



Matthias Wozasek

Kerbfalkatalog für die Schweißnahtberechnung nach IIW

Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Institut für Leichtbau

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Moser

Graz, April 2012

In Kooperation mit:

Siemens AG Österreich Mobility Division

SIEMENS

Deutsche Fassung:

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008

Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

STATUTORY DECLARATION

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

Graz, am

Matthias Wozasek

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit baut auf zwei vorhergehenden Diplomarbeiten auf. „Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzeptes“ von Dipl.-Ing. Franz Wolmersdorfer beschäftigt sich mit der Erstellung von 2D Schweißnahtmodellen nach Radaj zur Schweißnahtbewertung nach IIW. „Erweiterung eines Kerbfallkataloges zur Anwendung des Kerbspannungskonzeptes für die Berechnung von Schweißnahtverbindungen“ von Dipl.-Ing. Robert Demal hat die Erstellung von 3D Schweißnahtmodellen für die Bewertung nach IIW zum Inhalt. Ziel der vorliegenden Diplomarbeit ist es die bisher gewonnenen Erkenntnisse zu nutzen, um erstmals Daten für eine praktische Erprobung zur Verfügung zu stellen. Die erforderlichen Daten werden in Form eines Kerbfallkataloges erzeugt. Die dafür notwendigen Modelle werden mit Hilfe der Finite Elemente Methode berechnet. Um die große Anzahl an möglichen Schweißnähten abzubilden, wird eine gewisse Form der Automatisierung bei der Generierung der Finite Elemente Modelle und Berechnung verwendet. Die im Kerbfallkatalog enthaltenen Schweißstöße stellen die hauptsächlich bei der Siemens AG Österreich Mobility Division eingesetzten Schweißverbindungen dar. Für die programmtechnische Weiterverarbeitung der Ergebnisse des Kerbfallkataloges werden die berechneten Daten abschließend noch zu Kerbfallmatrizen zusammengefasst. Diese Kerbfallmatrizen sollen erstmals eine praktische Erprobung der Schweißnahtberechnung mittels des Kerbspannungskonzeptes der IIW ermöglichen.

Abstract

This diploma thesis is based on two previous diploma theses. “Evaluation of welded joints on the basis of the notch stress approach” written by Franz Wolmersdorfer whose intention was, to develop two-dimensional welded joints by Radaj’s concept for the weld joint assessment according to the IIW regulations. “Extension of a notch catalogue to be applied on the notch stress concept for the evaluation of weld joints” written by Robert Demal whose main aim was, to develop three-dimensional weld joints for the assessment according to the IIW regulations. The objective of this diploma thesis is to develop required data for a first testing of the notch stress concept, by the use of the previous findings. The required data will be provided in the form of a notch stress catalogue. The models for this notch stress catalogue will be calculated by the use of the finite element method. To handle the large number of required models certain automation will be used for the generation and calculation of the models. The contained models in the notch stress catalogue include the most common used weld joints at the Siemens AG Österreich Mobility Division. For the further processing within software the results of the calculations will finally be combined to notch case matrices. These matrices will allow a first trial of the weld joint calculation by the use of the notch stress concept of the IIW.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Siemens AG Österreich Mobility Division in Graz Eggenberg.

Für die Bereitstellung des Themas und die Betreuung am Institut für Leichtbau der TU Graz möchte ich mich recht herzlich bei Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Moser bedanken. Weiteres möchte ich Herrn Dipl.- Ing. Werner Mössler von der Firma Siemens und seinen Kollegen für die Unterstützung danken.

Das Arbeiten am Institut für Leichtbau hat mir nicht zuletzt aufgrund der herzlichen Stimmung und der vielen hilfreichen Anregungen von meinen Arbeitskollegen viel Freude bereitet.

Meiner Familie, besonders meinen Eltern gebührt ein ganz besonderer Dank, weil Sie mir mein Studium ermöglichten und mich in allen Lebenslagen bestens unterstützt haben.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Freundin Kathrin bedanken die mir immer eine Hilfe war und mich moralisch unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Betriebsfestigkeitsbewertung mit Schweißnahtmodellen.....	2
1.3	Ziele.....	3
1.4	Aufgabenstellung.....	3
2	Theoretischer Hintergrund.....	4
2.1	Schweißnahtberechnung nach IIW	4
2.1.1	Definition der Spannungsanteile.....	5
2.1.2	Nennspannung.....	7
2.1.3	Strukturspannung (hot spot stress).....	8
2.1.4	Effektive Kerbspannung	9
2.2	Kerbwirkungszahl nach Radaj.....	11
2.3	Die Hauptnormalspannung im Kerbgrund	14
2.4	Betriebsfestigkeitsnachweis nach IIW mit lokalen Kerbspannungen.....	16
2.5	Grundlagen der Finite Elemente Simulation.....	20
2.5.1	Grundlagen aus der Kontinuumsmechanik	20
2.5.2	Die Finite Elemente Methode.....	23
2.5.3	Das CQUAD8 Element.....	27
2.5.4	Inertia Relief.....	34
2.5.5	UGS NX Nastran.....	35
3	Erstellung der 2D - Schweißnahtmodelle	36
3.1	Das Koordinatensystem.....	36
3.2	Parameter im Partfile.....	38
3.3	Die Vernetzung der 2D - Modelle	39
3.4	Die Einheitslasten mit Subcases	45
4	Simulierte Schweißstöße im Detail.....	48
4.1	Übersicht über die Schweißstöße	48
4.2	Stumpfstöße.....	49
4.2.1	B_VC.....	49

4.2.2	B_VM.....	50
4.2.3	B_VT.....	51
4.3	T-Stöße	52
4.3.1	T_FD.....	52
4.3.2	T_YS.....	53
4.3.3	T_YB.....	55
4.3.4	T_YD	56
4.3.5	T_VS.....	57
4.4	Kreuzstöße	58
4.4.1	X_FD_FD	59
4.4.2	X_FD_YS.....	60
4.4.3	X_FD_YB	61
4.4.4	X_YS_YS.....	62
4.4.5	X_YB_YB.....	63
4.4.6	X_YD_YD	64
4.4.7	X_YS_YB.....	65
5	Aufbau des VB Scripts	66
5.1	Die Ordnerstruktur.....	66
5.2	Benennung der Dateien	67
5.3	Das VB Skript.....	68
5.3.1	Das B_VC Journal.....	69
5.3.2	Das X_FD_FD Journal.....	79
6	Die Kerbfalltafeln	83
6.1	Eingabeparameter in das MatLab Skript zur Kerbfalltafelerstellung.....	83
6.2	Aufbau der Excel Dateien	86
6.2.1	Das Infosheet.....	86
6.2.2	Die Parameterliste	87
6.2.3	Das Definitionssheet.....	87
6.2.4	Die Kerbfalltafeln.....	88
7	Zusammenfassung.....	89

8	Ausblick	90
9	Anhang.....	91
9.1	B_VC.....	91
9.2	B_VM.....	91
9.3	B_VT.....	92
9.4	T_FD	92
9.5	T_YS	93
9.6	T_YB.....	93
9.7	T_YD.....	94
9.8	T_VS	94
9.9	X_FD_FD.....	95
9.10	X_FD_YS.....	96
9.11	X_FD_YB.....	97
9.12	X_YS_YS	98
9.13	X_YB_YB	99
9.14	X_YD_YD.....	100
9.15	X_YS_YB.....	101
10	Literaturverzeichnis	102
	Abbildungsverzeichnis	103
	Tabellenverzeichnis	106

1 Einleitung

Bei der Siemens AG Österreich Mobility Division in Graz Eggenberg werden Eisenbahnfahrwerke entwickelt, konstruiert und gebaut. Diese Eisenbahnfahrwerke, insbesondere deren Schweißnähte, werden derzeit für Betriebsfestigkeitsbewertungen nach der Kranbaunorm DIN 15018 bewertet. Diese Bewertung bringt eine Reihe von Nachteilen mit sich. Durch das in Kraft treten der DIN EN 13749 für die Zulassung von Drehgestellrahmen hat die DIN 15018 an Gültigkeit verloren, weil Sie nicht alle Anforderungen der EN 13749 erfüllt. So ist unter anderem die Verwendung von Betriebsmessungen als Berechnungsgrundlage nicht möglich. (1)

Aufbauend auf der Diplomarbeit „Analyse und Bewertung von Berechnungsvorschriften zum Ermüdungsverhalten von Schweißverbindungen“ von Herrn Dipl.-Ing. Uwe Oßberger wurde entschieden, zukünftig die IIW Richtlinien zur Betriebsfestigkeitsbewertung der Schweißverbindungen heranzuziehen. Das lokale Kerbspannungskonzept der IIW bietet eine Reihe von Vorteilen für die Betriebsfestigkeitsbewertung von Schweißnähten: (1)

- Die Blechdicke hat einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten.
- Es erfolgt eine Abbildung der real verwendeten Schweißnahtgeometrie.
- Es ist eine örtliche Beurteilung der Ermüdung (Auslastungsgrad) an der Schweißnaht möglich.

1.1 Ausgangssituation

In der Diplomarbeit „Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzeptes“ von Dipl.-Ing. Franz Wolmersdorfer wird eine Methodik aufgezeigt, von realen Schweißstößen zweidimensionale Radaj Modelle für die Finite Elemente Berechnung zu modellieren. Dabei wurden verschiedene Simulationsmethoden und Elemente erprobt, um mit einem vertretbaren Rechenaufwand zu guten Ergebnissen zu kommen. Zusätzlich wurden zahlreiche reale Schweißnähte in der mechanischen Fertigung der Firma Siemens AG Österreich Mobility Division vermessen und simuliert. Bei dieser Vermessung von Schliffbildern konnten zahlreiche Details der Radaj Modelle wie Wurzelkerben aufgezeigt werden. Außerdem konnte erstmals der Einfluss der Blechdicken auf das Kerbdetail Schweißnaht berechnet werden.

Die Diplomarbeit „Erweiterung eines Kerbfallkataloges zur Anwendung des Kerbspannungskonzeptes für die Berechnung von Schweißnahtverbindungen“ von Dipl.-Ing. Robert Demal baut auf den Erkenntnissen der Arbeit von Dipl.-Ing. Franz Wolmersdorfer auf und erweitert diese um dreidimensionale Schweißnahtmodelle. Diese Diplomarbeit enthält außerdem Erkenntnisse zur Gewinnung der Schnittgrößen aus den Schalenmodellen und dem Aufprägen selbiger auf ein Detailmodell, sowie zu speziellen Funktionen wie Inertia Relief.

1.2 Betriebsfestigkeitsbewertung mit Schweißnahtmodellen

Die Drehgestellrahmen von Zügen werden für die Finite Elemente Berechnung mittels Schalenelementen vernetzt. Dies geschieht einerseits um den erforderlichen Rechenaufwand etwas zu minimieren, aber vor allem auch um den hohen Aufwand für das Vernetzen zu verringern. Für die Betriebsfestigkeitsbewertung der Schweißnähte wird dann ein entsprechendes Detailmodell verwendet, dass die reale Geometrie abbildet. Die Belastungen auf dieses Detailmodell werden aus dem Schalenmodell gewonnen. Werden alle Belastungen korrekt auf das Detailmodell aufgeprägt, so kann anschließend die höchst belastete Stelle der Schweißnahtgeometrie ermittelt werden und der Auslastungsgrad der Schweißverbindung kann nach den IIW Richtlinien bestimmt werden.

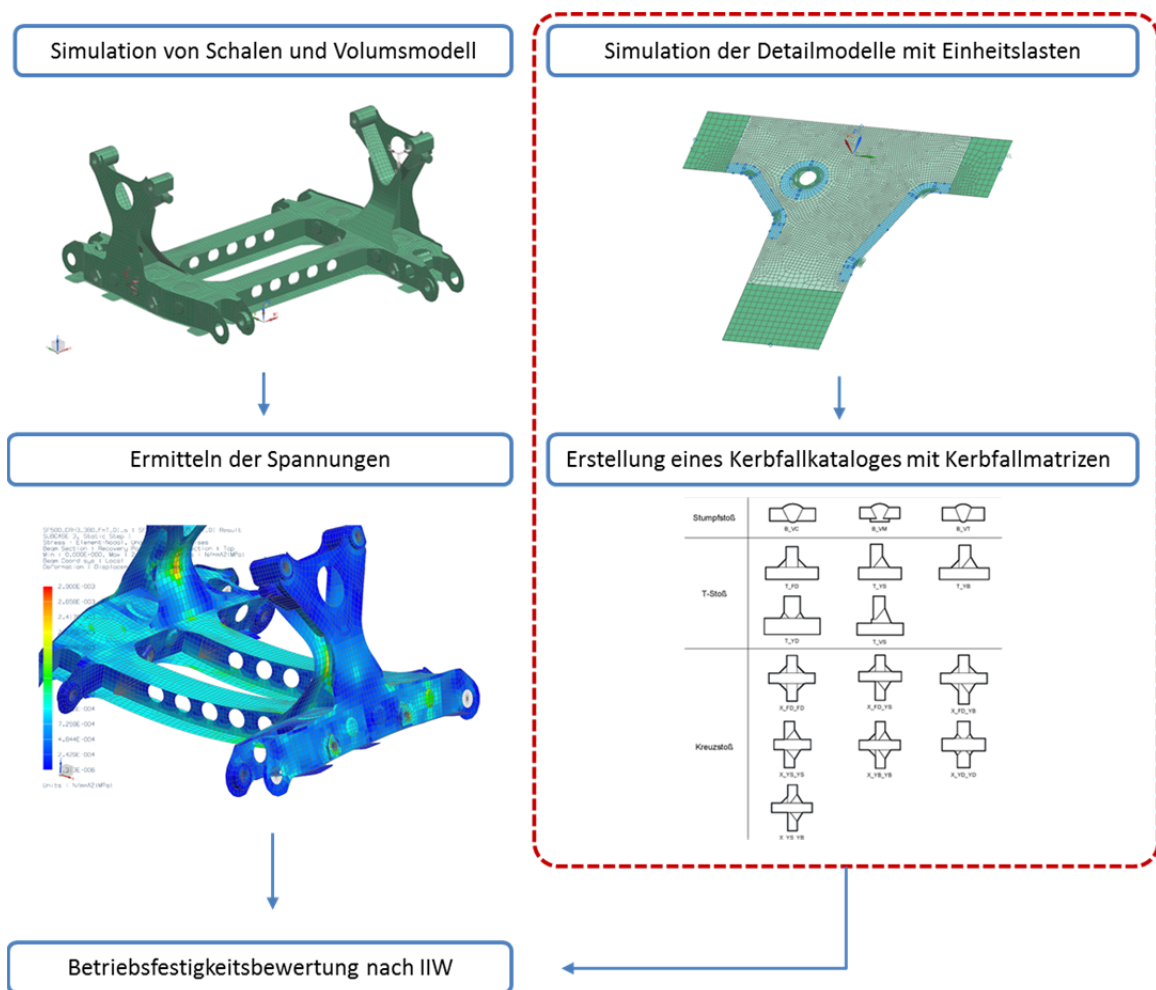


Abbildung 1-1: IIW Bewertung mit Detailmodellen

1.3 Ziele

Nach den Vorarbeiten zur Methodik generell ist das nächste Ziel eine praktische Erprobung. Dazu musste eine große Anzahl an Schweißstößen simuliert und weiterverarbeitet werden. Die einzelnen Schweißstöße werden für eine Vielzahl möglicher Blechstärken bzw. Blechstärkenkombinationen simuliert. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden dann zu geeigneten Kerbfalltafeln verarbeitet, um mit Ihnen eine Bewertung nach IIW durchführen zu können.

1.4 Aufgabenstellung

Um die große Anzahl an Detailmodellen mit unterschiedlichsten Wandstärkenkombinationen zu simulieren, ist eine gewisse Automatisierung zur Erstellung der Modelle vonnöten. Außerdem sind abschließende Fragen zur Methodik zu klären, zum Beispiel welche Spannungen in der Kerbe ausgelesen werden oder wie die Kerbfalltafeln sinnvoll aufgebaut werden sollen. Die Diplomarbeit beschäftigt sich im Folgenden, mit dem rot umrandeten Bereich in Abbildung 1-1.

2 Theoretischer Hintergrund

Nachfolgend wird eine kurze Einführung in das lokale Schweißnahtberechnungskonzept der „IIW Recommendations for fatigue design of welded joints and components“ von Hobbacher A. gegeben. Darauf aufbauend wird das Radaj Modell zur Modellierung von Schweißnähten mittels Finite Elemente (FE) Simulation erklärt. Die verwendete FE Methode sowie die Software zur Berechnung werden ebenfalls kurz vorgestellt.

2.1 Schweißnahtberechnung nach IIW

Die IIW Richtlinien stellen ein Instrumentarium zur Auslegung und Analyse von ermüdungsbeanspruchten, geschweißten Strukturen dar. Basierend auf den Informationen über den Schweißstoß muss eine Bewertungsmethode gewählt werden. Die Ermüdungsbeanspruchung und der Ermüdungswiderstand müssen für die gewählte Methode geeignet ermittelt werden. In weiterer Folge werden die verschiedenen Methoden zur Ermüdungsfestigkeitsbewertung nach IIW kurz vorgestellt, wobei auf die Methode der Effektiven Kerbspannungen detailliert eingegangen wird, weil diese Methode in der vorliegend Arbeit angewendet wurde. Die zusammengehörenden Typen von Ermüdungsbeanspruchung und Ermüdungswiderstand sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst. (2)

Ermüdungsbeanspruchung	Ermüdungswiderstand	Bewertungsverfahren
Kraft auf Komponente	Ermüdungswiderstand durch Tests der Komponente bestimmt	Komponenten Tests
Normalspannung im Querschnitt	Ermüdungswiderstand in Kerbfalltabellen gegeben in Form von Wöhlerlinien	Aufsummieren der kumulativen Beschädigung
Strukturspannung am Nahrand	Ermüdungswiderstand gegen Strukturspannung in Form von Wöhlerlinien	
Effektive Kerbspannung am Schweißstoß	Ermüdungswiderstand gegen effektive Kerbspannung in Form von universellen Wöhlerlinien	
Spannungsintensität an Riss Spitze	Widerstand der Rissausbreitung in Form der Werkstoffparameter der Rissausbreitung	Aufsummieren von Risszunahmen

Tabelle 2-1: Ermüdungsbeanspruchung-, widerstand und Bewertung (2)

Auf der Beanspruchungsseite sind verschiedene Einflüsse auf die Kerbwirkung zu unterscheiden. Diese verschiedenen spannungserhöhenden Einflüsse führen zur Berechnung verschiedener Spannungstypen. Der verwendete Spannungstyp ergibt sich aus der ausgewählten Methode zur Bewertung der Ermüdungsbeanspruchung. In Tabelle 2-2 werden die verschiedenen Spannungserhöhenden Einflüsse und das zugehörige Bewertungsverfahren dargestellt.

Typ	Spannungserhöhender Einfluss	Ermittelte Spannung	Bewertungsverfahren
A	Allgemeine Spannungsanalyse mit globalen Theorien, wie z.B.: mit der Balkentheorie		
B	A + Makrogeometrische Effekte aus der Gestalt des Bauteiles (auch Effekte aus Punktlasten und Kantenversatz)	Schwingbreite der Nennspannung (auch modifizierte oder örtliche Nennspannung)	Nennspannungsverfahren
C	A + B + Konstruktive Kerben aus dem konstruktiven Detail der Schweißverbindung	Schwingbreite der Strukturspannung (Hot Spot Stress)	Strukturspannungsverfahren
D	A + B + C + Kerbwirkung aus der Form der Schweißnaht (z.B.: am Nahtübergang oder an der Nahtwurzel) a.) Aktuelle Kerbspannung b.) Effektive Kerbspannung	Schwingbreite der elastischen Kerbspannung (totale oder gesamte Spannung)	a.) Bruchmechanik b.) Verfahren der effektiven Kerbspannung

Tabelle 2-2: Spannungserhöhende Einflüsse und Kerbwirkungen (2)

2.1.1 Definition der Spannungsanteile

In der Nähe von Kerben ist die Spannungsverteilung über die Blechdicke im Allgemeinen nicht linear. Die verschiedenen Spannungsanteile, aus denen sich die Kerbspannung zusammensetzt, sind in Abbildung 2-1 dargestellt.

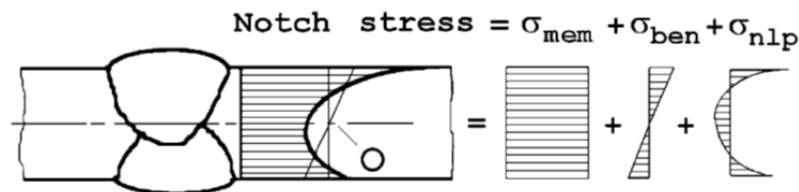


Abbildung 2-1: Spannungsanteile bei nichtlinearem Spannungsverlauf (2)

Die Spannungsanteile der Kerbspannung σ_{in} sind:

- σ_{mem} Membranspannung
- σ_{ben} Schalenbiegespannung
- σ_{nlp} nichtlineare Spannungsspitze

Die einzelnen Spannungsanteile, die in Summe die nichtlineare Spannungsverteilung in der Kerbe ergeben, können folgendermaßen getrennt werden:

- Die Membranspannung σ_{mem} ist der über die Wandstärke kontante Anteil, sie errechnet sich als Durchschnittsspannung.
- Die Schalenbiegespannung σ_{ben} entspricht dem linear über die Wandstärke verteilten Anteil. Ihr Anteil entspricht einer Geraden gezogen durch jenen Punkt an dem die Membranspannungsverteilung die Mittelachse schneidet. Die Steigung wird so gewählt das der nichtlineare Rest im Gleichgewicht steht.
- Der verbleibende Spannungsanteil entspricht der nichtlinearen Spannungsspitze σ_{nlp} .

Die jeweiligen Spannungsanteile bei einer gegebenen Spannungsverteilung $\sigma(x)$ werden wie folgt analytisch berechnet, wobei $x=0$ an der Oberfläche des Bleches und $x=t$ an der gegenüberliegenden Seite als Koordinate anzusetzen ist:

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

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

$$\sigma_{nlp} = \sigma(x) - \sigma_{mem} - \left(1 - \frac{x}{2}\right) * \sigma_{ben} \quad \text{Gleichung 2-3}$$

2.1.2 Nennspannung

Die Nennspannung ist die errechnete Spannung im betrachteten Querschnitt ohne Berücksichtigung einer Spannungsüberhöhung durch die Schweißverbindung. Andere spannungsüberhöhende Effekte wie große Ausschnitte oder ähnliches werden allerdings berücksichtigt. Die Nennspannung kann über einen betrachteten Querschnitt variieren, zum Beispiel kann die Variation über einen Balkenquerschnitt mit der Biegelinientheorie errechnet werden wie in Abbildung 2-2 dargestellt.

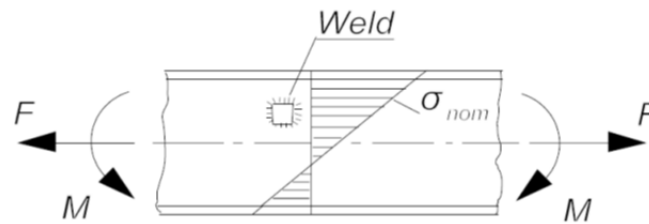


Abbildung 2-2: Nennspannung in einem Biegeträger (2)

Makrogeometrische Eigenschaften und Spannungsfelder in der Nähe von Punktlasten müssen in der Nennspannung berücksichtigt werden. Sekundäre Biegespannungen, eingeleitet durch Winkel und Kantenversatz, müssen ebenfalls berücksichtigt werden, wenn der Versatz den Betrag überschreitet, der bereits in den Wöhlerkurven des Ermüdungswiderstandes des konstruktiven Details berücksichtigt ist.

Die Nennspannung lässt sich nur für einfache Bauteile mit elementaren Theorien der linearelastischen technischen Mechanik berechnen. In komplexeren Fällen kann die Finite Elemente Methode (FEM) benutzt werden. Dies ist vor allem der Fall bei:

- Komplizierten statisch überbestimmten Strukturen
- Bauteilen die makrogeometrische Kerben beinhalten, für welche keine analytische Lösung vorhanden ist.

Bei der FEM Vernetzung kann das Netz einfach und grob sein. Es ist zu beachten, dass alle konstruktiven Details der Schweißverbindung, die einen Spannungsüberhöhenden Effekt haben, ausgeschlossen werden.

2.1.3 Strukturspannung (hot spot stress)

In der Strukturspannung werden alle spannungserhöhenden Details, außer die Erhöhung aus der Schweißnaht selbst, berücksichtigt. Das heißt es sind alle Spannungsanteile berücksichtigt, außer der nichtlinearen Spannungsspitze σ_{nlp} . Die nichtlineare Spannungsspitze wird beispielsweise durch die örtliche Kerbe an der Schweißnaht verursacht. Die Strukturspannung hängt von den Dimensions- und Belastungsparametern in der Nähe der Schweißnaht ab. Sie wird für den Punkt an der Oberfläche, der bewertet werden soll, bestimmt und besteht aus der Membranspannung σ_{mem} und aus der Schalenbiegespannung σ_{ben} . Da in der Strukturspannung auch die Spannungsüberhöhenden Effekte aus der konstruktiven Kerbe berücksichtigt werden, ist sie meist höher als die Normalspannung.

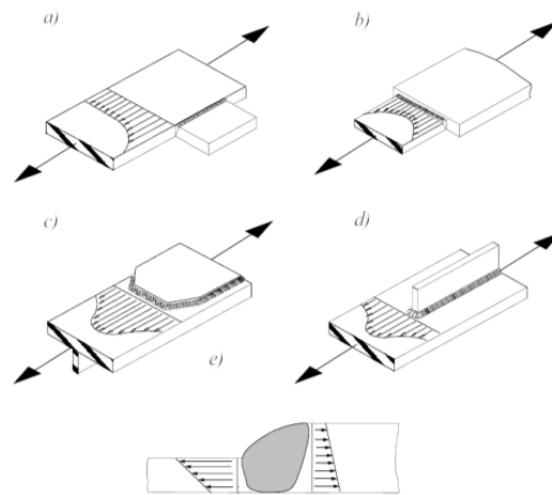


Abbildung 2-3: Strukturspannung am konstruktiven Detail (2)

In Abbildung 2-3 sind Beispiele für konstruktive Details und die dazugehörige Strukturspannung dargestellt. Zur Bewertung auf Schwingfestigkeit mit der Strukturspannungsmethode müssen die Strukturspannungen an den kritischen Stellen und kritischen Richtungen einer Schweißverbindung (hot spot) bestimmt werden. Die kritische Stelle ist allgemein, die Stelle wo eine Ermüdungsriss einleitung erwartet wird. Die Strukturspannungsmethode wird empfohlen, wenn bei einer Schweißverbindung aufgrund komplexer geometrischer Effekte eine Nennspannung nicht eindeutig definiert werden kann. Dies ist meist der Fall, wenn kein tabelliertes konstruktives Detail gefunden werden kann.

Die Strukturspannung wird meist mittels FEM berechnet, da keine analytischen Methoden und nur selten parametrische Formeln für die konstruktiven Details verfügbar sind. Ziel der FEM Berechnung ist die Hauptspannung. Wenn für die Berechnung eine idealisierte perfekt ausgerichtete Schweißnaht verwendet wird, muss ein möglicher Kantenversatz bei den Daten des Ermüdungswiderstandes berücksichtigt werden.

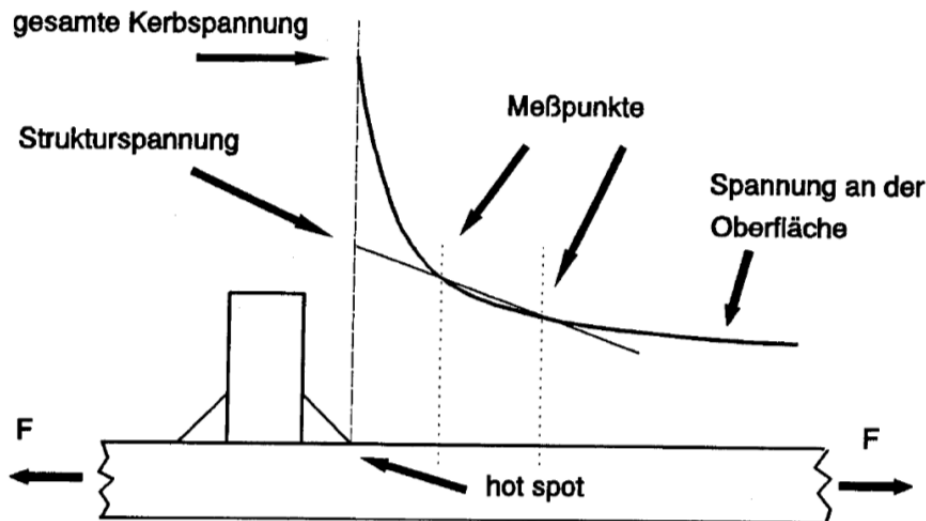


Abbildung 2-4: Definition der Strukturspannung (2)

In Abbildung 2-4 sieht man, dass für die Berechnung der Strukturspannung alle konstruktiven Spannungsüberhöhenden Effekte mitberücksichtigt werden außer der Schweißnaht selbst.

2.1.4 Effektive Kerbspannung

Die Effektive Kerbspannung ist nun die gesamte Spannung im Kerbgrund. Wie auch bei den vorangegangenen Methoden wird linear elastisches Werkstoffverhalten angenommen. Die reale Form der Kerbe an der Schweißnaht streut aufgrund der Herstellung stark, es wird deswegen eine idealisierte Kerbe für die Berechnung modelliert. Bei Baustählen, wie sie in Fahrwerksteilen von Zügen zum Einsatz kommen, hat sich gezeigt, dass ein effektiver Kerbradius von $r = 1\text{mm}$ gute Ergebnisse liefert. Zur Schwingfestigkeitsbewertung wird die effektive Kerbspannung mit einer allgemeinen Wöhlerlinie des Ermüdungswiderstandes verglichen.

Diese Methode ist beschränkt auf Schweißverbindungen die voraussichtlich am Nahtübergang oder an der Wurzel versagen. Andere Möglichkeiten des Versagens wie Ungänzen im Grundwerkstoff oder in der Schweißnaht werden mit dieser Methode nicht abgedeckt. Die Ermüdungsbewertung des Grundwerkstoffes müsste also zusätzlich mit der Methode der Strukturspannung durchgeführt werden. Die Bewertung von Schweißstößen mit größeren Spannungskomponenten parallel zur Schweißnaht oder parallel zur Wurzelkerbe ist mit dieser Methode ebenfalls nicht möglich. Der Vergleich verschiedener Schweißnahtformen ist gut durchführbar. Im Augenblick ist die Methode auf Schweißnahtdicken $t < 5\text{mm}$ beschränkt, bei geringeren Wandstärken konnte das Verfahren noch nicht verifiziert werden.

Berechnung der effektiven Kerbspannung

Die effektive Kerbspannung bzw. die Kerbfaktoren können aus parametrischen Formeln, Diagrammen, Randelement Rechnungen oder mithilfe der Finite Elemente Methode berechnet werden. Die vorliegende Arbeit befasst sich ausschließlich mit der Berechnung der Kerbfaktoren für vorgegebene Schweißnahtgeometrien mittels der Finite Elemente Methode. Der effektive Kerbradius wird so eingeführt, dass die Spitze des Radius den jeweiligen Kerbgrund berührt. Dies kann wie in Abbildung 2-5 ersichtlich an der Wurzelkerbe oder am Nahtübergang sein.

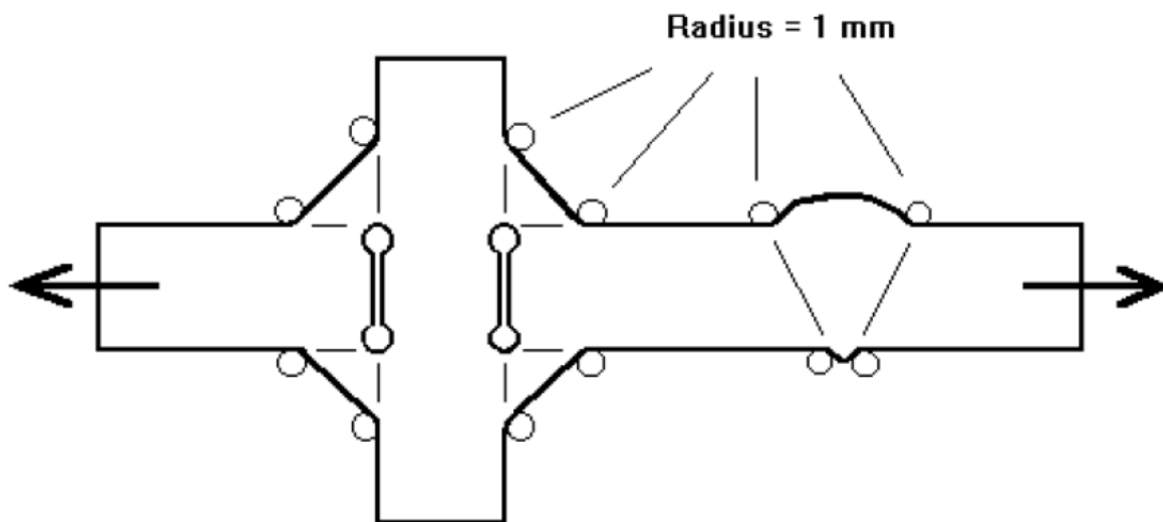


Abbildung 2-5: Bestimmen der effektiven Kerbradien (2)

Die Elemente in der FEM Berechnung müssen gewisse Kriterien erfüllen wie eine maximale Größe am Kerbgrund, um ausreichend gute Ergebnisse zu liefern. Dieser Sachverhalt wurde bereits von Dipl.-Ing. Franz Wolmersdorfer im Detail untersucht und die vorliegende Arbeit baut auf diesen Erkenntnissen auf. Ein möglicher Kantenversatz muss bei dieser Methode berücksichtigt werden.

2.2 Kerbwirkungszahl nach Radaj

In diesem Kapitel wird kurz darauf eingegangen, wie der Kerbradius beim Modell effektiver Kerbspannungen zustande kommt. Zur Ermittlung der maximalen Kerbspannung beim Kerbspannungskonzept wird linear elastisches Werkstoffverhalten angenommen. Nach dem Ansatz von Neuber bestimmt nicht die Kerbhöchstspannung, sondern die über ein kleines Werkstoffteilchen am Ort der Höchstspannung gemittelte Kerbspannung die Rißeinleitung (Mikrostützwirkung). (3) Die maßgebende Größe des kleinen Werkstoffteilchens ist die als Werkstoffkenngröße eingeführte Ersatzstrukturlänge ρ^* . Über diese Länge senkrecht zum Kerbgrund werden die rißeinleitenden Kerbspannungen rechnerisch gemittelt. Die folgenden Betrachtungen sind alle dem Kapitel Spannungsmittelungsansatz aus dem Buch Ermüdungsfestigkeit von Radaj D. und Vormwald M. entnommen.

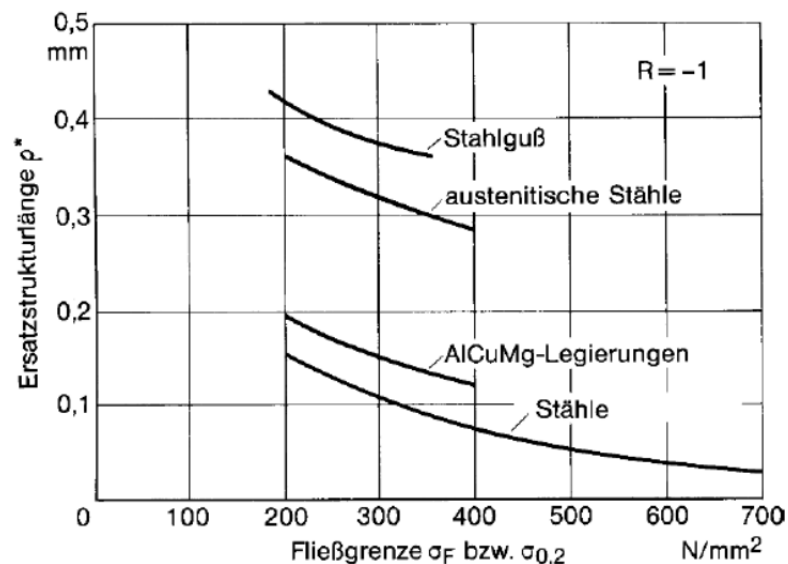


Abbildung 2-6: Ersatzstrukturlänge unterschiedlicher Werkstoffe als Funktion der Fließgrenze (3)

Die in Abbildung 2-6 dargestellte Ersatzstrukturlänge wurde von Neuber aus den Ergebnissen der Wöhler Versuche von Siebel und Stieler für unterschiedlich stark gekerbte Proben erstellt. Für den ingenieurmäßigen gebrauch wird eine fiktive Radiusvergrößerung gewählt. Das Ausmaß der fiktiven Radiusvergrößerung (Ausgangsradius ρ , fiktiv vergrößerter Radius ρ_f) ergibt sich aus der funktionsanalytischen Darstellung der Kerbspannungen und der Ersatzstrukturlänge ρ^* je nach Beanspruchungsfall (ebener Spannungszustand, ebener Dehnungszustand, nichtebener Schub) und gültiger Festigkeitshypothese.

$$\rho_f = \rho + s\rho^*$$

Gleichung 2-4

Der Faktor s ist je nach Festigkeitshypothese und Mehrachsigsigkeitsgrad des Spannungszustandes anzusetzen und kann Tabelle 2-3 entnommen werden.

Festigkeitshypothese	Mehrachsigsigkeitsgrad		
	ESZ Flachstab unter Zug- Druck oder Biegung Faktor s	EDZ Rundstab unter Zug- Druck oder Biegung Faktor s	NES Rundstab unter Torsion Faktor s^*)
Normalspannungshypothese	2	2	0,5 bzw. 1,0
Schubspannungshypothese	2	$\frac{2 - \nu}{1 - \nu}$	0,5 bzw. 1,0
Oktaederschubspannungs- u. Gestaltänderungsenergie- hypothese	2,5	$\frac{5 - 2\nu + 2\nu^2}{2 - 2\nu + 2\nu^2}$	0,5 bzw. 1,0
Dehnungshypothese	$2 + \nu$	$\frac{2 - \nu}{1 - \nu}$	0,5 bzw. 1,0
Formänderungsenergiehypothese	$2 + \nu$	$\frac{2 - \nu}{1 - \nu}$	0,5 bzw. 1,0

ESZ: ebener Spannungszustand, EDZ: ebener Dehnungszustand, NES: nichtebene Schubbeanspruchung

Tabelle 2-3: Faktor s der Mikrostützwirkung an Kerben für unterschiedliche Mehrachsigsigkeitsgrade und Festigkeitshypothesen (3)

Für Schweißverbindungen hat sich ein ebener Spannungszustand mit der Gestaltänderungsenergiehypothese also $s = 2,5$ bewährt. Unter der Annahme einer scharfen rissartigen Kerbe ergibt sich der Ausgangsradius ρ zu 0. Für einen niedrig legierten Baustahl im Festigkeitsbereich von $R_e \approx 230 \text{ N/mm}^2$ ergibt sich nach Abbildung 2-6 eine Ersatzstrukturlänge ρ^* von $\sim 0,4$. Daraus folgt ein fiktiver Kerbradius $\rho_f = 1 \text{ mm}$ der für die Modellierung verwendet wird.

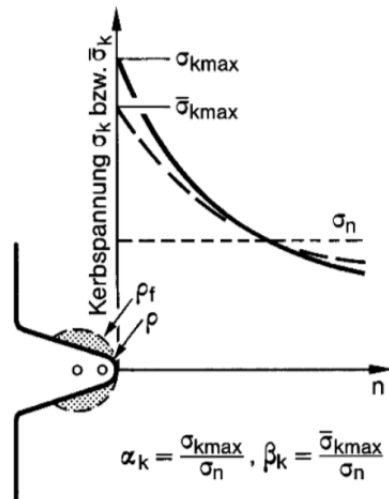


Abbildung 2-7: Reale und fiktive Kerbspannung an scharfer Kerbe ohne und mit fiktiver Kerbrundung (3)

Kerbformzahl $\alpha_k = \frac{\sigma_{kmax}}{\sigma_n}$ Gleichung 2-5

Kerbwirkungszahl $\beta_k = \frac{\bar{\sigma}_{kmax}}{\sigma_n}$ Gleichung 2-6

σ_n ist jeweils die ertragbare Nennspannung. Mit dem fiktiven vergrößerten Kerbradius ρ_f ergibt sich die Höchstspannung $\bar{\sigma}_{kmax}$ als festigkeitswirksam. Die aufgezeigten Spannungen sind als Dauerfestigkeitswerte anzusehen, sind aber auf beliebige Beanspruchungswerte übertragbar. Diese Betrachtungen von Radaj weichen von bisherigen Dauerfestigkeitsbetrachtungen, in denen jeweils die Dauerfestigkeit einer gekerbten zur ungekerbten Probe ins Verhältnis gesetzt wird ab.

2.3 Die Hauptnormalspannung im Kerbgrund

Allgemein lautet der Spannungstensor:

$$\boldsymbol{\sigma} := \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}.$$

Berücksichtigt man die Dualität der Schubspannungen enthält er sechs voneinander unabhängige Größen, als Spaltenmatrix $\boldsymbol{\tau}$ angeschrieben:

$$\boldsymbol{\tau} := \begin{bmatrix} \tau_{xx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}.$$

Die IIW spricht jeweils von der Spannung am Kerbgrund, geht aber nicht näher darauf ein welche Komponente bzw. Spannungshypothese im Einzelnen anzuwenden ist. In der vorliegenden Diplomarbeit werden jeweils 2D Schweißnahtstöße betrachtet, es ist also eine weitere Vereinfachung durch den ebenen Spannungszustand gegeben. Die Spaltenmatrix lautet:

$$\boldsymbol{\sigma} := \begin{bmatrix} \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix}$$

im ebenen Spannungszustand, da die betrachteten Modelle jeweils in der YZ – Ebene liegen und belastet werden. In mehreren Publikationen, die sich ebenfalls mit dem Konzept der lokalen Kerbspannung für betriebsfeste Auslegungen von Bauteilen beschäftigen, werden unterschiedlich Hauptnormalspannungen sowie von Mises Spannungen für die Betrachtung herangezogen. Die Hauptnormalspannung wird normalerweise bei spröden Werkstoffen, die eher mit einem Trennbruch versagen verwendet. Typische Werkstoffe die ein solches Verhalten zeigen, sind Guss oder Schweißnahtgefüge. Nach Auswertung einer großen Anzahl von Versuchen konnte laut Pedersen et al gezeigt werden, dass die IIW FAT 225 Wöhlerlinien gut mit der Hauptnormalspannung korrelieren. (4) Die berechneten Werte stimmten für Kehlnähte besonders gut überein, bei dünnen Stumpfstoßen kann es allerdings zu einer stark grenzwertigen Bewertung kommen. Es müssen wohl in weiterer Folge eigene Versuche mit den jeweils vorherrschenden Wandstärken und Schweißverfahren bzw. Schweißnahtqualitäten durchgeführt werden. Die auf den Modellen in der vorliegenden Arbeit aufbauende Bewertung orientiert sich streng an den IIW Richtlinien. Laut diesen Richtlinien ist eine Bewertung mit lokalen Kerbspannungen nur quer zur Naht möglich. Eine Bewertung mit Belastungen in Längsrichtung muss gesondert durchgeführt werden. Für die Bewertung im Nahtquerschnitt ist die Spannung an der Kerboberfläche maßgebend (größte Spannung). Die Spannungskomponente normal zur Oberflächenrichtung ist aber Null. Daraus folgt, dass die in Oberflächenrichtung gedrehte Spannung ein Maximum aufweisen muss sie entspricht also genau der

Hauptnormalspannung. Dabei wurden in UGS NX jeweils die in Oberflächenrichtung gedrehten, berechneten Spannungen mit den Hauptnormalspannungen verglichen und stimmten überein. Die Zusammenhänge zwischen Spannungsmatrix und Hauptnormalspannung können am einfachsten im Mohrschen Spannungskreis dargestellt werden.

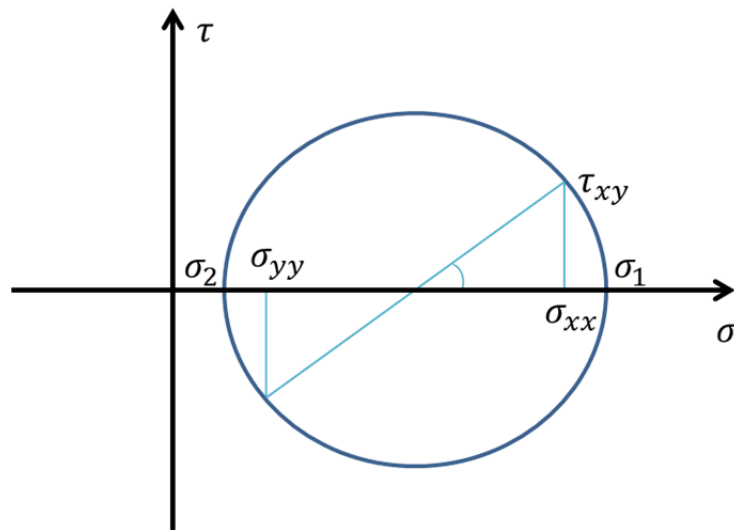


Abbildung 2-8: Mohrscher Spannungskreis

Daraus folgen die beiden Hauptnormalspannungen σ_1 und σ_2 :

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{Gleichung 2-7}$$

Die größte Hauptnormalspannung ist also nun jeweils die Höchstspannung im Kerbgrund und die Spannung welche für die Bewertung der Naht in Querrichtung verwendet wird.

2.4 Betriebsfestigkeitsnachweis nach IIW mit lokalen Kerbspannungen

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der automatisierten Erstellung von 2D Schweißnahtmodellen. Ziel ist es, die Schweißnahtmodelle für eine Kerbfallmatrix zur Verfügung zu stellen, mit der dann eine Bewertung nach IIW durchgeführt werden kann. Obwohl die eigentliche Bewertung im Rahmen der IIW nicht Gegenstand der Diplomarbeit ist, so soll Sie doch der Vollständigkeit halber kurz angeführt werden.

Der Ermüdungswiderstand gegen effektive Kerbspannungen für Stahl bezieht sich auf den geschweißten unbehandelten Zustand. Der Einfluss der Eigenspannungen ist berücksichtigt. Ein möglicher Kantenversatz ist allerdings nicht berücksichtigt. (2)

Nr.	Beschaffenheit der Kerbe	Beschreibung	FAT
1	Effektiver Kerbradius von 1mm als Ersatz für die Kerbe am Nahtübergang und der Nahtwurzel	Kerbe wie geschweißt, normale Qualität m=3	225

Tabelle 2-4: Ermüdungswiderstand gegen effektive Kerbspannung bei Stahl (2)

Der Ermüdungswiderstand wird üblicherweise von Einstufen- oder Betriebsversuchen abgeleitet. Die Daten auf denen die IIW aufbaut, stammen aus veröffentlichten Ergebnissen von Einstufenversuchen. Bei Schwingversuchen existieren verschiedene Versagenskriterien. Kleinproben werden bis zum Bruch getestet, während bei großen Bauteilen die Beobachtung eines Risses durch die Blechdicke als Versagen gewertet wird. Die in der IIW angegebenen tabellierten Details beruhen auf der Schwingbreite der Nennspannung, die im elastischen Bereich des Werkstoffes liegt. Die Bewertung von Normal- und Schubspannung erfolgt mit getrennt angegebenen Wöhlerkurven. Jede einzelne Kurve des Ermüdungswiderstandes wird durch den charakteristischen Ermüdungswiderstand des Details bei 2 Millionen Schwingspielen bezeichnet. Dieser Wert ist die Schwingfestigkeitsklasse (FAT). Die Neigung der Wöhlerlinie ist mit $m=3$ gegeben, mit einem Knickpunkt zur Dauerfestigkeit bei 10^7 Lastwechseln. Für eine Schadensakkumulation bei variabler Amplitude muss die Wöhlerlinie modifiziert werden. Die Steigung ab dem Knickpunkt bei 10^7 wird mit $m_2 = 2m_1 - 1$ angenommen. Die Wöhlerlinie fällt also stetig ab und es existiert keine Dauerfestigkeit. (2)

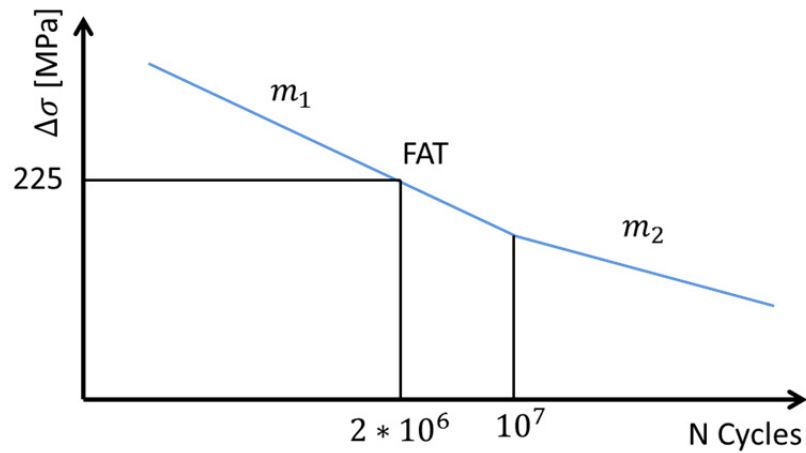


Abbildung 2-9: Wöhlerlinie mit FAT Klasse

Im Schalenmodell des zu bewertenden Bauteiles werden verschiedene Lastfälle berechnet und zu Lastgruppen zusammengefasst. Die Kräfte und Momente im 2D Schweißnahtmodell werden dann mit den Ergebnissen aus dem Schalenmodell überlagert und so die Kerbspannungen für jede Kerbe berechnet. Jeder dieser Lastfälle verursacht eine Teilschädigung, die zusammen die Schadenssumme bilden.

$$D = \sum_1^i \frac{n_i}{N_i} \leq 0,5 \dots 1$$

Gleichung 2-8

Aus der Summe der Teilschäden $\Delta\sigma_{j,s,d}$ wird eine Schadensäquivalente Spannung $\Delta\sigma_{eq,s,d}$ mit konstanter Amplitude berechnet. (2)

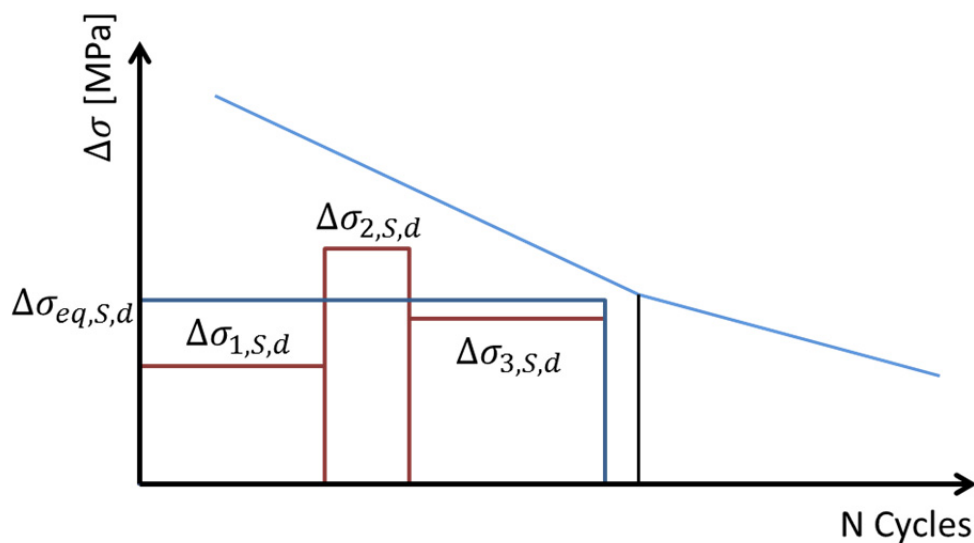


Abbildung 2-10: Wöhlerkurve mit Schadensäquivalenter Spannung

Diese Schadensäquivalente Spannung, bestehend aus den einzelnen Kerbspannungen der Lastfälle, wird nun mit dem Schub in der Blechebene kombiniert und bewertet.

$$\left(\frac{\Delta\sigma_{eq,S,d}}{\Delta\sigma_{R,d}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau_{eq,S,d}}{\Delta\tau_{R,d}}\right)^2 \leq CV \quad \text{mit } CV = 1 \quad \text{Gleichung 2-9}$$

Wobei hier $\Delta\sigma_{R,d}$ den ertragbaren Spannungsausschlag bei der Gesamtschwingenzahl angibt.

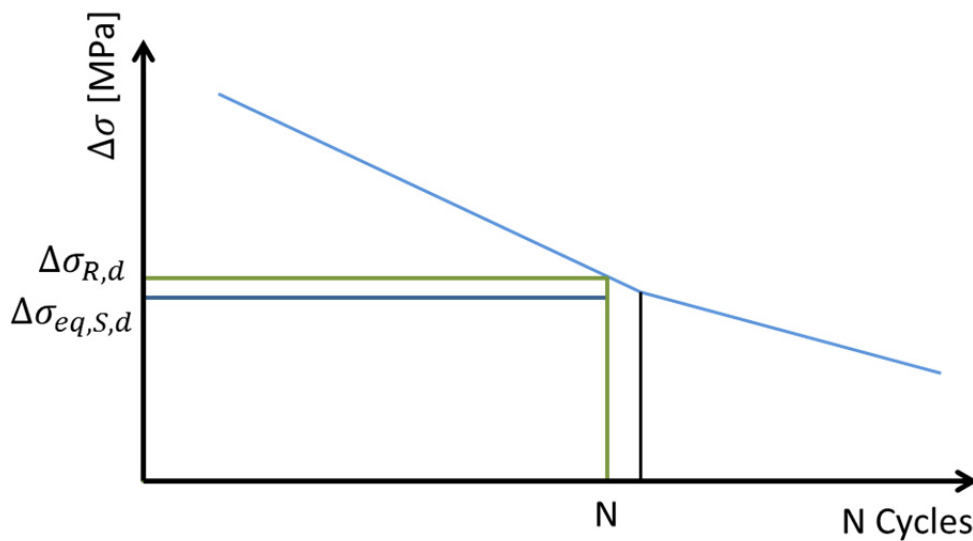


Abbildung 2-11: Wöhlerkurve mit ertragbarem Spannungsausschlag

$\Delta\sigma_{eq,S,d}$ und $\Delta\sigma_{R,d}$ zueinander ins Verhältnis gesetzt ergeben den jeweiligen Auslastungsgrad der Konstruktion an dieser Stelle. Die Längsspannungen in Schweißnahtichtung werden unabhängig davon mit der Nennspannungsmethode bewertet.

Bei einer Einstufenbelastung wird die Schwingbreite des charakteristischen Ermüdungswiderstandes $\Delta\sigma_{R,k}$ bei der geforderten Anzahl von Schwingspielen bestimmt. Anschließend wird das Festigkeitskriterium abgeprüft:

$$\Delta\sigma_{S,d} = \Delta\sigma_{S,k} * \gamma_F \leq \Delta\sigma_{R,d} = \frac{\Delta\sigma_{R,k}}{\gamma_M} \quad \text{Gleichung 2-10}$$

Mit den beiden Teilsicherheitsfaktoren γ für die Ermüdungsbeanspruchung und den Ermüdungswiderstand.

Für den Teilsicherheitsfaktor γ_F der Beanspruchungsseite werden in der IIW keine Empfehlungen abgegeben, er muss abhängig vom Anwendungsbereich selbst definiert werden. Der Teilsicherheitsbeiwert γ_M des Ermüdungswiderstandes kann folgender Tabelle entnommen werden:

Teilsicherheitsfaktor $\gamma_M \rightarrow$ Folge des Versagens	Ausfallsichere und schadenstolerante Bauweise	Bemessung auf sichere Lebensdauer oder auf Dauerschwingfestigkeit
Verlust sekundärer Bauteile	1,0	1,15
Verlust des gesamten Tragwerkes	1,15	1,30
Verlust menschlichen Lebens	1,30	1,40

Tabelle 2-5: Beispiele für Teilsicherheitsfaktoren γ_M für den Ermüdungswiderstand (2)

Eine Konstruktion wie beispielsweise ein Rahmen in einem Drehgestell ist einer Reihe von „Unsicherheitsfaktoren“ bei der Auslegung unterworfen. Einige denkbare „Unsicherheitsfaktoren“ eines Drehgestellrahmens die es bei der Auslegung zu berücksichtigen gilt, zeigt folgendes Schaubild auf:

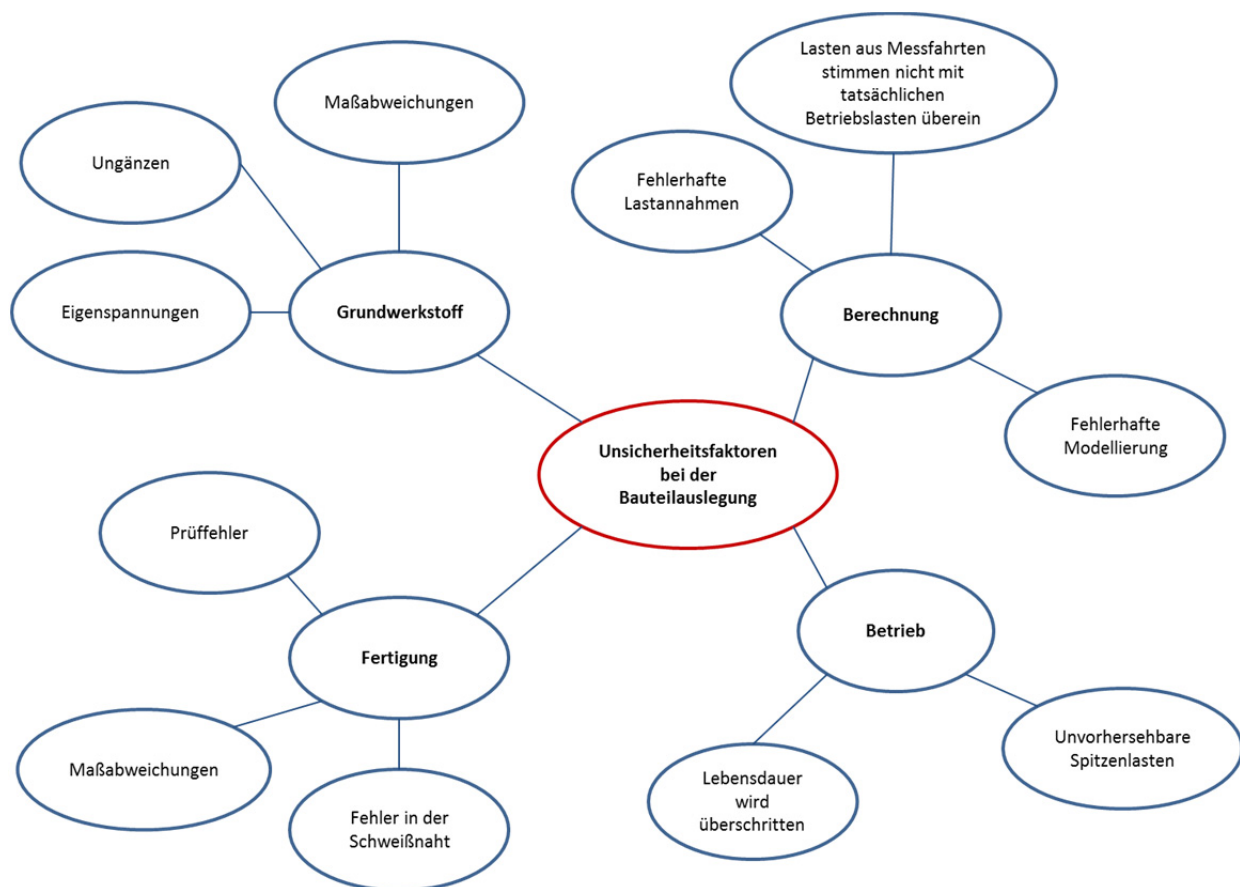


Abbildung 2-12: Unsicherheitsfaktoren bei der BauteilAuslegung

2.5 Grundlagen der Finite Elemente Simulation

Die benötigten Kerbfaktoren sind einer analytischen Berechnung nicht mehr zugänglich, weshalb üblicherweise die Berechnung mittels FE Simulation zur Bestimmung der Kerbfaktoren angewendet wird. Im Folgenden werden die dieser Methode zugrundeliegenden Gleichungen aufgezeigt, die unabhängig vom jeweils angewendeten Softwarepaket gelöst werden. Die Anwendung dieser Methode beschränkt sich in der vorliegenden Diplomarbeit auf linear elastische Festigkeitsprobleme. Allgemein ermöglicht diese Berechnungsmethode jedoch eine Vielzahl von Problemstellungen numerisch zu lösen.

2.5.1 Grundlagen aus der Kontinuumsmechanik

Die Ableitung der Grundgleichungen wird anhand des Skriptums aus Methode der Finiten Elemente von Celigoj C. und Schmidt M. gezeigt. (5)

Das Ziel der Festigkeitslehre ist es, das mechanische Verhalten von festen, verformbaren Körpern, die wir als Kontinuum auffassen, unter dem Einfluss von äußeren Belastungen (also hier Kräfte und vorgegebene Verschiebungen) zu beschreiben. Wenn man die Verschiebungen $u_i (i = x, y, z)$ und Spannungen $\tau_{ij} (i, j = x, y, z)$ in jedem Punkt des Bauteils kennt ist die Berechnung gelöst. Den Zusammenhang zwischen Verformung und Verschiebung liefert die Werkstoffkunde durch ein Materialgesetz, man geht bei dieser Betrachtung davon aus, dass nur die Verformung in einer beliebig kleinen Umgebung um den betrachteten Punkt die Spannung in diesem beeinflussen kann. Mit Hilfe des lokalen Verformungsmaßes definiert man die Verzerrungen:

$$\varepsilon_{ij} := \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \text{Gleichung 2-11}$$

In obiger Gleichung gilt $u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial j}$. Es sind also insgesamt 15 unbekannte Größen (3 Komponenten des Verschiebungsvektors u_i , 6 Komponenten des Verzerrungstensors ε_{ij} , und 6 Komponenten des Spannungstensors τ_{ij}) zu ermitteln.

Die 15 gesuchten Gleichungen setzen sich zusammen aus:

1. 6 Gleichungen aus den Verzerrungs-Verschiebungs-Beziehungen
2. 3 Gleichungen aus den Gleichgewichtsbedingungen im Inneren und Äußeren des Körpers
3. 6 Gleichungen aus dem Werkstoffgesetz

Die unter 1. Angeführten Gleichungen sind also bereits gegeben. Im Folgenden wird das Werkstoffgesetz aufgezeigt. Spannungen und Verzerrungen sind Tensoren zweiter Stufe. Für die weitere Ableitung werden sie als Spaltenmatrizen dargestellt.

$$\boldsymbol{\tau} := \begin{bmatrix} \tau_{xx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\varepsilon} := \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{xy} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{bmatrix}$$

Die oben dargestellten Spaltenmatrizen für Spannungen und Verzerrungen werden durch ein Werkstoffgesetz zueinander in Beziehung gesetzt. Im linear elastischen Fall geschieht dies durch das Hook'sche Gesetz:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{C} * \boldsymbol{\varepsilon}$$

Gleichung 2-12

Mit dem Elastizitätstensor in Matrixschreibweise – der Elastizitätsmatrix \mathbf{C} :

$$\mathbf{C} := \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & & & \\ \nu & 1-\nu & \nu & & & \\ \nu & \nu & 1-\nu & & & \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & & \\ & & & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & \\ & & & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

Äquivalent zu den Gleichgewichtsbedingungen im inneren und äußeren ist das im Folgenden angegebene Prinzip der virtuellen Arbeit.

$$\int_V \delta u_i (\tau_{ji,j} + f_i^B - \rho a_i) dV + \int_S \delta u_i (f_i^S - \tau_{ji} n_j) dS = 0 \quad \text{Gleichung 2-13}$$

In obiger Gleichung steht δu_i für eine beliebig angenommene virtuelle Verschiebung. Die virtuellen Verschiebungen müssen lediglich mit den kinematischen Randbedingungen des betrachteten Systems, also den vorgegebenen Verschiebungen, übereinstimmen. Der erste Term mit dV steht für die virtuelle Arbeit im Inneren und der zweite Term mit dS steht für die virtuelle Arbeit auf der Oberfläche. In obigem Term findet man die Ableitungen der Spannungen $\tau_{ji,j}$, welche durch das Werkstoffgesetz ja wiederum bereits die Verzerrungen als Ableitungen der Verschiebungen enthalten.

Die Differentielle Ordnung des Systems lässt sich unter Anwendung des Gauß'schen Integralsatzes um eins verringern. Unter Berücksichtigung der Symmetrie des Spannungstensors $\tau_{ij} = \tau_{ji}$ lässt sich der erste Term in Gleichung 2-13 umformen zu:

$$\int_V \delta u_i \tau_{ji,j} dV = \int_V (\delta u_i \tau_{ji})_{,j} dV - \int_V \delta u_{i,j} \tau_{ji} dV = \int_S \delta u_i \tau_{ji} n_j dS - \int_V \frac{1}{2} (\delta u_{i,j} + \delta u_{j,i}) \tau_{ji} dV$$

Gleichung 2-14

Damit lautet das Prinzip der virtuellen Arbeit:

$$- \int_V \delta \varepsilon_{ij} \tau_{ij} dV + \int_V \delta u_i f_i^B dV + \int_S \delta u_i f_i^S dS + \int_V \delta u_i \rho (-a_i) dV = 0$$

Gleichung 2-15

In obiger Gleichung steht der erste Term für die inneren Kräfte, die nächsten beiden Terme für die externen Kräfte am Volumen und an der Oberfläche und der letzte Term steht für die Trägheitskräfte. In Worten ausgedrückt beschreibt obige Gleichung, dass ein Körper unter der Wirkung äußerer Kräfte dann im Gleichgewicht ist, wenn bei einer virtuellen Verschiebung δu_i aus der momentanen Lage heraus die Summe der virtuellen Arbeit der Inneren-, Äußerer- sowie der Trägheitskräfte gleich null ist. Auch die Gleichgewichtsbedingungen, hier durch virtuelle Arbeiten ausgedrückt, lassen sich in Vektorschreibweise angeben. Dabei wird auch bereits das unter Gleichung 2-12 angeführte Werkstoffgesetz verwendet:

$$\delta W_{int} + \delta W_{ext} + \delta W_{inertia} = 0$$

Gleichung 2-16

$$\delta W_{int} = - \int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\tau} dV = - \int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} dV$$

$$\delta W_{ext} = \int_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{f}^B dV + \int_S \delta \mathbf{u}^T \mathbf{f}^S dS$$

$$\delta W_{inertia} = \int_V \delta \mathbf{u}^T \rho (-\mathbf{a}) dV$$

Damit sind nun alle gesuchten 15 Größen durch Gleichungen definiert.

2.5.2 Die Finite Elemente Methode

Die folgende Methodik wird anhand des Skriptums aus Methode der Finiten Elemente von Celigoj C. und Schmidt M. gezeigt. (5)

Die im Kapitel Grundlagen aus der Kontinuumsmechanik aufgezeigte Aufgabe ist also gelöst wenn ein Verschiebungsfeld $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}; t)$ gefunden wird, dass für alle beliebigen virtuellen Verschiebungen $\delta \mathbf{u}$ die Gleichung 2-11 und Gleichung 2-16 erfüllt. Da Randbedingungen und Geometrie des Körpers im Allgemeinen völlig beliebig sind, können obige Gleichungen nur in Sonderfällen analytisch exakt gelöst werden. Die gesuchten Größen werden also numerisch durch die Differentialgleichungen berechnet.

Für die Finite Elemente Methode heißt das im Einzelnen:

1. Der Körper wird durch gedachte Linien und Flächen in M finite Elemente geteilt („finit“ steht für „endlich groß“, im Gegensatz zu „infinitesimal“ für „unendlich klein“). Das mit dem m-ten Element verbundene Volumen wird mit $V^{(m)}$ und seine Oberfläche mit $S^{(m)}$ bezeichnet ($1 \leq m \leq M$).
2. Im Element (m) werden n Knotenpunkte an der Oberfläche und in speziellen Fällen auch im Inneren festgelegt.
Die Verschiebungen $\hat{\mathbf{u}}^T = [u_1 v_1 w_1 u_2 v_2 w_2 \dots u_N v_N w_N]$ der Knotenpunkte aller Elemente (N ist die Anzahl aller Knoten) sind nun die unbekanntenen Größen des diskreditierten Systems. In der Modellvorstellung werden Kräfte zwischen zwei Elementen nur noch an den gemeinsamen Knotenpunkten übertragen, jedoch nicht dazwischen.
3. Alle angreifenden äußeren Lasten werden in den Knotenpunkten konzentriert.
4. Das Verschiebungsfeld $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}; t)$ wird innerhalb jedes einzelnen Elementes (m) durch die Matrix der Ansatzfunktion (shape functions) $\mathbf{H}^{(m)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$, mit ihren Elementen $h_i^{(m)}$ und durch die Verschiebungen $\hat{\mathbf{u}}(t)$ seiner Knotenpunkte angenähert:

$$\mathbf{u}^{(m)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}; t) = \mathbf{H}^{(m)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \hat{\mathbf{u}}(t)$$

Gleichung 2-17

Die Ansatzfunktionen $\mathbf{H}^{(m)}$ können letztendlich willkürlich gewählt werden, sind aber, um brauchbare Ergebnisse zu erzielen, einigen Einschränkungen unterworfen:

- Zur Approximation der Verschiebungen sind nur stetige Funktionen physikalisch sinnvoll.
- Starrkörperverschiebungen sollen exakt als solche wiedergegeben werden können.
- Zwischen den verformten Elementen soll es zu keinen Klaffungen und Überlappungen kommen (d.h. die Kompatibilitätsbedingungen müssen erfüllt sein).
- Konstante Verzerrungszustände sollen erfasst werden können.

Als Ansatzfunktionen $\mathbf{H}^{(m)}$ dienen im Allgemeinen Polynome. Im einfachsten Fall wird das Verschiebungsfeld linear angenähert. Damit wird das kontinuierliche, kontinuumsmechanische Problem mit unendlich vielen Freiheitsgraden – nämlich dem gesamten Verschiebungsfeld \mathbf{u} - durch eine diskrete Formulierung mit endlich vielen Parametern – den Knotenpunktverschiebungen $\hat{\mathbf{u}}$ – approximiert.

Mit Hilfe der Differentialoperatormatrix \mathbf{D} ergibt sich daraus ein Ansatz für die Verzerrungen $\boldsymbol{\varepsilon}^{(m)}$ im Element als Funktion der Knotenpunktverschiebungen:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(m)}(x, y, z; t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \mathbf{D}\mathbf{u}^{(m)}(x, y, z; t) = \mathbf{D}\mathbf{H}^{(m)}(x, y, z)\hat{\mathbf{u}}(t)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(m)}(x, y, z; t) = \mathbf{B}^{(m)}(x, y, z)\hat{\mathbf{u}}(t)$$

Gleichung 2-18

Die Differentialoperatormatrix \mathbf{D} wird mit der Ansatzfunktion des Elementes $\mathbf{H}^{(m)}$ zur \mathbf{B} - Matrix zusammengefasst. Verschiebungen im Element und Knotenpunktverschiebungen werden also durch die \mathbf{H} - Matrix verbunden, Verzerrungen und Knotenpunktverschiebungen durch die \mathbf{B} - Matrix.

Analog ergeben sich die Beziehungen für die virtuellen Größen $\delta \mathbf{u}$ und $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$:

$$\delta \mathbf{u}^{(m)}(x, y, z; t) = \mathbf{H}^{(m)}(x, y, z) \delta \hat{\mathbf{u}} \quad \text{Gleichung 2-19}$$

$$\delta \boldsymbol{\varepsilon}^{(m)}(x, y, z; t) = \mathbf{B}^{(m)}(x, y, z) \delta \hat{\mathbf{u}} \quad \text{Gleichung 2-20}$$

Setzt man diese Zusammenhänge nun in die Gleichung 2-16 ein so ergeben sich die einzelnen Terme zu:

$$\delta W_{int} = - \int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} dV = - \delta \hat{\mathbf{u}}^T \sum_{(m)} \int_{V^{(m)}} \mathbf{B}^{(m)T} \mathbf{C}^{(m)} \mathbf{B}^{(m)} dV^{(m)} \hat{\mathbf{u}} = - \delta \hat{\mathbf{u}}^T \mathbf{K} \hat{\mathbf{u}} = - \delta \hat{\mathbf{u}}^T \mathbf{F}_{int}$$

Mit der globalen Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} als Summe (besser: „Assemblage“) der Elementsteifigkeitsmatrizen $\mathbf{K}^{(m)}$.

$$\begin{aligned} \delta W_{ext} &= \int_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{f}^B dV + \int_S \delta \mathbf{u}^T \mathbf{f}^S dS = \\ &= \delta \hat{\mathbf{u}}^T \sum_{(m)} \left[\int_{V^{(m)}} \mathbf{H}^{(m)T} \mathbf{f}^B dV^{(m)} + \int_{S^{(m)}} \mathbf{H}^{(m)T} \mathbf{f}^S dS^{(m)} \right] = \delta \hat{\mathbf{u}}^T \mathbf{F}_{ext} \end{aligned}$$

Mit der Spaltenmatrix \mathbf{F}_{ext} der äußeren Kräfte, die die verteilten Volums- und Oberflächenkräfte beinhaltet. Zu dieser müssen in den Knoten allenfalls vorhandene, angreifende Einzellasten \mathbf{F}_{ext}^C addiert werden.

$$\delta W_{inertia} = - \int_V \delta \mathbf{u}^T \rho \ddot{\mathbf{u}} dV = - \delta \hat{\mathbf{u}}^T \sum_{(m)} \int_{V^{(m)}} \mathbf{H}^{(m)T} \rho \mathbf{H}^{(m)} dV^{(m)} \ddot{\mathbf{u}} = - \delta \hat{\mathbf{u}}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} = - \delta \hat{\mathbf{u}}^T \mathbf{F}_{inertia}$$

Mit der globalen Massenmatrix \mathbf{M} als Summe (besser: „Assemblage“) der Elementmassenmatrizen $\mathbf{M}^{(m)}$.

Die Arbeitsgleichung kann nun vereinfacht angeschrieben werden als:

$$\mathbf{M} \ddot{\hat{\mathbf{u}}} + \mathbf{K} \hat{\mathbf{u}} = \mathbf{F}_{ext} \quad \text{Gleichung 2-21}$$

In der vorliegenden Arbeit werden rein statische Problemstellungen behandelt, das bedeutet der Trägheitsterm kann vernachlässigt werden.

$$\mathbf{K}\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{F}_{ext} \quad \text{Gleichung 2-22}$$

Diese Gleichung kann so noch nicht gelöst werden. \mathbf{K} ist im Allgemeinen singulär, da in die Formulierung lediglich die Kräfte- und Randbedingungen (als Vektor der äußeren Knotenlasten), nicht aber die Verschiebungsrandbedingungen eingearbeitet wurden. Formal kann man dabei folgendermaßen vorgehen: Der Vektor der Knotenpunktverschiebungen $\hat{\mathbf{u}}$ wird umgestellt und in zwei Teile aufgespalten, sodass $\hat{\mathbf{u}}_A$ alle unbekanntes Verschiebungen enthält und $\hat{\mathbf{u}}_B$ alle vorgegebenen Randverschiebungen. Diese Umordnung und Aufspaltung muss natürlich analog in \mathbf{K} und \mathbf{F}_{ext} erfolgen.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{AA} & \mathbf{K}_{AB} \\ \mathbf{K}_{BA} & \mathbf{K}_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{u}}_A \\ \hat{\mathbf{u}}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{extA} \\ \mathbf{F}_{extB} \end{bmatrix} \quad \text{Gleichung 2-23}$$

Daraus können nun die unbekanntes Knotenpunktverschiebungen $\hat{\mathbf{u}}_A$ und die unbekanntes (Reaktions-) Kräfte \mathbf{F}_{extB} an den Knoten mit vorgegebenen Verschiebungen ermittelt werden.

Zusammenfassend werden Spannungen mit der FE- Methode folgendermaßen berechnet:

- Unterteilung des Realen Körpers in M- finite Elemente, Verschiebungen im Element werden durch die Ansatzfunktion (\mathbf{H} - Matrix) angenähert.
- Berechnung der \mathbf{B} - Matrix als Ableitung der \mathbf{H} - Matrix.
- Berechnung der \mathbf{K} - Matrix über die Integrale der virtuellen Arbeit
- Bestimmung der Knotenpunktverschiebungen $\hat{\mathbf{u}}$ unter Berücksichtigung der Randbedingungen (Verschiebungen und Kräfte)
- Durch Verknüpfen der \mathbf{B} - Matrix mit den Knotenpunktverschiebungen $\hat{\mathbf{u}}$ Berechnung der Verzerrungen $\boldsymbol{\varepsilon}$
- Berechnung der Spannungen $\boldsymbol{\tau}$ über die Spannungs-Verzerrungsbeziehung

2.5.3 Das CQUAD8 Element

Die verwendete Simulationssoftware NX Nastran bietet eine Vielzahl möglicher Elemente für die FE Berechnung. Für die Erstellung der 2D-Schweißnahtmodelle wird vorwiegend das CQUAD8 Element verwendet. Dabei handelt es sich um ein isoparametrisches Schalenelement zweiter Ordnung. Isoparametrisch bedeutet, dass dieselben Ansatzfunktionen für die Knotenpunktkoordinaten im Netz wie für die Verschiebungen im Element verwendet werden. Die Kinematischen Beziehungen für diese Schale beruhen auf der Reissner-Mindlin Plattentheorie. (6)

Im Folgenden werden die Ansatzfunktionen und die Kinematischen Beziehungen kurz dargestellt. Die Ansatzfunktionen werden anders als zuvor in einem Elementkoordinatensystem mit r und s angegeben. vgl. (7)

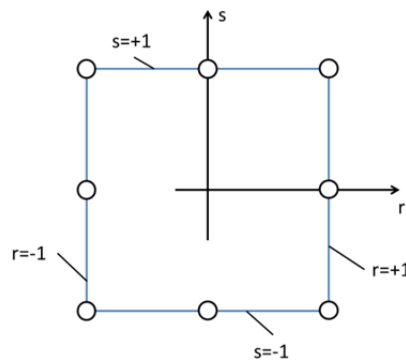


Abbildung 2-13: Viereckiges Element zweiter Ordnung der Serendipity-Klasse vgl. (7)

$$r_0 = r * r_k \quad \text{Gleichung 2-24}$$

$$s_0 = s * s_k \quad \text{Gleichung 2-25}$$

Hier sind r_k und s_k die Koordinaten am Knoten k .

Die Ansatzfunktionen für die Eckknoten lauten nun:

$$h_k = \frac{1}{4}(1 + r_0)(1 + s_0)(r_0 + s_0 - 1) \quad \text{Gleichung 2-26}$$

Die Ansatzfunktionen für die Zwischenknoten lauten:

$$r = 0 \quad h_k = \frac{1}{2}(1 - r^2)(1 + s_0) \quad \text{Gleichung 2-27}$$

$$s = 0 \quad h_k = \frac{1}{2}(1 + r_0)(1 - s^2) \quad \text{Gleichung 2-28}$$

Die folgende Ableitung entspricht weitestgehend der Darstellung in Klaus-Jürgen Bathes: „Finite-Elemente-Methoden“. Abgeleitet von Balkenelementen kann man auch Schalenelemente für eine variable Anzahl von Knoten formulieren. Unter Verwendung natürlicher Koordinaten r , s und t lauten die kartesischen Koordinaten eines beliebigen Punktes im Element mit q Knotenpunkten vor und nach der Deformation: (8)

$${}^l x(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k {}^l x_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k {}^l V_{nx}^k \quad \text{Gleichung 2-29}$$

$${}^l y(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k {}^l y_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k {}^l V_{ny}^k \quad \text{Gleichung 2-30}$$

$${}^l z(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k {}^l z_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k {}^l V_{nz}^k \quad \text{Gleichung 2-31}$$

Hier sind h_k die zuvor angeführten Interpolationsfunktionen; ferner bedeuten

${}^l x, {}^l y, {}^l z =$ kartesische Koordinaten eines beliebigen Punktes im Element,

${}^l x_k, {}^l y_k, {}^l z_k =$ kartesische Koordinaten des Knotenpunktes k ,

$a_k =$ die Schalendicke am Knotenpunkt k in Richtung t ,

${}^l V_{nx}^k, {}^l V_{ny}^k, {}^l V_{nz}^k =$ Komponenten des zur Schalenmittenfläche „normalen“ Einheitsvektors ${}^l V_n^k$ im Knotenpunkt k in Richtung t .

Der linke obere Index l kennzeichnet die Konfiguration des Elementes, dabei steht $l=0$ bzw. $l=1$ für die Konfiguration vor bzw. nach der Deformation.

Man erhält damit für die Verschiebungskomponenten:

$$u(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k u_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k V_{nx}^k \quad \text{Gleichung 2-32}$$

$$v(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k v_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k V_{ny}^k \quad \text{Gleichung 2-33}$$

$$w(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k w_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k V_{nz}^k \quad \text{Gleichung 2-34}$$

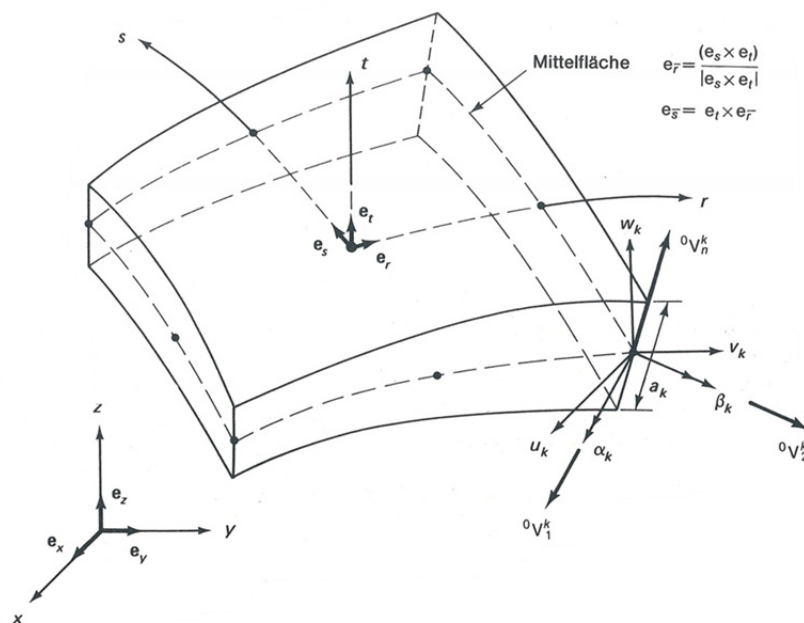


Abbildung 2-14: Schalelement (8)

Der Vektor \mathbf{V}_n^k erfasst den Zuwachs des Richtungscosinus von ${}^0\mathbf{V}_n^k$ infolge der Deformation, d.h. von $l=0$ nach $l=1$:

$$\mathbf{V}_n^k = {}^1\mathbf{V}_n^k - {}^0\mathbf{V}_n^k \quad \text{Gleichung 2-35}$$

Die Komponenten von V_n^k können durch Drehgrößen am Knoten k ausgedrückt werden. Eine effiziente Möglichkeit ist die folgende Definition von zwei Einheitsvektoren ${}^0V_1^k$ und ${}^0V_2^k$, die orthogonal zu ${}^0V_n^k$ sind.

$${}^0V_1^k = \frac{(\mathbf{e}_y \times {}^0V_n^k)}{|\mathbf{e}_y \times {}^0V_n^k|} \quad \text{Gleichung 2-36}$$

In obiger Gleichung ist \mathbf{e}_y der Einheitsvektor der y - Achse. Für den zweiten Vektor gilt:

$${}^0V_2^k = {}^0V_n^k \times {}^0V_1^k \quad \text{Gleichung 2-37}$$

Wenn α_k bzw. β_k die Drehungen des Normalenvektors ${}^0V_n^k$ um die Vektoren ${}^0V_1^k$ und ${}^0V_2^k$ sind, gilt unter Berücksichtigung sehr kleiner Winkel:

$$V_n^k = -{}^0V_2^k \alpha_k + {}^0V_1^k \beta_k \quad \text{Gleichung 2-38}$$

Diese Beziehung kann nun in Gleichung 2-32 bis Gleichung 2-34 angewendet werden:

$$u(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k u_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k (-{}^0V_{2x}^k \alpha_k + {}^0V_{1x}^k \beta_k) \quad \text{Gleichung 2-39}$$

$$v(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k v_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k (-{}^0V_{2y}^k \alpha_k + {}^0V_{1y}^k \beta_k) \quad \text{Gleichung 2-40}$$

$$w(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k w_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k (-{}^0V_{2z}^k \alpha_k + {}^0V_{1z}^k \beta_k) \quad \text{Gleichung 2-41}$$

Mit den dargestellten Zusammenhängen können nun die Elementmatrizen bestimmt werden. Die Einträge in die Verschiebungsinterpolationsmatrix \mathbf{H} des Schalenelementes sind durch die Gleichung 2-39 bis Gleichung 2-41 gegeben. Die Einträge für die Verzerrungs-Verschiebungs-Interpolationsmatrix lassen sich ähnlich wie bei Balkenelementen bestimmen.

Aus den Gleichung 2-39 bis Gleichung 2-41 erhält man die zur Berechnung der Verzerrungs-Verschiebungs-Matrix erforderlichen Ableitungen:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial s} \\ \frac{\partial u}{\partial t} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^q \begin{bmatrix} \frac{\partial h_k}{\partial r} [1 & t g_{1x}^k & t g_{2x}^k] \\ \frac{\partial h_k}{\partial s} [1 & t g_{1x}^k & t g_{2x}^k] \\ h_k [1 & t g_{1x}^k & t g_{2x}^k] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_k \\ \alpha_k \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \text{Gleichung 2-42}$$

Aus obiger Gleichung ergeben sich auch die Ableitungen von v bzw. w, indem man u und x durch v und y bzw. w und z ersetzt. In Gleichung 2-42 bedeutet:

$$\mathbf{g}_1^k = -\frac{1}{2} a_k \mathbf{0V}_2^k \quad \mathbf{g}_2^k = \frac{1}{2} a_k \mathbf{0V}_1^k \quad \text{Gleichung 2-43}$$

Die Verschiebungsableitungen nach den kartesischen Koordinaten x, y, z erhält man aus der Standardtransformation:

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{J}^{-1} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \quad \text{Gleichung 2-44}$$

Die Jacobi Matrix enthält die Ableitungen der natürlichen Koordinaten nach r, s und t.

Nutzt man nun diese Beziehung erhält man die Transformierte Matrix:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^q \begin{bmatrix} \frac{\partial h_k}{\partial x} & g_{1x}^k G_x^k & g_{2x}^k G_x^k \\ \frac{\partial h_k}{\partial y} & g_{1x}^k G_x^k & g_{2x}^k G_y^k \\ \frac{\partial h_k}{\partial z} & g_{1x}^k G_x^k & g_{2x}^k G_z^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_k \\ \alpha_k \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \text{Gleichung 2-45}$$

Die Ableitungen von v und w erfolgen analog. In Gleichung 2-45 bedeutet:

$$\frac{\partial h_k}{\partial x} = J_{11}^{-1} \frac{\partial h_k}{\partial r} + J_{12}^{-1} \frac{\partial h_k}{\partial s} \quad \text{Gleichung 2-46}$$

$$G_x^k = t \left(J_{11}^{-1} \frac{\partial h_k}{\partial r} + J_{12}^{-1} \frac{\partial h_k}{\partial s} \right) + J_{13}^{-1} h_k \quad \text{Gleichung 2-47}$$

In obiger Gleichung sind J_{ij}^{-1} die Elemente (i, j) von der Inversen der Jacobi Matrix.

Mit den in Gleichung 2-45 definierten Verschiebungsableitungen kann die Verzerrungs-Verschiebungs-Beziehung also die B-Matrix eines Schalenelementes auf direktem Weg zusammengestellt werden.

Die Einträge in die B-Matrix können unter der Annahme konstruiert werden, dass die Zeilen dieser Matrix den sechs globalen kartesischen Verzerrungskomponenten $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \dots, \gamma_{zx}$ entsprechen. Es muss aber die Schalenannahme, dass die zur Schalenmittelfläche normale Spannung Null ist, in das Spannungs-Verzerrungs-Gesetz eingebracht werden. Für die Spannungen und Verzerrungen gilt der Bereits bekannte Zusammenhang in leicht veränderter Form:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{C}_{sh} * \boldsymbol{\varepsilon} \quad \text{Gleichung 2-48}$$

Mit

$$\boldsymbol{\tau}^T = [\tau_{xx} \quad \tau_{yy} \quad \tau_{zz} \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}] \quad \text{Gleichung 2-49}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = [\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{zz} \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}] \quad \text{Gleichung 2-50}$$

$$\mathbf{C}_{sh} = \mathbf{Q}_{sh}^T \left(\frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 & & & \\ & 1 & 0 & & & \\ & & 0 & & & \\ & & & \frac{1-\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & 0 & k \frac{1-\nu}{2} & 0 \\ & & & & 0 & k \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \right) \mathbf{Q}_{sh} \quad \text{Gleichung 2-51}$$

symmetrisch

Hier stellt \mathbf{Q}_{sh} eine Matrix dar, die das Spannungs-Verzerrungs-Gesetz vom kartesischen mit der Schale gleichgerichteten Koordinatensystem $\bar{r}, \bar{s}, \bar{t}$ in das globale kartesische Koordinatensystem transformiert. Die Elemente der Matrix \mathbf{Q}_{sh} sind Produkte und Summen des Richtungskosinus der Koordinatenachsen $\bar{r}, \bar{s}, \bar{t}$ gegen die Koordinatenrichtungen x, y, z:

$$\mathbf{Q}_{sh} = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & & & \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & & & \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & & & \\ 2l_1l_2 & 2m_1m_2 & 2n_1n_2 & l_1m_2 + l_2m_1 & m_1n_2 + m_2n_1 & n_1l_2 + n_2l_1 \\ 2l_2l_3 & 2m_2m_3 & 2n_2n_3 & l_2m_3 + l_3m_2 & m_2n_3 + m_3n_2 & n_2l_3 + n_3l_2 \\ 2l_3l_1 & 2m_3m_1 & 2n_3n_1 & l_3m_1 + l_1m_3 & m_3n_1 + m_1n_3 & n_3l_1 + n_1l_3 \end{bmatrix} \quad \text{Gleichung 2-52}$$

Mit

$$\begin{aligned} l_1 &= \cos(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_{\bar{r}}) & m_1 &= \cos(\mathbf{e}_y, \mathbf{e}_{\bar{r}}) & n_1 &= \cos(\mathbf{e}_z, \mathbf{e}_{\bar{r}}) \\ l_2 &= \cos(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_{\bar{s}}) & m_2 &= \cos(\mathbf{e}_y, \mathbf{e}_{\bar{s}}) & n_2 &= \cos(\mathbf{e}_z, \mathbf{e}_{\bar{s}}) \\ l_3 &= \cos(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_{\bar{t}}) & m_3 &= \cos(\mathbf{e}_y, \mathbf{e}_{\bar{t}}) & n_3 &= \cos(\mathbf{e}_z, \mathbf{e}_{\bar{t}}) \end{aligned}$$

$$\text{Schubkorrekturfaktor } k = \frac{A_S}{A} \quad \text{Gleichung 2-53}$$

Das CQUAD8 Element besitzt vier Eckknoten und vier Zwischenknoten, die eine bessere Approximation der realen Geometrie in engen Kerben ermöglichen. In Abbildung 2-15 ist eine reale Kerbe mit CQUAD8 Elementen vernetzt.

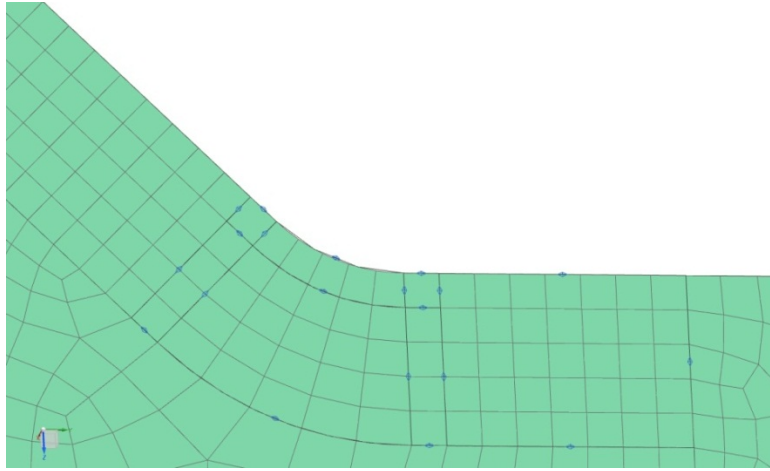


Abbildung 2-15: Kerbdetail

2.5.4 Inertia Relief

Die 2-D Schweißnahtmodelle werden an den freien Enden jeweils mit Einheitslasten (Kräfte und Momente) beaufschlagt. Für die Betriebsfestigkeitsbewertung nach IIW werden die aus diesen 2D-Schweißnahtmodellen gewonnenen Kerbfaktoren mit Lasten aus dem Schalenmodell des jeweiligen Bauteils überlagert.

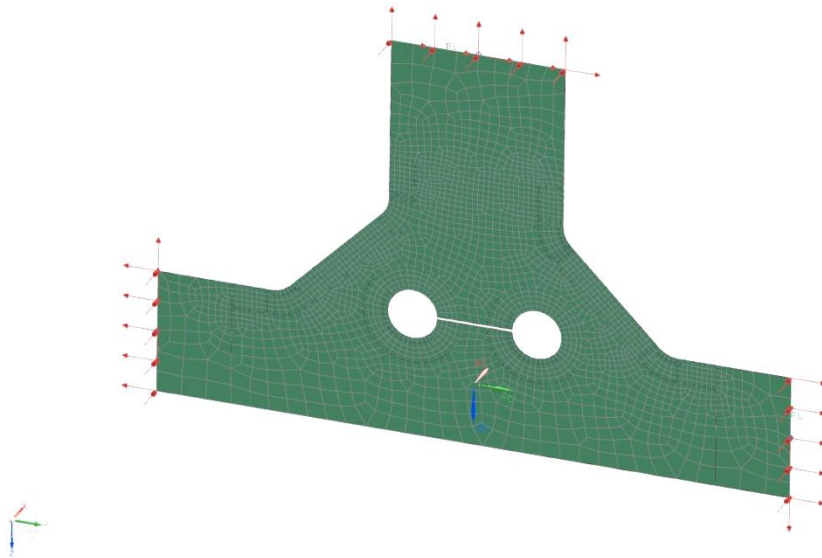


Abbildung 2-16: 2D- Schweißnahtmodell

Da nun der Kraftfluss im Modell nicht vorhersehbar ist, würde ein Einspannen eines freien Endes des Modells die Ergebnisse verfälschen. Wie aber in Kapitel 2.5.2 gezeigt wurde, ist das Gleichungssystem ohne Verschiebungsrandbedingungen nicht lösbar. Man behilft sich hier mit der Inertia Relief Funktion, die viele moderne FE Simulationsprogramme bieten. Inertia Relief wird bei statischen Analysen von Strukturen verwendet, die ohne Last nicht im Gleichgewicht sind, unter Last aber einen Gleichgewichtszustand erreichen. Beispiele für Anwendungen der Funktion sind Flugzeuge im Flug, Autos in Bewegung oder Weltraumgeräte im Orbit. (6)

Grundsätzlich wäre die Gleichung $\mathbf{K}\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{F}_{ext}$ auch ohne Aufspaltung der Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} und Einführung von Verschiebungsrandbedingungen $\hat{\mathbf{u}}_B$ lösbar. Dies gilt aber nur, wenn alle Kräfte exakt bekannt, im Gleichgewicht sind und keine numerischen Fehler beim Lösen auftreten. Bei den hier berechneten 2D-Schweißnahtmodelle ist dies aber praktisch nie der Fall. Selbst ein kleines Ungleichgewicht würde zu einer unendlichen Verschiebung des Modells führen. Wenn keine Verschiebungsrandbedingungen $\hat{\mathbf{u}}_B$ vorgegeben werden, behilft sich die Funktion Inertia Relief damit, dass zusätzliche Randbedienungsgleichungen durch Berechnung von Trägheitskräften durch die eigene Masse ermöglicht werden. Die Funktion wurde in der Diplomarbeit „Erweiterung eines Kerbfallkataloges zur Anwendung des Kerbspannungskonzepts für die Berechnung von Schweißnahtverbindungen“ von Dipl.-Ing. Robert Demal getestet. (9)

2.5.5 UGS NX Nastran

Das für die FE-Berechnung eingesetzte Softwarepaket ist UGS NX Nastran Version 7.5. Der FE Gleichungslöser Nastran (NASA Structural Analysis System) geht auf eine NASA Entwicklung zurück. Siemens PLM Software bietet mit UGS NX eine Komplettlösung von Präprozessor und Gleichungslöser, der in der Praxis gut funktioniert hat. Dabei können Teile wie in normalen CAD Programmen erstellt, vernetzt und mit Belastungen beaufschlagt werden.

3 Erstellung der 2D - Schweißnahtmodelle

In diesem Kapitel wird erklärt, welche Konventionen beim Aufbau der jeweiligen 2D-Schweißnahtmodelle bezüglich der Koordinatensysteme, der Vernetzung und dem Aufprägen der Einheitslasten getroffen wurden.

3.1 Das Koordinatensystem

Die Definition eines Koordinatensystems ist besonders im Hinblick auf eine Weiterverarbeitung wichtig. Die vielen erstellten Modelle sollen einer automatisierten Weiterverarbeitung zugeführt werden, um ein einfaches Auswerten mit der Methode der lokalen Kerbspannungen zu ermöglichen. Die Berechnungsergebnisse für alle Wandstärkenkombinationen und mit allen verschiedenen Lastfällen werden in einer Kerbfallmatrix abgelegt. Das Koordinatensystem wird bereits bei der ersten Skizze im Part File definiert. Dabei liegt der zu betrachtende 2D-Schweißstoß in der Y-Z-Ebene. Die Y-Achse liegt mittig im Gurtblech und zeigt nach rechts. Die Z-Achse liegt mittig im Stegblech und zeigt nach unten. Daraus ergibt sich, dass die X-Achse in die Bildebene hinein ragt. Im Folgenden wird das Koordinatensystem in einem Stumpfstoß und einem T-Stoß dargestellt.

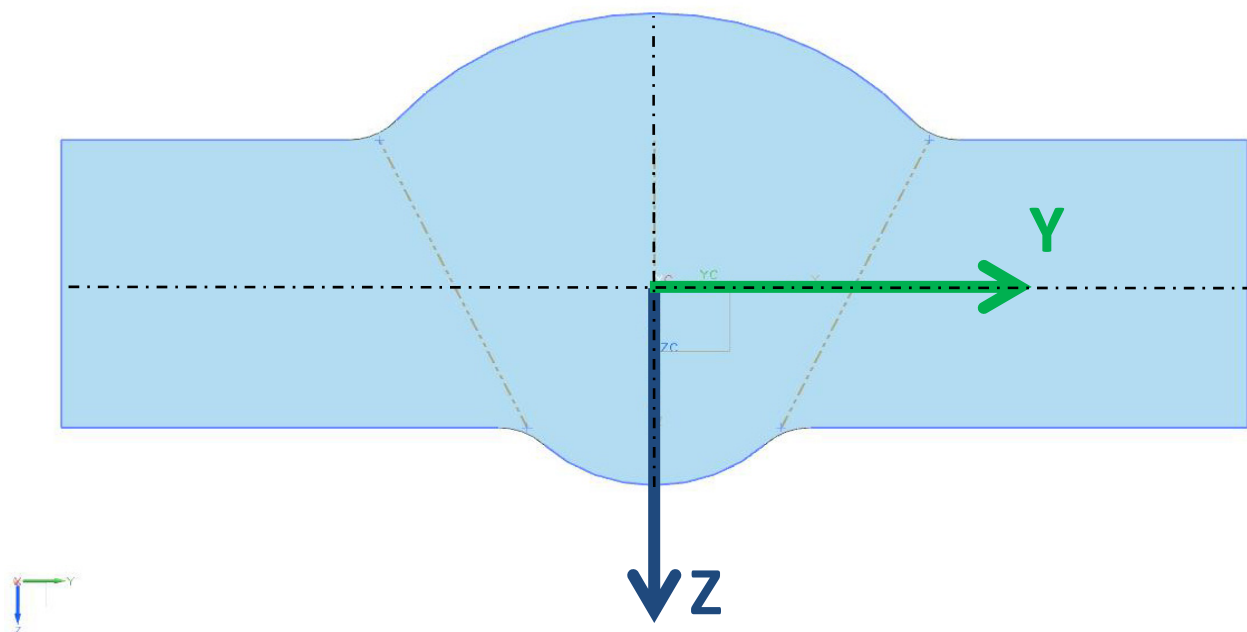


Abbildung 3-1: Koordinatensystem am Stumpfstoß

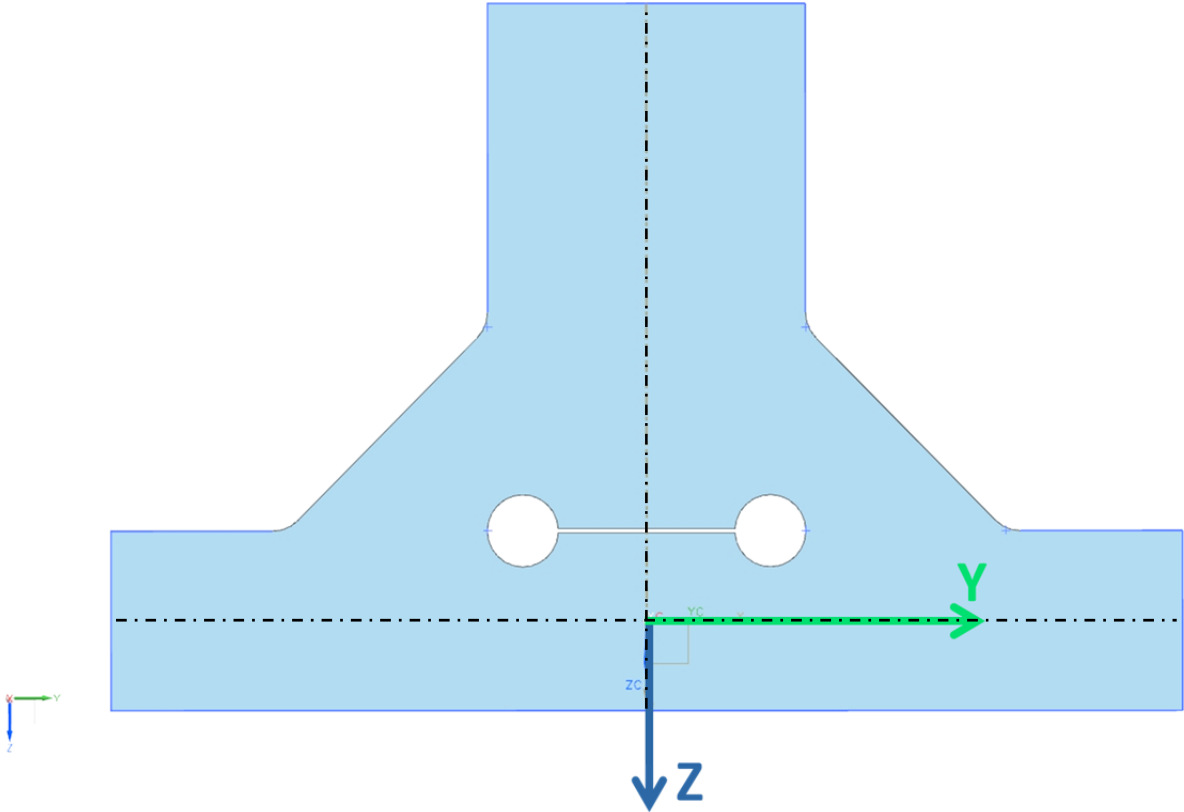


Abbildung 3-2: Koordinatensystem am T - Stoß

Die jeweiligen Schnittufer werden mit eins beginnend im Uhrzeigersinn nummeriert.

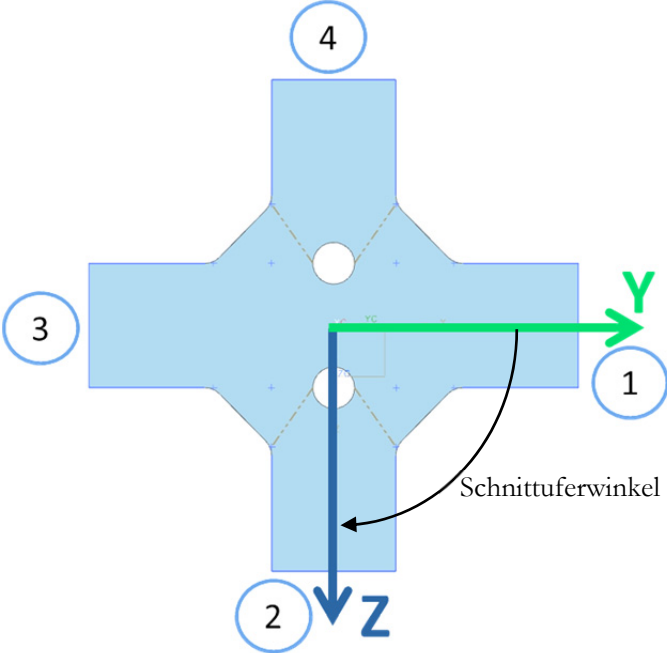


Abbildung 3-3: Schnittuferdefinition

3.2 Parameter im Partfile

Alle Parameter, die später über eine Excel Datei gezielt verändert werden sollen, müssen bereits beim Erzeugen des Partfiles als Expression vorgegeben werden. Das Einrichten der Expressions erfolgt unter Tools -> Expression. Diese Ausdrücke können dann einfach als gesteuerte Maße in Skizzen vergeben werden.

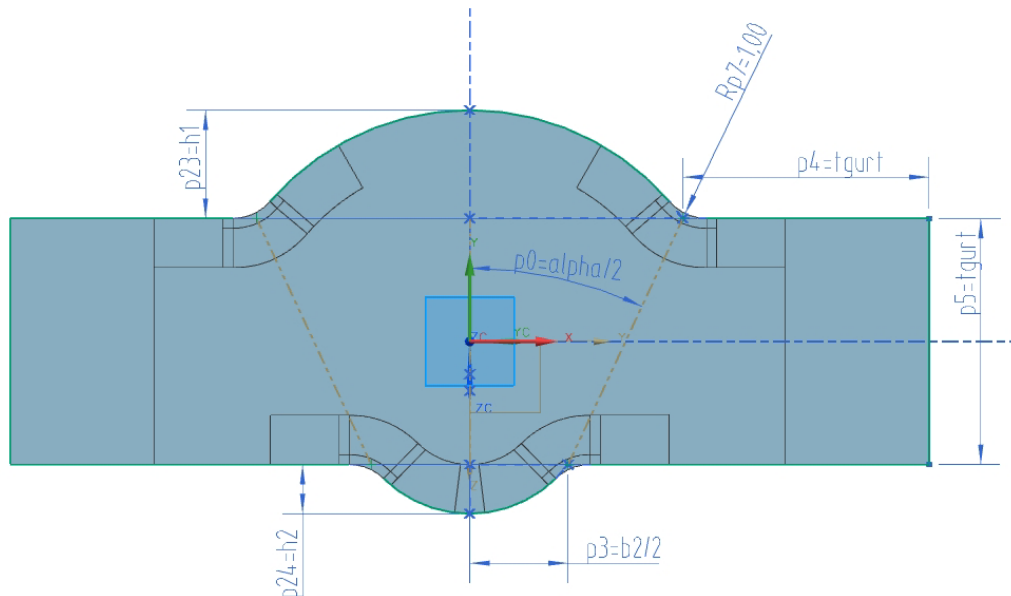


Abbildung 3-4: B_VC Parameterskizze

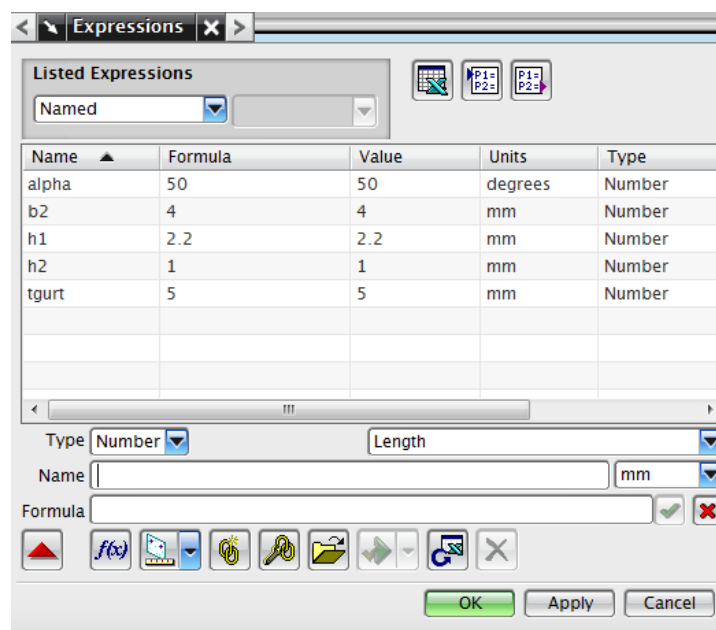


Abbildung 3-5: Expression Editor

3.3 Die Vernetzung der 2D - Modelle

In der IIW werden für die Berechnung effektiver Kerbspannungen mit FE-Methoden Empfehlungen für die Elementgröße gegeben. Im Falle linearer Elemente sollte die Elementgröße $1/6$ des Radius nicht überschreiten, während im Falle von Elemente höherer Ordnung die Elementgröße $1/4$ des Radius nicht überschreiten sollte. (2)

Die vorliegende Arbeit baut auf den Erkenntnissen der Diplomarbeit „Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzepts“ von Franz Wolmersdorfer auf. Direkt am Kerbradius wird mit quadratischen CQUAD8 Elementen mit einer Kantenlänge von 0,2mm vernetzt. Dieses Netz besteht bis zu einer Tiefe von 1mm aus fünf Elementen, wobei jedes Element eine Kantenlänge von 0,2mm aufweist. An den Kerbradius anschließend wird für jeweils acht Elemente ebenfalls eine Kantenlänge von 0,2mm vorgegeben wie in Abbildung 3-6 dargestellt. Das Vorgeben der Netzgröße erfolgt in UGS NX mit der Funktion 2D Mapped Mesh. (10)

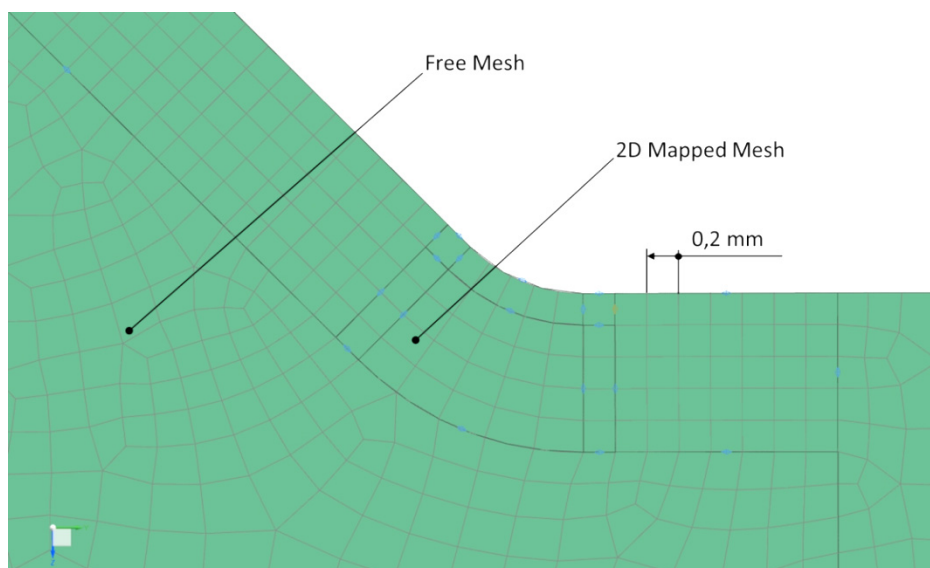


Abbildung 3-6: Vernetztes Kerbdetail

Wurzelkerben werden wie in Abbildung 3-7 analog vernetzt.

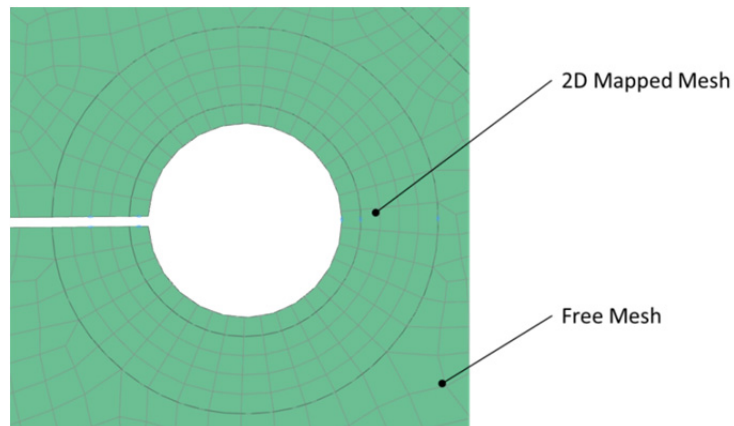


Abbildung 3-7: Vernetzte Wurzelkerbe

Der Rest des Modells wird mit einem Free-Mesh aufgefüllt, wobei die Elementgröße keinen großen Einfluss auf die Kerbspannung mehr hat. Die Dicke wird mit $s=1$ vorgegeben. (10)

Die Elementgröße im Free-Mesh hat allerdings einen starken Einfluss auf den Automesher bei der automatisierten Erstellung der Modelle. Wenn die Elemente nicht klein genug sind, werden bei der Parametervariation immer wieder einzelne Elemente stark verzerrt, was zu einem Jacobi Fehler führen kann. Dem kann einerseits begegnet werden, indem man den erlaubten Jacobi Wert erhöht, oder das Netz feiner ausführt, so dass kein Element stark verzerrt wird. Der Jacobi Wert hat direkt mit der Berechnung der Spannungen aus der B-Matrix zu tun. Die in Elementkoordinaten gegebenen Verschiebungen müssen mit Hilfe der Jacobi Matrix in das globale Koordinatensystem überführt werden. Dabei können Werte auftreten, die das Gleichungssystem ungünstig beeinflussen. Derartige verzerrte Dreiecke, wie in Abbildung 3-8 dargestellt, treten immer wieder an Stellen mit starker Rundung auf, wo das Free-Mesh auf das Mapped Mesh trifft. Der Solver startet und rechnet ganz normal, aber bei der Kontrolle der Ergebnisse fehlt das entsprechende File bzw. es hat keinen Inhalt.

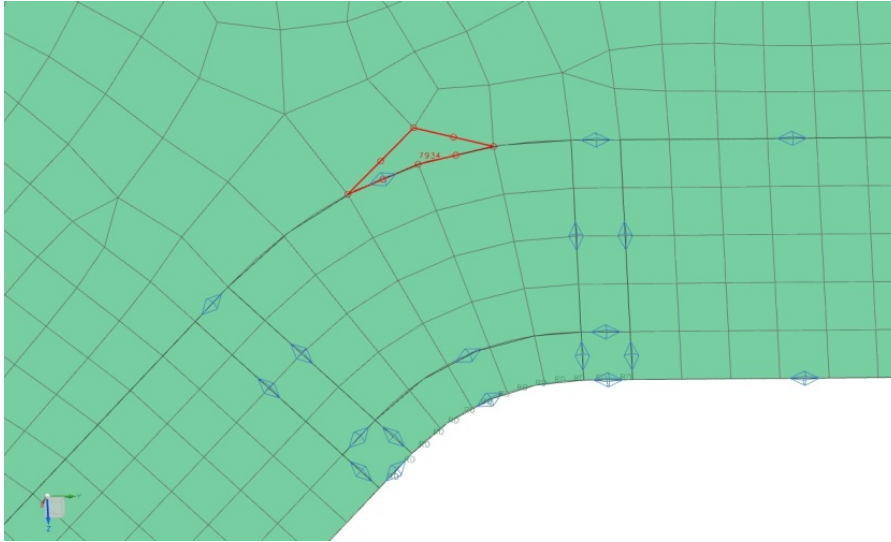


Abbildung 3-8: Stark verzerrtes Dreieckselement

Eine Möglichkeit diesen Fehler zu umgehen, wenn er öfter auftritt, ist das entsprechende Free Mesh um die Rundung vorzugeben. Dies wurde sechseckförmig bei einem Kreuzstoß erfolgreich um die Wurzelkerben durchgeführt.

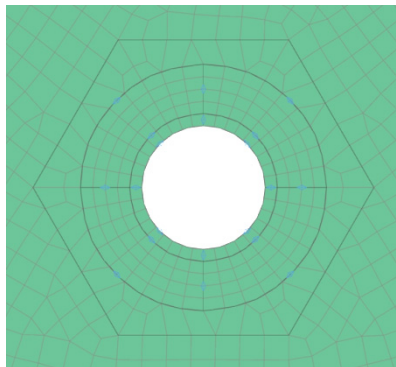
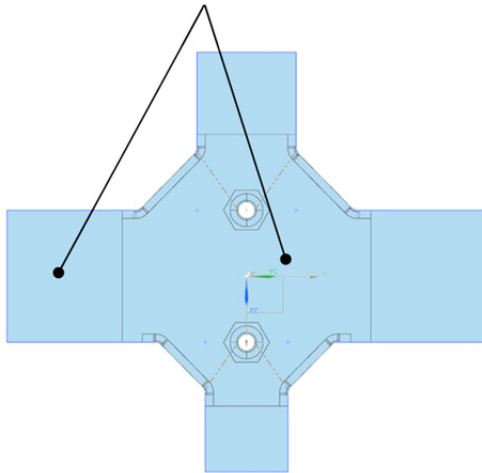


Abbildung 3-9: Vorgegebenes Free Mesh um Wurzelkerbe

Wenn zwei Kerben auf einer Kante liegen und diese nicht weit auseinander liegen, macht es oft Sinn diese aus einem Mapped Mesh zu vernetzen, um unnötig verzerrte Elemente im Free Mesh zu vermeiden. Dies wurde bei allen T- und Kreuzstößen so ausgeführt.

Um die Anzahl der Knoten und damit der zu lösenden Gleichungen etwas zu verringern, wird das Free Mesh oft in Bereiche mit kleineren Elementen zwischen den Mapped Meshes und Bereiche mit größeren Elementen am Rand aufgeteilt.

Zerteilen der Fläche in Bereiche mit unterschiedlicher Elementgröße



Feines Netz zwischen den Kerben, grobes Netz am Rand

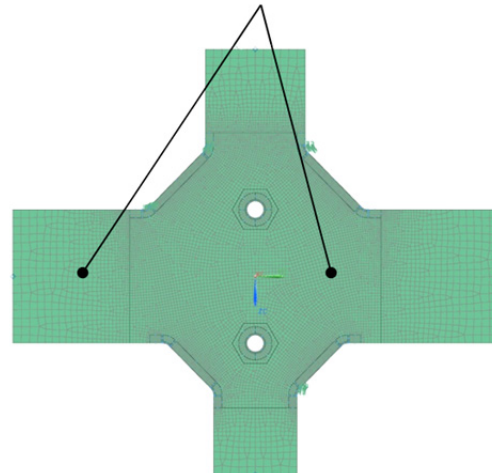


Abbildung 3-10: Bereiche unterschiedlicher Elementgröße

Zur Krafteinleitung werden an den jeweiligen Stoßenden RBE2 Spiderelemente verwendet. Diese als „Punkt zu Kante“ ausgeführten Elemente verbinden alle Randknoten mit dem Mittelknoten und ermöglichen eine sinnvolle Krafteinleitung.

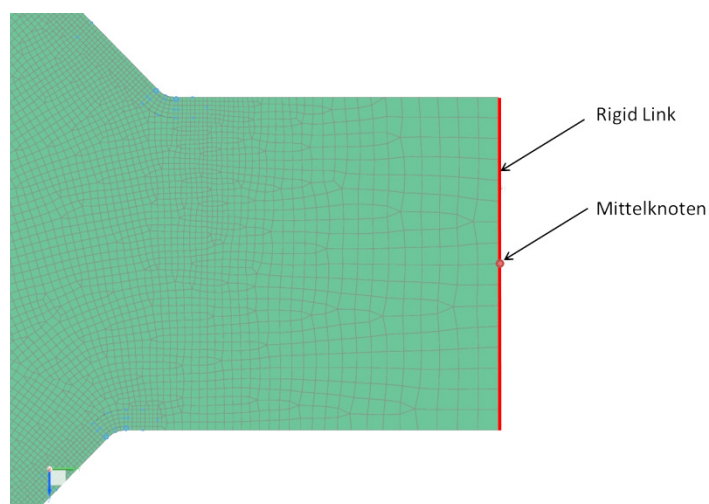


Abbildung 3-11: Rigid Link

Den Elementen, die auch als Rigid Link bezeichnet werden, sind dabei alle Freiheitsgrade gesperrt bis auf die Translation in der jeweiligen Schnittrichtung (Y oder Z Koordinate) für die Krafteinleitung und die Rotation um die X- Achse für die Einleitung des Moments.

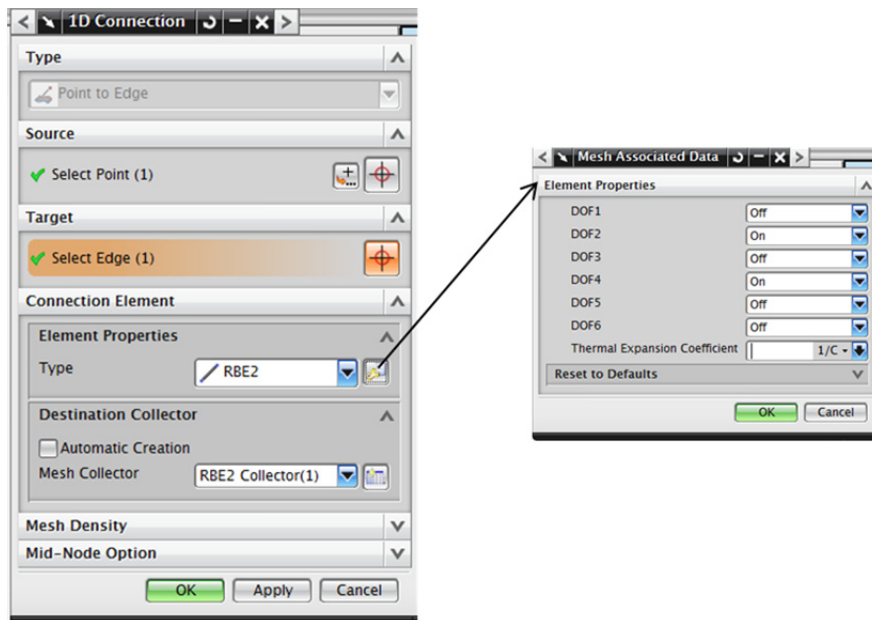
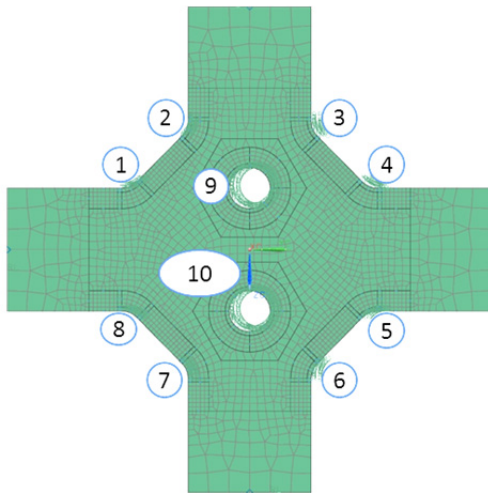


Abbildung 3-12: Rigid Link mit gesperrten Freiheitsgraden

In Abbildung 3-12 ist die Einstellung für den Rigid Link mittels RBE2 Element im Detail dargestellt. In diesem Fall ist also alles gesperrt bis auf die Translation in Y- Richtung und die Rotation um die X- Achse.

Für die Weiterverarbeitung ist es noch wichtig, die entsprechend höchst belasteten Knoten zu identifizieren, sowie die jeweilige Kerbe an der diese liegen. Die Randknoten an den Kerben werden daher noch mit CROD Elementen, die jeweils in einem eigenen Physical Property Table abgelegt werden, versehen.

CROD Elemente mit Label an verschiedenen Kerbregionen



CROD Netz an Kerbdetail

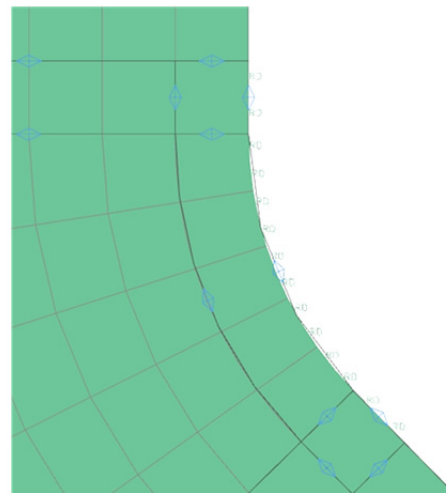


Abbildung 3-13: CROD Elemente an Kerbregionen

Diese Elemente besitzen lediglich eine Fläche von $1e-20 \text{ mm}^2$, wodurch sie keine mechanischen Eigenschaften haben. Durch den Physical Property Table mit eigenem Label können sie bei einer Weiterverarbeitung leichter identifiziert werden.

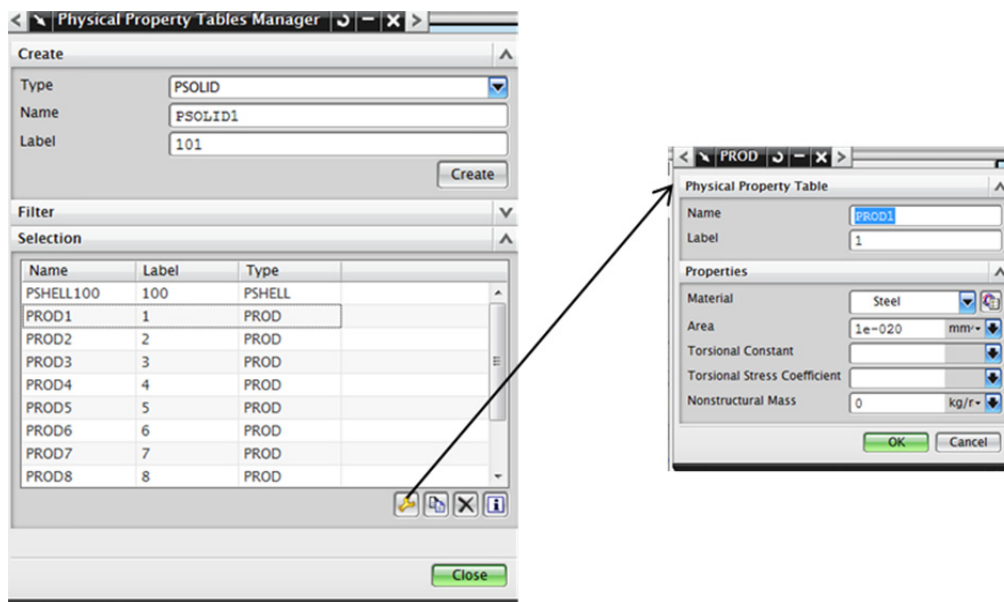


Abbildung 3-14: PROD Element Einstellung

In Abbildung 3-14 erkennt man die nach Label durchnummerierten ROD Elemente. Das Label, der Werkstoff und die Fläche werden im jeweiligen Untermenü vorgegeben.

3.4 Die Einheitslasten mit Subcases

Nachdem das Modell erstellt und vernetzt wurde, müssen die Belastungen vorgegeben werden. Es werden jeweils an jedem Schnittufer alle Belastungen also Normalkraft, Querkraft und Biegemoment in einem eigenen Subcase aufgeprägt.

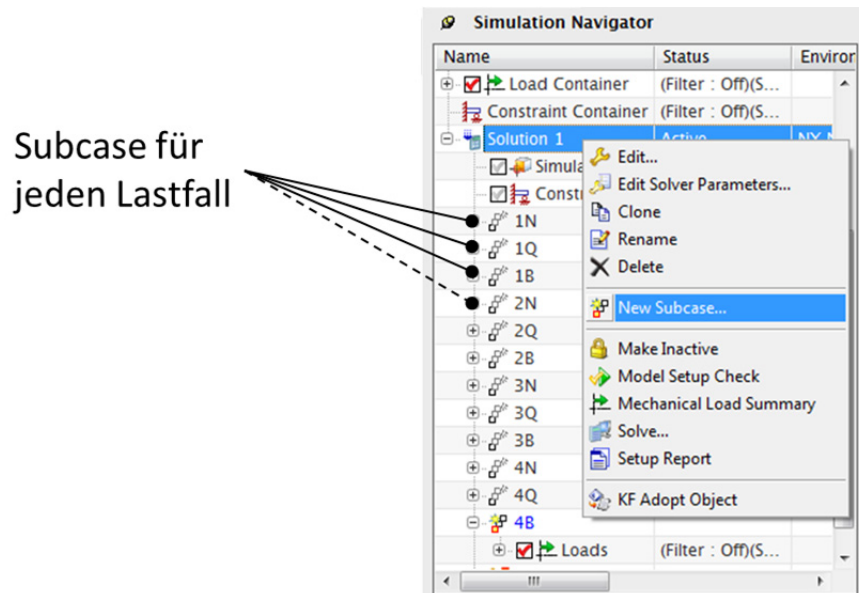


Abbildung 3-15: Subcase für Lastfälle

Dabei ist die Normalkraft immer als positiver Zug vom Schnittufer weg definiert. Die Querkraft wirkt am ersten Schnittufer in positiver Z- Richtung und läuft dann gegen den Uhrzeigersinn um. Das Moment wirkt immer um die X- Achse. Die Kräfte betragen 1 Newton, das Moment 1 Nmm.

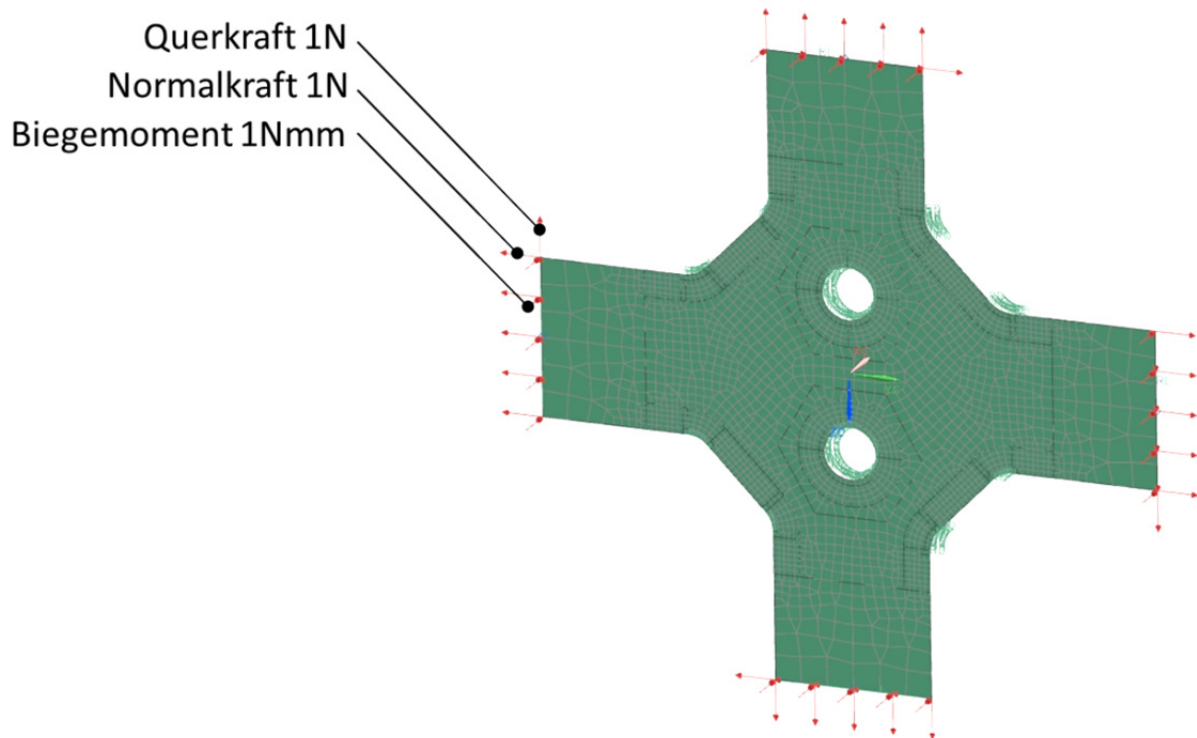


Abbildung 3-16: Kräfte und Momente am Schweißstoß

In Abbildung 3-16 ist die Richtung und Größe der Belastungen anhand eines Kreuzstoßes grafisch dargestellt.

Um nicht immer alle Ergebnisse auszugeben und die Datenverarbeitung etwas zu erleichtern, werden nur die Spannungsergebnisse der Elemente direkt in den Kerben ausgegeben. Diese Elemente können mit dem Befehl Group einfach zusammengefasst werden und bei der Solver Einstellung Output Request kann im Menüpunkt Case Control angegeben werden, dass lediglich die Spannungsergebnisse dieser zuvor angewählten Gruppe ausgeschrieben werden. Das für die Weiterverarbeitung der Ergebnisse benötigte Datenformat ist Punch.

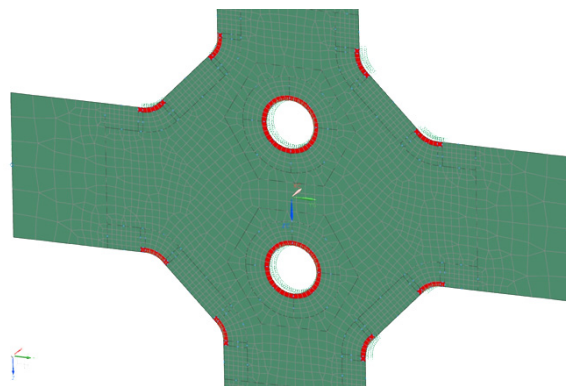


Abbildung 3-17: Elemente für Ausgabe der Spannungsergebnisse

In Abbildung 3-17 sind alle für die Ausgabe der Ergebnisse des dargestellten Kreuzstoßes nötigen Elemente dargestellt. Am Einfachsten lässt sich die Gruppe bilden, indem in der Kerbe mit einem eigenen Netz vernetzt wird.

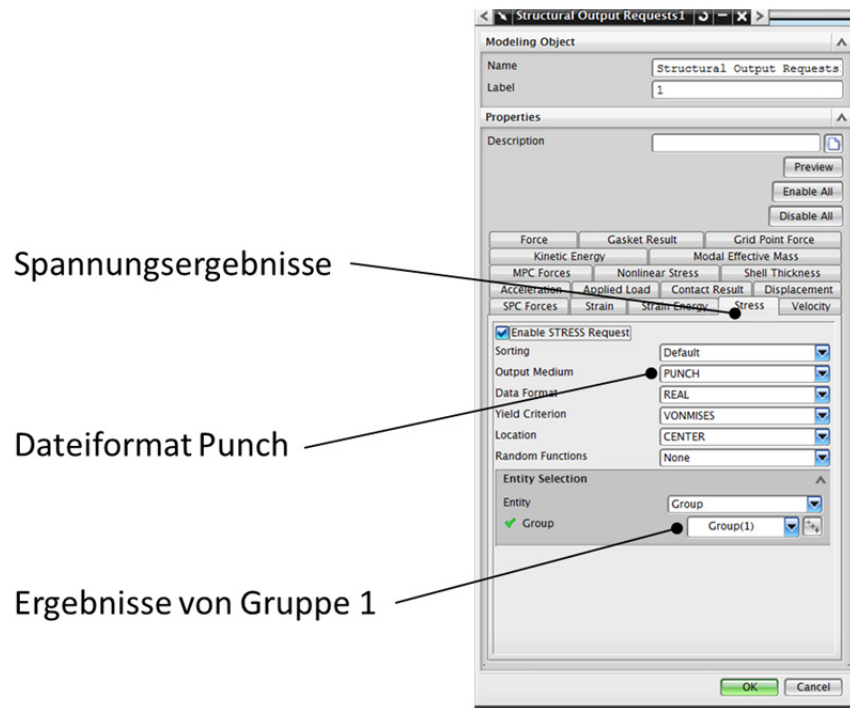


Abbildung 3-18: Details der Solverausgabebeeinstellung

Wie bereits in 2.5.4 erklärt, werden keine Randbedingungen vorgegeben, weil der Kraftfluss nicht vorhersehbar ist. Es ist also noch die Funktion Inertia Relief zu aktivieren. Diese Einstellung ist bei den Solver Eigenschaften unter Parameter zu finden.

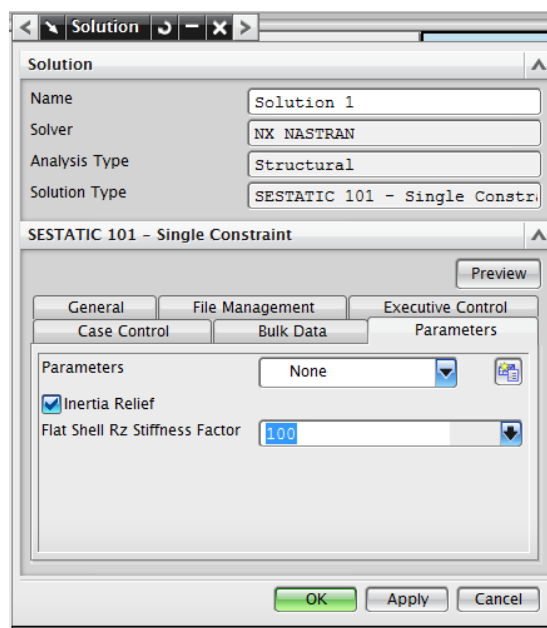


Abbildung 3-19: Einstellung Inertia Relief

4 Simulierte Schweißstöße im Detail

Hier wird jeder Schweißstoß, der im Rahmen dieser Diplomarbeit simuliert wurde, im Detail erklärt. Es wurden nur Schweißstöße nach den Normen DIN EN ISO 5817 und DIN EN 1508 simuliert, weil für real geschweißte Schweißstöße der Firma Siemens AG Österreich Mobility Division zu wenige Daten vorliegen. In einzelnen Fällen wurden in Absprache mit der Kontaktperson bei Siemens geringfügige Änderungen vorgenommen, dies betrifft zum Beispiel eine geringere nicht verschweißte Reststegbreite bei T- und Kreuzstößen. Die Vorlagen für die Modelle wurden der Diplomarbeit „Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzepts“ von Dipl.-Ing. Franz Wolmersdorfer entnommen. (10)

4.1 Übersicht über die Schweißstöße

Der erstellte Kerbfallkatalog richtet sich nach den bei der Firma Siemens AG Österreich Mobility Division am häufigsten im Einsatz befindlichen Schweißstößen. Die erstellten Geometrien sind in Abbildung 4-1 als Übersicht dargestellt.





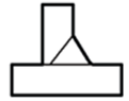



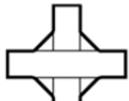

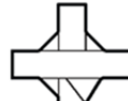


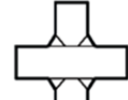

Stumpfstoß	 B_VC	 B_VM	 B_VT
T-Stoß	 T_FD	 T_YS	 T_YB
	 T_YD	 T_VS	
Kreuzstoß	 X_FD_FD	 X_FD_YS	 X_FD_YB
	 X_YS_YS	 X_YB_YB	 X_YD_YD
	 X_YS_YB		

Abbildung 4-1: Schweißverbindungen und Schweißnahtarten (10)

4.2 Stumpfstöße

Es wurden drei verschiedene Stumpfstöße simuliert. Der B_VC Stumpfstoß hat eine keramische Badsicherung und ist der meist verwendete. B_VM steht für den Stumpfstoß mit metallischer Badsicherung. Dieser kommt immer dann zum Einsatz, wenn die Schweißnahtwurzel nach dem verschweißen nicht mehr zugänglich ist. Der B_VT Stumpfstoß wird gänzlich ohne Schweißbadsicherung geschweißt. Alle Radaj-Modell-Abbildungen beinhalten die erforderlichen Parameter zur Erzeugung der Modelle und man kann die verwendete Flächenunterteilung für die Mapped-Mesh Funktion erkennen. Die Parametertabellen stellen jeweils einen Auszug der erzeugten Schweißstoß Modelle dar. Die vollständige Liste befindet sich auf der beiliegenden DVD.

4.2.1 B_VC

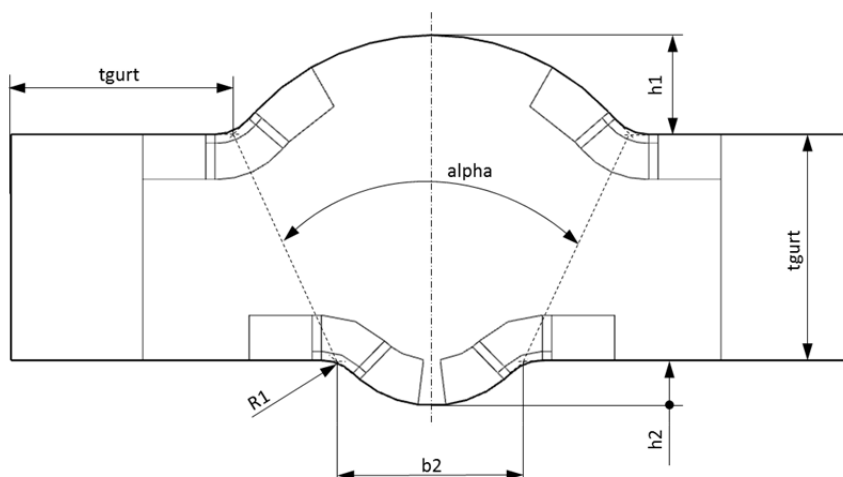


Abbildung 4-2: B_VC Radaj- Modell

Der Parameter h1 gibt je nach Schweißnahtqualität die maximal zulässige Nahtüberhöhung an. Laut Norm kann die zulässige Nahtüberhöhung errechnet werden mit $h1 \leq 1 + 0,15 \cdot b$.

	A	B	C	D	E	F
1	Counter	tgurt	h1 (C Qualität)	b2	h2	alpha
2	1	5	2.30	4	1	50
3	2	6	2.44	4	1	50
4	3	7	2.58	4	1	50
5	4	8	2.72	4	1	50
6	5	9	2.86	4	1	50
7	6	10	3.00	4	1	50
8	7	11	3.14	4	1	50
9	8	12	3.28	4	1	50

Tabelle 4-1: Auszug aus B_VC Parametertabelle

4.2.2 B_VM

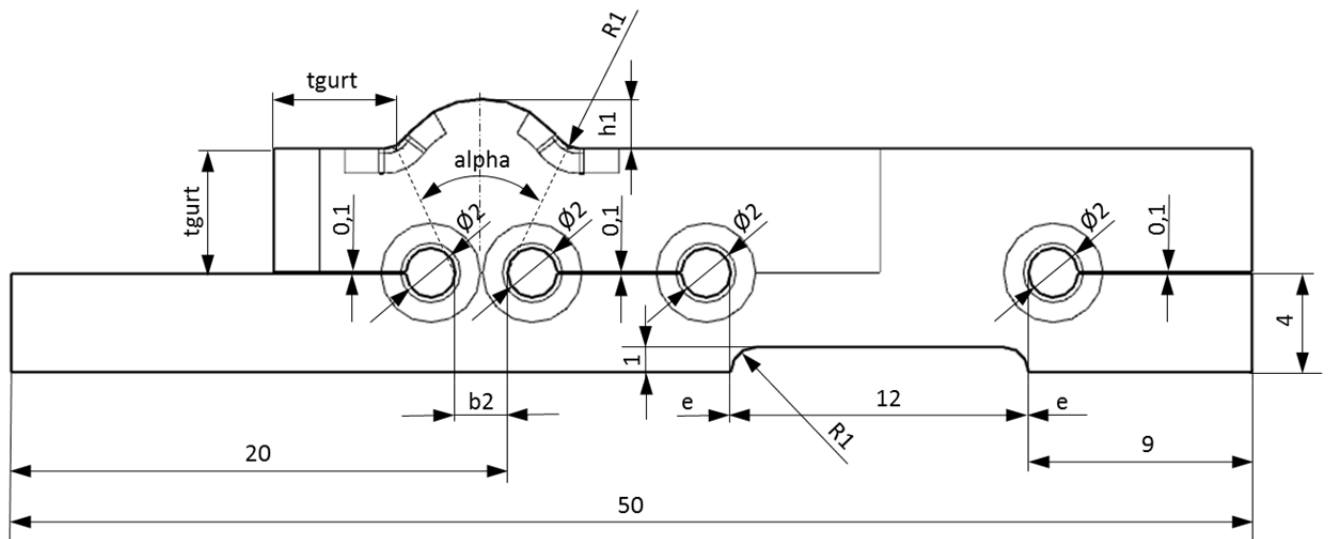


Abbildung 4-3: B_VM Radaj- Modell

	A	B	C	D	E	F
1	Counter	tgurt	h1 (C Qualität)	b2	e	alpha
2	1	5	2.01	2.1	0	50
3	2	6	2.15	2.1	0	50
4	3	7	2.29	2.1	0	50
5	4	8	2.43	2.1	0	50
6	5	9	2.57	2.1	0	50
7	6	10	2.71	2.1	0	50
8	7	11	2.85	2.1	0	50
9	8	12	2.99	2.1	0	50
10	9	13	3.13	2.1	0	50

Tabelle 4-2: Auszug aus B_VM Parametertabelle

Bei diesem Modell entspricht das untere 4mm dicke Blech der Schweißbadsicherung, die nicht mehr entfernt wird.

4.2.3 B_VT

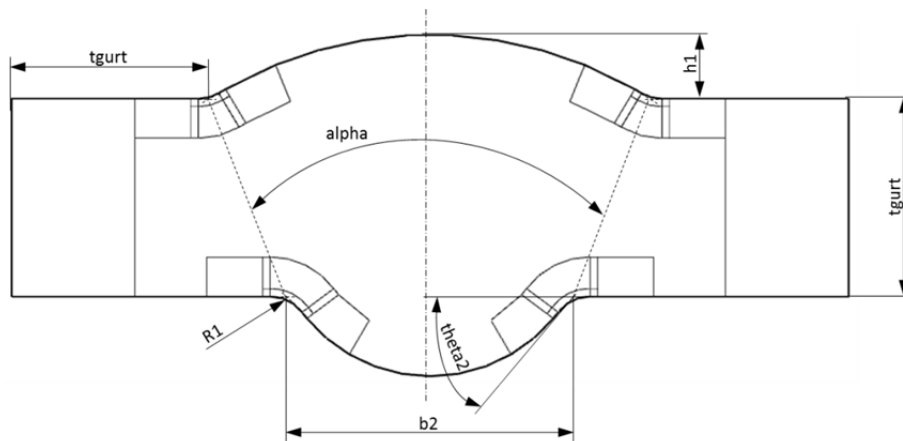


Abbildung 4-4: B_VT Radaj- Modell

	A	B	C	D	E	F
1	Counter	tgurt	theta2	b2	h1	alpha
2	1	5	60	7	1.62	45
3	2	6	60	7	1.75	45
4	3	7	60	7	1.87	45
5	4	8	60	7	1.99	45
6	5	9	60	7	2.12	45
7	6	10	60	7	2.24	45
8	7	11	60	7	2.37	45
9	8	12	60	7	2.49	45
10	9	13	60	7	2.62	45

Tabelle 4-3: Auszug aus B_VT Parametertabelle

Bei der B_VT Naht wird keine Schweißbadsicherung an der Wurzel verwendet. Die Wurzel wird hier also nicht mit einer maximalen Überhöhung sondern mit einem tangentialen Winkel θ_2 definiert.

4.3 T-Stöße

Bei den T-Stößen sind oft je nach Stegdicke verschiedene Radaj- Modelle nötig. Es wurde jeweils die Gurtstärke und die Stegdicke variiert, wie auf den vollständigen Parameterlisten der beiliegenden DVD ersichtlich ist. Es wurden alle Dicken in mm abgestuft und von 5mm bis 25mm simuliert.

4.3.1 T_FD

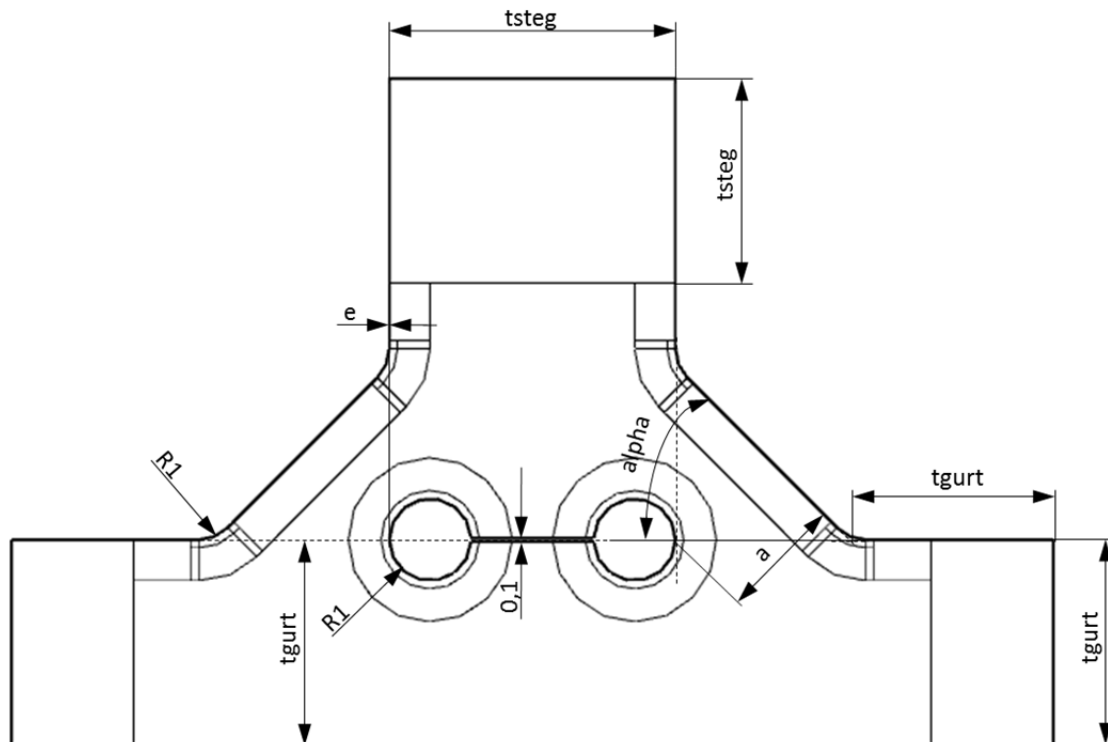


Abbildung 4-5: T_FD Radaj- Modell $t_{steg} > 6\text{mm}$

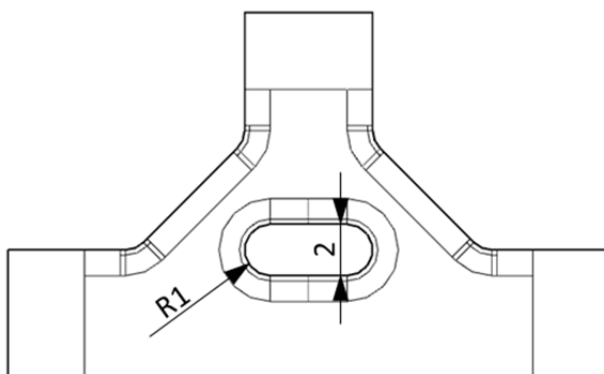


Abbildung 4-6: T_FD Radaj- Modell $t_{steg} < 6\text{mm}$

Bei Wandstärken t_{steg} unter 6mm wird die Gesamte nicht verschweißte Wurzel zu einem Langloch.

	A	B	C	D	E	F
1	Counter	tgurt	tsteg	a	alpha	e
2	1	5	5	3	45	0
3	2	5	6	3	45	0
4	3	5	7	3	45	0
5	4	5	8	4	45	0
6	5	5	9	4	45	0
7	6	5	10	5	45	0
8	7	5	11	5	45	0
9	8	5	12	6	45	0
10	9	5	13	6	45	0

Tabelle 4-4: Auszug aus T_FD Parametertabelle

4.3.2 T_YS

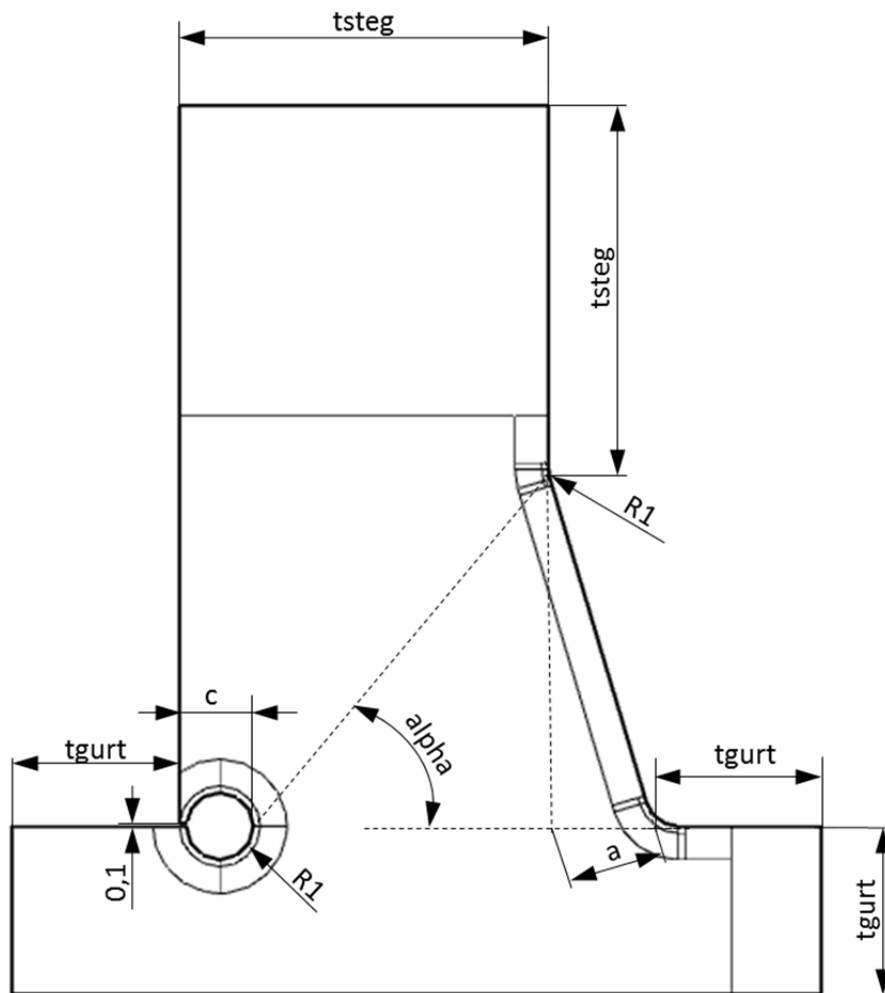


Abbildung 4-7: T_YS Radaj- Modell $t_{steg} > 10\text{mm}$

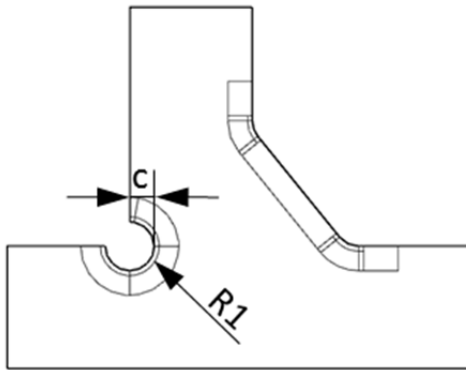


Abbildung 4-8: T_YS Radaj- Modell t_{steg} < 11mm

Beim T_YS Schweißstoß stimmen die beiden Radaj Modelle überein, es rückt lediglich die 1mm Radius Wurzelkerbe weiter unter das Stegblech. Dies erforderte im NX zwei verschiedene Modelle für eine automatisierte Erstellung und Simulation.

	A	B	C	D	E	F
1	Counter	tgurt	tsteg	a	alpha	c
2	1	5	5	3	50	1
3	2	5	6	3	50	1.2
4	3	5	7	3	50	1.4
5	4	5	8	4	50	1.6
6	5	5	9	4	50	1.8
7	6	5	10	5	50	1.99
8	7	5	11	5	50	2.2
9	8	5	12	6	50	2.4
10	9	5	13	6	50	2.6

Tabelle 4-5: Auszug aus T_YS Parametertabelle

4.3.3 T_YB

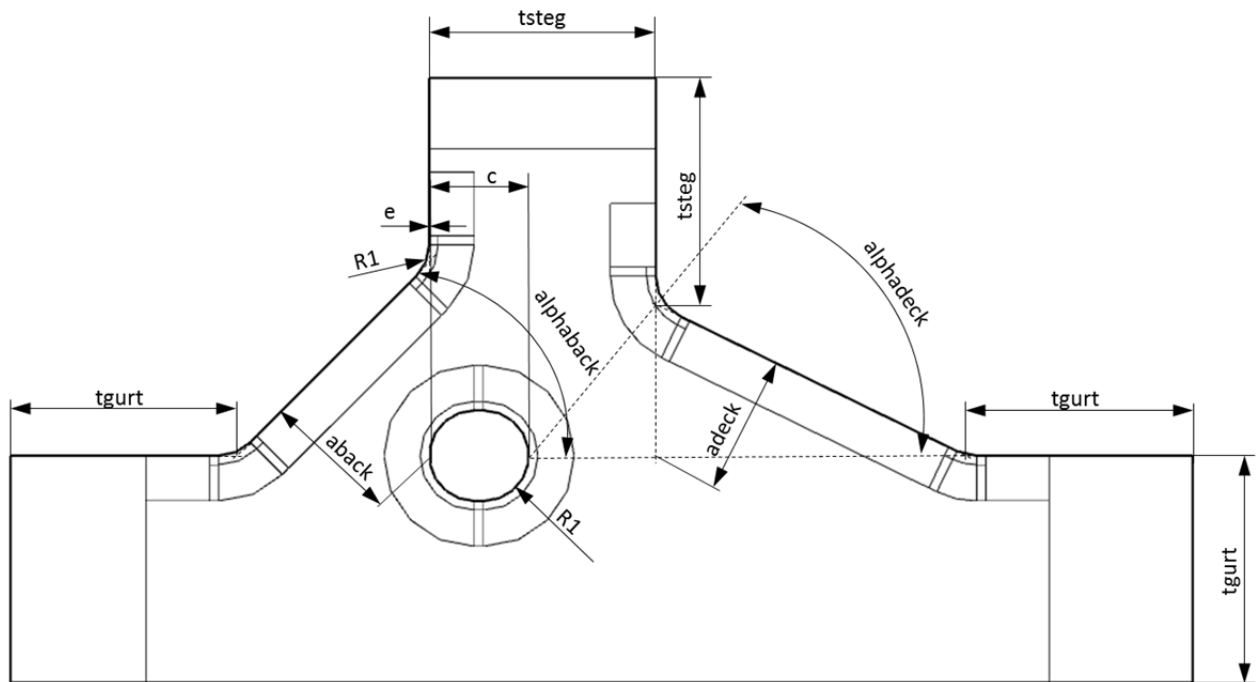


Abbildung 4-9: T_YB Radaj- Modell

Beim T_YB Schweißnahtmodell wurde in Absprache mit der Firma Siemens AG Österreich Mobility Division T_YD nur ein Modell realisiert. Bei der kleinsten Wandstärke von $t_{steg} = 5\text{mm}$ wäre die Wurzelkerbe dem Radaj- Modell entsprechend ein Kreisrundes Loch. Zugunsten einer einfacheren Automatisierung wird aber bereits bei der kleinsten Wandstärke ein Langloch realisiert.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Counter	tgurt	tsteg	aback	alphaback	adeck	alphadeck	c	e
2	1	5	5	3	45	3	50	2.20	0
3	2	5	6	3	45	3	50	2.20	0
4	3	5	7	3	45	3	50	2.20	0
5	4	5	8	3	45	3	50	2.20	0
6	5	5	9	3	45	3	50	2.20	0
7	6	5	10	3	45	3	50	2.20	0
8	7	5	11	3	45	3	50	2.20	0
9	8	5	12	3	45	3	50	2.40	0
10	9	5	13	3	45	3	50	2.60	0

Tabelle 4-6: Auszug aus T_YB Parametertabelle

4.3.4 T_YD

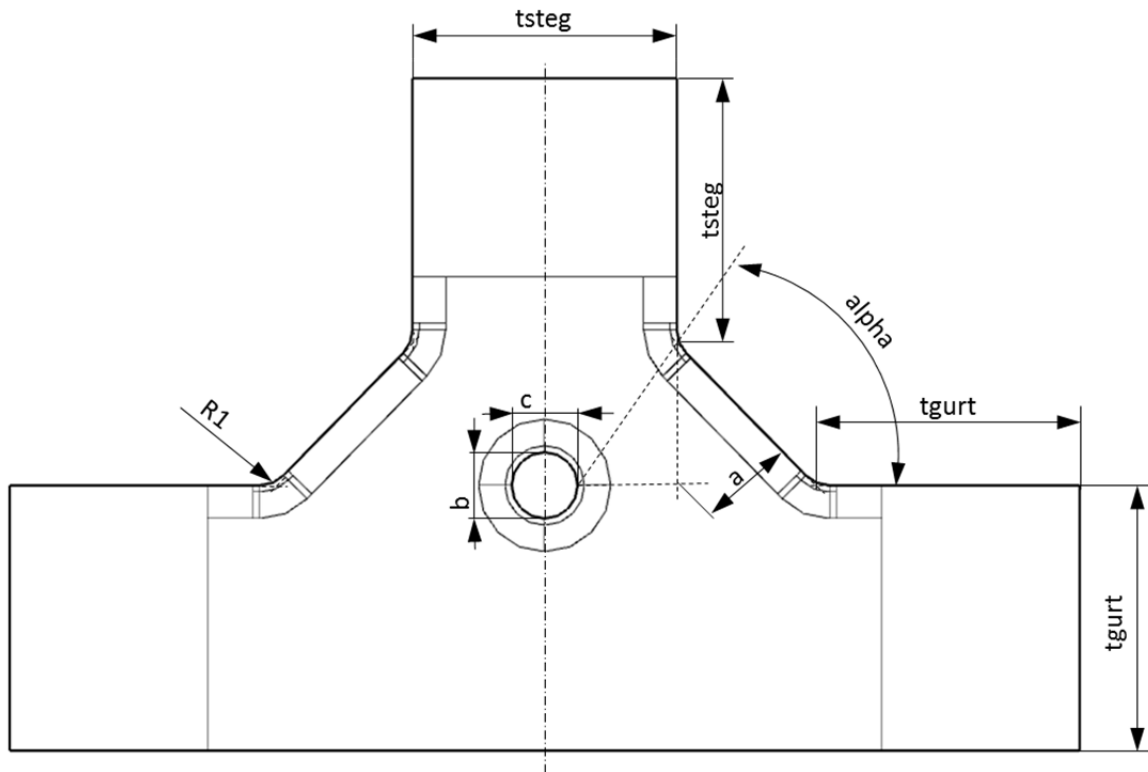


Abbildung 4-10: T_YD Radaj- Modell

Bei der T_YD Schweißstoß Geometrie wurde abweichend von der Norm eine Siemens interne Regelung angewendet, wonach die nicht verschweißte Reststegbreite 2mm nicht überschreiten darf. Dadurch ergibt sich im Radaj- Modell eine Kreisrunde Wurzelkerbe für alle Stegdicken.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Counter	tgurt	tsteg	a	alpha	c	b
2	1	5	5	1.50	55	2	2
3	2	5	6	2.00	55	2	2
4	3	5	7	2.50	55	2	2
5	4	5	8	3.00	55	2	2
6	5	5	9	3.50	55	2	2
7	6	5	10	4.00	55	2	2
8	7	5	11	4.50	55	2	2
9	8	5	12	5.00	55	2	2
10	9	5	13	5.50	55	2	2
11	10	5	14	6.00	45	2	2

Tabelle 4-7: Auszug aus T_YD Parametertabelle

4.3.5 T_VS

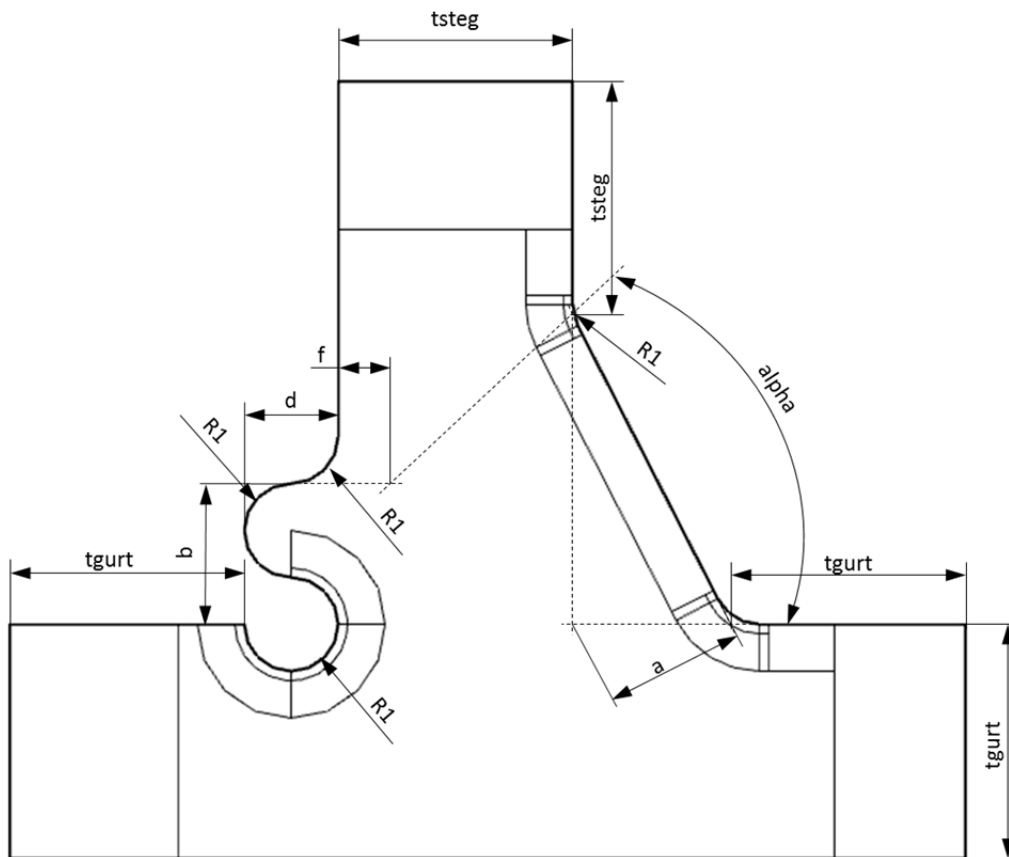


Abbildung 4-11: T_VS Radaj- Modell

Die ungewöhnliche Geometrie des Radaj- Modells ergibt sich durch die Kantenanarbeitung und das Durchschweißen.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Counter	tgurt	tsteg	a	alpha	d	b	f
2	1	5	5	3	50	2	3	2
3	2	5	6	3	50	2	3	2
4	3	5	7	3	50	2	3	2
5	4	5	8	3	50	2	3	2
6	5	5	9	3	50	2	3	2
7	6	5	10	3	50	2	3	2
8	7	5	11	3	50	2	3	2
9	8	5	12	3	50	2	3	2
10	9	5	13	3	50	2	3	2
11	10	5	14	3	50	2	3	2

Tabelle 4-8: Auszug aus T_VS Parametertabelle

4.4 Kreuzstöße

Die Kreuzstöße bestehen zum Teil aus vier verschiedenen Radaj- Modellen und fünf Modellen insgesamt. Im Prinzip ergibt sich die Geometrie der Modelle einfach als Kombinationen der zuvor angeführten T- Stöße. Benötigt ein T- Stoß bereits zwei verschiedene Modelle, ergeben sich vier verschiedene Kombinationsmöglichkeiten beim Kreuzstoß. Das oben angeführte fünfte Modell ergibt sich zum Teil aus Bemassungsgründen bei der Automatisierung und entspricht genau dem vierten Radaj-Modell. Der Unterschied liegt lediglich darin, dass in einem Fall der obere Steg dicker ist und im anderen Fall der untere Steg, dies hat ein unterschiedliches Bemessen zur Folge. Der Parameter t_{gurt} ist jeweils am dickeren Steg anzubringen, da sonst eine verzerrte Geometrie auftreten kann.

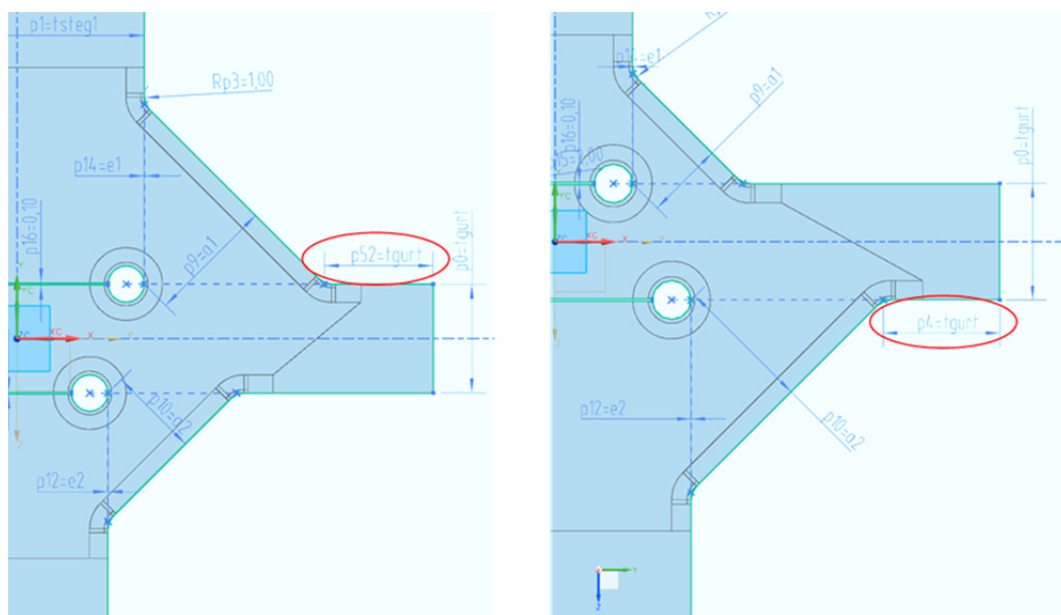


Abbildung 4-12: Unterschiedliche Modelle aufgrund der Stegdicken

Es wurden beide Stegdicken und die Gurtstärke variiert. Um die Anzahl der möglichen Simulationen zu begrenzen, wurde hier eine Einschränkung der Blechstärken getroffen. Es wurden alle Blechstärken von 6mm in 2mm Schritten bis 18mm modelliert und simuliert. Die Parameter entsprechen exakt den unter „T- Stöße“ aufgeführten. Die Radaj-Modelle werden hier der Vollständigkeit halber angeführt und die jeweiligen Bereiche mit Mapped Mesh und Free Mesh werden ersichtlich.

4.4.1 X_FD_FD

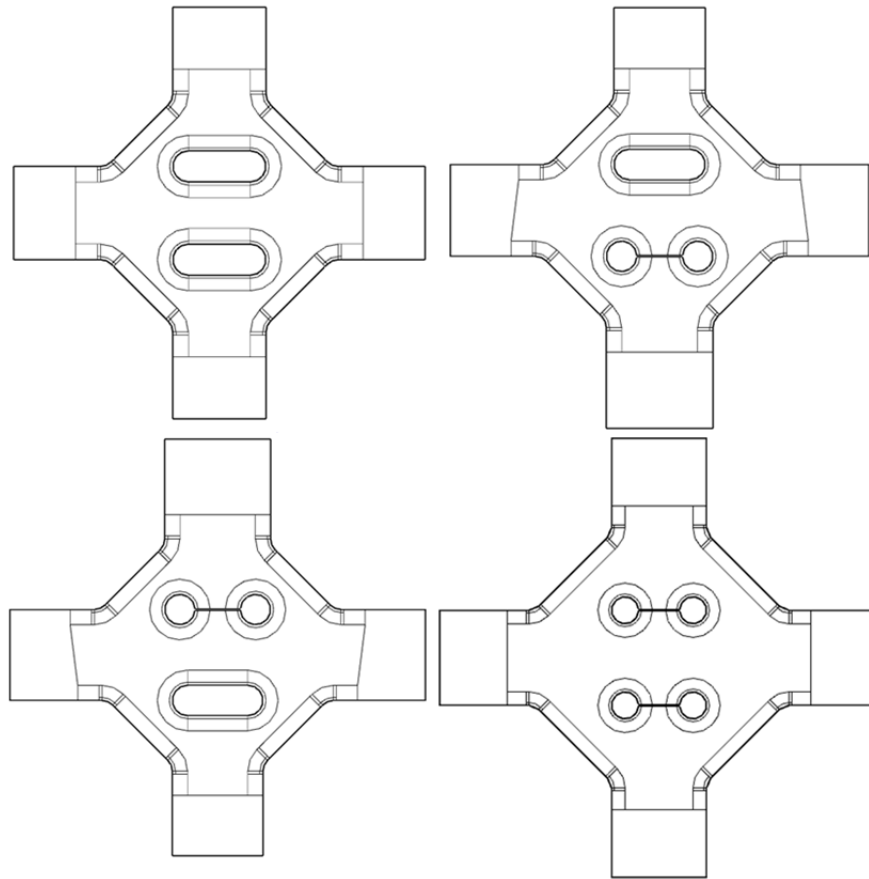


Abbildung 4-13: X_FD_FD Radaj- Modelle

Es wurden vier verschiedene Radaj- Modelle verwendet, die die unterschiedlichen Wurzelkerben abbilden. Ein fünftes Modell war nötig, um keine verzerrte Geometrie zu erhalten. Für das erste Modell gilt, dass beide Stegdicken kleiner 7mm sind. Für das vierte Radaj- Modell gilt, dass beide Stegdicken größer 7mm sind. Beim zweiten und dritten Modell ist jeweils ein Steg dicker als 7mm und der Andere dünner.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Counter	tgurt	tsteg1	tsteg2	a1	a2	alpha1	alpha2	e1	e2
2	1	6	6	6	3	3	45	45	0	0
3	2	6	6	8	3	4	45	45	0	0
4	3	6	6	10	3	5	45	45	0	0
5	4	6	6	12	3	6	45	45	0	0
6	5	6	6	14	3	7	45	45	0	0
7	6	6	6	16	3	8	45	45	0	0
8	7	6	6	18	3	9	45	45	0	0
9	8	6	8	6	4	3	45	45	0	0
10	9	6	8	8	4	4	45	45	0	0

Tabelle 4-9: Auszug aus X_FD_FD Parametertabelle

4.4.2 X_FD_YS

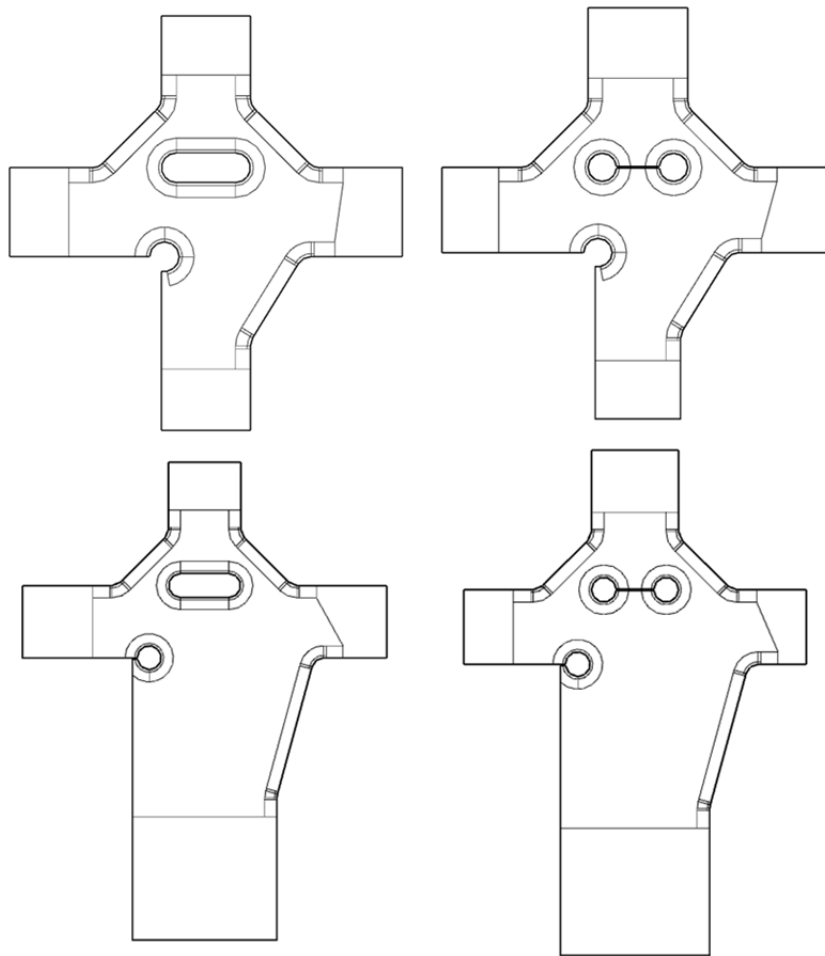


Abbildung 4-14: X_FD_YS Radaj- Modelle

Bei diesem Schweißstoß wurden vier verschiedene Radaj-Modelle verwendet und fünf Modelle insgesamt. Beim oberen Steg mit Kehlnaht gilt das Radaj-Modell mit Langloch sofern die Stegdicke dünner als 7mm ist. Beim unteren Steg wandert lediglich die kreisrunde Wurzelkerbe ab einer Stegdicke von 12mm vollständig unter den Steg.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Counter	tgurt	tsteg1	tsteg2	aFD	eFD	alphaFD	aYS	cYS	alphaYS
2	1	6	6	6	3	0	45	3	1.2	50
3	2	6	6	8	3	0	45	4	1.6	50
4	3	6	6	10	3	0	45	5	1.99	50
5	4	6	6	12	3	0	45	6	2.4	50
6	5	6	6	14	3	0	45	7	2.8	50
7	6	6	6	16	3	0	45	8	3.2	50
8	7	6	6	18	3	0	45	9	3.6	50
9	8	6	8	6	4	0	45	3	1.2	50
10	9	6	8	8	4	0	45	4	1.6	50
11	10	6	8	10	4	0	45	5	1.99	50

Tabelle 4-10: Auszug aus X_FD_YS Parametertabelle

4.4.3 X_FD_YB

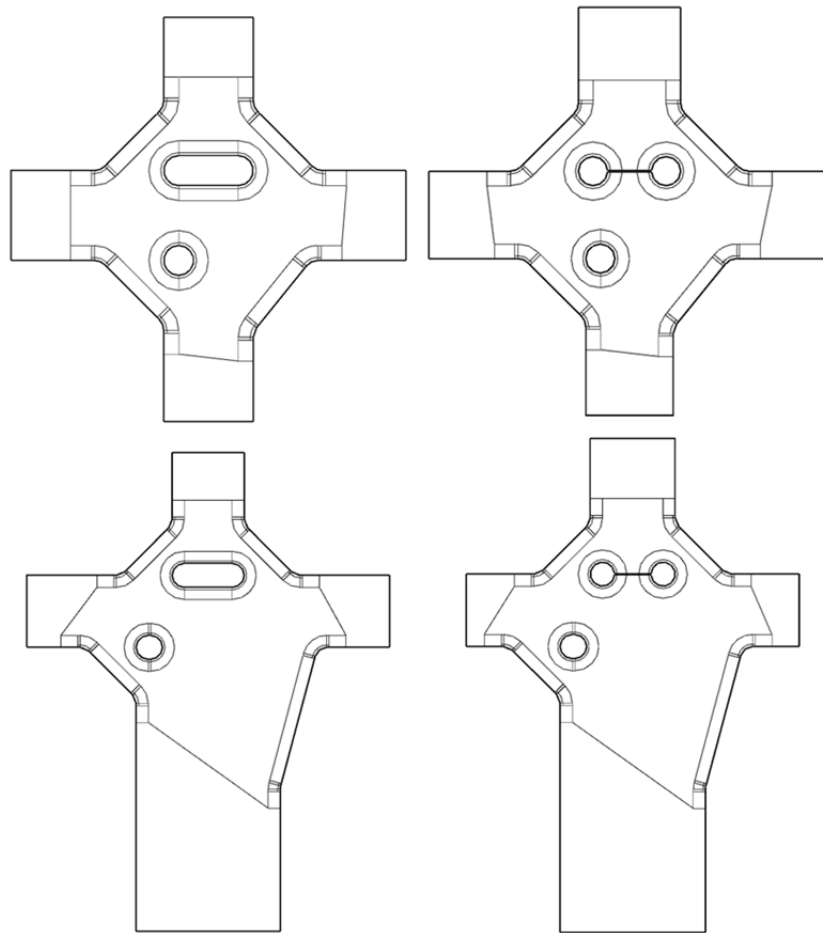


Abbildung 4-15: X_FD_YB Radaj- Modelle

Es wurden ebenfalls vier verschiedene Radaj- Modelle verwendet und fünf Modelle insgesamt. Bei der Kehlnaht oben gilt wieder, dass eine große Wurzel für Stegdicken unter 7mm verwendet wird, darüber zwei kreisrunde Wurzelkerben verbunden durch einen schmalen Steg. Beim unteren YB Schweißstoß wird bei Wandstärken unter 12mm eine Kreisrunde Wurzelkerbe verwendet, darüber ein Langloch.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Counter	tgurt	tsteg1	tsteg2	aFD	eFD	alphaFD	abackYB	adeckYB	cYB	alphabackYD	alphadeckYB	eYB
2	1	6	6	6	3	0	45	3	3	1.2	45	50	0
3	2	6	6	8	3	0	45	3	3	1.6	45	50	0
4	3	6	6	10	3	0	45	3	3	1.99	45	50	0
5	4	6	6	12	3	0	45	3	3	2.4	45	50	0
6	5	6	6	14	3	0	45	3	3	2.8	45	50	0
7	6	6	6	16	3	0	45	3	3	3.2	45	50	0
8	7	6	6	18	3	0	45	3	3	3.6	45	50	0
9	8	6	8	6	4	0	45	3	3	1.2	45	50	0
10	9	6	8	8	4	0	45	3	3	1.6	45	50	0
11	10	6	8	10	4	0	45	3	3	1.99	45	50	0

Tabelle 4-11: Auszug aus X_FD_YB Parametertabelle

4.4.4 X_YS_YS

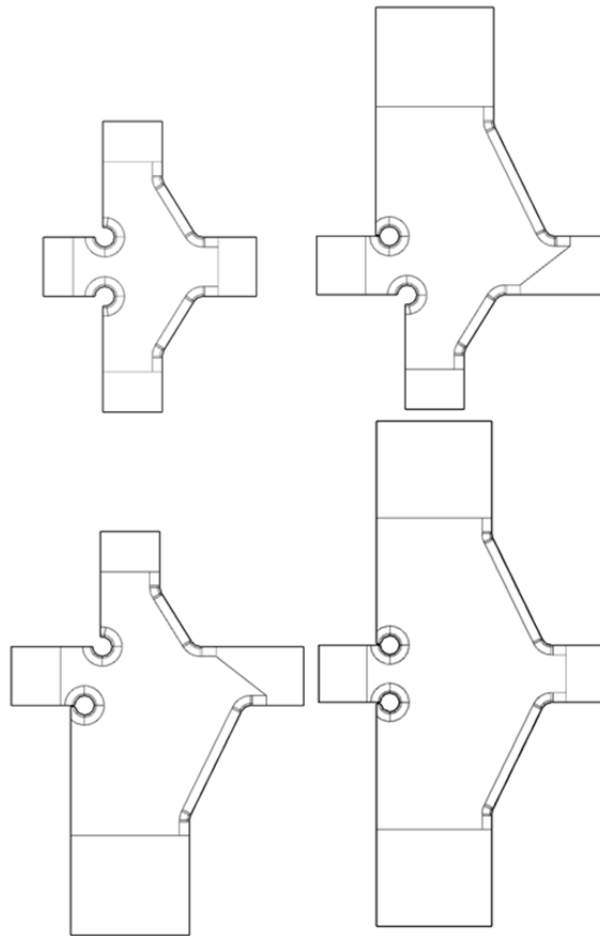


Abbildung 4-16: X_YS_YS Radaj- Modelle

Beim X_YS_YS Modell gibt es vier verschiedene Radaj- Modelle und fünf Modelle insgesamt. Bei Stegdicken unter 11mm ist die kreisrunde Wurzel offen, bei Stegdicken ab 11mm wandert die kreisrunde Wurzel unter das Stegblech und bildet mit dem 0,1mm Spalt den nichtverschweißten Reststeg.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Counter	tgurt	tsteg1	tsteg2	aYS1	cYS1	alphaYS1	aYS2	cYS2	alphaYS2
2	1	6	6	6	3	1.2	50	3	1.2	50
3	2	6	6	8	3	1.2	50	4	1.6	50
4	3	6	6	10	3	1.2	50	5	1.99	50
5	4	6	6	12	3	1.2	50	6	2.4	50
6	5	6	6	14	3	1.2	50	7	2.8	50
7	6	6	6	16	3	1.2	50	8	3.2	50
8	7	6	6	18	3	1.2	50	9	3.6	50
9	8	6	8	6	4	1.6	50	3	1.2	50
10	9	6	8	8	4	1.6	50	4	1.6	50
11	10	6	8	10	4	1.6	50	5	1.99	50

Tabelle 4-12: Auzug aus X_YD_YD Parametertabelle

4.4.5 X_YB_YB

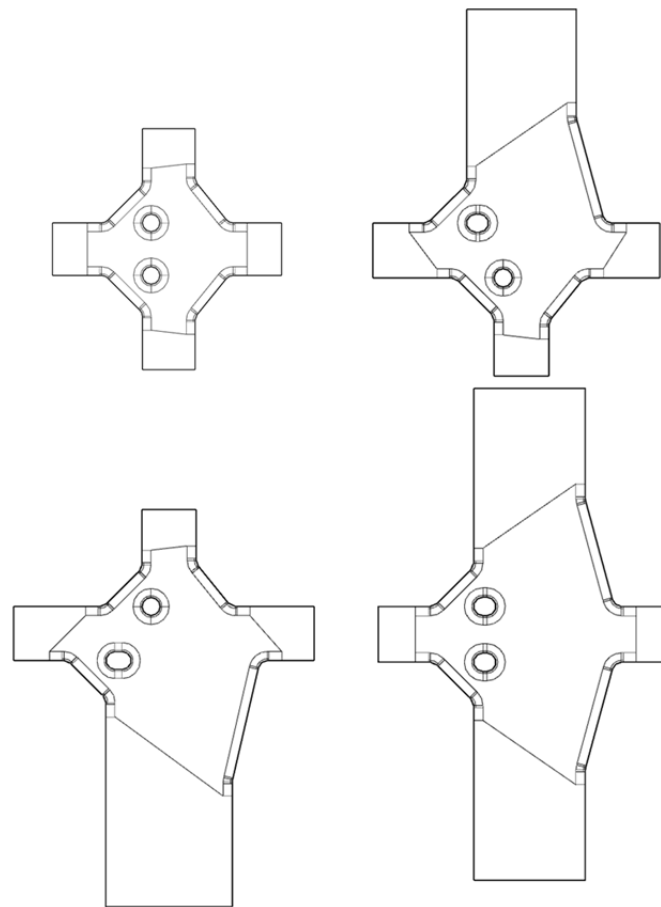


Abbildung 4-17: X_YB_YB Radaj- Modelle

Beim X_YB_YB Schweißstoß wurden vier verschiedene Radaj- Modelle verwendet. Bis zu einer Stegdicke von 10mm ist die Wurzelkerbe als kreisrundes Loch modelliert darüber als Langloch.

▲	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Counter	tgurt	tsteg1	tsteg2	abackYB1	adeckYB1	cYB1	alphanbackYB1	alphadeckYB1	eYB1	abackYB2	adeckYB2	cYB2	alphanbackYB2	alphadeckYB2	eYB2
2	1	6	6	6	3	3	1.2	45	50	0	3	3	1.2	45	50	0
3	2	6	6	8	3	3	1.2	45	50	0	3	3	1.6	45	50	0
4	3	6	6	10	3	3	1.2	45	50	0	3	3	1.99	45	50	0
5	4	6	6	12	3	3	1.2	45	50	0	3	3	2.4	45	50	0
6	5	6	6	14	3	3	1.2	45	50	0	3	3	2.8	45	50	0
7	6	6	6	16	3	3	1.2	45	50	0	3	3	3.2	45	50	0
8	7	6	6	18	3	3	1.2	45	50	0	3	3	3.6	45	50	0
9	8	6	8	6	3	3	1.6	45	50	0	3	3	1.2	45	50	0
10	9	6	8	8	3	3	1.6	45	50	0	3	3	1.6	45	50	0
11	10	6	8	10	3	3	1.6	45	50	0	3	3	1.99	45	50	0

Tabelle 4-13: Auszug aus X_YB_YB Parametertabelle

4.4.6 X_YD_YD

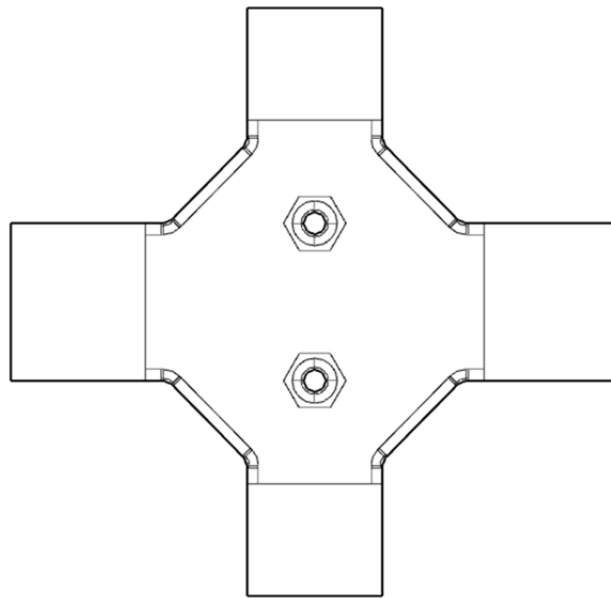


Abbildung 4-18: X_YD_YD Radaj- Modell

Beim X_YD_YD Schweißstoß genügt ein Radaj- Modell, da die nichtverschweißte Reststegbreite von der Firma Siemens AG Österreich Mobility Division eingeschränkt wurde. Insgesamt waren zwei Modelle notwendig, um Verzerrungen der Geometrie zu vermeiden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Counter	tgurt	tsteg1	tsteg2	a1	a2	alpha1	alpha2	c1	c2
2	1	6	6	6	2	2	55	55	2	2
3	2	6	6	8	2	3	55	55	2	2
4	3	6	6	10	2	4	55	55	2	2
5	4	6	6	12	2	5	55	55	2	2
6	5	6	6	14	2	6	55	45	2	2
7	6	6	6	16	2	7	55	45	2	2
8	7	6	6	18	2	8	55	45	2	2
9	8	6	8	6	3	2	55	55	2	2
10	9	6	8	8	3	3	55	55	2	2
11	10	6	8	10	3	4	55	55	2	2

Tabelle 4-14: Auszug aus X_YD_YD Parametertabelle

4.4.7 X_YS_YB

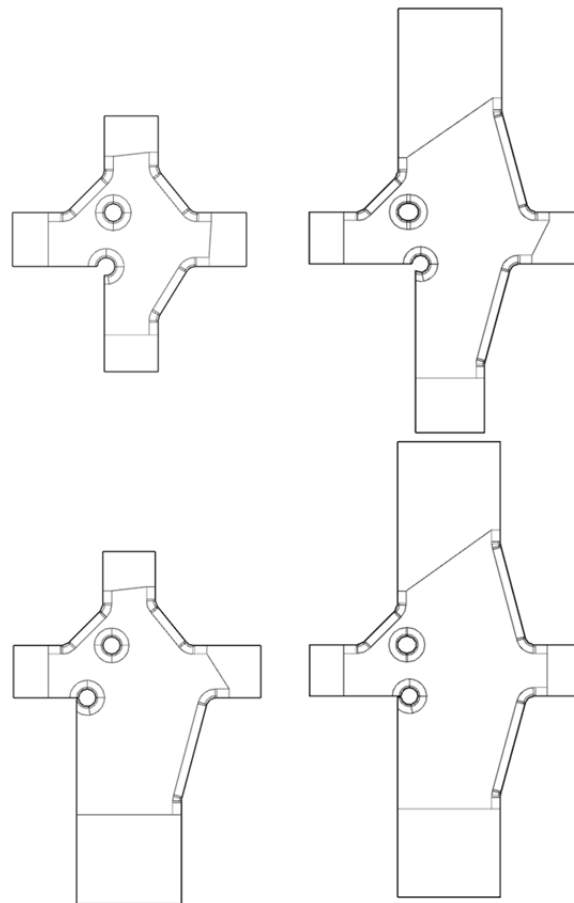


Abbildung 4-19: X_YS_YB Radaj- Modelle

Hier wurden ebenfalls fünf Modelle und vier verschiedene Radaj- Modelle erstellt. Die obere Wurzelkerbe ist bis zu einer Wandstärke von 10mm ein kreisrundes Loch, darüber wird die Geometrie zu einem Langloch. Beim unteren Steg bleibt die Wurzelkerbe ein kreisrundes Loch, wandert aber mit Zunahme des nichtverschweißten Reststegs weiter in das Werkstück.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Counter	tgurt	tsteg1	tsteg2	abackYB	adeckYB	cYB	alphabackYB	alphadeckYB	eYB	aYS	cYS	alphaYS
2	1	6	6	6	3	3	1.2	45	50	0	3	1.2	50
3	2	6	6	8	3	3	1.2	45	50	0	4	1.6	50
4	3	6	6	10	3	3	1.2	45	50	0	5	1.99	50
5	4	6	6	12	3	3	1.2	45	50	0	6	2.4	50
6	5	6	6	14	3	3	1.2	45	50	0	7	2.8	50
7	6	6	6	16	3	3	1.2	45	50	0	8	3.2	50
8	7	6	6	18	3	3	1.2	45	50	0	9	3.6	50
9	8	6	8	6	3	3	1.6	45	50	0	3	1.2	50
10	9	6	8	8	3	3	1.6	45	50	0	4	1.6	50
11	10	6	8	10	3	3	1.6	45	50	0	5	1.99	50

Tabelle 4-15: Auszug aus X_YS_YB Parametertabelle

5 Aufbau des VB Scripts

Im Weiteren wird das VB Skript zum automatischen Erzeugen und Simulieren der Modelle erklärt, sowie die damit zusammenhängenden Problemstellungen erläutert.

5.1 Die Ordnerstruktur

Die ca. 4600 Simulierten Schweißstöße wurden folgendermaßen abgelegt:

- Es wurde nur die jeweilige Geometrie nach Norm simuliert.
- Es wird nach Stumpf-, T- und Kreuzstößen unterschieden.
- Für jeden einzelnen Stoß wurde ein Ordner angelegt.
- In jedem Schweißstoßordner gibt es einen oder mehrere Ordner „Modell“ und einen Ordner „Solutions“, in dem die simulierten Stöße enthalten sind. Manche Schweißstöße erforderten je nach Wandstärke ein anderes Radaj-Modell, weshalb es mehrere Ordner „Modell“ gibt. Die Ordner „Solutions1“ usw. dienen lediglich als Speicherort für die Teillösungen der einzelnen Radaj Modelle.
- Im Ordner „Modell“ befinden sich das Part-, I-, Fem- und Simfile des Schweißstoßes und das dazugehörige Makro.
- Im Ordner „Solutions“ befindet sich die Excel Datei mit Parameterliste und Kerbfalltafeln

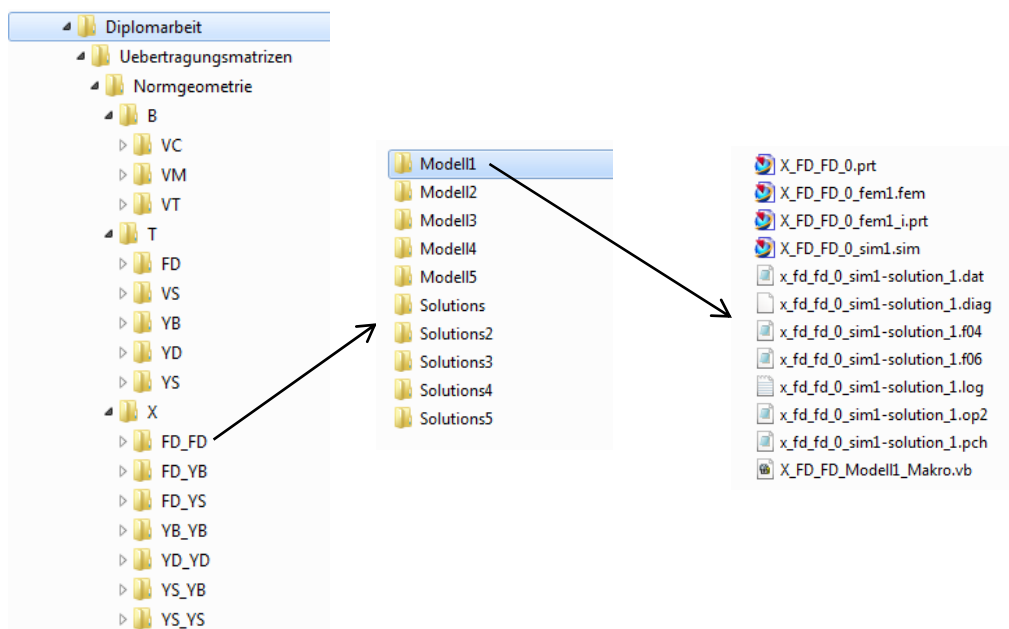


Abbildung 5-1: Ordnerstruktur

5.2 Benennung der Dateien

Die Dateien müssen, damit das Script fehlerfrei arbeitet, immer gleich benannt werden. Dies gilt sowohl für Part-, I-, Fem- und Simfile wie auch für die zugehörige Excel Datei, aus der die Teile generiert werden. Das zu einem Schweißstoß gehörende Modell, von dem die verschiedenen anderen Wandstärkenkombinationen abgeleitet werden, ist immer nach dem gleichen Schema benannt.

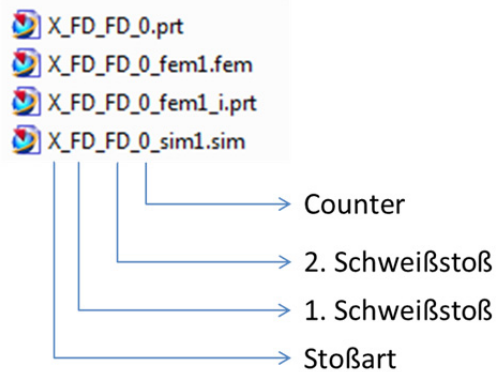


Abbildung 5-2: Bezeichnung der NX Dateien

Der erste Buchstabe bezeichnet also die Stoßart (B für Stumpfstoß, T für T- Stoß und X für Kreuzstoß), der nachfolgende Buchstabe kennzeichnet die Nahtart, im Falle eines Kreuzstoßes werden natürlich beide Nahtarten angeführt. Die letzte Ziffer im Benennungsschema stellt die fortlaufende Nummer der Teile dar. Diese Nummer findet sich auch im Excel File, aus dem die Teile generiert werden. Dabei hat das Modell, aus welchem die anderen Wandstärkenkombinationen abgeleitet werden, immer eine 0. Dies ist ebenfalls für ein reibungsloses Abarbeiten des Scripts wichtig.

5.3 Das VB Skript

Um die vielen geforderten Modelle für den Kerbfallkatalog nicht jeweils manuell erstellen und simulieren zu müssen, war eine Automatisierung gefordert. Siemens NX bietet mit NXOpen eine Programmierschnittstelle. Es werden mehrere Programmiersprachen unterstützt. Beim Programmieren für NX wird unterschieden zwischen einem Journal (ein einfaches Makro) und einem kompilierten ausführbaren Programm. Zuerst wurde versucht ein kompiliertes ausführbares Programm zu erstellen, dass einen höheren Benutzerkomfort ermöglichen würde. Zunächst war abzuklären ob die erforderliche Author Lizenz zur Verfügung steht, dies war der Fall. Dann wurde mit der FreeWare Microsoft Visual Basic Express testweise ein Programm geschrieben. Es stellte sich aber heraus, dass damit keine kompilierbaren Anwendungen für externe Programme (wie Siemens NX) erstellt werden können. Dies wäre nur mit einer teuren Vollversion möglich gewesen. Anschließend wurde mit der kostenlosen IDE (integrated development environment) SharpDevelop gearbeitet. Diese ermöglicht zwar ein kompilieren eines Programms für externe Anwendungen, hatte aber Probleme mit der 64bit Architektur. Es wurde also auf das in NX eingebettete Makro Tool Journals ausgewichen. Um den Programmieraufwand zu verringern, wurde viel mit dem angebotenen Recorder Tool programmiert. Dieses Aufnehmen und Abspielen eines Programms ermöglicht eine relativ einfache und rasche Lösung verschiedenster Problemstellungen. Bei dieser Playback Methode war die Auswahl der Programmiersprachen auf die beiden .NET Sprachen C# und Visual Basic begrenzt. Die Auswahl der Programmiersprache erfolgte dann aufgrund vorhandener Literatur zugunsten von Visual Basic. Da am Institut keinerlei Vorkenntnisse zur Programmierung von NX vorhanden waren, dauerte die Einarbeitung trotz eines einfachen Programms relativ lange.

Es wurde für jedes Modell ein eigenes Journal erstellt. Bei Schweißstößen, deren Geometrie ab gewissen Wandstärken ein anderes Radaj Modell erfordern, wurde für jedes dieser Modelle ein eigenes Journal angefertigt. Da grundsätzlich immer von einem mittels Recorder Funktion aufgenommenen Journal ausgegangen wird, ist nicht der gesamte im Journal vorhandene Programmcode verständlich bzw. bekannt, dies ist aber auch nicht nötig. Es wäre sicher auch möglich den Programmcode wesentlich zu optimieren beispielsweise, indem man nicht jeden Schritt sichtbar ausführt. Davon wird jedoch an dieser Stelle abgeraten, da der Rechner beim schrittweisen Ausführen des Journals relativ viel Rechenkapazität benötigt und sollte das Skript schneller abgearbeitet werden, kommt es bei vollem Arbeitsspeicher immer wieder zu Fehlern. Der Rechner startet dann quasi zu viele Simulationen gleichzeitig, was ab einer gewissen Grenze zu Problemen führt. Bei einigen Journals ist aus diesem Grund sogar ein sleep-timer integriert, um ein definiertes Abwarten und damit fertig simulieren des vorhergehenden Modells zu ermöglichen.

Wie bereits angesprochen wird mit dem Journal Tool in NX gearbeitet.



Abbildung 5-3: Journal Toolbox

Die wesentlichen Steuerelemente sind Play zum Ausführen des Journals, Record zum Aufzeichnen eines neuen Journals und Edit zum Bearbeiten des Journals. Wichtig ist, dass ein Journal nur funktioniert, wenn es unter exakt den gleichen Bedingungen ausgeführt wird, wie es aufgezeichnet wurde. Im Fall der Schweißnahtmodelle bedeutet das, dass Part-, I-, Fem- und Simfile geöffnet sind und das Simfile im Fenster aktiv ist.

Im Folgenden wird anhand von zwei Beispielen auf die in den jeweiligen Journals eingefügten beziehungsweise manipulierten Teile im Detail eingegangen.

5.3.1 Das B_VC Journal

Das B_VC Journal ermöglicht es, ausgehend von einem Modell B_VC_0, alle Wandstärkenkombination für den keramikbadgesicherten Stumpfstoß von einer Wandstärke von 5mm bis 25mm zu simulieren.

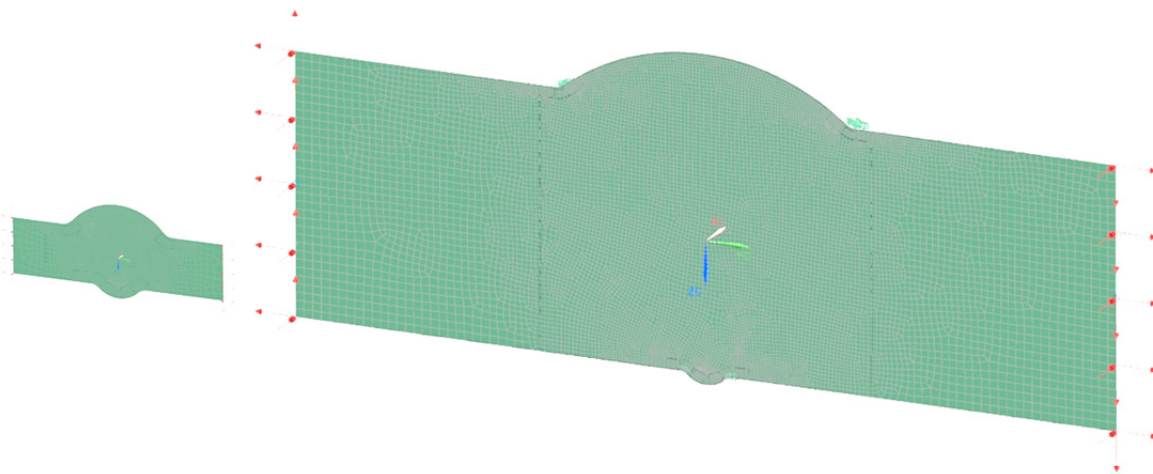


Abbildung 5-4: B_VC Wandstärke 5 bis 25mm

Die Parameter sind alle in der entsprechenden Excel Datei hinterlegt. In diesem Fall sind es außer der Blechstärke t nur die Überhöhung der Naht oben (h_1) und unten (h_2) sowie der Öffnungswinkel (α) und Blechabstand (b_2). Dieser einfache Stoß kommt mit einem einzelnen Radajmodell für alle Blechstärken aus.

Counter	tgurt	h1 (C Qualität)	b2	h2	alpha
1	5	2.30	4	1	50
2	6	2.44	4	1	50
3	7	2.58	4	1	50
4	8	2.72	4	1	50
5	9	2.86	4	1	50
6	10	3.00	4	1	50
7	11	3.14	4	1	50
8	12	3.28	4	1	50
9	13	3.42	4	1	50
10	14	3.56	4	1	50
11	15	3.70	4	1	50
12	16	3.84	4	1	50
13	17	3.98	4	1	50
14	18	4.12	4	1	50
15	19	4.26	4	1	50
16	20	4.40	4	1	50
17	21	4.54	4	1	50
18	22	4.68	4	1	50
19	23	4.82	4	1	50
20	24	4.96	4	1	50
21	25	5.10	4	1	50

Tabelle 5-1: B_VC Parametertabelle

Der eigentliche Programmablauf wird zunächst anhand eines Struktogrammes dargestellt:

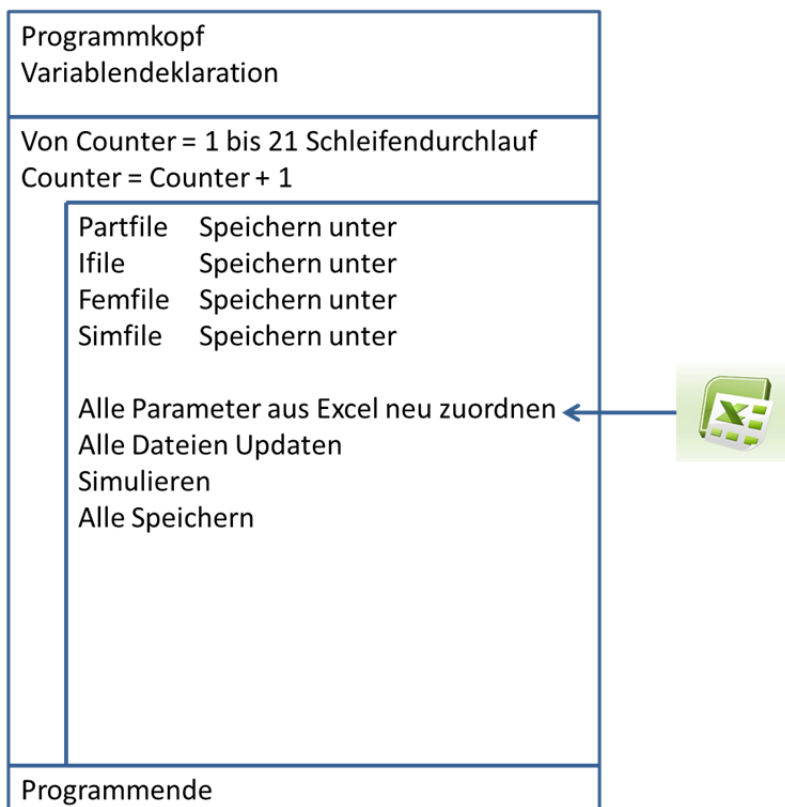


Abbildung 5-5: Struktogramm B_VC Journal

Um ein leichteres kontrollieren des Codes zu ermöglichen, wurde vorwiegend in SharpDevelop gearbeitet. Die hier gezeigte farbige Abstufung der einzelnen Programmteile entspricht dem Codierungsstandard von SharpDevelop.

Der Auszug auf der nächsten Seite aus dem B_VC Script zeigt die Variablendeklaration. Es wird zunächst also der Dateiname für Part-, I-, Fem- und Simfile ohne die Zählernummer vorgegeben. Später werden auch noch die jeweiligen Dateiendungen benötigt, weshalb sie hier angelegt werden. Anschließend erfolgt die Definition des Speicherorts, an dem man die Lösungen der Simulationen und die Dateien haben möchte. Als Nächstes wird die für den Excel Zugriff nötige Definition des Excel Dateinamen samt dem entsprechenden Speicherort bekanntgegeben. Zusätzlich zum Namen der Excel Datei muss noch definiert werden, in welchem Tabellenblatt die Parameterinformationen enthalten sind. Abschließend werden noch Variablen definiert, die später im Programmablauf den Speicherort der einzelnen Parameter aus dem Excel Tabellenblatt bezeichnen.

```
'-----  
' Variablenklärung  
'-----  
  
Dim Counter as Integer = 1  
  
Dim Filename as String = "B_VC_"  
Dim Ifileending as String = "_fem1_1"  
Dim Femfileending as String = "_fem1"  
Dim Simfileending as String = "_sim1"  
  
Dim Pathname as String = "C:\Users\wozma07\Documents\Diplomarbeit\Uebertragungsmatrizen\Normgeometrie\B\VC\Solutions\  
  
Dim xls_name as String = "C:\Users\wozma07\Documents\Diplomarbeit\Uebertragungsmatrizen\Normgeometrie\B\VC\B_VC.xlsx"  
Dim tab_name as String = "Parameter"  
  
Dim tguert_location as String  
Dim c1_location as String  
Dim b2_location as String  
Dim c2_location as String  
Dim alpha_location as String
```


Nun beginnt der eigentliche Programmablauf mit dem Schleifeneinstieg:

```
For Counter = 1 to 21 Step 1
```

Die Kopfgesteuerte For Schleife erhöht einfach bei jedem Schleifendurchlauf die Zählervariable Counter um eins bis schließlich der Wert 21 des letzten Teils erreicht wird. Nach Erreichen des voreingestellten Maximalwertes, der aus dem Excel Tabellenblatt ersichtlich ist, wird die Schleife übersprungen und das Programm beendet.

Als nächstes werden, wie im nachstehenden Programmteil ersichtlich, jeweils die neuen Part-, I-, Fem- und Simfiles angelegt und abgespeichert. Nachdem das Script zum Partfile gewechselt hat, wird dieses mit vollem Namen abgespeichert, also Pfad, Dateiname mit Zählernummer und Dateiendung. Bei den anderen Dateien wird zunächst nach der aktuell geöffneten Datei gesucht deshalb CStr(Counter-1). Anschließend wird die neue Datei durch Speichern erzeugt. Alle Dateinamen setzen sich also aus mehreren String Variablen zusammen und werden zusätzlich mit der entsprechenden Dateiendung abgespeichert. Die Funktion CStr() wandelt lediglich die Integervariable Counter in einen String um.

```
'-----  
' Menu:File -> SaveAs...  
'-----
```

```
Dim partSaveStatus1 As PartSaveStatus  
partSaveStatus1 = workPart1.SaveAs(Pathname + Filename + CStr(Counter) + ".prt")  
partSaveStatus1.Dispose()  
  
Dim part2 As Part = CType(theSession.Parts.FindObject(Filename + CStr(Counter-1) + Ifileending), Part)  
Dim partSaveStatus2 As PartSaveStatus  
partSaveStatus2 = part2.SaveAs(Pathname + Filename + CStr(Counter) + Ifileending + ".prt")  
partSaveStatus2.Dispose()  
  
Dim femPart1 As CAE.FemPart = CType(theSession.Parts.FindObject(Filename + CStr(Counter-1) + Femfileending), CAE.FemPart)  
Dim partSaveStatus3 As PartSaveStatus  
partSaveStatus3 = femPart1.SaveAs(Pathname + Filename + CStr(Counter) + Femfileending + ".fem")  
partSaveStatus3.Dispose()  
  
Dim simPart1 As CAE.SimPart = CType(theSession.Parts.FindObject(Filename + CStr(Counter-1) + Simfileending), CAE.SimPart)  
Dim partSaveStatus4 As PartSaveStatus  
partSaveStatus4 = simPart1.SaveAs(Pathname + Filename + CStr(Counter) + Simfileending + ".sim")  
partSaveStatus4.Dispose()
```

Jetzt können im neu erstellten Partfile die vorhandenen Parameter mit Werten aus dem Excel überschrieben werden.

Zuerst werden zwei Maßeinheiten unit1 in Millimeter für Längen und unit2 in Grad für Winkel definiert. Später müssen diese Einheiten bei der Zuweisung der Expression angegeben werden.

Nun kann die Expression definiert werden, dabei wird eine fortlaufende Nummer vergeben. Um die zu verändernde Expression zu finden, wird der entsprechende Parametername, der bereits im Part File definiert ist, unter „“ angeführt. Zusätzlich muss noch die Zelle der Variable im Excel File definiert werden, also Spalte und Zeile. Hierbei ändert sich die Spalte natürlich nicht, die Zeile wird allerdings bei jedem Schleifendurchlauf um eins erhöht.

Jetzt kann die Expression editiert werden, dazu ist zunächst zu definieren welche Expression editiert werden soll, die zugehörigen Maßeinheit, und abschließend wird unter „“ der neue Wert angegeben. Dieser neue Wert soll ja aus einer Excel Datei heraus gelesen werden, dies geschieht mit dem Befehl `ug_cell_read`. Im Befehl `ug_cell_read` ist jeweils unter drei Anführungszeichen der Name der Excel Datei, der Name des Tabellenblattes sowie der Ort der Zelle, in welcher der gewünschte Wert steht anzugeben. Diese Schritte sind nun für jeden Parameter, der verändert werden soll, zu wiederholen. Nachfolgend ist die Parameterzuweisung für den einfachen B_VC Stoß dargestellt und kann mit der Parameterliste aus Tabelle 5-1 verglichen werden.

```
' -----  
' Menu: Tools->Expression...  
' -----
```

```
Dim markId2 As Session.UndoMarkId  
markId2 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Expression")  
Dim unit1 As Unit = CType(workPart.UnitCollection.FindObject("MilliMeter"), Unit)  
Dim unit2 As Unit = CType(workPart.UnitCollection.FindObject("Degrees"), Unit)  
  
Dim expression1 As Expression = CType(workPart.Expressions.FindObject("tgurt"), Expression)  
tgurt_location = "B" + CStr(Counter+1)  
workPart.Expressions.EditWithUnits(expression1, unit1, "ug_cell_read(""" &xls_name &""", """" &tab_name & """) &tgurt_location &""")  
  
Dim expression2 As Expression = CType(workPart.Expressions.FindObject("h1"), Expression)  
c1_location = "C" + CStr(Counter+1)  
workPart.Expressions.EditWithUnits(expression2, unit1, "ug_cell_read(""" &xls_name &""", """" &tab_name & """) &c1_location &""")  
  
Dim expression3 As Expression = CType(workPart.Expressions.FindObject("b2"), Expression)  
b2_location = "D" + CStr(Counter+1)  
workPart.Expressions.EditWithUnits(expression3, unit1, "ug_cell_read(""" &xls_name &""", """" &tab_name & """) &b2_location &""")
```

```
Dim expression4 As Expression = CType(workPart.Expressions.FindObject("h2"), Expression)
c2_location = "E" + CStr(Counter+1)
workPart.Expressions.EditWithUnits(expression4, unit1, "ug_cell_read(""" &xls_name &""", """" &tab_name & """) &c2_location &""")

Dim expression5 As Expression = CType(workPart.Expressions.FindObject("alpha"), Expression)
alpha_location = "F" + CStr(Counter+1)
workPart.Expressions.EditWithUnits(expression5, unit2, "ug_cell_read(""" &xls_name &""", """" &tab_name & """) &alpha_location &""")

Dim nErrs1 As Integer
nErrs1 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId2)
```

Der nachfolgende Code stellt im Wesentlichen das Update der anderen Dateien also I-, Fem- und Simfile sowie das neu Simulieren dar und ist der beiliegenden DVD zu entnehmen. Dieser Code wird hauptsächlich mit dem Recorder aufgenommen und ist für alle Schweißstöße gleich. Am Ende des Programms wird noch der Schleifenfuß mit

Next Counter

End Sub

End Module

angegeben.

5.3.2 Das X_FD_FD Journal

Werden für einen Schweißstoß mehrere Radaj Modelle nötig, so verändert sich der Programmcode leicht, weil ja noch eine zusätzliche Entscheidung eingebaut werden muss. Diese Entscheidung ist nötig, da mit dem geöffneten Modell nicht alle Teile aus der Excel Liste generiert werden sollen, sondern nur jene für die das Radaj Modell passt.

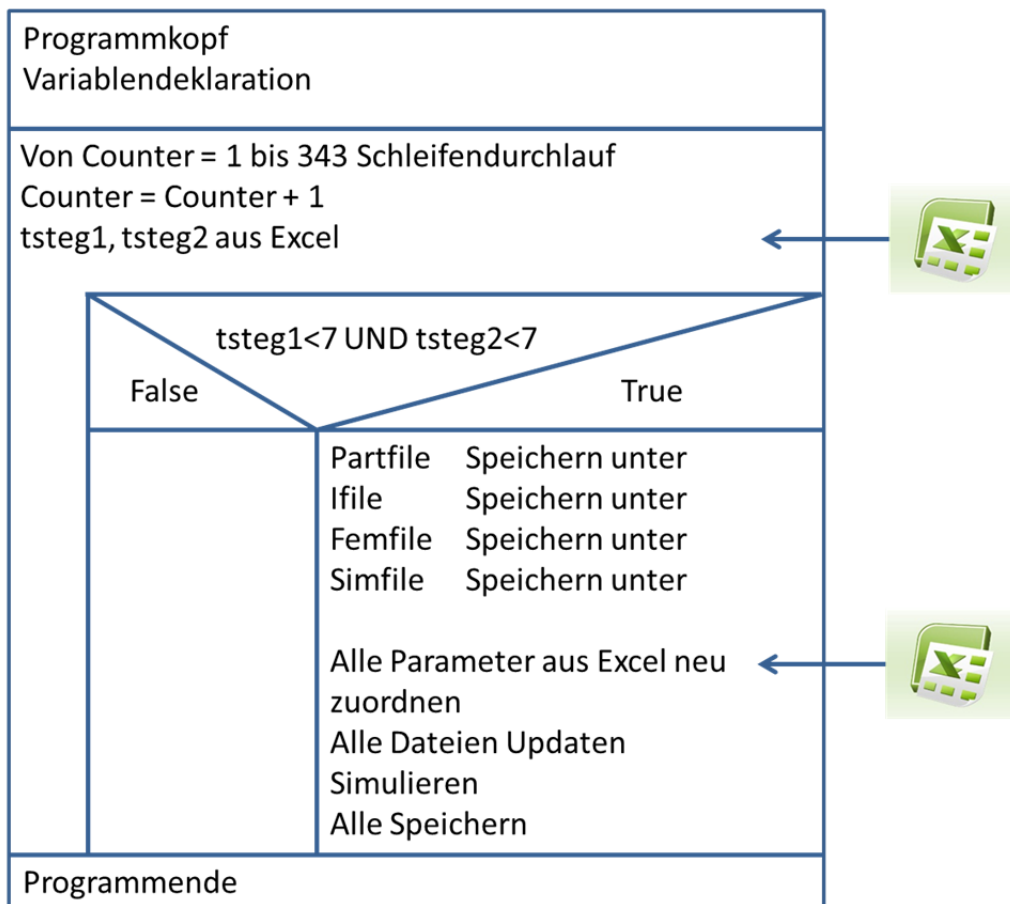


Abbildung 5-6: Struktogramm X_FD_FD Journal

Beim Kreuzstoß mit Kehlnähten X_FD_FD sind vier verschiedene Radaj Modelle nötig, weil sich die Wurzelkerbe bzw. der nichtverschweißte Steg je nach Stegdicke unterscheiden.

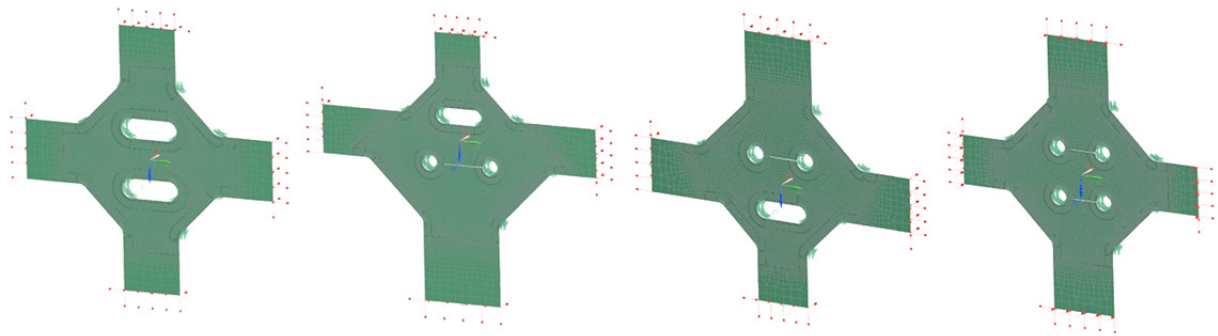


Abbildung 5-7: Radaj Modelle für X_FD_FD Stoß

Es ist wichtig zu beachten, dass das Script jedes Mal in die Schleife geht, die Zählervariable also immer um eins erhöht wird. Die Zählervariable ist im Namen jeder Simulation enthalten und muss darum auf die entsprechende Nummer des Teils laut Excel Liste erhöht werden.

Um die Entscheidung bezüglich des Radaj Modells aufgrund der Stegdicken zu treffen, ist es zunächst notwendig die Stegdicken als Variablen in das Script zu bekommen. Ein direkter Zugriff auf Excel konnte mit der Journals Funktion nicht realisiert werden. Dies wäre nur in einem kompilierten Programm möglich gewesen. Es musste also wieder mit der Funktion `ug_cell_read` gearbeitet werden, die eigentlich lediglich für einen Zugriff auf Excel für die Zuweisung zu Expressions vorgesehen ist. Zuerst wird ein Expressionname als String definiert, dann wird analog der Parameterzuweisung der Speicherort der Variablen (also die Zelle) in Excel angegeben. Anschließend kann ein Expressionstring definiert werden, bestehend aus dem Expressionname und dem Wert, der wieder über `ug_cell_read` aus dem Excel bezogen wird. Danach kann ein Expressionobject angelegt werden, dass als Attribut den gesamten Expressionstring bekommt. Nun kann mithilfe dieses Objekts eine einfache Integervariable definiert werden, die den gewünschten Wert enthält. Abschließend darf nicht vergessen werden, das angelegte Expressionobject wieder zu löschen, der gespeicherte Integerwert bleibt dabei für eine Weiterverarbeitung im Script erhalten. Leider war es nicht möglich eine einfachere Möglichkeit zu finden, um auf Werte aus dem Excel zuzugreifen. Die Anwendung gestaltet sich aber ganz einfach, da nur einzelne Bezeichnungen geringfügig geändert werden müssen. Nachstehend sieht man das Codebeispiel für den X_FD_FD Kreuzstoß.


```
'-----  
' tsteg1 Wert aus Excel zuweisen  
'-----
```

```
Dim expr_name1 As String = "tsteg1dicke"  
tsteg1_location = "C" + CStr(Counter+1)  
Dim expr_str1 As String = expr_name1 & " = ug_cell_read(""" &xls_name & """, """" &tab_name & """) &tsteg1_location & """"")  
Dim expr_object1 As Expression = part0.Expressions.CreateExpression("Integer", expr_str1)  
Dim tsteg1 As Integer = expr_object1.IntegerValue  
part0.Expressions.Delete(expr_object1)
```

```
'-----  
' tsteg2 Wert aus Excel zuweisen  
'-----
```

```
Dim expr_name2 As String = "tsteg2dicke"  
tsteg2_location = "D" + CStr(Counter+1)  
Dim expr_str2 As String = expr_name2 & " = ug_cell_read(""" &xls_name & """, """" &tab_name & """) &tsteg2_location & """"")  
Dim expr_object2 As Expression = part0.Expressions.CreateExpression("Integer", expr_str2)  
Dim tsteg2 As Integer = expr_object2.IntegerValue  
part0.Expressions.Delete(expr_object2)
```

Anschließend stehen die Variablen tsteg1 und tsteg2 im Script zur Verfügung und es wird die einfache logische Verknüpfungen WENN und UND angewendet.

```
If (tsteg1 < 7 And tsteg2 < 7) Then
```

```
'Hier steht entsprechend der eigentliche Schleifeninhalt analog dem Beispiel B_VC mit dem Unterschied das bei der Parameterzuweisung die Speicherorte von tsteg1 und tsteg2 in Excel (also die Zellen) natürlich nicht mehr zugewiesen werden müssen, da dies ja bereits weiter oben geschehen ist.
```

```
End If
```

```
Next Counter
```

```
End Sub
```

```
End Module
```

6 Die Kerbfalltafeln

Ziel der Diplomarbeit ist es, Kerbfalltafeln für die Berechnung und Bewertung nach IIW zur Verfügung zu stellen. Die eigentliche Programmierung des Bewertungsalgorithmus wird von der Firma Siemens AG Österreich Mobility Division selbst vorgenommen. Die dafür benötigten Kerbfalltafeln werden in den beiden Dateiformaten Excel und XML zur Verfügung gestellt. Das Zusammenfassen der Ergebnisse und die Erstellung der Kerbfalltafeldateien aus den simulierten Schweißstößen wird mit einem MatLab Tool, welches Herr Dipl.- Ing. Uwe Oßberger erstellt hat, vorgenommen. Zunächst wird die Bedienung des MatLab Programms gezeigt, dann wird der Prinzipielle Aufbau der Excel Dateien und der Kerbfalltafeln erklärt.

6.1 Eingabeparameter in das MatLab Skript zur Kerbfalltafelerstellung

Im Folgenden werden kurz die Eingabe und die Eingabeparameter in das von Herrn Dipl.- Ing. Uwe Oßberger erstellte MatLab Tool zur Kerbfalltafelerstellung aufgezeigt. Das Programm wird in das Verzeichnis mit den Punch Files kopiert und dann gestartet. Nach dem Starten fordert es einige Eingaben vom Benutzer, die nacheinander abgearbeitet werden müssen:

1. Enter weld definition: Dieser Punkt erfordert die Eingabe der Schweißstoßbezeichnung z.B.: X_FD_FD
2. From, To: An dieser Stelle wird die Anzahl der Modelle angegeben inklusive einem Startmodell (üblicherweise 1) z.B.: From: 1, To: 343
3. Enter number of SECTIONS: Definition der Anzahl der Schnittufer z.B.: 4
4. Enter angle for SECTION number: 1 etc.: Die Winkel der Schnittufer des jeweiligen Schweißstoßes werden angegeben. Die Winkelkoordinate läuft wie in 3.1 beschrieben. In obigem Beispiel eines Kreuzstoßes also 0, 90, 180, 270. Wenn aber beispielsweise die Kerbfalltafeln für einen T- Stoß generiert werden so lauten die Winkel: 0, 180, 270.
5. Enter number of NOTCHREGIONS: Es erfolgt die Angabe der Anzahl der mit CROD Elementen vernetzten Kerben wie in 3.3 beschrieben z.B.: 12.
6. Enter relevant NOTCHSECTION for NOTCHREGION 1 etc.: Definition der Kerbstelle in Relation zum betreffenden Schnittufer. Wurzelkerben werden üblicherweise auf das betreffende Stegblech bezogen. Die Nummerierung erfolgt ähnlich wie die Nummerierung der Schnittufer und läuft ebenfalls im Uhrzeigersinn um. Der genaue Sachverhalt ist anhand des Beispiels in Abbildung 6-2 erklärt.

Nachstehende Abbildungen verdeutlichen nochmal die jeweiligen Bezeichnungen und ihre Zuordnung.

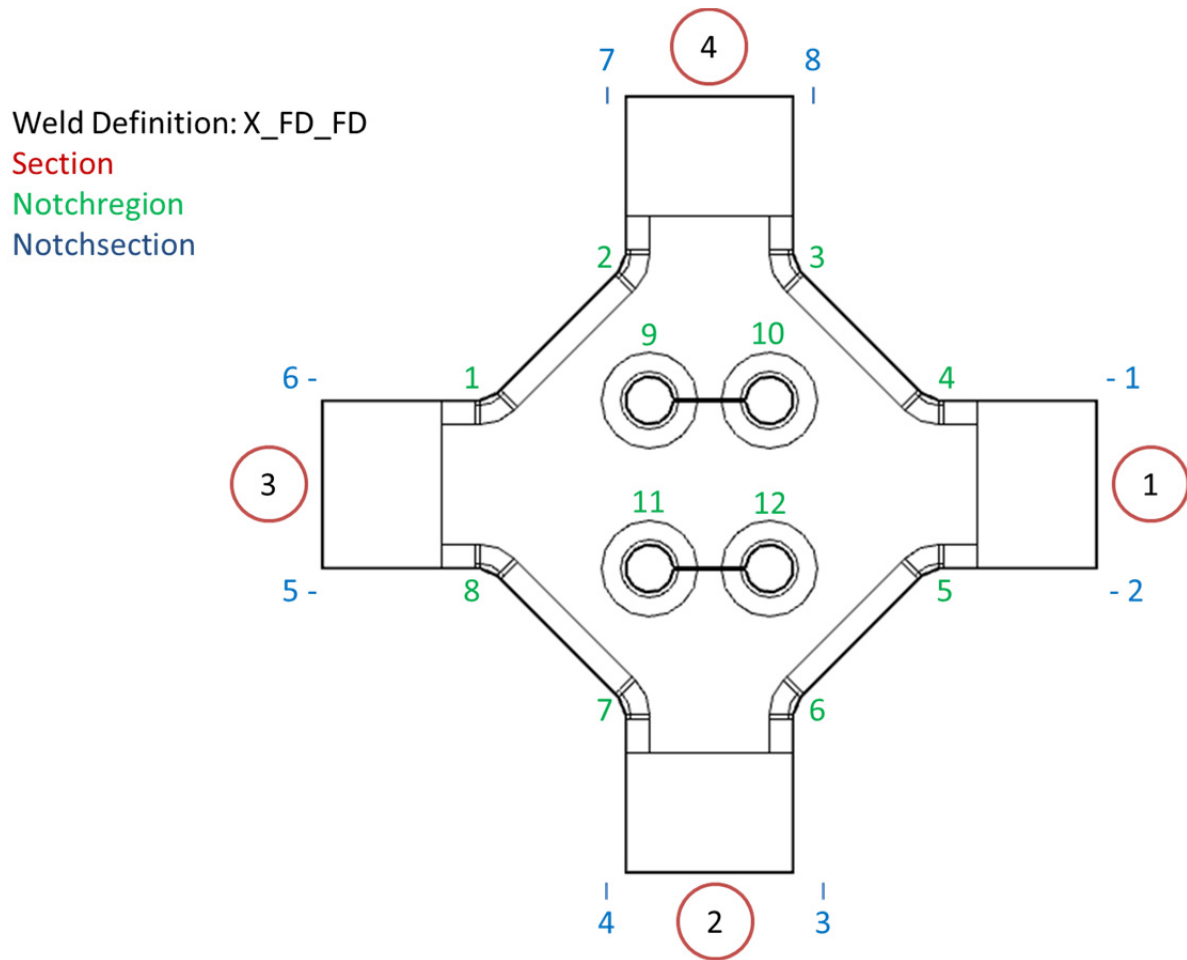


Abbildung 6-1: Eingabeparameter für das MatLab Programm anhand eines Kreuzstoßes

NOTCHREGION	NOTCHSECTION
1	6
2	7
3	8
4	1
5	2
6	3
7	4
8	5
9	7
10	8
11	4
12	3

Nebstehend sieht man die nötigen Eingaben unter NOTCHSECTION für den unter Abbildung 6-1 angeführten Kreuzstoß. Es ist zu beachten, dass die Wurzelkerben 9 – 12 jeweils den Stegblechen zugeordnet sind.

Abbildung 6-2: NOTCHSECTION for NOTCHREGION

Abschließend werden noch die Eingabeparameter für einen T- Stoß Beispielhaft dargestellt.

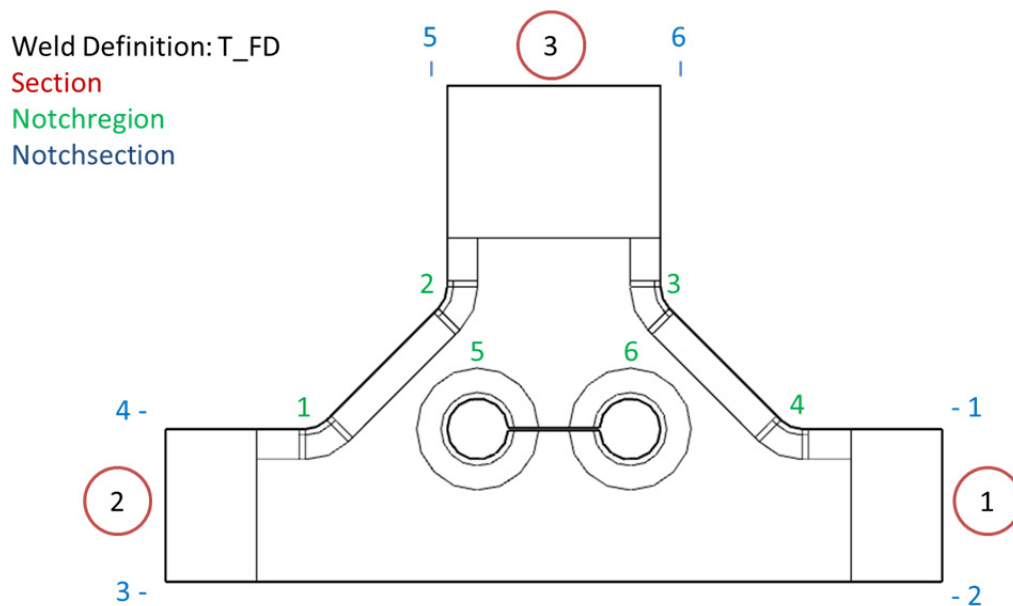


Abbildung 6-3: Eingabeparameter für das MatLab Programm anhand eines T- Stoßes

6.2 Aufbau der Excel Dateien

Jede Excel Datei enthält mehrere Tabellenblätter die im Folgenden erklärt werden.

6.2.1 Das Infosheet

Das erste Tabellenblatt ist als sogenanntes Infosheet vorgesehen, in dem die für den entsprechenden Schweißstoß benötigten Radaj Modelle kurz dargestellt sind. Im Infosheet ist detailliert dargestellt, wie die Kerbregionen und die Schnittufer durchnummeriert sind. Zusätzlich ist nochmal das Koordinatensystem dargestellt.

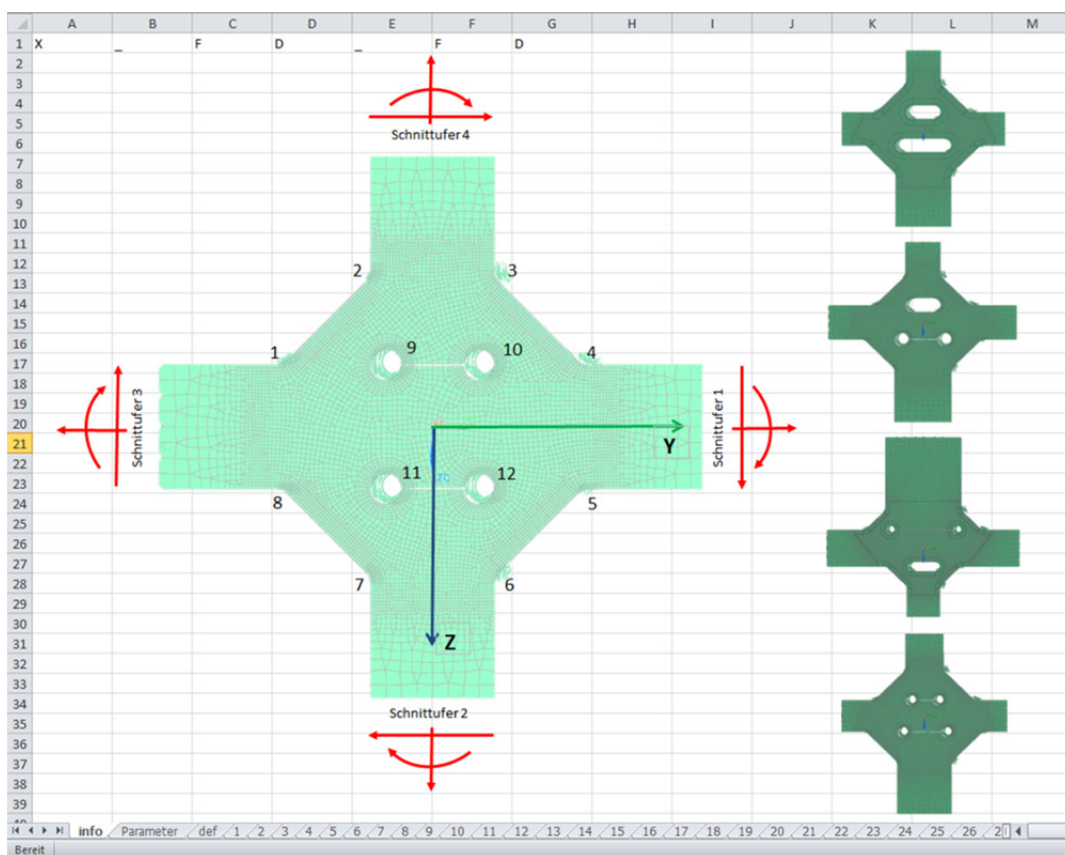


Abbildung 6-4: X_FD_FD Infosheet

6.2.2 Die Parameterliste

Das nächste Tabellenblatt in der Excel Datei stellt die Parameterliste dar, welche die Grundlage für die einzelnen Simulationen bilden. Jede Zeile in dieser Tabelle stellt eine Simulation mit Part-, I-, Fem- und Simfile dar. Die vollständigen Parameterlisten für die generierten Schweißstoßmodelle befinden sich im Anhang.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Counter	tgurt	tsteg1	tsteg2	a1	a2	alpha1	alpha2	e1	e2
2	1	6	6	6	3	3	45	45	0	0
3	2	6	6	8	3	4	45	45	0	0
4	3	6	6	10	3	5	45	45	0	0
5	4	6	6	12	3	6	45	45	0	0
6	5	6	6	14	3	7	45	45	0	0
7	6	6	6	16	3	8	45	45	0	0
8	7	6	6	18	3	9	45	45	0	0
9	8	6	8	6	4	3	45	45	0	0
10	9	6	8	8	4	4	45	45	0	0
11	10	6	8	10	4	5	45	45	0	0
12	11	6	8	12	4	6	45	45	0	0
13	12	6	8	14	4	7	45	45	0	0
14	13	6	8	16	4	8	45	45	0	0
15	14	6	8	18	4	9	45	45	0	0

Tabelle 6-1: Auszug aus X_FD_FD Parametertabelle

6.2.3 Das Definitionssheet

Zusätzlich ist noch ein Definitionssheet als Tabellenblatt vorgesehen. Das Definitionssheet enthält detaillierte Informationen zu jedem einzelnen Schnittufer an jedem einzelnen Schweißnahtmodell.

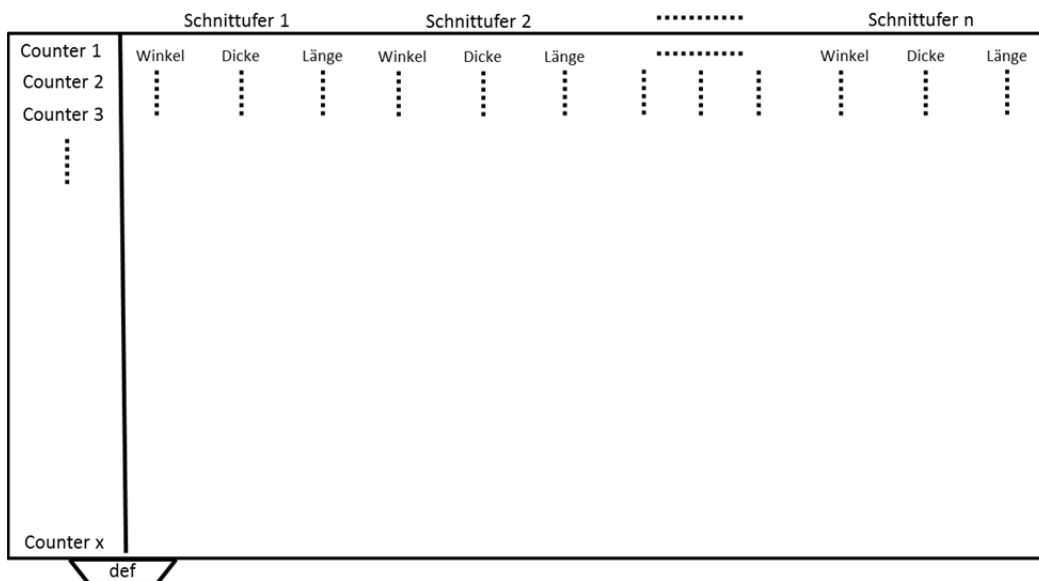


Abbildung 6-5: Das Definitionssheet

6.2.4 Die Kerbfalltafeln

Die restlichen Tabellenblätter in Excel stellen nun die Kerbfalltafeln für jedes einzelne simulierte Schweißnahtmodell dar. Dabei stehen ganz links die jeweiligen Knoten in der Kerbe. Diese Knoten und deren Anzahl können sich von Modell zu Modell unterscheiden, weil größere Modell auch mehr Knoten in den Kerben haben und durch das automatisierte Vernetzen nicht immer die gleichen Knotennummern vergeben werden. Nebenstehend stehen die jeweiligen Kerbregionen. Die eigentlichen Spannungen, die aus den Einheitslasten an jedem Schnittufer folgen, bilden dann die Matrix, die mit den Belastungen aus dem Schalenmodell Multipliziert werden. Das Ergebnis dieser Multiplikation ist dann eine Liste mit Knotenspannungen. Diese Knotenspannungen stellen dann die Grundlage für die Bewertung nach IIW dar, die in 2.4 erläutert wurde. Der Prinzipielle Aufbau der Excel Kerbfalltafeln ist in Abbildung 6-6 aufgezeigt.

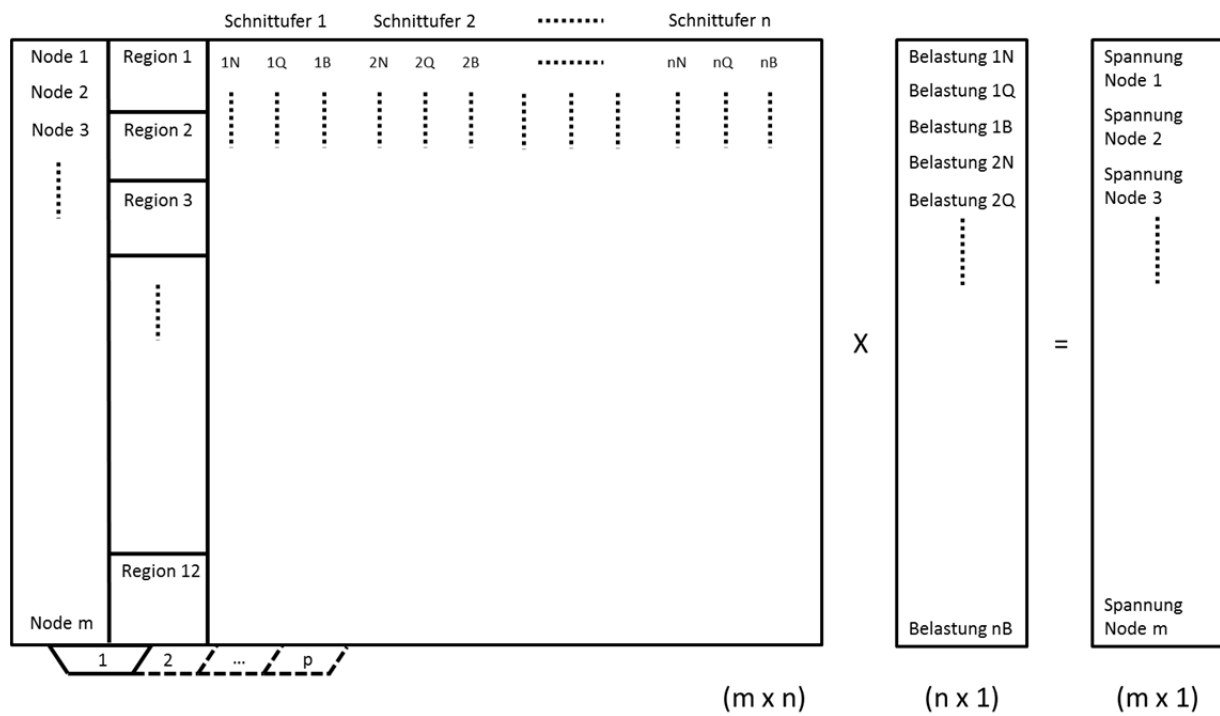


Abbildung 6-6: Kerbfallmatrix

7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird die erstellte Diplomarbeit inhaltlich kurz zusammengefasst.

Zu Beginn war eine Literaturrecherche notwendig, um einerseits die zuvor gewonnen Erkenntnisse zu erfassen und andererseits den derzeitigen Stand der Methodik sowie die weitere Vorgehensweise zu bestimmen. Im Gespräch mit dem Projektpartner wurden die einzelnen Problemstellungen bis zur automatisierten Auswertung nach IIW erläutert.

Im Rahmen dieser Literaturrecherche sind vergleichbare Ansätze in wissenschaftlichen Publikationen untersucht worden, vor allem im Hinblick auf die auszuwertenden Spannungen im Kerbgrund.

Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen wurde klar, dass die zu erzeugenden Schweißnahtmodelle nicht den real bei Siemens verwendeten Schweißnahtgeometrien entsprechen können, da dazu nicht ausreichend Daten zur Verfügung standen. Es wurden also Geometrien nach Norm erzeugt. Um eine Weiterverarbeitung zu ermöglichen, musste eine eindeutige Erkennbarkeit der Kerbstellen im Lösungsfile ermöglicht werden. Dies wurde durch die CROD Elemente gelöst.

Im Rahmen der Automatisierung durch die Journals wurde eine Reihe von Problemstellungen vor allem in Bezug auf die Netzqualität und den Automeshing untersucht, um ausreichend stabil laufende Simulationen zu erhalten. Die Automatisierung stellt den Kerninhalt der Diplomarbeit dar.

Bevor nun der eigentliche Kerbfallkatalog erstellt wurde, mussten noch Konventionen betreffend der verwendeten Koordinatensysteme, der Schnittufer, sowie der aufgebrachten Lasten gefunden werden. Nach Abschluss dieser Arbeiten wurden die FE Daten für den Kerbfallkatalog erzeugt.

Abschließend wurden aus den FE Daten die eigentlichen Kerbfalltafeln in Form von Excel, MatLab und XML Dateien gewonnen. Die Erzeugung dieser Dateien aus den FE Daten für eine Weiterverarbeitung bildet den Schluss der Diplomarbeit.

8 Ausblick

Derzeit wird im Auftrag des Projektpartners der Siemens AG Österreich Mobility Division die Auswertung nach der Kerbspannungsmethode nach IIW programmiert. Nach der vollständigen Implementierung der Bewertungsmethode und des Kerbfallkataloges ist erstmals eine Erprobung des Verfahrens möglich. In Zusammenhang mit bisherigen Berechnungen und vor allem Versuchen am Institut können Erkenntnisse über das neue Verfahren gewonnen werden. Unter anderem kann überprüft werden, ob die aus Einstufenversuchen gewonnene Wöhlerlinie der FAT 225 Klasse sinnvolle Berechnungsergebnisse liefert. Mit den zweidimensionalen Detailmodellen ist jetzt erstmalig die vollständige Bewertung vom Strukturmodell bis zum Auslastungsgrad nach IIW möglich. Die Bewertung unterliegt allerdings der Einschränkung, dass lediglich die Auswertung quer zur Schweißnaht nach der Kerbspannungsmethode erfolgt. Die Auswertung längs der Schweißnaht erfolgt nach dem Nennspannungskonzept. Dies bringt eine Reihe von Nachteilen mit sich, unter anderem ein aufwändigerer Bewertungsalgorithmus und keine Möglichkeit Schweißnahtenden sinnvoll zu bewerten. Es wird also in Zukunft das bereits begonnene Konzept der dreidimensionalen Schweißnahtdetailmodelle weiter verfolgt. Die Vorteile von dreidimensionalen Modellen sind unter anderem:

- Bewertung nach Kerbspannungskonzept in Quer und Längsrichtung
- Bewertung von Schweißnahtenden
- Einfacherer Bewertungsalgorithmus

Diesen Vorteilen stehen noch eine Reihe von Problemen gegenüber, wie lange Rechenzeiten und aufwändige Modellierung, um nur einige hier anzuführen. Aufbauend auf den Erkenntnissen mit der Bewertung zweidimensionaler Modelle wird langfristig die Bewertung mit dreidimensionalen Modellen die vorteilhafteste Bewertungsmethode darstellen. Die damit verbundenen Problemstellungen werden in Zukunft sicher gelöst werden.

9 Anhang

Im Anhang sind die einzelnen Infosheets der Kerbfalltafeln mit den zugehörigen Kerbregionen dargestellt. Die vollständigen Kerbfalltafeln mit den Parameterlisten der erzeugten Modelle und den Knotenspannungen zufolge der Einheitslasten befinden sich auf der beiliegenden DVD.

9.1 B_VC

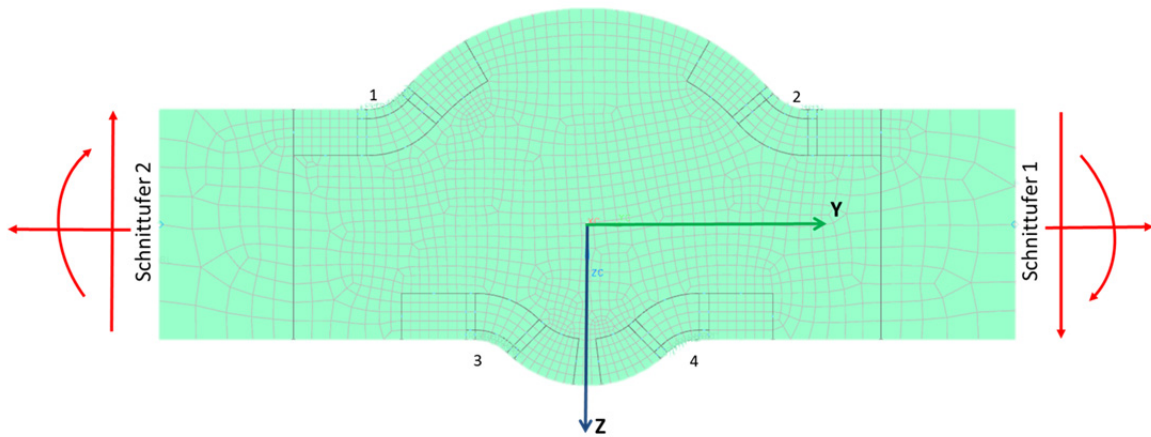


Abbildung 9-1: B_VC Infosheet

9.2 B_VM

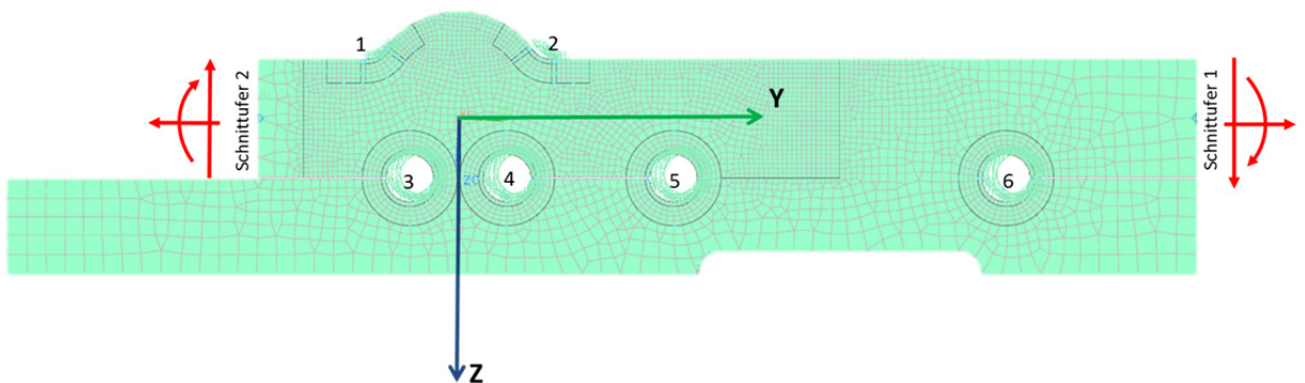


Abbildung 9-2: B_VM Infosheet

9.3 B_VT

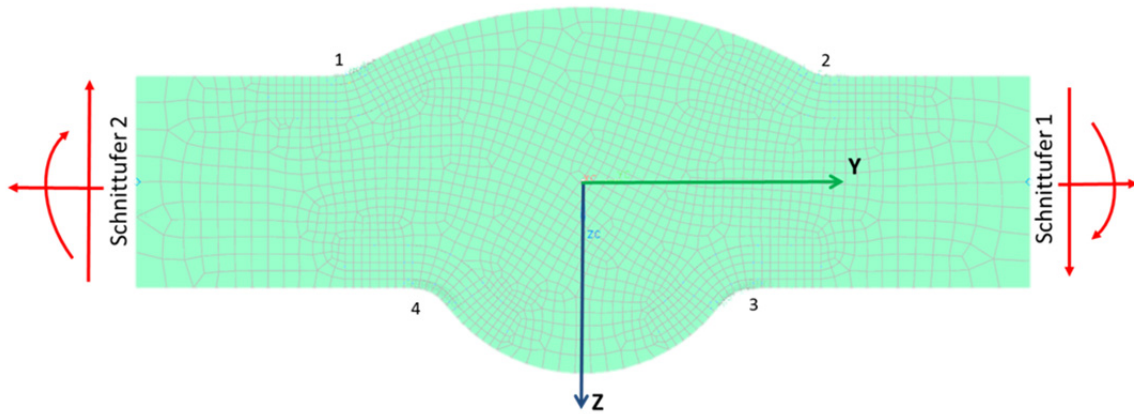


Abbildung 9-3: B_VT Infosheet

9.4 T_FD

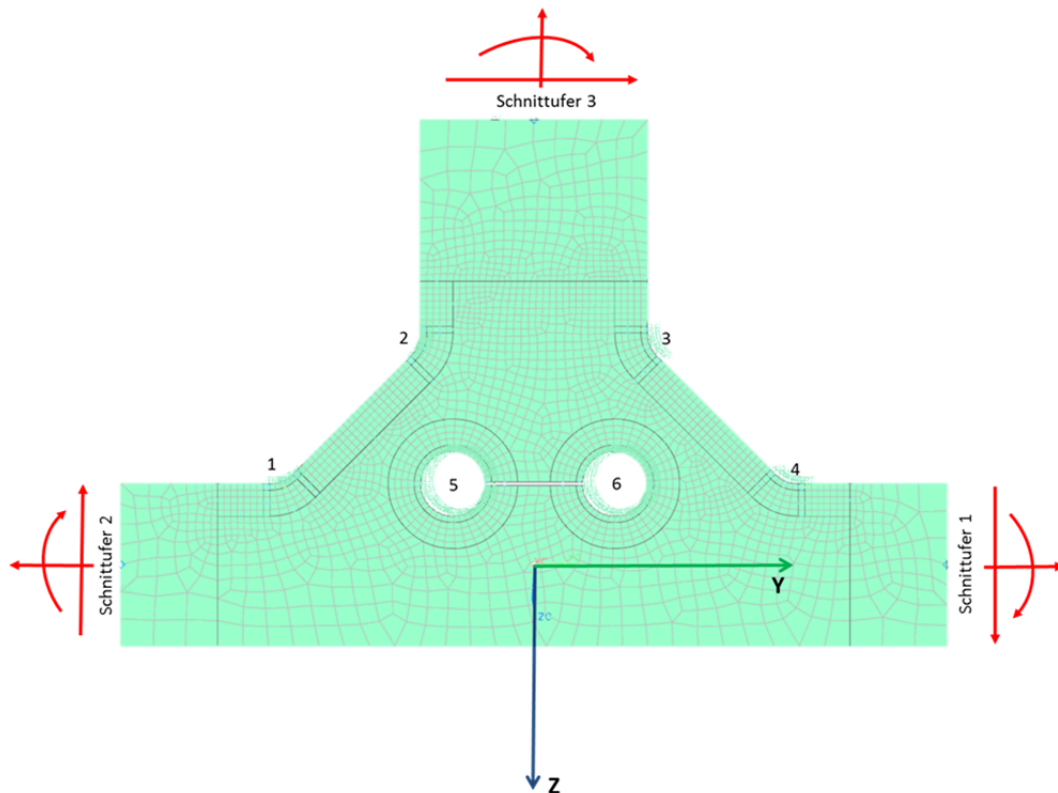


Abbildung 9-4: T_FD Infosheet

9.5 T_YS

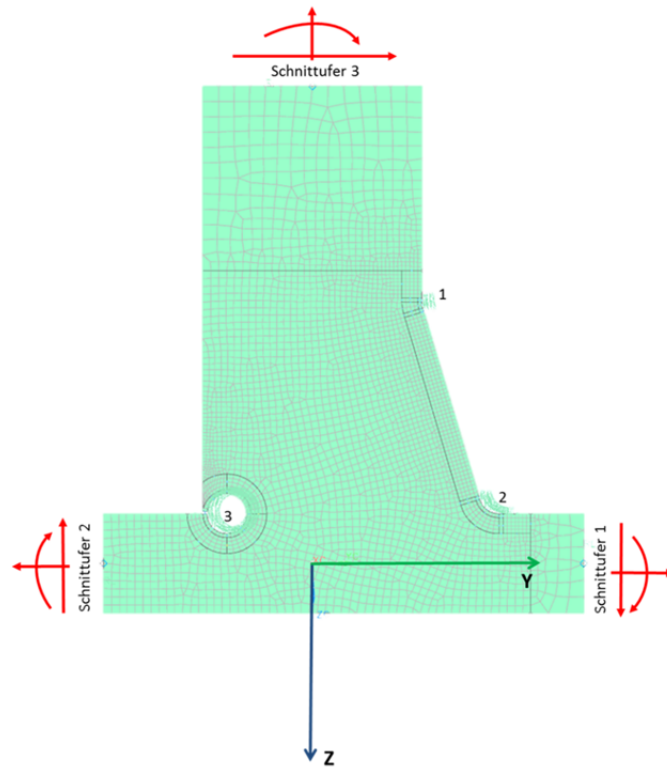


Abbildung 9-5: T_YS Infosheet

9.6 T_YB

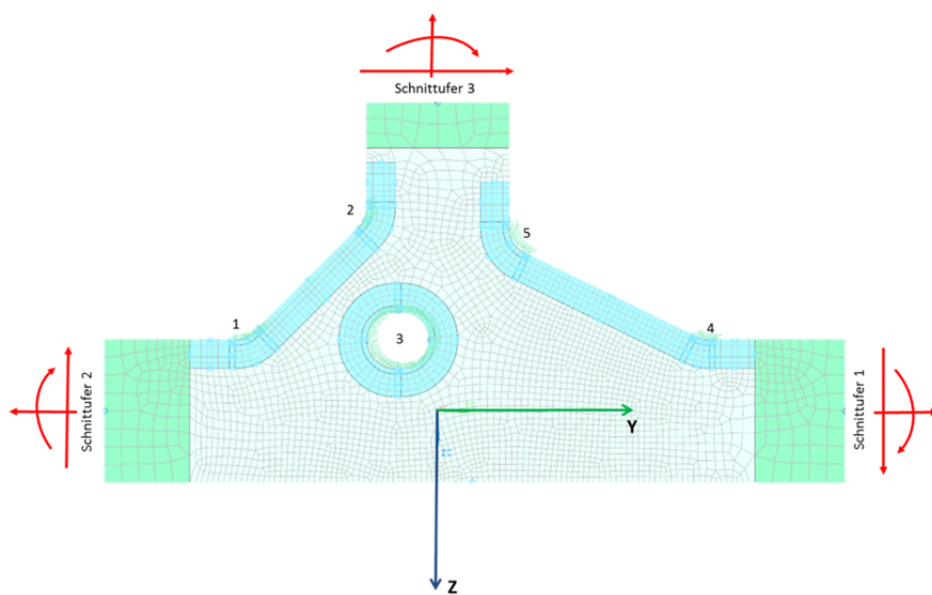


Abbildung 9-6: T_YB Infosheet

9.7 T_YD

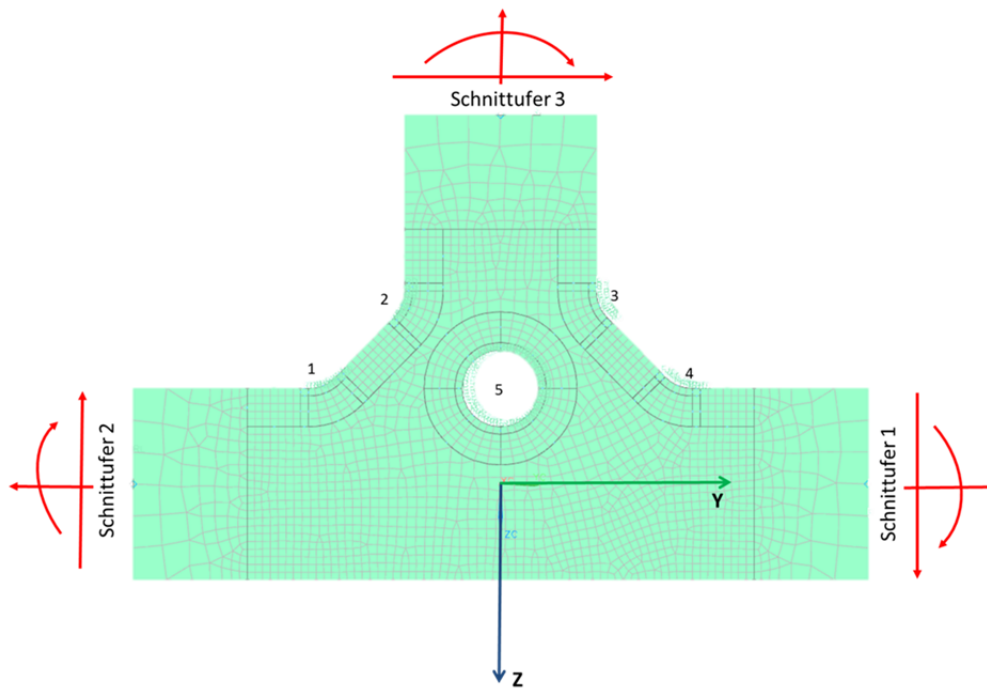


Abbildung 9-7: T_YD Infosheet

9.8 T_VS

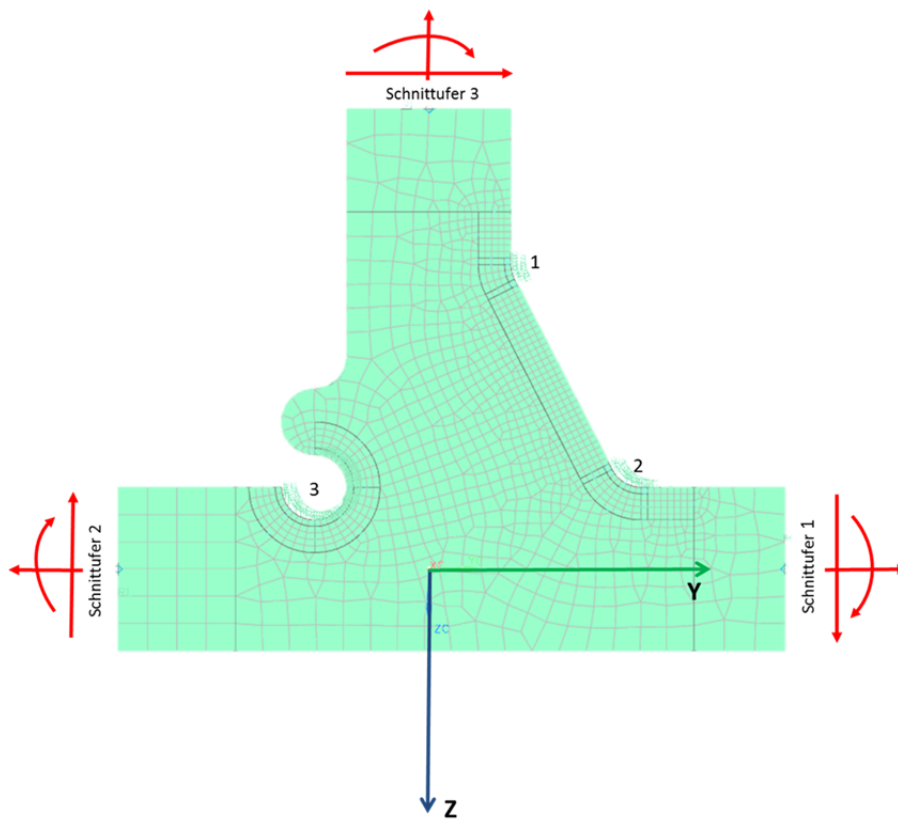


Abbildung 9-8: T_VS Infosheet

9.9 X_FD_FD

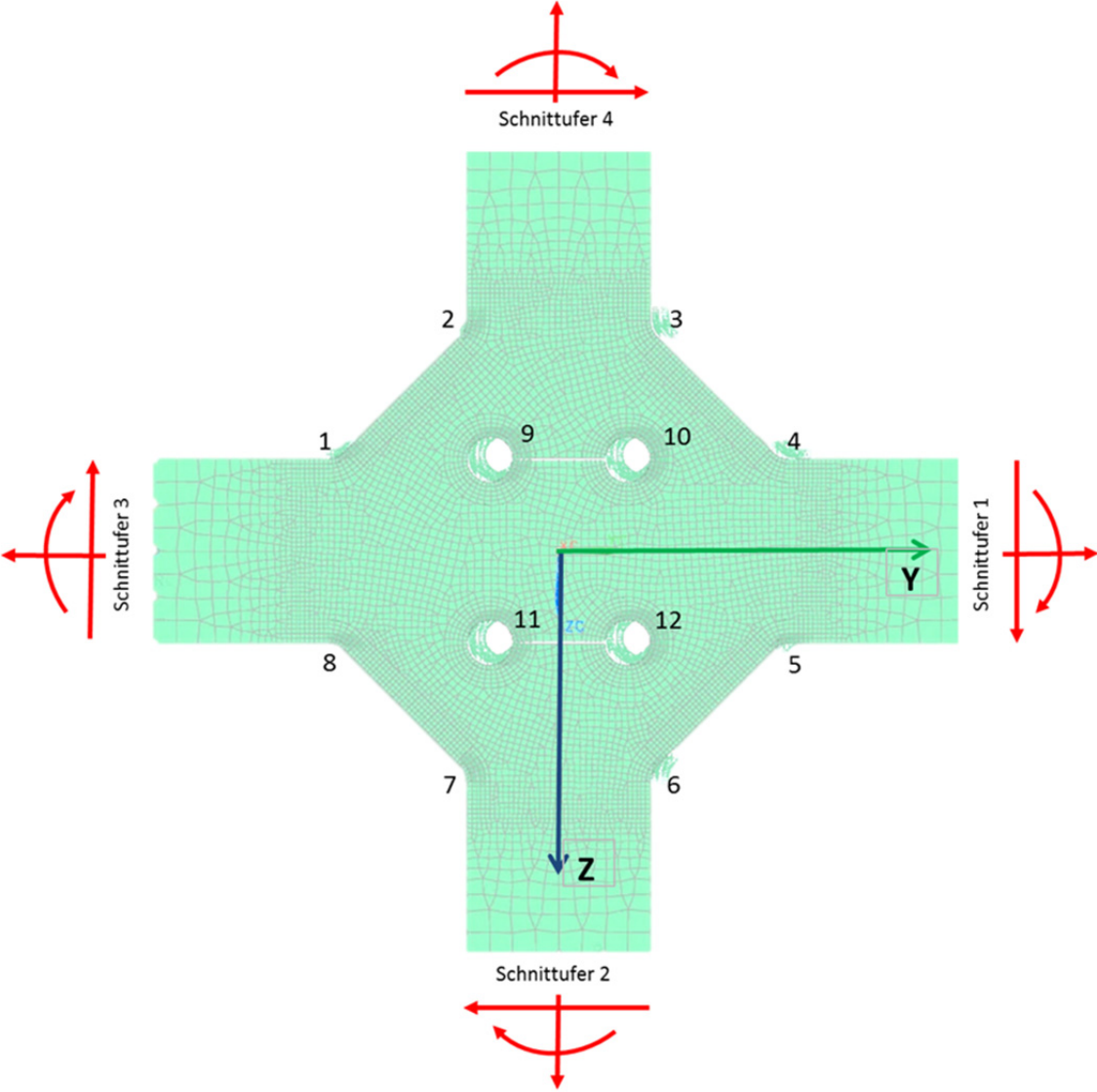


Abbildung 9-9: X_FD_FD Infosheet

9.10 X_FD_YS

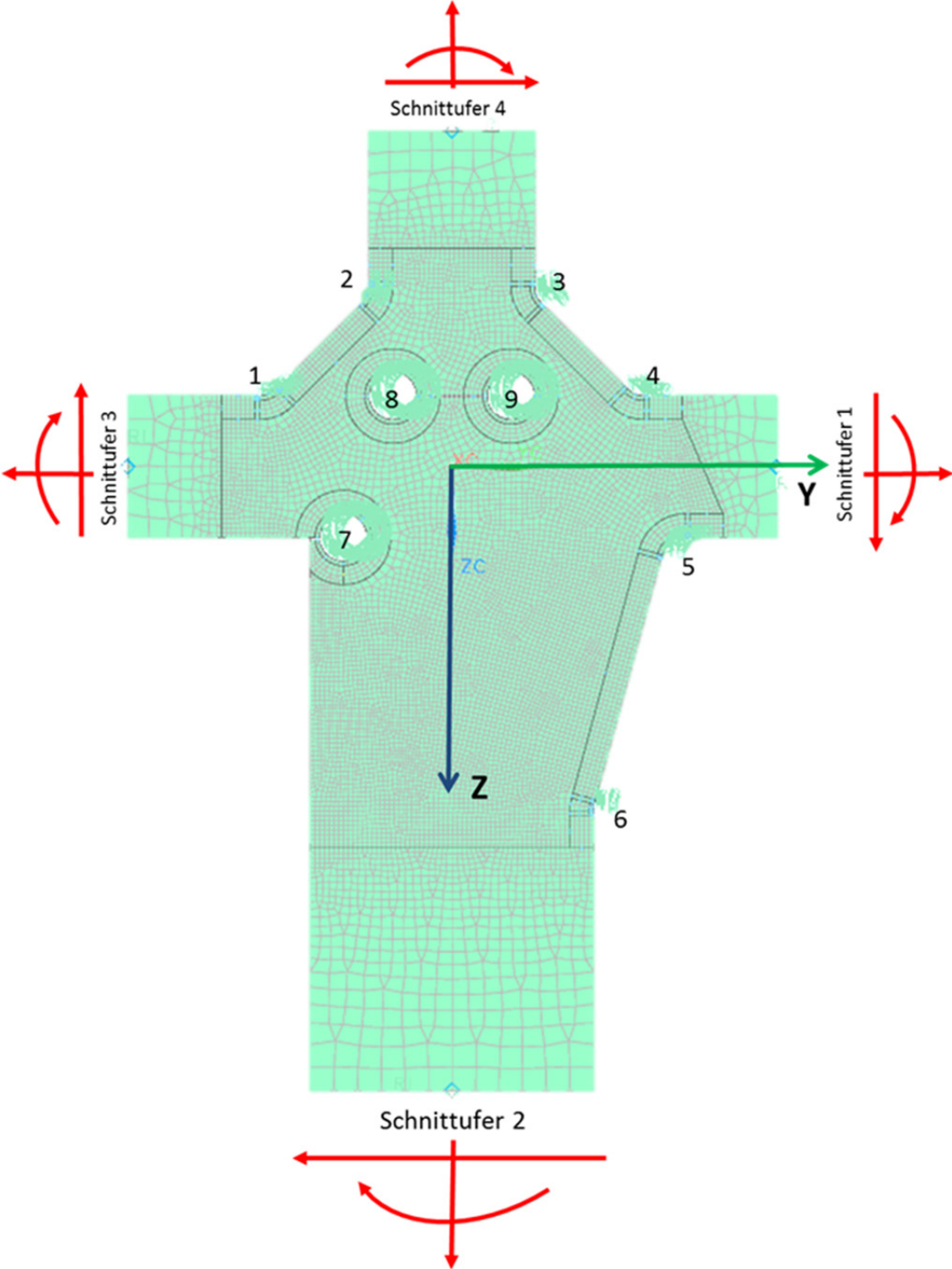


Abbildung 9-10: X_FD_YS Infosheet

9.11 X_FD_YB

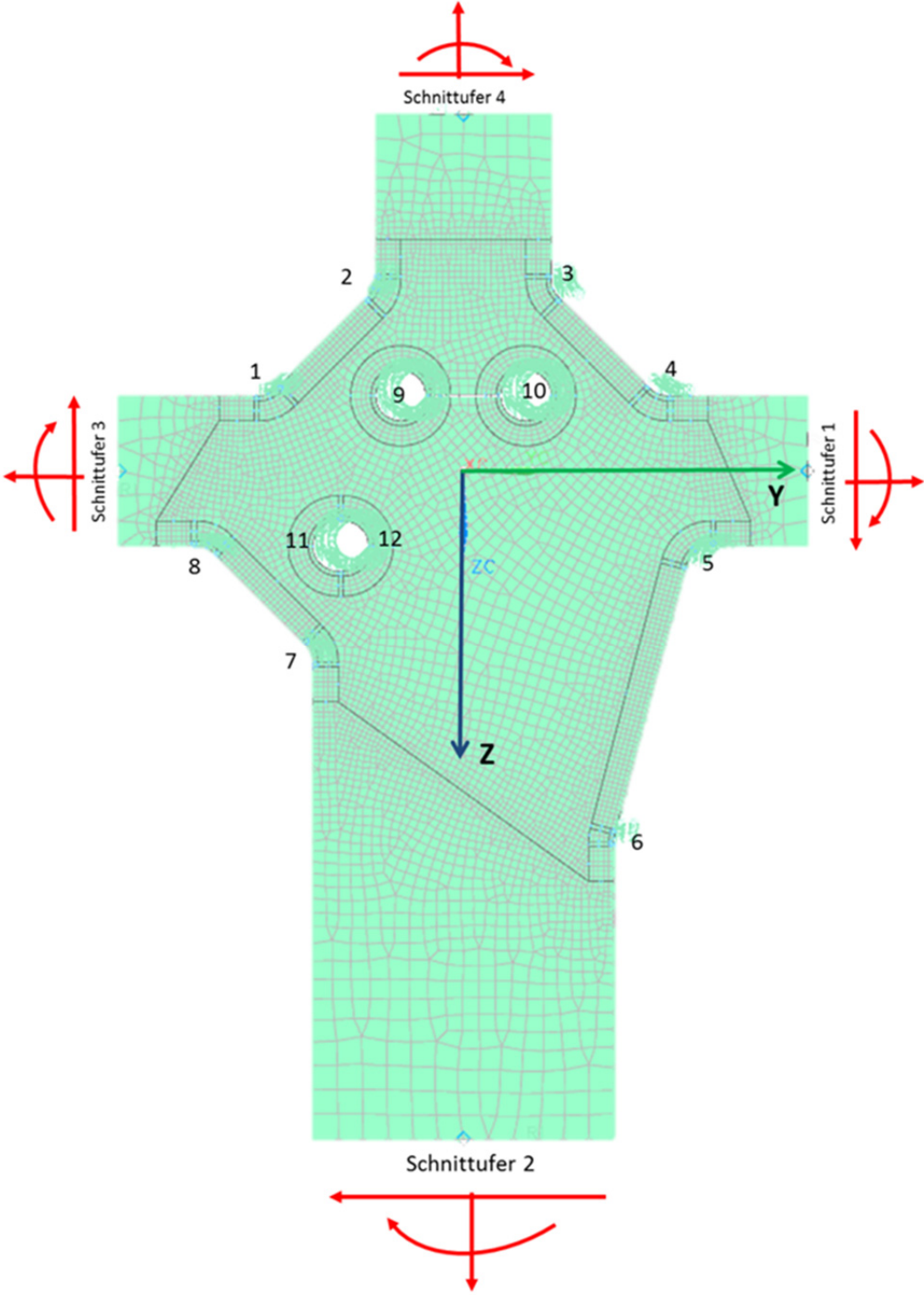


Abbildung 9-11: X_FD_YB Infosheet

9.12 X_YS_YS

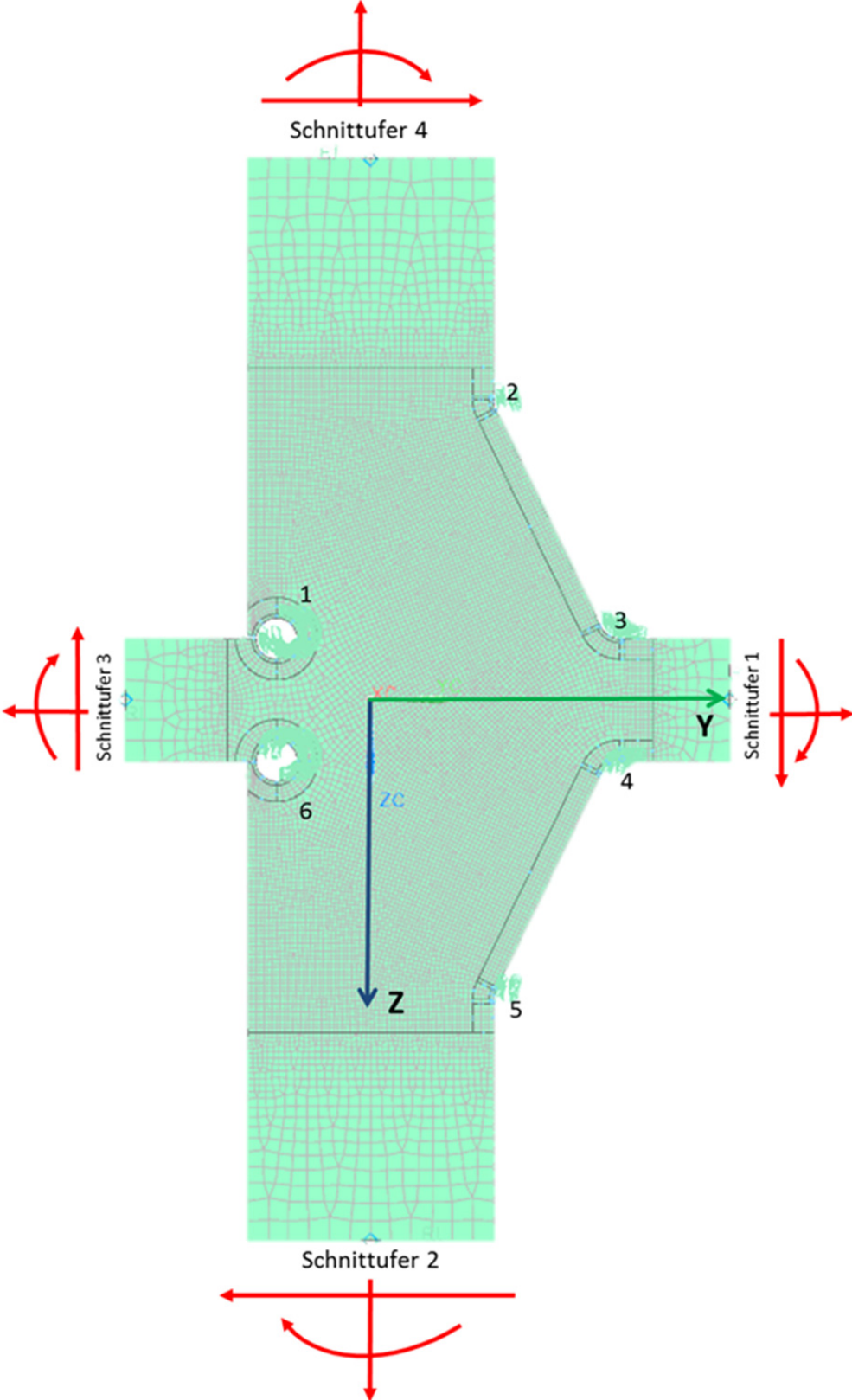


Abbildung 9-12: X_YS_YS Infosheet

9.13 X_YB_YB

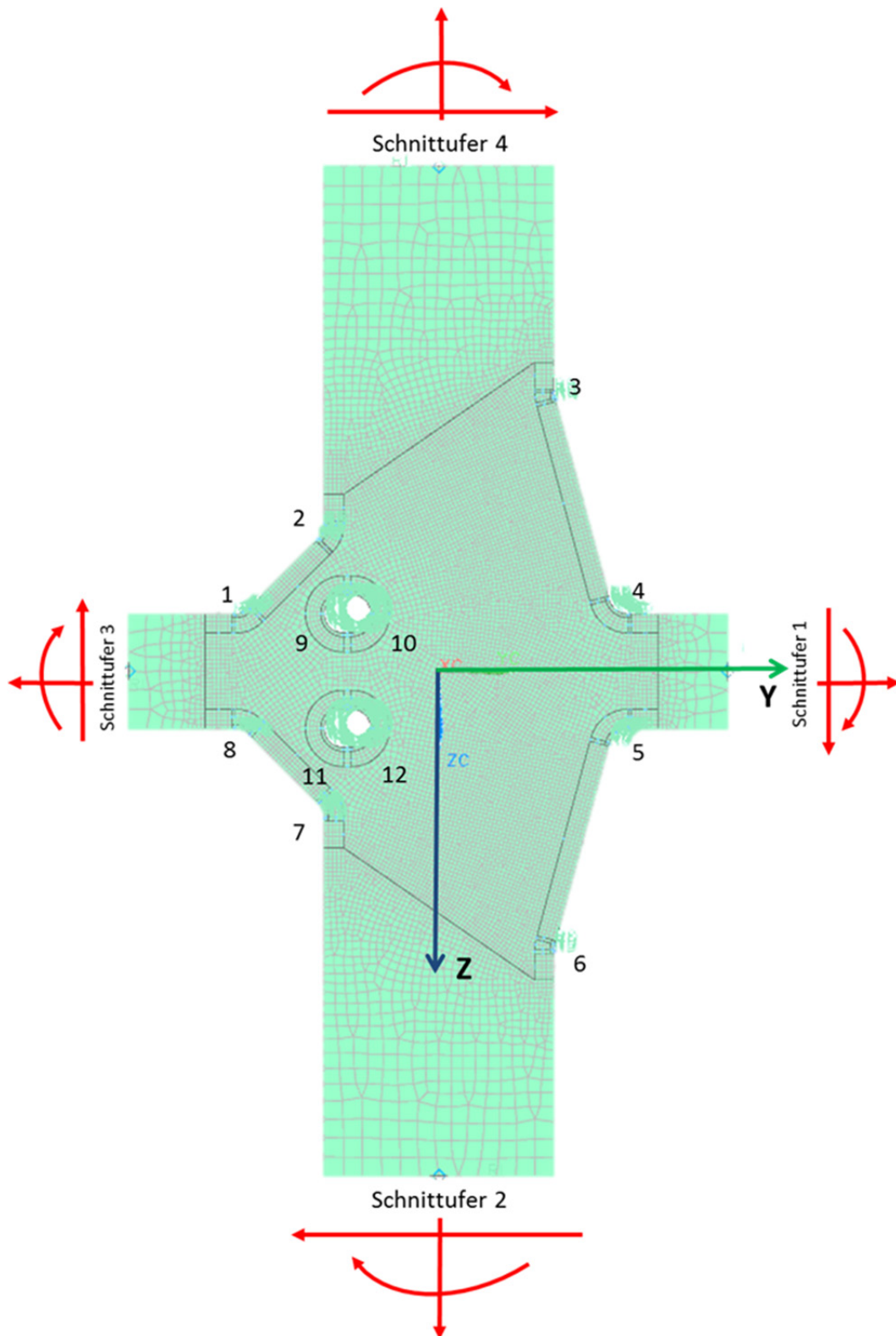


Abbildung 9-13: X_YB_YB Infosheet

9.14 X_YD_YD

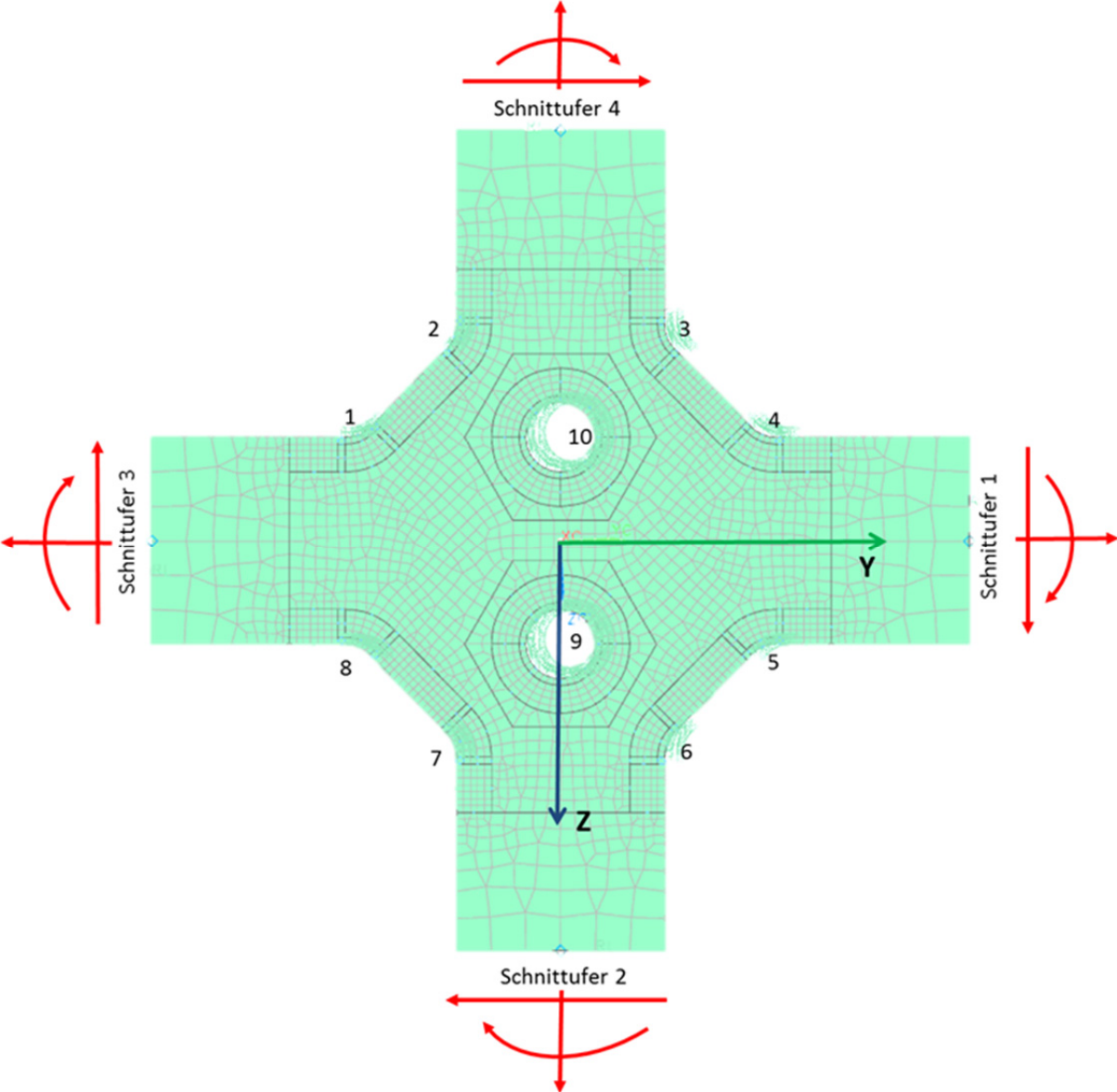


Abbildung 9-14: X_YD_YD Infosheet

9.15 X_YS_YB

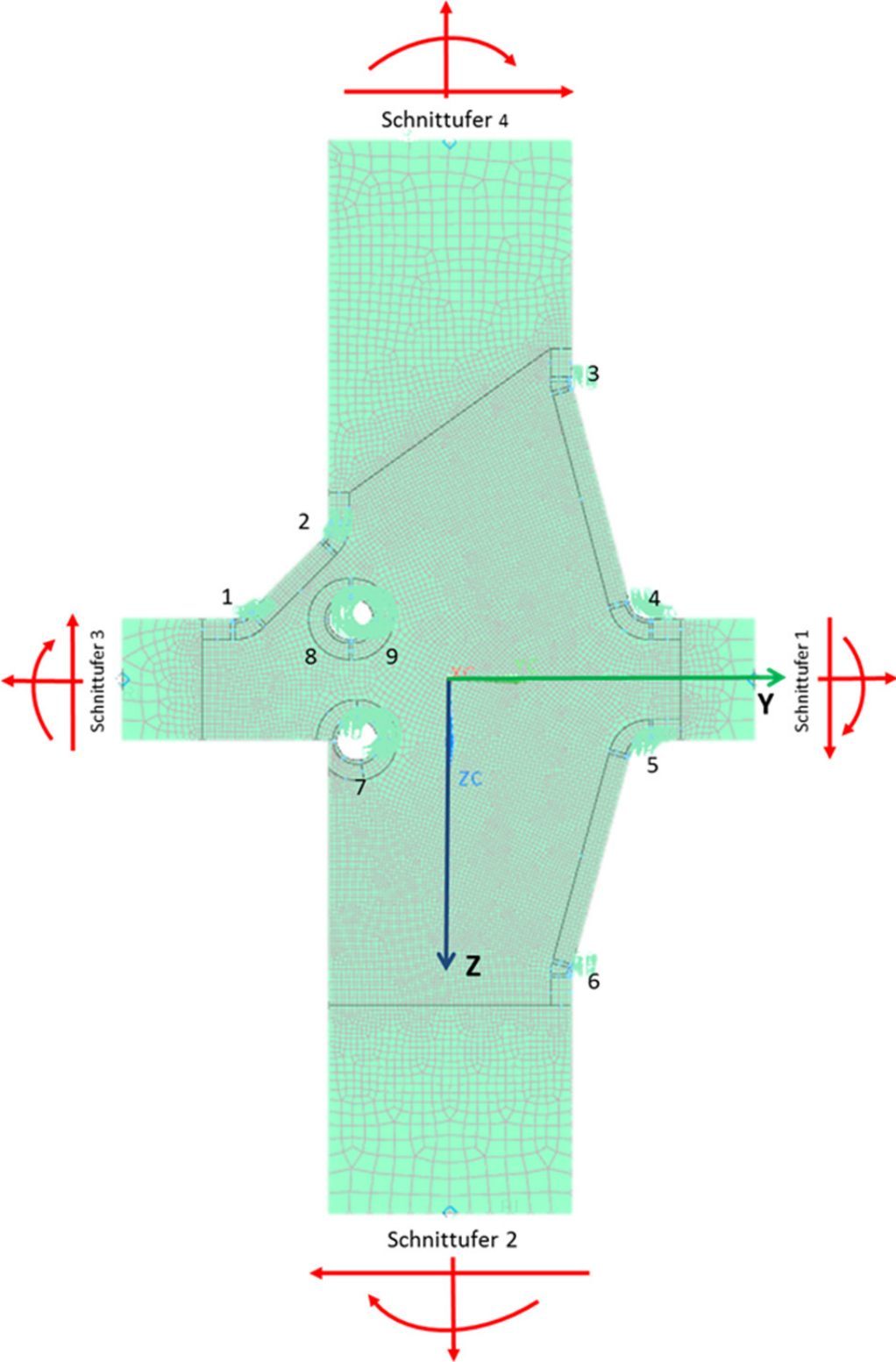


Abbildung 9-15: X_YS_YB Infosheet

10 Literaturverzeichnis

1. **Oßberger, Uwe.** *Diplomarbeit: Analyse und Bewertung von Berechnungsvorschriften zum Ermüdungsverhalten von Schweißverbindungen.* Graz : s.n., 2010.
2. **Hobbacher, A.** *Recommendations for fatigue design of welded joints and components.* Paris, France : s.n., 2007.
3. **Radaj D., Vormwald M.** *Ermüdungsfestigkeit.* Darmstadt : s.n., 2007.
4. **Pedersen M., et al.** *Re-analysis of fatigue data for welded joints using the notch stress approach.* Denmark, Norway : s.n., 2010.
5. **Celigoj C., Schmidt M.** *Vorlesungsskriptum: Methode der Finiten Elemente.* TU Graz : s.n., 1998.
6. **NX Nastran, Help.**
7. **O.C. Zienkiewicz, R.C. Taylor.** *The Finite Element Method Fifth edition Volume 1: The Basis.* 2000.
8. **Bathe, K.** *Finite-Elemente-Methoden.* Berlin, New York, Tokyo : s.n., 1986.
9. **Demal, Robert.** *Erweiterung eines Kerbfallkataloges zur Anwendung des Kerbspannungskonzeptes für die Berechnung von Schweißnahtverbindungen.* Graz : s.n., 2011.
10. **Wolmersdorfer, Franz.** *Diplomarbeit: Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzeptes.* Graz : s.n., 2009.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: IIW Bewertung mit Detailmodellen	2
Abbildung 2-1: Spannungsanteile bei nichtlinearem Spannungsverlauf (2).....	5
Abbildung 2-2: Nennspannung in einem Biegeträger (2)	7
Abbildung 2-3: Strukturspannung am konstruktiven Detail (2)	8
Abbildung 2-4: Definition der Strukturspannung (2)	9
Abbildung 2-5: Bestimmen der effektiven Kerbradien (2)	10
Abbildung 2-6: Ersatzstrukturlänge unterschiedlicher Werkstoffe als Funktion der Fließgrenze (3)	11
Abbildung 2-7: Reale und fiktive Kerbspannung an scharfer Kerbe ohne und mit fiktiver Kerbrundung (3)	13
Abbildung 2-8: Mohrscher Spannungskreis.....	15
Abbildung 2-9: Wöhlerlinie mit FAT Klasse	17
Abbildung 2-10: Wöhlerkurve mit Schadensäquivalenter Spannung.....	17
Abbildung 2-11: Wöhlerkurve mit ertragbarem Spannungsausschlag	18
Abbildung 2-12: Unsicherheitsfaktoren bei der Bauteilauslegung.....	19
Abbildung 2-13: Viereckiges Element zweiter Ordnung der Serendipity-Klasse vgl. (7)	27
Abbildung 2-14: Schalenelement (8)	29
Abbildung 2-15: Kerbdetail	33
Abbildung 2-16: 2D- Schweißnahtmodell	34
Abbildung 3-1: Koordinatensystem am Stumpfstoß.....	36
Abbildung 3-2: Koordinatensystem am T - Stoß	37
Abbildung 3-3: Schnittuferdefinition	37
Abbildung 3-4: B_VC Parameterskizze	38
Abbildung 3-5: Expression Editor	38
Abbildung 3-6: Vernetztes Kerbdetail	39
Abbildung 3-7: Vernetzte Wurzelkerbe	40
Abbildung 3-8: Stark verzerrtes Dreieckselement.....	41
Abbildung 3-9: Vorgegebenes Free Mesh um Wurzelkerbe.....	41
Abbildung 3-10: Bereiche unterschiedlicher Elementgröße.....	42

Abbildung 3-11: Rigid Link	42
Abbildung 3-12: Rigid Link mit gesperrten Freiheitsgraden	43
Abbildung 3-13: CROD Elemente an Kerbregionen.....	44
Abbildung 3-14: PROD Element Einstellung.....	44
Abbildung 3-15: Subcase für Lastfälle	45
Abbildung 3-16: Kräfte und Momente am Schweißstoß.....	46
Abbildung 3-17: Elemente für Ausgabe der Spannungsergebnisse	46
Abbildung 3-18: Details der Solverausgabeeinstellung.....	47
Abbildung 3-19: Einstellung Inertia Relief.....	47
Abbildung 4-1: Schweißverbindungen und Schweißnahtarten (10)	48
Abbildung 4-2: B_VC Radaj- Modell.....	49
Abbildung 4-3: B_VM Radaj- Modell.....	50
Abbildung 4-4: B_VT Radaj- Modell.....	51
Abbildung 4-5: T_FD Radaj- Modell tstep > 6mm.....	52
Abbildung 4-6: T_FD Radaj- Modell tstep < 6mm.....	52
Abbildung 4-7: T_YS Radaj- Modell tstep > 10mm.....	53
Abbildung 4-8: T_YS Radaj- Modell tstep < 11mm.....	54
Abbildung 4-9: T_YB Radaj- Modell.....	55
Abbildung 4-10: T_YD Radaj- Modell	56
Abbildung 4-11: T_VS Radaj- Modell	57
Abbildung 4-12: Unterschiedliche Modelle aufgrund der Stegdicken	58
Abbildung 4-13: X_FD_FD Radaj- Modelle.....	59
Abbildung 4-14: X_FD_YS Radaj- Modelle.....	60
Abbildung 4-15: X_FD_YB Radaj- Modelle	61
Abbildung 4-16: X_YS_YS Radaj- Modelle.....	62
Abbildung 4-17: X_YB_YB Radaj- Modelle.....	63
Abbildung 4-18: X_YD_YD Radaj- Modell.....	64
Abbildung 4-19: X_YS_YB Radaj- Modelle	65
Abbildung 5-1: Ordnerstruktur	66

Abbildung 5-2: Bezeichnung der NX Dateien	67
Abbildung 5-3: Journal Toolbox.....	69
Abbildung 5-4: B_VC Wandstärke 5 bis 25mm.....	69
Abbildung 5-5: Struktogramm B_VC Journal	70
Abbildung 5-6: Struktogramm X_FD_FD Journal	79
Abbildung 5-7: Radaj Modelle für X_FD_FD Stoß.....	80
Abbildung 6-1: Eingabeparameter für das MatLab Programm anhand eines Kreuzstoßes.....	84
Abbildung 6-2: NOTCHSECTION for NOTCHREGION	85
Abbildung 6-3: Eingabeparameter für das MatLab Programm anhand eines T'- Stoßes.....	85
Abbildung 6-4: X_FD_FD Infosheet.....	86
Abbildung 6-5: Das Definitionssheet.....	87
Abbildung 6-6: Kerbfallmatrix	88
Abbildung 9-1: B_VC Infosheet.....	91
Abbildung 9-2: B_VM Infosheet	91
Abbildung 9-3: B_VT Infosheet.....	92
Abbildung 9-4: T_FD Infosheet.....	92
Abbildung 9-5: T_YS Infosheet.....	93
Abbildung 9-6: T_YB Infosheet	93
Abbildung 9-7: T_YD Infosheet	94
Abbildung 9-8: T_VS Infosheet.....	94
Abbildung 9-9: X_FD_FD Infosheet.....	95
Abbildung 9-10: X_FD_YS Infosheet.....	96
Abbildung 9-11: X_FD_YB Infosheet	97
Abbildung 9-12: X_YS_YS Infosheet.....	98
Abbildung 9-13: X_YB_YB Infosheet	99
Abbildung 9-14: X_YD_YD Infosheet.....	100
Abbildung 9-15: X_YS_YB Infosheet.....	101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Ermüdungsbeanspruchung-, widerstand und Bewertung (2).....	4
Tabelle 2-2: Spannungserhöhende Einflüsse und Kerbwirkungen (2)	5
Tabelle 2-3: Faktor s der Mikrostützwirkung an Kerben für unterschiedliche Mehrachsigsigkeitsgrade und Festigkeitshypothesen (3).....	12
Tabelle 2-4: Ermüdungswiderstand gegen effektive Kerbspannung bei Stahl (2).....	16
Tabelle 2-5: Beispiele für Teilsicherheitsfaktoren γ_M für den Ermüdungswiderstand (2)	19
Tabelle 4-1: Auszug aus B_VC Parametertabelle.....	49
Tabelle 4-2: Auszug aus B_VM Parametertabelle.....	50
Tabelle 4-3: Auszug aus B_VT Parametertabelle.....	51
Tabelle 4-4: Auszug aus T_FD Parametertabelle.....	53
Tabelle 4-5: Auszug aus T_YS Parametertabelle.....	54
Tabelle 4-6: Auszug aus T_YB Parametertabelle	55
Tabelle 4-7: Auszug aus T_YD Parametertabelle	56
Tabelle 4-8: Auszug aus T_VS Parametertabelle.....	57
Tabelle 4-9: Auszug aus X_FD_FD Parametertabelle	59
Tabelle 4-10: Auszug aus X_FD_YS Parametertabelle.....	60
Tabelle 4-11: Auszug aus X_FD_YB Parametertabelle	61
Tabelle 4-12: Auszug aus X_YD_YD Parametertabelle.....	62
Tabelle 4-13: Auszug aus X_YB_YB Parametertabelle	63
Tabelle 4-14: Auszug aus X_YD_YD Parametertabelle.....	64
Tabelle 4-15: Auszug aus X_YS_YB Parametertabelle	65
Tabelle 5-1: B_VC Parametertabelle	70
Tabelle 6-1: Auszug aus X_FD_FD Parametertabelle.....	87