

SIEMENS



Robert Demal

Erweiterung eines Kerbfallkataloges zur Anwendung des
Kerbspannungskonzeptes für die Berechnung von
Schweißnahtverbindungen

Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Technische Universität Graz
Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Studienrichtung Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

Betreuer Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Moser
Institut für Leichtbau

Graz, Juni 2011

Deutsche Fassung:

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

Eidesstattliche Erklärung

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

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

Graz, am 21. Juni 2011

.....

Robert Demal

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Firma Siemens Mobility in Graz Eggenberg.

Für die hervorragende Betreuung der Diplomarbeit am Institut für Leichtbau der Technischen Universität Graz möchte ich mich recht herzlich bei Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Moser bedanken.

Für die große Unterstützung und die sehr hilfreichen Ideen für diese Diplomarbeit möchte ich mich seitens der Firma Siemens Mobility bei Herrn Dipl.-Ing. Bernhard Kittinger und Herrn Dipl.-Ing. Werner Mössler bedanken.

Ebenfalls bedanke ich mich bei meinen Arbeitskollegen am Institut für Leichtbau für das angenehme- und sehr hilfreiche Arbeitsklima.

Einen ganz besonders großen Dank möchte ich meiner Familie, im Besonderen meinen Eltern aussprechen, die mir mein Studium ermöglicht haben und mich in jeder Lebenslage bestens unterstützt haben.

Robert Demal

Kurzfassung

Aufbauend auf der Diplomarbeit „Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzeptes“ von Franz Wolmersdorfer, der zweidimensionale Schweißnahtmodelle nach Radaj gemäß dem Kerbspannungskonzept erstellt hat, wird dieses Prinzip in dieser Diplomarbeit auf dreidimensionale Schweißnahtsubmodelle angewandt.

Ziel dieser Diplomarbeit ist einerseits die Ermittlung der, zur Erstellung eines dreidimensionalen Kerbfallkataloges relevanten Schnittgrößen aus einem globalen Strukturmodell.

In weiterer Folge wird eine Methode erarbeitet, wie die ausgewählten Schnittgrößen als Einheitslasten bestmöglich auf ein dreidimensionales Schweißnahtsubmodell aufgebracht werden können um anschließend aus den daraus resultierenden Spannungs-Ergebnissen einen Kerbfallkatalog zu erstellen.

Abschließend werden dreidimensionale Finite-Element Schweißnahtsubmodelle basierend auf den zuvor erarbeiteten Prinzipien der Schnittgrößen-Aufbringung erstellt.

Abstract

Based on the diploma thesis „Evaluation of welded joints on the basis of the notch stress approach“ written by Franz Wolmersdorfer, who generated two-dimensional welded joint models by Radaj according to the notch stress approach, this principle is applied to three-dimensional welded joint models in this diploma thesis.

On the one hand an aim of this diploma thesis is to evaluate the relevant internal force variable out of a global structural model to generate a three-dimensional notch case catalog.

Furthermore a method is developed how the selected internal force variables used as entity loads best possible are applied to a three-dimensional welded joint model to generate a notch case catalog out of the stress result.

Finally three-dimensional Finite-Element welded joint models are generated based on before developed principles of internal force variable application.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Prinzipielle Vorgehensweise zum Ermitteln der Kerbspannungen	2
2	Aufgabenstellung.....	5
2.1	Arbeitspakete	5
2.2	Vorgehensweise	6
3	Theoretischer Hintergrund.....	9
3.1	Spannungen laut IIW.....	9
3.1.1	Nennspannung.....	9
3.1.2	Strukturspannung	10
3.1.3	Kerbspannung.....	11
3.1.4	Definition der Spannungsanteile.....	12
3.2	Die Finite Element Methode (FEM).....	14
3.2.1	Von-Mises Vergleichsspannung.....	14
3.2.2	Elemente.....	15
3.2.3	Combine Load Cases	17
4	Ermittlung bestimmter Schnittgrößen aus dem globalen Strukturmodell.....	18
4.1	Grid Point Forces – Grid Point Moments	18
4.2	Zusammenfassung	20
5	Aufbringen der Schnittgrößen auf ein Detailmodell	22
5.1	Übergang von 2D-Shell Elemente auf 3D-Solid Elemente	22
5.2	Übergangsschalenelemente	23
5.3	RBE3-Spider Elemente.....	27
5.3.1	Definition: Spider-Element, RBE2-Element, RBE3-Element.....	28
5.3.2	Kante-Fläche Verbindung.....	29
5.3.3	Manuelle RBE3-Spider Verbindung	31
5.4	Verifikation der Methode	33
5.4.1	Vorgehensweise	33
5.4.2	Vergleich 2D-Shell Modell und 3D-Solid Modell.....	41
5.4.3	Ergebnisse der Detail-Modell Berechnungen.....	45
6	Erstellung von 3D-Schweißnahtsubmodellen.....	62
6.1	Arten der Schweißnahtverbindungen	62
6.2	Wahl der Element-Tiefe.....	66
6.3	Aufbringen der Anschlusschalen	68

6.4	Aufbringen der RBE3-Spider.....	69
6.5	Fertiges 3D-Schweißnahtsubmodell.....	72
7	Inertia Relief.....	74
7.1	Beschreibung.....	74
7.2	Methodik.....	74
7.2.1	Beispiel.....	75
7.3	Testen der Funktion hinsichtlich der Ergebnisqualität.....	76
7.3.1	Lastfall 1.....	77
7.3.2	Lastfall 2.....	79
7.3.3	Lastfall 3.....	81
7.3.4	Lastfall 4.....	83
7.3.5	Ergebnis.....	84
7.4	Auswirkung der Elementgröße auf die Berechnung.....	85
8	Zusammenfassung.....	89
9	Ausblick.....	91
10	Anhang.....	93
10.1	Detaillierte Ergebnisse.....	93
10.1.1	Vergleich 2D-Shell Modell und 3D-Solid Modell (Kapitel 5.4.2).....	93
10.1.2	Ergebnisse der Detail-Modell Berechnungen (Kapitel 5.4.3).....	110
10.2	Behandelte Schnittgrößen.....	128
10.2.1	Stresses.....	128
10.2.2	Displacements – Rotations.....	137
11	Abbildungsverzeichnis.....	148
12	Tabellenverzeichnis.....	151
13	Literaturverzeichnis.....	153

1 Einleitung

Durch die, bei Siemens Mobility geplante Umstellung des Bewertungsverfahrens von einem Strukturspannungskonzept, das derzeit nach verschiedenen Normen, im speziellen nach der Kranbaunorm DIN 15018 bewertet wird auf ein Kerbspannungskonzept nach den Empfehlungen des International Institute of Welding (IIW) muss nun auch die Datenerfassung bzw. -Verarbeitung geändert werden.

In der vorangegangenen Diplomarbeit "*Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzeptes*" von Herrn Dipl.-Ing. Franz Wolmersdorfer wurden die in der Siemens Mobility Graz Eggenberg gefertigten Schweißverbindungen geometrisch eruiert, mit Modellen gemäß dem Kerbspannungskonzept nach Radaj abgebildet und anschließend in 2D- FE-Modelle übertragen. Diese 2D-Radaj Modelle werden für diese Arbeit herangezogen.

In einer weiteren, zu diesem Thema vorangegangenen Diplomarbeit „*Analyse und Bewertung von Berechnungsvorschriften zum Ermüdungsverhalten von Schweißverbindungen*“ von Herrn Dipl.-Ing. Uwe Oßberger wurde ein Vergleich der zur Bewertung von Schweißnahtverbindungen gängigen Normen aufgestellt. Aus dieser Arbeit ist hervorgegangen, dass sich die Empfehlungen des International Institute of Welding (IIW) zur Bewertung der Schweißnahtverbindungen anhand des Kerbspannungskonzeptes am besten dafür eignen.

Das erste und wichtiges Ziel dieser Diplomarbeit ist es zu erfahren, welche aus einem globalen 2D-Strukturmodell ermittelten Schnittgrößen sich am besten für die weiteren Berechnungen zur Ermittlung der realen Spannungen in den Kerben und Wurzeln eines Schweißnahtstoßes bzw. zu der Erstellung eines 3D-Kerbfallkataloges eignen. Dabei sollte ebenfalls untersucht werden, ob für das Auslesen bestimmter Schnittgrößen gegebenenfalls spezielle Modellierungsvorschriften bei der Strukturmodellerstellung notwendig sind.

Ein weiteres Ziel dieser Diplomarbeit wird anschließend sein, wie die, aus dem 2D-Strukturmodell ermittelten Schnittgrößen bestmöglich auf ein 3D-Schweißnahtsubmodell aufgebracht werden können.

Den abschließenden Teil dieser Diplomarbeit beinhaltet die Erstellung der 3D-Schweißnahtsubmodelle, wobei die, aus den zuvor erwähnten Zielsetzungen gewonnenen Erkenntnisse genutzt werden.

Die Vorgabe für all diese Zielsetzungen ist, dass die schlussendlich generierte-, automatisierte Anwendung auf dem, von Siemens Mobility genutzten Programm UGS NX von Siemens PLM Software basieren muss. Dabei sollte bei der Implementierung dieser Anwendung möglichst wenig Programmierarbeit notwendig sein und zusätzlich müssen die entstehenden Rechenzeiten optimiert werden.

1.1 Prinzipielle Vorgehensweise zum Ermitteln der Kerbspannungen

Die gewünschte- prinzipielle Vorgehensweise zum Ermitteln der Kerbspannungen anhand eines 3D-Kerbfallkataloges sieht wie folgt aus:

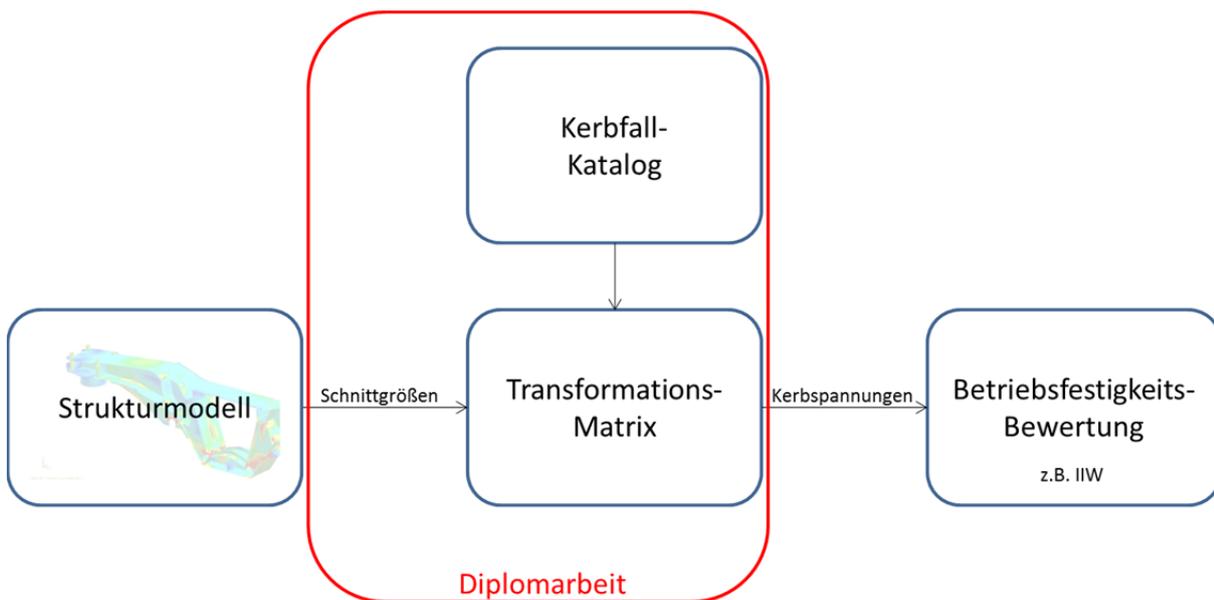


Abbildung 1: Prinzipielle Vorgehensweise zum Ermitteln der Kerbspannungen

Aus einem globalen Strukturmodell werden an der zu bewertenden Stelle die relevanten Schnittgrößen ermittelt und mittels einer Transformationsmatrix mit den Werten der Einheitslasten-Berechnungen aus dem Kerbfallkatalog überlagert. Anhand der daraus berechneten Kerbspannungen wird eine Betriebsfestigkeitsbewertung, zum Beispiel nach den Empfehlungen des International Institute of Welding (IIW) durchgeführt.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich dabei hauptsächlich mit der Auswahl geeigneter Schnittgrößen und den grundlegenden Arbeiten für die Erstellung des Kerbfallkataloges und der Transformationsmatrix.

Die zur Bewertung einer Schweißnahtverbindung wichtige Ermittlung der relevanten Teilschädigung sieht im Detail folgendermaßen aus:

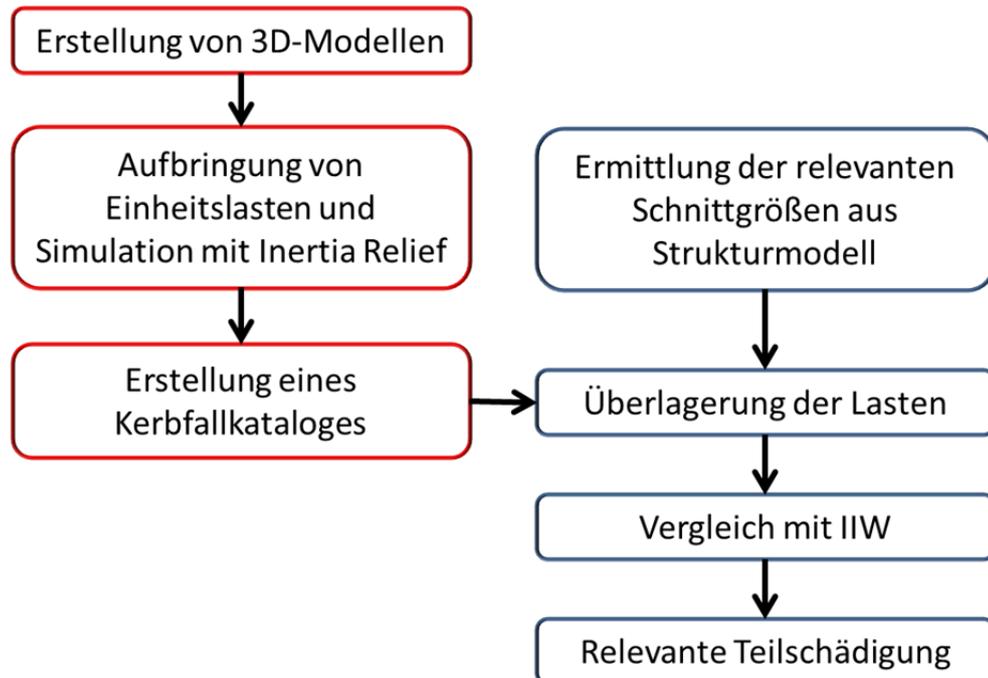


Abbildung 2: Prinzipielle Vorgehensweise zum Ermitteln der Kerbspannungen (Detail)

Zunächst müssen 3D-Schweißnahtsubmodelle erstellt werden. Auf diese werden anschließend Einheitslasten nach allen 6 Freiheitsgraden aufgebracht und jeweils einzeln mit der quasistatischen Berechnungsmethodik Inertia Relief berechnet. Die aus diesen Berechnungen ermittelten Spannungs-Ergebnisse der Knoten in den Kerben und Wurzeln dienen dann als Grundlage für die Erstellung eines 3D-Kerbfallkataloges für diese Schweißnahtverbindung.

Diese Vorgehensschritte (rot umrandet) im linken Teil der Abbildung sind Basis-Arbeiten die einmalig durchgeführt werden müssen und die Grundlage für die Erstellung des Kerbfallkataloges darstellen.

Um nun die relevante Teilschädigung für einen Schweißnahtstoß eines Bauteils ermitteln zu können, müssen die relevanten Schnittgrößen aus dem globalen 2D-Strukturmodell an den gewünschten Stellen ausgelesen werden. Diese Schnittgrößen werden anschließend mit den Ergebnissen der Einheitslasten-Berechnungen des Kerbfallkataloges überlagert und mit den Werten aus den Empfehlungen des International Institute of Welding (IIW) verglichen. Daraus lassen sich nun die relevanten Teilschädigungen für den ausgewählten Schweißnahtstoß ermitteln.

Diese Vorgehensschritte (blau umrandet) im rechten Teil der Abbildung werden dann für jeden projektbezogenen Berechnungsablauf durchgeführt.

2 Aufgabenstellung

Die grundlegende, von Siemens Mobility in Auftrag gegebene Aufgabenstellung ist es das Kerbspannungskonzept zum Bewerten von Schweißnahtverbindungen nach den Vorgaben des International Institute of Welding (IIW) in einen automatisierten-, industriellen Berechnungsablauf einzubinden. Hierfür sind, wie bereits erwähnt schon zwei grundlegende Arbeitspakete, nämlich die Erstellung von 2D-Radaj Modellen sowie ein Normenvergleich der im Schienenfahrzeugbau verwendeten Normen in zwei vorangegangenen Diplomarbeiten abgearbeitet worden.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich nun zum einen mit der Überführung der bereits erstellten 2D-Radaj-Modelle in 3D-Schweißnahtsubmodelle und in weiterer Folge mit der Einbindung dieser 3D-Schweißnahtsubmodelle in ein globales Strukturmodell.

2.1 Arbeitspakete

Diese Diplomarbeit gliedert sich grob in vier Arbeitspakete, wobei die einzelnen Aufgabenstellungen teilweise nacheinander abgearbeitet wurden, bzw. die Behandlung einzelner Teilbereiche teilweise gleichzeitig stattfand.

1.) Ermittlung der für die spätere Erstellung des Kerbfallkataloges relevanten Schnittgrößen aus einem globalem Strukturmodell:

Diese Aufgabenstellung bildet den Hauptteil dieser Arbeit. Es wird untersucht, welche Übergabegrößen sich aus einem globalen 2D-Strukturmodell ermitteln lassen und welche Schnittgrößen für die weiteren Berechnungen am 3D-Schweißnahtsubmodell am besten geeignet sind.

2.) Erarbeitung einer Methode, wie Schnittgrößen auf 3D-Schweißnahtsubmodelle aufgebracht werden können:

In dieser Aufgabenstellung wird das optimale Aufbringen der, aus einem globalen Strukturmodell ermittelten Schnittgrößen auf ein 3D-Schweißnahtsubmodell untersucht.

3.) Erstellung der Schweißnahtsubmodelle als 3D FE-Modelle:

Die, aus der Diplomarbeit "*Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzeptes*" von Herrn Dipl.-Ing. Franz Wolmersdorfer erstellten 2D-Radaj Modelle werden zu 3D-Schweißnahtsubmodellen transformiert, wobei die, aus den beiden vorangegangenen Aufgabenstellungen gewonnenen Erkenntnissen dabei einfließen.

4.) Behandlung der Berechnungsmethodik: Inertia Relief:

Für die Berechnungen 3D-Schweißnahtsubmodelle wird die quasistatische Berechnungsmethodik „Inertia Relief“ angewandt. In dieser Aufgabenstellung wird nun diese Berechnungsmethodik hinsichtlich ihrer Ergebnisqualität überprüft.

2.2 Vorgehensweise

Aufgrund der Größe und Komplexität eines Drehgestell-Rahmens ist es nicht möglich diesen in einem 3D-Finite Element Volumenmodell abzubilden und zu berechnen, da dies zu einer Vielzahl an Volumenelementen führen würde, die mit heutigen uns zur Verfügung stehenden Computer Systemen nicht berechenbar sind. Deshalb müssen zur Ermittlung der realen Kerbspannungen in den Kerben bzw. Wurzeln eines Schweißnahtstoßes andere Methoden gefunden werden.

Die einzelnen Teile eines Drehgestell Rahmens werden üblicherweise in einem globalen Strukturmodell, das aus 2D-Schalen Elementen modelliert ist zusammengefasst.

Dieses Strukturmodell bildet jedoch die Schweißnahtstöße nicht wahrheitsgetreu ab. Die Stöße an sich werden nur aus aufeinander stehenden Schalenelementen aufgebaut und die Schweißnähte selbst werden nicht abgebildet.

Um nun die Schweißnähte nach dem Kerbspannungskonzept und den Empfehlungen des International Institute of Welding (IIW) bewerten zu können, muss ein 3D-Kerbspannungskatalog erstellt werden.

Als Eingabedaten für diesen 3D-Kerbfallkatalog dienen Spannungen, die durch das Aufbringen von Einheitslasten auf ein 3D-Schweißnahtsubmodell ermittelt werden.

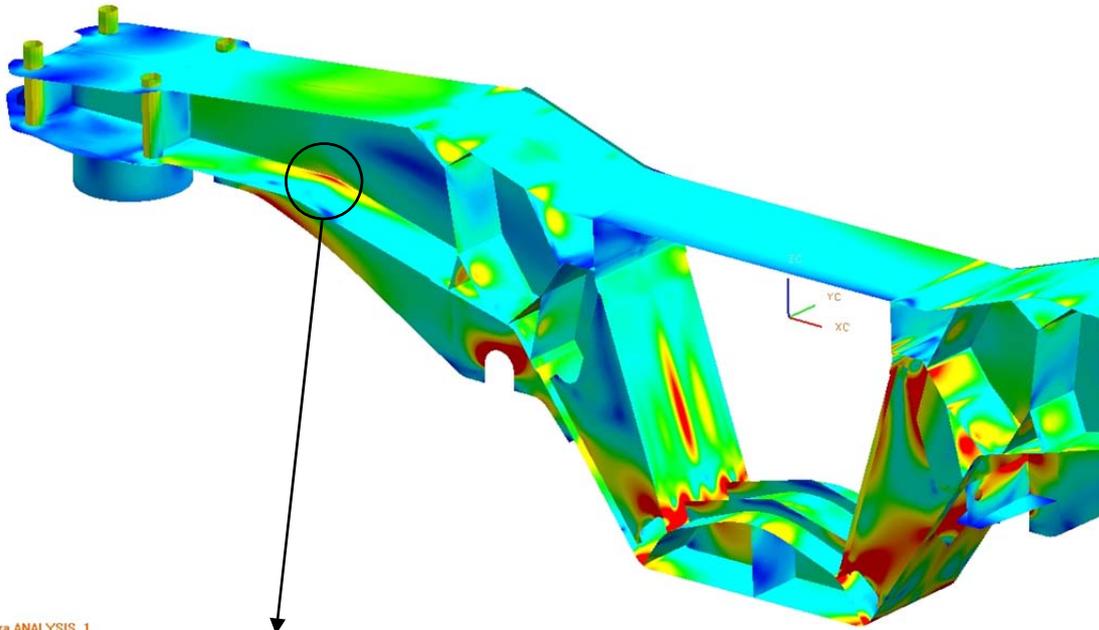
Dadurch ergeben sich nun einige Aufgabenstellungen für diese Diplomarbeit.

Als Erstes sollte untersucht werden, welche Schnittgrößen eines 2D-Strukturmodells sich für die anschließende Bewertung der Spannungen mittels dem 3D-Kerbfallkatalog eignen.

In weiterer Folge muss untersucht werden, wie die Einheitslasten dieser Schnittgrößen bestmöglich auf ein 3D-Schweißnahtsubmodell aufgebracht werden, um anschließend den 3D-Kerbfallkatalog zu erstellen.

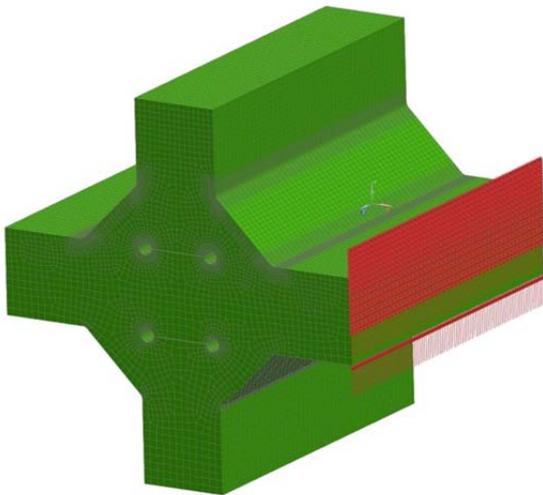
Da die Einheitslasten jeweils einzeln auf das 3D-Schweißnahtsubmodell aufgebracht und ohne Einspannung simuliert werden müssen, sollte die quasistatische Berechnungsmethodik „Inertia Relief“ untersucht werden.

Die wichtigsten Fragestellungen werden in der folgenden Abbildung nochmals zusammengefasst:

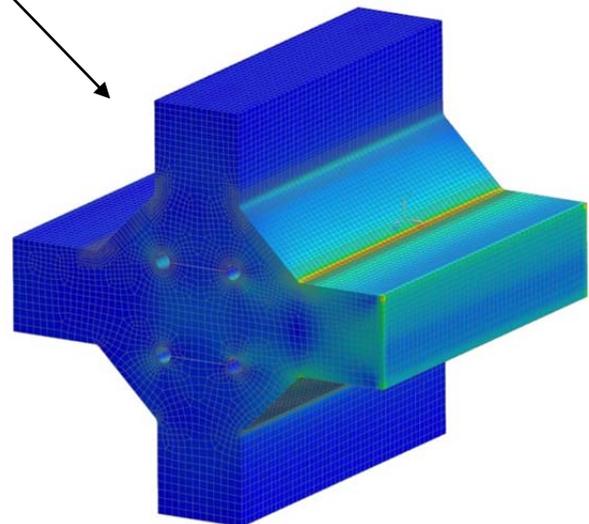


Camera ANALYSIS_1

Welche Schnittgrößen eines globalen Strukturmodells eignen sich am besten für die Bewertung?



Wie werden diese Schnittgrößen (als Einheitslasten) auf ein 3D-Schweißnahtsubmodell aufgebracht?



Ist die Berechnungsmethodik „Inertia Relief“ für die Simulation der Einheitslasten geeignet?

Abbildung 3: Fragestellungen

3 Theoretischer Hintergrund

3.1 Spannungen laut IIW

Folgende Definitionen und Informationen sind Auszüge aus: Hobbacher, *Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile* (S.7 ff).

In den Schwingfestigkeits-Empfehlungen des International Institute of Welding (IIW) werden folgende drei grundlegende Spannungsbewertungskonzepte angegeben:

- Nennspannungskonzept
- Strukturspannungskonzept
- Kerbspannungskonzept

3.1.1 Nennspannung

Die Nennspannung ist die errechnete Spannung im betrachteten Querschnitt eines Bauteils. Sie wird mit allgemeinen Theorien der technischen Mechanik (z.B. Balkenbiegetheorie) bestimmt.

Örtliche spannungserhöhende Effekte der Schweißverbindung werden nicht berücksichtigt, jedoch müssen spannungserhöhende Effekte aus der makrogeometrischen Form des Bauteils in der Nähe der Schweißverbindungen auf jeden Fall berücksichtigt werden.

Die Nennspannung kann über den betrachteten Querschnitt variieren. Bei der Berechnung wird ein elastisches Verhalten angenommen.

Für die Berechnung der Nennspannung wird die Finite-Element-Methode (FEM) genutzt, wobei darauf geachtet werden muss, dass alle spannungserhöhenden Effekte des konstruktiven Details der Schweißverbindung ausgeschlossen sind.

Im einfachen Bauteil kann die Nennspannung mit elementaren Theorien der linear-elastischen technischen Mechanik bestimmt werden.

3.1.2 Strukturspannung

Die Strukturspannung σ_{stru} enthält alle spannungserhöhenden Effekte des konstruktiven Details, jedoch nicht die Spannungskonzentration aus der Schweißnaht selbst. Auf diese Weise wird die nichtlineare Spannungsspitze σ_{nlp} , die durch die örtliche Kerbe verursacht wurde, z.B. durch den Schweißnahtübergang, von der Strukturspannung ausgeschlossen.

Die Strukturspannung kann in zwei Spannungskomponenten aufgeteilt werden, in die Membranspannung σ_{mem} und in die Schalenbiegespannung σ_{ben} . Sie ist üblicherweise höher als die Nennspannung, weil spannungserhöhende Effekte aus der konstruktiven Kerbe der Schweißverbindung eingeschlossen sind.

Das Strukturspannungsverfahren wird für Schweißverbindungen empfohlen, bei welchen eine Nennspannung wegen komplizierter geometrischer Effekte nicht eindeutig definiert werden kann, und bei welchen die Kerbwirkung nicht mit einem tabellierten konstruktiven Detail verglichen werden kann.

Für die Berechnung der Strukturspannung wird mehrheitlich die Finite-Element-Methode (FEM) angewandt, da es im Allgemeinen nicht möglich ist analytische Methoden zum Bestimmen der Strukturspannungen aus den Kerbwirkungen eines konstruktiven Details zu benutzen.

Bei der Analyse mittels FEM sollte die maximale Hauptspannung bestimmt werden.

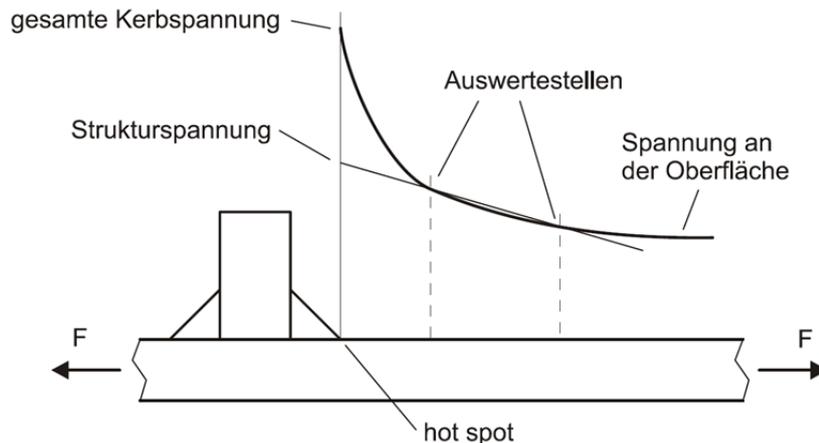


Abbildung 4: Definition der Strukturspannung (Grafik: Hobbacher)

Das Netz der Finiten Elemente muss an den kritischen Stellen (hot-spot) fein genug sein, damit Spannungen und Spannungsgradienten an den Extrapolationspunkten ermittelt werden können.

3.1.3 Kerbspannung

Die Kerbspannung ist die gesamte Spannung im Kerbgrund, wobei die Wirkung der örtlichen Kerbe berücksichtigt ist und ein linear-elastisches Materialverhalten angenommen wird. Sie ist die Summe aus der Strukturspannung σ_{stru} und der nichtlinearen Spannungsspitze σ_{nlp} .

Um die statistische Natur und die damit verbundene Streuung der Abmessungen der Schweißnaht und das nichtlineare Materialverhalten im Kerbgrund zu erfassen, wird die reale Form der Kerbe durch eine effektive ersetzt.

Bei Baustählen wird für die Ermittlung der effektiven Kerbspannung ein effektiver Kerbradius von $r = 1\text{ mm}$ gewählt, da dieser konsistente Ergebnisse liefert. Zur Schwingfestigkeitsbewertung wird die effektive Kerbspannung mit einer allgemeinen Wöhlerlinie des Ermüdungswiderstandes verglichen.

Die Methode ist auf Schweißverbindungen beschränkt, die voraussichtlich vom Nahtübergang oder von der Wurzel her versagen. Andere Fälle des Ermüdungsversagens, z.B. ausgehend von Oberflächenrauigkeiten oder von eingeschlossenen Imperfektionen, werden nicht abgedeckt. Der effektive Kerbradius von 1 mm ist begrenzt auf Wanddicken $t \geq 5\text{ mm}$. Für kleinere Wanddicken wird ein effektiver Kerbradius von $0,3\text{ mm}$ oder weniger gewählt.

Der Kerbfaktor beschreibt das Verhältnis von Kerbspannung zu Nenn- oder Strukturspannung.

Für die Berechnung der effektiven Kerbspannung kann diese, oder die Kerbfaktoren aus parametrischen Formeln, aus vorweg aufgestellten Diagrammen oder aus Finite-Element- oder Randelement-Rechnungen entnommen werden. Der effektive Kerbradius wird so eingeführt, dass die Spitze des Radius den Kerbgrund der wirklichen Kerbe berührt, z.B. das Ende einer nicht verschweißten Wurzelkerbe.

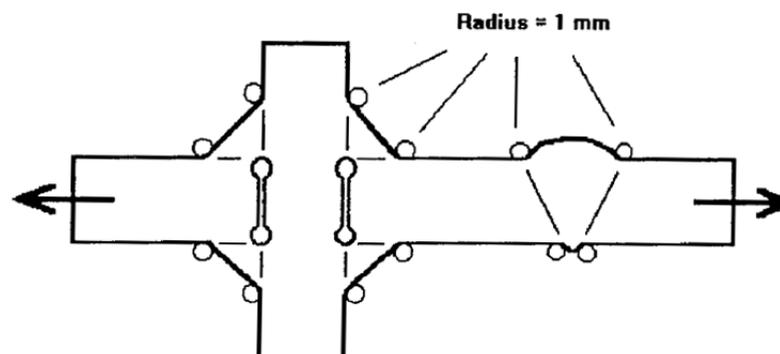


Abbildung 5: Bestimmung der effektiven Kerbspannung (Grafik: Hobbacher)

3.1.3.1 Kerbspannungskonzept nach Radaj

Das Kerbspannungskonzept nach: Dieter Radaj, *Fatigue Assessment of welded joints by local approaches*, basiert auf der Abschätzung der Mikrostützwirkung an scharfen Übergangskerben des Schweißstoßes nach dem Ansatz von: Neuber, *Kerbspannungslehre*.

Radaj führt die Kerbwirkungszahl K_f ein:

$$K_f = \frac{\bar{\sigma}_k}{\sigma_n} \quad (\text{Glg. 1})$$

In dieser Gleichung ist $\bar{\sigma}_k$ die ermüdungswirksame Kerbspannung und σ_n die ertragbare Nennspannung. Die erwähnten Spannungen bezeichnen zunächst Dauerfestigkeitswerte, sind jedoch auch auf Zeitfestigkeitswerte übertragbar.

Die Definition der Kerbwirkungszahl weicht von den traditionellen Definitionen ab, welche das Verhältnis aus der Dauerfestigkeit der ungekerbten polierten Probe zur Dauerfestigkeit der gekerbten polierten Probe darstellen.

3.1.4 Definition der Spannungsanteile

Bei der Verwendung der Kerbspannungen ist zu beachten, dass im Allgemeinen die Spannungsverteilung über die Blechdicke in der Nähe von Kerben nicht linear ist.

Daher wird nach den Überlegungen des International Institute of Welding (IIW) die Kerbspannung σ_{in} in folgende Spannungsanteile zerlegt:

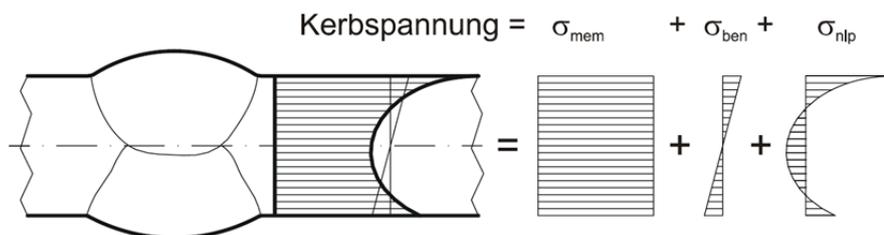


Abbildung 6: Spannungsanteile bei einem nichtlinearen Spannungsverlauf (Grafik: Hobbacher)

Die einzelnen Spannungsanteile sind wie folgt definiert:

σ_{mem} Membranspannung: ist der über die Wanddicke konstante Mittelwert der Normalspannung einer Platte oder Schale.

σ_{ben} Schalenbiegespannung: ist die Biegespannung in einem schalen- oder plattenartigen Teil eines Bauteils. Sie ist linear über die Wanddicke des Bleches verteilt, wobei der Nulldurchgang der Spannung sich mit der Mittellinie des Bleches schneidet. Die Steigung der Schalenbiegespannung wird so gewählt, dass der verbleibende nichtlineare Rest im Gleichgewicht steht.

σ_{nlp} nichtlineare Spannungsspitze: ist der verbleibende Spannungsanteil der Kerbspannung, der die linear verlaufende Strukturspannung übersteigt.

Diese Spannungsanteile können für ein Blech mit der Dicke t und einer gegebenen Spannungsverteilung $\sigma(x)$ analytisch getrennt werden, wobei $x=0$ an der Oberfläche des Bleches und $x=t$ an der gegenüberliegenden Seite anzusetzen ist:

$$\sigma_{\text{mem}} = \frac{1}{t} \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) dx \quad (\text{Glg. 2})$$

$$\sigma_{\text{ben}} = \frac{6}{t^2} \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \left(\frac{t}{2} - x \right) dx \quad (\text{Glg. 3})$$

$$\sigma_{\text{nlp}}(x) = \sigma(x) - \sigma_{\text{mem}} - \left(1 - \frac{x}{t} \right) \sigma_{\text{ben}} \quad (\text{Glg. 4})$$

3.2 Die Finite Element Methode (FEM)

Für die Erstellung und Simulation der, in dieser Diplomarbeit benutzten Struktur- und Detail-Modelle wird die Finite Element Methode (FEM) verwendet.

Hierfür wird das, von Siemens PLM Software bereitgestellte Programm UGS NX (7) für die Erstellung der Modelle bzw. NX Nastran (Nasa Structural Analysis System) für die Simulation herangezogen.

3.2.1 Von-Mises Vergleichsspannung

Zum Vergleich bzw. der Verifikation einzelner Methoden in dieser Diplomarbeit werden die, aus den Simulationen gewonnenen Spannungs-Ergebnisse der Von-Mises Spannungen herangezogen.

Folgende Definitionen und Informationen sind Auszüge aus: Parkus, *Mechanik der festen Körper* (S.181) bzw. wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Vergleichsspannung> (08.03.2011).

Die Vergleichsspannung σ_v bezeichnet eine fiktive einachsige Spannung, die dieselbe Materialbeanspruchung darstellt wie ein realer, mehrachsiger Spannungszustand.

Damit kann der wirkliche dreidimensionale Belastungszustand im Bauteil, bestehend aus Normal-Spannungen und Schub-Spannungen in alle drei Raumrichtungen, direkt mit den Kennwerten aus dem einachsigen Zugversuch (Material-Kennwerte, z.B. Streckgrenze oder Zugfestigkeit) verglichen werden.

Nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) oder Von-Mises-Vergleichsspannung genannt, tritt Versagen des Bauteils dann auf, wenn die Gestaltänderungsenergie einen Grenzwert überschreitet.

Verwendet wird diese Hypothese für zähe Werkstoffe (z.B. Stahl) unter ruhender und wechselnder Beanspruchung.

Nicht brauchbar ist die Gestaltänderungsenergiehypothese bei nahezu hydrostatischen Spannungszuständen (gleich große Spannungen in alle drei Raumrichtungen), weil sich trotz der Beanspruchung eine Vergleichsspannung von Null ergibt.

Die Von-Mises-Vergleichsspannung lautet für den allgemeinen Spannungszustand:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]} \quad (\text{Glg. 5})$$

Durch die Hauptnormalspannungen ausgedrückt:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2]} \quad (\text{Glg. 6})$$

Für den Sonderfall des ebenen Spannungszustandes $\sigma_{zz} = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$ erhält man:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{xx}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (\text{Glg. 7})$$

3.2.2 Elemente

Die meisten FE-Programme stellen weit mehr als 100 verschiedene Finite Elemente zur Verfügung. Für diese Diplomarbeit werden nun die folgenden drei Finiten Element-Typen, die das Programm UGS NX von Siemens PLM Software zur Verfügung stellt verwendet:

- CQUAD4: ist ein vierseitiges-, dünnes Schalelement mit 4 Knoten.

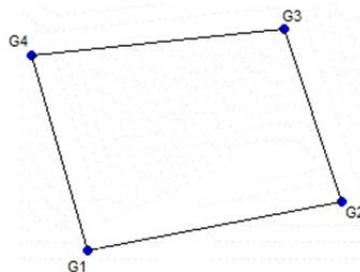


Abbildung 7: CQUAD4 Element (Grafik: www.kxcad.net)

Bei der Siemens Mobility wird dieser Element-Typ zur Erstellung globaler Strukturmodelle von Drehgestell-Rahmen bzw. Fahrwerkskomponenten eingesetzt. In dieser Diplomarbeit kommt das CQUAD4 Element zur Anwendung, da die Simulations-Ergebnissen der globalen Strukturmodelle als Grundlage für weitere Berechnungen dienen.

Die Knoten dieses Element-Typs besitzen alle 6 Freiheitsgrade (3 translatorisch, 3 rotatorisch). Daher ist es möglich, was speziell später beim Aufbringen der Schnittgrößen auf ein Detail Modell gezeigt wird, alle auftretenden Kräfte und Momente auf die Knoten aufzubringen.

- CQUAD8: ist ein vierseitiges-, dünnes Schalenelement mit 8 Knoten

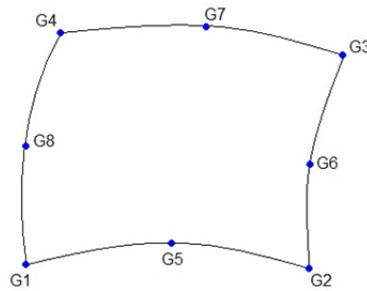


Abbildung 8: CQUAD8 Element (Grafik: www.kxcad.net)

Das CQUAD8 Element kommt in dieser Diplomarbeit bei vielen unterschiedlichen Modellen bzw. Methoden zur Anwendung.

Die Knoten dieses Element-Typs besitzen 5 Freiheitsgrade (3 translatorisch, 2 rotatorisch). Nur die beiden Rotationen in der Ebene sind mit Biege- bzw. transversaler Schubsteifigkeit versehen.

- CHEXA(20): ist ein Hexaeder-Volumenelement mit 20 Knoten.

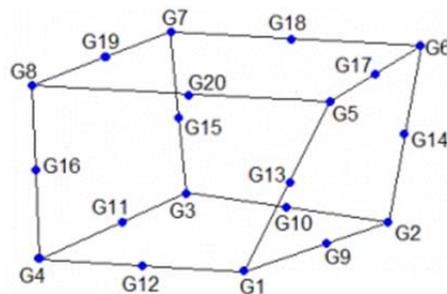


Abbildung 9: CHEXA(20) Element (Grafik: www.kxcad.net)

Das CHEXA(20) Element wird in dieser Diplomarbeit zur Erstellung der Referenz-Solid Modelle, der Detail-Volumenmodelle sowie der 3D-Schweißnahtsubmodelle verwendet.

Die Knoten dieses Element-Typs besitzen 3 Freiheitsgrade (nur die 3 translatorischen). Es ist daher nicht möglich Momente direkt auf die Knoten eines solchen Volumenelementes aufzubringen.

3.2.3 Combine Load Cases

Auf die Detail-Volumenmodelle sollen Einheitslasten in separaten Lastfällen aufgebracht werden um die daraus resultierenden Spannungen in den Kerben und Wurzeln zu analysieren. Es ist daher notwendig diese Spannungs-Ergebnisse der einzelnen Lastfälle miteinander zu kombinieren.

Das Programm UGS NX bietet mit der Funktion „Combine Load Cases“ die Möglichkeit, die Ergebnisse einzelner linear statischer Lastfälle einer Simulation miteinander in beliebiger Weise zu kombinieren und skalieren.

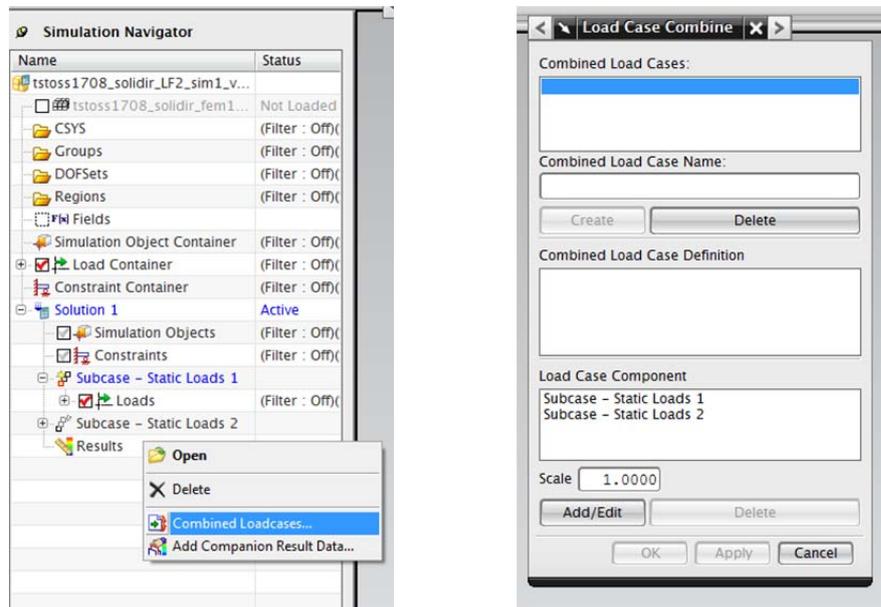


Abbildung 10: Combine Load Cases im UGS NX

4 Ermittlung bestimmter Schnittgrößen aus dem globalen Strukturmodell

Ein sehr wichtiger Teil dieser Diplomarbeit ist es herauszufinden, welche Größen man aus dem globalen Strukturmodell auslesen sollte, bzw. welche Größen für die weiteren Berechnungen am 3D-Schweißnahtsubmodell sowie zur Erstellung des Kerbfallkataloges am besten geeignet sind. Im Programm NX Nastran lassen sich viele beliebige Schnittgrößen als Ergebnis ausgeben. Die wichtigsten Schnittgrößen, die auch in dieser Arbeit untersucht wurden, sind Grid Point Forces („Knotenkräfte“) und Grid Point Moments („Knotenmomente“), Displacements („Verschiebungen“) und Rotations („Verdrehungen“), und Stresses („Spannungen“).

Als zielführende Methodik hat sich das Auslesen bzw. Aufbringen der Grid Point Forces und Grid Point Moments aus dem globalen Strukturmodell herausgestellt. Diese Methodik wird nun in den folgenden Kapiteln gezeigt bzw. verwendet.

Die anderen Schnittgrößen, Stresses bzw. Displacements und Rotations, die zu keinen brauchbaren Lösungen führten werden im Anhang, Kapitel 10.2.1 und Kapitel 10.2.2 gezeigt.

4.1 Grid Point Forces – Grid Point Moments

Kräfte und Momente lassen sich im NX Nastran Ergebnis als Grid Point Forces und Grid Point Moments an den Knotenpunkten exakt ausgeben.

Der große Vorteil dabei ist, dass diese Kräfte und Momente direkt verwendet werden können, d.h. dass sie ohne bestimmte Umrechnungen auf andere Größen auf ein 3D-Schweißnahtsubmodell übertragbar sind, und dass deren Wirkungsrichtungen ebenfalls schon bekannt sind.

Ein Problem bei der Verwendung der Grid Point Forces und Grid Point Moments ist, dass die Kräfte und Momente nur an den Knoten exakte Werte liefern. Innerhalb eines Elements lassen sie sich jedoch nicht ermitteln.

Anhand der folgenden Abbildung eines gebogenen Kastenträgers wird die Darstellung der Grid Point Forces im NX Nastran gezeigt:

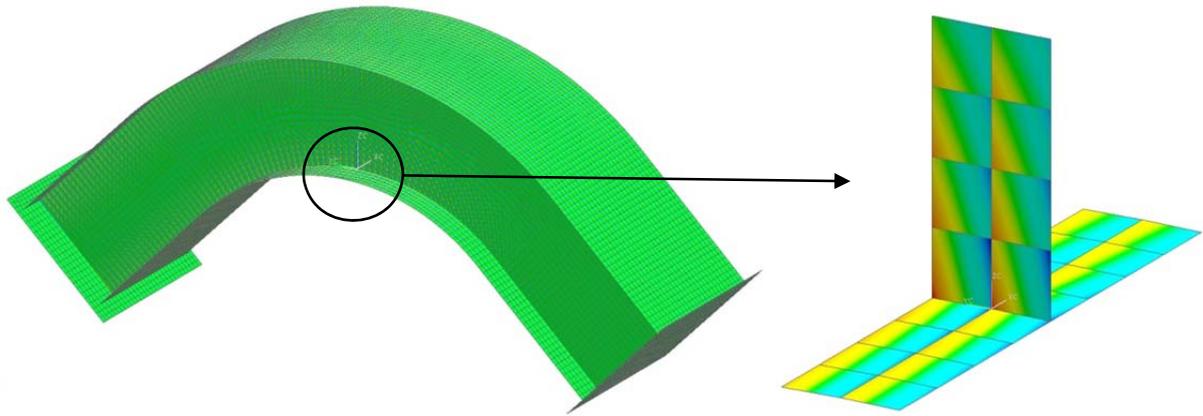


Abbildung 11: Kastenträger; Grid Point Forces

Die Abbildung zeigt, wie die Grid Point Forces (hier in Kastenträgerrichtung) im NX Nastran ausgegeben werden. Man sieht die an den Knoten auftretenden positiven- und negativen Schnittufer der jeweils angrenzenden Elemente. Summiert man nun die an den Knoten auftretenden Kräfte aller vier angrenzenden Elemente auf, so wird sich natürlich eine resultierende Kraft von 0 N ergeben, da der Knoten im Gleichgewicht sein muss.

Man erkennt hier auch sehr deutlich, wie die Kräfte innerhalb eines Elements dargestellt werden. Da sich der Kräfteverlauf im Element jeweils vom positiven- zum negativen Schnittufer ergibt, und dadurch zum Beispiel auch Stellen mit einer Kraft von 0 N (hier grün dargestellt) auftreten, ist eine direkte Ermittlung der Kräfte und Momente innerhalb eines Elementes nicht möglich.

Mit der Tatsache, dass an den Knoten die exakten Werte der Grid Point Forces und Grid Point Moments vorliegen, ist die Verwendung dieser Schnittgrößen, bzw. die Verifikation der Methodik möglich.

Für die Praxis, bzw. die Implementation in den Berechnungsablauf zur Ermittlung der realen Spannungen in der Kerbe, ist es jedoch erforderlich, die genauen Werte der Kräfte und Momente auch innerhalb eines Elementes zu kennen. Beim Erstellen eines globalen Strukturmodells ist es sehr wichtig, dass es so wenig Modellierungsvorschriften wie nur möglich gibt, um die Modell-Erstellungszeit gering zu halten. Das bedeutet, dass der Abstand bzw. die Lage der Knoten von der Schweißnaht nicht abhängig von der Methodik sein sollte.

Um nun auf die exakten Werte der Kräfte und Momente auch innerhalb eines Elementes zu gelangen müssen an den zu betrachtenden Stellen Interpolationen der Werte der angrenzenden Knoten durchgeführt werden.

Für die weiteren Berechnungen in dieser Arbeit werden keine Interpolationen durchgeführt und stattdessen die Knoten an den zu untersuchenden Stellen richtig gesetzt. Die Grid Point Forces und Grid Point Moments werden an diesen Knoten daher direkt ausgelesen und übernommen.

Ein weiteres Problem bei der Verwendung der Grid Point Forces und Grid Point Moments stellt das direkte Aufbringen der aus dem globalen Strukturmodell ermittelten Momente auf die Seiten- Stirnflächen des Detail-Volumenmodells dar. Momente können naturgemäß nicht direkt auf Knoten von Volumen-Elementen aufgebracht werden, da anhand der Elementdefinition eines Volumen-Elementes dessen Knoten nur die drei translatorischen Freiheitsgrade besitzen.

Es muss daher ein geeigneter Übergang von zweidimensionalen Schalenelementen auf dreidimensionale Volumenelemente gefunden werden.

4.2 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden kurz die Ergebnisse der behandelten Schnittgrößen Stresses, Displacements / Rotations sowie Grid Point Forces und Grid Point Moments gezeigt. Die genauen Ergebnisse sind im vorangegangenen Kapitel für die Grid Point Forces und Grid Point Moments, sowie im Anhang für die Stresses und Displacements / Rotations angegeben.

Als grundsätzliches Ergebnis der Schnittgrößenuntersuchung geht hervor, dass sich die Grid Point Forces und Grid Point Moments am besten für die Bewertung der Schweißnähte eines 2D-Strukturmodells mittels dem 3D-Kerbfallkataloges eignen.

- **Stresses:**

Die Verwendung von Spannungen zur Bewertung der Schweißnähte bietet den großen Vorteil, dass sich diese in einem globalen Strukturmodell an jeder beliebigen Stelle, auch innerhalb eines Elementes ohne Umrechnung genau ermitteln lassen. Daher wären keine speziellen Modellierungsvorschriften für die Erstellung des globalen Strukturmodells notwendig.

Die Spannungen werden an der zu betrachtenden Stelle aus dem globalen Strukturmodell komponentenweise ausgelesen und mittels Zug/Druck- bzw. Schubbelastung auf die Seiten- und Stirnflächen eines 3D-Submodells aufgebracht. Das größte Problem stellt jedoch dar, dass der Element-Typ Schale keine Schubspannungen normal auf die Schalenoberfläche berechnen kann. Daher muss mittels eines Berechnungsverfahrens, dem sogenannten „Querkraftausgleich“ auf diese fehlenden Spannungen zurückgerechnet werden.

Da jedoch keine Verifikation dieser Methode möglich war, wurde die Verwendung der Spannungen für die weiteren Betrachtungen als nicht zielführend angesehen und wieder verworfen.

- **Displacements / Rotations:**

Die Verwendung von Verschiebungen und Verdrehungen zur Bewertung der Schweißnähte bietet ebenfalls den großen Vorteil, dass sich diese in einem globalen Strukturmodell an jeder beliebigen Stelle, auch innerhalb eines Elementes ohne Umrechnung genau ermitteln lassen. Daher wären auch hier keine speziellen Modellierungsvorschriften für die Erstellung des globalen Strukturmodells notwendig.

Der große Nachteil dabei ist jedoch der Steifigkeitsunterschied zwischen der Schweißstoßabbildung in einem globalen 2D-Strukturmodell und der in einem 3D-Schweißnahtsubmodell. Daher ist es nicht zielführend die Verschiebungen und Verdrehungen als Einheitslasten direkt auf die Seiten- und Stirnflächen des 3D-Schweißnahtsubmodells aufzubringen. Es wären daher Umrechnungen erforderlich, die diese Verschiebungen und Verdrehungen in Kräfte und Momente transformieren, die anschließend auf das 3D-Schweißnahtsubmodell aufgebracht werden können.

Da jedoch wiederum keine Verifikation dieser Methode möglich war, wurde die Verwendung der Verschiebungen und Verdrehungen für die weiteren Betrachtungen als nicht zielführend angesehen und wieder verworfen.

- **Grid Point Forces / Grid Point Moments:**

Knotenkräfte und Knotenmomente lassen sich nur an den Knotenpunkten der Schalen-Elemente eines 2D-Strukturmodells exakt darstellen und ausgeben. Um aufwendige Modellierungsvorschriften zu vermeiden ist daher eine Interpolation der Knotenkräfte und Momente notwendig, um die richtigen Ergebnisse der Anschluss-Punkte auch innerhalb eines Schalen-Elementes zu erhalten.

Das direkte Aufbringen der Knotenkräfte und Knotenmomente als Einheitslasten auf die Seiten- und Stirnflächen des 3D-Schweißnahtsubmodells ist nicht möglich, da sich aufgrund der Elementdefinition eines Volumen-Elementes Momente nicht direkt auf die Knoten eines 3D-Modells aufbringen lassen. Daher muss hier eine passende Methode des Aufbringens der Knotenkräfte und Knotenmomente auf das 3D-Schweißnahtsubmodell gefunden werden.

Trotz dieser Probleme ist die Verwendung der Grid Point Forces und Grid Point Moments die zielführende Methode, und wird in weiterer Folge für die Bewertung der Schweißnähte eines 2D-Strukturmodells mittels dem 3D-Kerbfalkataloges genutzt.

5 Aufbringen der Schnittgrößen auf ein Detailmodell

Der nächste Schritt ist herauszufinden, wie man die aus dem globalen Strukturmodell ermittelten Grid Point Forces und Grid Point Moments auf ein 3D-Schweißnahtsubmodell aufbringt.

Ein direktes Aufbringen der Kräfte und Momente auf die Seiten- und Stirnflächen des Detail-Volumenmodells ist nicht möglich, da die Knoten eines Volumen-Elementes nur die drei translatorischen Freiheitsgrade besitzen.

Daher muss eine andere Möglichkeit gefunden werden, wie man diese Grid Point Forces und Grid Point Moments bestmöglich auf das Detailvolumenmodell überträgt.

5.1 Übergang von 2D-Shell Elemente auf 3D-Solid Elemente

Da ein direktes Aufbringen der Kräfte und Momente auf die Seiten- und Stirnflächen des Detail-Volumenmodells nicht möglich ist, muss nun eine andere Art des Aufbringens gefunden werden. Die zielführende Methode ist nun die aus dem globalen Struktur-Schalenmodell ermittelten Kräfte und Momente wieder auf Schalenelemente aufzubringen. Diese Schalenelemente müssen jedoch mit den Volumenelementen des Detailmodells in geeigneter Weise verbunden werden. Dadurch ergibt sich das Problem des Übergangs von zweidimensionalen Schalenelementen, welche alle 6 Freiheitsgrade besitzen auf dreidimensionale Volumenelemente, welche nur die drei translatorischen Freiheitsgrade besitzen.

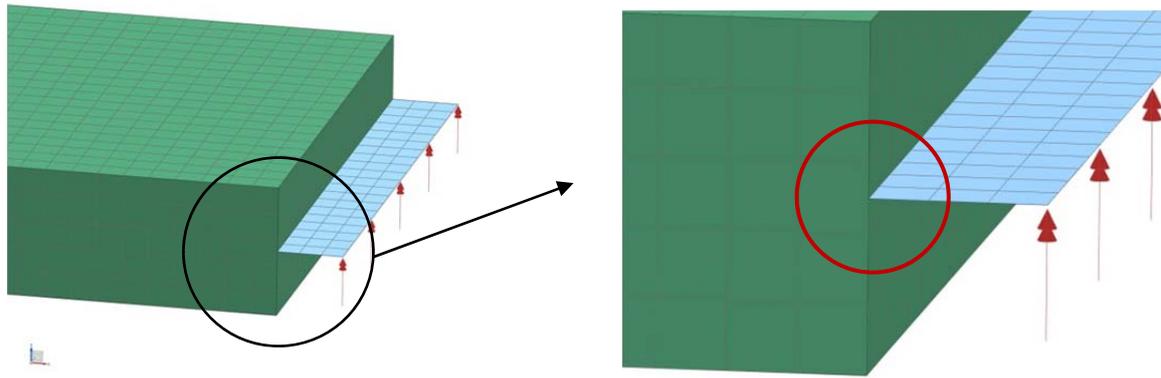


Abbildung 12: 2D - 3D Übergang

Das Detailvolumenmodell wird mit normal zu den Anschlussflächen stehenden Schalen erweitert. Anschließend muss ein geeigneter 2D-3D Übergang gefunden werden, um die Kräfte und Momente bestmöglich in das Detail-Volumenmodell einzuleiten.

Zwei Methoden, Übergangsschalenelemente und RBE3-Spider Elemente dieses Übergangs wurden behandelt und werden in den nächsten Kapiteln gezeigt.

Die folgenden Berechnungen zur Verifikation der einzelnen Methoden erfolgten jeweils in mehreren Lastfällen, wobei mindestens ein Lastfall eine Biegebeanspruchung und ein Lastfall eine Schubbelastung behandelte. Ein aus mehreren Beanspruchungen kombinierter Lastfall wurde ebenfalls berechnet.

5.2 Übergangsschalenelemente

Die erste untersuchte Methode ist den Übergang von zweidimensionalen Schalenelementen auf dreidimensionale Volumenelemente mittels Übergangsschalenelementen zu realisieren.

Diese Übergangsschalen sind, da das Detail-Volumenmodell aus Hexaeder-Elementen (CHEXA20) aufgebaut wird quadratische Schalen (CQUAD8). Sie werden an den Seiten- und Stirnflächen des Detailmodells hinzugefügt und mit der Funktion „Merge Duplicate Nodes“ mit den Volumenelementen verbunden.

„Merge Duplicate Nodes“ ist eine Funktion im UGS NX um zusammenfallende- bzw., in einem geringen Abstand benachbarte Knoten zu vereinigen.

Dadurch werden zwar die Knoten der Übergangsschalenelemente mit den, an den Seiten- und Stirnflächen liegenden Knoten der Detail-Volumenelemente vereinigt, die Eigenschaften der Übergangsschalenelemente bleiben jedoch aufrecht.

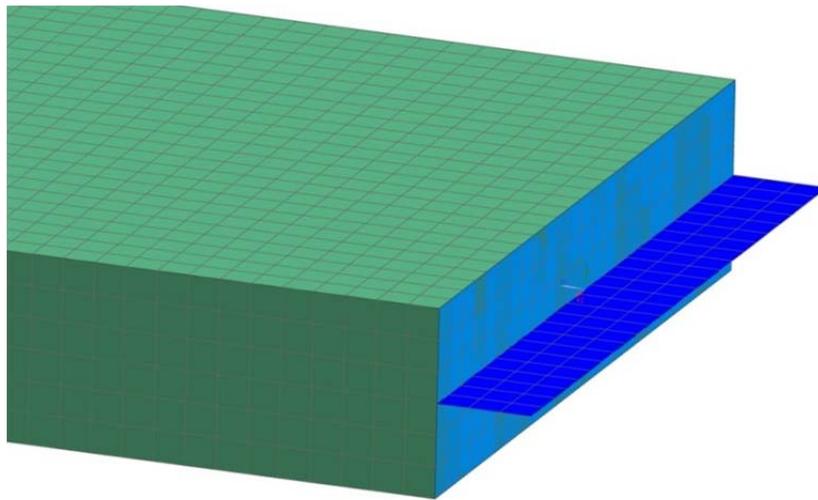


Abbildung 13: Übergangsschalenelemente - Prinzip

Die Grafik zeigt die Übergangsschalenelemente (blau), die mit den Knoten der Stirnfläche des Detail-Volumenkörpers (grün) vereinigt wurden.

Bei dieser Methode ist es notwendig, dass die Übergangsschalenelemente die gleichen geometrischen Abmessungen wie die Elemente der Seiten- und Stirnflächen des Detail-Volumenmodells haben, damit alle Knoten der Schalenelemente mit den Knoten der Volumenelemente verschmelzen.

Da das Detail-Volumenmodell aus 20 knotigen Hexaeder-Elementen (CHEXA20) besteht, müssen die Übergangsschalen aus 8 knotigen quadratischen Schalenelementen (CQUAD8) aufgebaut werden.

Die Übergangsschalen werden anschließend mit den, normal auf diese stehenden Anschlussschalen (dunkelblau) verbunden. Auf die Randknoten der Anschlussschalen werden nun die aus dem globalen Strukturmodell ermittelten Kräfte und Momente aufgebracht.

Zur Verifikation dieser Methode wurde ein T-Stoßmodell herangezogen. An den Seiten- und Stirnflächen dieses Detail-Volumenmodells des T-Stoßes wurden die Übergangsschalenelemente zusammen mit den Anschlussschalenelementen angebracht und verbunden.

Das Detail-Volumenmodell sieht wie folgt aus:

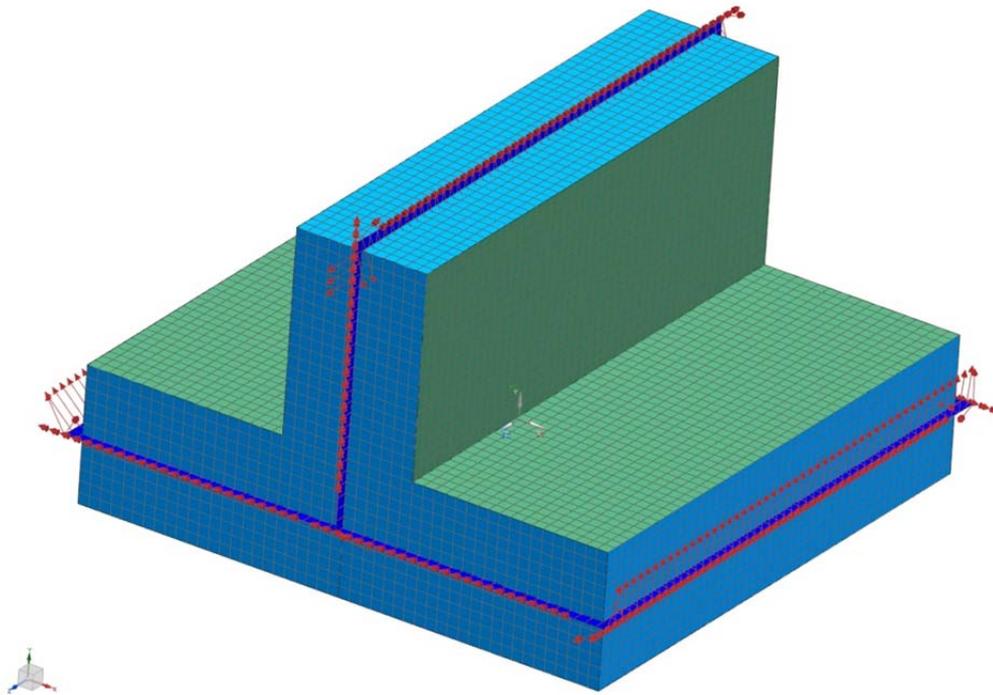


Abbildung 14: Übergangsschalenelemente T-Stoß

Auf dieses Detail-Volumenmodell wurden nun die, aus einem globalen Strukturmodell ermittelten Kräfte und Momente aufgebracht und anschließend berechnet.

Die daraus aus der Simulation gewonnenen Spannungs-Ergebnisse von einzelnen ausgewählten Knoten werden mit den Spannungs-Ergebnissen eines, den geometrischen Abmessungen des globalen Strukturmodells entsprechend modellierten Solid Modells verglichen.

Die Methode der Übergangsschalenelemente konnte im ersten Versuch nicht verifiziert werden, da die Abweichungen der zum Vergleich herangezogenen Spannungen der untersuchten Knoten des Detail-Modells vom globalen Solid-Modell zu groß waren.

Daher wurde im nächsten Schritt versucht anhand der Schaleneinstellungen der Übergangsschalen die Abweichungen der Spannungs-Ergebnisse zu reduzieren, bzw. eine größere Übereinstimmung der einzelnen Spannungs-Ergebnisse zwischen dem Detail-Modell und dem Referenz-Solid-Modell zu finden.

Die wichtigsten Parameter-Einstellungen der CQUAD-Schalen im UGS NX sehen wie folgt aus:

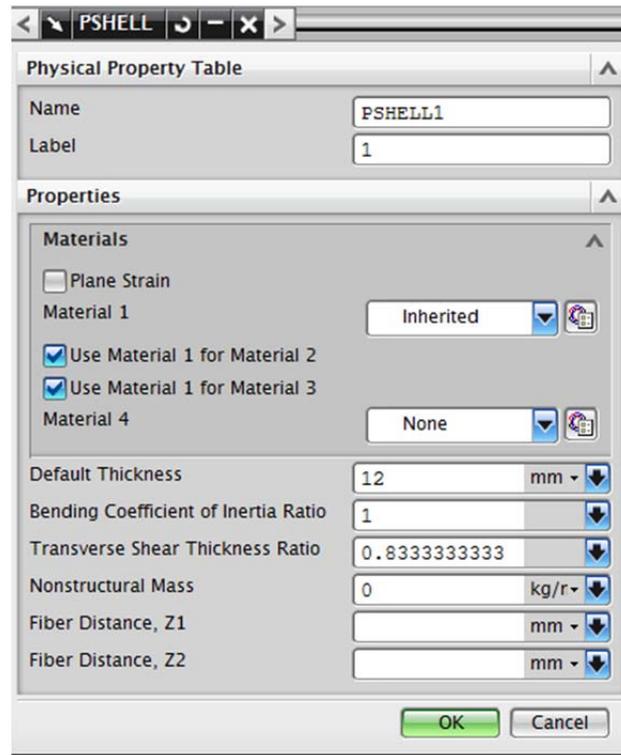


Abbildung 15: Shell-Properties im UGS NX

Die Einstellungen für „Default Thickness“, „Bending Coefficient of Inertia Ratio“ und „Transverse Shear Thickness Ratio“ wurden soweit geändert und angepasst, bis sich eine Übereinstimmung bzw. geringe Abweichungen der Spannungs-Ergebnisse zwischen dem Detail-Modell und dem globalen Solid-Modell im ersten Lastfall (Biegebelastung) ergeben hat.

Das Problem dabei war, dass zwar durch die Anpassung der Einstellungen die Abweichungen für den ersten Lastfall abgenommen haben, jedoch die Abweichungen der Spannungs-Ergebnisse im zweiten Lastfall (Schubbelastung) gleich hoch geblieben bzw. größer geworden sind.

Zusammenfassend kann man daher sagen, dass die Methode der Übergangsschalenelemente mit den angepassten Schaleneinstellungen zwar für bestimmte Lastfälle verifizierbar ist. Im allgemeinen Fall ist diese Methode jedoch nicht zielführend, da es nicht gelungen- bzw. möglich ist die Schaleneinstellungen dahingehend zu ändern, dass für jeden beliebigen Lastfall die Abweichungen der Spannungs-Ergebnisse zwischen dem Detail-Modell und dem globalen Solid-Modell gering zu halten.

Im letzten Schritt wurde noch versucht mittels hinzufügen von Solid-Elementen an die Seiten- und Stirnflächen des Detail-Modells die Verifikation dieser Methode der Übergangschalenelemente zu realisieren:

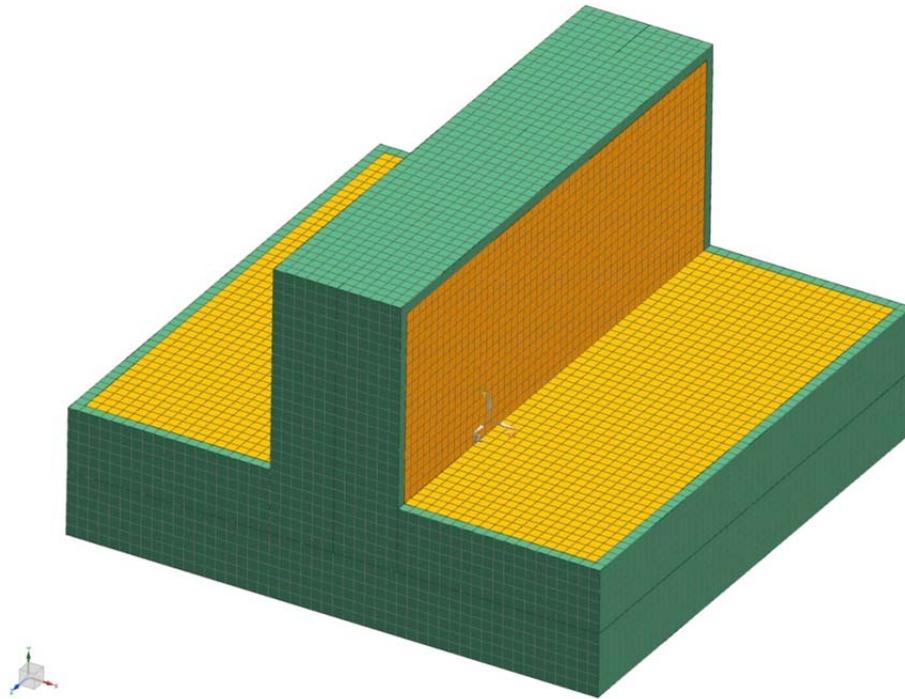


Abbildung 16: Detail-T-Stoß-Modell mit, hinzugefügten Solid-Elementen

Dabei ist die Verifikation dieser Methode der Übergangschalenelemente jedoch auch nicht geglückt, und sie wurde endgültig verworfen.

5.3 RBE3-Spider Elemente

Die zweite, zielführende Methode ist, den Übergang von zweidimensionalen Schalenelementen auf dreidimensionale Volumenelemente mittels RBE3-Spider Elementen zu realisieren.

Hierzu werden zwischen den Knoten der Seiten- und Stirnflächen des Detailmodells und den Knoten der Kanten der Anschlussflächen eindimensionale RBE3 Elemente eingesetzt.

5.3.1 Definition: Spider-Element, RBE2-Element, RBE3-Element

- **Spider-Element:** ein Spider-Element ist eine eindimensionale Verbindung zwischen zwei- oder mehreren Knoten und dient zur Verteilung von Massen oder Lasten. Dabei wird ein einzelner Knoten (Kernknoten) mit einem- oder mehreren Knoten (Beinknoten) mit einem starren Element oder Zwangsbedingungstypenelement verbunden.

Nach dem Erzeugen des Spider-Elements können durch Bearbeiten der Elementattribute bestimmte Freiheitsgrade aktiviert oder deaktiviert werden.

Typische Anwendungsgebiete sind das Darstellen eines Stiftes bzw. Bolzens in einer Bohrung oder das Aufbringen einer punktuellen Last auf eine Fläche.

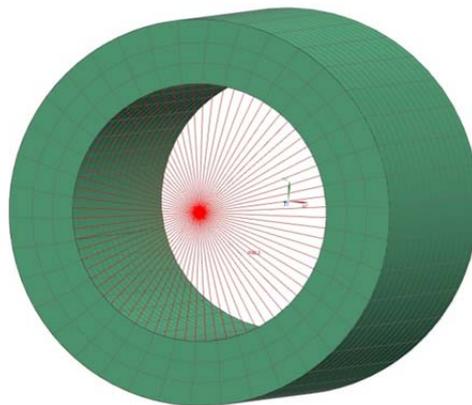


Abbildung 17: Spider-Element

- **RBE2-Element:** RBE2-Elemente (oder „rigid links“) sind eindimensionale Elemente die zur Verbindung zwischen Knoten dienen. Die aktiven Freiheitsgrade aller Knoten in einem RBE2-Element sind starr miteinander verbunden. Auf Grund dieser starren Verbindung, die diesem Fall über die gesamte Schnittfläche des Detail-Volumenmodells wirken würde, werden die RBE2-Elemente nicht verwendet.

- **RBE3-Element:** im Gegensatz zu den RBE2-Elementen besitzen die, ebenfalls eindimensionalen RBE3-Elemente andere Eigenschaften, die für diesen Anwendungsfall von Vorteil sind.

In einem RBE3-Element haben alle Knoten gleichen Anteil an der Bewegung, das bedeutet, im Gegensatz zum RBE2-Element ist das RBE3-Element flexibel, und daher nicht endlos starr.

Normalerweise wird dieses Element benutzt, um Masse hinzuzufügen oder zu verteilen, ohne Steifigkeit hinzuzufügen.

In unserem Anwendungsfall werden mehrere dieser RBE3-Elemente zu einem Spider zusammengeschlossen, und die Kräfte und Momente gleichmäßig auf die einzelnen RBE3-Elemente verteilt.

Auf Grund der besseren Aufteilung der Kräfte auf die Knoten und der Flexibilität der Beinknoten werden diese RBE3-Spider Elemente für den Übergängen der zweidimensionalen Schalenelemente der Anschlusschalen auf die dreidimensionalen Volumenelemente des Detail-Volumenmodells verwendet.

5.3.2 Kante-Fläche Verbindung

Der nächste Schritt ist nun herauszufinden, wie diese RBE3-Spider Elemente bestmöglich zur Verbindung der Kanten der Anschlusschalen mit den Seiten- und Stirnflächen des Detail-Volumenmodells eingesetzt bzw. aufgebracht werden können.

Im UGS NX gibt es nun die Möglichkeit den Verbindungstyp „Edge to Face“ (Kante zu Fläche) (Geometrie-basiert) oder den Verbindungstyp „Element Edge to Element Face“ (Elementkante zu Elementfläche) (FE-basiert) zu verwenden, um ein Kanten Set mit einem Flächen Set automatisch zu verbinden.

Diese eindimensionalen Verbindungstypen verwenden für Klebeverbindungen zwischen Kanten und Flächen immer vordefinierte Elementtypen.

Die Vorgehensweise bei diesen Verbindungen sieht wie folgt aus:

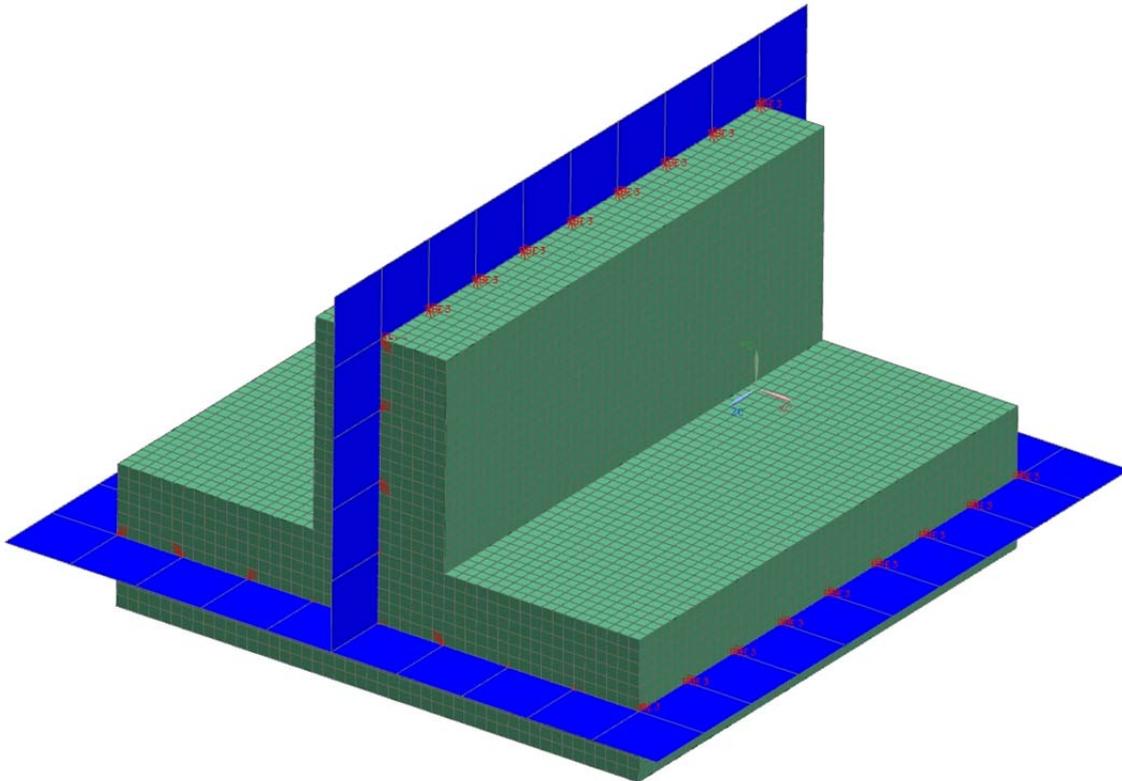


Abbildung 18: Darstellung: Edge to Face Verbindung

Die Software projiziert RBE2-Elemente von den ausgewählten Kanten der Anschlusschalen auf die ausgewählten Flächen des Detail-Volumenmodells und verbindet anschließend mit RBE3-Spider Elementen die projizierten Knoten mit den Knoten auf dem Oberflächengitter. Diese Art der Klebeverbindung ändert dabei weder das Ziel- noch das Quellgitter.

Der Nachteil bei diesen automatischen Verbindungstypen ist, dass die Software jeweils nur die benachbarten Knoten des Detail-Volumenmodells mit den Knoten der Kanten der Anschlusschalen verbindet. Da das Gitter des Detail-Volumenmodells sehr fein ist, wird dabei nur ein sehr kleiner Bereich der Fläche abgedeckt in dem die Kräfte und Momente eingeleitet werden.

Die folgende Abbildung einer Simulation dieser „Edge to Face“ Verbindung zeigt das Problem sehr deutlich:

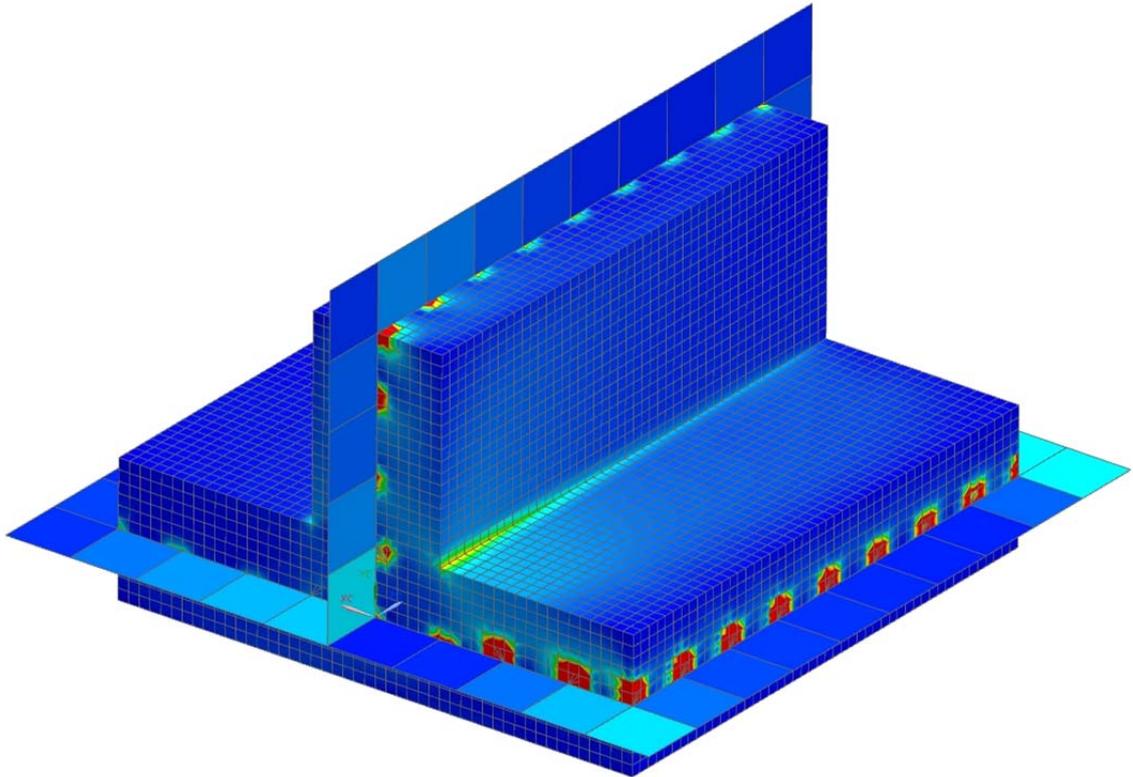


Abbildung 19: Simulation Edge to Face Verbindung

Diese Abbildung zeigt sehr schön den kleinen Bereich, in dem die Kräfte und Momente von den Kanten der zweidimensionalen Anschlusschalen in die gegenüberliegenden Flächen des dreidimensionalen Detail-Volumenmodells eingeleitet werden.

Da dies jedoch keine optimale Einleitung der Kräfte und Momente in das Detail-Volumenmodell ist, muss eine andere Methode als die der automatischen Verbindung mittels „Edge to Face“ gefunden werden.

5.3.3 Manuelle RBE3-Spider Verbindung

Da die automatische Verbindung „Edge to Face“ zwischen den Kanten der Anschlusschalen und den Flächen des Detail-Volumenmodells zu ungenau ist werden nun im nächsten Schritt diese, zur Verbindung zwischen Kanten und Flächen bestens geeignete RBE3-Spider Elemente manuell gesetzt.

Hierzu werden zuerst die Seiten- und Stirnflächen des Detail-Volumenmodells in Bereiche unterteilt, und die darin liegenden Knoten in Gruppen zusammengefasst. Anschließend werden die RBE3-Spider Elemente ausgehend von den Knoten der Kanten der Anschlusschalen mit den, in den einzelnen Bereichen zusammengefassten-, gegenüberliegenden Knoten der Flächen des Detail-Volumenmodells verbunden.

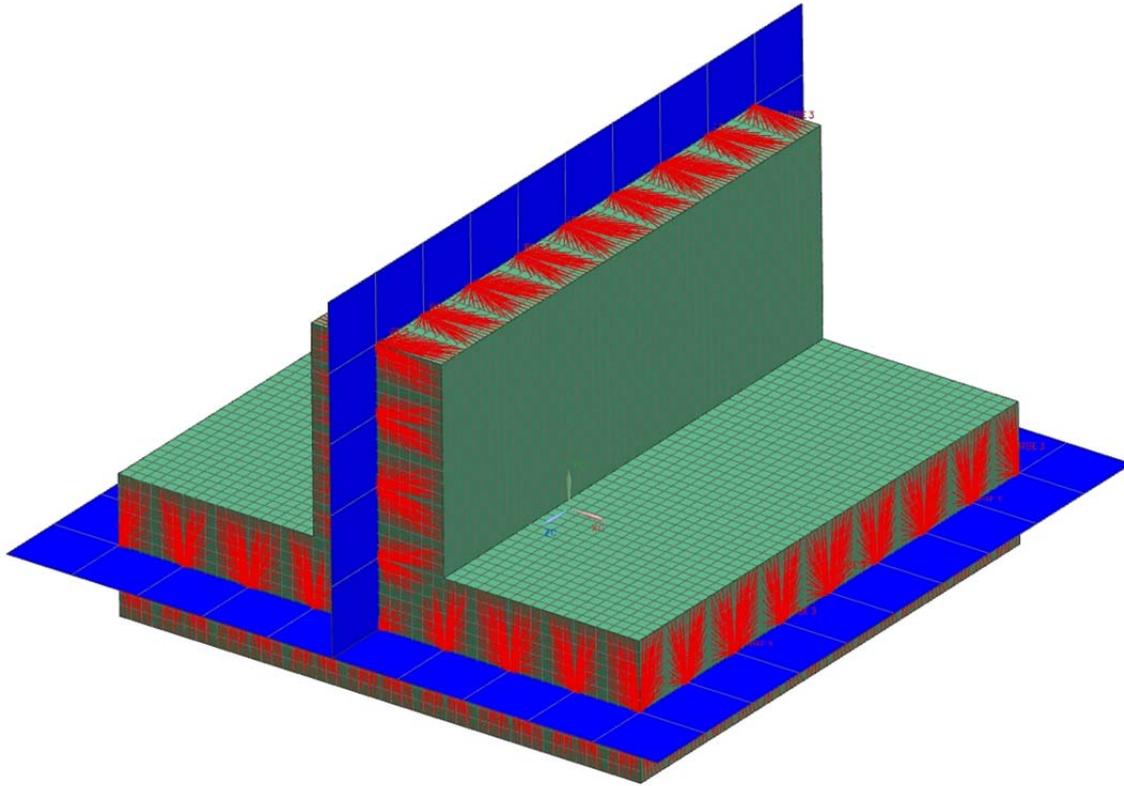


Abbildung 20: FE-Modell: T-Stoß mit RBE3-Spider Elementen

Der Vorteil dabei ist, dass nun alle Knoten der Flächen des Detail-Volumenmodells mittels RBE3-Spider Elementen mit den Knoten der gegenüberliegenden Kanten der Anschlusschalen verbunden sind.

Die Einleitung der Kräfte und Momente von den Anschlusschalen in das Detail-Volumenmodell erfolgt nun nahezu optimal, was in der folgenden Abbildung einer Simulation dieses T-Stoßes gezeigt wird:

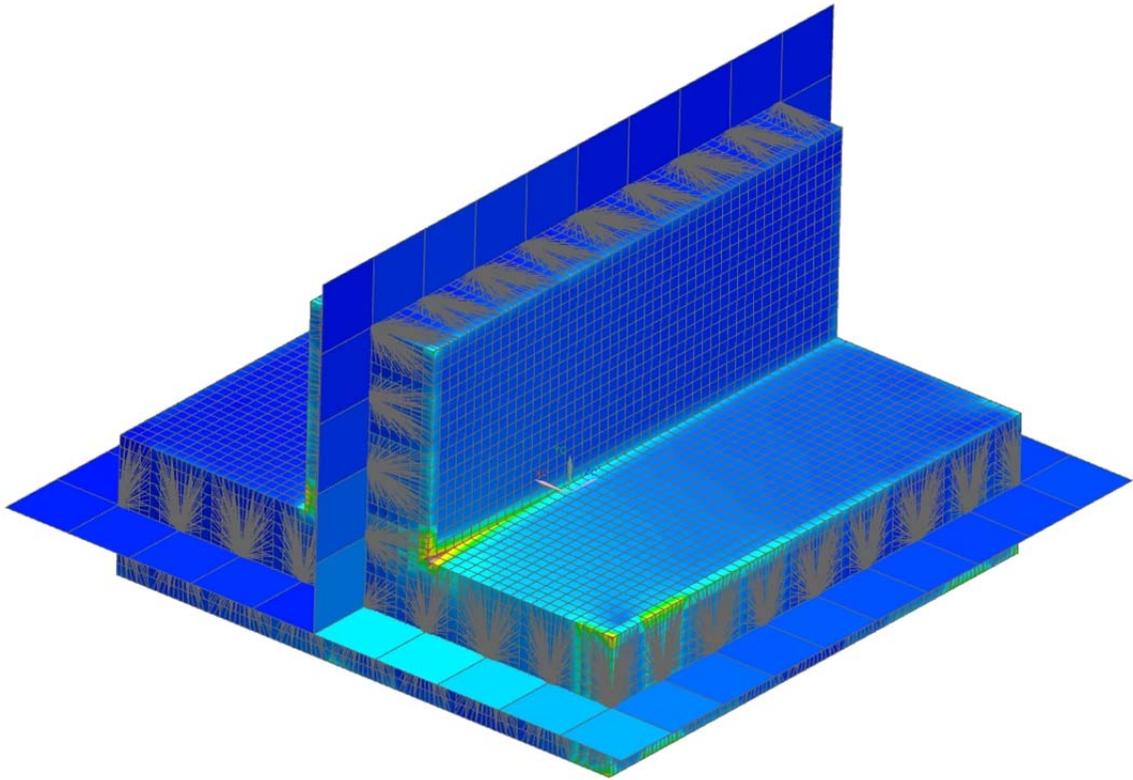


Abbildung 21: Simulation: T-Stoß mit RBE3-Spider Elementen

5.4 Verifikation der Methode

Da nun die Schnittgrößenaufbringung mittels 2D-Anschlusschalen und dem daraus resultierenden Übergang auf 3D-Volumenelemente des Detailmodells mittels RBE3-Spider-Elementen als zielführend angenommen wird, muss diese Methode im nächsten Schritt verifiziert werden.

5.4.1 Vorgehensweise

Die Verifikation erfolgt an einem einseitig eingespannten T-Träger. Als Referenz-Modell wird dieser T-Träger als ein FE-Volumenmodell aufgebaut und mittels 20 knotigen Hexaeder-Elementen (CHEXA20) vernetzt:

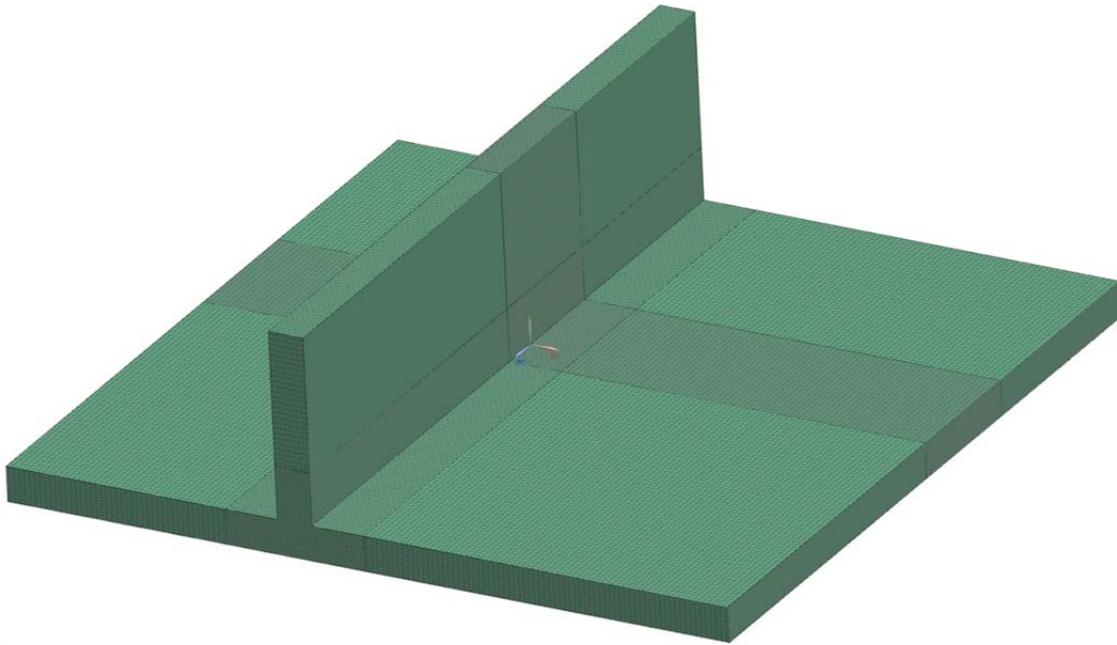


Abbildung 22: Referenz T-Stoß (Solid)

Die Elemente in dem Bereich in der Mitte dieses Modells, die zum Vergleich mit den anderen Detail-Modellen herangezogen werden, werden sehr fein mit einer Elementgröße von 1mm vernetzt. In den Randbereichen des Modells ist die Elementgröße auf 2mm erhöht, da bei einer durchgehenden Elementgröße von 1mm die Anzahl der Elemente bzw. Knoten zu hoch ist und mit den heutigen uns zur Verfügung stehenden Computern nicht bzw. nur schwer zu berechnen ist.

Zur Verifikation der Methode werden die Knoten in der Mitte des Volumenmodells mit denen der Detail-Modelle verglichen.

Herfür werden die Knoten, die zur Verifikation herangezogen werden in 4 Bereiche zusammengefasst:

Bezeichnung:	Knoten:
Bereich 1 (XP)	XP1 – XP17
Bereich 2 (XN)	XN1 – XN17
Bereich 3 (YP)	YP1 – YP17
Bereich 4 (YN)	YN1 – YN17
Eckknoten 1	EK1
Eckknoten 2	EK2

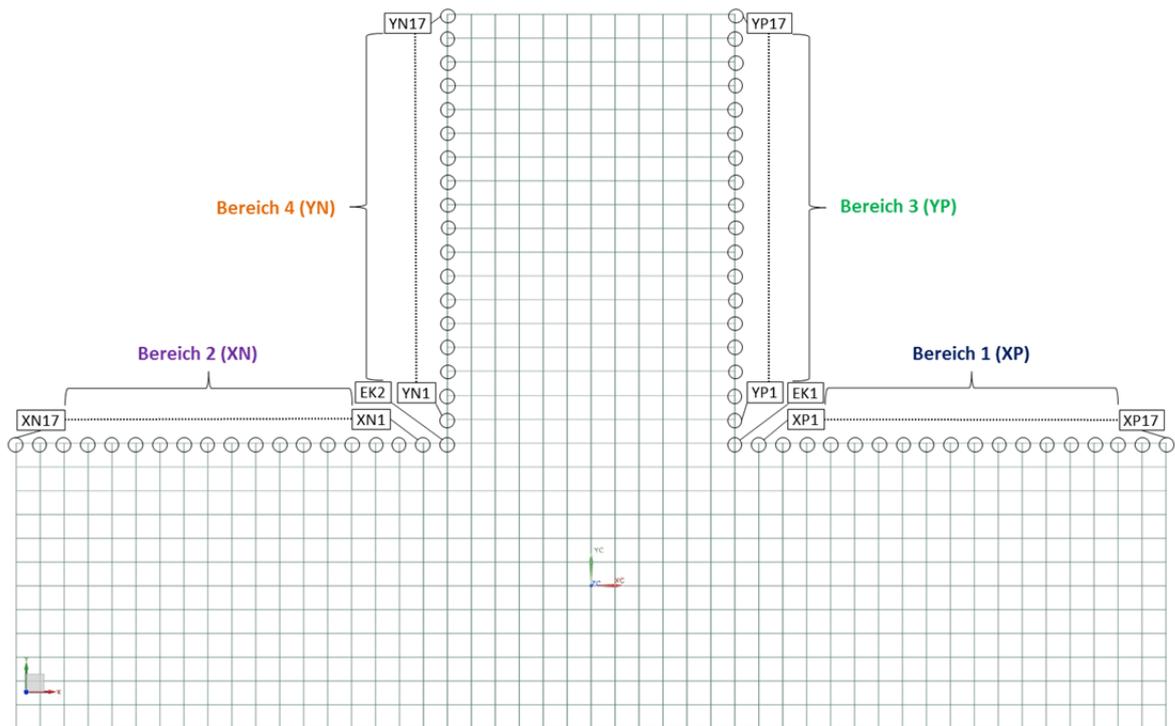


Abbildung 23: Knoten-Bereiche für Auswertung

Diese vier Bereiche befinden sich exakt in der Mitte des Detail-Ausschnittes und reichen jeweils von der Kerbe des Stoßes zum Rand des Ausschnittes.

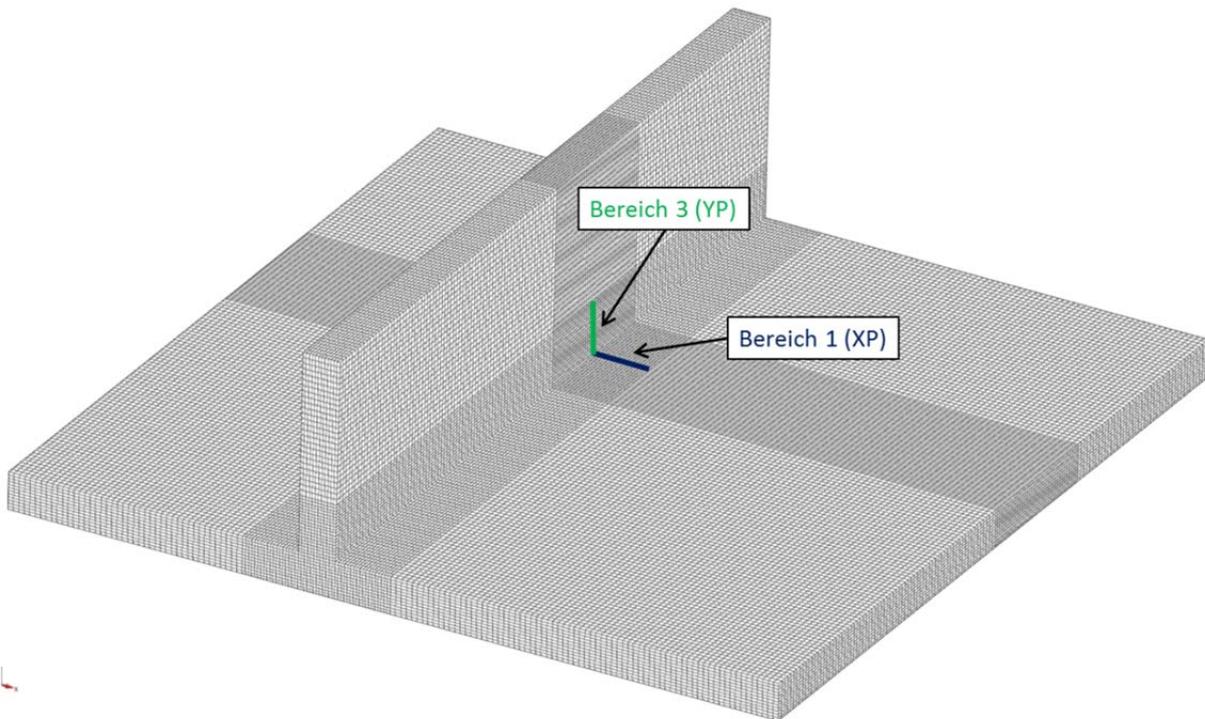


Abbildung 24: T-Stoß, Bereich 1(XP) und Bereich 3(YP)

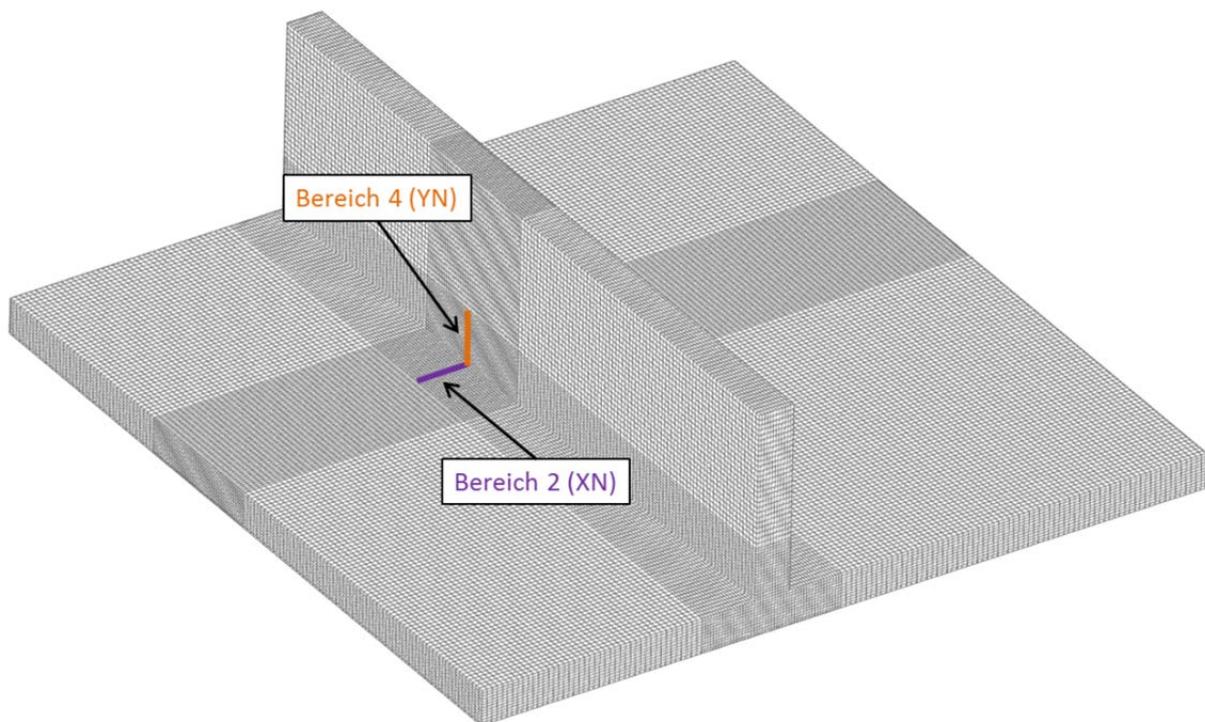


Abbildung 25: T-Stoß, Bereich 2(XN) und Bereich 4(YN)

Als nächstes werden die Detail-Modelle generiert. Sie bestehen jeweils aus 20 knotigen Hexaeder-Elementen (CHEXA20) mit einer Elementgröße von 1mm. Bei der Erstellung dieser Detail-Modelle werden 2 Kriterien variiert um mögliche Unterschiede zu erkennen und die bestmögliche Methode herauszufinden.

Einerseits wird die Tiefe des Detail-Modells variiert. Da die Stirnfläche eine Länge von 48mm hat, wird nun die Tiefe ebenfalls mit 48mm angenommen, um eine quadratische Grundfläche zu schaffen. Die zweite untersuchte Tiefe ist 24mm, was genau der Hälfte der Länge entspricht.

Das Verbinden der Knoten der Anschlusschalen-Kanten mit den Knoten der Seiten- und Stirnflächen des Detail-Modells mittels RBE3-Spider-Elemente wird ebenfalls variiert. Die erste Möglichkeit ist hierbei, dass die Knoten der Seiten- und Stirnflächen des Detail-Volumenmodells mit jeweils nur einem RBE3-Element verbunden werden und somit keine Überlappung von mehreren RBE3-Spider-Elementen entsteht. Die andere Möglichkeit ist, dass diese Überlappung zugelassen wird und somit an einem Knoten der Seiten- bzw. Stirnfläche des Detail-Volumenmodells auch mehrere RBE3-Elemente angreifen können.

Durch diese Variation der 2 Kriterien entstehen nun vier Detail-Volumenmodelle, die in weiterer Folge mit einander verglichen werden:

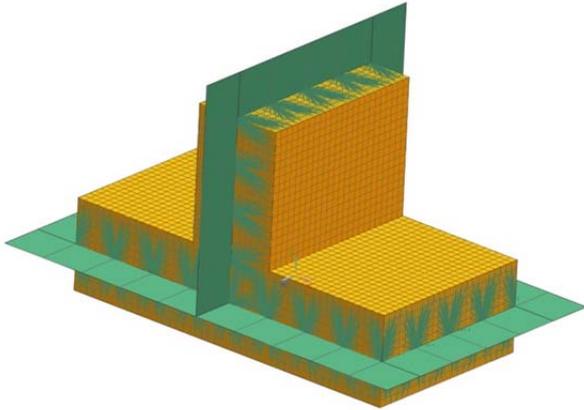


Abbildung 26: Detail-Modell 1: 24_v1

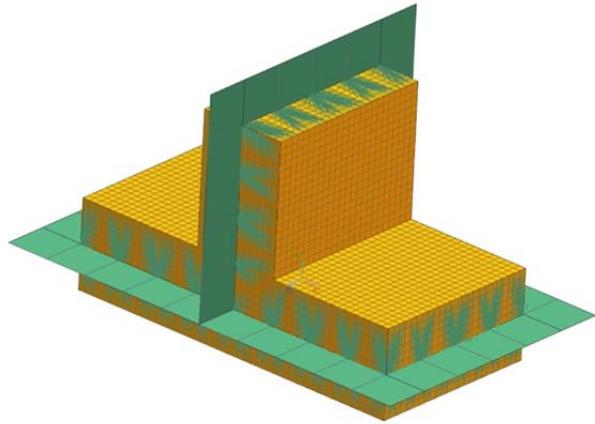


Abbildung 27: Detail-Modell 2: 24_v2

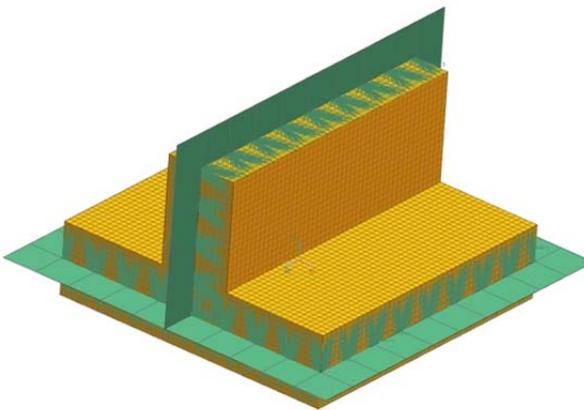


Abbildung 28: Detail-Modell 3: 48_v1

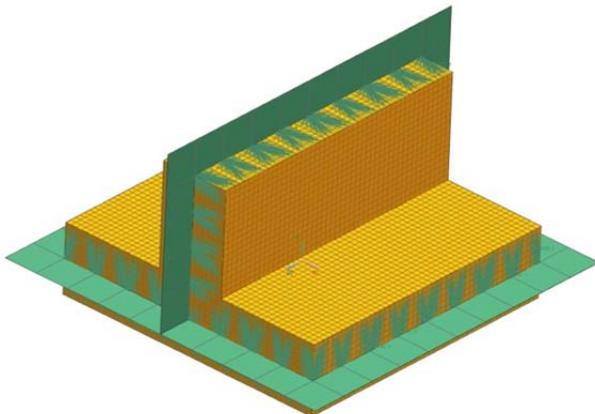


Abbildung 29: Detail-Modell 4: 48_v2

Diese Abbildungen zeigen die vier Detail-Modelle des T-Stoßes, die zur Verifikation der Methode herangezogen werden. In den beiden oberen Abbildungen hat das Detail-Modell jeweils eine Tiefe von 24mm, und in den beiden unteren Abbildungen jeweils eine Tiefe von 48mm, wodurch sich hier eine quadratische Grundfläche ergibt. In beiden linken Abbildungen überlappen sich die RBE3-Spider-Elemente an ihren Rändern und in den beiden rechten Abbildungen gibt es keine Überlappung und an jedem Knoten der Seiten- und Stirnflächen des Detail-Modells greift nur ein RBE3-Element an.

Die Verifikation der Methode erfolgt in zwei unterschiedlichen Lastfällen:

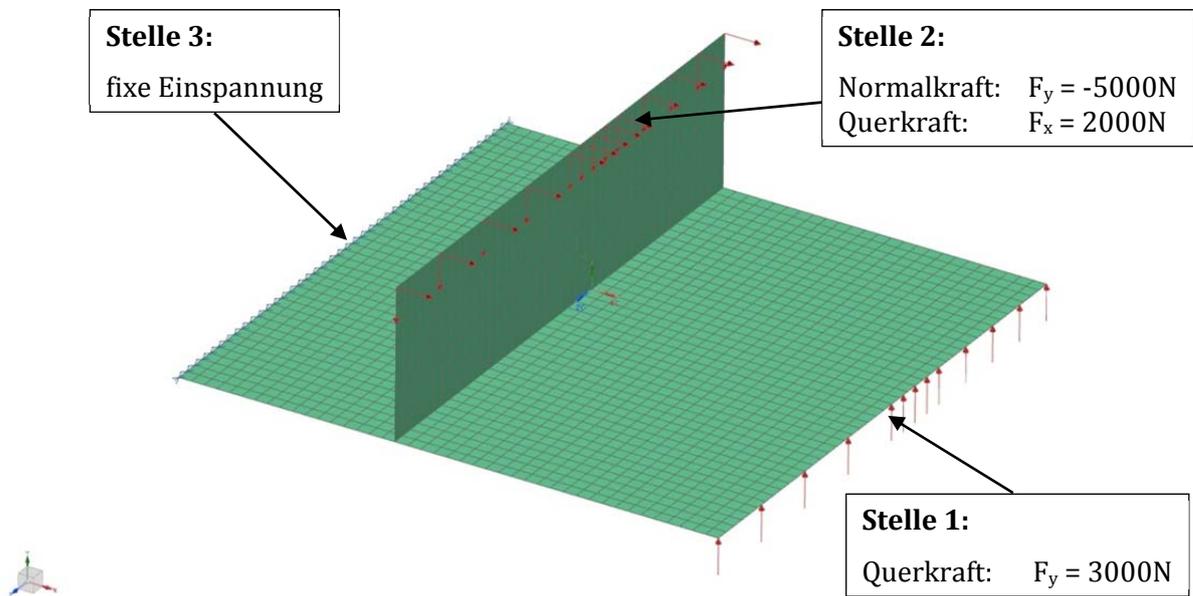


Abbildung 30: T-Stoß Lastfall 1: Biegebelastung

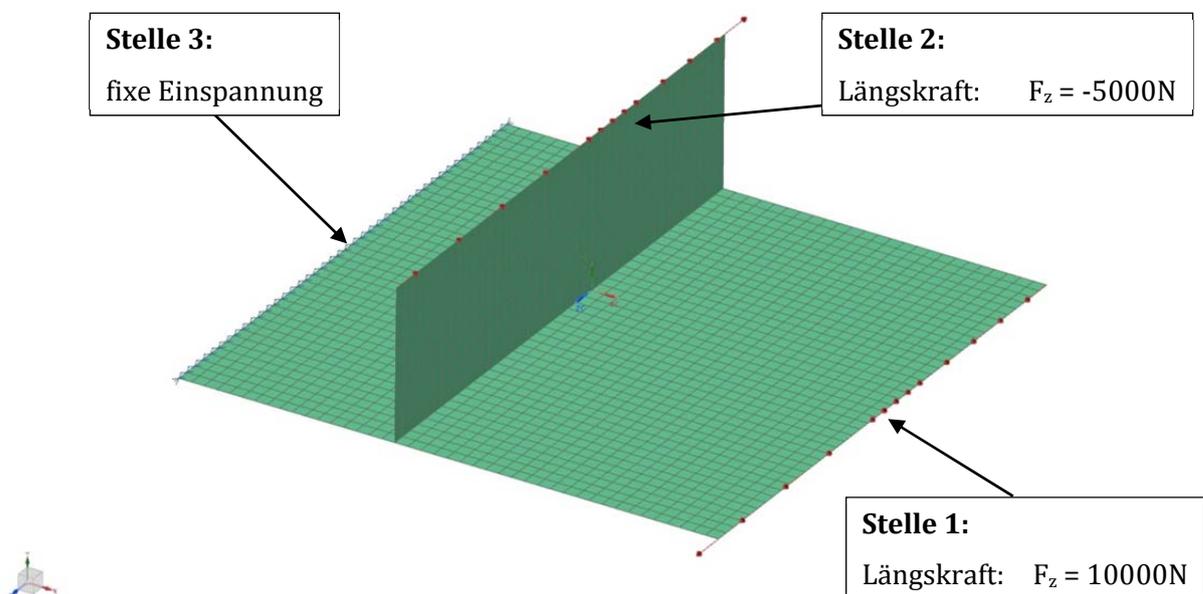


Abbildung 31: T-Stoß Lastfall 2: Schubbelastung

In beiden Fällen wird der T-Träger einseitig, an der Stelle 3 fix eingespannt.

Im ersten Lastfall, welcher eine Biegebelastung darstellt, werden die Kräfte wie folgt aufgebracht:

An der Stelle 1 eine Querkraft von 3000N in positiver y-Richtung und an der Stelle 2 eine Querkraft von 2000N in positiver x-Richtung sowie eine Normalkraft von 5000N in negativer y-Richtung.

Im zweiten Lastfall, welcher eine Schubbelastung darstellt, werden die Kräfte wie folgt aufgebracht:

An der Stelle 1 eine Längskraft von 10000N in positiver z-Richtung und an der Stelle 2 eine Längskraft von 5000N in negativer z-Richtung.

Diese beiden Lastfälle werden nun an dem zuvor beschriebenen Volumenmodell des T-Trägers simuliert und stellen die Referenz Ergebnisse für die weiteren Vergleiche mit den Detail-Modellen dar.

Im nächsten Schritt wird dieser T-Träger als Shell-Modell aufgebaut und die beiden Lastfälle darauf simuliert:

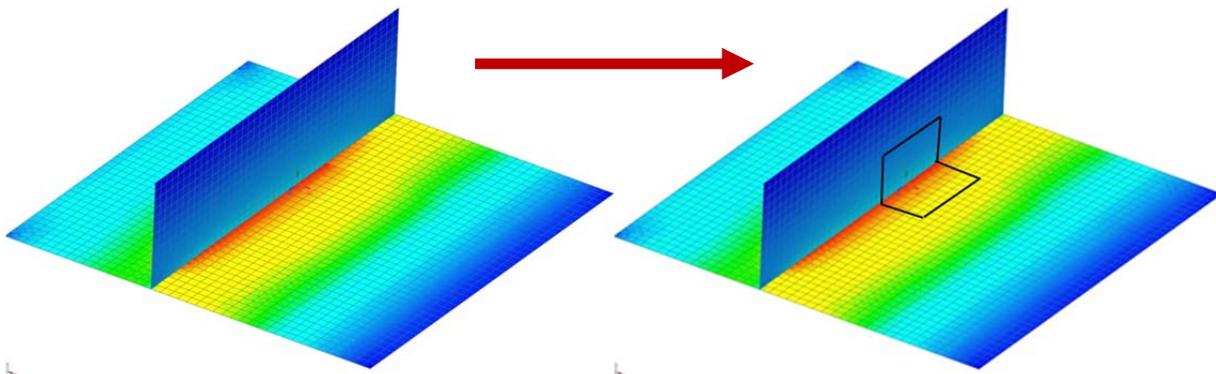


Abbildung 32: T-Stoß mit Ausschnitt

Das rechte Bild zeigt hier den Ausschnitt mit den Abmessungen des Detail-Modells. An den Rändern dieses Ausschnittes werden die Kräfte und Momente ausgelesen und auf die Anschlusschalen des Detail-Modells übertragen:

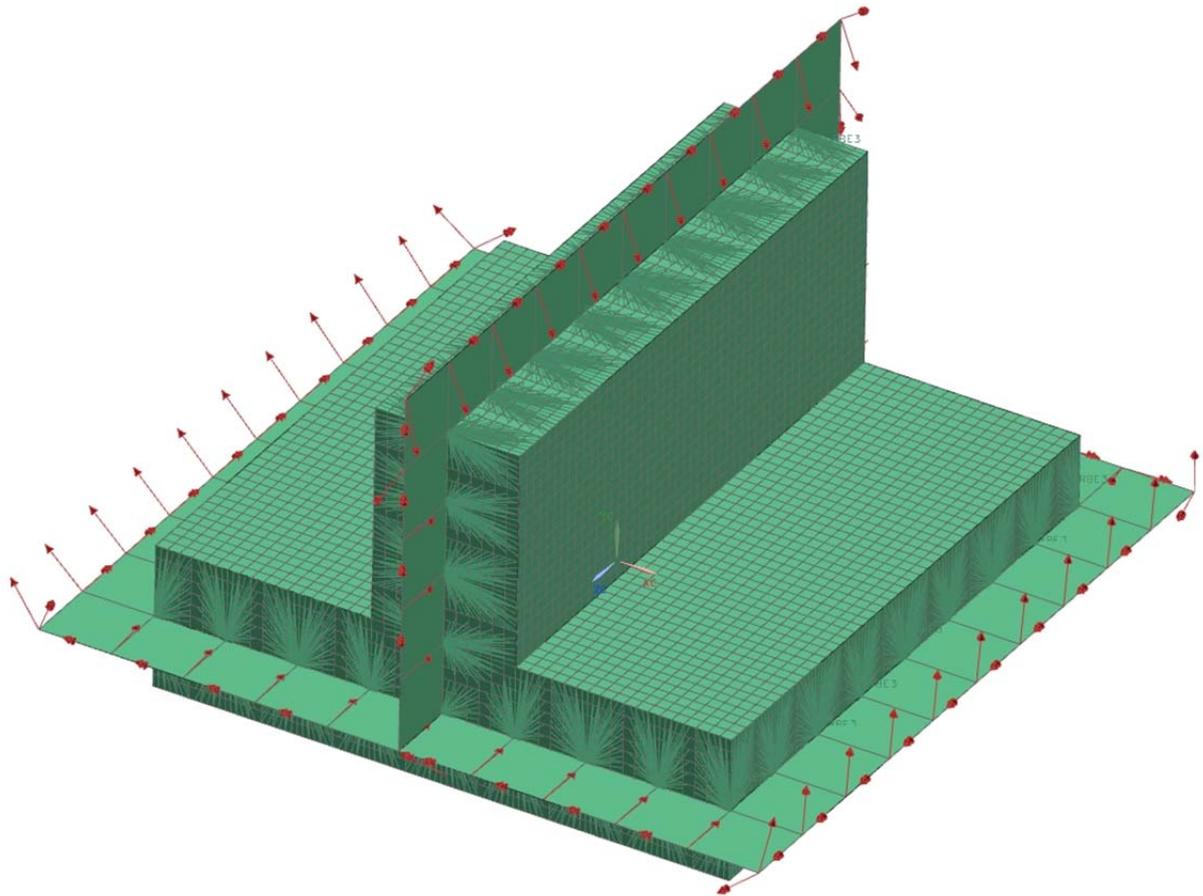


Abbildung 33: Detail-Modell mit Kräften und Momenten

Die daraus gewonnenen Spannungs-Ergebnisse in den vier Bereichen werden mit denen des Referenz-Solid-Modells verglichen um die Methode zu verifizieren.

5.4.2 Vergleich 2D-Shell Modell und 3D-Solid Modell

Bevor der Vergleich zwischen den einzelnen Spannungs-Ergebnissen der Detail-Modelle zur Verifikation der Methode stattfindet wird noch ein Vergleich zwischen dem Referenz-Solid Modell und einem Schalenmodell des T-Trägers aufgestellt.

Hierzu wird ein feines Schalenmodell des T-Trägers mit einer Elementlänge von 1mm erstellt. Anschließend werden die Kräfte der zuvor beschriebenen beiden Lastfälle aufgebracht und simuliert. Die daraus resultierenden Spannungs-Ergebnisse in den vier Bereichen werden mit denen des Referenz-Solid Modells verglichen.

Die detaillierten Spannung-Ergebnisse werden im Anhang, Kapitel 10.1.1 angegeben.

Zum Vergleich der Spannungs-Ergebnisse zwischen einem 2D-Schalenmodell und einem 3D-Volumenmodell des untersuchten T-Trägers werden hier die Abweichungen der Von-Mises Spannungen der beiden Lastfälle (LF1, LF2) zusammengefasst.

Die folgenden Tabellen und Diagramme zeigen diese Abweichungen der Spannungsergebnisse in den vier Bereichen (XP; XN; YP; YN), jeweils beginnend von der Stoß-Kerbe weg zum Rand des Detail-Ausschnittes.

Die Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell (Referenz) und dem 2D-Shell Modell im Bereich 1 (XP) werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	XP1	XP2	XP3	XP4	XP5	XP6	XP7	XP8	XP9
LF1	-29,33%	1,03%	-1,87%	1,12%	1,41%	1,57%	1,41%	1,20%	0,96%
LF2	-27,93%	-16,39%	-9,91%	-5,76%	-3,06%	-1,17%	0,19%	1,21%	2,00%

	XP10	XP11	XP12	XP13	XP14	XP15	XP16	XP17
LF1	0,74%	0,56%	0,41%	0,29%	0,20%	0,13%	0,08%	0,05%
LF2	2,63%	3,14%	3,56%	3,90%	4,16%	4,33%	4,41%	4,35%

Tabelle 1: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP)

Das daraus abgeleitete Diagramm sieht wie folgt aus:

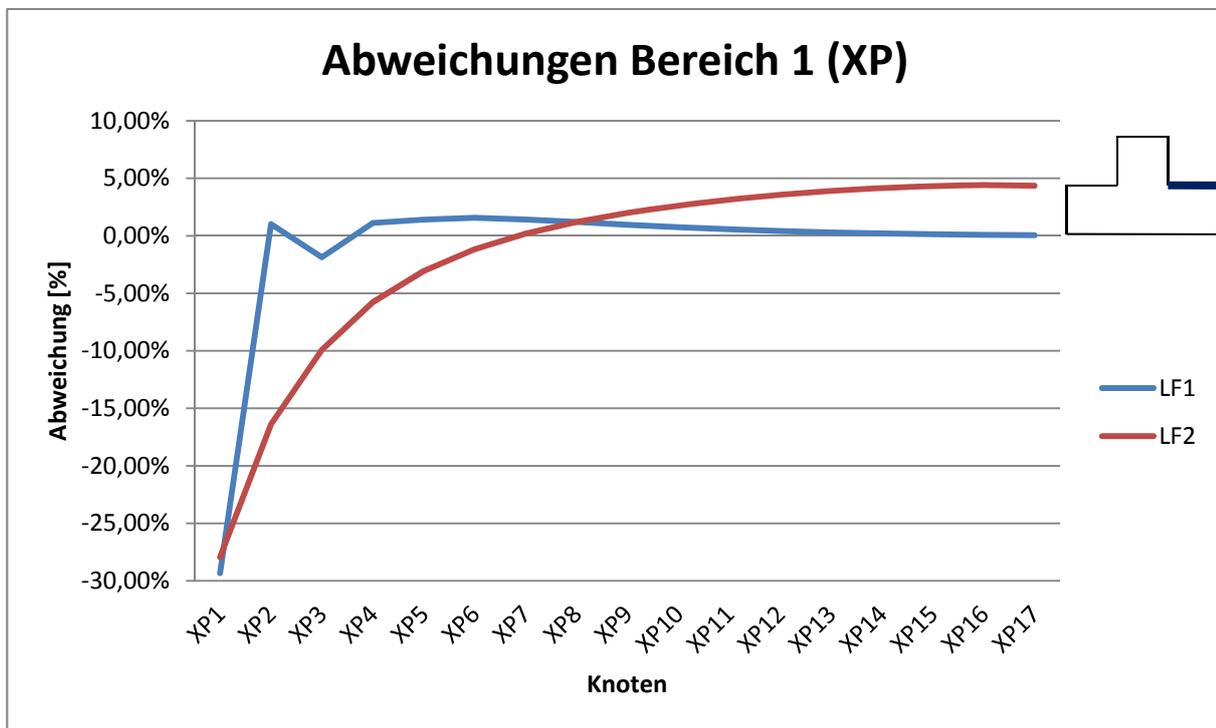


Abbildung 34: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP)

Die Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell (Referenz) und dem 2D-Shell Modell im Bereich 2 (XN) werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	XN1	XN2	XN3	XN4	XN5	XN6	XN7	XN8	XN9
LF1	-27,79%	-7,82%	-6,60%	-3,35%	-1,94%	-0,95%	-0,39%	-0,05%	0,14%
LF2	-32,80%	-20,78%	-13,15%	-8,15%	-4,79%	-2,46%	-0,81%	0,37%	1,21%

	XN10	XN11	XN12	XN13	XN14	XN15	XN16	XN17
LF1	0,23%	0,27%	0,27%	0,26%	0,24%	0,21%	0,19%	0,17%
LF2	1,82%	2,26%	2,58%	2,81%	2,96%	3,07%	3,14%	3,18%

Tabelle 2: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN)

Das daraus abgeleitete Diagramm sieht wie folgt aus:

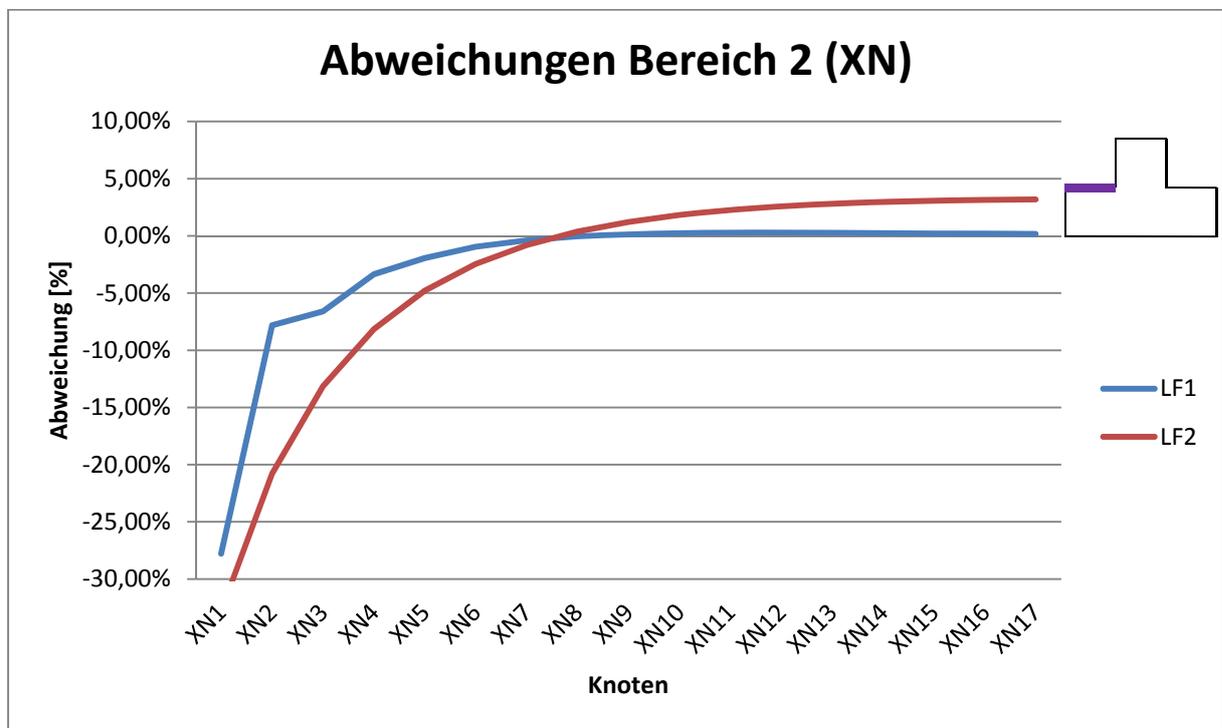


Abbildung 35: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN)

Die Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell (Referenz) und dem 2D-Shell Modell im Bereich 3 (YP) werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	YP1	YP2	YP3	YP4	YP5	YP6	YP7	YP8	YP9
LF1	-48,38%	63,41%	29,35%	37,66%	30,65%	24,73%	18,74%	13,84%	9,95%
LF2	-22,25%	-17,56%	-13,70%	-11,22%	-9,28%	-7,75%	-6,50%	-5,49%	-4,67%

	YP10	YP11	YP12	YP13	YP14	YP15	YP16	YP17
LF1	7,00%	4,81%	3,23%	2,11%	1,33%	0,81%	0,47%	0,26%
LF2	-4,02%	-3,50%	-3,09%	-2,77%	-2,52%	-2,33%	-2,19%	-2,08%

Tabelle 3: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP)

Das daraus abgeleitete Diagramm sieht wie folgt aus:

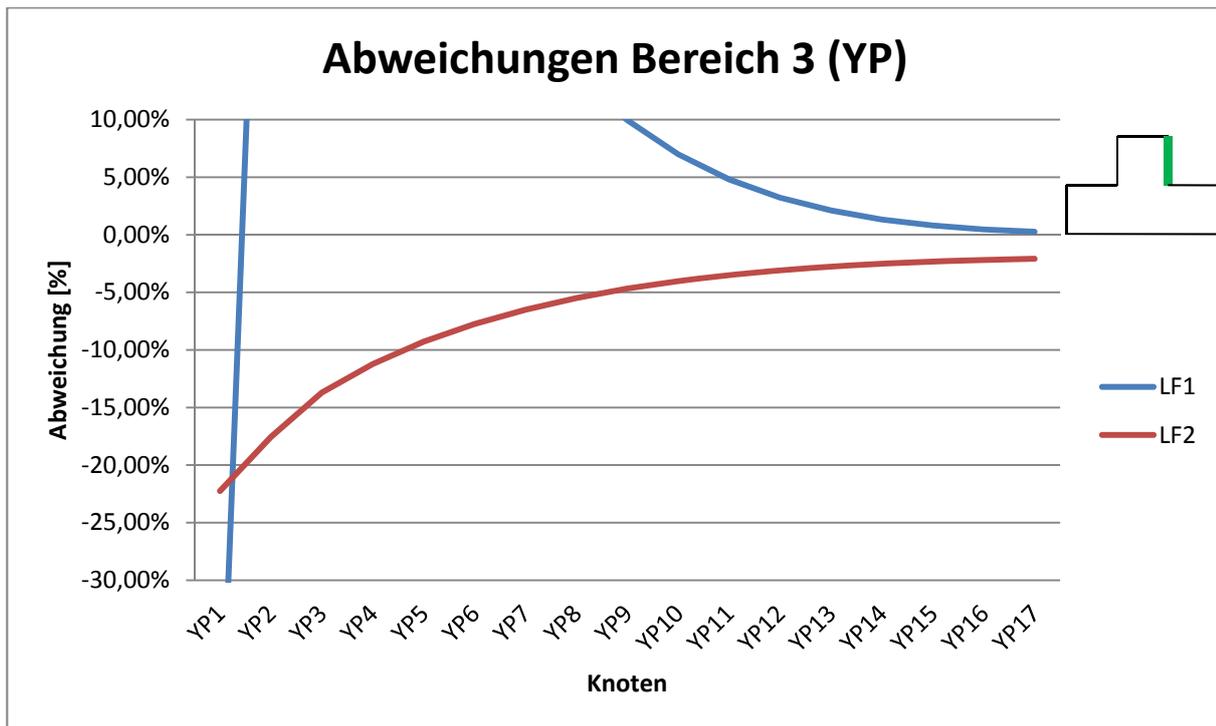


Abbildung 36: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP)

Die Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell (Referenz) und dem 2D-Shell Modell im Bereich 4 (YN) werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	YN1	YN2	YN3	YN4	YN5	YN6	YN7	YN8	YN9
LF1	7,18%	-25,51%	-20,64%	-22,08%	-20,14%	-17,77%	-14,89%	-11,99%	-9,25%
LF2	-25,50%	-16,44%	-11,16%	-7,94%	-5,86%	-4,46%	-3,48%	-2,78%	-2,27%
	YN10	YN11	YN12	YN13	YN14	YN15	YN16	YN17	
LF1	-6,85%	-4,85%	-3,27%	-2,08%	-1,22%	-0,63%	-0,24%	0,01%	
LF2	-1,89%	-1,61%	-1,39%	-1,23%	-1,10%	-1,00%	-0,93%	-0,87%	

Tabelle 4: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN)

Das daraus abgeleitete Diagramm sieht wie folgt aus:

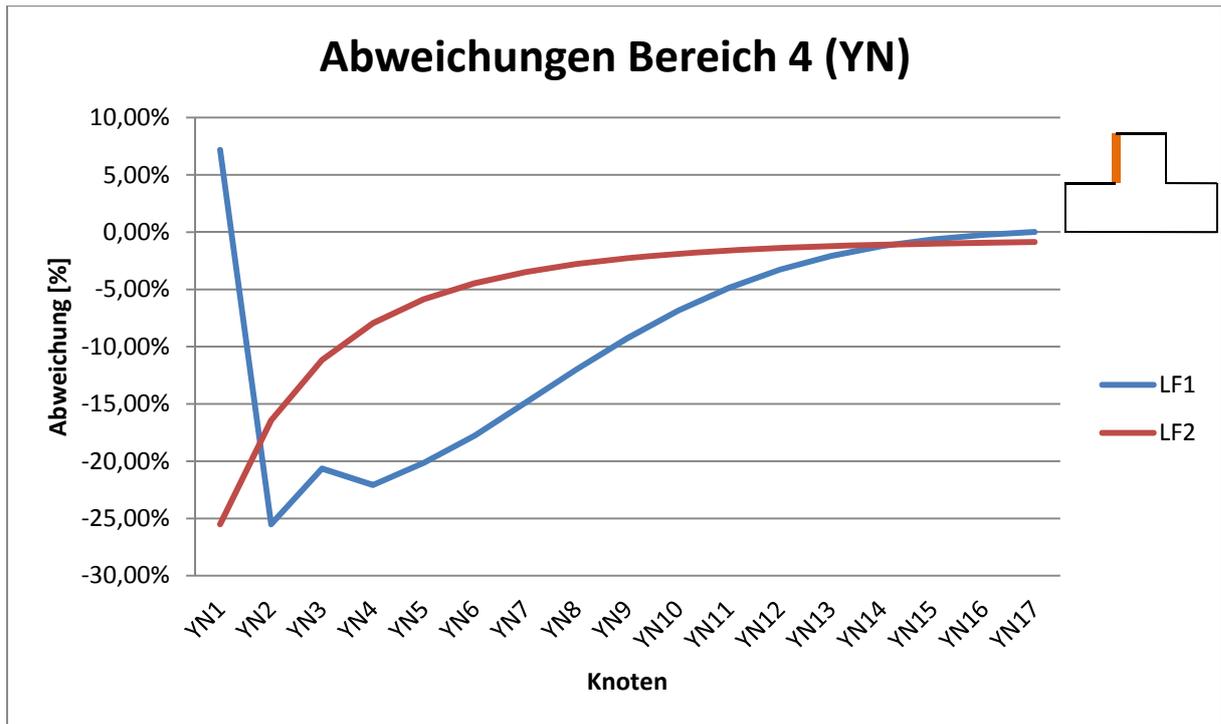


Abbildung 37: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN)

Aus diesen Tabellen bzw. Diagrammen erkennt man, dass die Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell und dem 2D-Shell Modell zur Stoß-Kerbe hin natürlich sehr stark ansteigen. Jedoch bestehen auch an Stellen die weiter von der Kerbe weg liegen gewisse, wenn auch teilweise sehr geringe Abweichungen.

Diese Abweichungen sollten bei der Bewertung der Ergebnisse der Detail-Modell Berechnungen berücksichtigt werden.

5.4.3 Ergebnisse der Detail-Modell Berechnungen

Die detaillierten Spannungs-Ergebnisse werden im Anhang, Kapitel 10.1.2 angegeben.

Zum Vergleich der Spannungs-Ergebnisse zwischen den vier Detail-Modellen (SolidIR_24_v1; SolidIR_24_v2; SolidIR_48_v1; SolidIR_48_v2) und dem 3D-Solid Modell (Referenz) des untersuchten T-Trägers werden hier die Abweichungen der Von-Mises Spannungen der beiden Lastfälle (LF1, LF2) zusammengefasst.

Die folgenden Tabellen und Diagramme zeigen diese Abweichungen der Spannungsergebnisse in den vier Bereichen (XP; XN; YP; YN), jeweils beginnend von der Stoß-Kerbe weg zum Rand des Detail-Ausschnittes.

Da, wie später in den einzelnen Diagrammen gezeigt die Abweichungen der Von-Mises-Spannungen bei den Randknoten (Bereich 1: XP15 – XP17; Bereich 2: XN15 – XN17; Bereich 3: YP15 – YP17; Bereich 4: YN15 – YN17) der einzelnen Bereiche (XP; XN; YP; YN) stark zunehmen werden zur genaueren Betrachtung auch Diagramme ohne Berücksichtigung dieser Randknoten angegeben.

Das folgende Bild zeigt beispielhaft die Randknoten des Bereiches 1 (XP15 – XP17) einer Simulation eines in der Mitte geschnittenen Detail-Modells:

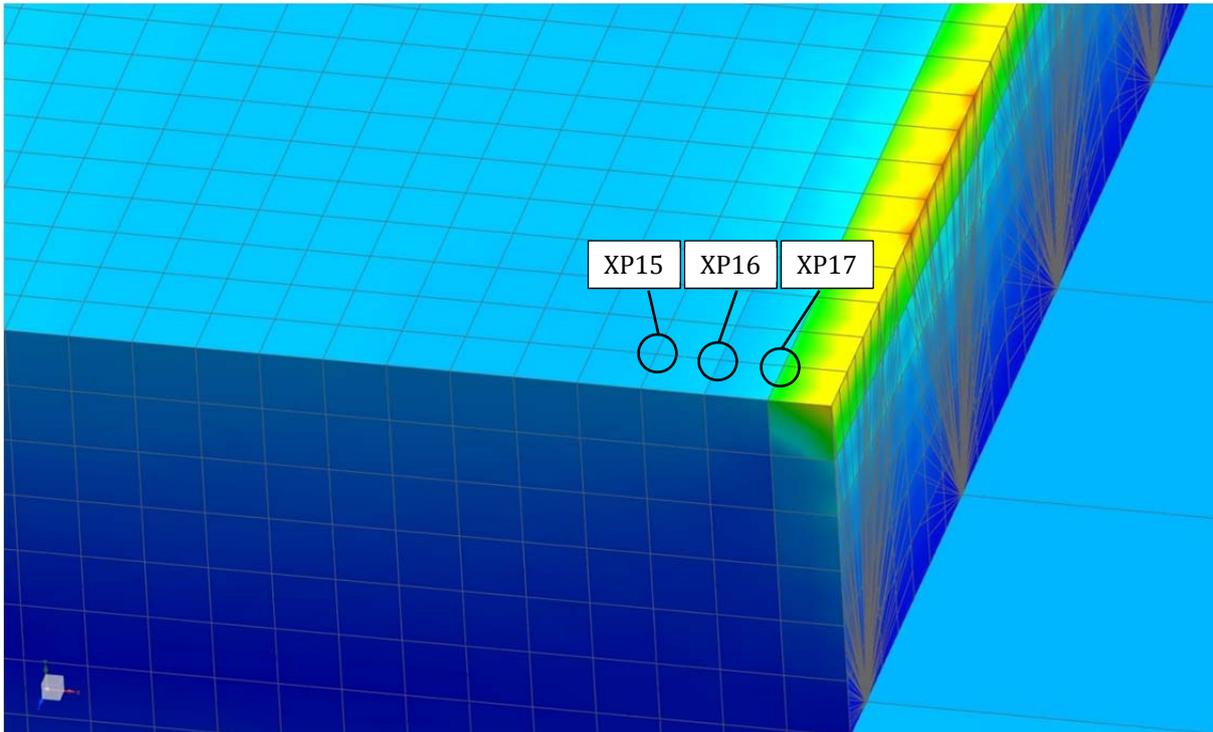


Abbildung 38: Randknoten (XP15 - XP17) Bereich 1 (XP)

5.4.3.1 Lastfall 1

Die Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell (Referenz) und den vier Detail-Modellen (SolidIR_24_v1; SolidIR_24_v2; SolidIR_48_v1; SolidIR_48_v2) des ersten Lastfalls im Bereich 1 (XP) werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	EK1	XP1	XP2	XP3	XP4	XP5	XP6	XP7	XP8
SolidIR_24_v1	4,69%	3,74%	2,60%	2,38%	1,89%	1,51%	1,12%	0,74%	0,37%
SolidIR_24_v2	4,36%	3,53%	2,40%	2,22%	1,77%	1,41%	1,04%	0,65%	0,24%
SolidIR_48_v1	0,14%	0,51%	0,47%	0,42%	0,34%	0,26%	0,17%	0,08%	0,00%
SolidIR_48_v2	-0,05%	0,41%	0,42%	0,37%	0,28%	0,19%	0,08%	-0,04%	-0,18%

	XP9	XP10	XP11	XP12	XP13	XP14	XP15	XP16	XP17
SolidIR_24_v1	0,04%	-0,25%	-0,43%	-0,43%	-0,11%	0,60%	3,07%	3,59%	70,06%
SolidIR_24_v2	-0,18%	-0,61%	-1,00%	-1,27%	-1,20%	-0,47%	2,94%	5,90%	77,55%
SolidIR_48_v1	-0,06%	-0,08%	0,00%	0,25%	0,81%	1,78%	4,55%	5,32%	73,00%
SolidIR_48_v2	-0,35%	-0,53%	-0,70%	-0,79%	-0,56%	0,30%	3,84%	6,87%	79,14%

Tabelle 5: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP), Lastfall 1

Die daraus abgeleiteten Diagramme, mit- und ohne Darstellung der Randknoten (XP15; XP16; XP17) sehen wie folgt aus:

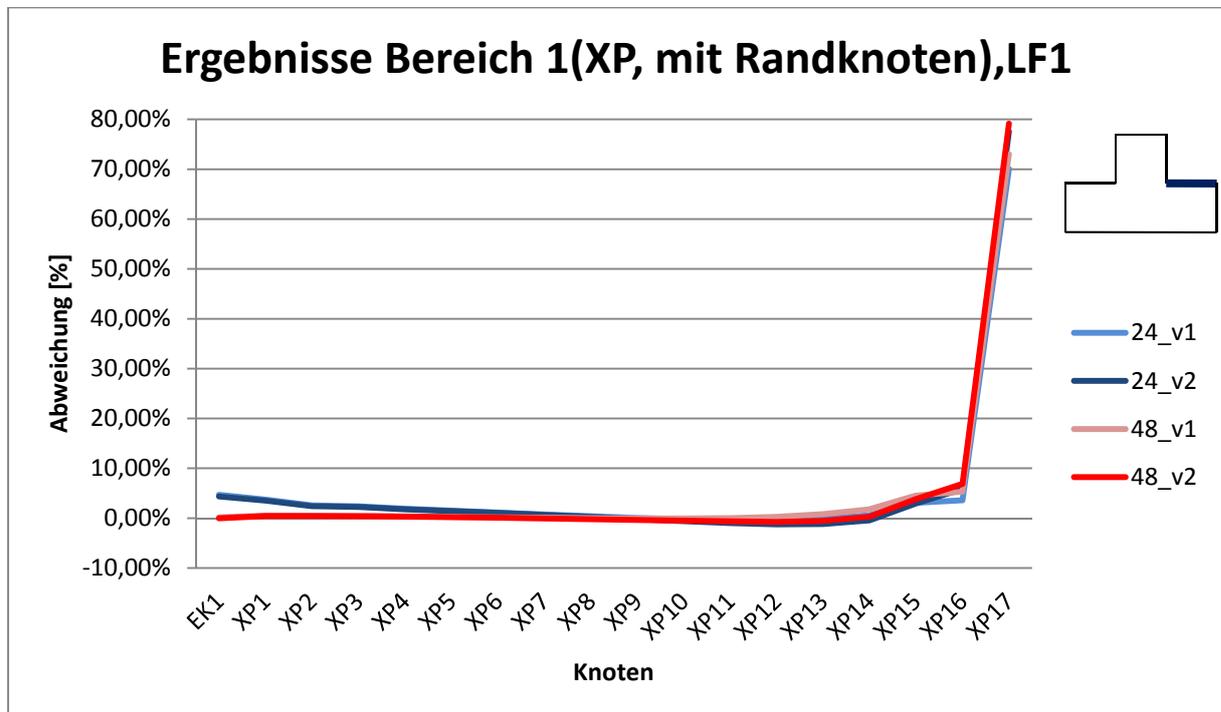


Abbildung 39: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP), LFI 1 (mit Randknoten)

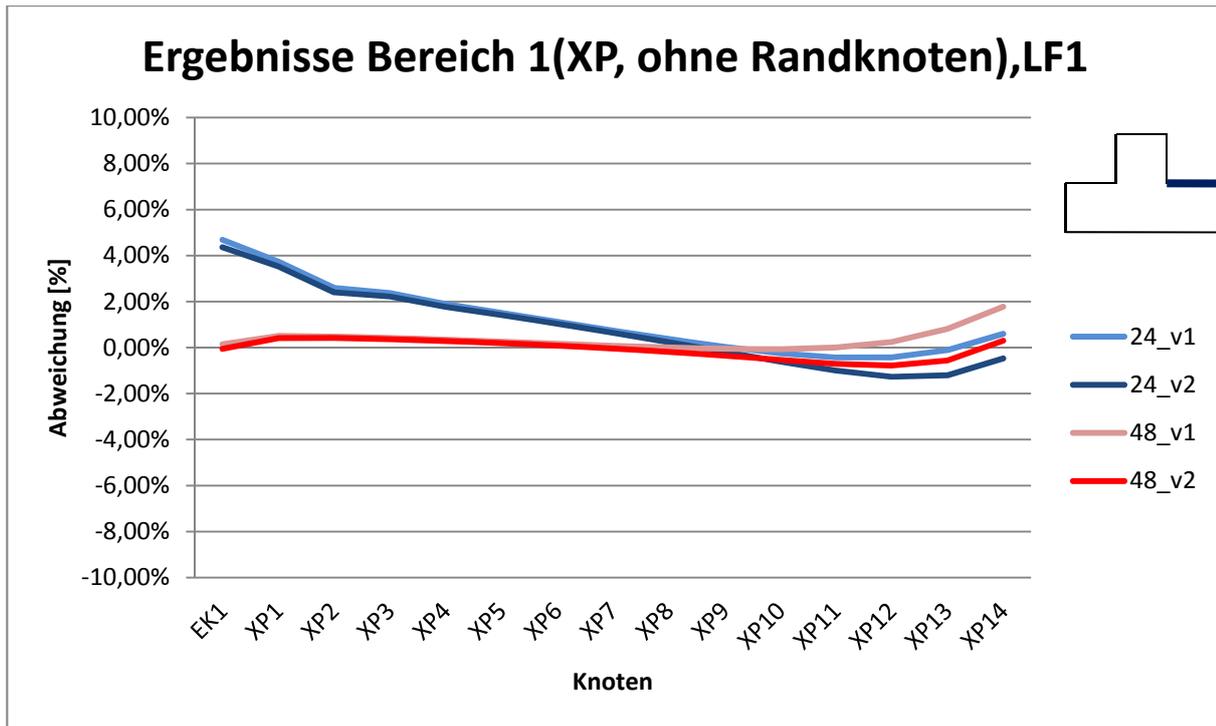


Abbildung 40: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP), LF 1 (ohne Randknoten)

Die Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell (Referenz) und den vier Detail Modellen (SolidIR_24_v1; SolidIR_24_v2; SolidIR_48_v1; SolidIR_48_v2) des ersten Lastfalls im Bereich 2 (XN) werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	EK2	XN1	XN2	XN3	XN4	XN5	XN6	XN7	XN8
SolidIR_24_v1	4,87%	4,22%	3,65%	3,39%	2,98%	2,57%	2,13%	1,68%	1,24%
SolidIR_24_v2	4,65%	3,94%	3,32%	3,07%	2,69%	2,32%	1,92%	1,49%	1,03%
SolidIR_48_v1	1,53%	1,44%	1,26%	1,17%	1,05%	0,93%	0,81%	0,69%	0,57%
SolidIR_48_v2	1,43%	1,38%	1,20%	1,11%	0,97%	0,84%	0,69%	0,53%	0,35%

	XN9	XN10	XN11	XN12	XN13	XN14	XN15	XN16	XN17
SolidIR_24_v1	0,82%	0,44%	0,18%	0,08%	0,31%	0,93%	3,34%	3,78%	70,42%
SolidIR_24_v2	0,55%	0,06%	-0,40%	-0,75%	-0,76%	-0,11%	3,23%	6,08%	77,90%
SolidIR_48_v1	0,47%	0,41%	0,44%	0,64%	1,15%	2,07%	4,79%	5,51%	73,36%
SolidIR_48_v2	0,15%	-0,08%	-0,29%	-0,41%	-0,24%	0,57%	4,05%	7,01%	79,44%

Tabelle 6: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN), Lastfall 1

Die daraus abgeleiteten Diagramme, mit- und ohne Darstellung der Randknoten (XN15; XN16; XN17) sehen wie folgt aus:

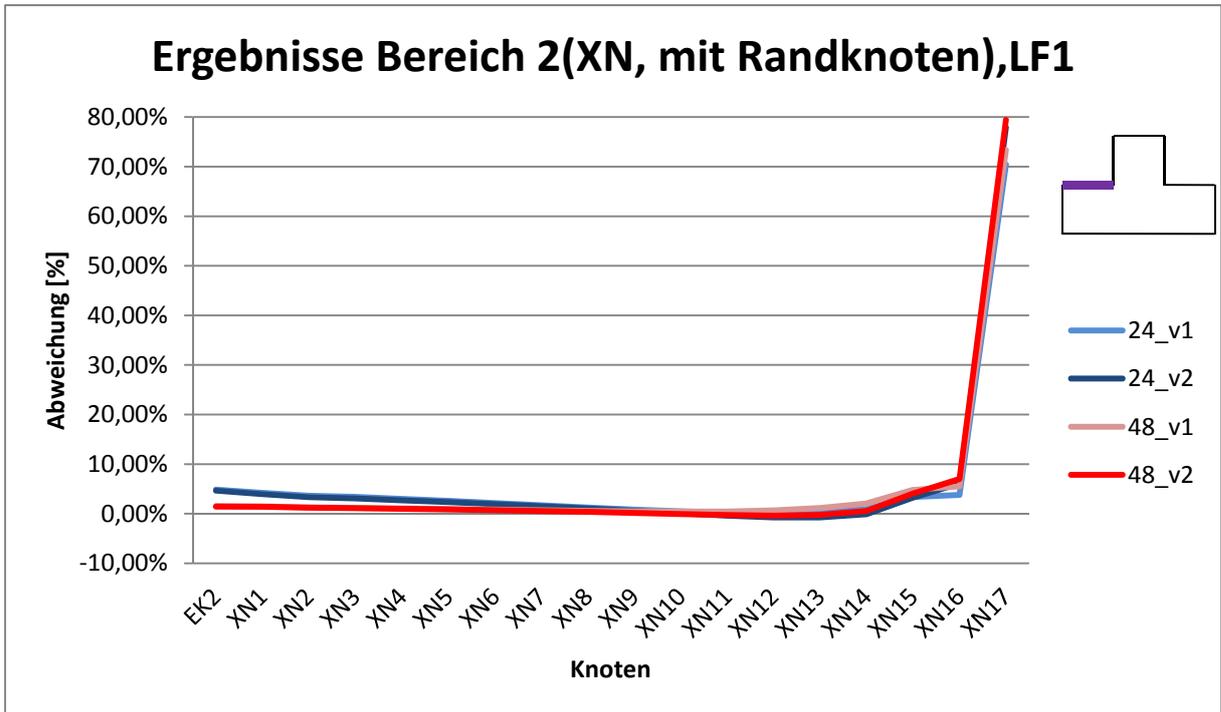


Abbildung 41: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN), LF 1 (mit Randknoten)

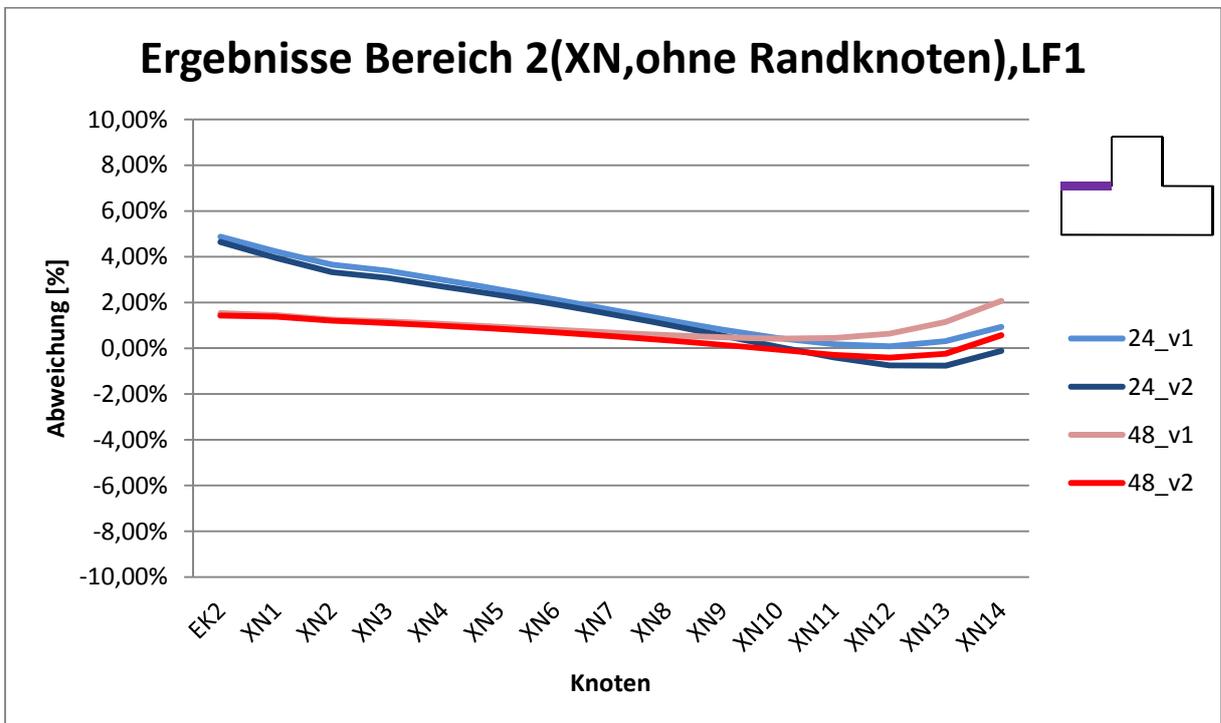


Abbildung 42: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN), LF 1 (ohne Randknoten)

Die Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell (Referenz) und den vier Detail Modellen (SolidIR_24_v1; SolidIR_24_v2; SolidIR_48_v1; SolidIR_48_v2) des ersten Lastfalls im Bereich 3 (YP) werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	EK1	YP1	YP2	YP3	YP4	YP5	YP6	YP7	YP8
SolidIR_24_v1	4,69%	5,78%	5,25%	5,36%	4,60%	4,22%	3,78%	3,37%	2,96%
SolidIR_24_v2	4,36%	5,58%	5,59%	5,86%	5,28%	4,93%	4,45%	3,95%	3,42%
SolidIR_48_v1	0,14%	-0,51%	-3,08%	-1,90%	-2,13%	-1,84%	-1,62%	-1,39%	-1,18%
SolidIR_48_v2	-0,05%	-0,83%	-3,57%	-2,23%	-2,39%	-2,04%	-1,79%	-1,56%	-1,38%

	YP9	YP10	YP11	YP12	YP13	YP14	YP15	YP16	YP17
SolidIR_24_v1	2,59%	2,29%	2,11%	2,15%	2,57%	3,48%	6,19%	7,36%	75,00%
SolidIR_24_v2	2,88%	2,35%	1,88%	1,57%	1,64%	2,48%	6,07%	9,76%	82,82%
SolidIR_48_v1	-0,95%	-0,68%	-0,30%	0,28%	1,24%	2,69%	5,96%	7,67%	76,16%
SolidIR_48_v2	-1,25%	-1,14%	-1,00%	-0,76%	-0,17%	1,15%	5,18%	9,21%	82,41%

Tabelle 7: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP), Lastfall 1

Die daraus abgeleiteten Diagramme, mit- und ohne Darstellung der Randknoten (YP15; YP16; YP17) sehen wie folgt aus:

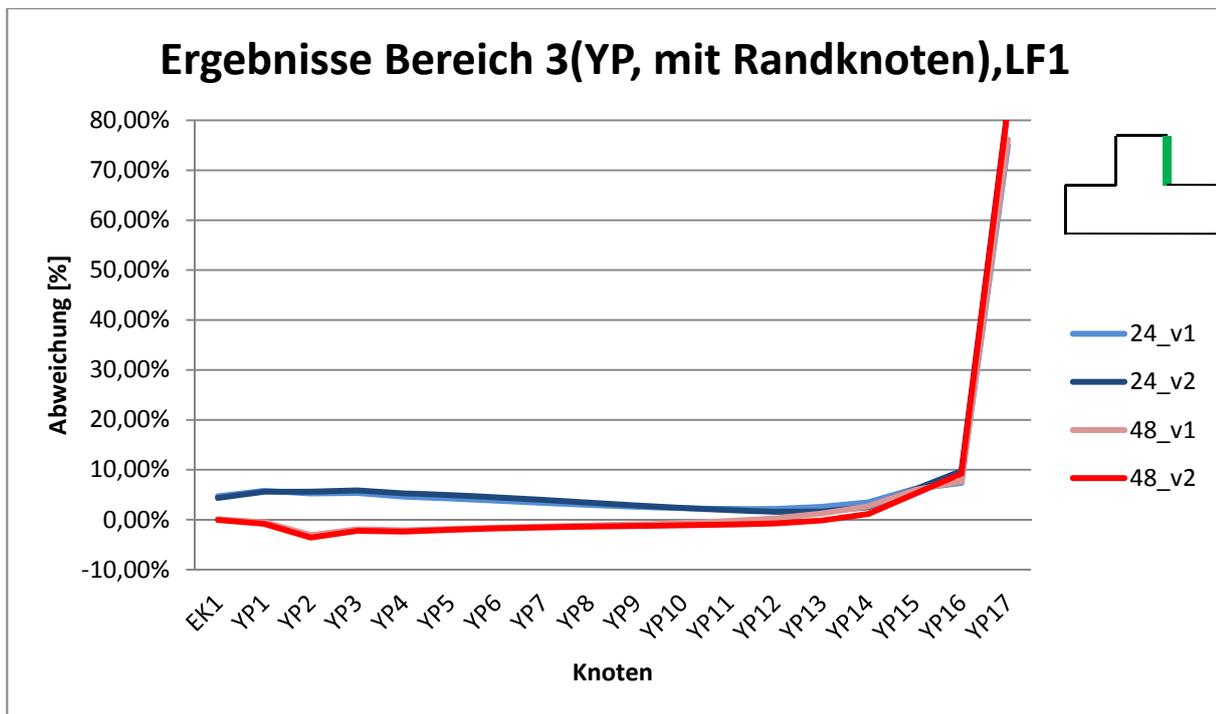


Abbildung 43: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP), LF 1 (mit Randknoten)

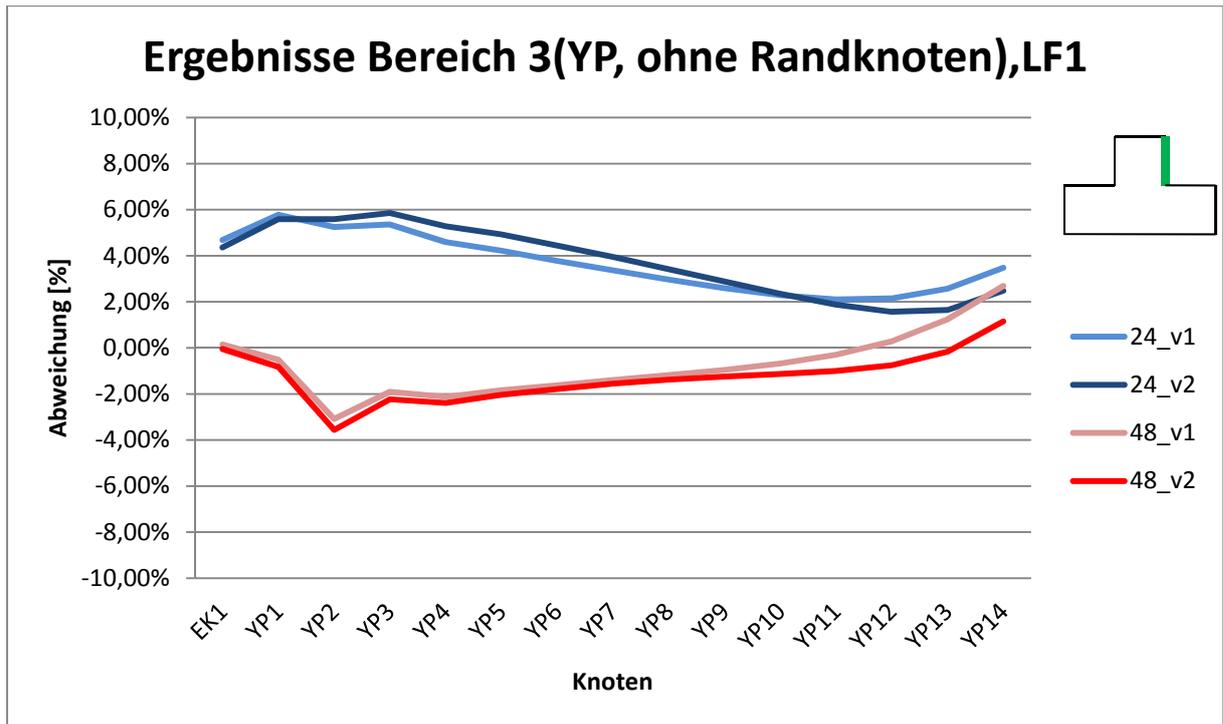


Abbildung 44: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP), LF 1 (ohne Randknoten)

Die Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell (Referenz) und den vier Detail Modellen (SolidIR_24_v1; SolidIR_24_v2; SolidIR_48_v1; SolidIR_48_v2) des ersten Lastfalls im Bereich 4 (YN) werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	EK2	YN1	YN2	YN3	YN4	YN5	YN6	YN7	YN8
SolidIR_24_v1	4,87%	1,41%	1,54%	0,36%	-0,32%	-1,20%	-2,02%	-2,80%	-3,50%
SolidIR_24_v2	4,65%	0,90%	0,95%	-0,40%	-1,05%	-1,87%	-2,61%	-3,31%	-3,96%
SolidIR_48_v1	1,53%	2,24%	1,89%	1,88%	1,77%	1,65%	1,49%	1,30%	1,06%
SolidIR_48_v2	1,43%	2,49%	2,00%	1,96%	1,81%	1,67%	1,48%	1,24%	0,95%

	YN9	YN10	YN11	YN12	YN13	YN14	YN15	YN16	YN17
SolidIR_24_v1	-4,10%	-4,58%	-4,88%	-4,93%	-4,55%	-3,53%	-0,49%	1,95%	66,14%
SolidIR_24_v2	-4,55%	-5,07%	-5,48%	-5,69%	-5,47%	-4,41%	-0,61%	3,95%	73,31%
SolidIR_48_v1	0,80%	0,54%	0,34%	0,30%	0,61%	1,49%	4,38%	6,40%	73,30%
SolidIR_48_v2	0,60%	0,21%	-0,20%	-0,53%	-0,53%	0,22%	3,71%	7,73%	79,36%

Tabelle 8: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN), Lastfall 1

Die daraus abgeleiteten Diagramme, mit- und ohne Darstellung der Randknoten (YN15; YN16; YN17) sehen wie folgt aus:

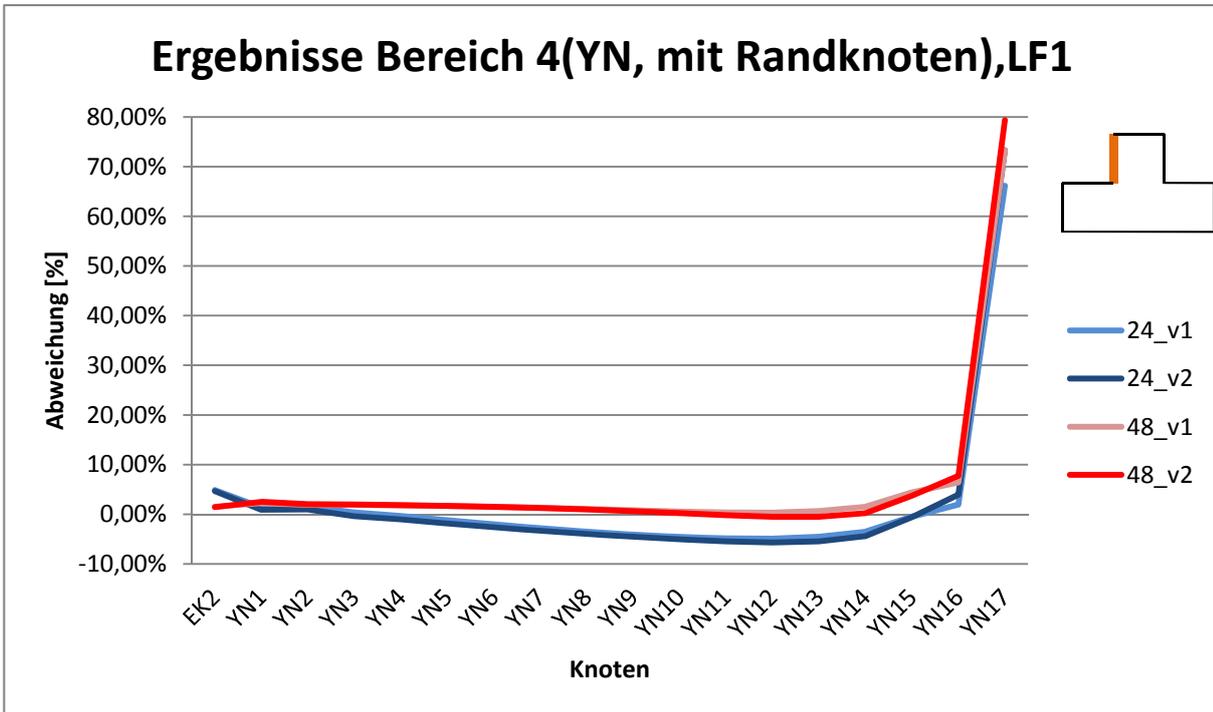


Abbildung 45: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN), LF 1 (mit Randknoten)

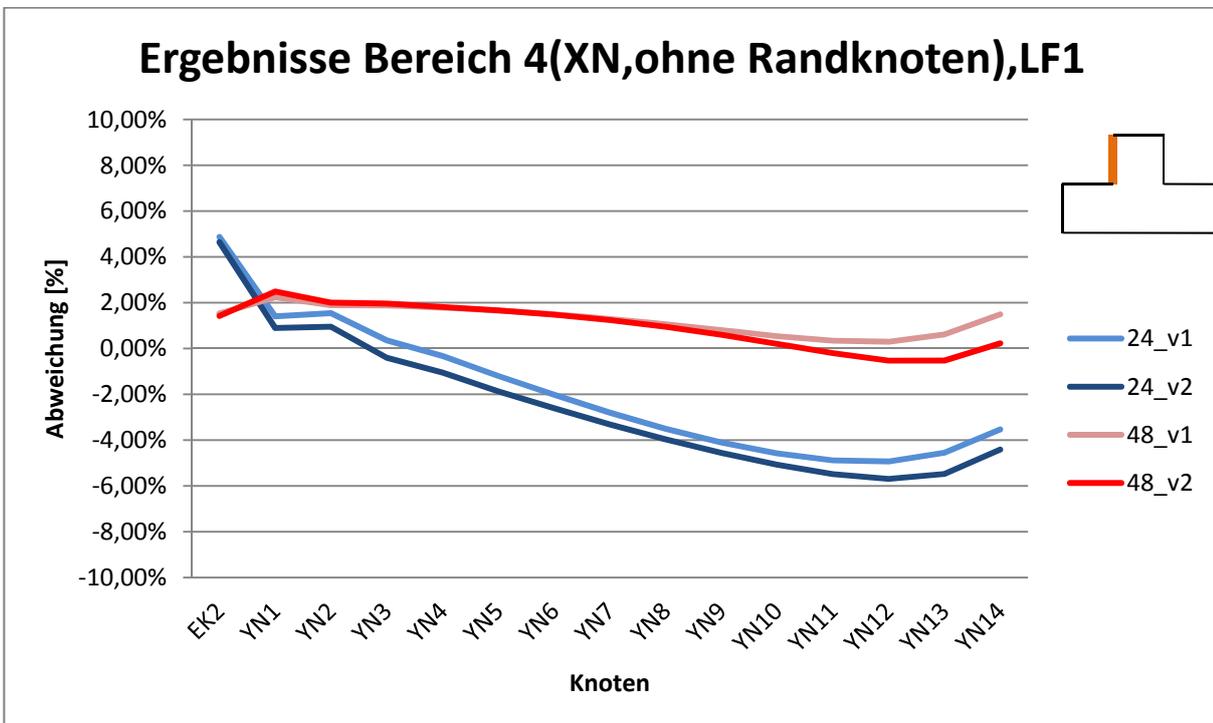


Abbildung 46: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN), LF 1 (ohne Randknoten)

5.4.3.2 Lastfall 2

Die Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell (Referenz) und den vier Detail Modellen (SolidIR_24_v1; SolidIR_24_v2; SolidIR_48_v1; SolidIR_48_v2) des zweiten Lastfalls im Bereich 1 (XP) werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	EK1	XP1	XP2	XP3	XP4	XP5	XP6	XP7	XP8
SolidIR_24_v1	-4,88%	-0,52%	1,11%	2,09%	2,80%	3,33%	3,78%	4,16%	4,41%
SolidIR_24_v2	-7,12%	-3,43%	-1,60%	0,10%	1,66%	3,06%	4,29%	5,32%	6,10%
SolidIR_48_v1	-3,65%	-2,36%	-1,76%	-1,31%	-0,94%	-0,66%	-0,50%	-0,50%	-0,75%
SolidIR_48_v2	-3,73%	-2,40%	-1,82%	-1,38%	-1,02%	-0,75%	-0,58%	-0,55%	-0,74%

	XP9	XP10	XP11	XP12	XP13	XP14	XP15	XP16	XP17
SolidIR_24_v1	4,43%	4,02%	2,89%	0,71%	-2,76%	-7,11%	-10,05%	-6,77%	44,38%
SolidIR_24_v2	6,60%	6,72%	6,38%	5,52%	4,30%	3,63%	6,24%	14,93%	61,70%
SolidIR_48_v1	-1,37%	-2,54%	-4,46%	-7,35%	-11,26%	-15,57%	-17,88%	-14,42%	38,66%
SolidIR_48_v2	-1,22%	-2,09%	-3,45%	-5,27%	-7,23%	-8,32%	-5,75%	2,91%	53,84%

Tabelle 9: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP), Lastfall 2

Die daraus abgeleiteten Diagramme, mit- und ohne Darstellung der Randknoten (XP15; XP16; XP17) sehen wie folgt aus:

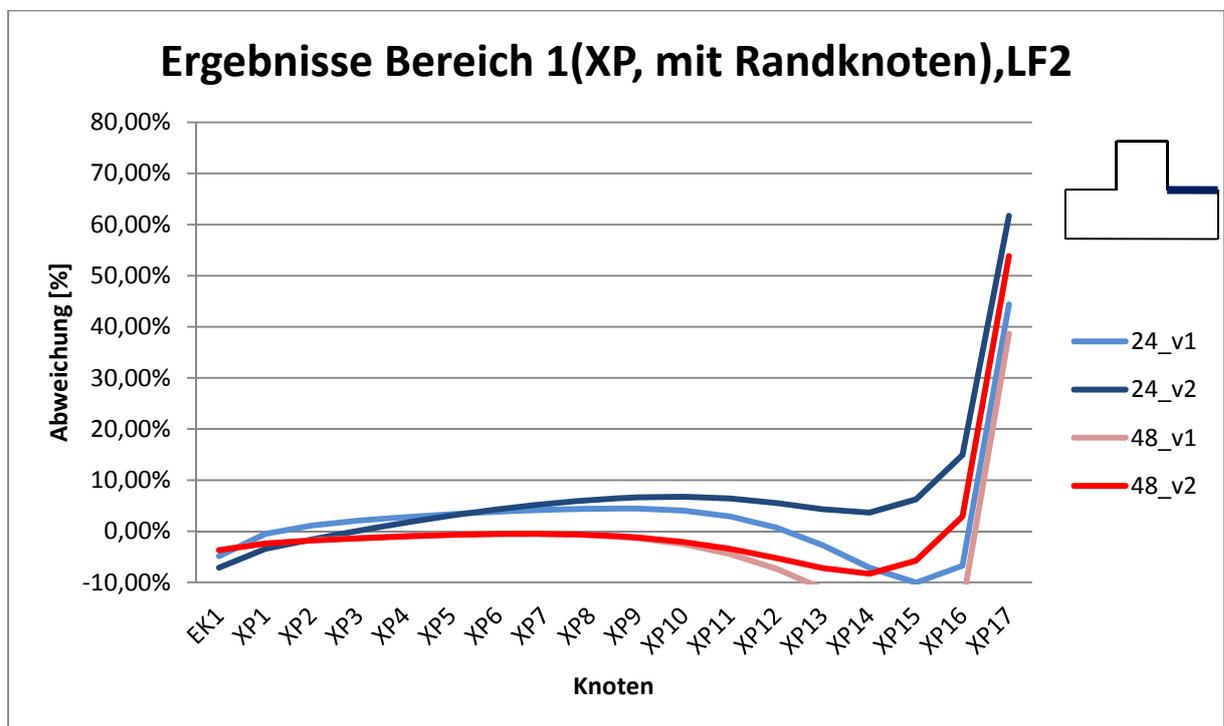


Abbildung 47: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP), LF 2 (mit Randknoten)

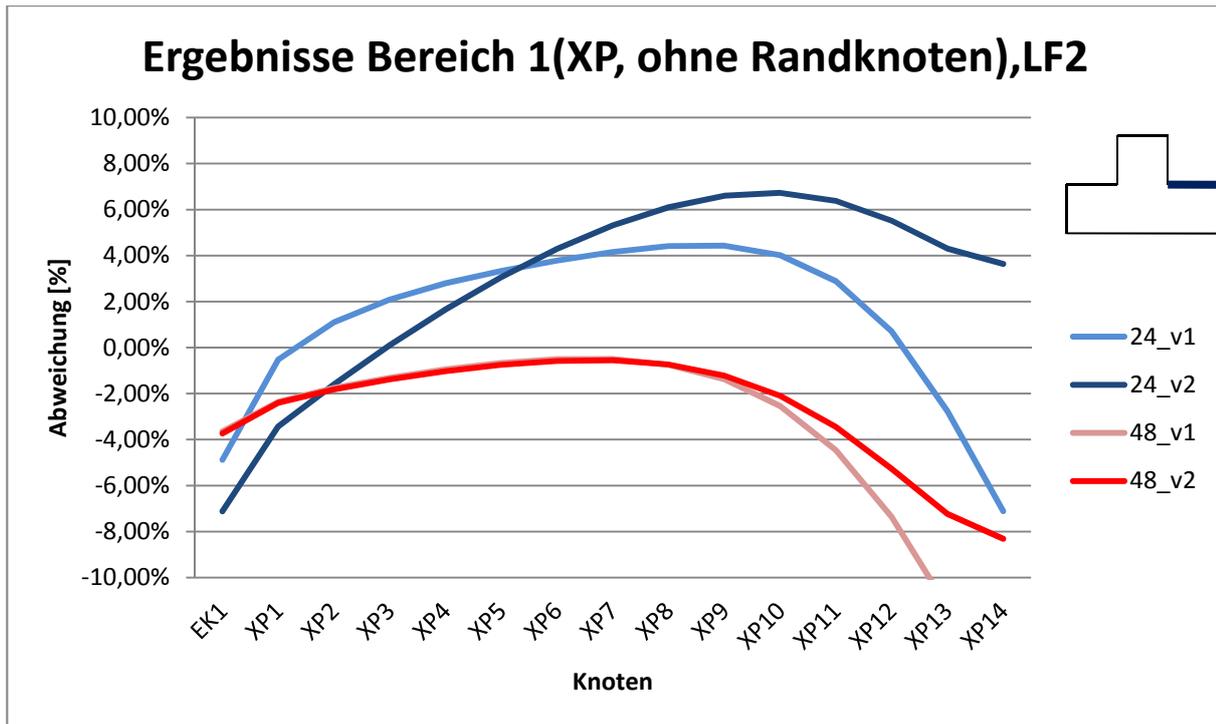


Abbildung 48: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP), LF 2 (ohne Randknoten)

Die Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell (Referenz) und den vier Detail Modellen (SolidIR_24_v1; SolidIR_24_v2; SolidIR_48_v1; SolidIR_48_v2) des zweiten Lastfalls im Bereich 2 (XN) werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	EK2	XN1	XN2	XN3	XN4	XN5	XN6	XN7	XN8
SolidIR_24_v1	0,98%	1,73%	1,38%	1,11%	0,79%	0,56%	0,43%	0,39%	0,39%
SolidIR_24_v2	0,97%	1,56%	1,41%	1,47%	1,50%	1,59%	1,70%	1,82%	1,92%
SolidIR_48_v1	-1,03%	-0,71%	-0,67%	-0,64%	-0,66%	-0,72%	-0,84%	-1,02%	-1,27%
SolidIR_48_v2	-0,91%	-0,55%	-0,48%	-0,44%	-0,44%	-0,48%	-0,55%	-0,66%	-0,80%

	XN9	XN10	XN11	XN12	XN13	XN14	XN15	XN16	XN17
SolidIR_24_v1	0,36%	0,21%	-0,15%	-0,75%	-1,50%	-1,92%	-0,93%	3,55%	11,38%
SolidIR_24_v2	1,97%	1,97%	1,88%	1,75%	1,69%	2,08%	3,56%	7,64%	13,37%
SolidIR_48_v1	-1,63%	-2,09%	-2,67%	-3,33%	-3,90%	-3,94%	-2,44%	2,39%	10,12%
SolidIR_48_v2	-0,97%	-1,16%	-1,33%	-1,40%	-1,21%	-0,38%	1,66%	6,22%	12,23%

Tabelle 10: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN), Lastfall 2

Die daraus abgeleiteten Diagramme, mit- und ohne Darstellung der Randknoten (XN15; XN16; XN17) sehen wie folgt aus:

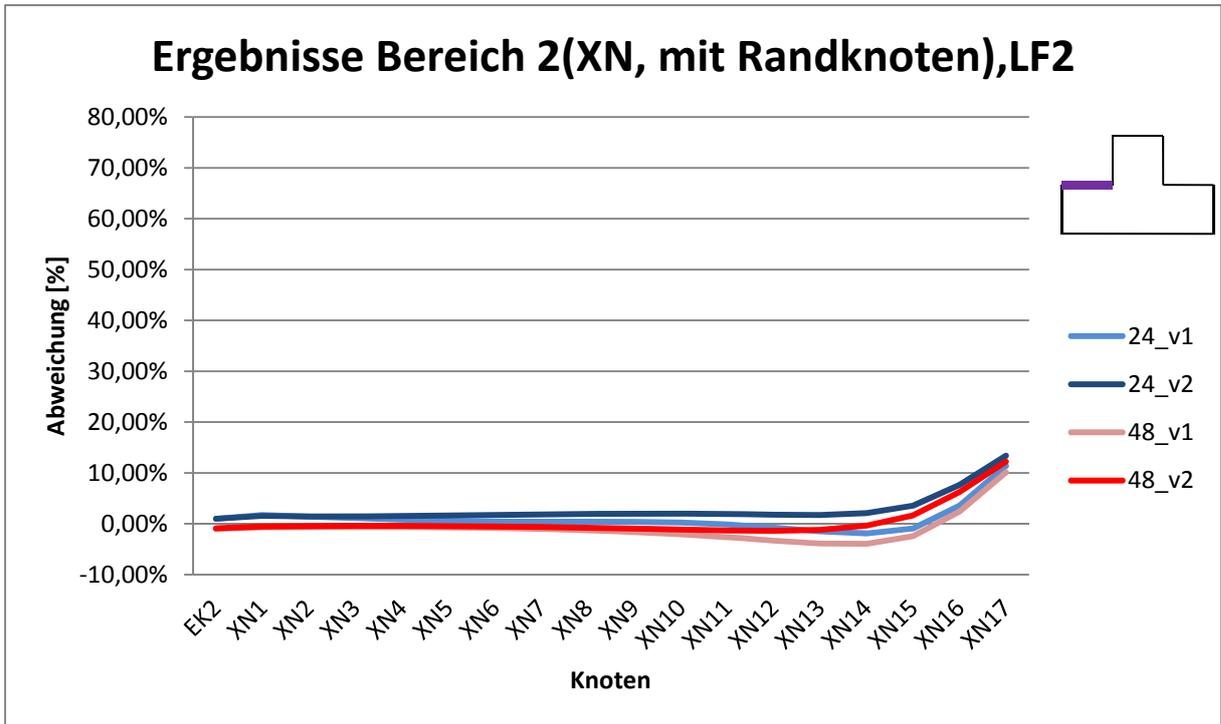


Abbildung 49: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN), LF 2 (mit Randknoten)

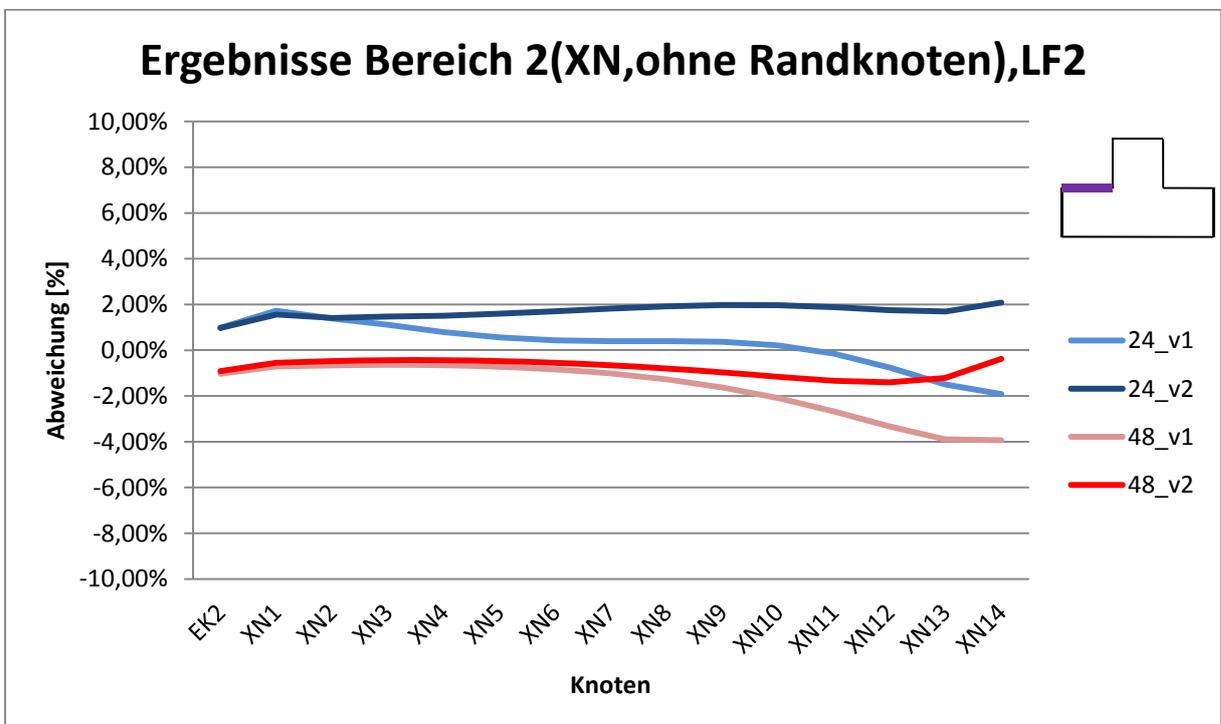


Abbildung 50: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN), LF 2 (ohne Randknoten)

Die Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell (Referenz) und den vier Detail Modellen (SolidIR_24_v1; SolidIR_24_v2; SolidIR_48_v1; SolidIR_48_v2) des zweiten Lastfalls im Bereich 3 (YP) werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	EK1	YP1	YP2	YP3	YP4	YP5	YP6	YP7	YP8
SolidIR_24_v1	-4,88%	-6,02%	-5,45%	-4,81%	-4,15%	-3,52%	-2,96%	-2,50%	-2,18%
SolidIR_24_v2	-7,12%	-6,96%	-5,84%	-4,73%	-3,67%	-2,71%	-1,88%	-1,21%	-0,72%
SolidIR_48_v1	-3,65%	-3,73%	-3,68%	-3,70%	-3,75%	-3,84%	-3,97%	-4,14%	-4,40%
SolidIR_48_v2	-3,73%	-3,87%	-3,80%	-3,80%	-3,80%	-3,84%	-3,89%	-3,98%	-4,10%

	YP9	YP10	YP11	YP12	YP13	YP14	YP15	YP16	YP17
SolidIR_24_v1	-2,04%	-2,14%	-2,55%	-3,31%	-4,36%	-5,27%	-4,93%	-1,08%	9,21%
SolidIR_24_v2	-0,40%	-0,28%	-0,34%	-0,55%	-0,78%	-0,62%	0,74%	4,72%	12,54%
SolidIR_48_v1	-4,75%	-5,23%	-5,87%	-6,68%	-7,53%	-8,02%	-7,13%	-2,90%	7,50%
SolidIR_48_v2	-4,27%	-4,49%	-4,73%	-4,94%	-4,94%	-4,34%	-2,39%	2,13%	10,50%

Tabelle 11: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP), Lastfall 2

Die daraus abgeleiteten Diagramme, mit- und ohne Darstellung der Randknoten (YP15; YP16; YP17) sehen wie folgt aus:

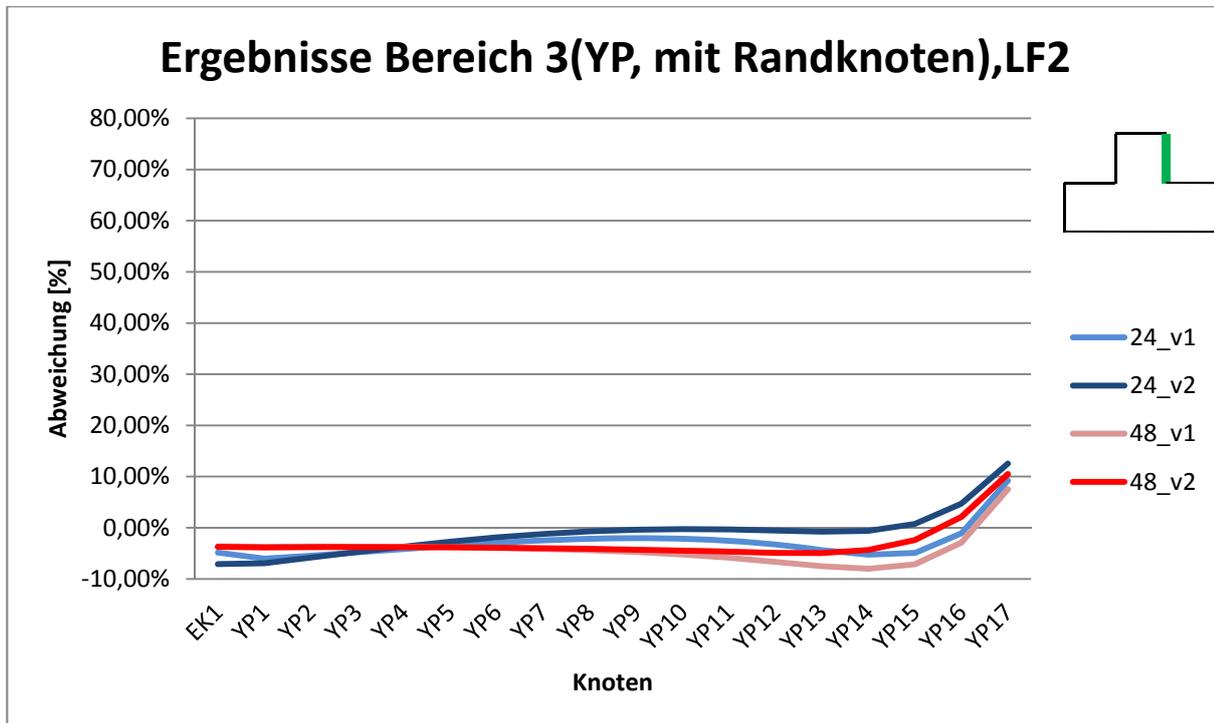


Abbildung 51: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP), LF 2 (mit Randknoten)

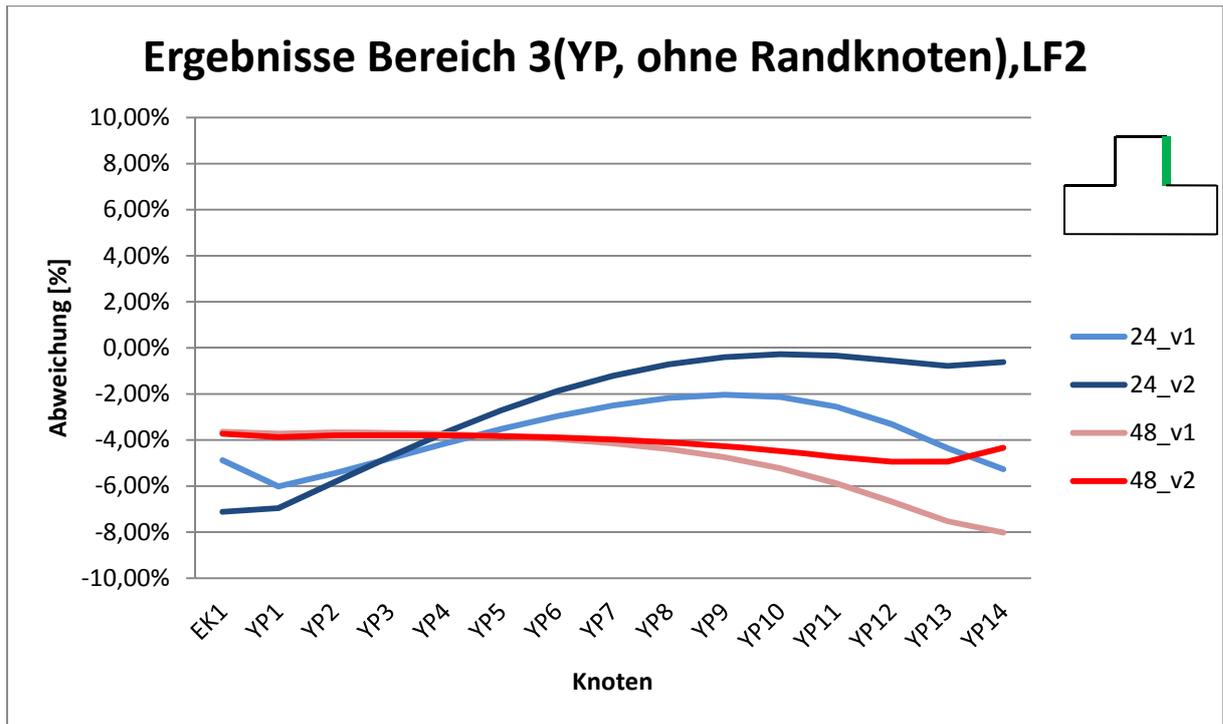


Abbildung 52: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP), LF 2 (ohne Randknoten)

Die Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell (Referenz) und den vier Detail Modellen (SolidIR_24_v1; SolidIR_24_v2; SolidIR_48_v1; SolidIR_48_v2) des zweiten Lastfalls im Bereich 4 (YN) werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	EK2	YN1	YN2	YN3	YN4	YN5	YN6	YN7	YN8
SolidIR_24_v1	0,98%	0,00%	-0,37%	-0,45%	-0,54%	-0,60%	-0,65%	-0,68%	-0,71%
SolidIR_24_v2	0,97%	0,10%	-0,21%	-0,19%	-0,15%	-0,06%	0,02%	0,09%	0,14%
SolidIR_48_v1	-1,03%	-1,31%	-1,44%	-1,49%	-1,56%	-1,64%	-1,73%	-1,86%	-2,01%
SolidIR_48_v2	-0,91%	-1,26%	-1,40%	-1,46%	-1,53%	-1,58%	-1,64%	-1,70%	-1,76%

	YN9	YN10	YN11	YN12	YN13	YN14	YN15	YN16	YN17
SolidIR_24_v1	-0,79%	-0,95%	-1,23%	-1,64%	-2,06%	-2,12%	-0,96%	2,70%	9,88%
SolidIR_24_v2	0,14%	0,10%	0,01%	-0,10%	-0,15%	0,11%	1,06%	3,86%	10,39%
SolidIR_48_v1	-2,20%	-2,44%	-2,71%	-2,96%	-3,05%	-2,63%	-0,93%	3,10%	10,26%
SolidIR_48_v2	-1,82%	-1,85%	-1,84%	-1,72%	-1,40%	-0,65%	0,85%	4,08%	10,80%

Tabelle 12: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN), Lastfall 2

Die daraus abgeleiteten Diagramme, mit- und ohne Darstellung der Randknoten (YN15; YN16; YN17) sehen wie folgt aus:

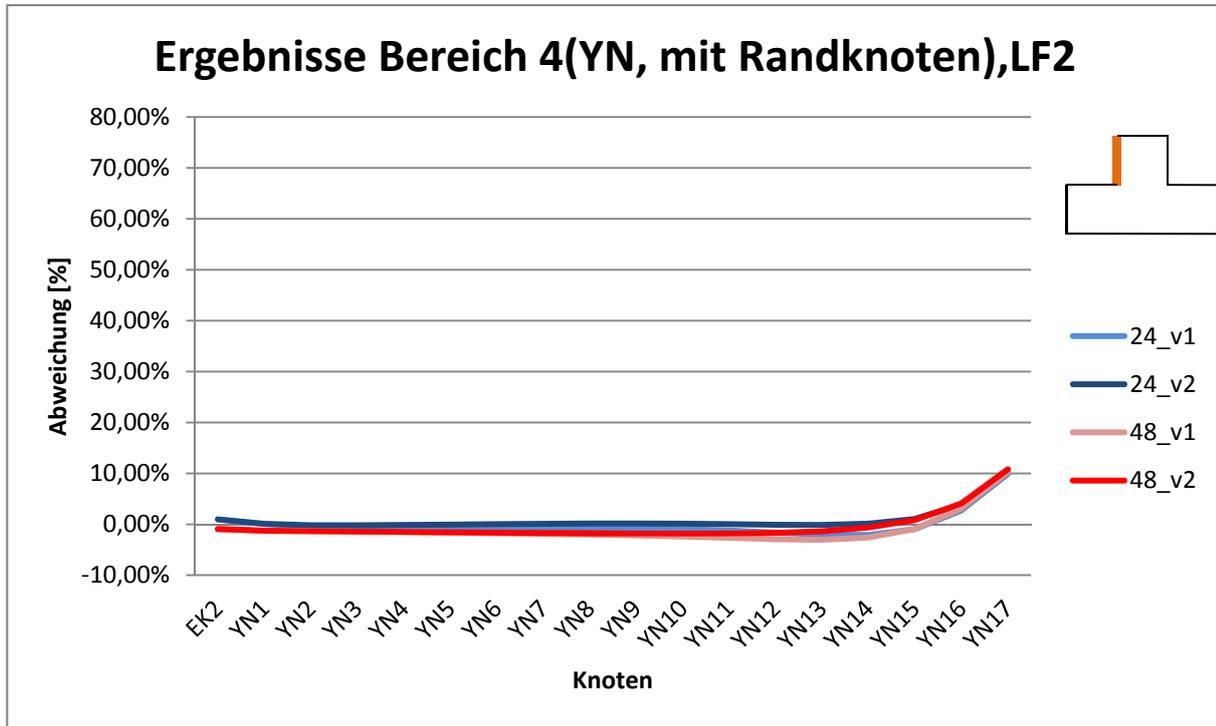


Abbildung 53: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN), LF 2 (mit Randknoten)

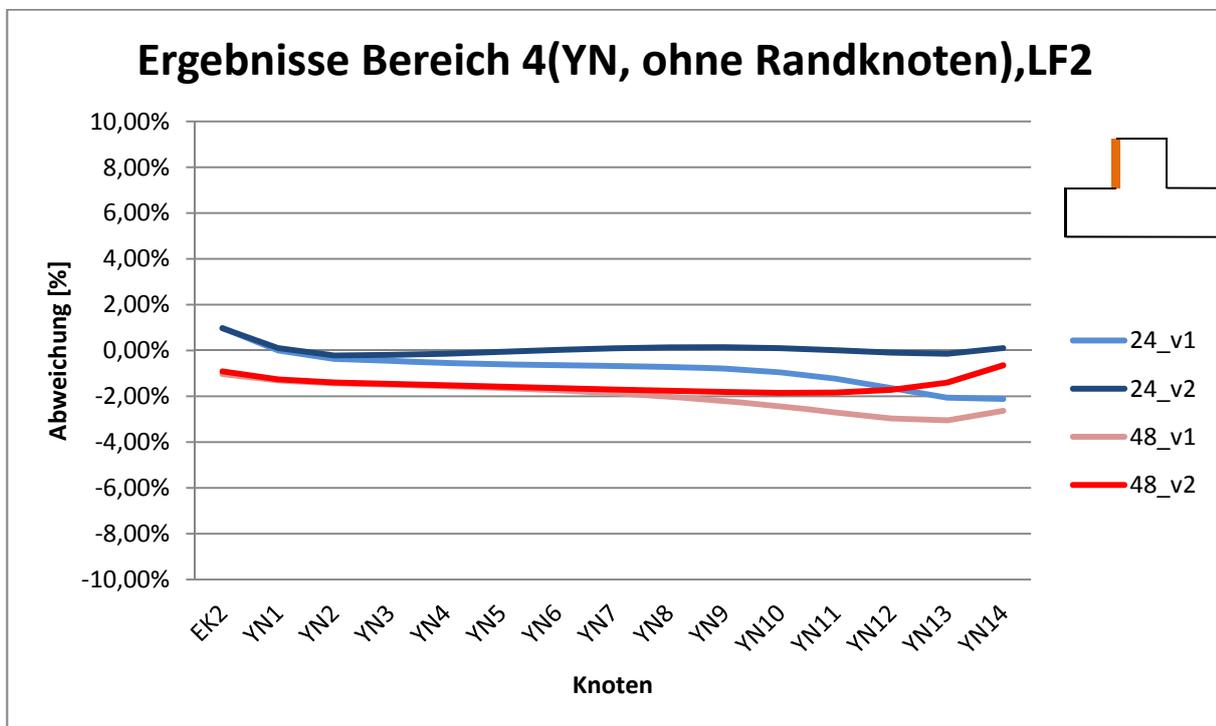


Abbildung 54: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN), LF 2 (ohne Randknoten)

5.4.3.3 Zusammenfassung

Die durchschnittlichen Abweichungen der Von-Mises Spannungen zwischen dem 3D-Solid Modell (Referenz) und den vier Detail Modellen (SolidIR_24_v1; SolidIR_24_v2; SolidIR_48_v1; SolidIR_48_v2) der beiden Lastfälle werden, ohne Berücksichtigung der Randknoten bzw. der ersten 3 Elementreihen in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

Lastfall 1:

	<u>Bereich</u>			
	1 (XP)	2 (XN)	3 (YP)	4 (YN)
SolidIR_24_v1	1,39%	1,97%	3,68%	2,97%
SolidIR_24_v2	1,49%	1,81%	3,75%	3,36%
SolidIR_48_v1	0,36%	0,97%	1,33%	1,26%
SolidIR_48_v2	0,35%	0,68%	1,42%	1,15%

Tabelle 13: Durchschnittliche Abweichung, Von-Mises-Sp., LF1, ohne Randknoten

Lastfall 2:

	<u>Bereich</u>			
	1 (XP)	2 (XN)	3 (YP)	4 (YN)
SolidIR_24_v1	3,27%	0,84%	3,74%	0,92%
SolidIR_24_v2	4,39%	1,69%	2,52%	0,17%
SolidIR_48_v1	3,67%	1,67%	4,86%	2,00%
SolidIR_48_v2	2,70%	0,78%	4,17%	1,50%

Tabelle 14: Durchschnittliche Abweichung, Von-Mises-Sp., LF2, ohne Randknoten

Aus den oben gezeigten Tabellen der durchschnittlichen Abweichungen der beiden Lastfälle geht hervor, dass sich das vierte Detail-Modell „SolidIR_48_v2“ am besten für diese Anwendung eignet, da es die geringsten Abweichungen zum Referenz-Solid-Modell aufweist.

Dieses Detail-Modell „SolidIR_48_v2“ wird in der folgenden Abbildung nochmals gezeigt und erklärt:

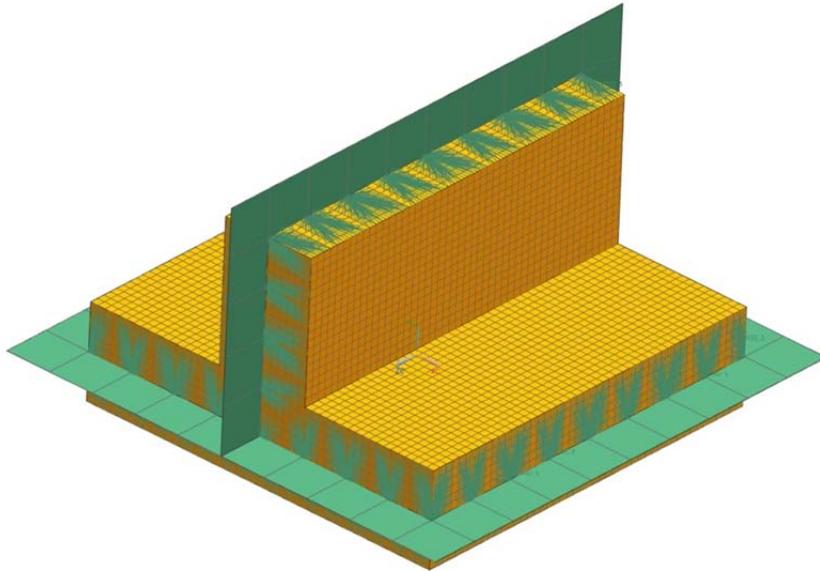


Abbildung 55: SolidIR_48_v2

Dieses Detail-Modell hat bei einer vorgegebenen Breite von 48mm ebenfalls eine Tiefe von 48mm, wobei eine quadratische Grundfläche entsteht. Senkrecht auf die Seiten- und Stirnflächen des Detail-Modells werden die Übergangsschalenelemente angebracht. Die Randknoten dieser Übergangsschalenelemente werden mittels RBE3-Spider-Elementen mit den Knoten der Seiten- und Stirnflächen des Detail-Modells verbunden. Dabei wird jeder Knoten der Seiten- und Stirnflächen des Detail-Modells mit jeweils nur einem RBE3-Element verbunden.

Dass eine Tiefe von 48 mm gewählt wird spielt ebenfalls am Schweißnahtende eine große Rolle. Die folgende Grafik aus Hobbacher, *Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile* zeigt beispielhaft ein solches Schweißnahtende:

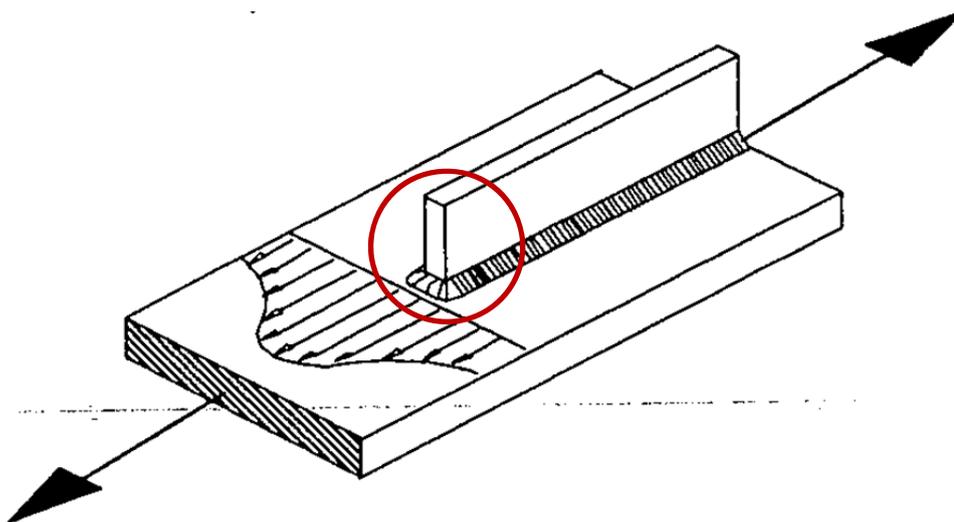


Abbildung 56: Schweißnahtende (Grafik: Hobbacher)

Um die Spannungen in den Kerben und Wurzeln am Schweißnahtende zu analysieren, muss das Detail-Modell eine genügend große Tiefe aufweisen.

Die geforderten Simulationen zur Analyse des Spannungszustandes am Schweißnahtende sind auch ein wichtiger Grund dafür, dass 3D-Schweißnahtsubmodelle erstellt werden.

Die Methode des Aufbringens der, aus einem globalen Strukturmodell ermittelten Schnittgrößen (Kräfte und Momente) auf ein Detailvolumenmodell mittels RBE3-Spider-Elementen kann nun als verifiziert angesehen werden.

Die Spannungs-Ergebnisse der beiden Lastfälle, die in den vorangegangenen Tabellen und Diagrammen dargestellt wurden, zeigen nun, dass die Abweichungen des Detail-Modells „SolidIR_48_v2“ von dem Referenz-Solid-Modell in der Größenordnung von (mit Ausnahme einzelner Ausreißer) maximal 2% liegen.

Beachtet man jedoch die Tatsache, dass die Abweichungen der Spannungs-Ergebnisse, wie im Kapitel 5.4.2 gezeigt zwischen dem Shell-Modell und dem Solid-Modell ebenfalls in etwa dieser Größenordnung liegen, so kann man diese Methode als verifiziert ansehen.

Die daraus gewonnen Erkenntnisse der Schnittgrößenaufbringung auf ein Detail-Modell werden nun bei der Erstellung der 3D-Schweißnahtsubmodelle angewandt.

6 Erstellung von 3D-Schweißnahtsubmodellen

Um die realen Spannungen in den Kerben und Wurzeln abbilden zu können benötigt man dreidimensionale Volumenmodelle der verschiedenen Schweißnahtstöße.

Daher werden im nächsten Schritt 3D-Schweißnahtsubmodelle erstellt.

Die, in den vorigen Kapiteln gewonnen Erkenntnisse der Aufbringung von den, aus einem globalen Strukturmodell ermittelten Kräften und Momenten auf ein 3D-Schweißnahtsubmodell und den geeigneten 2D-3D Übergang werden hierfür genutzt.

Eine Methode wäre die 3D-Schweißnahtsubmodelle neu zu generieren. Jedoch ist dies sehr zeitaufwendig, da die zu betrachtenden Stellen an den Kerben und Wurzeln des jeweiligen Schweißnahtstoßes mit einer bestimmten Elementlänge sehr fein vernetzt werden müssen.

Die schnellere -, bzw. bessere Methode ist es die 3D-Schweißnahtsubmodelle aus 2D-Schalenmodellen zu generieren.

Hierfür werden die bereits vollständig generierten 2D-Radaj-Schalenmodelle von verschiedenen Schweißnahtstößen aus der Diplomarbeit "*Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzeptes*" von Franz Wolmersdorfer herangezogen.

6.1 Arten der Schweißnahtverbindungen

Für die Erstellung der 3D-Schweißnahtsubmodelle dienen die 2D-Schalenmodelle, die von Franz Wolmersdorfer generiert wurden. Herr Wolmersdorfer hat diese 2D-Radaj-Schweißnahtmodelle nach den, bei Siemens Mobility am häufigsten eingesetzten Schweißverbindungen und Schweißnahtarten erstellt.

Die folgende Tabelle zeigt eine Auflistung dieser Schweißverbindungen und Schweißnahtarten. Es wird dabei grundsätzlich zwischen drei Schweißverbindungen (Stumpfstoß, T-Stoß und Kreuzstoß) unterschieden:

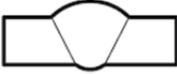
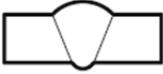
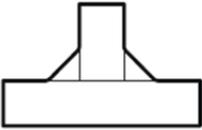
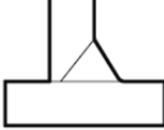
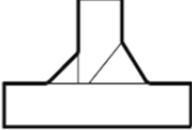
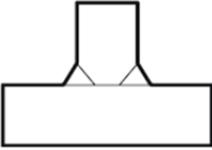
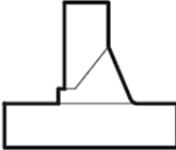
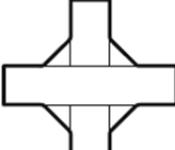
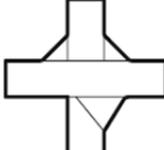
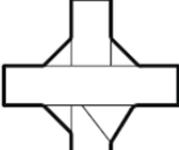
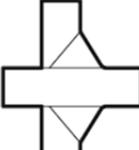
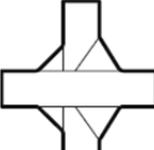
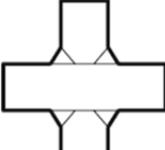
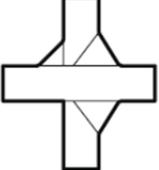
Stumpfstoß	 B_VC	 B_VM	 B_VT
T-Stoß	 T_FD	 T_YS	 T_YB
	 T_YD	 T_VS	
Kreuzstoß	 X_FD_FD	 X_FD_YS	 X_FD_YB
	 X_YS_YS	 X_YB_YB	 X_YD_YD
	 X_YS_YB		

Tabelle 15: Schweißverbindungen und Schweißnahtarten (Grafik: Wolmersdorfer)

Die abgekürzten Bezeichnungen der verschiedenen Schweißnahtarten werden auch für diese Arbeit übernommen. Daher ist jede Art der Schweißverbindung eindeutig definiert.

Eine Erklärung der abgekürzten Bezeichnungen zeigt der folgende Absatz:

B Butt joint; Stumpfstoß

T T joint; T-Stoß

X Cruciform joint; Kreuzstoß

VC V-weld, Ceramic backing bar; V-Naht, keramische Badsicherung

VM V-weld, Metal backing bar; V-Naht, metallische Badsicherung

VT V-weld, Tig-root; V-Naht, WIG-Wurzel

FD Fillet Double, Doppelkehlnaht

YS partial penetration, single sided; HY-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht

YD partial penetration, double sided; K-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht

YB partial penetration, backing run; HY-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht und Gegenlage

VS full penetration, single sided; HV-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht

Anhand dieser Schweißverbindungen und Schweißnahtarten hat nun Herr Wolmersdorfer in seiner Diplomarbeit "*Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzeptes*" feinvernetzte 2D-Schweißnahtsubmodelle nach Radaj erstellt.

In der folgenden Abbildung werden drei dieser feinvernetzten 2D-Schweißnahtmodelle nach Radaj gezeigt. Dabei handelt es sich um ein Stumpfstoß-Modell (B_VC, oben links), ein T-Stoß-Modell (T_FD, oben rechts) sowie ein Kreuzstoß-Modell (X_FD_FD, unten):

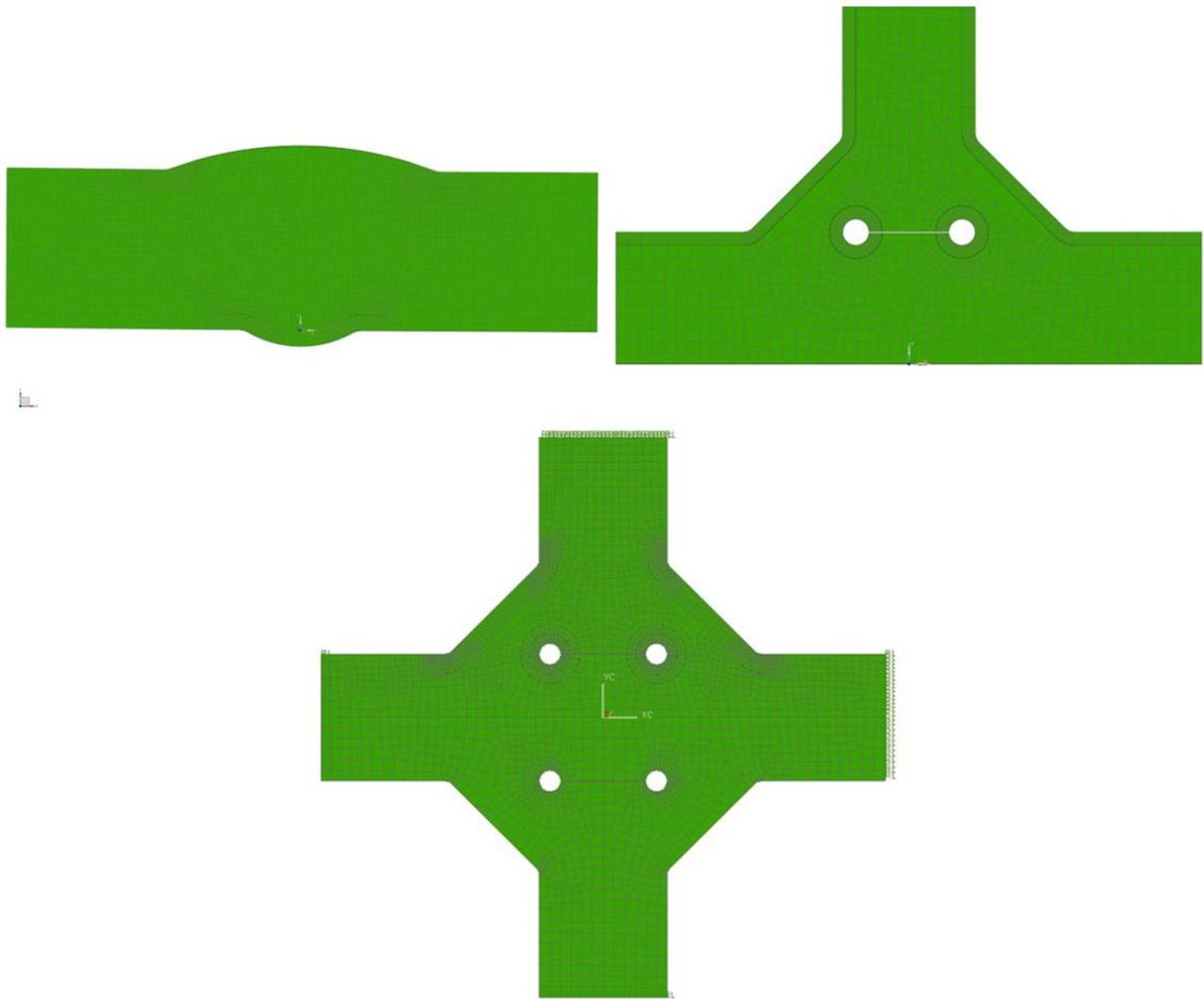


Abbildung 57: 2D-Radaj-Schweißnahtmodelle von Wolmersdorfer F.

Diese Modelle sind an den zu betrachtenden Stellen in den Kerben und Wurzeln sehr fein, mit einer Elementlänge von jeweils 0,2 mm vernetzt. Diese Elementlänge ist nach Untersuchungen aus seiner Diplomarbeit hervorgegangen.

Aus diesen 2D-Schalenmodellen nach Radaj werden nun 3D-Volumenmodelle generiert, indem die einzelnen Schalenelemente zu Volumenelementen im FEM-Part des Programms UGS NX extrudiert werden.

Diese Methode des Extrudierens der Schalenelemente bietet den großen Vorteil, dass es relativ einfach ist und sehr schnell umgesetzt werden kann.

Ein Nachteil dieser Methode ist, dass hinter dem Volumenmodell kein *polygon-body* hinterlegt ist, was im UGS NX in manchen Anwendungsfällen zu Problemen führen kann. Da sich diese Probleme jedoch in den meisten Fällen umgehen lassen, bzw. in diesem Fall für die weiteren Anwendungen nicht von Bedeutung sind, ist diese Methode des Extrudierens zu bevorzugen.

6.2 Wahl der Element-Tiefe

Bei dieser Extrusion wird die Tiefe der einzelnen Volumenelemente im ersten Schritt mit 0,2mm gewählt, was der kleinsten Elementlänge in den Kerben und Wurzeln des 2D-Schalenmodells entspricht. Damit ist die Forderung nach einem quadratischen Querschnitt der Elemente in den Kerben und Wurzeln des Schweißnahtsubmodells erfüllt und somit höchste Ergebnisqualität garantiert.

Wie in den Untersuchungen des vorangegangenen Kapitels gezeigt, wird die Gesamttiefe gleich der Gesamtlänge gewählt, damit das Detail-Volumenmodell eine quadratische Basisfläche hat und somit der Ausschnitt aus dem globalen Strukturmodell in alle Richtungen gleiche Abmessungen hat.

Diese 3D-Schweißnahtsubmodelle bestehen aus 20 knotigen Hexaeder-Elementen (CHEXA20). Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft ein Kreuzstoßmodell (X_FD_FD) mit einer Elementtiefe von 0,2mm:

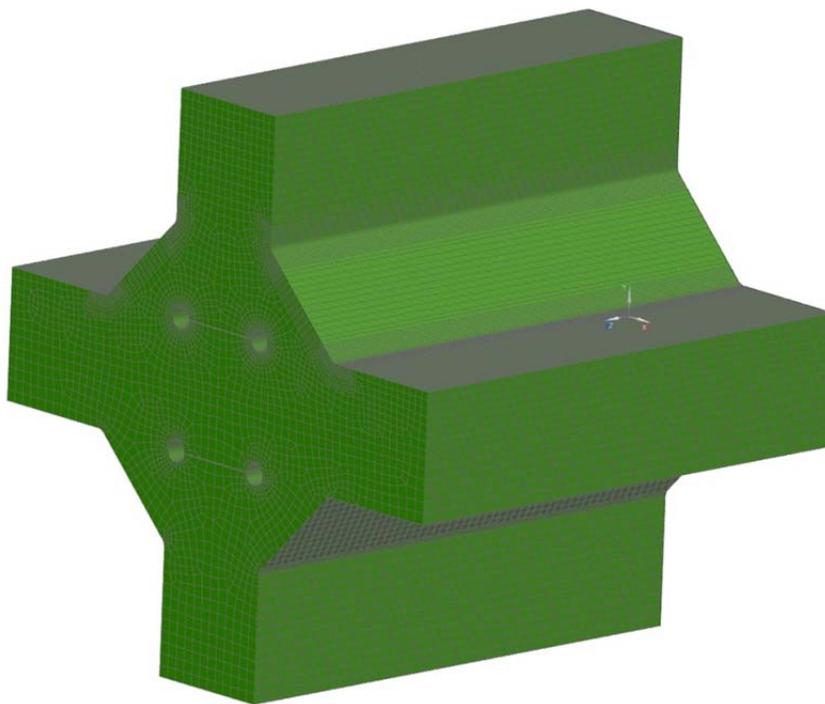


Abbildung 58: Extrusion X-Stoß, Elementtiefe 0,2mm

Bei der Schweißnahtsubmodellerstellung ist einer der wichtigsten Faktoren die derzeit maximal erzielbare Rechenleistung der heutigen Computer. Daher wird hier bewusst ein Kreuzstoß-Volumenmodell gewählt, weil dabei die Anzahl der Knoten bzw. Elemente am höchsten ist und somit die größte Rechenleistung erforderlich ist.

Bei diesem Detail-Volumenmodell beträgt die Elementtiefe jedes einzelnen Elementes 0,2mm, was zu Folge hat, dass dieses Schweißnahtsubmodell eines Kreuzstoßes aus 3401978 Knoten bzw. 804240 Hexaeder-Elementen besteht.

Diese extrem hohe Anzahl an Knoten bzw. Elementen ist mit den heutigen uns zur Verfügung stehenden Computern zwar linear statisch berechenbar, jedoch mit der quasistatischen Berechnungsmethodik „Inertia Relief“, welche für die weiteren Berechnungen zwingend erforderlich ist, ist eine Berechnung auf Grund zu hoher erforderlicher Rechenleistung nicht möglich.

Im nächsten Schritt werden nun die Anzahl der Knoten bzw. Elemente reduziert um eine Berechnung zu ermöglichen. In der Mitte, d.h. den mittleren 10 Elementreihen des 3D-Schweißnahtsubmodelles wird die Elementtiefe von 0,2mm beibehalten, damit die Gleichheit von Elementlänge zu Elementtiefe an der zu betrachtenden Stelle gewährleistet ist. Zum Rand hin, wird auf beiden Seiten die Elementtiefe erhöht. Dabei wird diese so gewählt, dass sich jeweils 10 Elementreihen ergeben. Die Gesamtanzahl von 30 Elementreihen ist somit für jedes 3D-Schweißnahtsubmodell konstant. Die Tiefe der jeweils 10 „Rand-Elementreihen“ ist daher variabel und Abhängig von den geometrischen Abmessungen des Schweißnahtsubmodells. Die Gesamttiefe ändert sich nicht, da die quadratische Basisfläche beibehalten werden muss.

Daraus ergibt sich hier nun ein 3D-Schweißnahtsubmodell dieses Kreuzstoßes (X_FD_FD), das wie folgt aussieht:

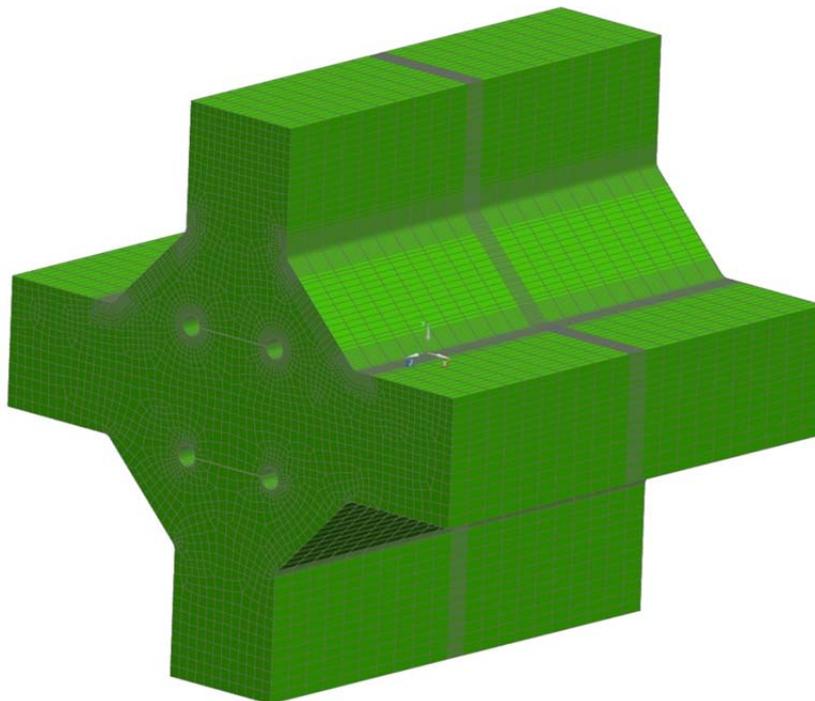


Abbildung 59: Extrusion X-Stoß, variable Elementtiefe

Dieses 3D-Schweißnahtsubmodell besteht nun aus 434468 Knoten bzw. 100530 Hexaeder-Elementen.

In der Mitte des 3D-Schweißnahtsubmodells wird der quadratische Element-Querschnitt von 0,2mm beibehalten:

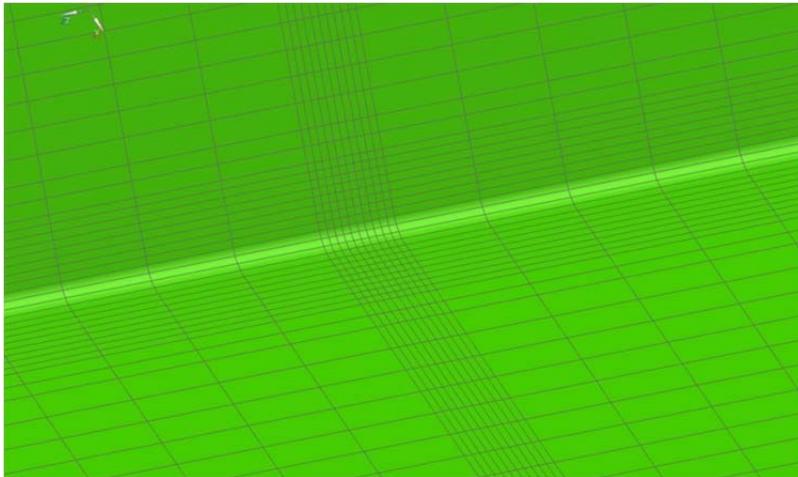


Abbildung 60: Detail-Ausschnitt X-Stoß

Dieses 3D-Schweißnahtsubmodell lässt sich nun mit den heutigen uns zur Verfügung stehenden Computern problemlos berechnen.

6.3 Aufbringen der Anschlusschalen

Als nächstes werden nun die, aus den vorigen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse des Aufbringens von Kräften und Momenten bzw. des Übergangs von 2D-Schalenelementen auf 3D-Volumenelemente an diesem 3D-Kreuzstoßmodell angewandt.

Hierzu werden zunächst normal auf die Seiten- und Stirnflächen des Detailvolumenmodells die 2D-Anschlusschalen hinzugefügt.

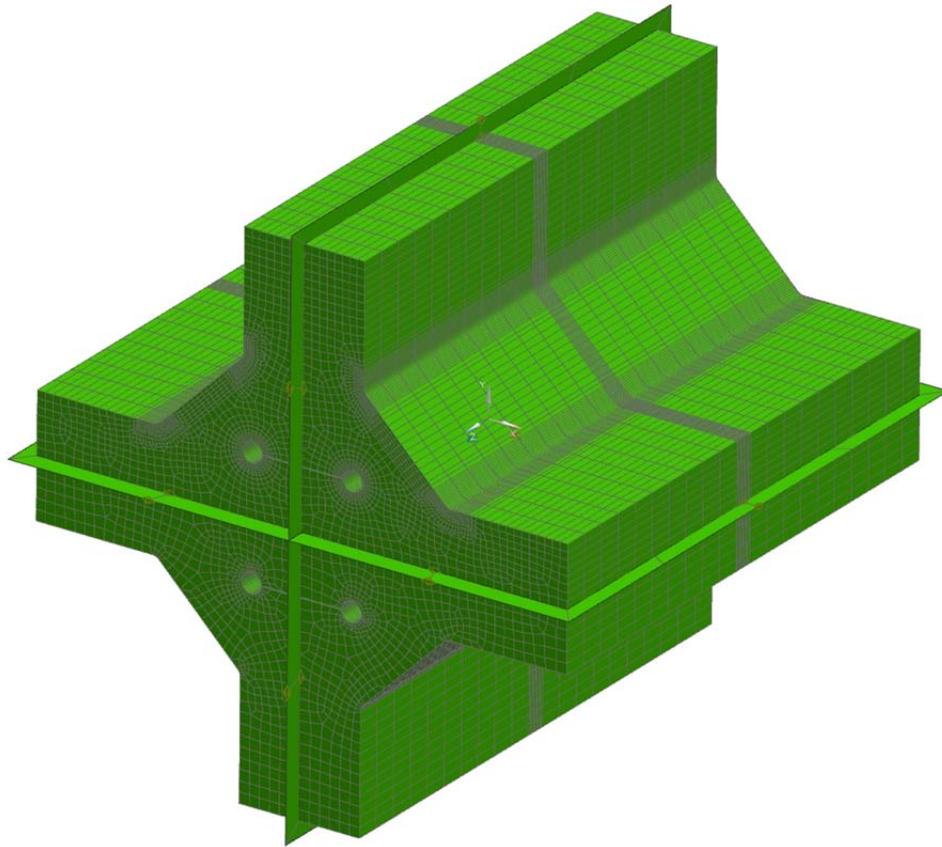


Abbildung 61: X-Stoß mit Anschlusschalen

Die Abmessungen der Schalen wurden bewusst klein gehalten, damit die Gesamtgröße des Schweißnahtsubmodells so gering wie möglich ist, um dadurch auch Schweißnähte, die eher am Rand eines Bleches angeordnet sind berechnen zu können.

Die Elementlänge der Anschluss-Kanten ist Submodell-spezifisch variabel, da auch die geometrischen Abmessungen der 3D-Submodelle von den Schweißnahtarten abhängen. Innerhalb eines jeden 3D-Schweißnahtsubmodells ist die Elementlänge der Anschluss-Kanten jedoch konstant, um eine vereinfachte Automatisierung zu ermöglichen.

6.4 Aufbringen der RBE3-Spider

Im nächsten Schritt werden RBE3-Spider-Elemente implementiert, um die Anschlusschalen mit den Seiten- und Stirnflächen des 3D-Schweißnahtsubmodells zu verbinden.

Dabei ergibt sich ein nicht unwesentliches Problem. Bei der Verifikation der Methode waren die Knoten der Seiten- und Stirnflächen des 3D-Submodells gleichmäßig über die gesamte Fläche verteilt. Bei den detaillierten Schweißnahtsubmodellen ist das jedoch nicht der Fall, da diese speziell in den Kerben und Wurzeln stark verfeinerte Netze mit lokalen Ansammlungen von vielen Knotenpunkten aufweisen.

Da aber die RBE3-Spider-Elemente die Kräfte und Momente gleichmäßig auf jedes einzelne RBE3-Element verteilen, würde dadurch aber lokal eine ungleichmäßige Verteilung dieser Kräfte und Momente auf die Seiten- und Stirnflächen des 3D-Schweißnahtsubmodells stattfinden. Daher muss nun eine andere Möglichkeit der Verteilung der RBE3-Elemente auf die Seiten- und Stirnflächen des Submodells gefunden werden.

Die folgende Abbildung zeigt nun eine Methode, wie man die RBE3-Elemente möglichst gleichmäßig verteilt auf die Seitenfläche des 3D-Schweißnahtsubmodells aufbringt:

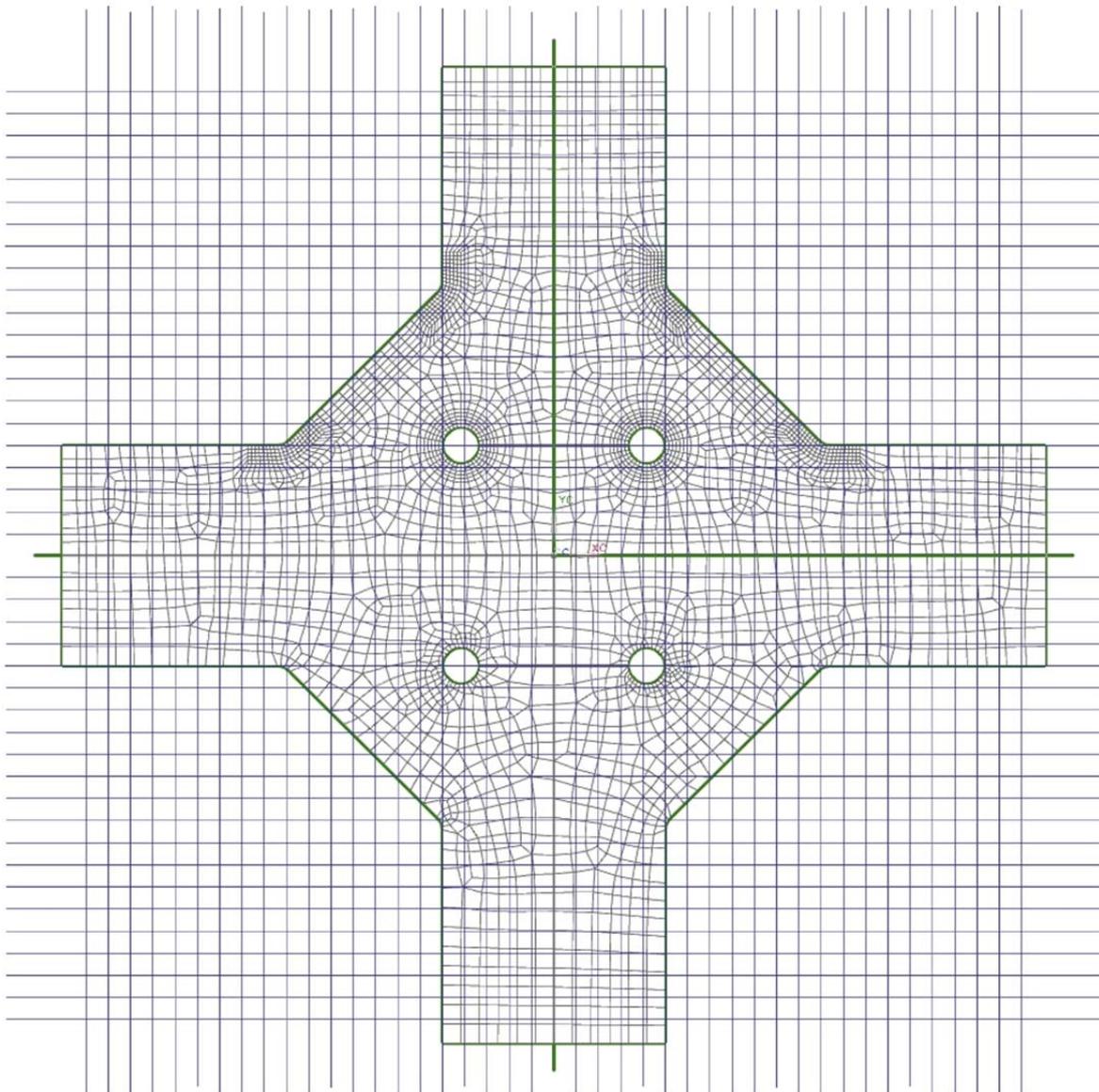


Abbildung 62: Bereiche-Unterteilung, RBE3-Aufbringung

Dabei wird diese Seitenfläche in gleich große quadratische Bereiche unterteilt. Die Abmessungen dieser Bereiche werden so gewählt, dass die Länge bzw. Breite genau ein Zehntel der Blechdicke ausmacht. In jedem dieser Bereiche wird nun jeweils genau ein einziger Knoten gewählt, an dem ein RBE3-Element angreift. Dieser Knoten sollte möglichst kein Mittelknoten sein, und er sollte ebenfalls nicht am Rand der Seitenfläche liegen.

Die folgende Abbildung zeigt die für das Aufbringen der RBE3-Elemente ausgewählten Knoten eines Teilbereiches der Seitenfläche:

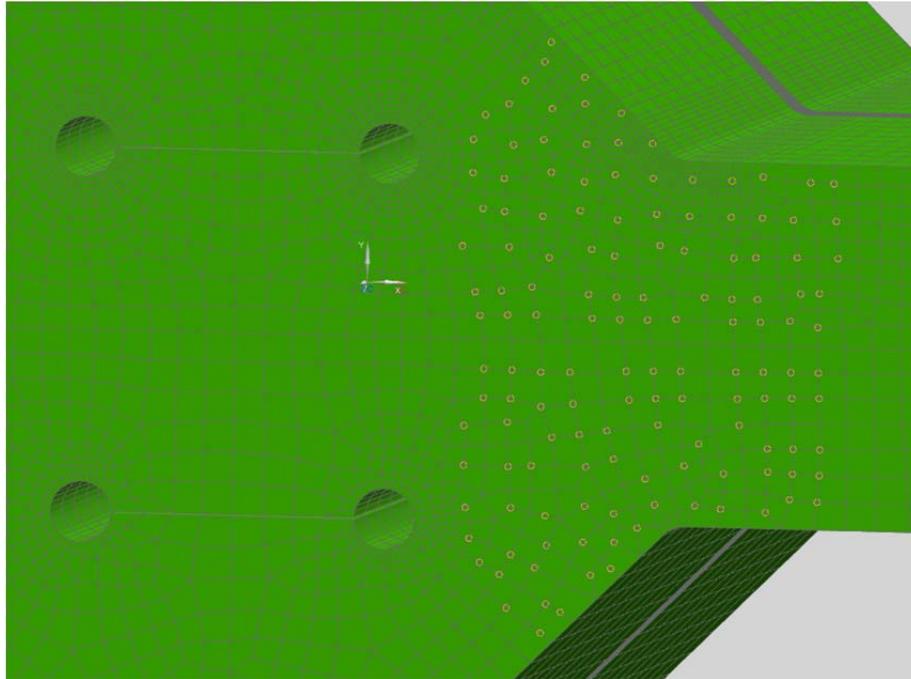


Abbildung 63: Ausgewählte Knoten eines Teilbereiches

Diese ausgewählten Knoten der Seiten- und Stirnflächen des 3D-Schweißnahtsubmodells werden anschließend mit den gegenüberliegenden Knoten der Anschlusschalen-Kanten mittels RBE3-Elementen verbunden.

Durch das manuelle Setzen der RBE3-Elemente in die einzelnen Bereiche der Seiten- und Stirnflächen ist nun gewährleistet, dass auch bei einem 3D-Schweißnahtsubmodell mit verfeinerten Kerben und Wurzeln das Aufbringen der Kräfte und Momente möglichst gleichmäßig auf die jeweilige Fläche erfolgt.

6.5 Fertiges 3D-Schweißnahtsubmodell

Das fertige 3D-Schweißnahtsubmodell des, in den vorigen Kapiteln gezeigten Kreuzstoßes (X_FD_FD) sieht nun wie folgt aus:

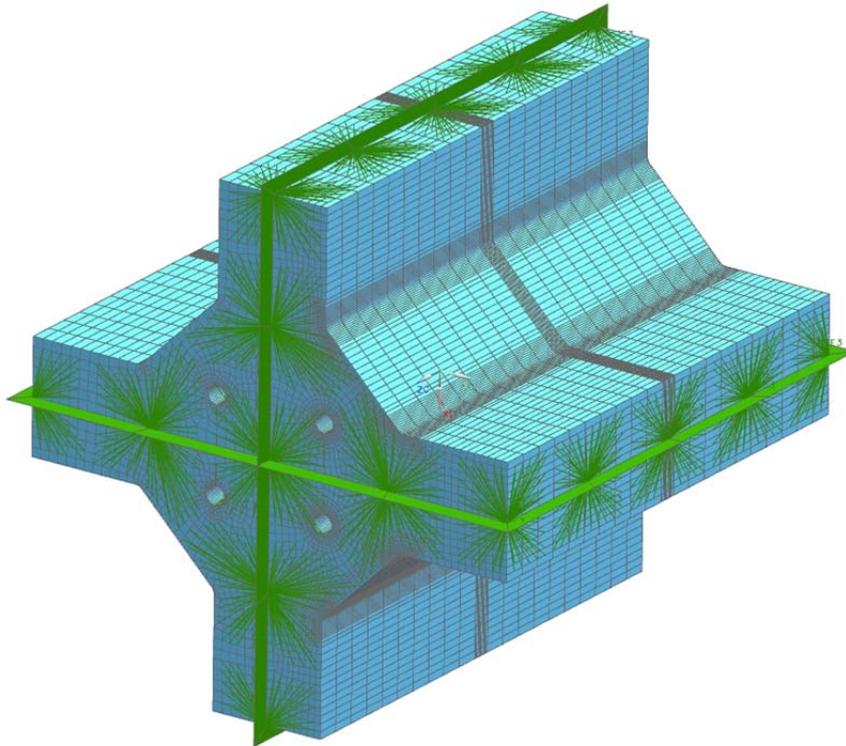
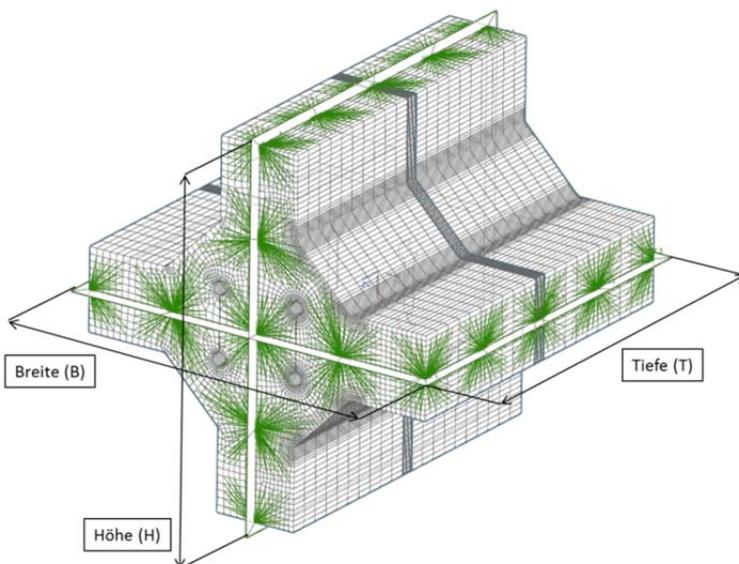


Abbildung 64: fertiges 3D-Schweißnahtsubmodell eines Kreuzstoßes (X_FD_FD)

Die wichtigsten Werte und Abmessungen dieses 3D-Schweißnahtsubmodells werden in der folgenden Abbildung und Tabelle gezeigt:



X_FD_FD_12	
Bezeichnung	Wert
Stoß-Art	X_FD_FD
Blechdicke (t)	12mm
Breite (B)	56mm
Höhe (H)	56mm
Tiefe (T)	56mm
Elemente	100530
Knoten	434468

Abbildung 65: Abmessungen 3D-Schweißnahtsubmodell

Auf die einzelnen Knoten der Kanten der Anschlusschalen werden in weiterer Folge Einheitslasten aufgebracht. Anhand der daraus folgenden Ergebnisse wird dann anschließend ein 3D-Kerbfallkatalog erstellt.

Dieselbe Vorgehensweise der 3D-Submodellerstellung wird nun bei allen weiteren, in Kapitel 6.1 gezeigten Schweißnahtarten angewandt.

7 Inertia Relief

An den Anschluss-Knoten der 3D-Schweißnahtsubmodelle werden Einheitslasten nach allen 6 Freiheitsgraden aufgebracht und berechnet. Die daraus gewonnenen Spannungsergebnisse in den Kerben und Wurzeln des 3D-Schweißnahtsubmodells werden anschließend zur Erstellung des Kerbfallkataloges genutzt.

Da diese Einheitslasten jeweils einzeln auf das 3D-Schweißnahtsubmodell aufgebracht und ohne jegliche Einspannung simuliert werden ist es notwendig eine geeignete Simulationsmethodik im UGS NX Nastran zu finden.

Bei einer konventionellen linear statischen Finite Elemente Simulation im UGS NX Nastran ist es jedoch nicht möglich statisch unbestimmte Strukturen zu berechnen. Daher bietet UGS NX Nastran mit der Funktion „Inertia Relief“ die Möglichkeit solche Simulationen durchzuführen.

7.1 Beschreibung

Inertia Relief (zu Deutsch: „Trägheitsrelief“) ist eine erweiterte Simulationsmethodik im UGS NX Nastran, welche ermöglicht freie- oder nur teilweise gelagerte Strukturen durch eine quasistatische Analyse zu berechnen. Typische Anwendungsgebiete des Inertia Relief Berechnungsverfahrens sind die Luftfahrtindustrie, wo Flugzeuge in der Luft berechnet werden, bzw. die Raumfahrtindustrie, wo Berechnungen von Satelliten im All durchgeführt werden.

7.2 Methodik

Konventionelle linear statische Finite Elemente Simulationen im UGS NX Nastran erfordern, dass die zu berechnende Struktur statisch bestimmt ist, bzw. dementsprechende Einspannbedingungen besitzt. Ist das nicht der Fall, so wird in der UGS NX Nastran Simulation die Steifigkeits-Matrix singulär und liefert keine Ergebnisse.

Um solche FE-Berechnungen im UGS NX Nastran dennoch durchführen zu können benötigt man eine geeignete Berechnungs-Methodik, die Inertia Relief genannt wird. Bei dieser Art der Simulation werden die von außen auf die Struktur einwirkenden Kräfte mit den Massenträgheitskräften der Struktur ins Gleichgewicht gebracht. Durch diesen Sonderfall der linear statischen Festigkeitsanalyse ist es möglich Strukturen ohne Lagerungseinfluss zu simulieren.

7.2.1 Beispiel

Die Funktionsweise von Inertia Relief wird hier anhand eines einfachen Beispiels gezeigt:

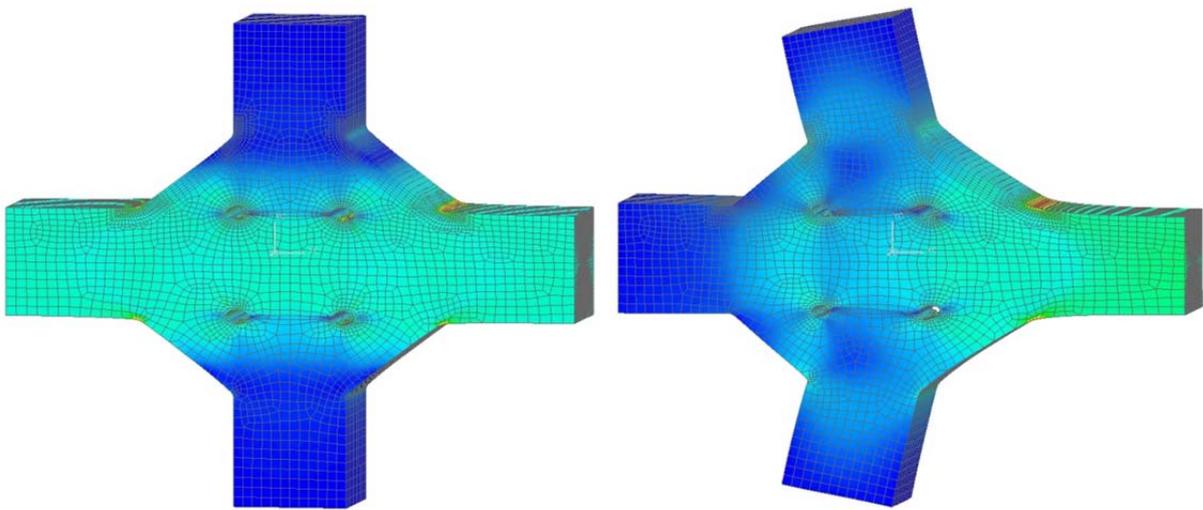


Abbildung 66 : Beispiel: Linear Statisch - Inertia Relief

(In den beiden Abbildungen wurde die Deformation jeweils auf 10% gestellt um die Unterschiede im Detail zu zeigen)

Die linke Abbildung zeigt eine linear statische Berechnung, wobei der Kreuzstoß auf der linken Seite fix eingespannt und auf der rechten Seite einseitig belastet wird.

Das rechte Bild zeigt eine Berechnung mit Inertia Relief, wobei der Kreuzstoß ohne Einspannung auf der rechten Seite einseitig belastet wird. Man erkennt sehr deutlich, wie sich die Struktur aufgrund ihrer Massenträgheit verformt.

Für dieses Beispiel, bzw. für die folgenden Testreihen wurde ein 3 dimensionales Schweißnahtsubmodell aus einem 2D-Schalenmodell generiert. Als Vorlage diente das Schalenmodell eines Kreuzstoßes mit beidseitiger Doppelkehlnaht und einer Blechdicke von 12mm, das aus der Diplomarbeit „*Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzeptes*“ von Franz Wolmersdorfer stammt.

Das Volumenmodell besteht aus 20 knotigen Hexaeder-Elementen, mit einer globalen Elementgröße von 1mm und einer Tiefe von 12mm. Wie schon im Schalenmodell ist das Netz an den Kerben des Volumenmodells auf eine Elementlänge von 0,2mm verfeinert worden.

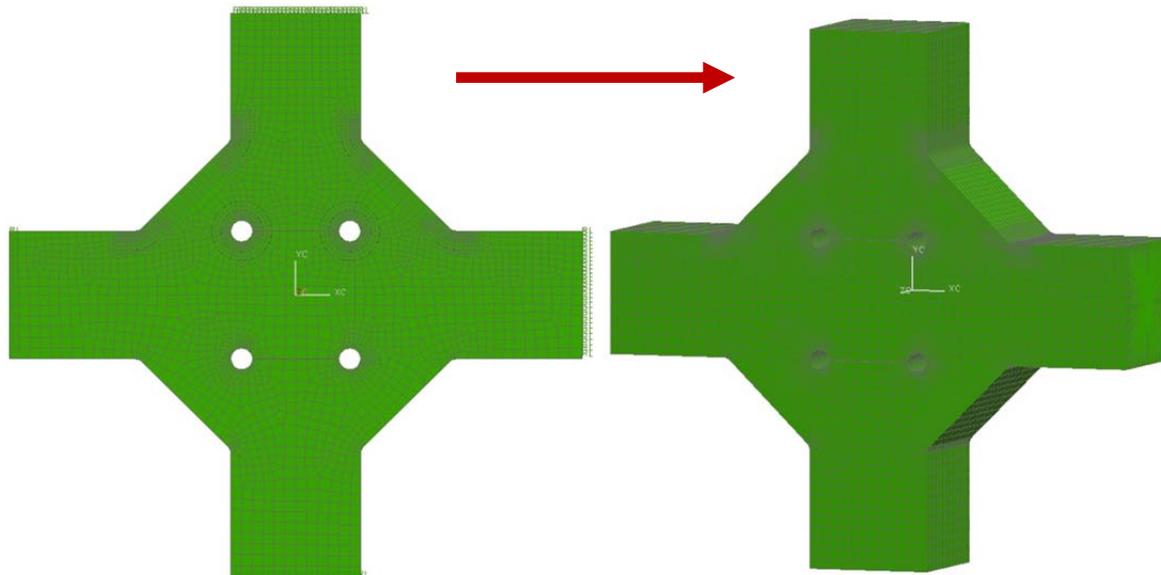


Abbildung 67: Transformation von 2D Radaj-Modell in 3D-Modell

7.3 Testen der Funktion hinsichtlich der Ergebnisqualität

Der nächste Schritt war nun die Funktion „Inertia Relief“ im UGS NX Nastran hinsichtlich ihrer Ergebnisqualität zu testen und zu verifizieren, um sie für die weiteren Berechnungen als gültig bzw. anwendbar anzusehen.

Hierzu wurden in vier Lastfällen drei verschiedene Berechnungsmethoden miteinander verglichen:

- Bei der ersten Methode handelt es sich um eine konventionelle linear statische Simulation mit einer fixen Einspannung.
- Bei der zweiten Methode, die ebenfalls linear statisch berechnet wurde, wurde die fixe Einspannung durch Einspannungen an drei Stellen mittels Federn mit sehr geringen Steifigkeiten ersetzt.
- Die dritte Methode war schließlich die zu testende Inertia Relief Methode, bei der die Kräfte einzeln aufgebracht und nacheinander berechnet wurden. Die Ergebnisse der einzelnen Berechnungen wurden dann kombiniert um die gleiche Situation wie bei den ersten beiden Methoden zu schaffen.

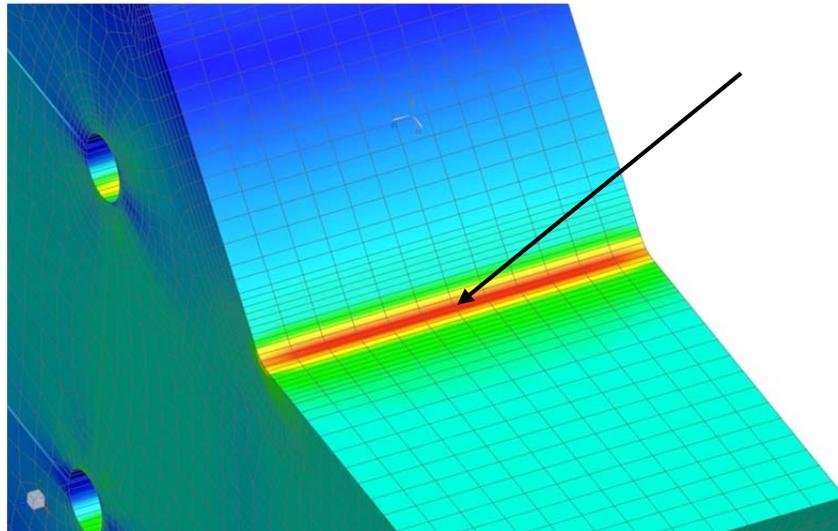


Abbildung 68: Schweißstoß, Kerbe - Knoten

Bei den vier Lastfällen wurde jeweils ein Knoten in der Kerbe zum Vergleich herangezogen. Die linear statische Berechnung diente jeweils als Referenz für die beiden anderen Methoden.

7.3.1 Lastfall 1

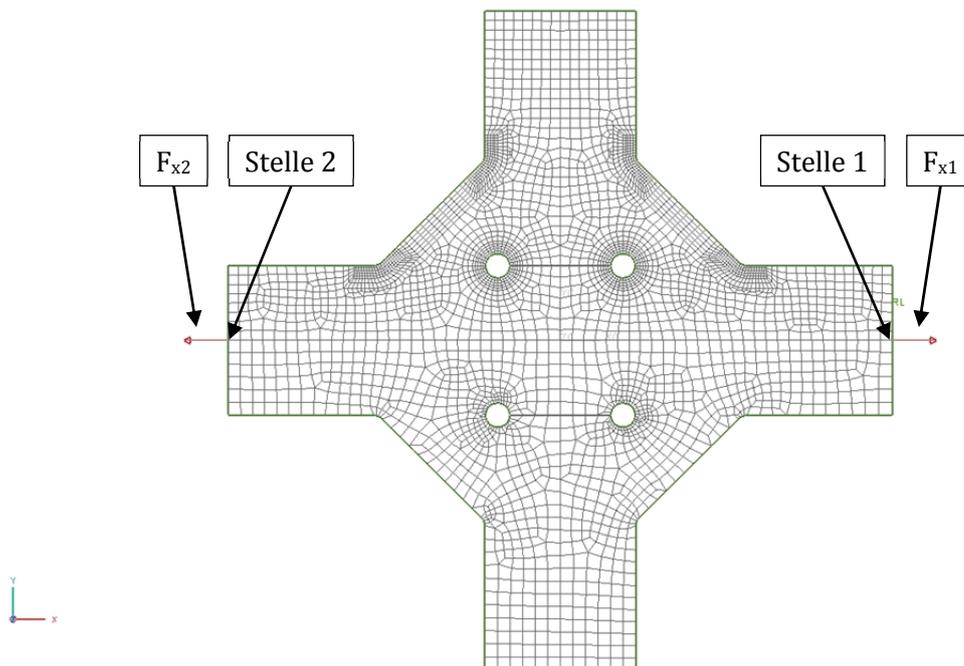


Abbildung 69: Inertia Relief Test, Lastfall 1

Im ersten Lastfall wird eine Kraft F_{x1} von 14400 N an der Stelle 1 normal auf die Fläche (in positiver x-Richtung) aufgebracht.

Für die Linear Statische Berechnung wird das Modell an der Stelle 2 fix eingespannt.

Für die Linear Statische Berechnung mit Federn und die Inertia Relief Berechnung ergibt sich an der Stelle 2 eine Reaktionskraft F_{x2} von -14400 N normal auf die Fläche (in negativer x-Richtung).

Ergebnisse:

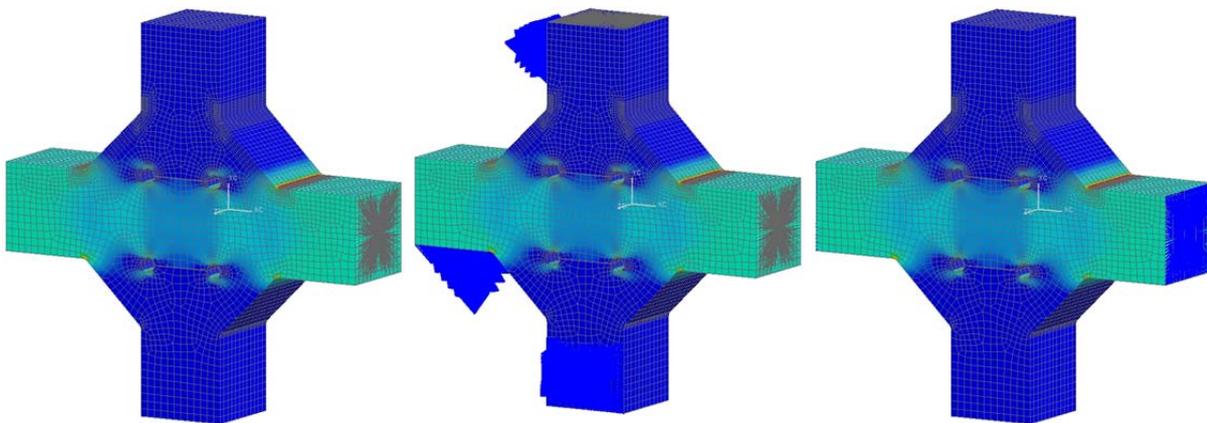


Abbildung 70: LF1, Links: Linear Statisch; Mitte: Linear Statisch mit Federn; Rechts: Inertia Relief

Ergebnisse Last-Fall 1

Spannungen [N/mm²]

	XX	YY	ZZ	XY	YZ	ZX	Von-Mises
Linear Statisch	235,917	46,207	51,303	-94,479	-0,026	0,063	248,667
Linear Statisch mit Federn	235,917	46,207	51,303	-94,479	-0,026	0,063	248,667
Inertia Relief	235,917	46,207	51,303	-94,479	-0,026	0,063	248,667

Abweichungen [%]

Linear Statisch / Linear Statisch mit Federn	0,00004%	0,00012%	0,00008%	0,00009%	0,00313%	0,05075%	0,00008%
Linear Statisch / Inertia Relief	0,00007%	0,00020%	0,00015%	0,00002%	0,01635%	0,05055%	0,00004%

Tabelle 16: Ergebnisse Inertia Relief Test Lastfall 1

Die Ergebnisse des ersten Lastfalls zeigen, dass die Spannungen an dem betrachteten Knotenpunkt in der Kerbe bei allen drei Berechnungsmethoden beinahe gleich sind und nur sehr geringe Abweichungen aufweisen.

Alle drei Simulationsverfahren können bei diesem Lastfall somit als ident angesehen werden.

7.3.2 Lastfall 2

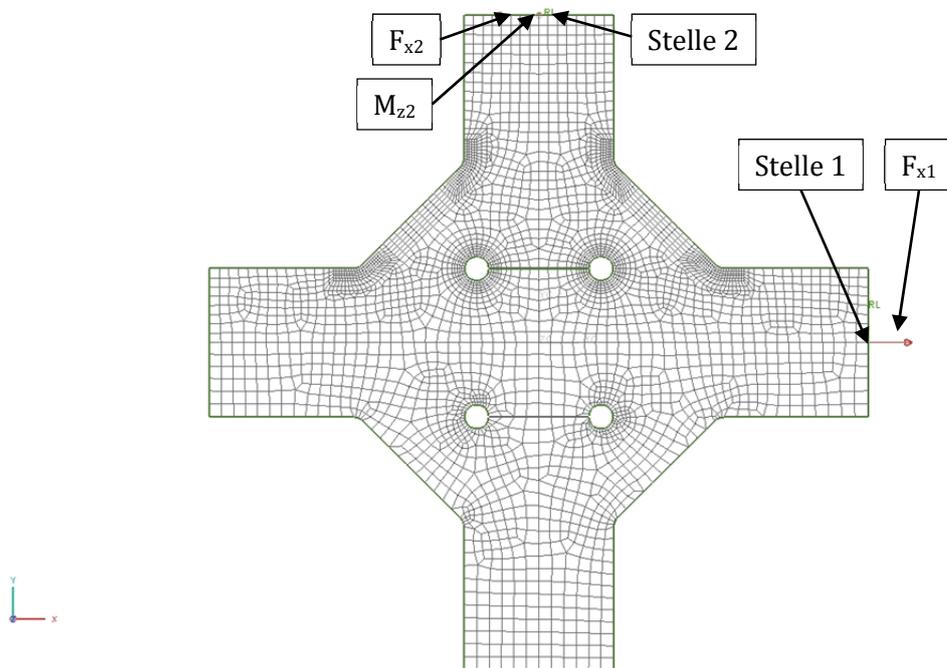


Abbildung 71: Inertia Relief Test, Lastfall 2

Im zweiten Lastfall wird eine Kraft F_{x1} von 14400 N an der Stelle 1 normal auf die Fläche (in positiver x-Richtung) aufgebracht.

Für die Linear Statische Berechnung wird das Modell an der Stelle 2 fix eingespannt.

Für die Linear Statische Berechnung mit Federn und die Inertia Relief Berechnung ergeben sich an der Stelle 2 eine Reaktionskraft F_{x2} von -14400 N quer zur Fläche (in negativer x-Richtung) und ein Reaktionsmoment M_{z2} von -381388,32 Nmm um die z-Achse.

Ergebnisse:

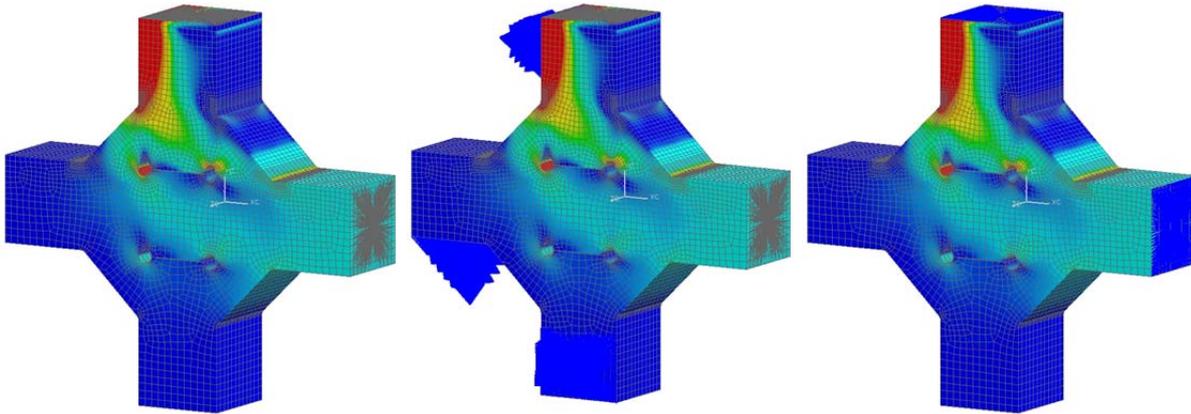


Abbildung 72: LF2, Links: Linear Statisch; Mitte: Linear Statisch mit Federn; Rechts: Inertia Relief

Ergebnisse Last-Fall 2

Spannungen [N/mm²]

	XX	YY	ZZ	XY	YZ	ZX	Von-Mises
Linear Statisch	333,918	65,849	82,107	-134,243	-0,023	0,055	349,062
Linear Statisch mit Federn	333,918	65,849	82,107	-134,242	-0,023	0,055	349,061
Inertia Relief	333,918	65,849	82,107	-134,243	-0,023	0,055	349,062

Abweichungen [%]

Linear Statisch / Linear Statisch mit Federn	0,00007%	0,00020%	0,00077%	0,00020%	0,10778%	0,35591%	0,00021%
Linear Statisch / Inertia Relief	0,00017%	0,00016%	0,00006%	0,00016%	0,02482%	0,02474%	0,00019%

Tabelle 17: Ergebnisse Inertia Relief Test Lastfall 2

Die Ergebnisse des zweiten Lastfalls zeigen, dass die Spannungen an dem betrachteten Knotenpunkt in der Kerbe bei allen drei Berechnungsmethoden ebenfalls beinahe gleich sind und nur sehr geringe Abweichungen aufweisen.

Alle drei Simulationsverfahren können auch bei diesem Lastfall als ident angesehen werden.

7.3.3 Lastfall 3

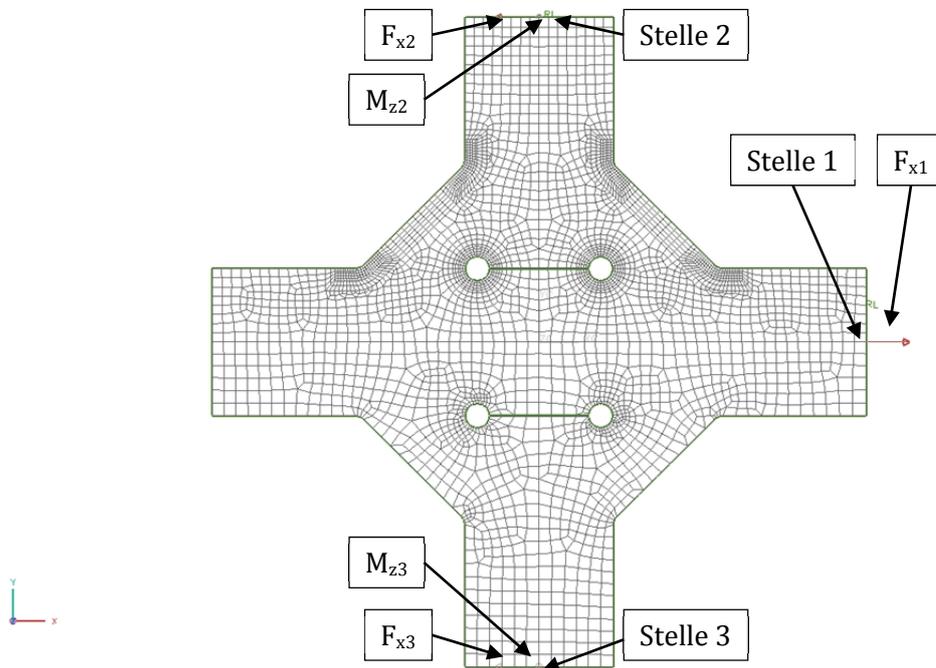


Abbildung 73: Inertia Relief Test, Lastfall 3

Im dritten Lastfall wird an der Stelle 1 eine Kraft F_{x1} von 14400 N normal auf die Fläche (in positiver x-Richtung), sowie an der Stelle 2 eine Kraft F_{x2} von -7200 N quer zur Fläche (in negativer x-Richtung) und ein Moment M_{z2} von -190694,16 Nmm um die z-Achse aufgebracht.

Für die Linear Statische Berechnung wird das Modell an der Stelle 3 fix eingespannt.

Für die Linear Statische Berechnung mit Federn und die Inertia Relief Berechnung ergeben sich an der Stelle 3 eine Reaktionskraft F_{x3} von -7200 N quer zur Fläche (in negativer x-Richtung) und ein Reaktionsmoment M_{z3} von 190694,16 Nmm um die z-Achse.

Ergebnisse:

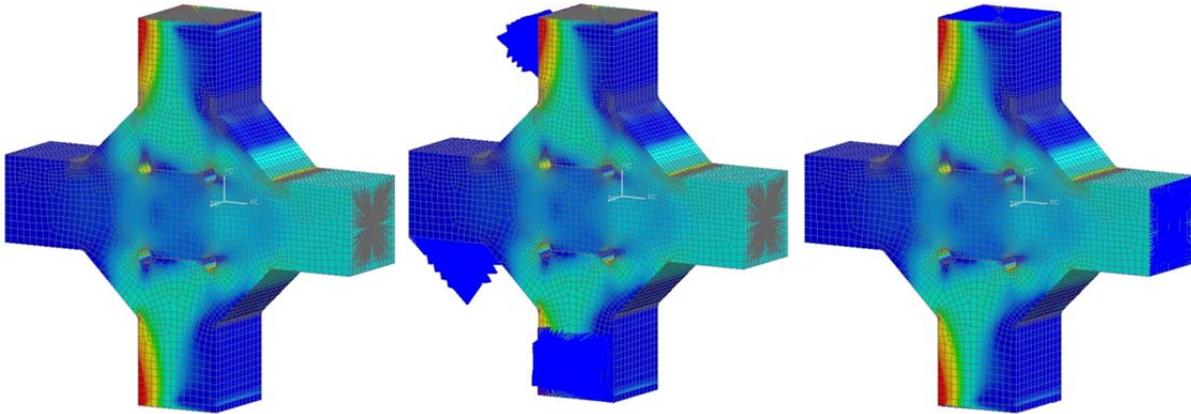


Abbildung 74: LF3, Links: Linear Statisch; Mitte: Linear Statisch mit Federn; Rechts: Inertia Relief

Ergebnisse Last-Fall 3

Spannungen [N/mm²]

	XX	YY	ZZ	XY	YZ	ZX	Von-Mises
Linear Statisch	305,941	60,221	72,074	-122,821	-0,014	0,033	320,738
Linear Statisch mit Federn	305,941	60,221	72,074	-122,821	-0,014	0,033	320,738
Inertia Relief	305,941	60,221	72,075	-122,821	-0,014	0,033	320,738

Abweichungen [%]

Linear Statisch / Linear Statisch mit Federn	0,00004%	0,00035%	0,00015%	0,00003%	0,10701%	0,10286%	0,00002%
Linear Statisch / Inertia Relief	0,00004%	0,00006%	0,00020%	0,00010%	0,12580%	0,06372%	0,00007%

Tabelle 18: Ergebnisse Inertia Relief Test Lastfall 3

Die Ergebnisse des dritten Lastfalls zeigen, dass die Spannungen an dem betrachteten Knotenpunkt in der Kerbe bei allen drei Berechnungsmethoden ebenfalls beinahe gleich sind und nur sehr geringe Abweichungen aufweisen.

Alle drei Simulationsverfahren können auch bei diesem Lastfall als ident angesehen werden.

7.3.4 Lastfall 4

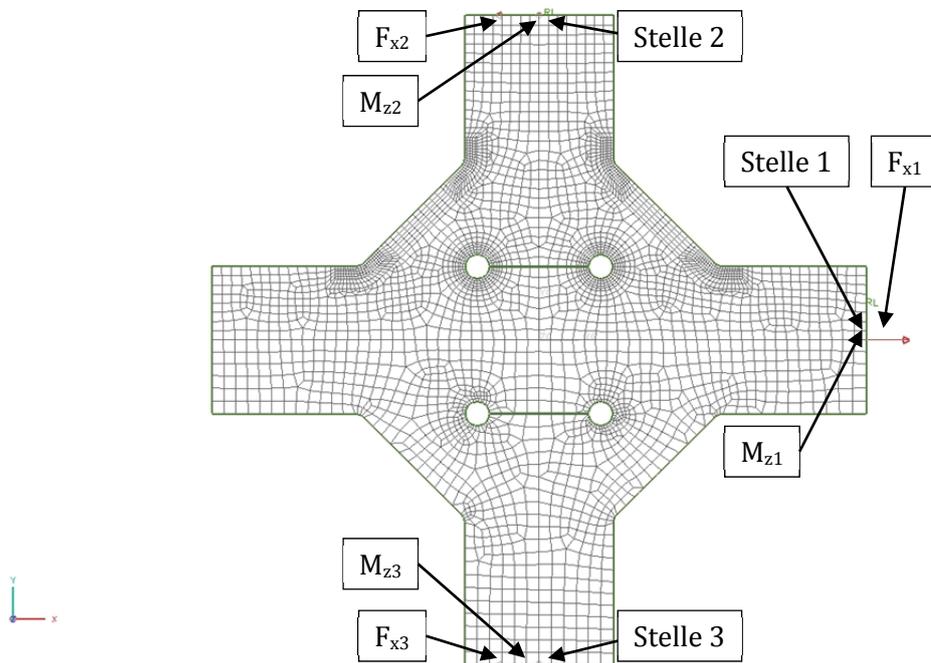


Abbildung 75: Inertia Relief Test, Lastfall 4

Im vierten Lastfall wird an der Stelle 1 eine Kraft F_{x1} von 14400 N normal auf die Fläche (in positiver x-Richtung) und ein Moment M_{z1} von -150000 Nmm um die z-Achse, sowie an der Stelle 2 eine Kraft F_{x2} von -10000 N quer zur Fläche (in negativer x-Richtung) und ein Moment M_{z2} von -350000 Nmm um die z-Achse aufgebracht.

Für die Linear Statische Berechnung wird das Modell an der Stelle 3 fix eingespannt.

Für die Linear Statische Berechnung mit Federn und die Inertia Relief Berechnung ergeben sich an der Stelle 3 eine Reaktionskraft F_{x3} von -4400 N quer zur Fläche (in negativer x-Richtung) und ein Reaktionsmoment M_{z3} von 351682,32 Nmm um die z-Achse.

Ergebnisse:

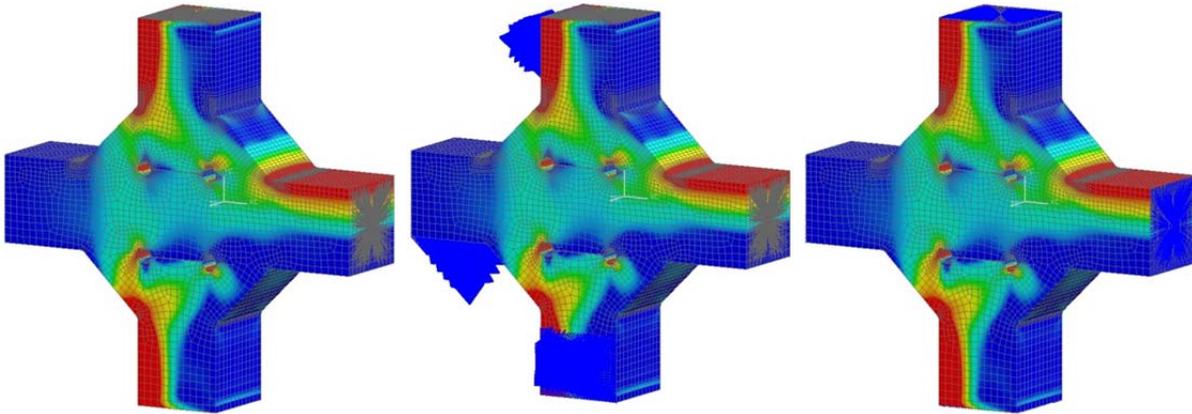


Abbildung 76: LF4, Links: Linear Statisch; Mitte: Linear Statisch mit Federn; Rechts: Inertia Relief

Ergebnisse Last-Fall 4

Spannungen [N/mm²]

	XX	YY	ZZ	XY	YZ	ZX	Von-Mises
Linear Statisch	128,766	25,207	29,846	-51,541	0,002	-0,005	135,044
Linear Statisch mit Federn	128,766	25,207	29,846	-51,541	0,002	-0,005	135,044
Inertia Relief	128,766	25,207	29,846	-51,541	0,002	-0,005	135,044

Abweichungen [%]

Linear Statisch / Linear Statisch mit Federn	0,00011%	0,00054%	0,00016%	0,00022%	0,91489%	0,26986%	0,00023%
Linear Statisch / Inertia Relief	0,00010%	0,00026%	0,00001%	0,00020%	0,29003%	0,58589%	0,00018%

Tabelle 19: Ergebnisse Inertia Relief Test Lastfall 4

Die Ergebnisse des vierten Lastfalls zeigen, dass die Spannungen an dem betrachteten Knotenpunkt in der Kerbe bei allen drei Berechnungsmethoden ebenfalls beinahe gleich sind und nur sehr geringe Abweichungen aufweisen.

Alle drei Simulationsverfahren können auch bei diesem Lastfall als ident angesehen werden.

7.3.5 Ergebnis

Die Funktion Inertia Relief wurde in vier verschiedenen Lastfällen im Programm UGS NX Nastran hinsichtlich der Ergebnisqualität getestet. Die Abweichungen der Von-Mises Vergleichsspannung der Inertia Relief Simulation von der linear statischen Simulation bewegen sich in dem betrachteten Knotenpunkt in allen vier Lastfällen jeweils im Bereich von maximal 0,00023% und können somit als ident angesehen werden.

Die Funktion Inertia Relief gilt somit als verifiziert und kann für weitere Berechnungen eingesetzt werden.

7.4 Auswirkung der Elementgröße auf die Berechnung

Der nächste Schritt war herauszufinden, wie sich die Elementgröße eines 2D-Schalenmodells auf die Inertia Relief Berechnung auswirkt. Der Gedanke hinter dieser Aufgabenstellung war, wie grob man das Netz für eine Inertia Relief Berechnung modellieren kann bzw. wie fein man es modellieren muss um noch brauchbare Ergebnisse zu erhalten. Da die Feinheit des Netzes bzw. die Elementanzahl direkt mit der Berechnungszeit in Verbindung steht werden die Erkenntnisse der folgenden Berechnung sehr wichtig sein für weitere Berechnungen.

Der Test erfolgt durch die Inertia Relief Berechnung eines einfachen Kreuzstoßes. Der Kreuzstoß wird mit einer Kraft F_{x1} von 14400 N an der Stelle 1 in x-Richtung belastet:

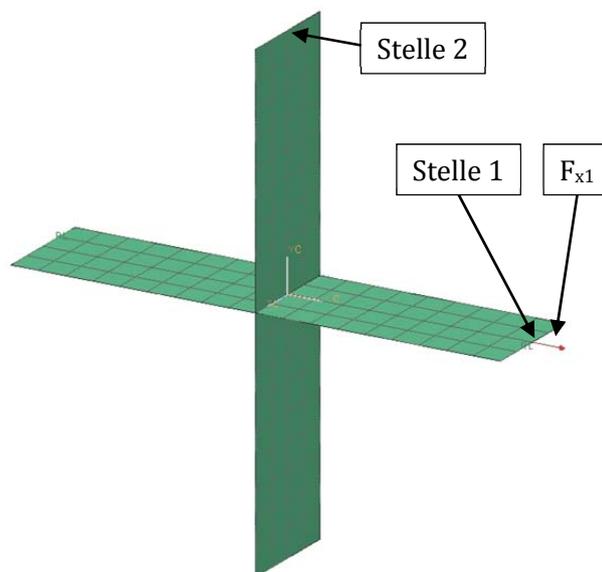


Abbildung 77: X-Stoß Elementgrößen Test

Anschließend wurde die globale Elementgröße (im Bild: Elementgröße 3 mm) der 2D-Schalenelemente variiert. Insgesamt wurden 8 verschiedene globale Elementgrößen, angefangen mit einer Elementgröße von 30 mm, was 1 Element pro Seite bedeutet bis hin zu 0,6 mm, was die kleinste realisierbare globale Elementgröße eines 2D-Schalenelements im UGS NX darstellt, betrachtet.

Es wurden jeweils die Verschiebungen in x-Richtung in den Punkten 1 und 2 zur Folge der Kraft F_{x1} betrachtet und miteinander verglichen.

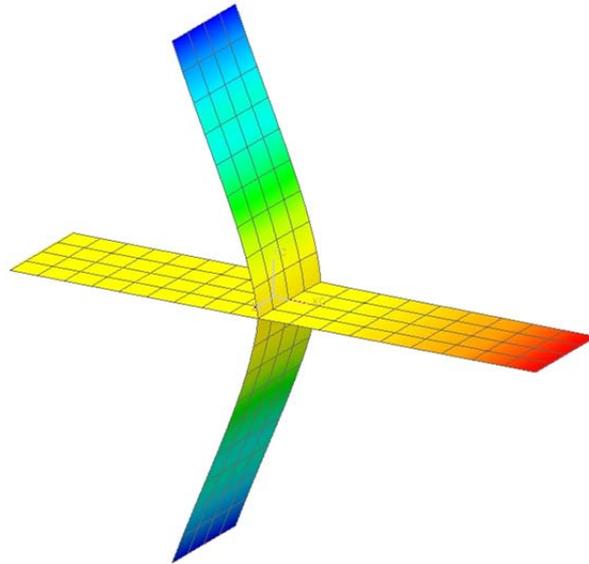


Abbildung 78 : Verschiebung in x-Richtung zur Folge F_{x1} (Deformation 10%)

Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle angegeben:

Verschiebungen in x-Richtung

<u>Elementgröße</u>	<u>Stelle</u>	
	1	2
30	0,016493	-0,023194
15	0,016461	-0,023181
12	0,01645	-0,023157
6	0,016443	-0,023122
4	0,016428	-0,023094
3	0,016422	-0,023039
1,6	0,016421	-0,023027
0,6	0,01642	-0,023024

Tabelle 20: Auswirkung der Elementgröße auf die Verschiebungen in x-Richtung

Die Ergebnisse der Verschiebungen in x-Richtung an den Stellen 1 und 2 werden in den beiden folgenden Diagrammen dargestellt:

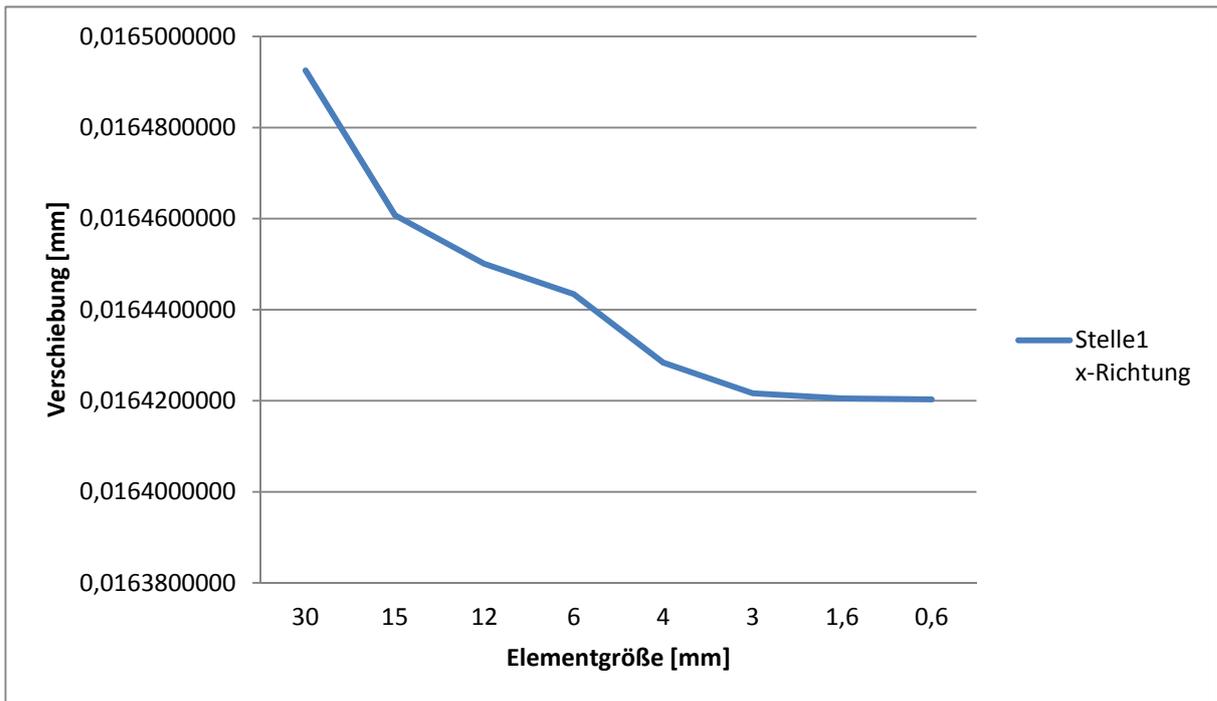


Abbildung 79: Auswirkung der Elementgröße auf die Verschiebung in x- Richtung, Stelle 1

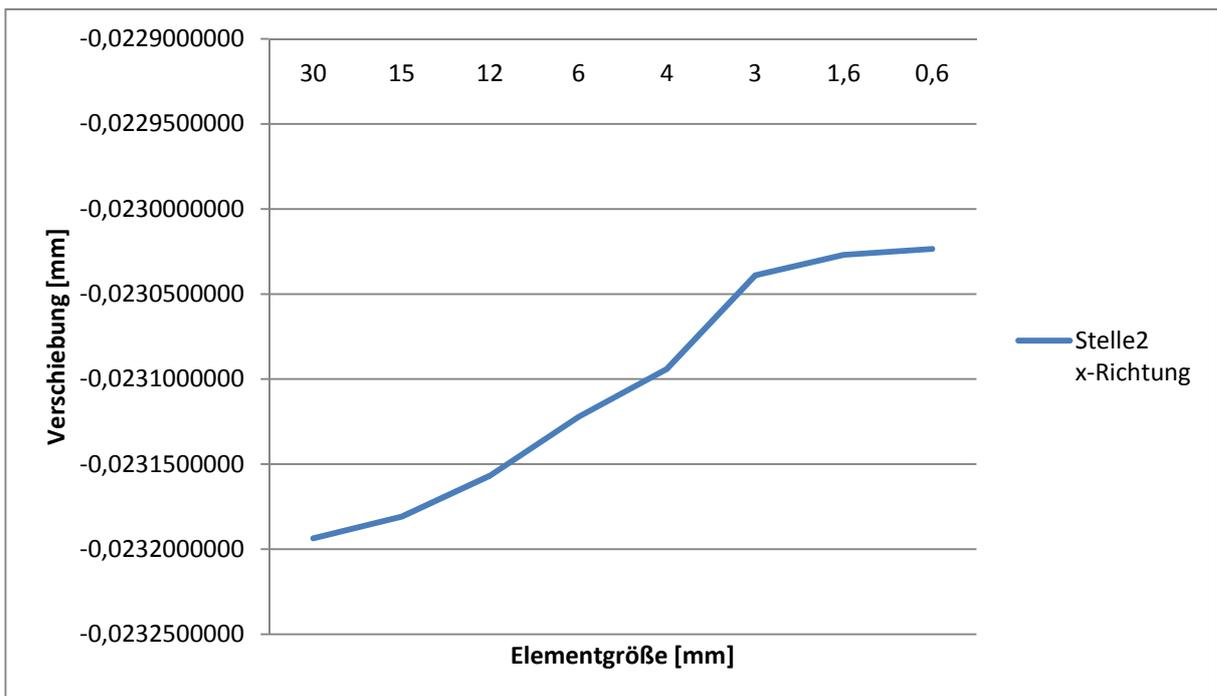


Abbildung 80: Auswirkung der Elementgröße auf die Verschiebung in x- Richtung, Stelle 2

Aus den beiden Diagrammen ist ersichtlich, dass sich die Feinheit des Netzes auch in der Konvergenz der Verschiebungen widerspiegelt.

Betrachtet man nun die Ergebnisse im Detail, so ergibt sich an der Stelle 1 eine Differenz der Verschiebungen der größten Elementgröße (30 mm) hin zur kleinsten (0,6 mm) von 0,000072 mm bzw. 0,44%, und an der Stelle 2 eine Differenz von 0,00017 mm bzw. 0,73%.

Die Differenz von 0,44% bzw. 0,73% ist zwar schon sehr gering, jedoch sollte bei der Inertia Relief Berechnung eine globale Elementgröße von maximal 3 mm verwendet werden, da die Ergebnisse fast ident zu denen der genauesten Berechnung mit einer Elementgröße von 0,6 mm sind.

8 Zusammenfassung

Die Erkenntnisse dieser Diplomarbeit werden nun in diesem Kapitel kurz zusammengefasst.

Aus den Untersuchungen der Schnittgrößenauswahl aus dem globalen 2D-Strukturmodell für die Bewertung der Schweißnahtverbindung nach dem Kerbspannungskonzept anhand von 3D-Schweißnahtsubmodellen ist hervorgegangen, dass die relevanten Schnittgrößen die Grid Point Forces (Knotenkräfte) und Grid Point Moments (Knotenmomente) sind.

Das Aufbringen dieser Knotenkräfte und Knotenmomente auf ein 3D-Schweißnahtsubmodell hat dann das Problem des Übergangs von 2D-Schalenelementen auf 3D-Volumenelemente aufgeworfen. Die Lösung dieses Übergang-Problems, die aus den Erkenntnissen genauer Untersuchungen hervorgegangen ist, ist eine Verbindung der Kanten der zweidimensionalen „Anschlusschalen“ mit den gegenüberliegenden Flächen des 3D-Submodells mittels RBE3-Spider-Elementen. Dabei werden die RBE3-Elemente manuell über die gesamte Seiten- bzw. Stirnfläche des 3D-Submodells verteilt und aufgebracht.

Anhand dieser Erkenntnisse wurden dann die ersten 3D-Schweißnahtsubmodelle erstellt. Dabei musste jedoch die Methode des manuellen Aufbringens der RBE3-Elemente verbessert werden. Da bei den detaillierten Schweißnahtsubmodellen das Netz der Kerben und Wurzeln verfeinert ist, befinden sich dort lokal große Ansammlungen von Knotenpunkten. Wenn nun alle Knoten einer Fläche mittels RBE3-Elementen mit den Knoten der gegenüber liegenden Kante der Anschlusschalen-Elemente verbunden werden, dann würde eine Ungleichverteilung der Kräfte und Momente auf die Fläche stattfinden, da die Spider-Elemente die Kräfte und Momente gleichmäßig auf die RBE3-Elemente aufteilen.

Daher werden die Seiten- und Stirnflächen des 3D-Schweißnahtsubmodells in quadratische Bereiche unterteilt. Diese Bereiche sind geometriebezogen gleich groß. Für jeden einzelnen Bereich wird nun jeweils ein Knotenpunkt gewählt, der anschließend mittels eines RBE3-Elements mit dem gegenüberliegenden Knoten des Anschlusschalenelements verbunden wird. Somit wird die nahezu gleichmäßige Verteilung der Kräfte und Momente auf die Seiten- und Stirnflächen gewährleistet.

Anhand dieser verbesserten neuen Erkenntnisse der RBE3-Element-Verteilung werden nun alle weiteren 3D-Schweißnahtsubmodelle erstellt.

Für die Berechnungen der Einheitslasten an den 3D-Schweißnahtsubmodellen wird die quasistatische Berechnungsmethodik „Inertia Relief“ verwendet. Um die ordnungsgemäße Anwendbarkeit für diese Arbeit zu gewährleisten wurde diese Berechnungsmethodik hinsichtlich ihrer Ergebnisqualität getestet und analysiert. Dabei wurde diese Berechnungsmethodik „Inertia Relief“ erfolgreich in vier unterschiedlichen Lastfällen verifiziert, und kann somit für die weiteren Berechnungen der Einheitslasten an den 3D-Schweißnahtsubmodellen für die Erstellung des 3D-Kerbfalkataloges verwendet werden.

Die, in dieser Diplomarbeit entwickelte Methode der 3D-Schweißnahtsubmodell-Erstellung ist auf das von Siemens Mobility verwendete Programm UGS NX von Siemens PLM Software abgestimmt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Implementierung dieser Methode in einen automatisierten- industriellen Berechnungsablauf nur wenig Programmieraufwand zur Folge haben wird. Die prognostizierten Rechenzeiten werden sich mit den heutigen uns zur Verfügung stehenden Computern ebenfalls in Grenzen halten

9 Ausblick

Anhand der Erkenntnisse dieser Diplomarbeit müssen nun 3D-Schweißnahtsubmodelle von allen weiteren Schweißverbindungen und Schweißnahtarten mit unterschiedlichen Blechstärken entsprechend des 2D-Kataloges erstellt werden.

Der nächste Arbeits-Schritt wird dann sein, dass auf die einzelnen 3D-Schweißnahtsubmodelle Einheitslasten nach allen 6 Freiheitsgraden aufgebracht und simuliert werden. Anhand der Spannungsergebnisse dieser Simulationen wird dann ein 3D-Kerbfallkatalog für die jeweiligen Schweißverbindungen und Schweißnahtarten erstellt.

Die Einführung dieser Methode in einen automatisierten- industriellen Berechnungsablauf sollte schrittweise über 2D-Modelle erfolgen, dabei sollte jedoch dieselbe Technologie wie bei den 3D-Modellen verwendet werden.

Die vollständige Festigkeitsauslegung von bestimmten Strukturen nach dem Kerbspannungskonzept auf Basis von dreidimensionalen Schweißnahtsubmodellen sollte dann in Zukunft wie folgt aussehen:

- 1.) Berechnen der Knotenkräfte und Knotenmomente im globalen Strukturmodell
- 2.) Auslesen der Knotenkräfte und Knotenmomente an den relevanten Stellen. Wenn die relevanten Knotenpunkte innerhalb eines Schalen-Elementes liegen müssen Interpolationen durchgeführt werden.
- 3.) Überlagerung dieser Kräfte und Momente mit den Ergebnissen der Berechnungen der Einheitslasten des 3D-Kerbfallkataloges am Schweißnahtsubmodell.
- 4.) Vergleich der sich daraus ergebenden Werte mit den Werten der Wöhlerlinie der FAT225-Klasse nach den Empfehlungen des International Institute of Welding (IIW).
- 5.) Ermittlung der relevanten Teilschädigung für die betrachtete Stelle.

Dabei ist es notwendig, dass dieser Gesamtablauf zur Ermittlung der relevanten Teilschädigung nahezu vollständig automatisiert abläuft.

Dadurch ergeben sich auch wichtige Fragestellungen, die noch genauer betrachtet werden müssen:

- 1.) Wie werden Stellen im globalen Strukturmodell bewertet, an denen das 3D-Schweißnahtsubmodell zu groß ist, d.h. an dem der Abstand des Bleches vom Stoßmittelpunkt zum Rand hin geringer ist als die Breite des Submodells?
- 2.) Wie sehen die 3D-Submodelle an den Schweißstoß-Endpunkten aus?
- 3.) Wie sieht die Bewertung an schrägen Blechen aus?
- 4.) Wie sieht die Bewertung bei unterschiedlicher Blechstärke aus?
- 5.) Wie sehen die Bewertung bzw. die Modelle an komplizierten Stellen mit mehreren unterschiedlichen Blechen aus?
- 6.) Wie werden die Spannungen in den Kerben und Wurzeln des 3D-Schweißnahtsubmodells ausgelesen und bewertet? Welche Knoten bzw. welche Spannungen sollen dabei betrachtet werden? Soll dabei zum Beispiel der Mittelwert der Spannungen der einzelnen Knoten in der Kerbe (oder Wurzel) gebildet werden, oder müssen die Maximalwerte der jeweiligen Spannungen zusammengesetzt werden?
- 7.) Welche Schädigungssumme wird dabei zugelassen?

Diese erwähnten Aufgaben- und Fragestellungen werden sicher ein wichtiger Teil für die nächsten Arbeitsschritte zu diesem Thema sein.

10 Anhang

In diesem Kapitel werden einerseits die detaillierten Ergebnisse der Berechnungen des T-Trägers bzw. die detaillierten Ergebnisse des Vergleiches zwischen den vier Detail-Modellen angegeben.

In weiterer Folge werden auch kurz die behandelten Methoden der Schnittgrößen-Ermittlung aus einem globalen Strukturmodell gezeigt, die in diesem Fall zu keinem brauchbaren Ergebnis führten und deshalb nicht zur Anwendung kamen.

10.1 Detaillierte Ergebnisse

10.1.1 Vergleich 2D-Shell Modell und 3D-Solid Modell (Kapitel 5.4.2)

Hier werden die detaillierten Ergebnisse des Kapitels 5.4.2 aufgelistet.

Die folgenden Tabellen und Diagramme zeigen die, bei dem Vergleich zwischen einem 2D-Shell Modell und einem 3D-Solid Modell des T-Trägers ermittelten Spannungsergebnisse in den vier Bereichen (XP,XN,YP,YN).

Es werden jeweils nur die drei Spannungen, die in dem jeweiligen Bereich und für den behandelten Lastfall relevant sind angegeben.

10.1.1.1 Lastfall 1

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen des 2D-Shell und 3D-Solid Vergleichs des ersten Lastfalls im Bereich 1 (XP) lauten wie folgt:

XP1				XP2				XP3				XP4			
<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>			
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-98,949	-26,930	94,052	-74,616	-22,189	65,276	-73,574	-21,005	66,679	-72,057	-20,955	64,197	-72,057	-20,955	64,197
Shell	-74,594	-21,658	66,468	-74,009	-21,469	65,951	-73,424	-21,280	65,435	-72,839	-21,090	64,918	-72,839	-21,090	64,918
<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>			
	-24,61%	-19,58%	-29,33%	-0,81%	-3,25%	1,03%	-0,20%	1,31%	-1,87%	1,09%	0,65%	1,12%	1,09%	0,65%	1,12%

XP5				XP6				XP7				XP8			
<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>			
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-71,139	-20,622	63,510	-70,558	-20,466	62,903	-70,098	-20,314	62,490	-69,687	-20,178	62,115	-69,687	-20,178	62,115
Shell	-72,255	-20,901	64,403	-71,672	-20,712	63,888	-71,089	-20,522	63,373	-70,507	-20,333	62,859	-70,507	-20,333	62,859
<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>			
	1,57%	1,36%	1,41%	1,58%	1,20%	1,57%	1,41%	1,03%	1,41%	1,18%	0,76%	1,20%	1,18%	0,76%	1,20%

XP9				XP10				XP11				XP12			
<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>			
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-69,280	-20,041	61,753	-68,857	-19,898	61,378	-68,410	-19,747	60,984	-67,937	-19,588	60,568	-67,937	-19,588	60,568
Shell	-69,925	-20,143	62,347	-69,345	-19,953	61,834	-68,765	-19,763	61,323	-68,187	-19,573	60,813	-68,187	-19,573	60,813
<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>			
	0,93%	0,51%	0,96%	0,71%	0,28%	0,74%	0,52%	0,08%	0,56%	0,37%	-0,08%	0,41%	0,37%	-0,08%	0,41%

XP13				XP14				XP15				XP16			
<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>			
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-67,442	-19,422	60,131	-66,927	-19,250	59,678	-66,397	-19,074	59,212	-65,855	-18,893	58,735	-65,855	-18,893	58,735
Shell	-67,609	-19,382	60,304	-67,033	-19,192	59,796	-66,458	-19,001	59,290	-65,884	-18,810	58,784	-65,884	-18,810	58,784
<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>			
	0,25%	-0,20%	0,29%	0,16%	-0,30%	0,20%	0,09%	-0,38%	0,13%	0,04%	-0,44%	0,08%	0,04%	-0,44%	0,08%

XP17			
<u>Spannungen [N/mm²]</u>			
	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-65,304	-18,710	58,250
Shell	-65,311	-18,619	58,280
<u>Abweichungen [%]</u>			
	0,01%	-0,48%	0,05%

Tabelle 21: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 1 (XP)

Das folgende Diagramm zeigt den Vergleich der Von-Mises Spannungen zwischen Shell und Solid in dem Bereich 1 (XP):

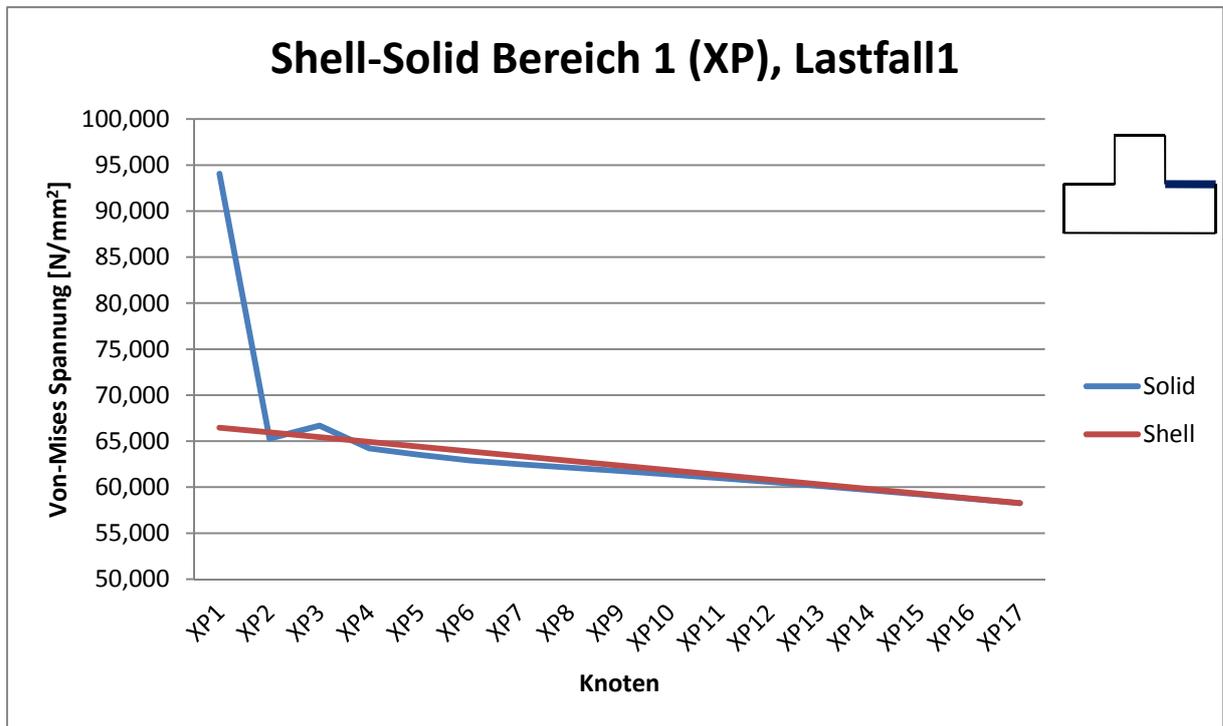


Abbildung 81: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 1 (XP), Lastfall 1

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen des 2D-Shell und 3D-Solid Vergleichs des ersten Lastfalls im Bereich 2 (XN) lauten wie folgt:

		XN1			XN2			XN3			XN4		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		XX	ZZ	Von-Mises									
Solid		-68,748	-19,829	62,181	-54,810	-16,324	48,347	-52,733	-15,427	47,349	-51,006	-15,086	45,410
Shell		-50,462	-14,920	44,903	-50,085	-14,822	44,564	-49,707	-14,723	44,226	-49,330	-14,625	43,887
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		-26,60%	-24,76%	-27,79%	-8,62%	-9,20%	-7,82%	-5,74%	-4,56%	-6,60%	-3,29%	-3,06%	-3,35%

		XN5			XN6			XN7			XN8		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		XX	ZZ	Von-Mises									
Solid		-49,846	-14,750	44,411	-49,011	-14,534	43,626	-48,362	-14,361	43,038	-47,830	-14,221	42,554
Shell		-48,952	-14,526	43,548	-48,575	-14,427	43,210	-48,199	-14,328	42,872	-47,822	-14,229	42,534
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		-1,79%	-1,52%	-1,94%	-0,89%	-0,74%	-0,95%	-0,34%	-0,23%	-0,39%	-0,02%	0,06%	-0,05%

		XN9			XN10			XN11			XN12		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		XX	ZZ	Von-Mises									
Solid		-47,371	-14,100	42,138	-46,956	-13,992	41,763	-46,568	-13,890	41,413	-46,195	-13,792	41,077
Shell		-47,446	-14,130	42,197	-47,071	-14,031	41,860	-46,696	-13,932	41,524	-46,322	-13,832	41,188
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		0,16%	0,21%	0,14%	0,24%	0,28%	0,23%	0,28%	0,30%	0,27%	0,28%	0,29%	0,27%

		XN13			XN14			XN15			XN16		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		XX	ZZ	Von-Mises									
Solid		-45,830	-13,696	40,749	-45,468	-13,600	40,424	-45,109	-13,504	40,101	-44,749	-13,408	39,779
Shell		-45,949	-13,733	40,854	-45,576	-13,633	40,520	-45,204	-13,533	40,186	-44,833	-13,433	39,854
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		0,26%	0,27%	0,26%	0,24%	0,24%	0,24%	0,21%	0,21%	0,21%	0,19%	0,19%	0,19%

		XN17		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		XX	ZZ	Von-Mises
Solid		-44,389	-13,312	39,456
Shell		-44,463	-13,333	39,522
		<u>Abweichungen [%]</u>		
		0,17%	0,16%	0,17%

Tabelle 22: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 2 (XN)

Das folgende Diagramm zeigt den Vergleich der Von-Mises Spannungen zwischen Shell und Solid in dem Bereich 2 (XN):

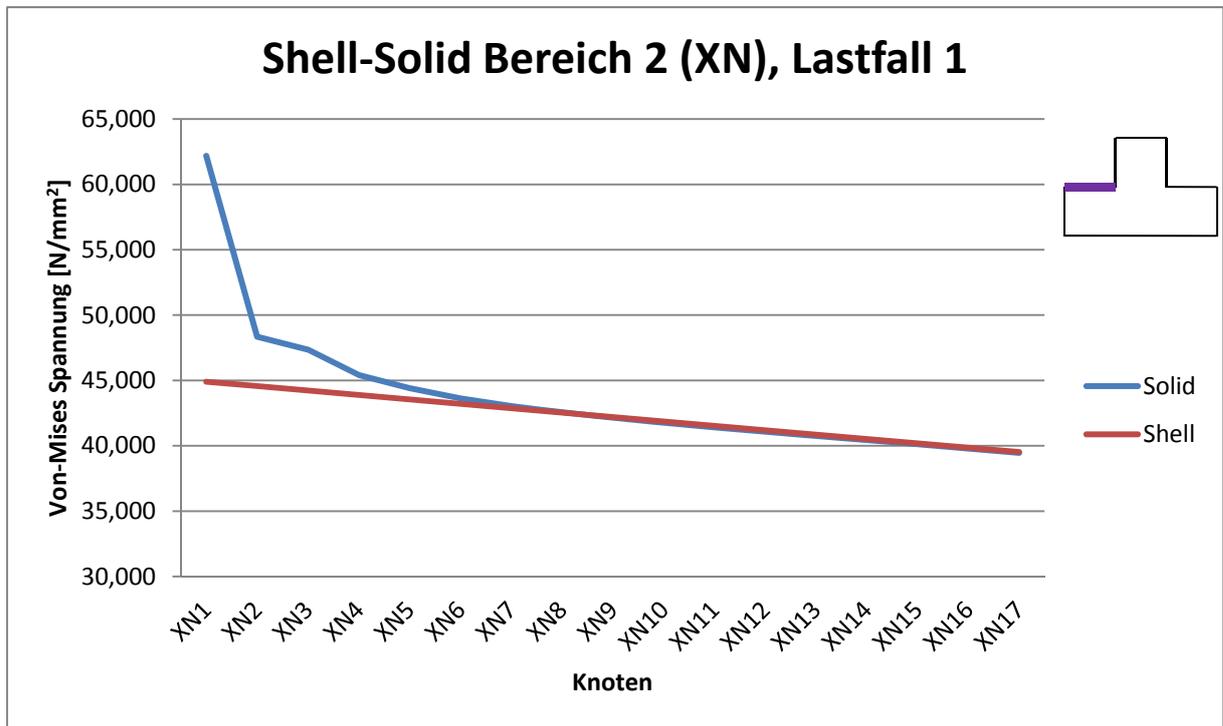


Abbildung 82: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 2 (XN), Lastfall 1

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen des 2D-Shell und 3D-Solid Vergleichs des ersten Lastfalls im Bereich 3 (YP) lauten wie folgt:

		YP1			YP2			YP3			YP4		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	ZZ	Von-Mises									
Solid		-34,350	-7,507	41,706	-15,614	-5,246	12,979	-16,672	-4,605	16,147	-16,794	-5,074	14,939
Shell		-24,247	-7,406	21,530	-23,875	-7,254	21,209	-23,503	-7,102	20,887	-23,131	-6,950	20,565
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		-29,41%	-1,35%	-48,38%	52,91%	38,27%	63,41%	40,98%	54,22%	29,35%	37,73%	36,98%	37,66%

		YP5			YP6			YP7			YP8		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	ZZ	Von-Mises									
Solid		-17,267	-5,124	15,495	-17,921	-5,311	15,972	-18,525	-5,446	16,507	-19,014	-5,549	16,936
Shell		-22,758	-6,798	20,243	-22,386	-6,646	19,922	-22,014	-6,494	19,601	-21,642	-6,341	19,280
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		31,80%	32,68%	30,65%	24,92%	25,13%	24,73%	18,84%	19,23%	18,74%	13,83%	14,27%	13,84%

		YP9			YP10			YP11			YP12		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	ZZ	Von-Mises									
Solid		-19,352	-5,603	17,244	-19,539	-5,612	17,420	-19,592	-5,581	17,479	-19,531	-5,516	17,438
Shell		-21,271	-6,188	18,959	-20,900	-6,035	18,639	-20,529	-5,882	18,320	-20,159	-5,729	18,001
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		9,92%	10,45%	9,95%	6,96%	7,54%	7,00%	4,79%	5,40%	4,81%	3,21%	3,85%	3,23%

		YP13			YP14			YP15			YP16		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	ZZ	Von-Mises									
Solid		-19,381	-5,425	17,318	-19,162	-5,313	17,137	-18,894	-5,187	16,911	-18,589	-5,051	16,654
Shell		-19,789	-5,575	17,683	-19,420	-5,421	17,365	-19,051	-5,266	17,049	-18,683	-5,111	16,732
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		2,11%	2,76%	2,11%	1,35%	2,01%	1,33%	0,84%	1,52%	0,81%	0,50%	1,20%	0,47%

		YP17		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	ZZ	Von-Mises
Solid		-18,261	-4,907	16,374
Shell		-18,315	-4,956	16,417
		<u>Abweichungen [%]</u>		
		0,30%	1,01%	0,26%

Tabelle 23: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 3 (YP)

Das folgende Diagramm zeigt den Vergleich der Von-Mises Spannungen zwischen Shell und Solid in dem Bereich 3 (YP):

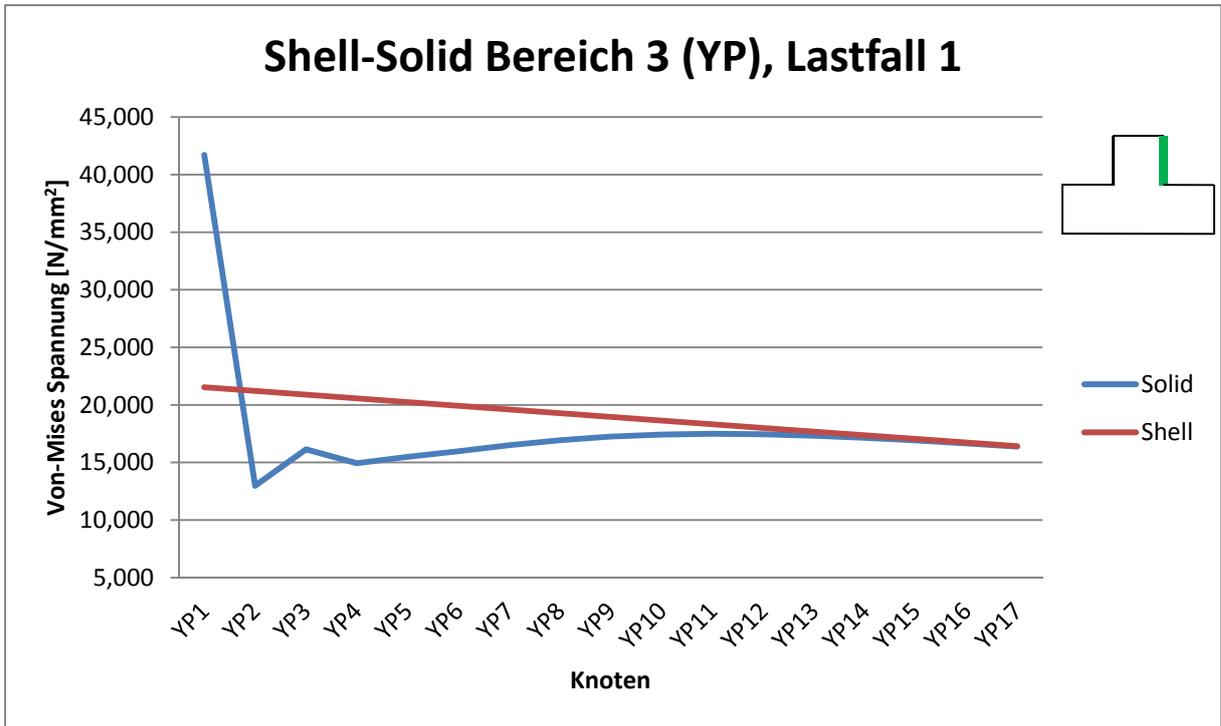


Abbildung 83: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 3 (YP), Lastfall 1

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen des 2D-Shell und 3D-Solid Vergleichs des ersten Lastfalls im Bereich 4 (YN) lauten wie folgt:

		YN1			YN2			YN3			YN4		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	ZZ	Von-Mises									
Solid		20,265	7,136	17,069	26,501	7,320	24,104	25,611	7,526	22,196	24,909	7,169	22,169
Shell		20,459	5,680	18,294	20,096	5,639	17,954	19,732	5,598	17,615	19,368	5,558	17,275
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		0,96%	-20,40%	7,18%	-24,17%	-22,97%	-25,51%	-22,95%	-25,62%	-20,64%	-22,24%	-22,46%	-22,08%

		YN5			YN6			YN7			YN8		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	ZZ	Von-Mises									
Solid		23,890	6,960	21,205	22,686	6,660	20,181	21,476	6,376	19,100	20,339	6,113	18,084
Shell		19,004	5,519	16,935	18,641	5,481	16,595	18,277	5,443	16,256	17,914	5,405	15,916
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		-20,45%	-20,70%	-20,14%	-17,83%	-17,70%	-17,77%	-14,90%	-14,64%	-14,89%	-11,93%	-11,59%	-11,99%

		YN9			YN10			YN11			YN12		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	ZZ	Von-Mises									
Solid		19,321	5,888	17,166	18,433	5,701	16,360	17,668	5,550	15,663	17,009	5,430	15,060
Shell		17,551	5,368	15,578	17,188	5,331	15,240	16,826	5,294	14,903	16,464	5,258	14,566
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		-9,16%	-8,83%	-9,25%	-6,75%	-6,49%	-6,85%	-4,77%	-4,61%	-4,85%	-3,20%	-3,17%	-3,27%

		YN13			YN14			YN15			YN16		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	ZZ	Von-Mises									
Solid		16,437	5,335	14,534	15,932	5,260	14,068	15,477	5,198	13,648	15,057	5,147	13,261
Shell		16,103	5,222	14,231	15,742	5,186	13,896	15,382	5,150	13,562	15,022	5,115	13,230
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		-2,03%	-2,13%	-2,08%	-1,19%	-1,40%	-1,22%	-0,61%	-0,92%	-0,63%	-0,24%	-0,63%	-0,24%

		YN17		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	ZZ	Von-Mises
Solid		14,663	5,103	12,897
Shell		14,663	5,079	12,898
		<u>Abweichungen [%]</u>		
		0,00%	-0,46%	0,01%

Tabelle 24: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 4 (YN)

Das folgende Diagramm zeigt den Vergleich der Von-Mises Spannungen zwischen Shell und Solid in dem Bereich 4 (YN):

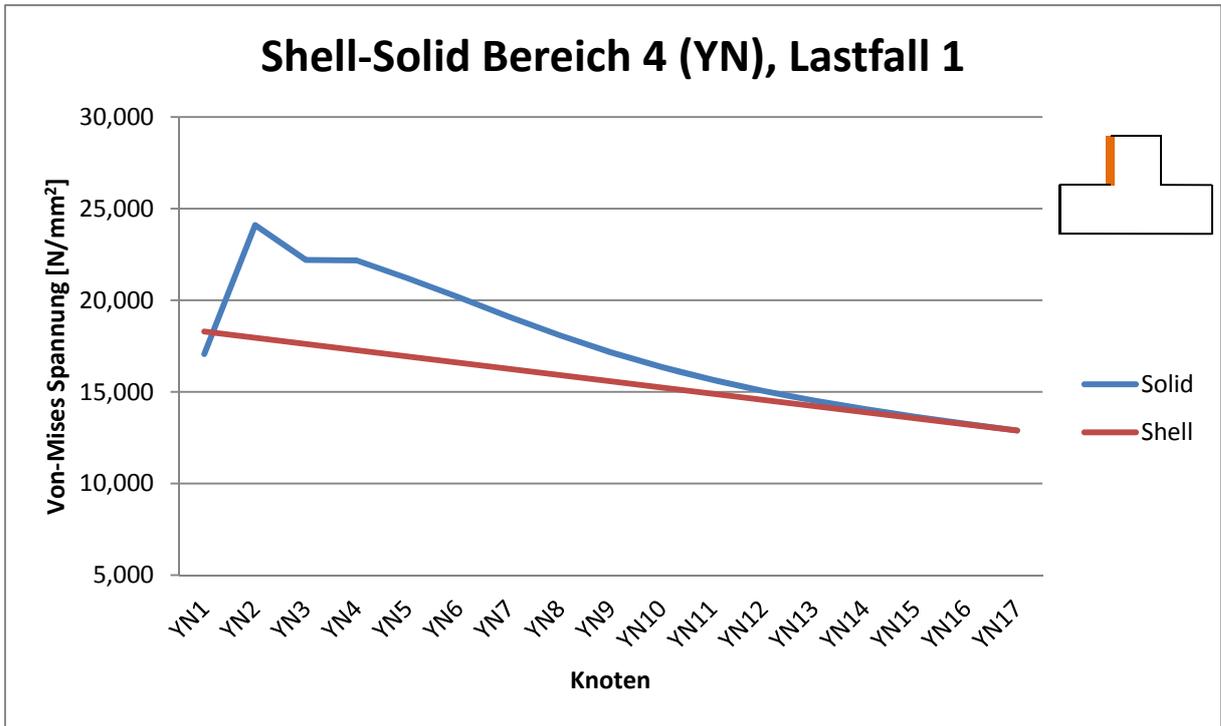


Abbildung 84: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 4 (YN), Lastfall 1

10.1.1.2 Lastfall 2

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen des 2D-Shell und 3D-Solid Vergleichs des zweiten Lastfalls im Bereich 1 (XP) lauten wie folgt:

XP1				XP2				XP3				XP4			
<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>			
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-2,461	-2,963	5,696	-1,922	-2,524	4,679	-1,815	-2,203	4,133	-1,725	-1,989	3,756			
Shell	-1,655	-2,221	4,105	-1,627	-2,107	3,912	-1,599	-1,995	3,724	-1,571	-1,886	3,540			
<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>			
	-32,74%	-25,05%	-27,93%	-15,36%	-16,54%	-16,39%	-11,86%	-9,42%	-9,91%	-8,93%	-5,15%	-5,76%			

XP5				XP6				XP7				XP8			
<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>			
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-1,660	-1,819	3,466	-1,608	-1,676	3,221	-1,564	-1,548	3,005	-1,525	-1,429	2,808			
Shell	-1,543	-1,779	3,360	-1,515	-1,674	3,183	-1,488	-1,571	3,011	-1,460	-1,469	2,842			
<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>			
	-7,00%	-2,20%	-3,06%	-5,73%	-0,11%	-1,17%	-4,86%	1,49%	0,19%	-4,29%	2,79%	1,21%			

XP9				XP10				XP11				XP12			
<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>			
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-1,490	-1,317	2,624	-1,458	-1,210	2,450	-1,427	-1,107	2,285	-1,397	-1,007	2,127			
Shell	-1,432	-1,369	2,676	-1,404	-1,270	2,515	-1,377	-1,173	2,357	-1,350	-1,077	2,202			
<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>			
	-3,91%	3,91%	2,00%	-3,66%	4,93%	2,63%	-3,49%	5,91%	3,14%	-3,38%	6,92%	3,56%			

XP13				XP14				XP15				XP16			
<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>				<u>Spannungen [N/mm²]</u>			
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-1,368	-0,909	1,976	-1,339	-0,814	1,831	-1,311	-0,720	1,694	-1,282	-0,628	1,564			
Shell	-1,322	-0,982	2,053	-1,295	-0,889	1,907	-1,269	-0,796	1,767	-1,242	-0,706	1,633			
<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>				<u>Abweichungen [%]</u>			
	-3,30%	7,99%	3,90%	-3,24%	9,19%	4,16%	-3,19%	10,59%	4,33%	-3,14%	12,31%	4,41%			

XP17			
<u>Spannungen [N/mm²]</u>			
	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-1,255	-0,538	1,442
Shell	-1,216	-0,616	1,504
<u>Abweichungen [%]</u>			
	-3,09%	14,49%	4,35%

Tabelle 25: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 1 (XP)

Das folgende Diagramm zeigt den Vergleich der Von-Mises Spannungen zwischen Shell und Solid in dem Bereich 1 (XP):

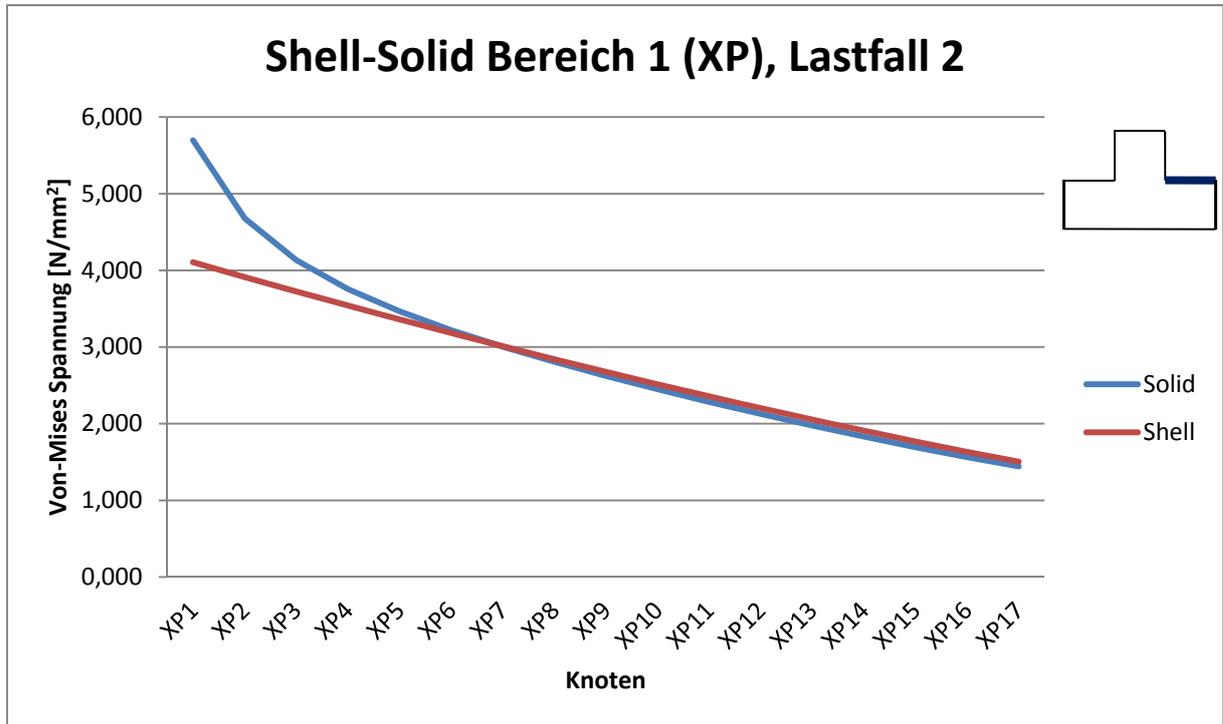


Abbildung 85: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 1 (XP), Lastfall 2

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen des 2D-Shell und 3D-Solid Vergleichs des zweiten Lastfalls im Bereich 2 (XN) lauten wie folgt:

		XN1			XN2			XN3			XN4		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid		-3,879	-9,008	16,377	-2,489	-8,075	14,155	-2,368	-7,491	13,149	-2,190	-7,224	12,657
Shell		-2,831	-6,191	11,006	-2,659	-6,334	11,214	-2,487	-6,473	11,420	-2,314	-6,609	11,625
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		-27,02%	-31,27%	-32,80%	6,83%	-21,56%	-20,78%	5,02%	-13,58%	-13,15%	5,64%	-8,51%	-8,15%

		XN5			XN6			XN7			XN8		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		XX	ZX	Von-Mises									
Solid		-2,031	-7,097	12,420	-1,883	-7,053	12,326	-1,733	-7,057	12,317	-1,582	-7,092	12,361
Shell		-2,140	-6,742	11,826	-1,965	-6,871	12,023	-1,790	-6,995	12,217	-1,613	-7,116	12,406
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		5,34%	-5,01%	-4,79%	4,39%	-2,59%	-2,46%	3,24%	-0,88%	-0,81%	1,99%	0,34%	0,37%

		XN9			XN10			XN11			XN12		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		XX	ZX	Von-Mises									
Solid		-1,426	-7,146	12,439	-1,266	-7,212	12,540	-1,102	-7,286	12,656	-0,935	-7,364	12,781
Shell		-1,436	-7,233	12,590	-1,259	-7,345	12,769	-1,080	-7,453	12,943	-0,901	-7,556	13,111
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		0,71%	1,21%	1,21%	-0,61%	1,84%	1,82%	-2,00%	2,29%	2,26%	-3,60%	2,60%	2,58%

		XN13			XN14			XN15			XN16		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		XX	ZX	Von-Mises									
Solid		-0,764	-7,444	12,911	-0,591	-7,525	13,043	-0,415	-7,604	13,176	-0,239	-7,682	13,307
Shell		-0,721	-7,655	13,273	-0,541	-7,749	13,430	-0,359	-7,838	13,580	-0,178	-7,923	13,725
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		-5,61%	2,83%	2,81%	-8,49%	2,98%	2,96%	-13,48%	3,08%	3,07%	-25,50%	3,14%	3,14%

		XN17		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		XX	ZX	Von-Mises
Solid		-0,060	-7,757	13,436
Shell		0,005	-8,003	13,863
		<u>Abweichungen [%]</u>		
		-107,70%	3,18%	3,18%

Tabelle 26: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 2 (XN)

Das folgende Diagramm zeigt den Vergleich der Von-Mises Spannungen zwischen Shell und Solid in dem Bereich 2 (XN):

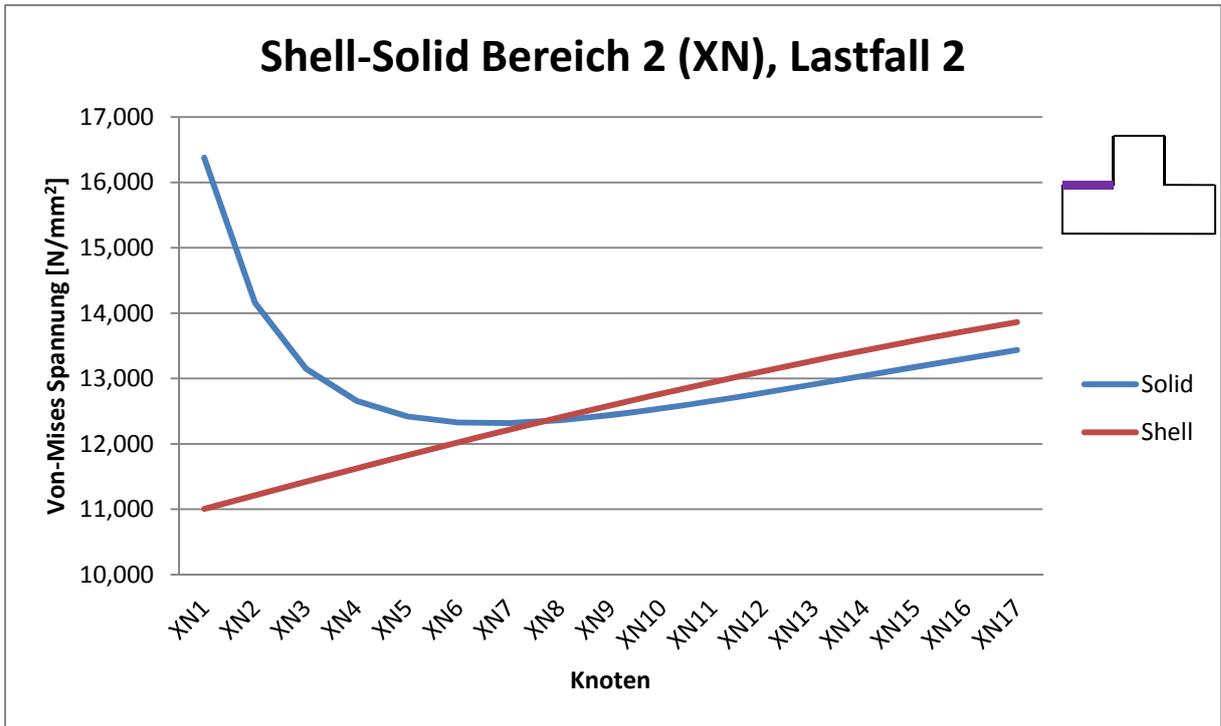


Abbildung 86: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 2 (XN), Lastfall 2

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen des 2D-Shell und 3D-Solid Vergleichs des zweiten Lastfalls im Bereich 3 (YP) lauten wie folgt:

		YP1			YP2			YP3			YP4		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	YZ	Von-Mises									
Solid		1,019	4,958	8,717	1,421	4,903	8,619	1,534	4,823	8,489	1,617	4,768	8,410
Shell		1,708	3,783	6,777	1,693	3,983	7,105	1,676	4,118	7,326	1,659	4,205	7,466
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		67,60%	-23,69%	-22,25%	19,15%	-18,76%	-17,56%	9,29%	-14,61%	-13,70%	2,60%	-11,81%	-11,22%

		YP5			YP6			YP7			YP8		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	YZ	Von-Mises									
Solid		1,658	4,710	8,315	1,668	4,648	8,210	1,658	4,583	8,094	1,637	4,516	7,974
Shell		1,640	4,255	7,543	1,621	4,277	7,574	1,600	4,278	7,568	1,579	4,263	7,537
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		-1,06%	-9,66%	-9,28%	-2,82%	-7,99%	-7,75%	-3,49%	-6,66%	-6,50%	-3,53%	-5,59%	-5,49%

		YP9			YP10			YP11			YP12		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	YZ	Von-Mises									
Solid		1,610	4,448	7,852	1,580	4,381	7,730	1,550	4,315	7,610	1,519	4,250	7,493
Shell		1,558	4,237	7,485	1,535	4,202	7,420	1,512	4,162	7,344	1,489	4,117	7,262
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		-3,25%	-4,75%	-4,67%	-2,84%	-4,07%	-4,02%	-2,40%	-3,55%	-3,50%	-2,02%	-3,13%	-3,09%

		YP13			YP14			YP15			YP16		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	YZ	Von-Mises									
Solid		1,490	4,187	7,379	1,462	4,126	7,269	1,434	4,067	7,162	1,407	4,010	7,058
Shell		1,465	4,070	7,175	1,440	4,021	7,085	1,415	3,971	6,995	1,390	3,921	6,904
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		-1,71%	-2,81%	-2,77%	-1,48%	-2,56%	-2,52%	-1,33%	-2,37%	-2,33%	-1,25%	-2,22%	-2,19%

		YP17		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	YZ	Von-Mises
Solid		1,380	3,955	6,959
Shell		1,364	3,872	6,814
		<u>Abweichungen [%]</u>		
		-1,21%	-2,11%	-2,08%

Tabelle 27: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 3 (YP)

Das folgende Diagramm zeigt den Vergleich der Von-Mises Spannungen zwischen Shell und Solid in dem Bereich 3 (YP):

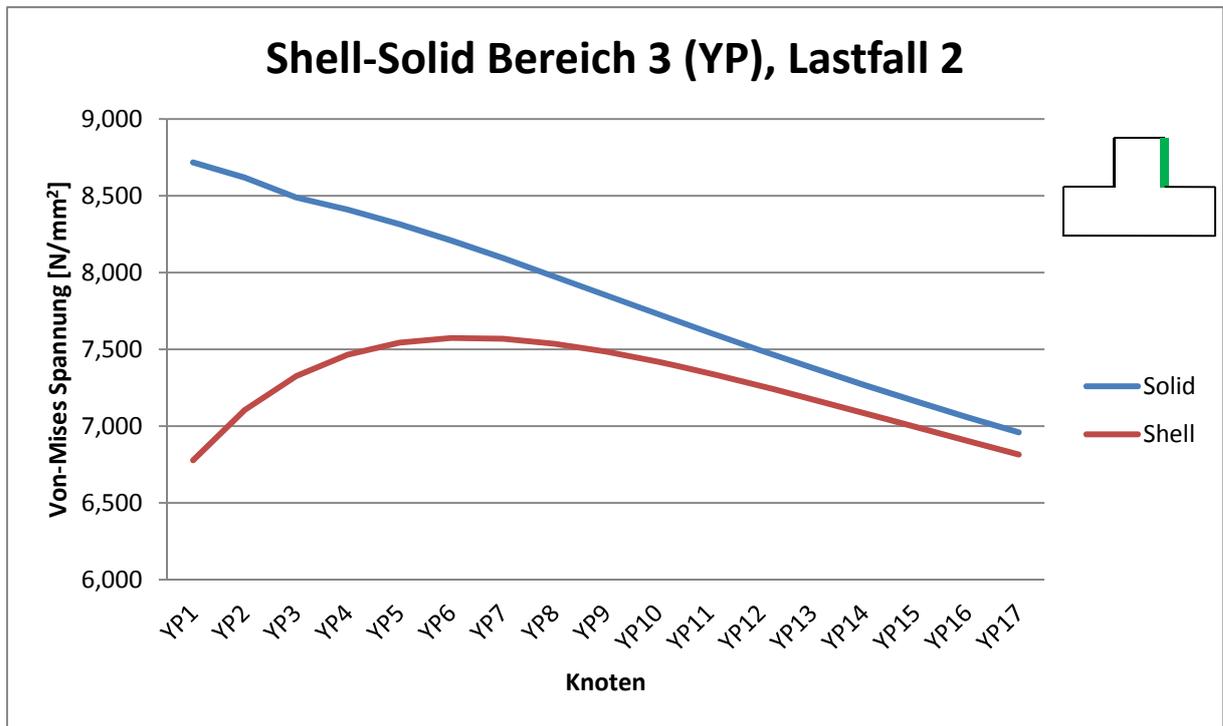


Abbildung 87: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 3 (YP), Lastfall 2

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen des 2D-Shell und 3D-Solid Vergleichs des zweiten Lastfalls im Bereich 4 (YN) lauten wie folgt:

		YN1			YN2			YN3			YN4		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises
Solid		-3,965	-10,750	19,267	-2,509	-10,127	17,677	-2,390	-9,716	16,966	-2,258	-9,521	16,608
Shell		-2,394	-8,200	14,354	-2,362	-8,445	14,770	-2,330	-8,624	15,073	-2,296	-8,752	15,289
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		-39,63%	-23,72%	-25,50%	-5,84%	-16,61%	-16,44%	-2,53%	-11,24%	-11,16%	1,68%	-8,08%	-7,94%

		YN5			YN6			YN7			YN8		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	YZ	Von-Mises									
Solid		-2,177	-9,405	16,401	-2,128	-9,329	16,264	-2,094	-9,272	16,162	-2,068	-9,224	16,077
Shell		-2,261	-8,842	15,439	-2,226	-8,902	15,539	-2,190	-8,939	15,599	-2,153	-8,959	15,629
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		3,89%	-5,99%	-5,86%	4,60%	-4,58%	-4,46%	4,55%	-3,59%	-3,48%	4,09%	-2,87%	-2,78%

		YN9			YN10			YN11			YN12		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	YZ	Von-Mises									
Solid		-2,045	-9,181	16,000	-2,021	-9,140	15,928	-1,995	-9,101	15,859	-1,966	-9,063	15,790
Shell		-2,115	-8,966	15,637	-2,077	-8,962	15,627	-2,039	-8,951	15,603	-1,999	-8,933	15,570
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		3,46%	-2,35%	-2,27%	2,80%	-1,95%	-1,89%	2,20%	-1,66%	-1,61%	1,68%	-1,43%	-1,39%

		YN13			YN14			YN15			YN16		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	YZ	Von-Mises									
Solid		-1,936	-9,025	15,722	-1,902	-8,988	15,654	-1,867	-8,950	15,587	-1,831	-8,913	15,520
Shell		-1,960	-8,912	15,529	-1,920	-8,887	15,482	-1,879	-8,859	15,430	-1,839	-8,829	15,376
		<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
		1,26%	-1,26%	-1,23%	0,91%	-1,13%	-1,10%	0,64%	-1,02%	-1,00%	0,43%	-0,94%	-0,93%

		YN17		
		<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
		YY	YZ	Von-Mises
Solid		-1,793	-8,876	15,453
Shell		-1,797	-8,799	15,319
		<u>Abweichungen [%]</u>		
		0,27%	-0,88%	-0,87%

Tabelle 28: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 4 (YN)

Das folgende Diagramm zeigt den Vergleich der Von-Mises Spannungen zwischen Shell und Solid in dem Bereich 4 (YN):

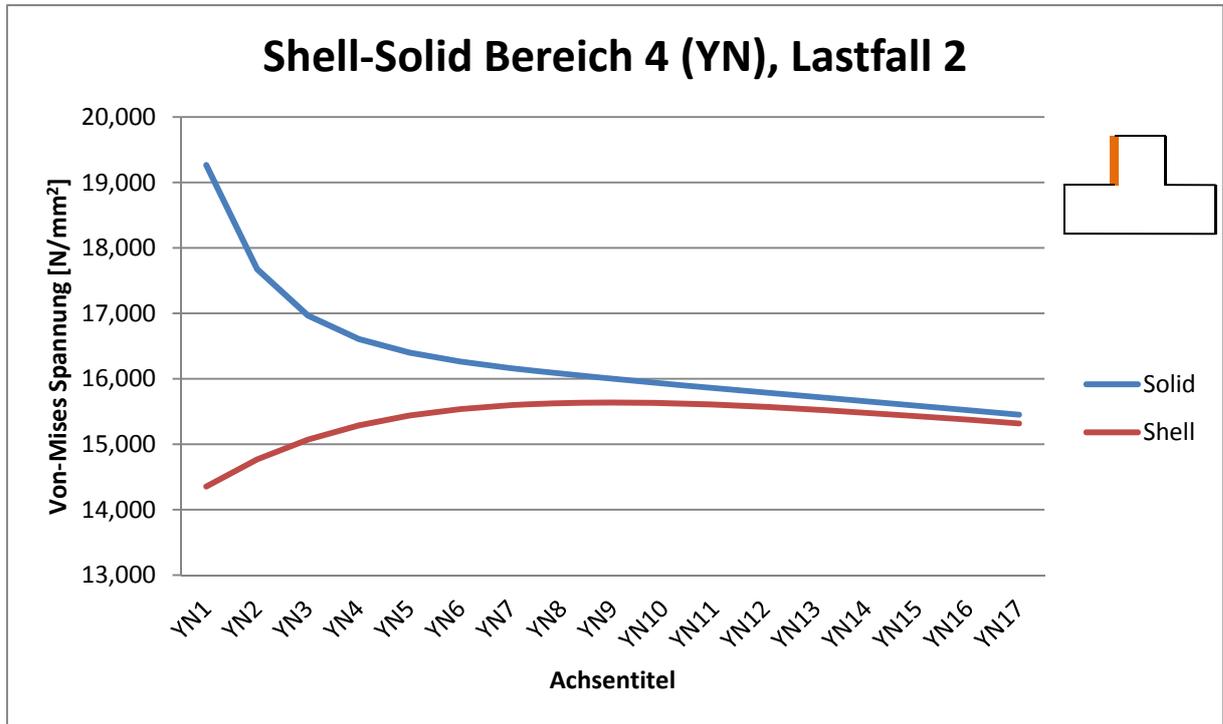


Abbildung 88: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 4 (YN), Lastfall 2

10.1.2 Ergebnisse der Detail-Modell Berechnungen (Kapitel 5.4.3)

Hier werden die detaillierten Ergebnisse des Kapitels 5.4.3 aufgelistet.

Die folgenden Tabellen und Diagramme zeigen die ermittelten Spannungsergebnisse der vier Detail-Modelle in den vier Bereichen (XP,XN,YP,YN). Als Referenz werden jeweils die Spannungsergebnisse des 3D-Solid Modells des T-Trägers herangezogen.

Es werden jeweils nur die drei Spannungen, die in dem jeweiligen Bereich und für den behandelten Lastfall relevant sind angegeben.

10.1.2.1 Lastfall 1

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen der Detail-Modell Berechnungen des ersten Lastfalls der beiden Eckknoten (EK1, EK2) lauten wie folgt:

EK1							
<u>Spannungen [N/mm²]</u>							
	XX	YY	ZZ	XY	YZ	ZX	Von-Mises
Solid	-157,183	-118,885	-79,852	72,188	0,675	-0,658	149,866
SolidIR_24_v1	-164,901	-125,550	-85,815	76,007	0,675	-0,658	156,893
SolidIR_24_v2	-164,566	-125,205	-85,931	75,812	0,667	-0,651	156,400
SolidIR_48_v1	-157,949	-119,033	-81,040	72,414	0,670	-0,653	150,081
SolidIR_48_v2	-157,706	-118,746	-80,937	72,270	0,672	-0,655	149,789
<u>Abweichungen [%]</u>							
SolidIR_24_v1	4,91%	5,61%	7,47%	5,29%	-0,10%	-0,01%	4,69%
SolidIR_24_v2	4,70%	5,32%	7,61%	5,02%	-1,26%	-1,08%	4,36%
SolidIR_48_v1	0,49%	0,13%	1,49%	0,31%	-0,82%	-0,73%	0,14%
SolidIR_48_v2	0,33%	-0,12%	1,36%	0,11%	-0,52%	-0,41%	-0,05%

EK2							
<u>Spannungen [N/mm²]</u>							
	XX	YY	ZZ	XY	YZ	ZX	Von-Mises
Solid	-82,124	-29,355	-32,439	-29,757	-0,333	-0,350	75,019
SolidIR_24_v1	-86,287	-31,536	-34,561	-31,454	-0,283	-0,312	78,674
SolidIR_24_v2	-86,134	-31,379	-34,579	-31,366	-0,289	-0,318	78,504
SolidIR_48_v1	-83,539	-29,922	-33,470	-30,288	-0,294	-0,317	76,168
SolidIR_48_v2	-83,453	-29,797	-33,443	-30,230	-0,295	-0,318	76,089
<u>Abweichungen [%]</u>							
SolidIR_24_v1	5,07%	7,43%	6,54%	5,70%	-15,03%	-10,76%	4,87%
SolidIR_24_v2	4,88%	6,89%	6,60%	5,41%	-13,02%	-9,06%	4,65%
SolidIR_48_v1	1,72%	1,93%	3,18%	1,78%	-11,54%	-9,39%	1,53%
SolidIR_48_v2	1,62%	1,50%	3,09%	1,59%	-11,40%	-9,20%	1,43%

Tabelle 29: Ergebnisse Lastfall 1, Eckknoten (EK1, EK2)

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen der Detail-Modell Berechnungen des ersten Lastfalls im Bereich 1 (XP) lauten wie folgt:

	XP1			XP2			XP3		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-98,949	-26,930	94,052	-74,616	-22,189	65,276	-73,574	-21,005	66,679
SolidIR_24_v1	-102,931	-29,908	97,572	-77,089	-24,863	66,973	-75,740	-23,515	68,263
SolidIR_24_v2	-102,828	-30,391	97,368	-77,086	-25,457	66,845	-75,773	-24,178	68,161
SolidIR_48_v1	-99,712	-28,137	94,532	-75,242	-23,405	65,586	-74,151	-22,246	66,962
SolidIR_48_v2	-99,641	-28,202	94,436	-75,221	-23,498	65,548	-74,138	-22,360	66,922
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	4,02%	11,06%	3,74%	3,31%	12,05%	2,60%	2,94%	11,95%	2,38%
SolidIR_24_v2	3,92%	12,85%	3,53%	3,31%	14,73%	2,40%	2,99%	15,11%	2,22%
SolidIR_48_v1	0,77%	4,48%	0,51%	0,84%	5,48%	0,47%	0,79%	5,91%	0,42%
SolidIR_48_v2	0,70%	4,72%	0,41%	0,81%	5,90%	0,42%	0,77%	6,45%	0,37%

	XP4			XP5			XP6		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-72,057	-20,955	64,197	-71,139	-20,622	63,510	-70,558	-20,466	62,903
SolidIR_24_v1	-73,886	-23,343	65,413	-72,660	-22,870	64,470	-71,788	-22,587	63,607
SolidIR_24_v2	-73,951	-24,042	65,332	-72,749	-23,587	64,408	-71,889	-23,310	63,554
SolidIR_48_v1	-72,581	-22,217	64,413	-71,610	-21,899	63,672	-70,972	-21,753	63,008
SolidIR_48_v2	-72,573	-22,348	64,377	-71,601	-22,047	63,631	-70,956	-21,920	62,955
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	2,54%	11,40%	1,89%	2,14%	10,90%	1,51%	1,74%	10,36%	1,12%
SolidIR_24_v2	2,63%	14,73%	1,77%	2,26%	14,38%	1,41%	1,89%	13,89%	1,04%
SolidIR_48_v1	0,73%	6,03%	0,34%	0,66%	6,19%	0,26%	0,59%	6,29%	0,17%
SolidIR_48_v2	0,72%	6,65%	0,28%	0,65%	6,91%	0,19%	0,56%	7,10%	0,08%

	XP7			XP8			XP9		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-70,098	-20,314	62,490	-69,687	-20,178	62,115	-69,280	-20,041	61,753
SolidIR_24_v1	-71,047	-22,314	62,953	-70,370	-22,067	62,348	-69,717	-21,830	61,776
SolidIR_24_v2	-71,143	-23,037	62,894	-70,439	-22,791	62,264	-69,733	-22,556	61,640
SolidIR_48_v1	-70,455	-21,606	62,540	-69,991	-21,473	62,115	-69,544	-21,340	61,715
SolidIR_48_v2	-70,420	-21,794	62,465	-69,921	-21,688	62,001	-69,413	-21,590	61,536
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	1,35%	9,85%	0,74%	0,98%	9,36%	0,37%	0,63%	8,93%	0,04%
SolidIR_24_v2	1,49%	13,41%	0,65%	1,08%	12,95%	0,24%	0,65%	12,55%	-0,18%
SolidIR_48_v1	0,51%	6,36%	0,08%	0,44%	6,42%	0,00%	0,38%	6,48%	-0,06%
SolidIR_48_v2	0,46%	7,29%	-0,04%	0,34%	7,48%	-0,18%	0,19%	7,73%	-0,35%

	XP10			XP11			XP12		
	Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]		
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-68,857	-19,898	61,378	-68,410	-19,747	60,984	-67,937	-19,588	60,568
SolidIR_24_v1	-69,089	-21,606	61,227	-68,510	-21,415	60,724	-68,034	-21,304	60,307
SolidIR_24_v2	-69,015	-22,340	61,004	-68,303	-22,154	60,375	-67,654	-22,031	59,799
SolidIR_48_v1	-69,110	-21,214	61,331	-68,715	-21,114	60,984	-68,414	-21,085	60,716
SolidIR_48_v2	-68,883	-21,507	61,050	-68,342	-21,455	60,554	-67,842	-21,464	60,092
	Abweichungen [%]			Abweichungen [%]			Abweichungen [%]		
SolidIR_24_v1	0,34%	8,58%	-0,25%	0,15%	8,45%	-0,43%	0,14%	8,76%	-0,43%
SolidIR_24_v2	0,23%	12,27%	-0,61%	-0,16%	12,19%	-1,00%	-0,42%	12,47%	-1,27%
SolidIR_48_v1	0,37%	6,61%	-0,08%	0,45%	6,92%	0,00%	0,70%	7,64%	0,25%
SolidIR_48_v2	0,04%	8,09%	-0,53%	-0,10%	8,65%	-0,70%	-0,14%	9,58%	-0,79%

	XP13			XP14			XP15		
	Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]		
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-67,442	-19,422	60,131	-66,927	-19,250	59,678	-66,397	-19,074	59,212
SolidIR_24_v1	-67,771	-21,396	60,063	-67,774	-21,800	60,035	-69,118	-23,165	61,032
SolidIR_24_v2	-67,197	-22,014	59,407	-67,136	-22,147	59,397	-68,946	-22,815	60,953
SolidIR_48_v1	-68,321	-21,247	60,619	-68,493	-21,704	60,741	-70,030	-23,116	61,903
SolidIR_48_v2	-67,511	-21,572	59,793	-67,554	-21,815	59,859	-69,455	-22,572	61,483
	Abweichungen [%]			Abweichungen [%]			Abweichungen [%]		
SolidIR_24_v1	0,49%	10,16%	-0,11%	1,27%	13,25%	0,60%	4,10%	21,45%	3,07%
SolidIR_24_v2	-0,36%	13,34%	-1,20%	0,31%	15,05%	-0,47%	3,84%	19,62%	2,94%
SolidIR_48_v1	1,30%	9,40%	0,81%	2,34%	12,74%	1,78%	5,47%	21,19%	4,55%
SolidIR_48_v2	0,10%	11,07%	-0,56%	0,94%	13,32%	0,30%	4,61%	18,34%	3,84%

	XP16			XP17		
	Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]		
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-65,855	-18,893	58,735	-65,304	-18,710	58,250
SolidIR_24_v1	-67,837	-23,815	60,844	-125,192	-44,868	99,062
SolidIR_24_v2	-68,596	-22,021	62,200	-130,391	-44,834	103,422
SolidIR_48_v1	-68,892	-23,800	61,857	-127,263	-45,275	100,776
SolidIR_48_v2	-69,148	-21,823	62,770	-131,434	-44,842	104,349
	Abweichungen [%]			Abweichungen [%]		
SolidIR_24_v1	3,01%	26,05%	3,59%	91,71%	139,81%	70,06%
SolidIR_24_v2	4,16%	16,55%	5,90%	99,67%	139,63%	77,55%
SolidIR_48_v1	4,61%	25,97%	5,32%	94,88%	141,98%	73,00%
SolidIR_48_v2	5,00%	15,51%	6,87%	101,26%	139,67%	79,14%

Tabelle 30: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 1 (XP)

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen der Detail-Modell Berechnungen des ersten Lastfalls im Bereich 2 (XN) lauten wie folgt:

	XN1			XN2			XN3		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-68,748	-19,829	62,181	-54,810	-16,324	48,347	-52,733	-15,427	47,349
SolidIR_24_v1	-71,693	-21,026	64,808	-56,918	-17,302	50,113	-54,596	-16,302	48,953
SolidIR_24_v2	-71,606	-21,409	64,633	-56,873	-17,816	49,954	-54,574	-16,896	48,803
SolidIR_48_v1	-69,856	-20,642	63,078	-55,632	-17,077	48,954	-53,476	-16,164	47,903
SolidIR_48_v2	-69,839	-20,721	63,038	-55,630	-17,184	48,929	-53,474	-16,292	47,872
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	4,28%	6,04%	4,22%	3,85%	6,00%	3,65%	3,53%	5,67%	3,39%
SolidIR_24_v2	4,16%	7,97%	3,94%	3,76%	9,14%	3,32%	3,49%	9,52%	3,07%
SolidIR_48_v1	1,61%	4,10%	1,44%	1,50%	4,62%	1,26%	1,41%	4,78%	1,17%
SolidIR_48_v2	1,59%	4,50%	1,38%	1,50%	5,27%	1,20%	1,41%	5,61%	1,11%

	XN4			XN5			XN6		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-51,006	-15,086	45,410	-49,846	-14,750	44,411	-49,011	-14,534	43,626
SolidIR_24_v1	-52,613	-15,888	46,764	-51,212	-15,486	45,553	-50,145	-15,222	44,556
SolidIR_24_v2	-52,619	-16,521	46,632	-51,244	-16,134	45,443	-50,196	-15,869	44,464
SolidIR_48_v1	-51,673	-15,812	45,885	-50,444	-15,465	44,824	-49,544	-15,241	43,979
SolidIR_48_v2	-51,670	-15,959	45,851	-50,438	-15,628	44,784	-49,532	-15,419	43,929
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	3,15%	5,32%	2,98%	2,74%	4,99%	2,57%	2,31%	4,73%	2,13%
SolidIR_24_v2	3,16%	9,51%	2,69%	2,81%	9,39%	2,32%	2,42%	9,18%	1,92%
SolidIR_48_v1	1,31%	4,82%	1,05%	1,20%	4,85%	0,93%	1,09%	4,86%	0,81%
SolidIR_48_v2	1,30%	5,79%	0,97%	1,19%	5,96%	0,84%	1,06%	6,09%	0,69%

	XN7			XN8			XN9		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-48,362	-14,361	43,038	-47,830	-14,221	42,554	-47,371	-14,100	42,138
SolidIR_24_v1	-49,271	-15,010	43,763	-48,525	-14,842	43,081	-47,867	-14,701	42,482
SolidIR_24_v2	-49,329	-15,647	43,681	-48,574	-15,466	42,994	-47,886	-15,314	42,370
SolidIR_48_v1	-48,832	-15,059	43,333	-48,242	-14,912	42,796	-47,734	-14,788	42,336
SolidIR_48_v2	-48,807	-15,253	43,267	-48,193	-15,124	42,703	-47,644	-15,023	42,200
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	1,88%	4,52%	1,68%	1,45%	4,36%	1,24%	1,05%	4,26%	0,82%
SolidIR_24_v2	2,00%	8,96%	1,49%	1,55%	8,76%	1,03%	1,09%	8,61%	0,55%
SolidIR_48_v1	0,97%	4,86%	0,69%	0,86%	4,86%	0,57%	0,77%	4,88%	0,47%
SolidIR_48_v2	0,92%	6,21%	0,53%	0,76%	6,35%	0,35%	0,58%	6,54%	0,15%

	XN10			XN11			XN12		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-46,956	-13,992	41,763	-46,568	-13,890	41,413	-46,195	-13,792	41,077
SolidIR_24_v1	-47,281	-14,585	41,949	-46,771	-14,500	41,486	-46,363	-14,476	41,110
SolidIR_24_v2	-47,245	-15,188	41,787	-46,649	-15,093	41,246	-46,126	-15,046	40,769
SolidIR_48_v1	-47,290	-14,686	41,935	-46,914	-14,616	41,596	-46,632	-14,603	41,339
SolidIR_48_v2	-47,135	-14,949	41,731	-46,661	-14,909	41,294	-46,245	-14,918	40,907
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	0,69%	4,24%	0,44%	0,44%	4,40%	0,18%	0,37%	4,96%	0,08%
SolidIR_24_v2	0,62%	8,55%	0,06%	0,17%	8,66%	-0,40%	-0,15%	9,09%	-0,75%
SolidIR_48_v1	0,71%	4,96%	0,41%	0,74%	5,23%	0,44%	0,95%	5,88%	0,64%
SolidIR_48_v2	0,38%	6,84%	-0,08%	0,20%	7,33%	-0,29%	0,11%	8,17%	-0,41%

	XN13			XN14			XN15		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-45,830	-13,696	40,749	-45,468	-13,600	40,424	-45,109	-13,504	40,101
SolidIR_24_v1	-46,123	-14,590	40,874	-46,079	-14,913	40,800	-46,957	-15,880	41,441
SolidIR_24_v2	-45,755	-15,072	40,437	-45,667	-15,200	40,378	-46,857	-15,687	41,395
SolidIR_48_v1	-46,514	-14,726	41,217	-46,591	-15,053	41,259	-47,603	-16,029	42,023
SolidIR_48_v2	-45,966	-15,001	40,650	-45,955	-15,180	40,654	-47,212	-15,709	41,726
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	0,64%	6,53%	0,31%	1,34%	9,65%	0,93%	4,10%	17,59%	3,34%
SolidIR_24_v2	-0,16%	10,05%	-0,76%	0,44%	11,77%	-0,11%	3,88%	16,16%	3,23%
SolidIR_48_v1	1,49%	7,53%	1,15%	2,47%	10,68%	2,07%	5,53%	18,69%	4,79%
SolidIR_48_v2	0,30%	9,53%	-0,24%	1,07%	11,62%	0,57%	4,66%	16,32%	4,05%

	XN16			XN17		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZZ	Von-Mises	XX	ZZ	Von-Mises
Solid	-44,749	-13,408	39,779	-44,389	-13,312	39,456
SolidIR_24_v1	-46,059	-16,358	41,281	-85,016	-30,681	67,240
SolidIR_24_v2	-46,585	-15,180	42,198	-88,551	-30,693	70,191
SolidIR_48_v1	-46,805	-16,512	41,969	-86,465	-31,112	68,401
SolidIR_48_v2	-46,975	-15,218	42,567	-89,290	-30,866	70,799
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	2,93%	22,00%	3,78%	91,53%	130,48%	70,42%
SolidIR_24_v2	4,10%	13,21%	6,08%	99,49%	130,57%	77,90%
SolidIR_48_v1	4,59%	23,15%	5,51%	94,79%	133,72%	73,36%
SolidIR_48_v2	4,97%	13,50%	7,01%	101,15%	131,87%	79,44%

Tabelle 31: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 2 (XN)

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen der Detail-Modell Berechnungen des ersten Lastfalls im Bereich 3 (YP) lauten wie folgt:

	YP1			YP2			YP3		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises
Solid	-34,350	-7,507	41,706	-15,614	-5,246	12,979	-16,672	-4,605	16,147
SolidIR_24_v1	-36,691	-9,765	44,117	-16,784	-7,203	13,660	-17,798	-6,366	17,012
SolidIR_24_v2	-36,640	-9,929	44,036	-16,852	-7,344	13,704	-17,902	-6,489	17,093
SolidIR_48_v1	-34,111	-8,335	41,492	-15,375	-6,093	12,579	-16,474	-5,454	15,840
SolidIR_48_v2	-33,978	-8,332	41,361	-15,306	-6,096	12,516	-16,420	-5,460	15,787
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	6,82%	30,07%	5,78%	7,49%	37,31%	5,25%	6,75%	38,25%	5,36%
SolidIR_24_v2	6,67%	32,26%	5,58%	7,93%	40,00%	5,59%	7,38%	40,92%	5,86%
SolidIR_48_v1	-0,70%	11,03%	-0,51%	-1,53%	16,14%	-3,08%	-1,19%	18,45%	-1,90%
SolidIR_48_v2	-1,08%	10,98%	-0,83%	-1,97%	16,21%	-3,57%	-1,51%	18,56%	-2,23%

	YP4			YP5			YP6		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises
Solid	-16,794	-5,074	14,939	-17,267	-5,124	15,495	-17,921	-5,311	15,972
SolidIR_24_v1	-17,837	-6,697	15,626	-18,245	-6,595	16,149	-18,837	-6,650	16,575
SolidIR_24_v2	-17,964	-6,813	15,728	-18,380	-6,712	16,258	-18,971	-6,771	16,682
SolidIR_48_v1	-16,631	-5,922	14,621	-17,138	-5,961	15,210	-17,823	-6,131	15,713
SolidIR_48_v2	-16,590	-5,928	14,582	-17,107	-5,970	15,180	-17,798	-6,144	15,686
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	6,21%	31,99%	4,60%	5,66%	28,72%	4,22%	5,11%	25,21%	3,78%
SolidIR_24_v2	6,97%	34,29%	5,28%	6,45%	31,01%	4,93%	5,86%	27,49%	4,45%
SolidIR_48_v1	-0,97%	16,73%	-2,13%	-0,75%	16,35%	-1,84%	-0,55%	15,44%	-1,62%
SolidIR_48_v2	-1,21%	16,85%	-2,39%	-0,93%	16,52%	-2,04%	-0,69%	15,68%	-1,79%

	YP7			YP8			YP9		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises
Solid	-18,525	-5,446	16,507	-19,014	-5,549	16,936	-19,352	-5,603	17,244
SolidIR_24_v1	-19,372	-6,664	17,063	-19,786	-6,657	17,438	-20,047	-6,613	17,690
SolidIR_24_v2	-19,497	-6,792	17,159	-19,894	-6,794	17,515	-20,130	-6,763	17,740
SolidIR_48_v1	-18,456	-6,242	16,277	-18,974	-6,315	16,737	-19,344	-6,337	17,079
SolidIR_48_v2	-18,432	-6,261	16,250	-18,944	-6,343	16,703	-19,300	-6,378	17,029
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	4,57%	22,35%	3,37%	4,06%	19,96%	2,96%	3,59%	18,03%	2,59%
SolidIR_24_v2	5,25%	24,70%	3,95%	4,63%	22,44%	3,42%	4,02%	20,69%	2,88%
SolidIR_48_v1	-0,37%	14,61%	-1,39%	-0,21%	13,80%	-1,18%	-0,04%	13,09%	-0,95%
SolidIR_48_v2	-0,50%	14,95%	-1,56%	-0,37%	14,31%	-1,38%	-0,27%	13,82%	-1,25%

	YP10			YP11			YP12		
	Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]		
	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises
Solid	-19,539	-5,612	17,420	-19,592	-5,581	17,479	-19,531	-5,516	17,438
SolidIR_24_v1	-20,166	-6,539	17,818	-20,173	-6,443	17,848	-20,109	-6,349	17,813
SolidIR_24_v2	-20,212	-6,702	17,830	-20,168	-6,623	17,808	-20,043	-6,541	17,712
SolidIR_48_v1	-19,574	-6,315	17,302	-19,690	-6,262	17,427	-19,735	-6,199	17,488
SolidIR_48_v2	-19,504	-6,373	17,222	-19,578	-6,341	17,304	-19,565	-6,297	17,306
	Abweichungen [%]			Abweichungen [%]			Abweichungen [%]		
SolidIR_24_v1	3,21%	16,50%	2,29%	2,96%	15,45%	2,11%	2,96%	15,09%	2,15%
SolidIR_24_v2	3,44%	19,42%	2,35%	2,94%	18,67%	1,88%	2,62%	18,57%	1,57%
SolidIR_48_v1	0,18%	12,52%	-0,68%	0,50%	12,20%	-0,30%	1,04%	12,38%	0,28%
SolidIR_48_v2	-0,18%	13,56%	-1,14%	-0,07%	13,62%	-1,00%	0,17%	14,16%	-0,76%

	YP13			YP14			YP15		
	Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]		
	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises
Solid	-19,381	-5,425	17,318	-19,162	-5,313	17,137	-18,894	-5,187	16,911
SolidIR_24_v1	-20,037	-6,299	17,763	-19,993	-6,330	17,733	-20,313	-6,647	17,957
SolidIR_24_v2	-19,901	-6,476	17,602	-19,826	-6,445	17,563	-20,271	-6,571	17,938
SolidIR_48_v1	-19,767	-6,171	17,533	-19,825	-6,212	17,598	-20,248	-6,530	17,919
SolidIR_48_v2	-19,527	-6,262	17,289	-19,545	-6,251	17,334	-20,072	-6,385	17,787
	Abweichungen [%]			Abweichungen [%]			Abweichungen [%]		
SolidIR_24_v1	3,38%	16,11%	2,57%	4,33%	19,13%	3,48%	7,51%	28,14%	6,19%
SolidIR_24_v2	2,68%	19,37%	1,64%	3,46%	21,29%	2,48%	7,29%	26,67%	6,07%
SolidIR_48_v1	1,99%	13,75%	1,24%	3,46%	16,91%	2,69%	7,17%	25,89%	5,96%
SolidIR_48_v2	0,75%	15,44%	-0,17%	2,00%	17,65%	1,15%	6,24%	23,09%	5,18%

	YP16			YP17		
	Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]		
	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises
Solid	-18,589	-5,051	16,654	-18,261	-4,907	16,374
SolidIR_24_v1	-19,878	-6,748	17,879	-36,202	-12,703	28,655
SolidIR_24_v2	-20,101	-6,247	18,279	-37,720	-12,692	29,936
SolidIR_48_v1	-19,909	-6,628	17,931	-36,406	-12,652	28,846
SolidIR_48_v2	-19,971	-6,067	18,188	-37,584	-12,512	29,869
	Abweichungen [%]			Abweichungen [%]		
SolidIR_24_v1	6,93%	33,60%	7,36%	98,25%	158,90%	75,00%
SolidIR_24_v2	8,13%	23,68%	9,76%	106,56%	158,67%	82,82%
SolidIR_48_v1	7,10%	31,23%	7,67%	99,36%	157,86%	76,16%
SolidIR_48_v2	7,43%	20,13%	9,21%	105,82%	155,01%	82,41%

Tabelle 32: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 3 (YP)

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen der Detail-Modell Berechnungen des ersten Lastfalls im Bereich 4 (YN) lauten wie folgt:

	YN1			YN2			YN3		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises
Solid	20,265	7,136	17,069	26,501	7,320	24,104	25,611	7,526	22,196
SolidIR_24_v1	20,456	7,286	17,309	26,960	7,724	24,475	25,885	8,142	22,275
SolidIR_24_v2	20,435	7,465	17,222	26,880	8,022	24,334	25,797	8,524	22,106
SolidIR_48_v1	20,547	6,838	17,451	26,906	7,078	24,560	26,004	7,347	22,612
SolidIR_48_v2	20,612	6,863	17,494	26,945	7,117	24,587	26,036	7,400	22,630
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	0,94%	2,11%	1,41%	1,73%	5,51%	1,54%	1,07%	8,19%	0,36%
SolidIR_24_v2	0,84%	4,61%	0,90%	1,43%	9,58%	0,95%	0,73%	13,26%	-0,40%
SolidIR_48_v1	1,39%	-4,17%	2,24%	1,53%	-3,31%	1,89%	1,53%	-2,38%	1,88%
SolidIR_48_v2	1,71%	-3,82%	2,49%	1,68%	-2,78%	2,00%	1,66%	-1,68%	1,96%

	YN4			YN5			YN6		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises
Solid	24,909	7,169	22,169	23,890	6,960	21,205	22,686	6,660	20,181
SolidIR_24_v1	25,016	7,939	22,097	23,833	7,865	20,951	22,478	7,665	19,774
SolidIR_24_v2	24,937	8,368	21,937	23,771	8,317	20,808	22,435	8,125	19,655
SolidIR_48_v1	25,287	7,049	22,562	24,244	6,910	21,555	23,007	6,683	20,482
SolidIR_48_v2	25,314	7,115	22,571	24,267	6,987	21,559	23,025	6,770	20,479
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	0,43%	10,75%	-0,32%	-0,24%	13,00%	-1,20%	-0,92%	15,10%	-2,02%
SolidIR_24_v2	0,11%	16,73%	-1,05%	-0,50%	19,50%	-1,87%	-1,11%	22,00%	-2,61%
SolidIR_48_v1	1,52%	-1,67%	1,77%	1,48%	-0,72%	1,65%	1,41%	0,35%	1,49%
SolidIR_48_v2	1,63%	-0,75%	1,81%	1,58%	0,39%	1,67%	1,49%	1,66%	1,48%

	YN7			YN8			YN9		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises
Solid	21,476	6,376	19,100	20,339	6,113	18,084	19,321	5,888	17,166
SolidIR_24_v1	21,139	7,458	18,566	19,898	7,252	17,451	18,799	7,069	16,461
SolidIR_24_v2	21,111	7,916	18,468	19,877	7,703	17,368	18,777	7,510	16,384
SolidIR_48_v1	21,759	6,476	19,348	20,582	6,292	18,276	19,523	6,148	17,303
SolidIR_48_v2	21,771	6,573	19,338	20,585	6,399	18,256	19,513	6,265	17,269
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	-1,57%	16,97%	-2,80%	-2,17%	18,62%	-3,50%	-2,70%	20,05%	-4,10%
SolidIR_24_v2	-1,70%	24,15%	-3,31%	-2,27%	26,00%	-3,96%	-2,82%	27,54%	-4,55%
SolidIR_48_v1	1,32%	1,56%	1,30%	1,19%	2,93%	1,06%	1,05%	4,42%	0,80%
SolidIR_48_v2	1,37%	3,09%	1,24%	1,21%	4,67%	0,95%	0,99%	6,40%	0,60%

	YN10			YN11			YN12		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises
Solid	18,433	5,701	16,360	17,668	5,550	15,663	17,009	5,430	15,060
SolidIR_24_v1	17,855	6,915	15,611	17,064	6,796	14,898	16,418	6,721	14,317
SolidIR_24_v2	17,822	7,346	15,530	17,007	7,214	14,804	16,330	7,120	14,202
SolidIR_48_v1	18,599	6,046	16,449	17,811	5,987	15,716	17,157	5,976	15,105
SolidIR_48_v2	18,567	6,173	16,394	17,747	6,125	15,631	17,050	6,121	14,980
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	-3,13%	21,29%	-4,58%	-3,42%	22,45%	-4,88%	-3,47%	23,77%	-4,93%
SolidIR_24_v2	-3,32%	28,84%	-5,07%	-3,74%	29,98%	-5,48%	-3,99%	31,12%	-5,69%
SolidIR_48_v1	0,90%	6,05%	0,54%	0,81%	7,87%	0,34%	0,87%	10,04%	0,30%
SolidIR_48_v2	0,73%	8,28%	0,21%	0,45%	10,35%	-0,20%	0,24%	12,71%	-0,53%

	YN13			YN14			YN15		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises
Solid	16,437	5,335	14,534	15,932	5,260	14,068	15,477	5,198	13,648
SolidIR_24_v1	15,925	6,713	13,873	15,583	6,792	13,571	15,631	7,106	13,582
SolidIR_24_v2	15,801	7,071	13,739	15,454	7,075	13,448	15,614	7,227	13,565
SolidIR_48_v1	16,648	6,033	14,623	16,286	6,178	14,279	16,317	6,564	14,246
SolidIR_48_v2	16,488	6,166	14,457	16,096	6,265	14,100	16,206	6,509	14,154
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	-3,11%	25,82%	-4,55%	-2,19%	29,13%	-3,53%	1,00%	36,70%	-0,49%
SolidIR_24_v2	-3,87%	32,53%	-5,47%	-3,00%	34,51%	-4,41%	0,89%	39,03%	-0,61%
SolidIR_48_v1	1,29%	13,08%	0,61%	2,23%	17,47%	1,49%	5,43%	26,27%	4,38%
SolidIR_48_v2	0,31%	15,57%	-0,53%	1,03%	19,11%	0,22%	4,71%	25,22%	3,71%

	YN16			YN17		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	ZZ	Von-Mises	YY	ZZ	Von-Mises
Solid	15,057	5,147	13,261	14,663	5,103	12,897
SolidIR_24_v1	15,244	7,299	13,519	27,634	12,033	21,427
SolidIR_24_v2	15,445	7,110	13,784	28,839	12,241	22,352
SolidIR_48_v1	15,878	6,821	14,110	28,666	11,754	22,350
SolidIR_48_v2	15,952	6,453	14,286	29,636	11,729	23,132
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	1,24%	41,82%	1,95%	88,46%	135,81%	66,14%
SolidIR_24_v2	2,58%	38,15%	3,95%	96,68%	139,90%	73,31%
SolidIR_48_v1	5,45%	32,53%	6,40%	95,50%	130,34%	73,30%
SolidIR_48_v2	5,94%	25,38%	7,73%	102,11%	129,85%	79,36%

Tabelle 33: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 4 (YN)

10.1.2.2 Lastfall 2

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen der Detail-Modell Berechnungen des zweiten Lastfalls der beiden Eckknoten (EK1, EK2) lauten wie folgt:

EK1							
<u>Spannungen [N/mm²]</u>							
	XX	YY	ZZ	XY	YZ	ZX	Von-Mises
Solid	-2,865	-0,885	-1,548	1,015	5,477	-4,829	13,746
SolidIR_24_v1	-2,853	-0,733	-1,531	0,973	5,156	-4,628	13,076
SolidIR_24_v2	-2,851	-0,720	-1,537	0,969	5,047	-4,494	12,768
SolidIR_48_v1	-2,796	-0,778	-1,543	0,970	5,265	-4,659	13,245
SolidIR_48_v2	-2,802	-0,781	-1,547	0,972	5,259	-4,655	13,233
<u>Abweichungen [%]</u>							
SolidIR_24_v1	-0,41%	-17,23%	-1,05%	-4,07%	-5,87%	-4,17%	-4,88%
SolidIR_24_v2	-0,49%	-18,69%	-0,71%	-4,47%	-7,86%	-6,94%	-7,12%
SolidIR_48_v1	-2,40%	-12,15%	-0,32%	-4,41%	-3,88%	-3,53%	-3,65%
SolidIR_48_v2	-2,18%	-11,79%	0,00%	-4,16%	-3,99%	-3,61%	-3,73%

EK2							
<u>Spannungen [N/mm²]</u>							
	XX	YY	ZZ	XY	YZ	ZX	Von-Mises
Solid	-8,187	-8,294	-5,137	-4,310	-14,026	-13,493	36,952
SolidIR_24_v1	-8,783	-8,850	-5,629	-4,614	-14,078	-13,624	37,315
SolidIR_24_v2	-8,772	-8,842	-5,652	-4,608	-14,088	-13,615	37,311
SolidIR_48_v1	-8,212	-8,317	-5,250	-4,320	-13,862	-13,360	36,571
SolidIR_48_v2	-8,198	-8,301	-5,246	-4,312	-13,880	-13,381	36,616
<u>Abweichungen [%]</u>							
SolidIR_24_v1	7,27%	6,71%	9,59%	7,05%	0,37%	0,98%	0,98%
SolidIR_24_v2	7,14%	6,61%	10,04%	6,92%	0,44%	0,91%	0,97%
SolidIR_48_v1	0,30%	0,27%	2,20%	0,23%	-1,17%	-0,98%	-1,03%
SolidIR_48_v2	0,13%	0,08%	2,12%	0,04%	-1,05%	-0,83%	-0,91%

Tabelle 34: Ergebnisse Lastfall 2, Eckknoten (EK1, EK2)

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen der Detail-Modell Berechnungen des zweiten Lastfalls im Bereich 1 (XP) lauten wie folgt:

	XP1			XP2			XP3		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-2,461	-2,963	5,696	-1,922	-2,524	4,679	-1,815	-2,203	4,133
SolidIR_24_v1	-2,534	-2,939	5,666	-1,994	-2,543	4,731	-1,877	-2,244	4,220
SolidIR_24_v2	-2,538	-2,835	5,500	-1,998	-2,464	4,604	-1,881	-2,192	4,137
SolidIR_48_v1	-2,444	-2,888	5,561	-1,913	-2,475	4,597	-1,802	-2,171	4,079
SolidIR_48_v2	-2,449	-2,886	5,559	-1,917	-2,473	4,594	-1,805	-2,169	4,076
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	2,96%	-0,80%	-0,52%	3,71%	0,74%	1,11%	3,47%	1,88%	2,09%
SolidIR_24_v2	3,12%	-4,32%	-3,43%	3,93%	-2,40%	-1,60%	3,69%	-0,50%	0,10%
SolidIR_48_v1	-0,67%	-2,52%	-2,36%	-0,48%	-1,95%	-1,76%	-0,70%	-1,43%	-1,31%
SolidIR_48_v2	-0,48%	-2,60%	-2,40%	-0,30%	-2,05%	-1,82%	-0,51%	-1,55%	-1,38%

	XP4			XP5			XP6		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-1,725	-1,989	3,756	-1,660	-1,819	3,466	-1,608	-1,676	3,221
SolidIR_24_v1	-1,780	-2,043	3,861	-1,705	-1,883	3,581	-1,643	-1,746	3,343
SolidIR_24_v2	-1,784	-2,015	3,818	-1,710	-1,876	3,572	-1,648	-1,755	3,359
SolidIR_48_v1	-1,710	-1,969	3,720	-1,642	-1,808	3,443	-1,586	-1,670	3,205
SolidIR_48_v2	-1,714	-1,966	3,717	-1,645	-1,806	3,440	-1,590	-1,668	3,203
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	3,17%	2,75%	2,80%	2,75%	3,48%	3,33%	2,21%	4,18%	3,78%
SolidIR_24_v2	3,43%	1,34%	1,66%	3,05%	3,09%	3,06%	2,54%	4,72%	4,29%
SolidIR_48_v1	-0,87%	-0,98%	-0,94%	-1,07%	-0,61%	-0,66%	-1,32%	-0,35%	-0,50%
SolidIR_48_v2	-0,68%	-1,12%	-1,02%	-0,86%	-0,76%	-0,75%	-1,10%	-0,50%	-0,58%

	XP7			XP8			XP9		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-1,564	-1,548	3,005	-1,525	-1,429	2,808	-1,490	-1,317	2,624
SolidIR_24_v1	-1,588	-1,623	3,130	-1,536	-1,508	2,932	-1,486	-1,396	2,740
SolidIR_24_v2	-1,593	-1,644	3,165	-1,542	-1,537	2,979	-1,492	-1,432	2,797
SolidIR_48_v1	-1,538	-1,544	2,990	-1,493	-1,423	2,787	-1,449	-1,304	2,588
SolidIR_48_v2	-1,542	-1,542	2,989	-1,497	-1,422	2,787	-1,454	-1,305	2,592
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	1,53%	4,88%	4,16%	0,70%	5,52%	4,41%	-0,32%	6,00%	4,43%
SolidIR_24_v2	1,90%	6,22%	5,32%	1,10%	7,55%	6,10%	0,09%	8,68%	6,60%
SolidIR_48_v1	-1,65%	-0,25%	-0,50%	-2,11%	-0,42%	-0,75%	-2,75%	-1,01%	-1,37%
SolidIR_48_v2	-1,41%	-0,39%	-0,55%	-1,84%	-0,48%	-0,74%	-2,45%	-0,90%	-1,22%

	XP10			XP11			XP12		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-1,458	-1,210	2,450	-1,427	-1,107	2,285	-1,397	-1,007	2,127
SolidIR_24_v1	-1,435	-1,284	2,549	-1,382	-1,167	2,351	-1,328	-1,041	2,142
SolidIR_24_v2	-1,441	-1,326	2,615	-1,388	-1,219	2,431	-1,333	-1,109	2,244
SolidIR_48_v1	-1,405	-1,183	2,388	-1,360	-1,057	2,183	-1,313	-0,924	1,970
SolidIR_48_v2	-1,410	-1,189	2,399	-1,364	-1,072	2,206	-1,316	-0,954	2,015
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	-1,59%	6,09%	4,02%	-3,14%	5,41%	2,89%	-4,94%	3,43%	0,71%
SolidIR_24_v2	-1,18%	9,55%	6,72%	-2,75%	10,07%	6,38%	-4,57%	10,16%	5,52%
SolidIR_48_v1	-3,61%	-2,26%	-2,54%	-4,71%	-4,52%	-4,46%	-6,01%	-8,28%	-7,35%
SolidIR_48_v2	-3,30%	-1,75%	-2,09%	-4,42%	-3,19%	-3,45%	-5,77%	-5,24%	-5,27%

	XP13			XP14			XP15		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-1,368	-0,909	1,976	-1,339	-0,814	1,831	-1,311	-0,720	1,694
SolidIR_24_v1	-1,275	-0,904	1,921	-1,228	-0,761	1,701	-1,209	-0,629	1,523
SolidIR_24_v2	-1,279	-1,000	2,061	-1,233	-0,901	1,898	-1,221	-0,834	1,799
SolidIR_48_v1	-1,268	-0,781	1,753	-1,228	-0,636	1,546	-1,216	-0,507	1,391
SolidIR_48_v2	-1,270	-0,840	1,833	-1,229	-0,741	1,679	-1,221	-0,679	1,596
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	-6,78%	-0,54%	-2,76%	-8,27%	-6,50%	-7,11%	-7,73%	-12,61%	-10,05%
SolidIR_24_v2	-6,45%	10,00%	4,30%	-7,89%	10,76%	3,63%	-6,85%	15,87%	6,24%
SolidIR_48_v1	-7,30%	-14,07%	-11,26%	-8,25%	-21,78%	-15,57%	-7,23%	-29,54%	-17,88%
SolidIR_48_v2	-7,17%	-7,62%	-7,23%	-8,18%	-8,98%	-8,32%	-6,80%	-5,71%	-5,75%

	XP16			XP17		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-1,282	-0,628	1,564	-1,255	-0,538	1,442
SolidIR_24_v1	-1,173	-0,580	1,458	-2,059	-0,697	2,082
SolidIR_24_v2	-1,199	-0,828	1,797	-2,160	-0,845	2,331
SolidIR_48_v1	-1,185	-0,460	1,338	-2,083	-0,573	1,999
SolidIR_48_v2	-1,203	-0,682	1,609	-2,170	-0,709	2,218
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	-8,54%	-7,66%	-6,77%	64,11%	29,45%	44,38%
SolidIR_24_v2	-6,53%	31,85%	14,93%	72,13%	56,93%	61,70%
SolidIR_48_v1	-7,62%	-26,85%	-14,42%	66,00%	6,48%	38,66%
SolidIR_48_v2	-6,23%	8,47%	2,91%	72,92%	31,70%	53,84%

Tabelle 35: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 1 (XP)

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen der Detail-Modell Berechnungen des zweiten Lastfalls im Bereich 2 (XN) lauten wie folgt:

	XN1			XN2			XN3		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-3,879	-9,008	16,377	-2,489	-8,075	14,155	-2,368	-7,491	13,149
SolidIR_24_v1	-4,172	-9,136	16,660	-2,673	-8,176	14,351	-2,534	-7,562	13,296
SolidIR_24_v2	-4,168	-9,120	16,633	-2,672	-8,179	14,355	-2,534	-7,590	13,342
SolidIR_48_v1	-3,900	-8,940	16,261	-2,509	-8,019	14,060	-2,388	-7,441	13,066
SolidIR_48_v2	-3,896	-8,957	16,288	-2,508	-8,034	14,087	-2,387	-7,456	13,092
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	7,54%	1,42%	1,73%	7,36%	1,26%	1,38%	7,01%	0,96%	1,11%
SolidIR_24_v2	7,44%	1,24%	1,56%	7,32%	1,29%	1,41%	7,01%	1,32%	1,47%
SolidIR_48_v1	0,53%	-0,76%	-0,71%	0,78%	-0,69%	-0,67%	0,82%	-0,67%	-0,64%
SolidIR_48_v2	0,43%	-0,57%	-0,55%	0,74%	-0,50%	-0,48%	0,81%	-0,46%	-0,44%

	XN4			XN5			XN6		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-2,190	-7,224	12,657	-2,031	-7,097	12,420	-1,883	-7,053	12,326
SolidIR_24_v1	-2,336	-7,272	12,757	-2,158	-7,129	12,490	-1,990	-7,077	12,379
SolidIR_24_v2	-2,336	-7,325	12,847	-2,159	-7,204	12,618	-1,992	-7,169	12,536
SolidIR_48_v1	-2,208	-7,175	12,573	-2,046	-7,044	12,330	-1,893	-6,993	12,223
SolidIR_48_v2	-2,209	-7,190	12,600	-2,048	-7,062	12,361	-1,896	-7,013	12,258
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	6,64%	0,66%	0,79%	6,21%	0,45%	0,56%	5,70%	0,34%	0,43%
SolidIR_24_v2	6,67%	1,39%	1,50%	6,28%	1,50%	1,59%	5,80%	1,64%	1,70%
SolidIR_48_v1	0,82%	-0,68%	-0,66%	0,74%	-0,75%	-0,72%	0,55%	-0,86%	-0,84%
SolidIR_48_v2	0,85%	-0,47%	-0,44%	0,82%	-0,50%	-0,48%	0,69%	-0,57%	-0,55%

	XN7			XN8			XN9		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-2,190	-7,224	12,657	-2,031	-7,097	12,420	-1,883	-7,053	12,326
SolidIR_24_v1	-2,336	-7,272	12,757	-2,158	-7,129	12,490	-1,990	-7,077	12,379
SolidIR_24_v2	-2,336	-7,325	12,847	-2,159	-7,204	12,618	-1,992	-7,169	12,536
SolidIR_48_v1	-2,208	-7,175	12,573	-2,046	-7,044	12,330	-1,893	-6,993	12,223
SolidIR_48_v2	-2,209	-7,190	12,600	-2,048	-7,062	12,361	-1,896	-7,013	12,258
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	6,64%	0,66%	0,79%	6,21%	0,45%	0,56%	5,70%	0,34%	0,43%
SolidIR_24_v2	6,67%	1,39%	1,50%	6,28%	1,50%	1,59%	5,80%	1,64%	1,70%
SolidIR_48_v1	0,82%	-0,68%	-0,66%	0,74%	-0,75%	-0,72%	0,55%	-0,86%	-0,84%
SolidIR_48_v2	0,85%	-0,47%	-0,44%	0,82%	-0,50%	-0,48%	0,69%	-0,57%	-0,55%

	XN10			XN11			XN12		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-1,733	-7,057	12,317	-1,582	-7,092	12,361	-1,426	-7,146	12,439
SolidIR_24_v1	-1,821	-7,080	12,365	-1,649	-7,117	12,409	-1,469	-7,170	12,485
SolidIR_24_v2	-1,824	-7,183	12,541	-1,652	-7,226	12,598	-1,474	-7,286	12,685
SolidIR_48_v1	-1,737	-6,985	12,191	-1,576	-7,001	12,203	-1,407	-7,030	12,237
SolidIR_48_v2	-1,741	-7,010	12,236	-1,581	-7,035	12,262	-1,414	-7,077	12,318
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	5,06%	0,33%	0,39%	4,22%	0,35%	0,39%	3,03%	0,34%	0,36%
SolidIR_24_v2	5,20%	1,77%	1,82%	4,42%	1,89%	1,92%	3,32%	1,96%	1,97%
SolidIR_48_v1	0,20%	-1,03%	-1,02%	-0,39%	-1,28%	-1,27%	-1,35%	-1,63%	-1,63%
SolidIR_48_v2	0,42%	-0,67%	-0,66%	-0,05%	-0,80%	-0,80%	-0,84%	-0,97%	-0,97%

	XN13			XN14			XN15		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-1,266	-7,212	12,540	-1,102	-7,286	12,656	-0,935	-7,364	12,781
SolidIR_24_v1	-1,283	-7,227	12,567	-1,089	-7,276	12,637	-0,889	-7,309	12,684
SolidIR_24_v2	-1,288	-7,354	12,787	-1,096	-7,424	12,894	-0,899	-7,494	13,005
SolidIR_48_v1	-1,230	-7,062	12,278	-1,045	-7,092	12,318	-0,855	-7,120	12,355
SolidIR_48_v2	-1,240	-7,129	12,395	-1,058	-7,190	12,487	-0,870	-7,262	12,601
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	1,31%	0,20%	0,21%	-1,21%	-0,15%	-0,15%	-4,83%	-0,74%	-0,75%
SolidIR_24_v2	1,74%	1,97%	1,97%	-0,54%	1,89%	1,88%	-3,79%	1,77%	1,75%
SolidIR_48_v1	-2,86%	-2,08%	-2,09%	-5,16%	-2,66%	-2,67%	-8,53%	-3,31%	-3,33%
SolidIR_48_v2	-2,09%	-1,15%	-1,16%	-4,03%	-1,32%	-1,33%	-6,88%	-1,39%	-1,40%

	XN16			XN17		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	XX	ZX	Von-Mises	XX	ZX	Von-Mises
Solid	-0,764	-7,444	12,911	-0,591	-7,525	13,043
SolidIR_24_v1	-0,690	-7,334	12,718	-0,499	-7,381	12,793
SolidIR_24_v2	-0,702	-7,572	13,129	-0,511	-7,682	13,315
SolidIR_48_v1	-0,663	-7,155	12,408	-0,479	-7,229	12,530
SolidIR_48_v2	-0,681	-7,356	12,755	-0,497	-7,497	12,994
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	-9,71%	-1,48%	-1,50%	-15,49%	-1,91%	-1,92%
SolidIR_24_v2	-8,16%	1,71%	1,69%	-13,42%	2,09%	2,08%
SolidIR_48_v1	-13,16%	-3,88%	-3,90%	-18,85%	-3,93%	-3,94%
SolidIR_48_v2	-10,84%	-1,19%	-1,21%	-15,81%	-0,36%	-0,38%

Tabelle 36: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 2 (XN)

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen der Detail-Modell Berechnungen des zweiten Lastfalls im Bereich 3 (YP) lauten wie folgt:

	YP1			YP2			YP3		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises
Solid	1,019	4,958	8,717	1,421	4,903	8,619	1,534	4,823	8,489
SolidIR_24_v1	1,177	4,642	8,193	1,543	4,616	8,149	1,636	4,574	8,081
SolidIR_24_v2	1,186	4,596	8,111	1,549	4,596	8,116	1,641	4,578	8,088
SolidIR_48_v1	1,099	4,763	8,392	1,485	4,709	8,302	1,596	4,631	8,175
SolidIR_48_v2	1,100	4,755	8,380	1,487	4,703	8,291	1,598	4,626	8,167
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	15,49%	-6,36%	-6,02%	8,60%	-5,85%	-5,45%	6,65%	-5,16%	-4,81%
SolidIR_24_v2	16,38%	-7,30%	-6,96%	9,02%	-6,25%	-5,84%	6,99%	-5,07%	-4,73%
SolidIR_48_v1	7,84%	-3,93%	-3,73%	4,55%	-3,95%	-3,68%	4,08%	-3,99%	-3,70%
SolidIR_48_v2	7,90%	-4,08%	-3,87%	4,66%	-4,08%	-3,80%	4,21%	-4,09%	-3,80%

	YP4			YP5			YP6		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises
Solid	1,617	4,768	8,410	1,658	4,710	8,315	1,668	4,648	8,210
SolidIR_24_v1	1,697	4,556	8,061	1,718	4,533	8,022	1,709	4,503	7,966
SolidIR_24_v2	1,702	4,580	8,101	1,723	4,574	8,090	1,714	4,556	8,055
SolidIR_48_v1	1,676	4,575	8,094	1,712	4,515	7,996	1,717	4,450	7,884
SolidIR_48_v2	1,678	4,572	8,090	1,715	4,515	7,996	1,720	4,454	7,890
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	5,00%	-4,45%	-4,15%	3,64%	-3,75%	-3,52%	2,47%	-3,12%	-2,96%
SolidIR_24_v2	5,31%	-3,94%	-3,67%	3,94%	-2,90%	-2,71%	2,78%	-1,99%	-1,88%
SolidIR_48_v1	3,65%	-4,05%	-3,75%	3,30%	-4,14%	-3,84%	2,99%	-4,26%	-3,97%
SolidIR_48_v2	3,80%	-4,11%	-3,80%	3,46%	-4,14%	-3,84%	3,15%	-4,19%	-3,89%

	YP7			YP8			YP9		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises
Solid	1,658	4,583	8,094	1,637	4,516	7,974	1,610	4,448	7,852
SolidIR_24_v1	1,682	4,464	7,892	1,646	4,416	7,801	1,605	4,358	7,692
SolidIR_24_v2	1,687	4,526	7,996	1,650	4,485	7,917	1,608	4,434	7,821
SolidIR_48_v1	1,703	4,380	7,759	1,676	4,305	7,624	1,642	4,225	7,480
SolidIR_48_v2	1,705	4,388	7,772	1,678	4,319	7,647	1,643	4,248	7,517
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	1,44%	-2,60%	-2,50%	0,51%	-2,22%	-2,18%	-0,31%	-2,03%	-2,04%
SolidIR_24_v2	1,74%	-1,24%	-1,21%	0,79%	-0,69%	-0,72%	-0,10%	-0,33%	-0,40%
SolidIR_48_v1	2,67%	-4,43%	-4,14%	2,34%	-4,67%	-4,40%	2,00%	-5,01%	-4,75%
SolidIR_48_v2	2,82%	-4,26%	-3,98%	2,47%	-4,36%	-4,10%	2,06%	-4,51%	-4,27%

	YP10			YP11			YP12		
	Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]		
	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises
Solid	1,580	4,381	7,730	1,550	4,315	7,610	1,519	4,250	7,493
SolidIR_24_v1	1,564	4,289	7,565	1,524	4,206	7,416	1,489	4,110	7,245
SolidIR_24_v2	1,565	4,374	7,709	1,523	4,306	7,584	1,484	4,233	7,452
SolidIR_48_v1	1,606	4,141	7,326	1,571	4,050	7,163	1,538	3,955	6,993
SolidIR_48_v2	1,605	4,175	7,383	1,567	4,102	7,250	1,530	4,033	7,123
	Abweichungen [%]			Abweichungen [%]			Abweichungen [%]		
SolidIR_24_v1	-1,04%	-2,11%	-2,14%	-1,63%	-2,51%	-2,55%	-2,01%	-3,29%	-3,31%
SolidIR_24_v2	-0,93%	-0,17%	-0,28%	-1,70%	-0,21%	-0,34%	-2,32%	-0,41%	-0,55%
SolidIR_48_v1	1,66%	-5,48%	-5,23%	1,37%	-6,13%	-5,87%	1,22%	-6,95%	-6,68%
SolidIR_48_v2	1,61%	-4,70%	-4,49%	1,13%	-4,93%	-4,73%	0,71%	-5,11%	-4,94%

	YP13			YP14			YP15		
	Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]		
	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises
Solid	1,490	4,187	7,379	1,462	4,126	7,269	1,434	4,067	7,162
SolidIR_24_v1	1,460	4,004	7,058	1,440	3,906	6,886	1,450	3,861	6,808
SolidIR_24_v2	1,451	4,160	7,321	1,429	4,106	7,224	1,449	4,099	7,214
SolidIR_48_v1	1,511	3,860	6,824	1,492	3,782	6,685	1,504	3,761	6,651
SolidIR_48_v2	1,498	3,974	7,014	1,476	3,941	6,953	1,494	3,962	6,990
	Abweichungen [%]			Abweichungen [%]			Abweichungen [%]		
SolidIR_24_v1	-2,02%	-4,37%	-4,36%	-1,52%	-5,33%	-5,27%	1,11%	-5,08%	-4,93%
SolidIR_24_v2	-2,61%	-0,64%	-0,78%	-2,24%	-0,50%	-0,62%	1,00%	0,79%	0,74%
SolidIR_48_v1	1,39%	-7,82%	-7,53%	0,96%	-4,49%	-4,34%	4,85%	-7,52%	-7,13%
SolidIR_48_v2	0,54%	-5,10%	-4,94%	0,96%	-4,49%	-4,34%	4,19%	-2,59%	-2,39%

	YP16			YP17		
	Spannungen [N/mm ²]			Spannungen [N/mm ²]		
	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises
Solid	1,407	4,010	7,058	1,380	3,955	6,959
SolidIR_24_v1	1,414	3,958	6,982	2,577	4,142	7,600
SolidIR_24_v2	1,431	4,196	7,391	2,683	4,278	7,831
SolidIR_48_v1	1,467	3,877	6,854	2,667	4,060	7,481
SolidIR_48_v2	1,472	4,084	7,208	2,752	4,184	7,689
	Abweichungen [%]			Abweichungen [%]		
SolidIR_24_v1	0,52%	-1,30%	-1,08%	86,71%	4,72%	9,21%
SolidIR_24_v2	1,70%	4,64%	4,72%	94,38%	8,17%	12,54%
SolidIR_48_v1	4,23%	-3,32%	-2,90%	93,22%	2,65%	7,50%
SolidIR_48_v2	4,63%	1,85%	2,13%	99,38%	5,77%	10,50%

Tabelle 37: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 3 (YP)

Die relevanten Spannungsergebnisse und Abweichungen der Detail-Modell Berechnungen des zweiten Lastfalls im Bereich 4 (YN) lauten wie folgt:

	YN1			YN2			YN3		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises
Solid	-3,965	-10,750	19,267	-2,509	-10,127	17,677	-2,390	-9,716	16,966
SolidIR_24_v1	-4,195	-10,719	19,268	-2,642	-10,081	17,611	-2,516	-9,663	16,890
SolidIR_24_v2	-4,198	-10,730	19,287	-2,650	-10,097	17,639	-2,526	-9,688	16,933
SolidIR_48_v1	-3,985	-10,601	19,015	-2,530	-9,978	17,423	-2,414	-9,567	16,713
SolidIR_48_v2	-3,978	-10,607	19,025	-2,526	-9,982	17,429	-2,411	-9,570	16,718
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	5,81%	-0,29%	0,00%	5,33%	-0,45%	-0,37%	5,27%	-0,54%	-0,45%
SolidIR_24_v2	5,89%	-0,19%	0,10%	5,64%	-0,29%	-0,21%	5,70%	-0,29%	-0,19%
SolidIR_48_v1	0,51%	-1,39%	-1,31%	0,86%	-1,47%	-1,44%	1,00%	-1,53%	-1,49%
SolidIR_48_v2	0,33%	-1,33%	-1,26%	0,70%	-1,43%	-1,40%	0,86%	-1,50%	-1,46%

	YN4			YN5			YN6		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises
Solid	-2,258	-9,521	16,608	-2,177	-9,405	16,401	-2,128	-9,329	16,264
SolidIR_24_v1	-2,372	-9,462	16,518	-2,280	-9,342	16,302	-2,221	-9,263	16,159
SolidIR_24_v2	-2,384	-9,500	16,583	-2,293	-9,393	16,391	-2,234	-9,325	16,268
SolidIR_48_v1	-2,283	-9,369	16,348	-2,202	-9,248	16,132	-2,152	-9,164	15,982
SolidIR_48_v2	-2,280	-9,373	16,354	-2,199	-9,253	16,141	-2,150	-9,173	15,997
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	5,06%	-0,62%	-0,54%	4,75%	-0,67%	-0,60%	4,35%	-0,71%	-0,65%
SolidIR_24_v2	5,60%	-0,23%	-0,15%	5,35%	-0,13%	-0,06%	4,98%	-0,04%	0,02%
SolidIR_48_v1	1,10%	-1,60%	-1,56%	1,15%	-1,67%	-1,64%	1,15%	-1,77%	-1,73%
SolidIR_48_v2	0,98%	-1,56%	-1,53%	1,04%	-1,62%	-1,58%	1,05%	-1,67%	-1,64%

	YN7			YN8			YN9		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises
Solid	-2,094	-9,272	16,162	-2,068	-9,224	16,077	-2,045	-9,181	16,000
SolidIR_24_v1	-2,176	-9,204	16,052	-2,139	-9,153	15,962	-2,104	-9,104	15,874
SolidIR_24_v2	-2,189	-9,275	16,177	-2,150	-9,232	16,099	-2,113	-9,190	16,023
SolidIR_48_v1	-2,118	-9,096	15,862	-2,091	-9,035	15,754	-2,067	-8,975	15,648
SolidIR_48_v2	-2,116	-9,111	15,887	-2,088	-9,058	15,793	-2,062	-9,011	15,709
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	3,89%	-0,73%	-0,68%	3,40%	-0,76%	-0,71%	2,91%	-0,83%	-0,79%
SolidIR_24_v2	4,51%	0,04%	0,09%	3,95%	0,09%	0,14%	3,35%	0,10%	0,14%
SolidIR_48_v1	1,13%	-1,89%	-1,86%	1,11%	-2,05%	-2,01%	1,10%	-2,24%	-2,20%
SolidIR_48_v2	1,01%	-1,73%	-1,70%	0,95%	-1,80%	-1,76%	0,87%	-1,85%	-1,82%

	YN10			YN11			YN12		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises
Solid	-2,021	-9,140	15,928	-1,995	-9,101	15,859	-1,966	-9,063	15,790
SolidIR_24_v1	-2,071	-9,050	15,777	-2,038	-8,985	15,663	-2,007	-8,910	15,531
SolidIR_24_v2	-2,076	-9,147	15,944	-2,038	-9,100	15,861	-2,002	-9,052	15,775
SolidIR_48_v1	-2,044	-8,913	15,540	-2,021	-8,850	15,429	-2,000	-8,789	15,322
SolidIR_48_v2	-2,036	-8,968	15,633	-2,009	-8,931	15,567	-1,982	-8,905	15,518
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	2,48%	-0,99%	-0,95%	2,17%	-1,27%	-1,23%	2,08%	-1,69%	-1,64%
SolidIR_24_v2	2,75%	0,07%	0,10%	2,19%	-0,01%	0,01%	1,79%	-0,12%	-0,10%
SolidIR_48_v1	1,15%	-2,48%	-2,44%	1,33%	-2,76%	-2,71%	1,71%	-3,02%	-2,96%
SolidIR_48_v2	0,78%	-1,88%	-1,85%	0,73%	-1,87%	-1,84%	0,80%	-1,75%	-1,72%

	YN13			YN14			YN15		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises
Solid	-1,936	-9,025	15,722	-1,902	-8,988	15,654	-1,867	-8,950	15,587
SolidIR_24_v1	-1,982	-8,835	15,398	-1,964	-8,792	15,323	-1,983	-8,856	15,438
SolidIR_24_v2	-1,969	-9,010	15,699	-1,947	-8,995	15,671	-1,976	-9,038	15,751
SolidIR_48_v1	-1,984	-8,744	15,242	-1,974	-8,744	15,242	-2,000	-8,858	15,442
SolidIR_48_v2	-1,958	-8,897	15,503	-1,943	-8,927	15,553	-1,977	-9,019	15,719
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	2,40%	-2,11%	-2,06%	3,21%	-2,18%	-2,12%	6,17%	-1,05%	-0,96%
SolidIR_24_v2	1,73%	-0,17%	-0,15%	2,33%	0,08%	0,11%	5,82%	0,98%	1,06%
SolidIR_48_v1	2,48%	-3,12%	-3,05%	3,73%	-2,71%	-2,63%	7,10%	-1,04%	-0,93%
SolidIR_48_v2	1,16%	-1,43%	-1,40%	2,12%	-0,68%	-0,65%	5,87%	0,77%	0,85%

	YN16			YN17		
	<u>Spannungen [N/mm²]</u>			<u>Spannungen [N/mm²]</u>		
	YY	YZ	Von-Mises	YY	YZ	Von-Mises
Solid	-1,831	-8,913	15,520	-1,793	-8,876	15,453
SolidIR_24_v1	-1,928	-9,125	15,938	-3,511	-9,303	16,979
SolidIR_24_v2	-1,944	-9,227	16,119	-3,647	-9,334	17,058
SolidIR_48_v1	-1,950	-9,160	16,001	-3,554	-9,334	17,038
SolidIR_48_v2	-1,948	-9,247	16,153	-3,655	-9,367	17,121
	<u>Abweichungen [%]</u>			<u>Abweichungen [%]</u>		
SolidIR_24_v1	5,30%	2,37%	2,70%	95,83%	4,81%	9,88%
SolidIR_24_v2	6,19%	3,52%	3,86%	103,44%	5,16%	10,39%
SolidIR_48_v1	6,50%	2,77%	3,10%	98,26%	5,15%	10,26%
SolidIR_48_v2	6,38%	3,74%	4,08%	103,90%	5,53%	10,80%

Tabelle 38: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 4 (YN)

10.2 Behandelte Schnittgrößen

Wie im Kapitel 4.1 ausführlich beschrieben stellt das Auslesen der Grid-Point-Forces und Grid-Point-Moments aus einem globalen Strukturmodell die zielführende Methode dar.

Bevor jedoch diese Methode verifiziert wurde, wurden noch andere Möglichkeiten der Schnittgrößen-Ermittlung behandelt und untersucht.

Dieses Kapitel zeigt nun zwei weitere Schnittgrößen, Stresses bzw. Displacements – Rotations, die ebenfalls untersucht wurden.

10.2.1 Stresses

Zunächst wurde die Methode, mittels der, aus einem globalen Strukturmodell ermittelten „Stresses“ (Spannungen) auf die realen Spannungen in den Kerben und Wurzeln des Schweißnahtstoßes zurückzuschließen untersucht.

Die Methode sieht dabei folgendermaßen aus. Die Spannungen werden an der zu bewertenden Stelle aus dem globalen Strukturmodell komponentenweise ausgelesen und auf ein Detail-Modell mittels Zug/Druck- bzw. Schubbelastung übertragen.

Der große Vorteil dabei ist, dass die Spannungen an jeder beliebigen Stelle im Strukturmodell, auch innerhalb eines zweidimensionalen Schalenelements genau ermittelt werden können, bzw. ohne weitere Interpolation aus dem UGS NX Nastran Solver ausgegeben werden. Daher wären in dieser Hinsicht keine speziellen Modellierungsvorschriften des globalen Strukturmodells erforderlich.

Ein Problem stellt jedoch die Tatsache dar, dass die Schubspannungen normal auf die Oberfläche des Schalen-Elements (als σ_{yy} in Abbildung dargestellt) nicht berechnet werden.

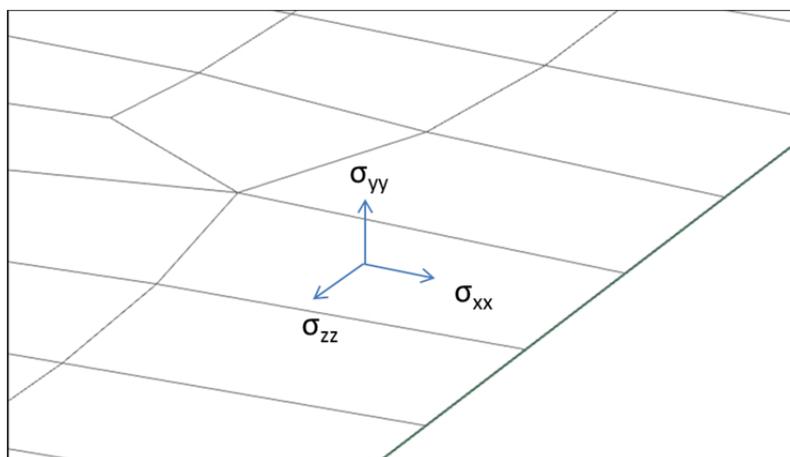


Abbildung 89: Spannungen am Schalenelement

Daher muss eine Möglichkeit gefunden werden, wie diese fehlende Spannung berücksichtigt werden kann.

10.2.1.1 Querkraftausgleich

Um die fehlenden Spannungen normal auf die Schalen zu berücksichtigen wird ein sogenannter Querkraftausgleich erzeugt.

Das Prinzip dieses Querkraftausgleichs wird in der folgenden eindimensionalen Abbildung gezeigt:

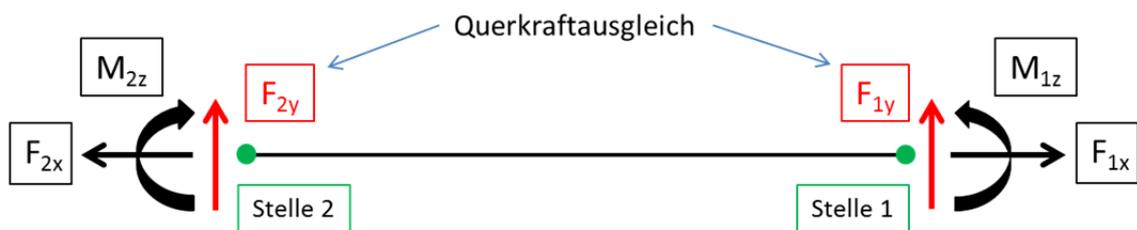


Abbildung 90: Prinzip – Querkraftausgleich, Kragträger

Diese Abbildung zeigt vereinfacht den Detail-Ausschnitt, der das 3D-Submodell darstellen soll. Die Stellen 1 und 2 sind dabei die Schnittpunkte (bzw. Flächen) an denen die Spannungen im globalen 2D-Strukturmodell ausgelesen werden.

Die Normalkräfte (F_{1x} , F_{2x}) und die Momente (M_{1x} , M_{2x}) an den Stellen 1 und 2 werden über den Normalspannungsverlauf in der Schnittfläche ermittelt (Achtung: das Koordinatensystem in der folgenden Grafik stimmt nicht mit dem Koordinatensystem der 3D-Submodelle überein, die x-Richtung ist dieselbe, die y- und z-Richtung sind vertauscht).

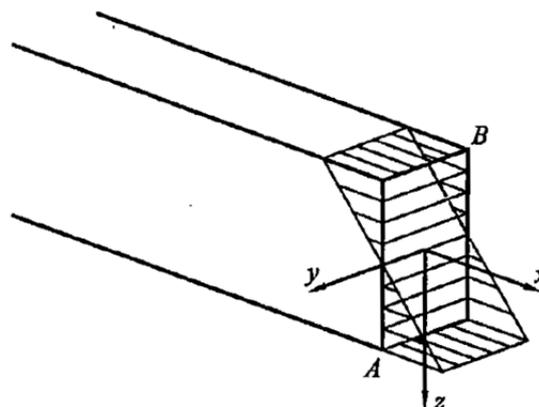


Abbildung 91: Normalspannungsverlauf Schnittfläche (Grafik: Celigoj)

Die resultierenden Momente bzw. Kräfte, die durch die Normal-Spannungen an der Oberkante B und Unterkante A erzeugt werden, werden anhand folgender Gleichung mit Berücksichtigung des Biege­widerstandsmomentes W_z ermittelt:

$$M_z = \sigma_{xx} W_z \quad (\text{Glg. 8})$$

Das Biege­widerstandsmoment W_z setzt sich wie folgt zusammen:

$$W_z = \frac{I_{zz}}{|y_1|} = \frac{I_{zz}}{\frac{h}{2}} = \frac{h^2 b}{6} \quad (\text{Glg. 9})$$

Anschließend werden die fehlenden Querkräfte (F_{1y} , F_{2y}) über das Kräfte- und Momenten-Gleichgewicht ermittelt. Dabei sind die daraus resultierenden Querkräfte vom Betrag her gleich groß, jedoch mit unterschiedlichem Vorzeichen versehen, um das fehlende Moment auszugleichen.

Die folgende Excel-Tabelle zeigt diese Berechnung der fehlenden Querkräfte für ein 3D-Submodell mit 2 relevanten Schnit­tufern:

Stelle 1: positive x-Richtung				Stelle 2: negative x-Richtung							
h_1	=	10 mm		h_2	=	10 mm					
b_1	=	30 mm		b_2	=	30 mm					
σ_{T1}	=	-63 N/mm ²	σ_{Tn1}	=	-62 N/mm ²	σ_{T2}	=	-97 N/mm ²	σ_{Tn2}	=	-98 N/mm ²
σ_{B1}	=	61 N/mm ²	σ_{Bn1}	=	62 N/mm ²	σ_{B2}	=	99 N/mm ²	σ_{Bn2}	=	98 N/mm ²
σ_{mem1}	=	-1 N/mm ²		σ_{mem2}	=	1 N/mm ²					
F_{1x}	=	-300 N		F_{2x}	=	-300 N					
M_{1z}	=	31000 Nmm		M_{2z}	=	-49000 Nmm					
l_{1x}	=	30 mm		l_{2x}	=	30 mm					
			M_r	=	-18000						
F_{1y}	=	300		F_{2y}	=	-300					

Tabelle 39: Berechnung Querkraftausgleich für 2 Schnit­tufer

Die erforderlichen Eingabewerte sind in dieser Tabelle grün hinterlegt. Die daraus resultierenden Kräfte und Momente sind rot hinterlegt. Die Felder mit gelbem Hintergrund sind Zwischenrechen­schritte.

Die einzelnen Terme dieser Berechnung werden im folgenden Absatz genauer erklärt:

h_1, h_2	Höhe des Schnittufers
b_1, b_2	Breite des Schnittufers
σ_{T1}, σ_{T2}	Normalspannungen an der Oberseite des Schnittufers
σ_{B1}, σ_{B2}	Normalspannungen an der Unterseite des Schnittufers
l_{1x}, l_{2x}	Abstand des Schnittufers von der Mitte des Ausschnittes
$\sigma_{mem1}, \sigma_{mem2}$	Membranspannung am Schnittufer
$\sigma_{Tn1}, \sigma_{Tn2}$	Schalenbiegespannung an der Oberseite des Schnittufers
$\sigma_{Bn1}, \sigma_{Bn2}$	Schalenbiegespannung an der Unterseite des Schnittufers
M_r	aus Kräfte- / Momenten-Gleichgewicht bestimmtes fehlendes Moment
F_{1x}, F_{2x}	Normalkraft am Schnittufer
M_{1x}, M_{2x}	Moment am Schnittufer
F_{1y}, F_{2y}	fehlende Querkraft am Schnittufer

Die berechneten fehlenden Querkräfte werden nun zusammen mit den, aus dem globalen Strukturmodell ermittelten Spannungen auf das 3D-Schweißnahtsubmodell aufgebracht.

Das Aufbringen der Spannungen erfolgt mittels Zug/Druck- bzw. Schubbelastung. Dabei werden die Spannungen an den Schnittstellen im globalen Strukturmodell komponentenweise ausgelesen und in ein Excel-File übertragen. Die Spannungs-Daten dieses Excel-Files werden anschließend mittels einer „Field“-Funktion als Druckkräfte auf die Seiten- und Stirnflächen des 3D-Submodells aufgebracht.

Da nicht jeder Punkt der jeweiligen Seiten- bzw. Stirnfläche aus dem globalen Strukturmodell erfasst werden kann, werden die Druckkräfte der Bereiche zwischen den ausgelesenen Punkten mittels der Funktion „Delauny Accurate“ über die verbleibende Fläche interpoliert.

Diese Vorgehensweise wird in den folgenden Kapiteln für einen Kragträger und einen T-Stoß gezeigt.

10.2.1.2 Kragträger

Die ersten Untersuchungen dieser Methode erfolgten an einem Kragträger Modell.

Dieser Kragträger wurde einseitig fix eingespannt und an der gegenüberliegenden Seite wurden verschiedene Belastungen aufgebracht.

Anschließend wurden die Spannungen im betrachteten Ausschnitt aus dem 2D-Strukturmodell komponentenweise ausgelesen und auf ein 3D-Submodell mittels Zug/Druck- bzw. Schubbelastung aufgebracht.

Die folgende Abbildung zeigt die Vorgehensweise am Kragträgermodell:

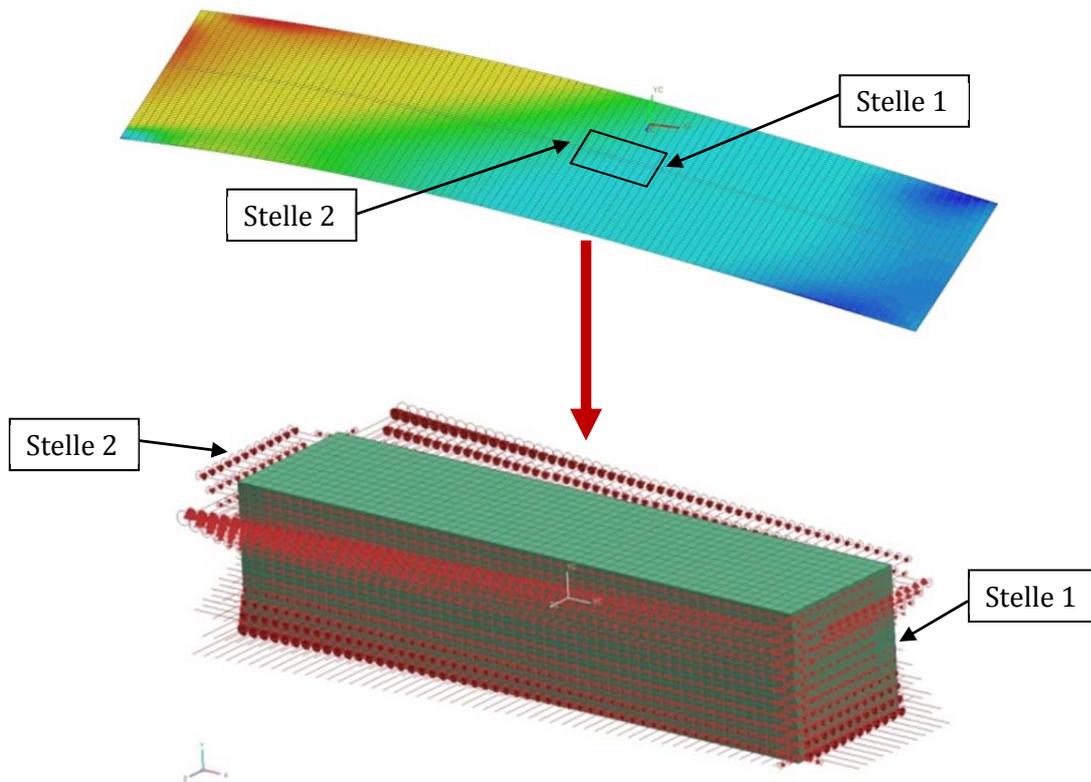


Abbildung 92: Vorgehensweis Kragträger-Modell, Druckbelastung

Die fehlenden Querkräfte an den Stellen 1 und 2 wurden, wie im vorigen Kapitel gezeigt mit Hilfe des Kräfte- und Momenten-Gleichgewichts berechnet und ebenfalls auf das 3D-Submodell aufgebracht.

Anschließend wurde dieses 3D-Submodell mit der Funktion „Inertia Relief“ berechnet. Die, aus der Simulation ermittelten Spannungsergebnisse wurden mit den Spannungsergebnissen des 2D-Strukturmodells (das als Referenz dient) verglichen. Der Vergleich erfolgte jeweils an mehreren Stellen des 3D-Detail-Modells.

Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft die Spannungsergebnisse eines Knotenpunktes (15/6/0) des 3D-Submodells:

	X Coord	Y Coord	Z Coord	XX	YY	ZZ	XY	YZ	ZX	Von-Mises	
Ergebnis: Schalenmodell (Referenz)	Shell	15	6	0	38,05	0,00	2,48	0,00	0,00	5,21	37,97
Ergebnis: Detail Modell (ohne Querkraft)	Solid_IR	15	6	0	36,60	-0,01	2,50	0,00	0,00	5,20	36,55
Ergebnis: Detail Modell (mit Querkraft)	Solid_IR+Fy	15	6	0	37,80	0,00	2,53	0,00	0,00	5,20	37,69
Abweichung: Shell - Solid_IR				3,83%	#DIV/0!	0,69%	#DIV/0!	#DIV/0!	0,18%	3,74%	
Abweichung: Shell - Solid_IR+Fy				0,68%	#DIV/0!	2,01%	#DIV/0!	#DIV/0!	0,18%	0,72%	

Tabelle 40: Spannungsergebnisse eines Punktes am Kragträgermodell

In der obersten Zeile (Shell, grün hinterlegt) sind die Spannungsergebnisse des 2D-Strukturmodells an diesem Punkt angegeben. Diese Ergebnisse dienen als Referenz-Werte für den Vergleich mit den Detail-Modellen.

Die mittlere Zeile (Solid_IR, blau hinterlegt) zeigt die Spannungsergebnisse einer Simulation des 3D-Submodells ohne Querkraftausgleich.

Die dritte Zeile (Solid_IR+Fy, orange hinterlegt) zeigt die Spannungsergebnisse einer Simulation des 3D-Submodells mit Querkraftausgleich.

Die untersten beiden Zeilen zeigen jeweils die Abweichungen in Prozent der 3D-Submodelle vom 2D-Strukturmodell.

Man erkennt, dass mit Hilfe des Querkraftausgleiches die Abweichungen der Von-Mises-Spannung in diesem Knoten-Punkt von 3,74% (ohne Querkraftausgleich) auf 0,72% (mit Querkraftausgleich) reduziert werden.

Die Verifikation dieser Methode des Aufbringens der aus einem 2D-Strukturmodell ermittelten Spannungen auf ein 3D-Submodell mittels Druckkräften wurde in verschiedenen Lastfällen durchgeführt. Die dabei erzielten Abweichungen sind im Bereich von unter 5% gelegen. Somit kann die Verifikation der Methode am Kragträgermodell als gelungen angesehen werden.

10.2.1.3 T-Stoß

Da die Verifikation der Methode am Kragträgermodell gelungen ist, wurde im nächsten Schritt ein T-Stoß modelliert, an dem das Aufbringen der, aus dem 2D-Strukturmodell ermittelten Spannungsergebnissen mittels Zug/Druck- bzw. Schubbelastung getestet wurde.

Im Vergleich zum Kragträger-Modell weist das T-Stoß-Modell eine 3. Stelle auf, die für den Querkraftausgleich berücksichtigt werden muss.

Das Prinzip dieses Querkraftausgleiches am T-Stoß-Modell wird in der folgenden eindimensionalen Abbildung gezeigt:

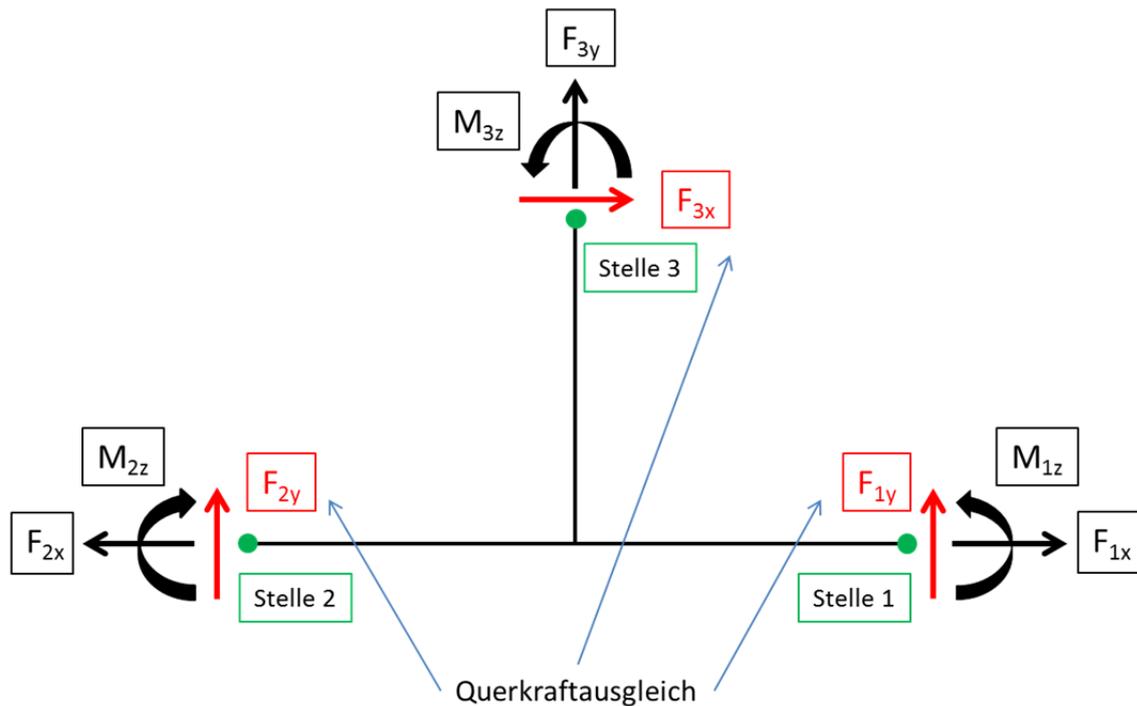


Abbildung 93: Prinzip - Querkraftausgleich, T-Stoß

Wie schon beim Querkraftausgleich am Kragträger-Modell werden auch am T-Stoß-Modell die fehlenden Querkräfte mittels dem Kräfte- und Momenten-Gleichgewicht bestimmt.

Zur Berechnung der fehlenden Querkräfte dient wieder ein Excel-File, diesmal mit 3 relevanten Schnittufern:

Stelle 1: positive x-Richtung		Stelle 2: negative x-Richtung		Stelle 3: positive y-Richtung	
t_1	= 12 mm	t_2	= 12 mm	t_3	= 12 mm
b_1	= 12 mm	b_2	= 12 mm	b_3	= 12 mm
σ_{T1}	= -63 N/mm ²	σ_{T2}	= -97 N/mm ²	σ_{T3}	= 55 N/mm ²
σ_{B1}	= 61 N/mm ²	σ_{B2}	= 99 N/mm ²	σ_{B3}	= -53 N/mm ²
σ_{Tn1}	= -62 N/mm ²	σ_{Tn2}	= -98 N/mm ²	σ_{Tn3}	= 54 N/mm ²
σ_{Bn1}	= 62 N/mm ²	σ_{Bn2}	= 98 N/mm ²	σ_{Bn3}	= -54 N/mm ²
σ_{mem1}	= -1 N/mm ²	σ_{mem2}	= 1 N/mm ²	σ_{mem3}	= 1 N/mm ²
F_{1x}	= -144 N	F_{2x}	= -144 N	F_{3y}	= 144 N
M_{1z}	= 17856 Nmm	M_{2z}	= -28224 Nmm	M_{3z}	= 15552 Nmm
l_{1x}	= 30 mm	l_{2x}	= 30 mm	l_{3y}	= 30 mm
F_{1y}	= -14,40 N	F_{2y}	= -129,60 N	F_{3x}	= 288 N

Tabelle 41: Berechnung Querkraftausgleich für 3 Schnittufer

Die Eingabewerte für diese Berechnung (geometrische Abmessungen, Spannungen aus 2D-Strukturmodell) sind grün hinterlegt. Die daraus resultierenden fehlenden Querkräfte, die auf das 3D-Submodell aufgebracht werden sind rot hinterlegt.

Die einzelnen Terme dieser Berechnung sind ident mit jenen des Querkraftausgleiches für das Kragträger-Modell.

Wie zuvor beim Kragträger-Modell werden nun die, aus dem 2D-Strukturmodell ermittelten Spannungen zusammen mit den berechneten fehlenden Querkräften auf ein 3D-Submodell des T-Stoßes aufgebracht und mittels der Funktion „Inertia Relief“ berechnet.

Die folgende Abbildung zeigt die Vorgehensweise am T-Stoß-Modell:

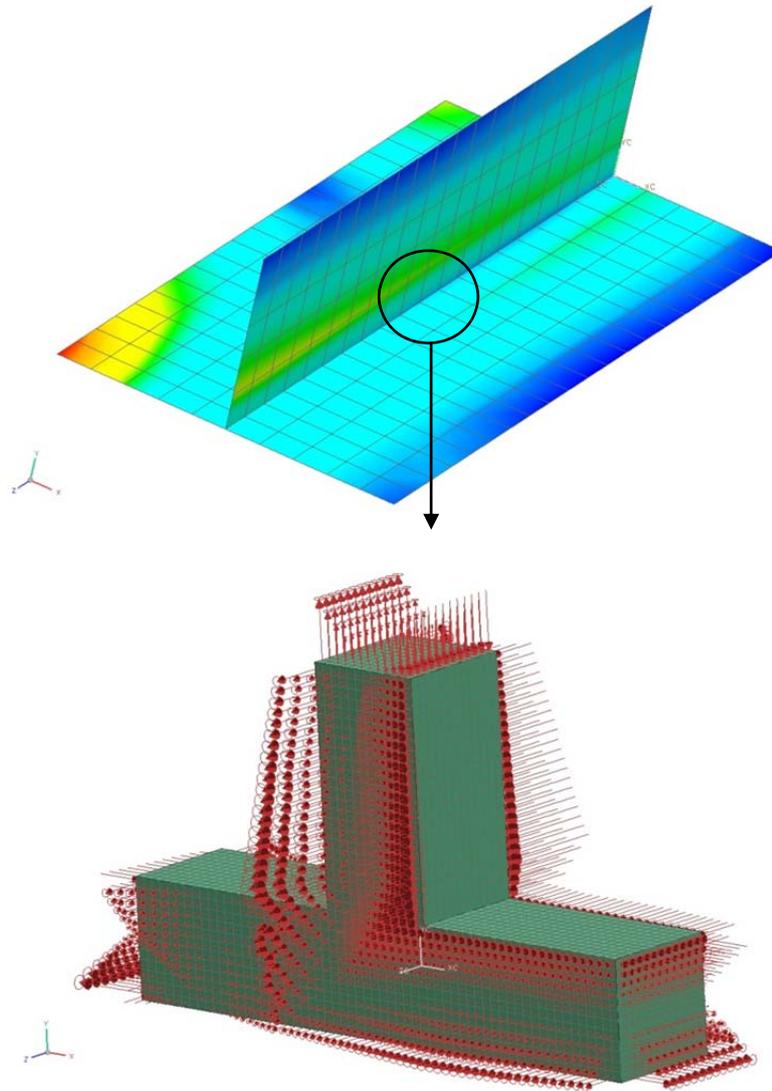


Abbildung 94: Vorgehensweise T-Stoß-Modell, Druckbelastung

Für die Verifikation der Methode wurde dieses 2D-Strukturmodell des T-Stoßes in verschiedenen Lastfällen simuliert und die daraus ermittelten Spannungen auf das 3D-Submodell übertragen. Die aus den anschließend durchgeführten Inertia Relief Berechnungen ermittelten Spannungsergebnisse wurden wiederum mit jenen des 2D-Strukturmodells verglichen. Dieser Vergleich erfolgte jeweils an mehreren Stellen bzw. Knotenpunkten des Detail-Modells.

Das Ergebnis für eine reine Zug-Druck und Biegebelastung zeigte, dass die Abweichungen der Spannungsergebnisse zwischen dem 2D-Referenz-Modell und dem 3D-Submodell wie schon zuvor beim Kragträgermodell sehr gering waren. Die Methode konnte also dahingehend verifiziert werden.

Probleme entstanden jedoch bei Belastungen auf Schub. Die Abweichungen der Spannungsergebnisse zwischen dem 2D-Referenz-Modell und dem 3D-Submodell waren erheblich. Das Ergebnis der Abweichungen betrug stellenweise 10% bis über 30%. Selbst mit Hilfe des Querkraftausgleiches konnte der berechnete Spannungs-Unterschied nicht gesenkt werden. An manchen Stellen wurden die Abweichungen mit Aufbringen des Querkraftausgleiches sogar größer.

Die Methode konnte dadurch am T-Stoß-Modell für Schubbelastung nicht verifiziert werden.

Die Schlussfolgerung aus den vorangegangenen Berechnungen ist daher, dass die Methode des Aufbringens der aus einem 2D-Strukturmodell ermittelten Spannungen auf ein 3D-Submodell mittels Druckkräften nicht zielführend ist und für die weiteren Anwendungen nicht in Frage kommt.

10.2.2 Displacements – Rotations

Die Methode, mittels der, aus einem globalen Strukturmodell ermittelten „Displacements“ (Verschiebungen) und „Rotations“ (Verdrehungen) auf die realen Spannungen in den Kerben und Wurzeln des Schweißnahtstoßes zurückzuschließen wurde ebenfalls untersucht.

Der große Vorteil dabei ist, dass die Verschiebungen und Verdrehungen an jeder beliebigen Stelle im Strukturmodell, auch innerhalb eines zweidimensionalen Schalenelements genau ermittelt werden können, bzw. ohne weitere Interpolation aus dem UGS NX Nastran Solver ausgegeben werden. Daher wären in dieser Hinsicht keine speziellen Modellierungsvorschriften des globalen Strukturmodells erforderlich.

10.2.2.1 Problem der Steifigkeiten

Das größte Problem, das sich durch die Verwendung von Verschiebungen und Verdrehungen ergibt ist, dass ein 3D-Schweißnahtsubmodell im Vergleich zu einem globalen Strukturmodell unterschiedliche Steifigkeiten aufweist.

Da das detaillierte Submodell die Schweißnaht besser abbildet als ein globales Strukturmodell, sind die Steifigkeiten in Gurt- und Stegblech verschieden und generell anders als bei einem Strukturmodell, wo der Schweißnahtstoß als Zusammenschluss dreier Elementkanten ausgeführt wird und die Steifigkeiten in Gurt- und Stegblech gleich sind.

Anhand der folgenden Abbildungen werden diese unterschiedlichen Steifigkeiten im Gurt- bzw. Stegblech gezeigt:

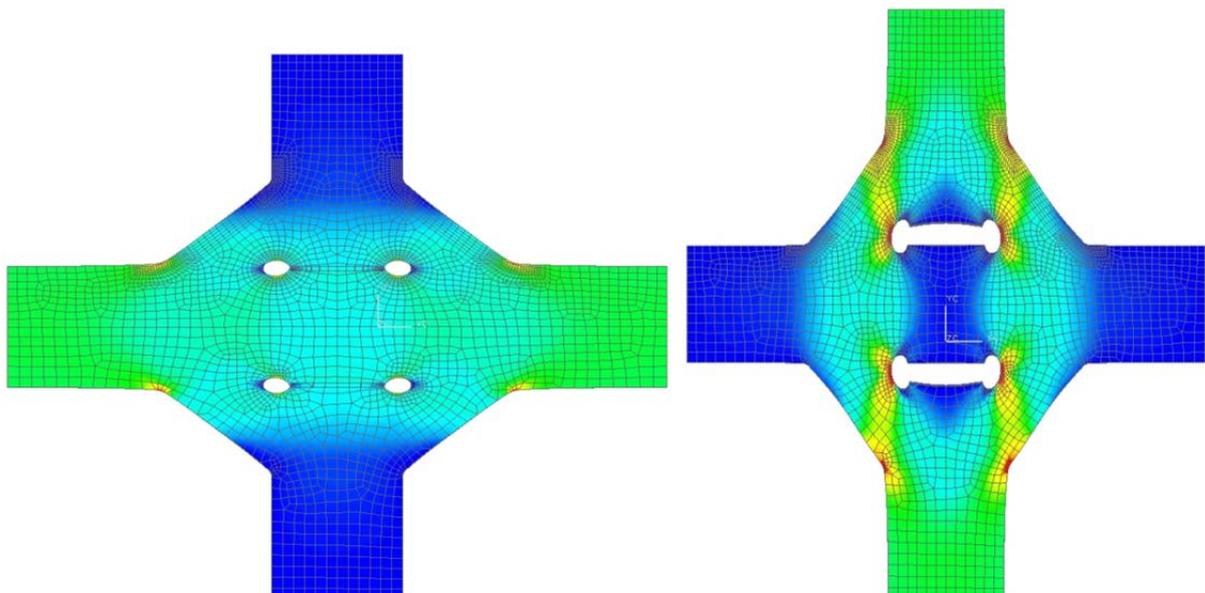


Abbildung 95: Steifigkeitsunterschiede Kreuzstoß

In den beiden Berechnungen wurde jeweils dieselbe Kraft aufgebracht, im linken Bild nur in Stegblechrichtung und im rechten Bild nur in Gurtblechrichtung. Die Deformation wurde auf 10% eingestellt um die Unterschiede zu verdeutlichen.

Man erkennt sehr deutlich, dass die Steifigkeiten in Steg- bzw. Gurtblech keinesfalls gleich sein können, was bei einem globalen Strukturmodell schon der Fall ist.

Da die Verschiebungen und Verdrehungen nicht direkt auf das 3D-Schweißnahtsubmodell aufgebracht werden können, müssen diese mithilfe einer Transformationsmatrix in Kräfte und Momente umgewandelt werden.

Um die unterschiedlichen Steifigkeiten des 3D-Schweißnahtsubmodells im Vergleich zu einem globalen Strukturmodell zu berücksichtigen müssen Umrechnungsfaktoren gefunden werden.

10.2.2.2 Erstellen einer Transformationsmatrix

Um die Verschiebungen und Verdrehungen aus einem globalen Strukturmodell bewerten und verwenden zu können, muss man wissen, welche Kräfte bzw. Momente welche Verschiebungen bzw. Verdrehungen verursachen.

Es werden nun Einheitskräfte bzw. -Momente in allen Richtungen an den Schnittufern aufgebracht und mit Inertia Relief berechnet. Als Ergebnis erhält man Verschiebungen bzw. Verdrehungen der Knoten an den Schnittufern zur Folge der einzelnen Kräfte bzw. Momente.

Anhand des folgenden Beispiels wird die Vorgehensweise der Transformationsmatrixerstellung an 2 Stellen erklärt:

An den Stellen 1 und 2 werden jeweils Einheitskräfte von 1 N in jede Koordinatenrichtung und Einheitsmomente von 1 Nmm um jede Achse aufgebracht.

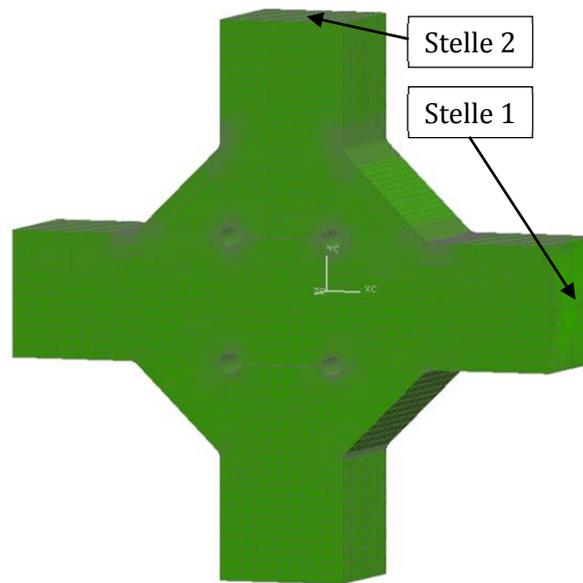


Abbildung 96: X-Stoß-Modell Transformationsmatrixerstellung

Die folgenden Abbildungen zeigen die Unterschiede der Inertia Relief Berechnungen an der Stelle 1 beim Aufbringen jeweils der Einheitskraft von 1 N in x- und y- Richtung:

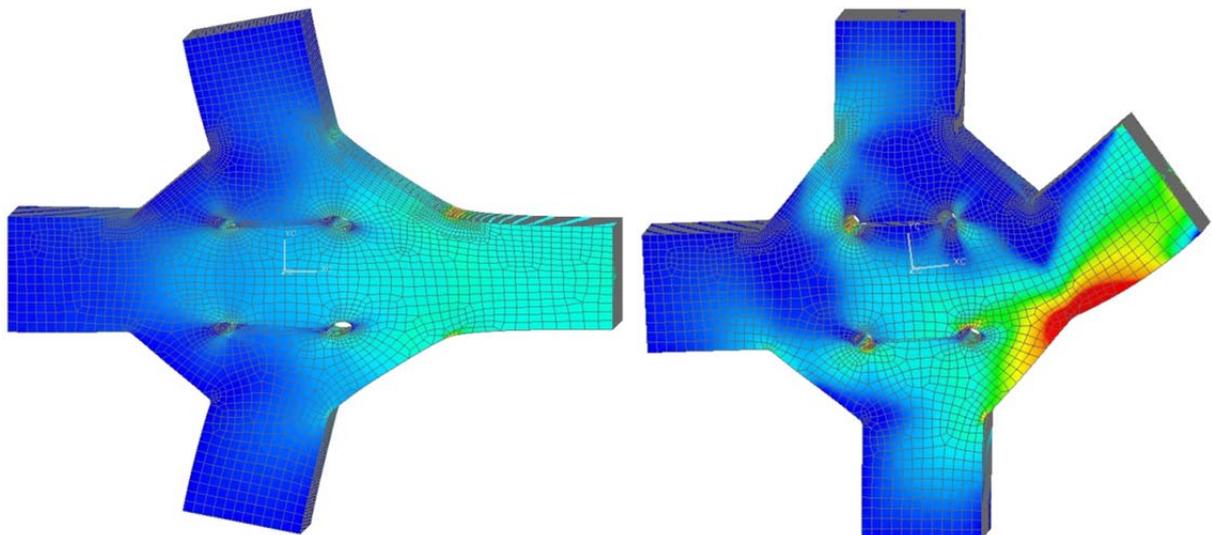


Abbildung 97: Prinzip: Inertia Relief Berechnung Einheitslasten X-Stoß

Die Deformation wurde in den Abbildungen auf 10% eingestellt um die Unterschiede zu verdeutlichen.

Die Ergebnisse der Verschiebungen und Verdrehungen an den Stellen 1 und 2 zur Folge der Einheitskräfte in x- bzw. y- Richtung werden in den folgenden Tabellen dargestellt:

Kraft	Verschiebung [mm]		Verdrehung [°]
F_{1x}	x ₁	6,584E-07	mm
	y ₁	0	mm
	z ₁	0	mm
	φ _{x1}	0	°
	φ _{y1}	0	°
	φ _{z1}	-2E-10	°
	x ₂	-3,395E-07	mm
	y ₂	-8,14E-08	mm
	z ₂	0	mm
	φ _{x2}	0	°
	φ _{y2}	0	°
	φ _{z2}	9,65E-07	°

Tabelle 42: Verschiebungen und Verdrehungen an der Stelle 1 zu Folge der Kraft F_{1x}

Kraft	Verschiebung [mm]		Verdrehung [°]
F_{1y}	x ₁	0	mm
	y ₁	3,9772E-06	mm
	z ₁	0	mm
	φ _{x1}	0	°
	φ _{y1}	0	°
	φ _{z1}	1,794E-05	°
	x ₂	1,1286E-06	mm
	y ₂	-3,118E-07	mm
	z ₂	0	mm
	φ _{x2}	0	°
	φ _{y2}	0	°
	φ _{z2}	-3,978E-06	°

Tabelle 43: Verschiebungen und Verdrehungen an der Stelle 1 zu Folge der Kraft F_{1y}

Diese Tabellen werden nun auch für die weiteren Einheitskräfte und Einheitsmomente an den Stellen 1 und 2 aufgestellt.

Um die im vorigen Kapitel erwähnten Steifigkeitsunterschiede des 3D-Schweißnahtsubmodells im Vergleich zum globalen Strukturmodell mit einzubeziehen müssen Umrechnungsfaktoren gefunden werden.

Deshalb werden dieselben Einheitskräfte und -Momente, wie zuvor beim 3D-Kreuzstoßmodell auf ein 2D-Schalenmodell aufgebracht und mit Inertia Relief berechnet.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Unterschiede der Inertia Relief Berechnungen an der Stelle 1 beim Aufbringen jeweils der Einheitskraft von 1 N in x- und y- Richtung wie zuvor beim 3D-Kreuzstoßmodell:

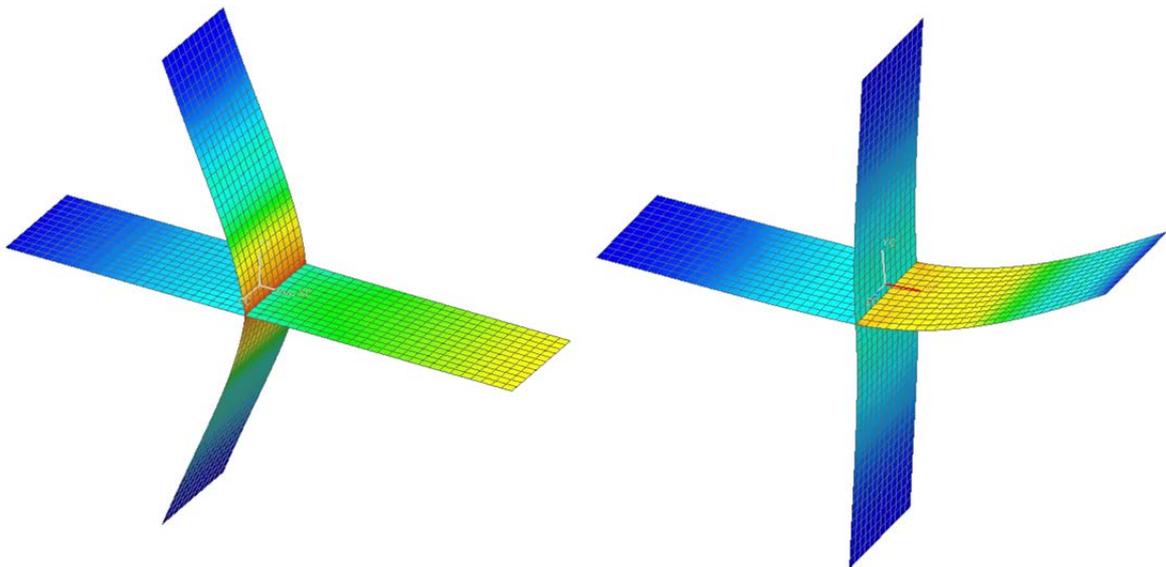


Abbildung 98: Prinzip: Inertia Relief Berechnung Einheitslasten 2D-X-Stoß

Aus den unterschiedlichen Ergebnissen des 2D-Schalenmodells und des 3D-Kreuzstoßmodells werden nun die Umrechnungsfaktoren für die Transformationsmatrix und die weiteren Berechnungen bestimmt.

Damit sind nun die feststehenden Werte für die Transformationsmatrix vollständig.

Als nächstes muss die Gültigkeit der Transformationsmatrix verifiziert werden.

Aus dem globalen Strukturmodell werden nun die Verschiebungen und Verdrehungen an einer bestimmten Stelle ausgelesen und in die Transformationsmatrix übertragen.

Als Beispiel dient hier ein einseitig eingespannter Kastenträger:

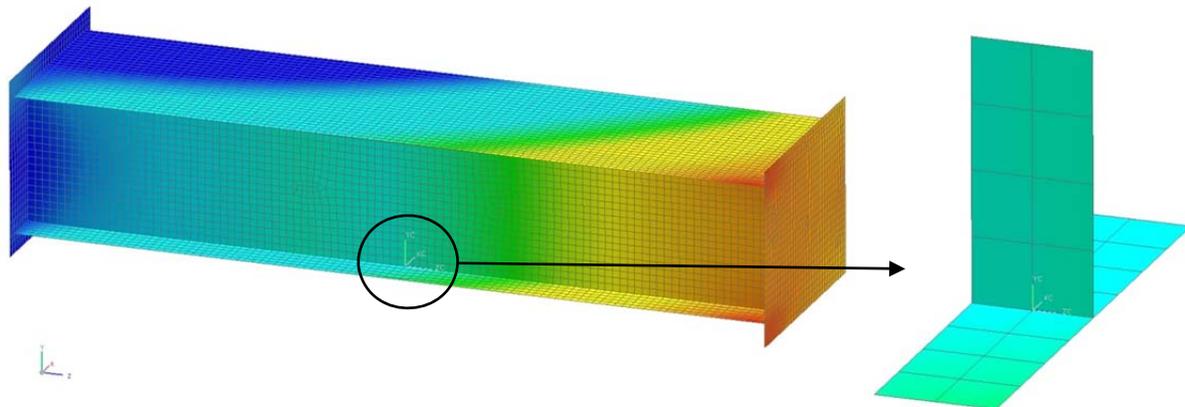


Abbildung 99: Verschiebungen - Verdrehungen am Kastenträger

Bei der zu Betrachtenden Stelle im Strukturmodell (hier z.B. ein Kastenträger) werden im gleichen Abstand wie zuvor beim Kreuzstoßmodell die Verschiebungen und Verdrehungen ausgelesen und in das Gleichungssystem eingetragen.

Die Ergebnisse des Strukturmodells müssen zuvor noch auf den Schweißstoßmittelpunkt transformiert werden, d.h. der Nullpunkt sollte im Schweißstoßmittelpunkt liegen.

Die einzelnen Gleichungen des linearen Gleichungssystems haben nun die Form:

$$(v_{1(N1,N2,...)} - v_{MP(N1,N2,...)}) * U = w_{1(F1x)} * N1 + w_{1(F1y)} * N2 + ... \quad (\text{Glg. 10})$$

Die einzelnen Terme der Gleichung haben folgende Bedeutung:

- $v_{1(N1,N2,...)}$Verschiebung bzw. Verdrehung an einer Stelle im Strukturmodell
- $v_{MP(M1,N2,...)}$Verschiebung bzw. Verdrehung des Schweißnahtmittelpunktes im Strukturmodell
- UUmrechnungsfaktor des 2D-Schalenmodells auf das 3D-Kreuzstoßmodell
- $w_{1(F1x)}$Verschiebung bzw. Verdrehung zur Folge der Einheitslasten bzw. Einheitsmomente
- $N1; N2$die zu ermittelnden Kräfte bzw. Momente

Um das Gleichungssystem zu verifizieren, wird es an einem einfachen Kragträger getestet. Der Balken wird an einer Stirnseite eingespannt und an der anderen mit verschiedenen Kräften und Momenten belastet. Der Vorteil dabei ist, dass die Ergebnisse, die man aus dem Gleichungssystem erhält, sehr einfach mit den bekannten realen Ergebnissen verglichen werden können.

Bei dem folgenden Gleichungssystem, das aus 6 Gleichungen mit 6 Unbekannten besteht, werden die Kräfte in Träger-Richtung, F_x und in Quer-Richtung, F_y sowie die Momente um die Querachse M_z gesucht.

Als Inputdaten werden die Verschiebungen und Verdrehungen an 2 Schnittufern eines Ausschnittes in der Mitte des Kragträgers verwendet:

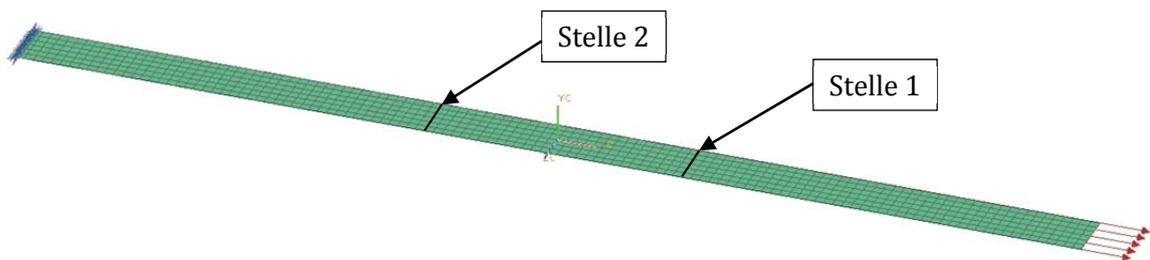
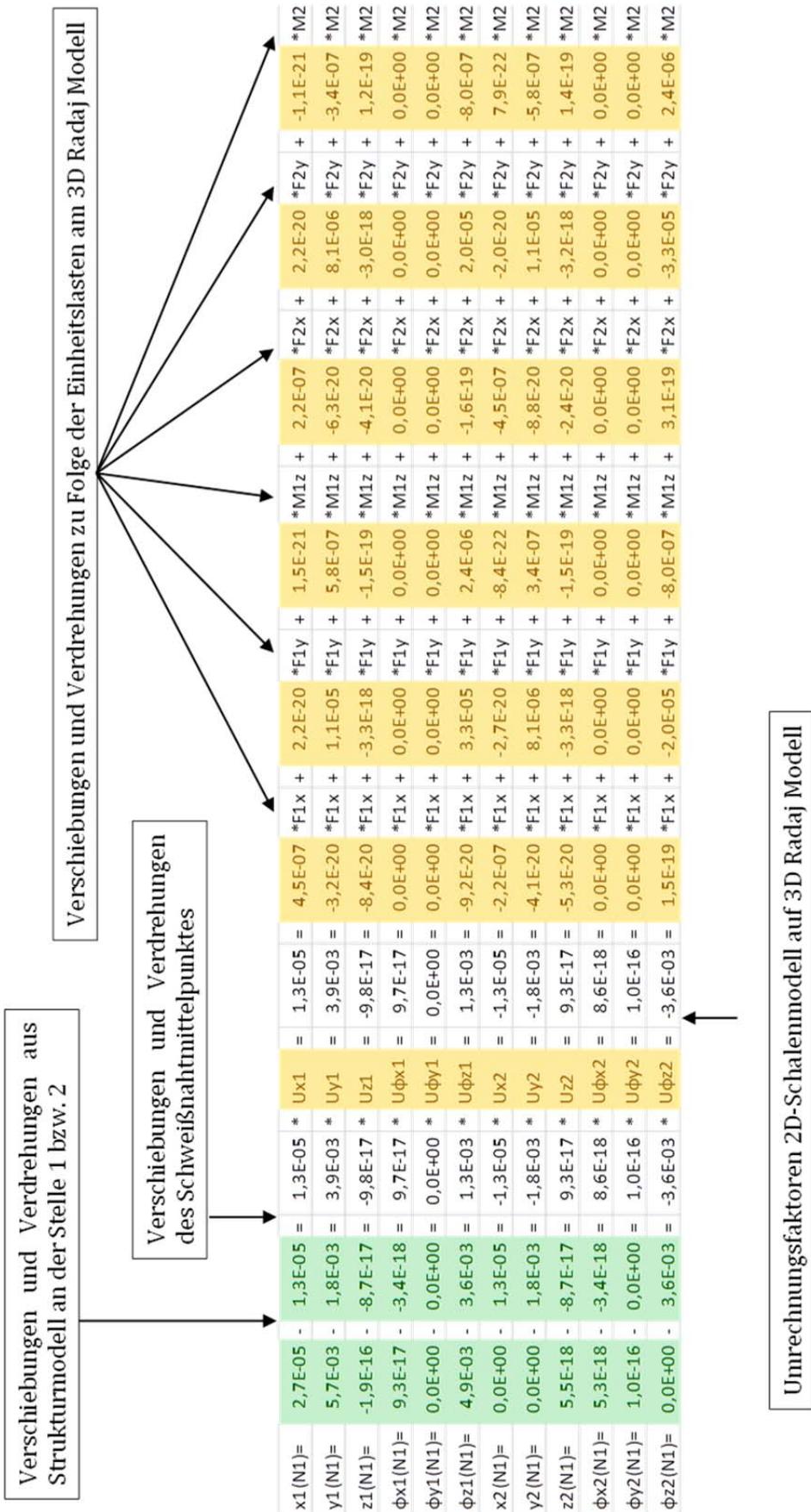


Abbildung 100: Kragträger

Die Verschiebungen und Verdrehungen an den Schnittufern werden noch mit den Verschiebungen und Verdrehungen an dem Mittelpunkt des Ausschnittes subtrahiert um den Nullpunkt in den Mittelpunkt des Ausschnittes zu verlagern.

Die Umrechnungsfaktoren U sind in diesem Gleichungssystem 1, da es keinen Steifigkeitsunterschied zwischen 2D-Schalenmodell und 3D-Volumenmodell in dem Kragträger gibt.

Das Gleichungssystem sieht nun wie folgt aus:



In diesem Gleichungssystem, das zum Verifizieren der Methode dargestellt wurde, werden die Kräfte und Moment an 2 Schnittufern eines Balkens gesucht. Durch die 2-dimensionale Betrachtung, bei der die Querkräfte in der Ebene und die Momente um die Hochachse nicht berücksichtigt werden, ergeben sich 6 Gleichungen mit 6 Unbekannten.

Beim 3D-Schweißnahtsubmodell müssen jedoch alle Einheitskräfte und Einheitsmomente an den insgesamt 6 Schnittufern berechnet werden. Daraus ergibt sich ein Gleichungssystem mit 36 Gleichungen und 36 Unbekannten.

10.2.2.3 Zusammenfassung:

Der Grundgedanke beim Auslesen der Verschiebungen und Verdrehungen war, dass sich diese sehr schön im Ergebnis des Programms UGS NX Nastran, auch innerhalb eines Elementes darstellen und ausgeben lassen.

Bei der Verwendung der Verschiebungen und Verdrehungen ergibt sich jedoch das Problem der Steifigkeitsunterschiede zwischen dem globalen 2D-Strukturmodell und dem feinen 3D-Schweißnahtsubmodell. Deshalb müssen die ausgelesenen Verschiebungen und Verdrehungen mittels einer Transformationsmatrix in Kräfte und Momente umgewandelt werden.

10.2.2.4 Ergebnis:

Die Verifikation des Gleichungssystems wurde mit der Berechnung eines einseitig eingespannten Kragträgers durchgeführt.

Als Erstes wurde der Kragträger einseitig in Träger-Richtung mit einer Kraft F_{1x} von 5000 N belastet:

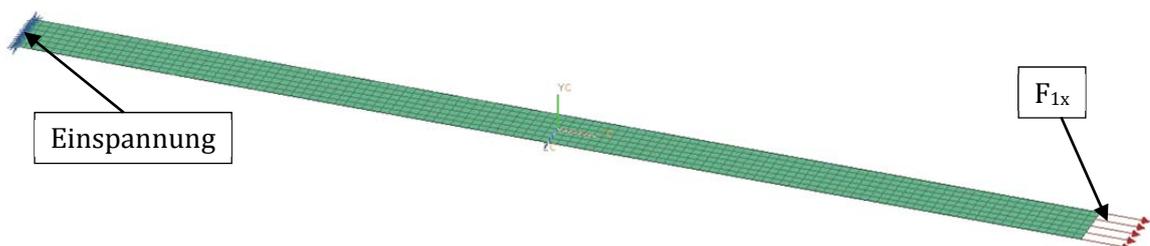


Abbildung 101: Kragträger, Verifikation Lastfall 1

Die Verschiebungen und Verdrehungen des zu betrachtenden Ausschnittes wurden anschließend in das Gleichungssystem übertragen und die daraus resultierenden Kräfte und Momente an den Schnittufern berechnet:

0,00000045	0	0	0,00000022	0	0	0,00335577	5000 = F1x
0	0,00001108	0,00000058	0	0,00000815	-0,00000034	0	0 = F1y
0	0,00003347	0,00000237	0	0,00001974	-0,00000080	0	0 = M1z
-0,00000022	0	0	-0,00000045	0	0	-0,00335577	5000 = F2x
0	0,00000815	0,00000034	0	0,00001108	-0,00000058	0	0 = F2y
0	-0,00001974	-0,00000080	0	-0,00003347	0,00000237	0	0 = M2z

Tabelle 44: Ergebnisse Lastfall 1 Kragträgerberechnung (Verschiebungen / Verdrehungen)

Das Ergebnis der Berechnung lieferte Kräfte in Träger-Richtung von jeweils 5000 N, die den realen Kräften in dem Kragträger entsprechen haben, und somit das Gleichungssystem für diesen einfachen Fall als verifiziert angesehen werden kann.

Als Nächstes wurde der Kragträger, zuerst einzeln und anschließend kombiniert mit einer Kraft F_{1y} von 15 N in Querrichtung und einem Moment M_{1z} von 30 Nmm um die Querachse belastet:

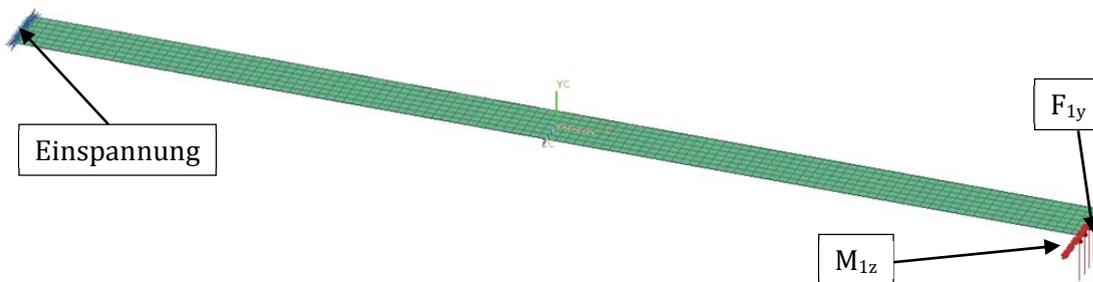


Abbildung 102: Kragträger, Verifikation Lastfall 2

Die Verschiebungen und Verdrehungen des zu betrachtenden Ausschnittes wurden wiederum in das Gleichungssystem übertragen um damit die resultierenden Kräfte und Momente an den Schnittufern zu berechnen.

0,00000045	0	0	0,00000022	0	0	0,00000000	0 = F1x
0	0,00001108	0,00000058	0	0,00000815	-0,00000034	0,00379645	3582 = F1y
0	0,00003347	0,00000237	0	0,00001974	-0,00000080	0,00119982	-32020 = M1z
-0,00000022	0	0	-0,00000045	0	0	0,00000000	0 = F2x
0	0,00000815	0,00000034	0	0,00001108	-0,00000058	-0,0017378	-3398 = F2y
0	-0,00001974	-0,00000080	0	-0,00003347	0,00000237	-0,0035313	-30429 = M2z

Tabelle 45: Ergebnisse Lastfall 2 Kragträgerberechnung (Verschiebungen / Verdrehungen)

Die Ergebnisse dieser Berechnungen führten jedoch zu falschen Werten für die Kräfte und Momente an den Schnittufern.

Der Grund hierfür war, dass das Aufbringen der Einheitskraft in y-Richtung und des Einheitsmomentes um die z-Achse jeweils ähnliche Verschiebungen in y-Richtung und Verdrehungen um die z-Achse an der zu betrachtenden Stelle 1 zur Folge hatte:

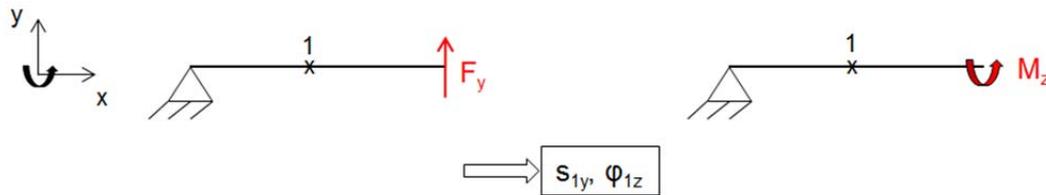


Abbildung 103: Prinzip-Darstellung: Querkraft-Moment Problematik

Bei der anschließenden Berechnung des Gleichungssystems war es dann jedoch nicht möglich aus der ausgelesenen Verschiebung in y-Richtung bzw. Verdrehung um die z-Achse auf den Anteil der auftretenden Kraft bzw. des auftretenden Momentes zurückzurechnen.

Nach unzähligen Versuchen das Gleichungssystem mit verschiedenen Faktoren so umzuformen, dass der Anteil der Kräfte bzw. Momente richtig dargestellt wird, die jedoch zu keinem brauchbaren Ergebnis führten, wurde diese Methode nicht weiter verfolgt.

Die Schlussfolgerung aus den vorangegangenen Berechnungen ist daher, dass die Methode des Auslesens von „Displacements“ (Verschiebungen) und „Rotations“ (Verdrehungen) aus einem globalen Strukturmodell nicht zielführend ist und für die weiteren Anwendungen nicht in Frage kommt.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipielle Vorgehensweise zum Ermitteln der Kerbspannungen.....	2
Abbildung 2: Prinzipielle Vorgehensweise zum Ermitteln der Kerbspannungen (Detail).....	3
Abbildung 3: Fragestellungen.....	8
Abbildung 4: Definition der Strukturspannung (Grafik: Hobbacher).....	10
Abbildung 5: Bestimmung der effektiven Kerbspannung (Grafik: Hobbacher).....	11
Abbildung 6: Spannungsanteile bei einem nichtlinearen Spannungsverlauf (Grafik: Hobbacher).....	12
Abbildung 7: CQUAD4 Element (Grafik: www.kxcad.net).....	15
Abbildung 8: CQUAD8 Element (Grafik: www.kxcad.net).....	16
Abbildung 9: CHEXA(20) Element (Grafik: www.kxcad.net).....	16
Abbildung 10: Combine Load Cases im UGS NX.....	17
Abbildung 11: Kastenträger; Grid Point Forces.....	19
Abbildung 12: 2D - 3D Übergang.....	23
Abbildung 13: Übergangsschalenelemente - Prinzip.....	24
Abbildung 14: Übergangsschalenelemente T-Stoß.....	25
Abbildung 15: Shell-Properties im UGS NX.....	26
Abbildung 16: Detail-T-Stoß-Modell mit, hinzugefügten Solid-Elementen.....	27
Abbildung 17: Spider-Element.....	28
Abbildung 18: Darstellung: Edge to Face Verbindung.....	30
Abbildung 19: Simulation Edge to Face Verbindung.....	31
Abbildung 20: FE-Modell: T-Stoß mit RBE3-Spider Elementen.....	32
Abbildung 21: Simulation: T-Stoß mit RBE3-Spider Elementen.....	33
Abbildung 22: Referenz T-Stoß (Solid).....	34
Abbildung 23: Knoten-Bereiche für Auswertung.....	35
Abbildung 24: T-Stoß, Bereich 1(XP) und Bereich 3(YP).....	36
Abbildung 25: T-Stoß, Bereich 2(XN) und Bereich 4(YN).....	36
Abbildung 26: Detail-Modell 1: 24_v1 Abbildung 27: Detail-Modell 2: 24_v2.....	38
Abbildung 28: Detail-Modell 3: 48_v1 Abbildung 29: Detail-Modell 4: 48_v2.....	38
Abbildung 30: T-Stoß Lastfall 1: Biegebelastung.....	39
Abbildung 31: T-Stoß Lastfall 2: Schubbelastung.....	39
Abbildung 32: T-Stoß mit Ausschnitt.....	40
Abbildung 33: Detail-Modell mit Kräften und Momenten.....	41
Abbildung 34: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP).....	42

Abbildung 35: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN)	43
Abbildung 36: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP)	44
Abbildung 37: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN)	45
Abbildung 38: Randknoten (XP15 - XP17) Bereich 1 (XP).....	46
Abbildung 39: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP), LFl 1 (mit Randknoten).....	47
Abbildung 40: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP), LF 1 (ohne Randknoten).....	48
Abbildung 41: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN), LF 1 (mit Randknoten).....	49
Abbildung 42: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN), LF 1 (ohne Randknoten)	49
Abbildung 43: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP), LF 1 (mit Randknoten)	50
Abbildung 44: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP), LF 1 (ohne Randknoten).....	51
Abbildung 45: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN), LF 1 (mit Randknoten).....	52
Abbildung 46: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN), LF 1 (ohne Randknoten)	52
Abbildung 47: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP), LF 2 (mit Randknoten)	53
Abbildung 48: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP), LF 2 (ohne Randknoten).....	54
Abbildung 49: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN), LF 2 (mit Randknoten).....	55
Abbildung 50: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN), LF 2 (ohne Randknoten)	55
Abbildung 51: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP), LF 2 (mit Randknoten)	56
Abbildung 52: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP), LF 2 (ohne Randknoten).....	57
Abbildung 53: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN), LF 2 (mit Randknoten).....	58
Abbildung 54: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN), LF 2 (ohne Randknoten)	58
Abbildung 55: SolidIR_48_v2.....	60
Abbildung 56: Schweißnahtende (Grafik: Hobbacher).....	60
Abbildung 57: 2D-Radaj-Schweißnahtmodelle von Wolmersdorfer F.....	65
Abbildung 58: Extrusion X-Stoß, Elementtiefe 0,2mm	66
Abbildung 59: Extrusion X-Stoß, variable Elementtiefe.....	67
Abbildung 60: Detail-Ausschnitt X-Stoß.....	68
Abbildung 61: X-Stoß mit Anschlusschalen	69
Abbildung 62: Bereiche-Unterteilung, RBE3-Aufbringung.....	70
Abbildung 63: Ausgewählte Knoten eines Teilbereiches.....	71
Abbildung 64: fertiges 3D-Schweißnahtsubmodell eines Kreuzstoßes (X_FD_FD).....	72
Abbildung 65: Abmessungen 3D-Schweißnahtsubmodell.....	72
Abbildung 66 : Beispiel: Linear Statisch - Inertia Relief.....	75
Abbildung 67: Transformation von 2D Radaj-Modell in 3D-Modell	76
Abbildung 68: Schweißstoß, Kerbe - Knoten	77
Abbildung 69: Inertia Relief Test, Lastfall 1.....	77
Abbildung 70: LF1, Links: Linear Statisch; Mitte: Linear Statisch mit Federn; Rechts: Inertia Relief.....	78
Abbildung 71: Inertia Relief Test, Lastfall 2.....	79
Abbildung 72: LF2, Links: Linear Statisch; Mitte: Linear Statisch mit Federn; Rechts: Inertia Relief.....	80
Abbildung 73: Inertia Relief Test, Lastfall 3.....	81
Abbildung 74: LF3, Links: Linear Statisch; Mitte: Linear Statisch mit Federn; Rechts: Inertia Relief.....	82

Abbildung 75: Inertia Relief Test, Lastfall 4.....	83
Abbildung 76: LF4, Links: Linear Statisch; Mitte: Linear Statisch mit Federn; Rechts: Inertia Relief.....	84
Abbildung 77: X-Stoß Elementgrößen Test	85
Abbildung 78 : Verschiebung in x-Richtung zur Folge F_{x1} (Deformation 10%).....	86
Abbildung 79: Auswirkung der Elementgröße auf die Verschiebung in x- Richtung, Stelle 1	87
Abbildung 80: Auswirkung der Elementgröße auf die Verschiebung in x- Richtung, Stelle 2	87
Abbildung 81: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 1 (XP), Lastfall 1	95
Abbildung 82: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 2 (XN), Lastfall 1	97
Abbildung 83: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 3 (YP), Lastfall 1	99
Abbildung 84: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 4 (YN), Lastfall 1	101
Abbildung 85: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 1 (XP), Lastfall 2	103
Abbildung 86: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 2 (XN), Lastfall 2	105
Abbildung 87: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 3 (YP), Lastfall 2	107
Abbildung 88: Vergleich Von-Mises Spannungen Shell-Solid Bereich 4 (YN), Lastfall 2	109
Abbildung 89: Spannungen am Schalenelement	128
Abbildung 90: Prinzip – Querkraftausgleich, Kragträger	129
Abbildung 91: Normalspannungsverlauf Schnittfläche (Grafik: Celigoj)	129
Abbildung 92: Vorgehensweis Kragträger-Modell, Druckbelastung	132
Abbildung 93: Prinzip - Querkraftausgleich, T-Stoß.....	134
Abbildung 94: Vorgehensweise T-Stoß-Modell, Druckbelastung	135
Abbildung 95: Steifigkeitsunterschiede Kreuzstoß.....	137
Abbildung 96: X-Stoß-Modell Transformationsmatrixerstellung.....	139
Abbildung 97: Prinzip: Inertia Relief Berechnung Einheitslasten X-Stoß.....	139
Abbildung 98: Prinzip: Inertia Relief Berechnung Einheitslasten 2D-X-Stoß	141
Abbildung 99: Verschiebungen - Verdrehungen am Kastenträger	142
Abbildung 100: Kragträger.....	143
Abbildung 101: Kragträger, Verifikation Lastfall 1	145
Abbildung 102: Kragträger, Verifikation Lastfall 2	146
Abbildung 103: Prinzip-Darstellung: Querkraft-Moment Problematik	147

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP)	42
Tabelle 2: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN)	43
Tabelle 3: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP)	43
Tabelle 4: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN)	44
Tabelle 5: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP), Lastfall 1	47
Tabelle 6: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN), Lastfall 1	48
Tabelle 7: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP), Lastfall 1	50
Tabelle 8: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN), Lastfall 1	51
Tabelle 9: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 1 (XP), Lastfall 2	53
Tabelle 10: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 2 (XN), Lastfall 2	54
Tabelle 11: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 3 (YP), Lastfall 2	56
Tabelle 12: Abweichungen der Von-Mises Spannungen im Bereich 4 (YN), Lastfall 2	57
Tabelle 13: Durchschnittliche Abweichung, Von-Mises-Sp., LF1, ohne Randknoten	59
Tabelle 14: Durchschnittliche Abweichung, Von-Mises-Sp., LF2, ohne Randknoten	59
Tabelle 15: Schweißverbindungen und Schweißnahtarten (Grafik: Wolmersdorfer)	63
Tabelle 16: Ergebnisse Inertia Relief Test Lastfall 1	78
Tabelle 17: Ergebnisse Inertia Relief Test Lastfall 2	80
Tabelle 18: Ergebnisse Inertia Relief Test Lastfall 3	82
Tabelle 19: Ergebnisse Inertia Relief Test Lastfall 4	84
Tabelle 20: Auswirkung der Elementgröße auf die Verschiebungen in x-Richtung	86
Tabelle 21: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 1 (XP)	94
Tabelle 22: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 2 (XN)	96
Tabelle 23: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 3 (YP)	98
Tabelle 24: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 4 (YN)	100
Tabelle 25: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 1 (XP)	102
Tabelle 26: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 2 (XN)	104
Tabelle 27: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 3 (YP)	106
Tabelle 28: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 4 (YN)	108
Tabelle 29: Ergebnisse Lastfall 1, Eckknoten (EK1, EK2)	110
Tabelle 30: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 1 (XP)	112
Tabelle 31: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 2 (XN)	114
Tabelle 32: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 3 (YP)	116

Tabelle 33: Ergebnisse Lastfall 1, Bereich 4 (YN)	118
Tabelle 34: Ergebnisse Lastfall 2, Eckknoten (EK1, EK2).....	119
Tabelle 35: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 1 (XP).....	121
Tabelle 36: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 2 (XN)	123
Tabelle 37: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 3 (YP).....	125
Tabelle 38: Ergebnisse Lastfall 2, Bereich 4 (YN)	127
Tabelle 39: Berechnung Querkraftausgleich für 2 Schnittufer.....	130
Tabelle 40: Spannungsergebnisse eines Punktes am Kragträgermodell.....	133
Tabelle 41: Berechnung Querkraftausgleich für 3 Schnittufer.....	134
Tabelle 42: Verschiebungen und Verdrehungen an der Stelle 1 zu Folge der Kraft F_{1x}	140
Tabelle 43: Verschiebungen und Verdrehungen an der Stelle 1 zu Folge der Kraft F_{1y}	140
Tabelle 44: Ergebnisse Lastfall 1 Kragträgerberechnung (Verschiebungen / Verdrehungen).....	146
Tabelle 45: Ergebnisse Lastfall 2 Kragträgerberechnung (Verschiebungen / Verdrehungen).....	146

13 Literaturverzeichnis

Celigoj, C. und Schmidt, M. *Vorlesungsskriptum: Methode der Finiten Elemente*. Technische Universität Graz, Institut für Festigkeitslehre, Juni 1998

Hobbacher, A. *Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile*. IIW-Dokument XIII-1539-96/XV-845-96, Juli 1996. ISBN 3-87155-496-0

<http://de.wikipedia.org/wiki/Vergleichsspannung>, 08.03.2011

<http://www.kxcad.net/Altair/HyperWorks/oshelp/chexa.htm>, 10.03.2011

<http://www.kxcad.net/Altair/HyperWorks/oshelp/cquad4.htm>, 10.03.2011

<http://www.kxcad.net/Altair/HyperWorks/oshelp/cquad8.htm>, 10.03.2011

Nasdala, L. *FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik Hintergrundinformationen, Tipps und Tricks*. Vieweg + Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2010. ISBN 978-3-8348-0980-3

Parkus, H. *Mechanik der festen Körper*. Springer Wien New York Verlag, 2005. ISBN 3-211-80777-2

Radaj, D. *Fatigue Assessment of welded joints by local approaches*. Woodhead Publishing in Materials. ISBN 13:978-1-85573-948-2

UGS NX. Help

Wolmersdorfer, F. *Diplomarbeit: Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzeptes*. Technische Universität Graz, Institut für Leichtbau, Juni 2009