extrapolation in den Schnittpunkt am 2mm Radius Modell bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ ) . . . . .	116
6.27	Extrapolation in den Schnittpunkt am 2mm Radius Modell bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ ) . . . . .	118
6.28	Extrapolation in den Schnittpunkt am 2mm Radius Modell bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ ) . . . . .	119
6.29	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_y$ ) . . . . .	124
6.30	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_y$ ) . . . . .	125
6.31	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation bei 0,002mm Netzfeinheit am ebenen Boden ( $\sigma_z$ ) . . . . .	128
6.32	Vergleich Linearisierung durch die Wand - Extrapolation bei 0,02mm Netzfeinheit an der Kugelschale ( $\sigma_z$ ) . . . . .	129
7.1	Lage des ersten Extrapolationspunkt bei unterschiedlichen Netzfeinheiten am ebenen Boden und der Kugelschale . . . . .	132