



SIEMENS



3D-Kerbfalkatolog für die Schweißnahtberechnung nach IIW

Mario Bican

Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Studienrichtung Energie- und Umwelttechnik

Institut für Leichtbau

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

Graz, im September 2013

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

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

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

.....
(Mario Bican)

Kurzfassung

Aufbauend auf der Diplomarbeit „Kerbfalkatalog für die Schweißnahtberechnung nach IIW“ von DI Matthias Wozasek, in der das Kerbspannungskonzept gemäß den Erläuterungen nach Radaj erstmals automatisiert zur zweidimensionalen Generierung von Kerbfalkatalogen genutzt wurde, werden im Rahmen dieser Arbeit die darin beschriebenen Methoden auf dreidimensionale Modelle erweitert. Diese 3D-Modelle werden einer FE-Simulation unterzogen, sodass eine Betriebsfestigkeitsbewertung nach den Vorgaben der IIW-Richtlinie möglich wird. Hierzu ist es notwendig die einzelnen Schweißstoßmodelle von Grund auf neu aufzubauen und die Automatismen an die räumliche Problemstellung anzupassen und gegebenenfalls zu erweitern. Die diesbezügliche Vorgehensweise wird genau erläutert und im Anschluss ein Vergleich zu den bereits bestehenden 2D-Modelle durchgeführt.

Abstract

Based on DI Matthias Wozasek's diploma thesis, titled „Kerbfalkatalog für die Schweißnahtberechnung nach IIW“, dealing with the creation of a standard for fatigue calculations of welded joints, the aim of this paper is to expand the already described two-dimensional methods to three-dimensional models. Therefore, it is necessary to rebuild the specific welding joints and to adapt the automatism to the three-dimensional problem or to expand them. This specific procedure is described detailed in course of this paper. Finally, there will be a comparison between existing two-dimensional models and three-dimensional models.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1.	Kerbspannungskonzept am Institut für Leichtbau	1
1.2.	Vorgehensweise bei der Ermittlung von Kerbspannungen	3
1.1.	Aufgabenstellung dieser Arbeit	4
2.	Theoretische Grundlagen	5
2.1.	Definition der Spannungsanteile nach IIW	5
2.2.	Nennspannungskonzept	6
2.3.	Strukturspannungskonzept	7
2.4.	Kerbspannungskonzept	8
2.4.1.	Kerbspannung nach Radaj/Neuber	8
2.4.2.	Kerbspannung nach Seeger	10
2.5.	Bestimmung der Hauptnormalspannungen	11
2.6.	Finite Elemente Methode	13
2.6.1.	Verwendete Elemente	13
2.7.	Inertia Relief	15
3.	Modellierte Schweißnahtmodelle	17
3.1.	Stumpfstöße	18
3.2.	T-Stöße	20
3.3.	Kreuzstöße	22
4.	Ablauf der automatischen Erstellung.....	25
5.	Modellerstellung.....	28
5.1.	Allgemeines zur Erstellung eines 3D-Modells	29
5.2.	Part-File.....	29
5.3.	Idealisiertes Part-File	32
5.4.	FEM-File	34
5.4.1.	Vorgabe des stirnseitigen CQUAD8-Netzes	35
5.4.2.	Definition der Mesh Control	36

5.4.3.	Erstellung und Gruppierung der CHEXA20 Elemente	37
5.4.4.	Anbringen der CROD-Elemente.....	38
5.4.5.	CQUAD8 Elemente auf Anschlusschalen	39
5.5.	Sim-File	39
6.	Unterstützende Tools.....	42
6.1.	NX-Journal	42
6.1.1.	Allgemein.....	42
6.1.2.	Aufbau des Journals	42
6.2.	Batch-File	53
6.2.1.	Allgemeines zum Batch-File	53
6.2.2.	Aufbau des Batch-Files im speziellen Fall.....	53
6.2.3.	Erweiterungsmöglichkeiten	54
7.	Auswertung der Spannungsergebnisse und Erstellung der Kerbfalltafeln	56
7.1.	Vorgehensweise	56
7.2.	Manuelle Eingabemaske.....	58
7.3.	Aufbau Matlab Skript	59
7.3.1.	Executing File	60
7.3.2.	Grid einlesen	64
7.3.3.	Loadcases einlesen	65
7.3.4.	CHEXA einlesen	66
7.3.5.	CROD einlesen.....	68
7.3.6.	Spannungen einlesen	68
7.3.7.	Zuordnung der Knoten.....	71
7.3.8.	Berechnung der Spannungsergebnisse	71
7.4.	Aufbau der Kerbfall-Excel Datei	73
8.	Vergleich 2D/3D Modelle	74
8.1.	RBE3-Spiderelemente	74
8.1.1.	Exkurs: Modellbildung mittels RBE3-Spiderelementen	74
8.1.2.	Vergleich 2D/3D-Spider	77
8.2.	Anschlusschalen	82

9. Zusammenfassung	84
10. Ausblick	85
11. Literaturverzeichnis.....	86
12. Abbildungsverzeichnis	88
13. Tabellenverzeichnis	90

1. Einleitung

Die vorliegende Diplomarbeit wurde in Kooperation mit der Railway Division der Siemens AG Österreich (Infrastructure & Cities Sector), im weiteren Verlauf kurz *Siemens* genannt, verfasst, welche am Standort Graz-Eggenberg auf die Konstruktion, Simulation und Fertigung von Eisenbahnfahrwerken spezialisiert ist.

Eine exakte Nachbildung aller Geometrien und Schweißnahtformen eines Drehgestellrahmens ist im Rahmen einer Betriebsfestigkeitssimulation beinahe unmöglich. Die genaue Abbildung der Schweißnahtgeometrie mitsamt allen Radien, Wurzelkerben, usw. würde den Rechenaufwand aufgrund der Vielzahl an verwendeten Elementen exorbitant vergrößern. Aus diesem Grund werden diese Detailgeometrien nicht in die globale Modellbildung mit einbezogen, sondern durch diverse Normen separat bewertet und anschließend durch Faktoren berücksichtigt.

Ursprünglich erfolgte die Bewertung der Schweißstöße in erster Linie nach der DIN 15018 („Kranbaunorm“) entsprechend dem Nennspannungskonzept. Als diese schließlich zurückgezogen wurde, sah sich *Siemens* gezwungen, eine neue Bewertungsmethode zu finden und diese in ihr bestehendes System zu integrieren. Weiters wurde mit der EN 13749 eine eigene Richtlinie eingeführt, die erstmals eine Betriebsfestigkeitsbewertung von Drehgestellrahmen genauer beschreibt. Sie beinhaltet einen dreistufigen Kreislauf, der aus einem theoretischen Nachweis, einem Nachweis am Prüfstand und schließlich einer Streckenmessung zur Kontrolle der Lastannahmen usw. besteht.

Aus diesem Grund wurde eine Kooperation mit dem Institut für Leichtbau der TU Graz eingegangen, an dem zahlreiche Diplomarbeiten zur Findung, Evaluierung und schließlich Ausführung eines den Anforderungen der EN 13749 entsprechenden Verfahrens zur Bewertung der Betriebsfestigkeit von Schweißnähten durchgeführt wurden.

1.1. Kerbspannungskonzept am Institut für Leichtbau

Insgesamt wurden bisher vier Diplomarbeiten zum Thema Kerbspannungskonzept am Institut für Leichtbau verfasst. Jede Arbeit baut auf den Kenntnissen auf, welche in den Vorgängerarbeiten ermittelt wurden.

1 Einleitung

Als erstes gestaltete DI Uwe Oßberger durch seine Diplomarbeit „Analyse und Bewertung von Berechnungsvorschriften zum Ermüdungsverhalten von Schweißverbindungen“ einen detaillierten Vergleich aller gängigen Berechnungsvorschriften von Schweißnähten. Er kam zu dem Schluss, dass die Empfehlungen bezüglich des Kerbspannungskonzeptes des International Institute of Welding, kurz IIW, am besten mit der Realität korrelieren und somit eine Bewertung der Schweißnähte anhand des IIW-Kerbspannungskonzeptes erfolgen sollte.

Als nächstes verfasste DI Franz Wolmersdorfer eine Arbeit zum Thema „Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzeptes“. Nach genauen Untersuchungen aller von *Siemens* eingesetzten Schweißstößen wurde die reale Nahtform unter Einbezug der Theorien von Radaj und den Vorgaben der DIN EN 15085-3 (Konstruktionsvorgaben für Schweißverbindungen) und der DIN EN ISO 5817:2003 (Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten) geometrisch abgebildet. In weiterer Folge wurden diese Geometrien zu zweidimensionalen FE-Modellen weiterentwickelt und verschiedenste Simulationsmethoden erprobt.

Auf Basis der 2D-Radaj-Modelle erarbeitete DI Robert Demal eine Arbeit mit dem Titel „Erweiterung eines Kerbfallkataloges zur Anwendung des Kerbspannungskonzeptes für die Berechnung von Schweißnahtverbindungen“. Unter anderem wurde ermittelt, welche Schnittgrößen des zweidimensionalen Strukturmodells sich am besten zur Weiterverarbeitung eines 3D-Kerbfallkataloges eignen, wie die Schnittkräfte auf ein dreidimensionales Volumensmodell aufgebracht werden sollten und wie die programmspezifische Funktion *Inertia Relief* bestmöglich eingesetzt werden kann.

Die bislang letzte Arbeit zum Thema Kerbspannungskonzepte „Kerbfallkatalog für die Schweißnahtberechnung nach IIW“ verfasste DI Matthias Wozasek. Ziel war die automatische Generierung aller von *Siemens* verwendeten Stoßarten nach den Vorgaben des IIW und die Zusammenfassung der Kerbspannungen zu einem Kerbfallkatalog.

1.2. Vorgehensweise bei der Ermittlung von Kerbspannungen

Abbildung 1.1 zeigt schematisch die Vorgehensweise bei der Betriebsfestigkeitsbewertung von Schweißnähten, wie sie gemeinsam mit *Siemens* erarbeitet wurde.

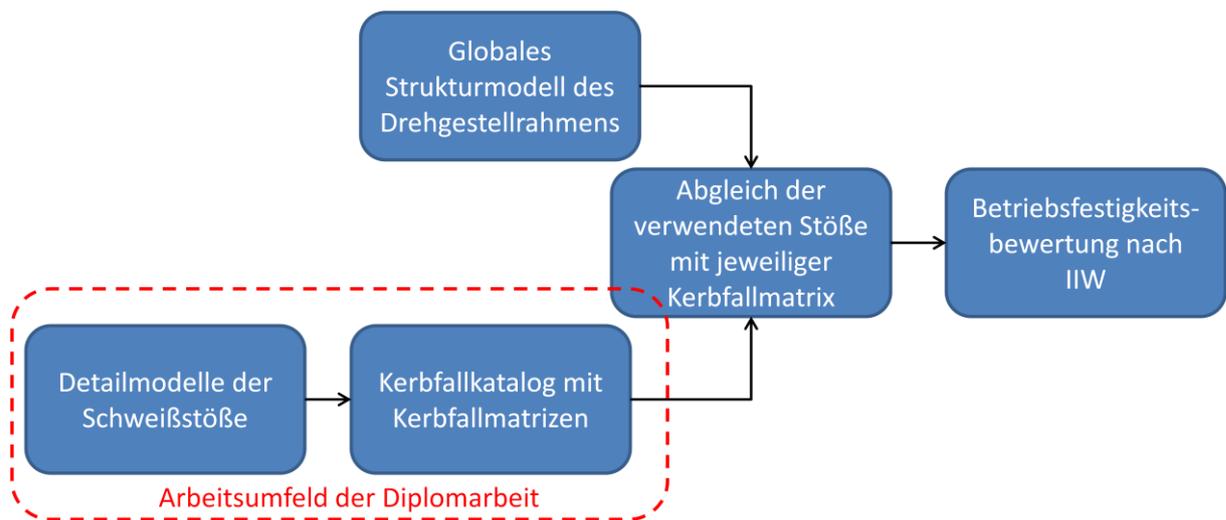


Abb. 1.1: Prinzipielle Vorgehensweise zur Betriebsfestigkeitsbewertung nach IIW

Ausgangspunkt der Betriebsfestigkeitsbewertung eines Drehgestellrahmens ist ein globales Strukturmodell, welches von *Siemens* erstellt wird. Dieses Strukturmodell wird nach der gänzlichen Vernetzung mit Schalenelementen, welche den Vernetzungs- und Berechnungsaufwand im Gegensatz zu detaillierten Volumsmodellen deutlich verringern, einer FE-Berechnung unterzogen. Demnach wird der festigkeitswirksame Einfluss von Schweißnähten in diesen Modellen nicht berücksichtigt. Deshalb wird für jeden Schweißstoßtyp ein eigenes Detailmodell entworfen, welches die Geometrie der Schweißnaht nachbilden soll. Sind nun die Belastungen an einer bestimmten Stelle aus dem Strukturmodell bekannt, können diese auf das Detailmodell übertragen werden. Somit kann festgestellt werden, ob die Schweißnaht den Beanspruchungen stand hält bzw. wie hoch ihr Auslastungsgrad ist.

Daraus ergibt sich, dass alle bei *Siemens* verwendeten Schweißstöße entsprechend den verwendeten Blechstärken modelliert, berechnet und die Ergebnisse zu einem Kerbfallkatalog zusammengefasst werden. Ist ein kompletter Kerbfallkatalog aufgebaut, können die bestimmten Kerbfaktoren einfach einem Strukturmodell zugeordnet werden, ohne dass ein neuerliches Detailmodell aufgebaut werden muss.

1.1. Aufgabenstellung dieser Arbeit

Aufbauend auf den zuvor beschriebenen vier Diplomarbeiten sollte nun ein Kerbfallkatalog unter der Verwendung von dreidimensionalen Volumsmodellen erstellt werden. Der Fortschritt von 2D-Schalenelementen hin zu 3D-Volumselementen ermöglicht eine Bewertung sowohl in Längs- als auch in Querrichtung. Die Bewertung in Längsrichtung wird bei der zweidimensionalen Betrachtung mittels Nennspannungen vorgenommen.

Die Generierung und Auswertung der unterschiedlichen Stoßarten soll automatisch erfolgen, da nur so die Vielzahl der Modelle, in Summe rund 4600, abgehandelt werden kann. Obwohl DI Matthias Wozasek im Rahmen seiner Arbeit den grundlegenden Ablauf und die notwendigen Tools erstellte, müssen alle Mechanismen auf die neue dreidimensionale Problemstellung umgebaut und erweitert werden, sodass ein stabiles Ablaufen des Automatismus gewährleistet werden kann.

2. Theoretische Grundlagen

Um die Vorgehensweise und Ergebnisse, die im Rahmen dieser Diplomarbeit ermittelt wurden, besser verstehen zu können, werden in diesem Kapitel sämtliche theoretische Grundlagen genauer erläutert. Hierzu werden zuallererst die unterschiedlichsten Konzepte der Spannungsbewertung, wie Nenn-, Struktur- und Kerbspannung, beschrieben. Weiters wird auf die Modellbildung nach Radaj, welche die Basis der Kerbspannungsermittlung darstellt, und auf allgemeine Grundlagen der Finiten-Elemente-Berechnung (FEM) eingegangen.

2.1. Definition der Spannungsanteile nach IIW

Wie in Abbildung 2.1 ersichtlich, verläuft die Spannungsverteilung im Nahbereich einer Schweißnahtkerbe nichtlinear und kann in drei getrennte Anteile zerlegt werden: [1]

- Membranspannung σ_{mem} : Sie ist die durchschnittliche Spannung über die Dicke der Platte. Sie ist konstant über die gesamte Dicke.
- Schalenbiegespannung σ_{ben} : Sie besitzt einen lineareren Verlauf, wobei der Punkt O auf der Mittellinie der Platte liegt. Weiters ist sie so gewählt, dass sich der restliche nichtlineare Spannungsanteil im Gleichgewicht befindet.
- Nichtlineare Spannungsspitze σ_{nlp} : Sie ist der verbleibender Anteil der Spannung.

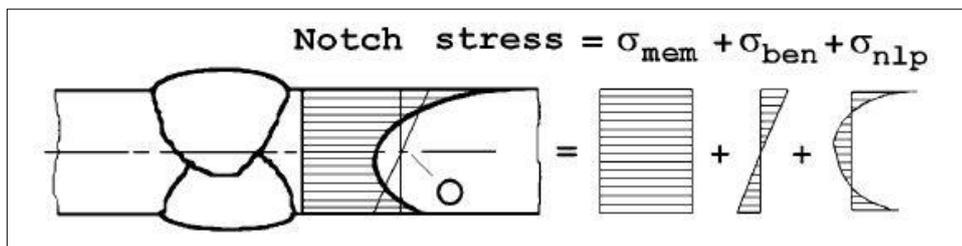


Abb. 2.1: Spannungsanteile laut IIW [1]

Ist eine Spannungsverteilung $\sigma(x)$ gegeben, so können die einzelnen Spannungsanteile analytisch getrennt werden. Die Stelle $x = 0$ ist als Oberfläche des Bleches und $x = t$ an der gegenüberliegenden Seite anzusetzen. Somit folgt für die einzelnen Anteile:

2 Theoretische Grundlagen

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

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

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

Aufbauend auf diesen Spannungsanteilen können die drei Spannungskonzepte, welche in der IIW behandelt werden, abgeleitet werden:

- Nennspannungskonzept
- Strukturspannungskonzept
- Kerbspannungskonzept

2.2. Nennspannungskonzept

Die Nennspannung ist die berechnete Spannung im betrachteten Querschnitt, wobei lokale spannungserhöhende Effekte der Schweißnaht nicht berücksichtigt werden. Spannungserhöhungen aufgrund der makrogeometrischen Form des Bauteils, wie zum Beispiel große Ausschnitte oder Winkel- und Kantenversätze, werden durch Faktoren in der Berechnung berücksichtigt. Des Weiteren wird ein elastisches Materialverhalten vorausgesetzt.

Das Nennspannungskonzept kann zur Festigkeitsberechnung von einfachen Bauteilen mit den elementaren Theorien der technischen Mechanik erfolgen. Bei komplexeren oder statisch überbestimmten Strukturen wird häufig die Finite-Elemente-Methode (FEM) verwendet. Hierbei muss beachtet werden, dass keine spannungsüberhöhenden Effekte des konstruktiven Details in die Berechnung mit einfließen. [1]

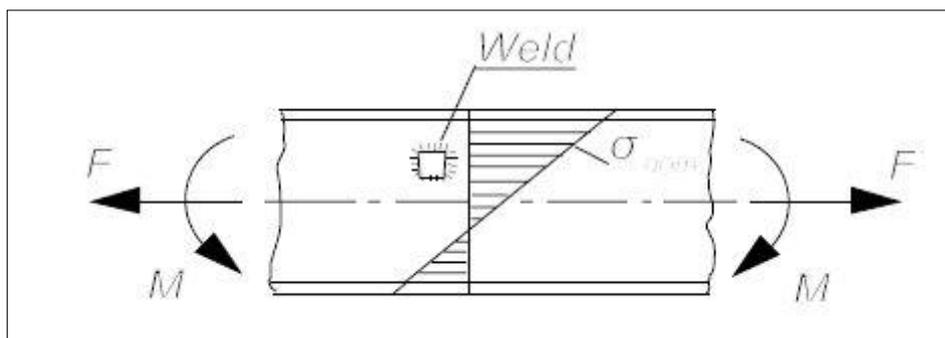


Abb. 2.2: Nennspannung laut IIW [1]

2.3. Strukturspannungskonzept

Das Strukturspannungskonzept beinhaltet alle spannungsüberhöhenden Effekte des konstruktiven Details, schließt jedoch die Spannungskonzentration innerhalb der Schweißnaht von der Betrachtung aus. Somit wird die durch die lokale Kerbe verursachte nichtlineare Spannungsspitze nicht berücksichtigt.

Grundsätzlich setzt sich die Strukturspannung σ_{stru} aus der Membranspannung σ_{mem} und der Schalenbiegespannung σ_{ben} zusammen. Da spannungsüberhöhende Effekte aus der konstruktiven Kerbe der Schweißverbindung berücksichtigt werden, ist sie üblicherweise höher als die Normalspannung.

Die IIW-Richtlinie empfiehlt die Anwendung dieses Konzeptes in Schweißnahtfällen, bei welchen aufgrund komplexer geometrischer Effekte keine eindeutige Nennspannung definiert werden kann oder bei welchen die Auswirkungen der Kerbe nicht tabellarisch festgehalten sind. Weiters ist dieses Verfahren auf die Bewertung des Nahtüberganges begrenzt. [1]

Da es nur in seltensten Fällen möglich ist, die Strukturspannung analytisch zu ermitteln, wird meistens die Bestimmung mittels FEM angewendet. In diesem Fall soll die maximale Hauptspannung ermittelt werden. Dabei werden für den schwingbruchkritischen Punkt an der Bauteiloberfläche, dem *Hot Spot*, an dem die Risseinleitung vermutet wird, die über den Querschnitt linear verlaufenden Strukturspannungen berechnet. Das IIW empfiehlt den im Allgemeinen nichtlinearen Strukturspannungswert im Bereich des Nahtüberganges linear oder quadratisch mit Werten aus zwei oder drei Punkten vor der Schweißnaht zu extrapolieren. [2]

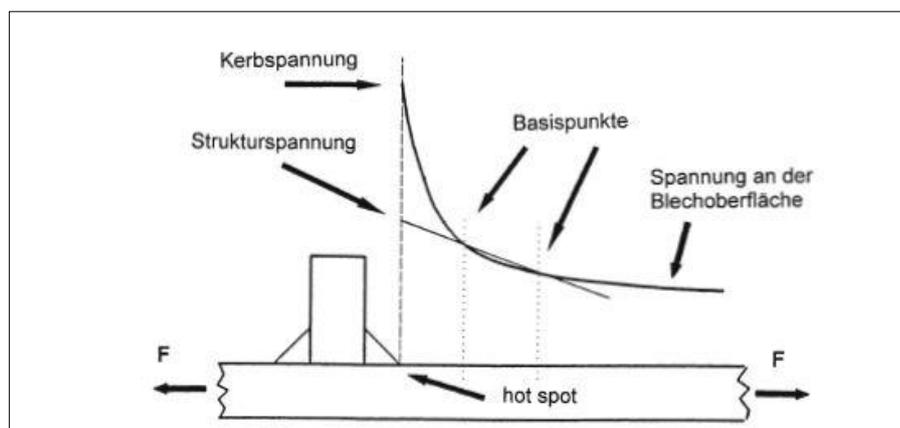


Abb. 2.3: Strukturspannung laut IIW [1]

2.4. Kerbspannungskonzept

Um eine Aussage über die Spannungsverteilung innerhalb der Schweißnaht treffen zu können, wird eine Bewertung mittels Kerbspannungen durchgeführt. Die Kerbspannung ist als gesamte Spannung im Kerbgrund definiert und setzt sich aus der Summe von der Strukturspannung σ_{stru} und dem nichtlinearen Spannungsanteil σ_{nlp} zusammen. Wiederum wird wie bei den vorigen Konzepten ein nichtlineares Werkstoffverhalten angenommen.

Da die Form der Schweißnaht in der Praxis sehr stark von der Herstellung- und Bearbeitungsqualität abhängig ist und es demnach unmöglich ist, eine exakte Nachbildung der Realität zu modellieren, wird die reale Kerbe durch einen effektiven Kerbradius ersetzt. Dadurch können sowohl die statistischen Streuungen der Abmessungen, als auch das nichtlineare Materialverhalten im Kerbgrund erfasst werden.

Bei Baustählen wurde ein Kerbradius von $r = 1 \text{ mm}$ als mit der Realität korrelierend nachgewiesen. Zur Schwingfestigkeitsüberprüfung wird somit die ermittelte effektive Kerbspannung mit einer allgemeinen Wöhlerlinie des Ermüdungswiderstandes verglichen.

Diese Methode darf ausschließlich auf Schweißverbindungen angewendet werden, die voraussichtlich vom Nahtübergang oder der Wurzel her versagen. Versagen aufgrund von eingeschlossenen Imperfektionen oder Oberflächenrauigkeiten werden somit nicht abgedeckt.

Weiters muss die Wanddicke des betrachteten Bauteils mindestens $t = 5 \text{ mm}$ betragen.

Da die effektive Kerbspannung durch den idealisierten Kerbradius berechnet wird, kann diese nicht am realen Bauteil gemessen werden. [1]

2.4.1. Kerbspannung nach Radaj/Neuber

Die Grundlage des Kerbspannungskonzeptes laut IIW bilden die Untersuchungen von Radaj und Neuber. Radaj gibt an, dass das Kerbspannungskonzept auf den Effekten der Mikrostützwirkung an scharfen Übergangskerben des Schweißstoßes nach dem Ansatz nach Neuber beruht. Demnach wird die Risseinleitung nicht durch die Kerbhöchstspannung σ_k , sondern durch die über ein kleines Werkstoffteilchen am Ort der Höchstspannung gemittelte Kerbspannung $\overline{\sigma_k}$ bestimmt. Um diese Risseinleitung rechnerisch ermitteln zu können, wurde die Ersatzstrukturlänge ρ^* als Kenngröße des kleinen Werkstoffteilchens definiert und alle auftretenden Kerbspannungen schließlich über diese Länge senkrecht zum Kerbgrund

2 Theoretische Grundlagen

gemittelt. Da dieser Mittelungsprozess nach Neuber einen großen Aufwand darstellt, kann für die ingenieurmäßige Verwendung ein fiktiv vergrößerter Kerbradius ρ_f definiert und damit eine ermüdungsfestigkeitswirksame Kerbhöchstspannung σ_k berechnet werden. [3]

Radaj definiert so durch die Kerbhöchstspannung und die ertragbare Nennspannung σ_n die Kerbwirkungszahl K_f :

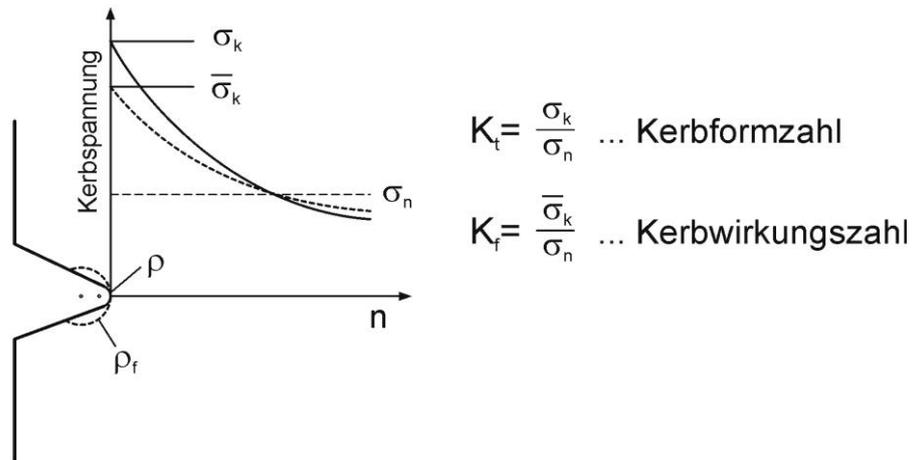


Abb. 2.4: reale und fiktive Kerbhöchstspannung an scharfer Kerbe [9]

Der vergrößerte Kerbradius kann unter Verwendung vom realen Kerbradius ρ und dem Mehrachsigenkoeffizienten s wie folgt bestimmt werden:

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

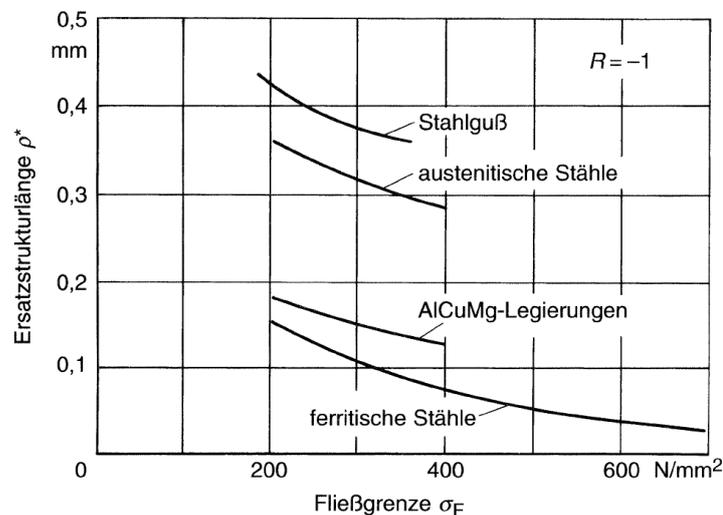


Abb. 2.5: Ersatzstrukturlänge in Abhängigkeit von der Fließgrenze (Neuber) [1]

2 Theoretische Grundlagen

Der Mehrachsigenkoeffizient s wird bei Schweißverbindungen üblicherweise aufgrund des ebenen Spannungszustandes und der Gestaltenergieänderungshypothese mit 2,5 angegeben. Unter der Annahme des ungünstigsten Falles einer scharfen rissartigen Kerbe ergibt sich ein Ausgangsradius von 0. Daraus folgt, dass man für einen niedrig legierten Baustahl mit $R_{p0,2}$ von ungefähr 230 N/mm² eine Ersatzstrukturlänge von ca. 0,4 mm und schließlich einen fiktiven Kerbradius von 1 mm erhält, der in weiterer Folge für die Modellbildung verwendet wird.

Mit diesen Erkenntnissen können nun die Schweißstoßmodelle nach Radaj erstellt werden. Abbildung 2.6. zeigt links ein Radaj-Modell eines Kreuzstoßes und rechts eines üblichen Stumpfstoßes.

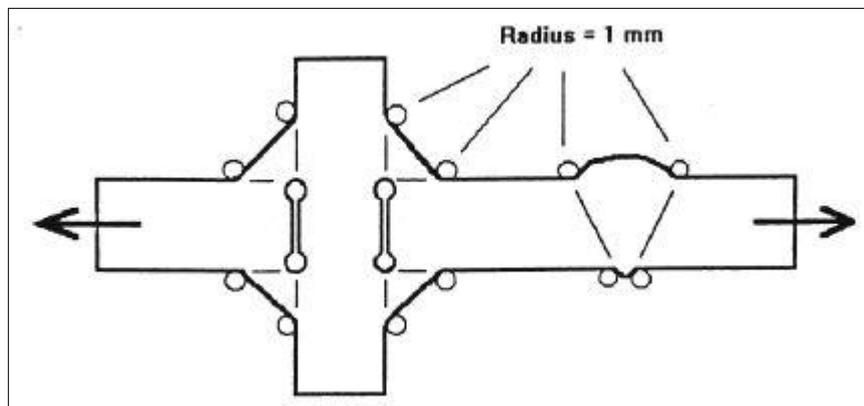


Abb. 2.6: Radaj Modell [1]

2.4.2. Kerbspannung nach Seeger

Neben Radaj beschäftigte sich auch Seeger mit der Problematik der Wahl des richtigen Radius in den Schweißnahtkerben und entwickelte diese Theorie soweit weiter, sodass sie in viele Regelwerke, so auch in die IIW-Richtlinie, aufgenommen wurde. Seeger versuchte durch empirische Versuche den idealen Kerbradius herauszufinden und kam schlussendlich ebenfalls auf einen Kerbradius von 1 mm. Anstatt eines fiktiven Kerbradius wird hier der Mittelwert eines real vorhandenen Kerbradius verwendet. Nach gründlichen Untersuchungen kam er zu folgenden Ergebnissen, welche auch in die IIW-Richtlinie übernommen wurden:

Die Schwingbreite des örtlichen Schwingfestigkeitskennwertes ist mit $\Delta\sigma_{e,A} = 225$ N/mm² anzunehmen und der FAT-Klasse 225 zuzuordnen. Diese FAT-Klasse ist durch den charakteristischen Ermüdungswiderstand von 225 N/mm² bei 2×10^6 Schwingspielen definiert. Gemäß den Sicherheitsgrundsätzen der IIW, in der eine

Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{u}} = 97,7\%$ bei einer mittleren Streuspanne von $T=1:1,48$ gegeben sein muss, ist eine örtliche Beanspruchung von $R = +0,5$ zugrunde gelegt. [4]

2.5. Bestimmung der Hauptnormalspannungen

Da die lokalen Kerbspannungen im Rahmen dieser Diplomarbeit mit Volumsmodellen ermittelt werden, erfordert dies eine Spannungsauswertung. Wie in Publikationen und bisherigen Diplomarbeiten gezeigt, korrelieren die IIW FAT 225 Wöhlerlinien sehr gut mit den Hauptnormalspannungen. [5]

Abbildung 2.7 zeigt ganz allgemein die einzelnen Spannungskomponenten auf. In weiterer Folge werden die Schubspannungen als σ_{xy} usw. bezeichnet.

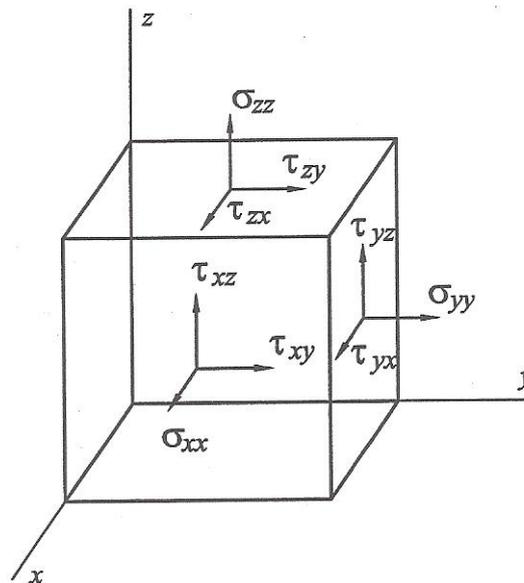


Abb. 2.7: Spannungskomponenten [6]

Der Spannungstensor ist allgemein definiert mit:

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Unter Berücksichtigung der Dualität der Schubspannungen ($\sigma_{xy} = \sigma_{yx}, \dots$) kann die charakteristische kubische Gleichung zur Bestimmung der Hauptnormalspannungen aufgestellt werden:

$$\sigma^3 - I_1 * \sigma^2 + I_2 * \sigma - I_3 = 0$$

2 Theoretische Grundlagen

Die Invarianten I_1 , I_2 , und I_3 der Spannungsmatrix können mit folgenden Formeln ermittelt werden:

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$$

$$I_2 = \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx} - \sigma_{xy}^2 - \sigma_{yz}^2 - \sigma_{zx}^2$$

$$I_3 = \sigma_{xx}\sigma_{yy}\sigma_{zz} + 2\sigma_{xy}\sigma_{yz}\sigma_{zx} - \sigma_{xx}\sigma_{yz}^2 - \sigma_{yy}\sigma_{zx}^2 - \sigma_{zz}\sigma_{xy}^2$$

Somit können die Hauptnormalspannungen durch Lösen der kubischen Gleichung bestimmt werden. [6]

Mithilfe des Mohr'schen Spannungskreises kann der Spannungszustand in jedem Körperpunkt graphisch dargestellt werden. Hierbei werden in einem σ - τ Koordinatensystem die Hauptnormalspannungen eingetragen. Da laut Definition σ_1 als die größte und σ_3 als die kleinste Hauptnormalspannung angesehen werden, ergibt sich die maximale Schubspannung aus: [7]

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

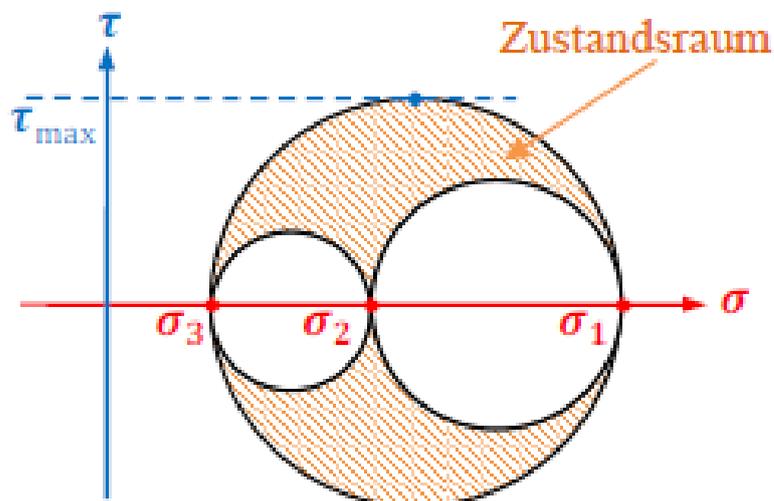


Abb. 2.8: Mohr'scher Spannungskreis [7]

Der markierte Bereich zeigt alle möglichen Zustände der Normal- und Schubspannungen.

2.6. Finite Elemente Methode

Zur Erstellung aller Schweißnahtmodelle und der anschließenden Festigkeitssimulation mittels Finite Elemente Methode (FEM) wird das Softwarepaket NX Version 8 von *Siemens PLM Software* und dem dazugehörigen Gleichungslöser NX Nastran verwendet. Diesbezüglich folgt eine kurze Erläuterung der verwendeten Elementtypen, welche in dieser Arbeit verwendet werden.

2.6.1. Verwendete Elemente

CROD:

Das CROD-Element ist das einfachste aller geometrischen Elemente. Es ist als prismatisches, gerades Element mit konstanten Eigenschaften über die gesamte Länge definiert, das nur Steifigkeiten in axialer Richtung und auf Torsion besitzt. Im Rahmen dieser Arbeit wird es nur zum Auslesen von Knotennummern in gewissen Bereichen benötigt. [8]

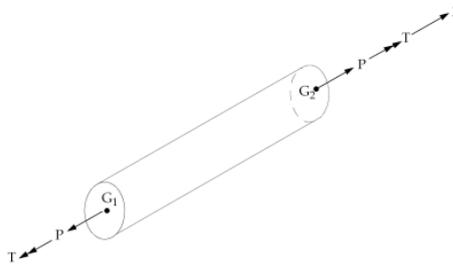


Abb. 2.9: CROD [6]

CQUAD8:

Dieses vierseitige, dünne Schalenelement besteht aus 4 Eckknoten mit je einem Mittelknoten pro Seitenfläche. Es besitzt 3 translatorische und 2 rotatorische Freiheitsgrade, wobei nur die Rotationen in der Ebene mit einer Biege- und transversalen Steifigkeit versehen sind.

Das CQUAD8 Element wird einerseits zur Kraft- und Momenteinleitung an den Schnittufern und andererseits zur Vorgabe des Vernetzungsmusters verwendet. [8]

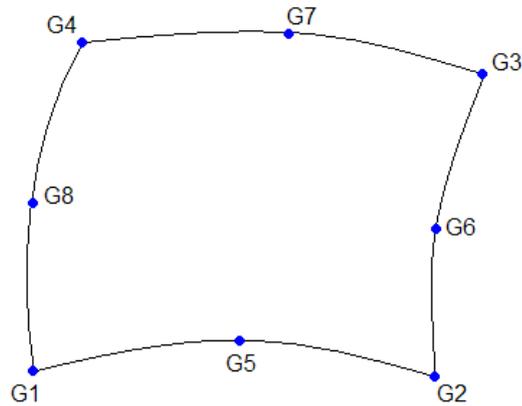


Abb. 2.10: CQUAD8 [6]

CHEXA20:

Das 20-knotige Hexaeder Element besteht aus 6 Seiten mit insgesamt 8 Eckknoten und weiteren 12 Mittelknoten. Durch die Vielzahl an Knoten vergrößert sich dementsprechend der Rechenaufwand, allerdings liefert es auch bei starken Verzerrungen noch verwertbare Ergebnisse. NX Nastran berechnet alle Spannungen im Mittelpunkt des Elementes und extrapoliert die Werte anschließend auf die Eckpunkte. [8]

Da das CHEXA20-Element nur die 3 translatorischen Freiheitsgrade besitzt, ist es unmöglich Momente direkt auf die Knoten aufzubringen. [9]

Dieser Elementtyp wird bei der Erstellung aller Volumenmodelle verwendet.

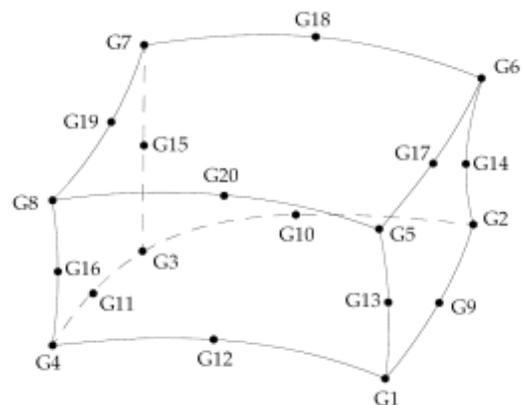


Abb. 2.11: CHEXA20 [6]

2.7. Inertia Relief

Üblicherweise ist eine Struktur, wenn sie einer Berechnung mittels FEM unterzogen wird, eindeutig statisch bestimmt und kann somit mit konventionellen, linear statischen Finite Elemente Berechnungsmethoden analytisch bestimmt werden. Fehlen notwendige Einspannbedingungen, oder sind diese gar nicht vorhanden, wird die Steifigkeitsmatrix der NX Nastran Simulation singulär und es können keine Ergebnisse geliefert werden.

Um dennoch eine solche Problemstellung lösen zu können, wurde die Berechnungsmethode *Inertia Relief* eingeführt. Hierbei werden alle von außen einwirkenden Kräfte mit den Massenträgheiten der Struktur ins Gleichgewicht gesetzt. Somit können auch freie oder nur teilweise gelagerte Strukturen linear statisch durch die FEM bestimmt werden.

Anwendung findet diese Berechnungsmethode vor allem im Luft- und Raumfahrtbereich, wo beispielsweise Flugzeuge im Flug oder Satelliten im Weltall simuliert werden. [8]

Inertia Relief wird in weiterer Folge bei allen Modellen zur Bestimmung der Spannungen in der Kerbe verwendet.

Die nachfolgenden beiden Abbildungen zeigen die Wirkungsweise von *Inertia Relief* anhand eines Kreuzstoßes. Während in der oberen Abbildung die FE-Simulation ohne definierte Einspannbedingungen abläuft, ist unten das linke Schnittufer fest eingespannt. Beide Modelle werden durch eine Zugkraft am rechten Schnittufer beaufschlagt. Die Deformation wurde auf 10% eingestellt, sodass die Unterschiede sichtbar gemacht werden.

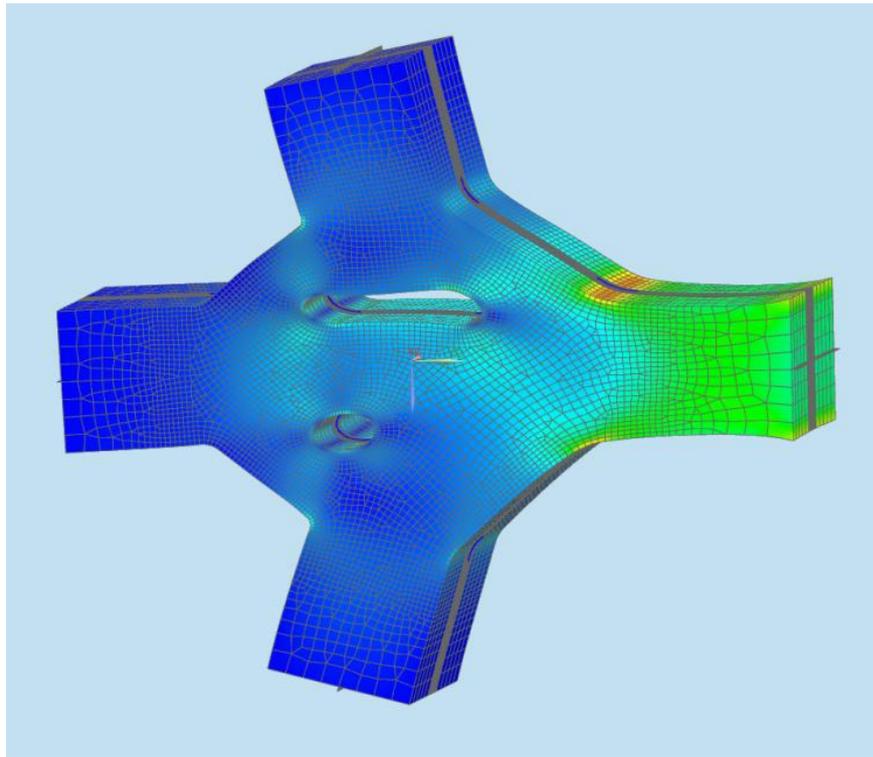


Abb. 2.12: Inertia Relief

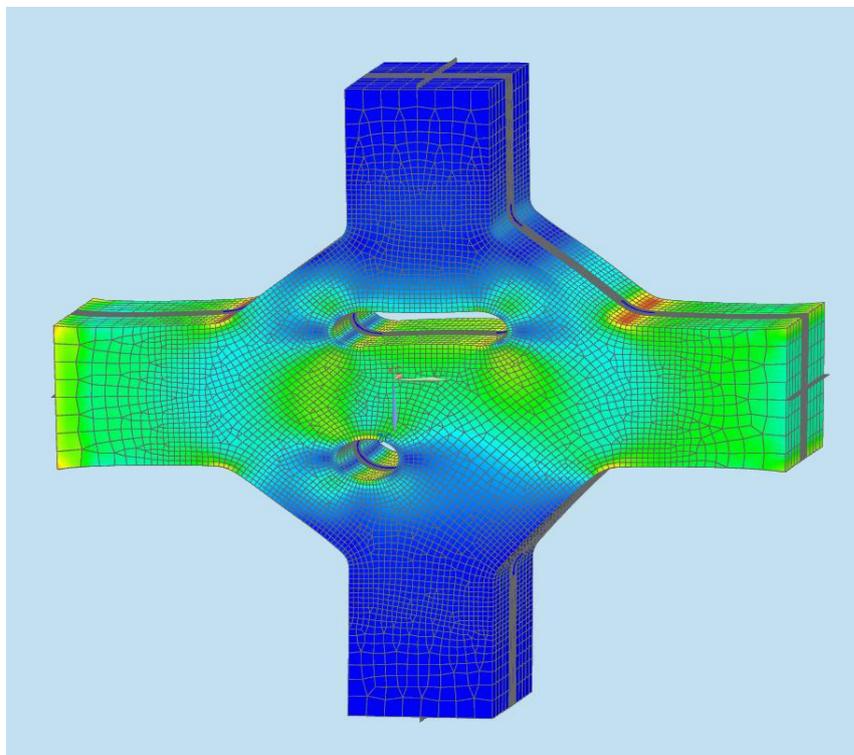


Abb. 2.13: fixe Einspannung

3. Modellierte Schweißnahtmodelle

Im Rahmen dieser Arbeit werden die bei *Siemens* am häufigsten eingesetzten Schweißstöße simuliert. Abbildung 3.1 stellt diese Stoßarten, eingeteilt nach Stumpf-, T- und Kreuzstoß, graphisch dar:

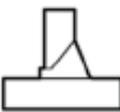
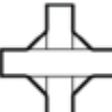
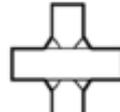
Stumpfstoß	 B_VC	 B_VM	 B_VT
T-Stoß	 T_FD	 T_YS	 T_YB
	 T_YD	 T_VS	
Kreuzstoß	 X_FD_FD	 X_FD_YS	 X_FD_YB
	 X_YS_YS	 X_YB_YB	 X_YD_YD
	 X_YS_YB		

Abb. 3.1: Schweißnahtarten [10]

Jeder Stoß ist durch die Kombination einfacher Abkürzungen eindeutig definiert. Die von hierbei verwendeten Abkürzungen für die jeweiligen Stöße werden auch in dieser Arbeit weiterverwendet. Nachfolgende Tabelle erklärt kurz die Bedeutung dieser Abkürzungen:

Abkürzung	Bezeichnung Englisch	Bezeichnung Deutsch
B	butt joint	Stumpfstoß
T	T-joint	T-Stoß
X	cruciform joint	Kreuzstoß
VC	V-weld, ceramic backing bar	V-Naht, keramische Badsicherung
VM	V-weld, metal backing bar	V-Naht, metallische Badsicherung
VT	V-weld, tig-root	V-Naht, WIG-Wurzel
FD	filled double	Doppelkehlnaht
YS	partial penetration, single sided	HY-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht
YD	partial penetration, double sided	K-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht
YB	partial penetration, backing run	HY-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht und Gegenlage
VS	full penetration, single sided	HV-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht

Tab. 3.1: Schweißnahtbezeichnungen

Während es bei den Stumpfstößen ausreicht nur ein Basismodell für die Automatisierung zu erstellen, müssen bei T- und Kreuzstößen mehrere Modelle generiert werden, um alle verwendeten Wandstärken abbilden zu können, da sich hier je nach Kombination sehr unterschiedliche Geometrien im Querschnitt einstellen. Bei der Aufteilung in diese Submodelle ist sehr darauf zu achten, dass dennoch eine einheitliche Auswertung des Stoßes möglich ist.

Auf den folgenden Seiten werden die behandelten Stoßarten kurz genauer erläutert und je ein Radaj-Modell inkl. der dazugehörigen Excel-Parameter-Tabelle angeführt.

3.1. Stumpfstöße

Insgesamt wurden drei verschiedene Stumpfstoßarten erstellt und simuliert. Am häufigsten eingesetzt wird bei *Siemens* der Stumpfstoß mit keramischer Badsicherung (B_VC). Des Weiteren werden metallische Badsicherungen (B_VM) verwendet oder überhaupt auf eine Badsicherung verzichtet (B_VT). Zur Simulation wurde die Gurtstärke von 5 -25 mm in jeweils 1 mm Abständen variiert. Somit ergeben sich hier ausgehend von drei Basismodellen insgesamt 63 Modelle.

3 Modellerte Schweißnahtmodelle

Stoß	Anzahl der Modelle
B_VC	21
B_VM	21
B_VT	21

Tab. 3.2: Stumpfstoßarten

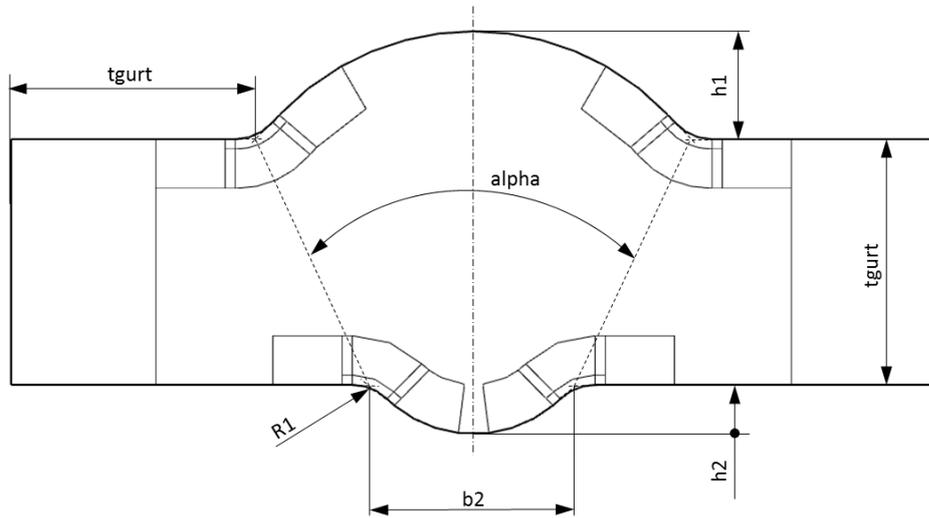


Abb. 3.2: Radaj-Modell B_VC

	A	B	C	D	E	F
1	Counter	t_{gurt}	h_1 (C Qualität)	b_2	h_2	α
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
10	9	13	3.42	4	1	50
11	10	14	3.56	4	1	50
12	11	15	3.70	4	1	50
13	12	16	3.84	4	1	50
14	13	17	3.98	4	1	50
15	14	18	4.12	4	1	50
16	15	19	4.26	4	1	50
17	16	20	4.40	4	1	50
18	17	21	4.54	4	1	50
19	18	22	4.68	4	1	50
20	19	23	4.82	4	1	50
21	20	24	4.96	4	1	50
22	21	25	5.10	4	1	50

Abb. 3.3: Auszug B_VC Excel-Parameter

3.2. T-Stöße

Ähnlich wie bei den Stumpfstößen werden auch hier Blechdicken von 5 – 25 mm in 1 mm Abständen simuliert. Zusätzlich zur Variation der Gurtwandstärke wird hier die Stegdicke verändert. Insgesamt ergeben sich mit 5 Stoßarten und jeweils 441 Variationsmöglichkeiten somit 2205 Modelle. Aufgrund der Eigenheiten mancher Stöße müssen mehrere Basismodelle erstellt werden. So erfordert z.B. der T-Stoß mit Doppelkehlnaht (T_FD) 2 verschiedene Basismodelle, da sich bei zu geringen Stegdicken die nicht verschweißte Wurzel zu einem Langloch ausbildet.

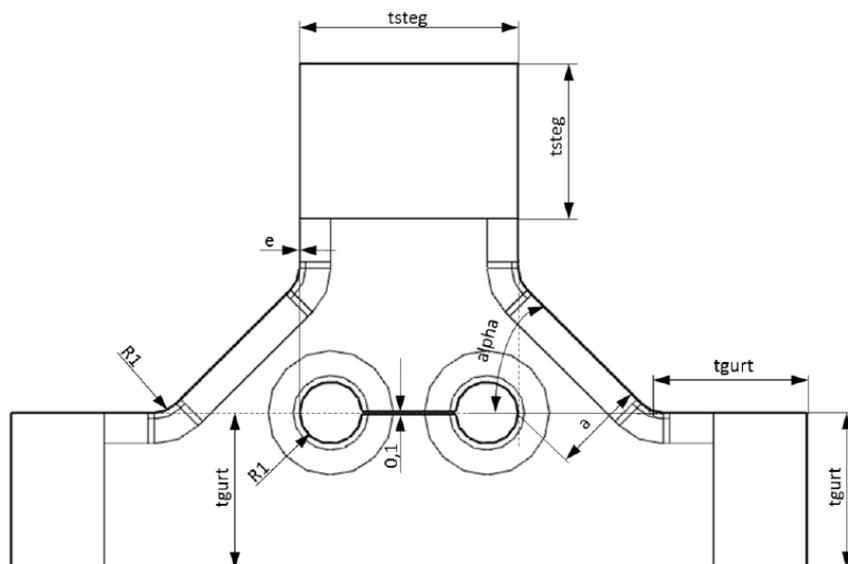


Abb. 3.4: Radaj-Modell T_FD für Stegblechstärke > 6 mm

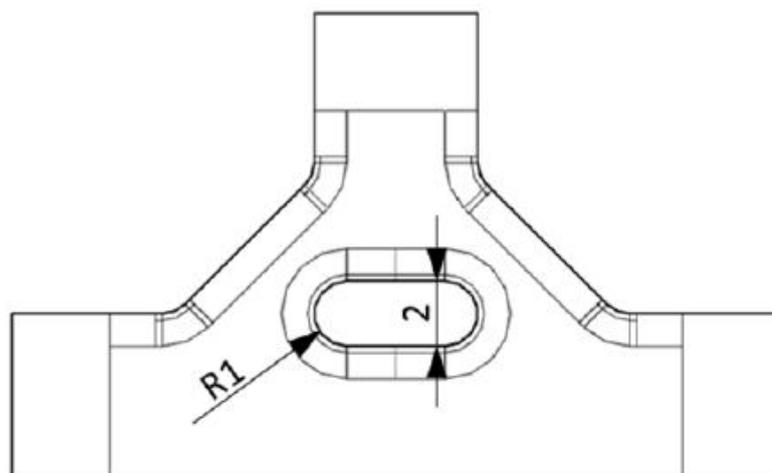


Abb. 3.5: Radaj-Modell T_FD für Stegblechstärke bis einschließlich 6 mm

3 Modellierte Schweißnahtmodelle

	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
11	10	5	14	7	45	0
12	11	5	15	7	45	0
13	12	5	16	8	45	0
14	13	5	17	8	45	0
15	14	5	18	9	45	0
16	15	5	19	9	45	0
17	16	5	20	10	45	0
18	17	5	21	10	45	0
19	18	5	22	11	45	0
20	19	5	23	11	45	0
21	20	5	24	12	45	0
22	21	5	25	12	45	0
23	22	6	5	3	45	0
24	23	6	6	3	45	0
25	24	6	7	3	45	0
26	25	6	8	4	45	0
27	26	6	9	4	45	0
28	27	6	10	5	45	0
29	28	6	11	5	45	0
30	29	6	12	6	45	0
31	30	6	13	6	45	0

Abb. 3.6: Auszug T_FD Excel-Parameter

Stoß		Anzahl der Modelle	Auswahlkriterium
T_FD	Modell 1	42	tsteg < 7
	Modell 2	399	tsteg > 6
T_VS		441	
T_YB		441	
T_YD		441	
T_YS	Modell 1	126	tsteg < 11
	Modell 2	315	tsteg > 10

Tab. 3.3: T-Stoßarten

3.3. Kreuzstöße

Im Zuge dieser Arbeit wurden sieben verschiedene Kreuzstoßarten untersucht. Da hier im Vergleich zum T-Stoß noch eine weitere Stegdicke variiert wird, wurde in Absprache mit Siemens die Schrittweite der Variation auf 2 mm vergrößert und nur Blechstärken von 6 – 18 mm verwendet. Somit ergeben sich immer noch insgesamt 2401 Modelle. Aufgrund der unterschiedlichsten Wandstärken der verschweißten Bleche, müssen nun analog zu den bereits erwähnten T-Stößen mehrere Submodelle des jeweiligen Stoßes generiert werden. Beispielsweise wird hier der X_YS_YB Stoß gewählt. Vier verschiedene Radaj-Modelle ergeben fünf Submodelle, wobei ein Radaj-Modell nur unterschiedlich bemaßt wurde. Bis zu einer Wandstärke von 10 mm ergibt sich die obere Wurzelkerbe als kreisrundes Loch, ehe es dann zu einem Langloch übergeführt wird. Bei der unteren Wurzelkerbe bleibt das kreisrunde Loch bestehen. Es dringt aber immer weiter in den nichtverschweißten Reststeg des Modelles ein.

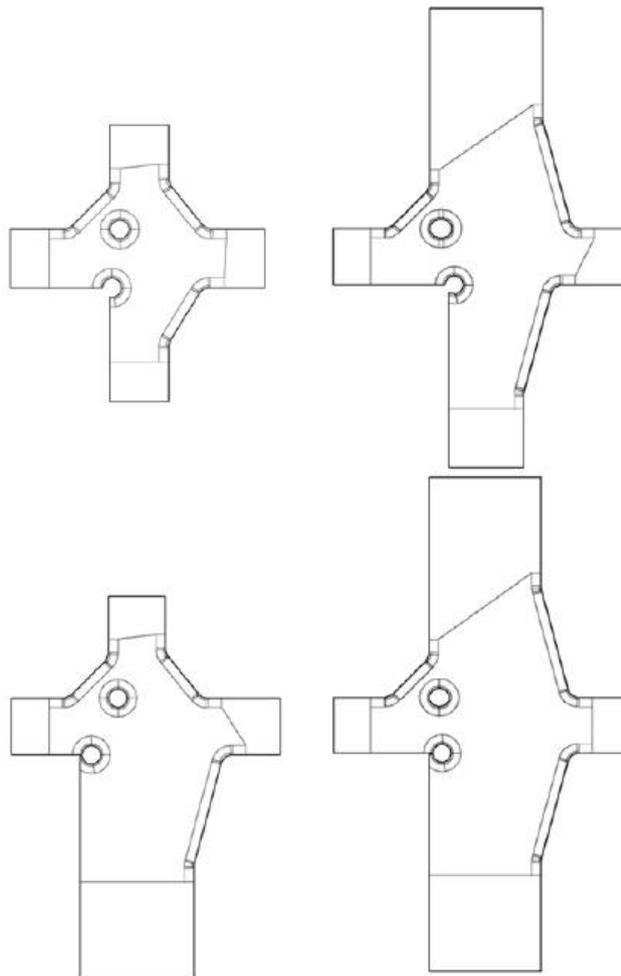


Abb. 3.7: Radaj-Modell X_YS_YB

3 Modellerte Schweißnahtmodelle

	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
12	11	6	8	12	3	3	1.6	45	50	0	6	2.4	50
13	12	6	8	14	3	3	1.6	45	50	0	7	2.8	50
14	13	6	8	16	3	3	1.6	45	50	0	8	3.2	50
15	14	6	8	18	3	3	1.6	45	50	0	9	3.6	50
16	15	6	10	6	3	3	1.99	45	50	0	3	1.2	50
17	16	6	10	8	3	3	1.99	45	50	0	4	1.6	50
18	17	6	10	10	3	3	1.99	45	50	0	5	1.99	50
19	18	6	10	12	3	3	1.99	45	50	0	6	2.4	50
20	19	6	10	14	3	3	1.99	45	50	0	7	2.8	50
21	20	6	10	16	3	3	1.99	45	50	0	8	3.2	50
22	21	6	10	18	3	3	1.99	45	50	0	9	3.6	50
23	22	6	12	6	3	3	2.4	45	50	0	3	1.2	50
24	23	6	12	8	3	3	2.4	45	50	0	4	1.6	50
25	24	6	12	10	3	3	2.4	45	50	0	5	1.99	50
26	25	6	12	12	3	3	2.4	45	50	0	6	2.4	50
27	26	6	12	14	3	3	2.4	45	50	0	7	2.8	50
28	27	6	12	16	3	3	2.4	45	50	0	8	3.2	50
29	28	6	12	18	3	3	2.4	45	50	0	9	3.6	50
30	29	6	14	6	3	3	2.8	45	50	0	3	1.2	50
31	30	6	14	8	3	3	2.8	45	50	0	4	1.6	50

Abb. 3.8: Auszug X_YS_YB Excel-Parameter

Stoß		Anzahl d. Modelle	Auswahlkriterium
X_FD_FD	Modell 1	7	tsteg1 < 7, tsteg2 < 7
	Modell 2	42	tsteg1 < 7, tsteg2 > 6
	Modell 3	42	tsteg1 > 6, tsteg2 < 7
	Modell 4	147	tsteg1 > 6, tsteg2 >= tsteg1
	Modell 5	105	tsteg1 > tsteg2, tsteg2 > 6
X_FD_YB	Modell 1	21	tsteg1 < 7, tsteg2 < 12
	Modell 2	126	tsteg1 > 6, tsteg2 < 12
	Modell 3	28	tsteg1 < 7, tsteg2 > 11
	Modell 4	42	tsteg1 > 6, tsteg2 > 11, tsteg1 > tsteg2
	Modell 5	126	tsteg1 > 6, tsteg2 > 11, tsteg1 <= tsteg2
X_FD_YS	Modell 1	21	tsteg1 < 7, tsteg2 <= 10
	Modell 2	126	tsteg1 > 6, tsteg2 <= 10
	Modell 3	28	tsteg1 < 7, tsteg2 > 10
	Modell 4	70	tsteg1 > 6, tsteg2 > 10, tsteg1 >= tsteg2
	Modell 5	98	tsteg1 > 6, tsteg2 > 10, tsteg1 < tsteg2
F_YB_YB	Modell 1	63	tsteg1 < 11, tsteg2 < 11
	Modell 2	84	tsteg1 > 10, tsteg2 < 11
	Modell 3	84	tsteg1 < 11, tsteg2 > 10
	Modell 4	112	tsteg1 > 10, tsteg2 > 10
X_YD_YD	Modell 1	147	tsteg1 > tsteg2
	Modell 2	196	tsteg1 <= tsteg2

3 Modellierte Schweißnahtmodelle

X_YS_YB	Modell 1	42	$t_{steg1} < 11, t_{steg2} < 11, t_{steg1} \geq t_{steg2}$
	Modell 2	21	$t_{steg1} < 11, t_{steg2} < 11, t_{steg1} < t_{steg2}$
	Modell 3	84	$t_{steg1} > 10, t_{steg2} > 11$
	Modell 4	84	$t_{steg1} < 11, t_{steg2} > 10$
	Modell 5	112	$t_{steg1} > 10, t_{steg2} > 10$
X_YS_YS	Modell 1	63	$t_{steg1} < 11, t_{steg2} < 11$
	Modell 2	84	$t_{steg1} > 10, t_{steg2} < 11$
	Modell 3	84	$t_{steg1} < 11, t_{steg2} > 10$
	Modell 4	70	$t_{steg1} > 10, t_{steg2} > 10, t_{steg1} \geq t_{steg2}$
	Modell 5	42	$t_{steg1} > 10, t_{steg2} > 10, t_{steg1} < t_{steg2}$

Tab. 3.4: Kreuzstoßarten

4. Ablauf der automatischen Erstellung

Aufgrund der Vielzahl von verschiedenen Schweißstoßarten und den daraus resultierenden Modellen muss der gesamte Ablauf, angefangen bei der Modellgenerierung, über die FE - Simulation bis hin zur Auswertung der Spannungsergebnisse und Zusammenfassung in Kerbfalltafeln, so gut wie möglich automatisch erfolgen. Da diese Bereiche im Großen und Ganzen voneinander unabhängig sind und unterschiedlichste Programme und Tools genutzt werden, können nur die einzelnen Bereiche selbstständig ablaufen und die jeweiligen Ergebnisse anschließend manuell an den nächsten Prozessschritt weitergegeben werden. Leider ist diese Methode mit einem enormen Aufwand verbunden, hat aber den Vorteil, dass etwaige Fehler oft frühzeitig erkannt werden können und ein einzelner Schritt unkompliziert und schnell wiederholt werden kann.

Abbildung 4.1 zeigt schemenhaft die einzelnen Schritte, die während der Automatisierung abgehandelt werden.

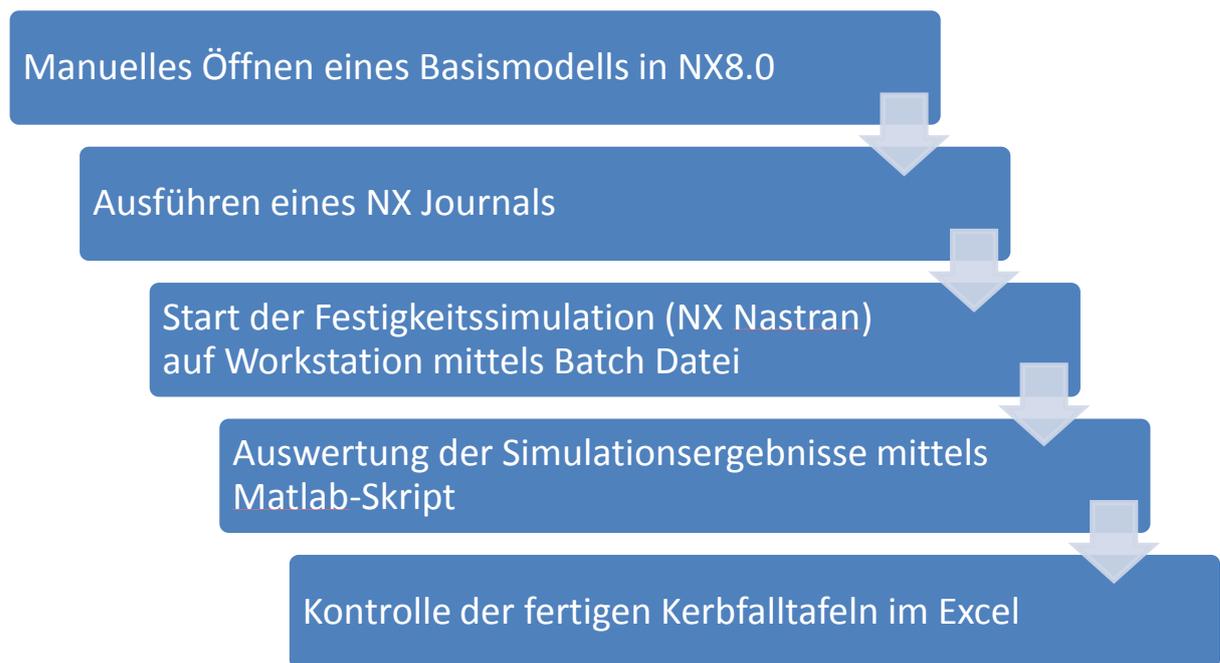


Abb. 4.1: Ablauf der automatischen Erstellung

Ausgangspunkt in der Erstellung ist der Dateiordner des jeweiligen Schweißstoßes, welcher für jedes Submodell zwei Ordner, einen für das Basismodell inkl. Part-, idealisiertes-Part-, FEM- und SIM-File und das dazugehörige Journal sowie einen Solutions-Ordner für die abgeleiteten Modellreihen, und eine Excel-Datei mit den Schweißstoßparametern enthält. Alle Basismodelle und Parameterfiles sind mit der Endung „_0“ im Dateinamen

4 Ablauf der automatischen Erstellung

gekennzeichnet. Es wurden zwei Journals erstellt, die sich nur dahingehend unterscheiden, dass das *Test* Journal den Solver zwar startet, ihn aber unmittelbar danach abbricht und die Erstellung des nächsten Modelles einleitet. Aus diesem Grund wurde dieses Journal zur Generierung der notwendigen Solver-Input-Files, welche anschließend zur Berechnung auf eine leistungsstarke Workstation weiterverschoben werden, verwendet.

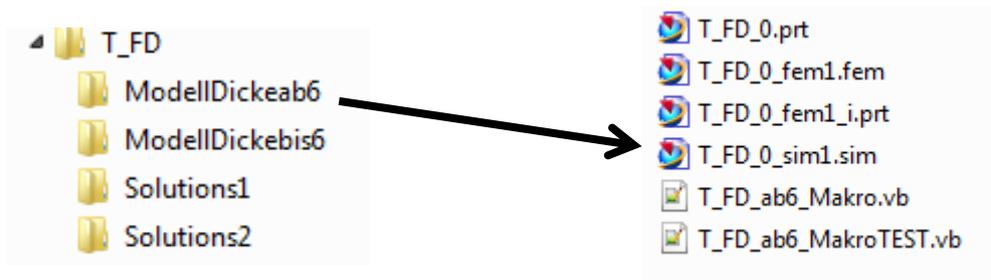


Abb. 4.2: Ordner- und Dateienstruktur

Vereinfacht läuft die Erstellung in NX wie in nachfolgender Grafik gezeigt ab:

- Basismodell wird geladen
- Neue Parameter aus Excel werden eingelesen
- Geometrie- und Netzgitter wird aktualisiert
- FE - Simulation wird gestartet und liefert Spannungsergebnisse
- Nächste Parameter aus Excel werden eingelesen
- ...

Dieser Vorgang läuft so lange ab, bis alle Stöße erstellt und simuliert wurden.

4 Ablauf der automatischen Erstellung

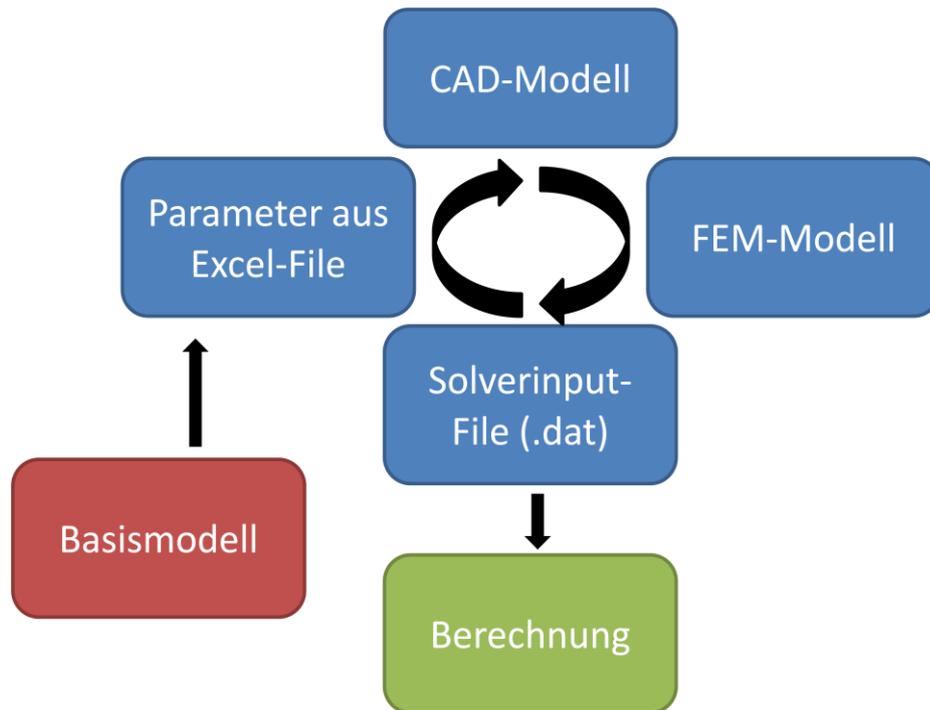


Abb. 4.3: Automatische Modellgenerierung

Alle in diesem Kapitel erwähnten Tools wurden im Rahmen vorangegangener Diplomarbeiten entwickelt, mussten aber zum Teil massivst verändert werden, um den Anforderungen dieser dreidimensionalen Problemstellung gerecht werden zu können. Die einzelnen Schritte werden in den nachfolgenden Kapiteln ausführlichst behandelt.

5. Modellerstellung

In diesem Kapitel wird die genaue Vorgehensweise bei der Erstellung der 3D Schweißnahtmodelle anhand eines T-Stoßes mit Doppelkehlnaht (T_FD) Schritt für Schritt erläutert. Die beschriebenen Modelle werden ausschließlich an den Schnittuferflächen mit Belastungen beaufschlagt, da nur so eine automatisierte Erstellung im Rahmen dieser Arbeit möglich ist. Soll an den Stirnseiten ebenfalls eine Belastung eingeleitet werden, wie es schließlich die vollständige Bewertung erfordert, müssen hierfür in Zukunft weitere Untersuchungen angestrebt werden. Da die Gurt- und Stegdicke beiderseits nur 5 mm beträgt, ist die nicht verschweißte Wurzel als Langloch ausgeführt. Vorweg ist zu erwähnen, dass alle geometrisch relevanten Details im Part-File, konstruktive Details zur Erstellung der Vernetzung für die FE-Berechnung im idealisierten Part-File, Materialeigenschaften und die Vernetzung selbst im Finite Elemente Model-File (FEM-File) und die gesamte Kraft- und Momentaufbringung im Simulations-File (SIM-File) modelliert werden. Alle verwendeten Ausdrücke für Funktionen und FEM-Bezeichnungen beziehen sich auf deren Verwendung in NX Version 8 und dem dazugehörigen Solver NX Nastran.

Die Dateihierarchie in NX sieht folgendermaßen aus, wobei mit dem Part-File gestartet wird:

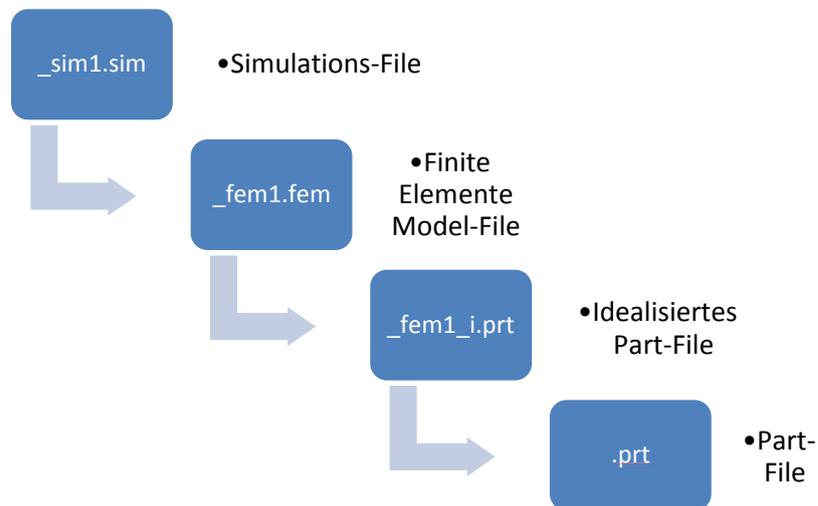


Abb. 5.1: Dateihierarchie

5.1. Allgemeines zur Erstellung eines 3D-Modells

Grundsätzlich gibt es verschiedenste Möglichkeiten ein 3D Modell zu erstellen:

1. Die einfachste und schnellste Möglichkeit ist die Erstellung eines 2D-Schalenmodells mit CQUAD8 Elementen und einer anschließenden Extrusion mittels *element-extrude*. Diese Variante besitzt den großen Nachteil, dass dem FEM-Netz kein *polygon-body* hinterlegt ist und dies die Automatisierung sehr verkompliziert bzw. in manchen Bereichen unmöglich macht. [9]
2. Eine weitere Möglichkeit ist die vollständige Generierung eines *polygon-body*, der schlussendlich einer FE-Simulation unterzogen wird. Obwohl die Modellerstellung einen enormen Aufwand darstellt, wurde diese Variante schließlich gewählt. Der große Vorteil hierbei ist, dass alle *Constraints* und *Relations* unmittelbar auf ein Part-File referenziert werden und nicht bei Aktualisierungen verloren gehen können.

5.2. Part-File

Als erstes ist die Definition des Koordinatensystems sowohl für die Modellerstellung als auch für die spätere Auswertung von wesentlicher Bedeutung. Da auch die Auswertung der Spannungsergebnisse und die Zusammenfassung der Ergebnisse zu Kerbfalltafeln automatisch ablaufen, muss eine einheitliche Darstellung des Koordinatensystems gewährleistet sein. Die Definition erfolgt in der ersten Skizze des Part-Files in folgender Weise:

- Die Skizze des Schweißstoßes liegt in der Y-Z Ebene.
- Das Zentrum des Koordinatensystems liegt genau im Schnittpunkt der Mittellinie der Gurt- und Stegbleche.
- Die Y-Achse zeigt nach rechts und die Z-Achse nach unten. Somit folgt, dass die X-Achse in die Bildebene hineinragt.

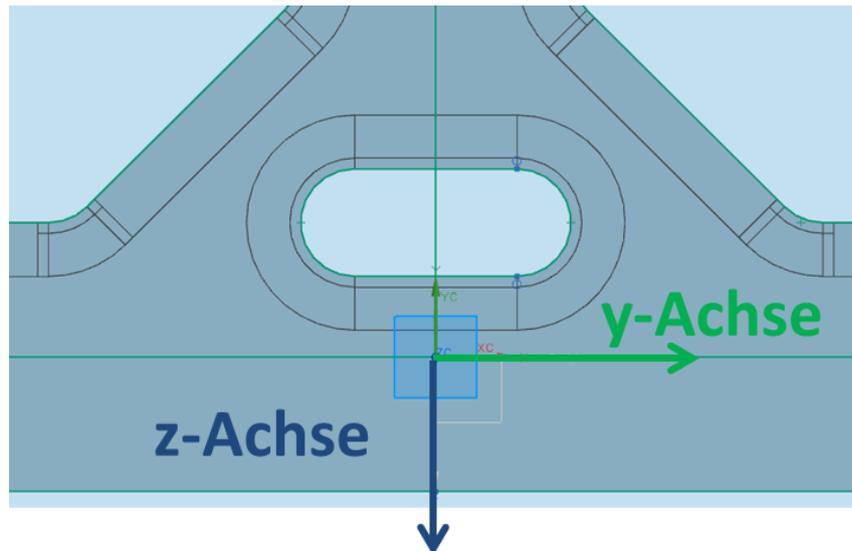


Abb. 5.2: Koordinatensystem

Jeder Schweißstoß kann, wie in den Abbildungen 5.3 und 5.4 dargestellt, durch einige wenige Parameter eindeutig charakterisiert werden. Die Anzahl dieser Parameter hängt stark von der Komplexität des jeweiligen Stoßes ab. Um die Modellerstellung automatisieren zu können, werden diese Parameter aus einer Excel Tabelle als Expressions in NX importiert. Die Expressions sind unter dem Menüpunkt *Tools* zu finden. Dieser Import erfolgt durch ein eigens dafür geschriebenes Journal, dessen Aufbau später noch genauer erläutert wird.

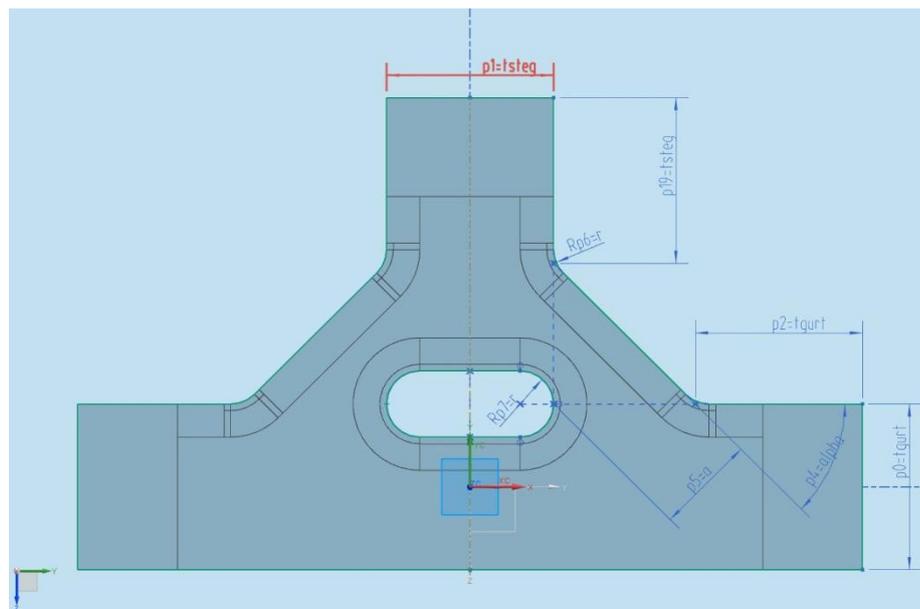


Abb. 5.3: Basisskizze

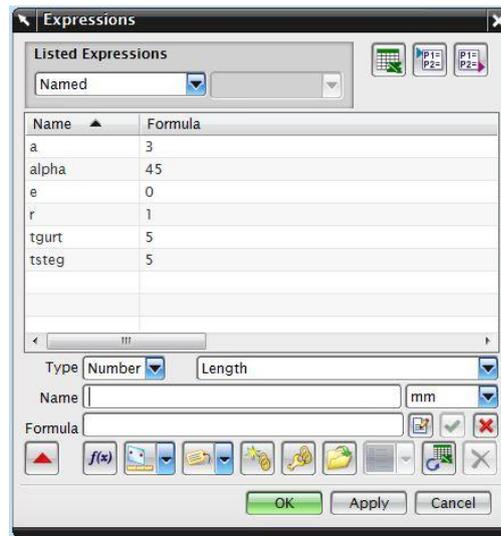


Abb. 5.4: Expressions

Anschließend erfolgt eine Extrusion der erstellten Skizze. Um Schub und Torsion entsprechend berücksichtigen zu können, wird die Dicke des Modells entsprechend den jeweiligen Abmessungen individuell angepasst. Somit ergibt sich die Dicke des gesamten Modells aus dem doppelten Maximalwert aus den Gurt- und Stegdicken:

$$t = 2 * \max(tgurt, tsteg)$$

Während bei Stumpfstößen die Dicke logischerweise nur von der Gurtdicke abhängig ist, werden bei den Kreuzstößen tgurt, tsteg1 und tsteg2 miteinander verglichen.

Um in den Kerben eine hohe Feinheit des Mesh und somit eine ausreichende Genauigkeit zu erreichen, muss das Modell in verschiedene Bereiche unterteilt werden. Da in den Kerbbereichen mindestens fünf Elementreihen mit einer maximalen Kantenlänge von 0,2 mm vorhanden sein müssen, erfolgt die Unterteilung wie in Abbildung 5.5 dargestellt. [10]

Hierbei ist besonders hervorzuheben, dass zuerst die Kanten durch die Funktion *Project Curve* in die Skizzierebene projiziert werden müssen und diese anschließend mittels *Offset Curve* versetzt werden. Jede unnötige manuelle Bemaßung sollte vermieden und durch *Constraints* ersetzt werden, da unbedacht gewählte Bemaßungen häufig zu Fehlern und Abbrüchen während der Automatisierung führen können.

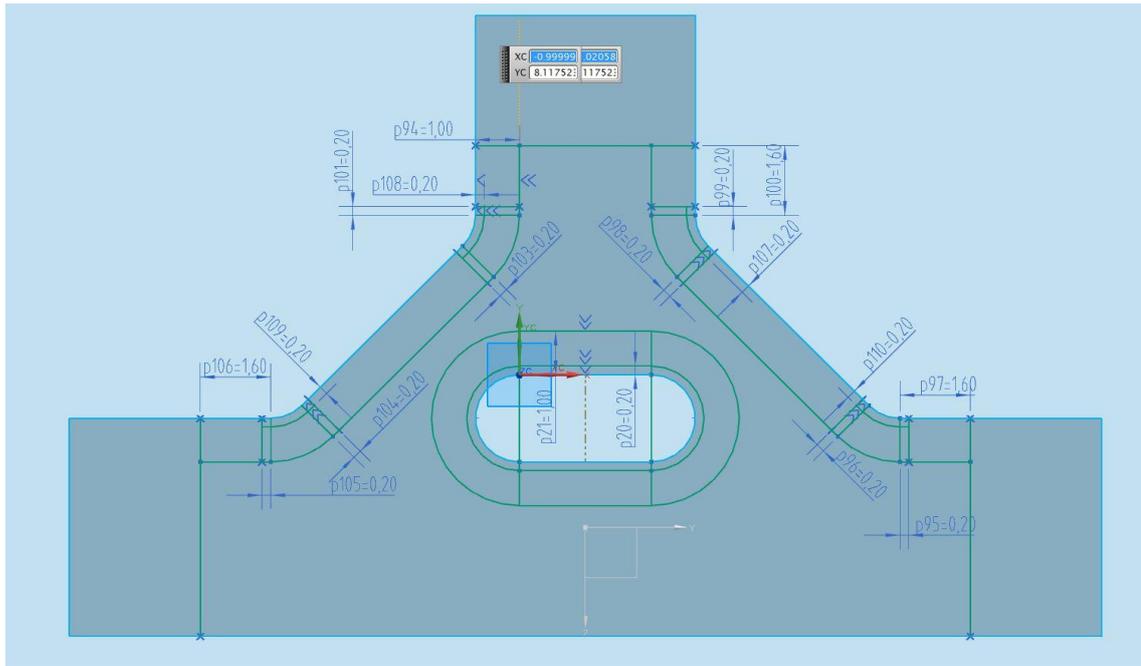


Abb. 5.5: Definition der Kerbregionen

Zuletzt wird die Skizze durch *Divide Face* gefestigt, sodass eine Weiterverarbeitung im idealisierten Part-File erfolgen kann.

5.3. Idealisiertes Part-File

Das idealisierte Part-File dient ursprünglich dazu, Bauteile mit komplexen Geometrien, die zu Schwierigkeiten in der Vernetzung während der Anwendung der FEM führen können, zu vereinfachen, um somit schnelle aber dennoch ausreichend genaue Simulationsergebnisse zu erhalten. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgen alle notwendigen Maßnahmen, um einerseits eine stabile automatische Vernetzung generieren zu können, und um andererseits eine gleichmäßige Kraft- und Momenteinleitung zu erhalten, in diesem File.

Zuerst werden die im Part-File definierten Bereiche um die Kerbzonen mittels *Split Body* auf die gegenüberliegende Seitenfläche projiziert und das Modell somit in viele kleine Einzelteile zerlegt. Dieser Schritt ermöglicht die Realisierung unterschiedlichster Netzstrukturen, wie später im FEM-File beschrieben wird. Hier ist besonders zu beachten, dass im Skizzenmodus der *Split Body* Funktion (*Select Curve*) die Grenzen des betrachteten Bereichs mit *Project Curve* und der anschließend Auswahl *Face Edges* hervorgehoben werden. Weiters muss ein Häkchen bei *Create Mesh Mating Conditions* gesetzt sein, damit später die FEM-Netze der entstandenen Einzelkörper miteinander verbunden sind.

5 Modellerstellung

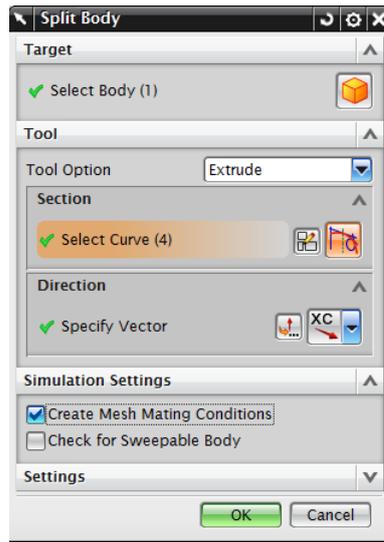


Abb. 5.6: Einstellungen *Split Body*

Als nächstes wird das Modell in Längsrichtung in vier Bereiche unterteilt, damit unterschiedliche Elementlängen ermöglicht werden können. Dieser Schritt ist unbedingt notwendig, um die ohnehin schon sehr aufwendige Berechnung von Volumsmodellen nicht unnötig zu verlängern. Die Unterteilung erfolgt mit drei in der Y-Z-Ebene befindlichen Ebenen, wobei die Mittelebene durch den Koordinatenursprung verläuft und die beiden anderen jeweils um 1 mm versetzt sind. Zur Unterteilung mit der Funktion *Divide Face* werden alle Außenflächen herangezogen.

Anschließend wird je eine Schale mit einer Breite von 0,2 mm an den Schnittufern angebracht. Diese Anschlusschalen befinden sich in der X-Y- und in der X-Z Ebene des Koordinatensystems.

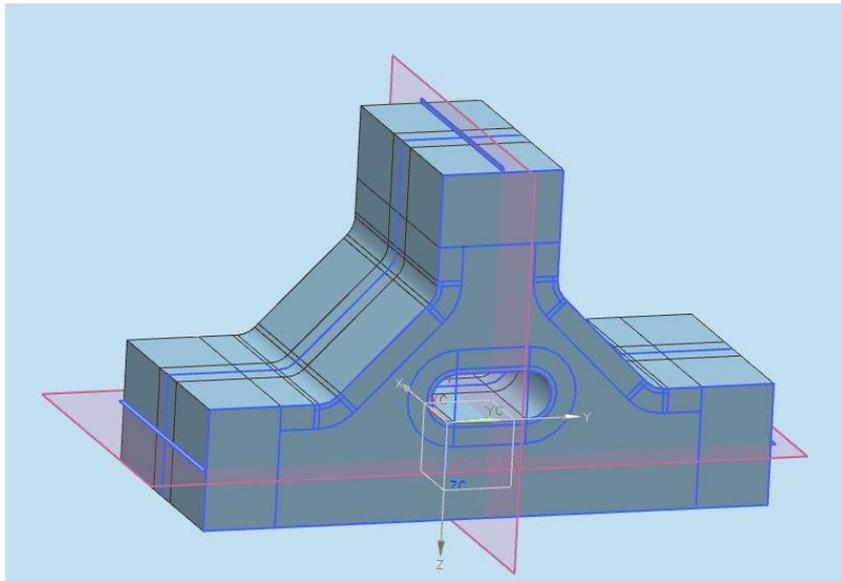


Abb. 5.7: fertiges idealisiertes Part-File

5.4. FEM-File

Das FEM-File bildet das Herzstück der Modellgenerierung, da die automatische Erstellung hier am häufigsten unterbrochen wird. Während bei sauber erstellten Modellen kaum Fehlermeldungen im Part- und idealisierten Part-File zu rechnen ist, kann die Vernetzungsqualität im FEM-File nur bedingt beeinflusst werden, da diese sehr stark von den Parametern des jeweiligen Schweißstoßes abhängen. Die Vernetzung des Modells erfolgt nun in sechs Schritten:

1. Vorgabe eines zweidimensionalen achtknotigen Schalenelementes (CQUAD8) an der Stirnseite
2. Definition der *Mesh-Control*
3. Erstellung des 20-knotigen Hexadernetzes (CHEXA20)
4. Gruppierung der auszuwertenden 3D-Mesh-Regionen
5. Anbringen der CROD Elemente in auszuwertenden Kerbregionen
6. Anbringen der CQUAD8 Elemente auf Anschlusschalen

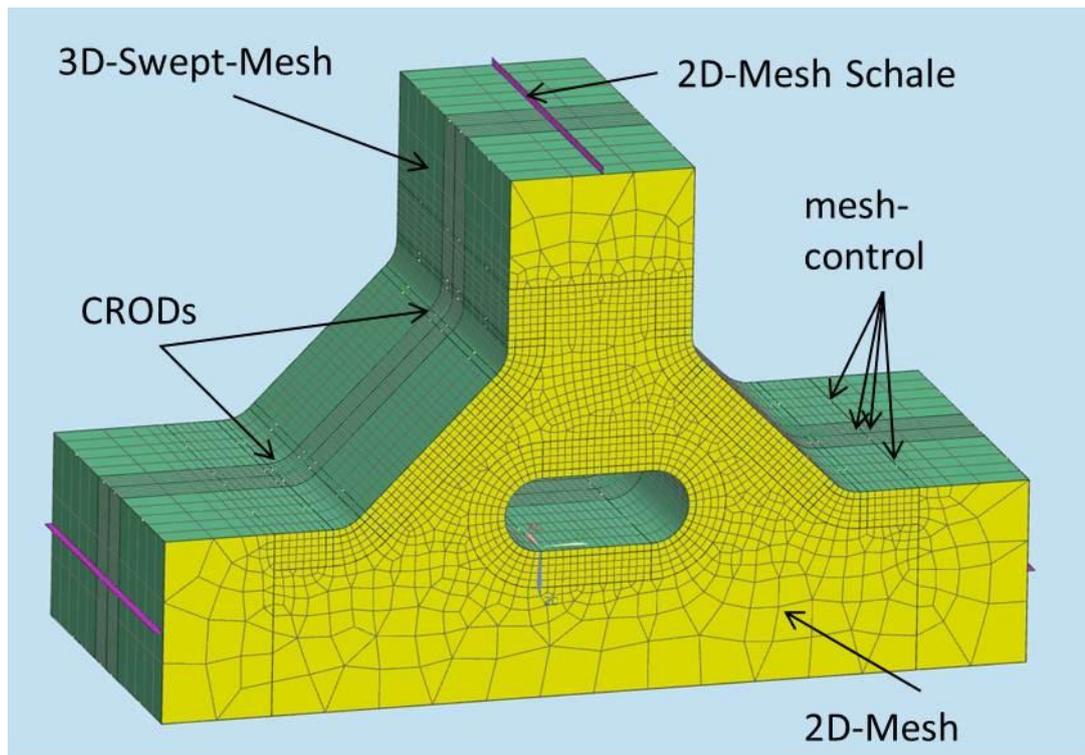


Abb. 5.8: Überblick FEM-File

5.4.1. Vorgabe des stirnseitigen CQUAD8-Netzes

Während in den Bereichen rund um die Kerben ein mapped Mesh aus CQUAD8 Elementen mit einer Elementgröße von 0,2 verwendet wird, werden sowohl der mittlere Bereich, als auch die Randgebiete hin zu den Schnittufern mit einem free Mesh gefüllt. Obwohl die Elementgröße des free Mesh für die Ermittlung der Kerbspannungen nur eine untergeordnete Rolle spielt, darf sie keinesfalls außer Acht gelassen werden, da sie mit Abstand am häufigsten zu einer Fehlermeldung und einem resultierenden Abbruch der Automatisierung führt. Sind die Elemente zu groß, kann das 2D-Netz aufgrund der zu starken Verzerrung nicht in ein Hexaedernetz übergeführt werden. Es gilt hierbei einen guten Kompromiss zwischen noch tolerierbarer Verzerrung und der Rechendauer zu finden. Meistens wird eine Elementgröße von 1 - 1,5 mm verwendet, wobei bei großen Modellen auch Werte bis zu 3,5 mm möglich sind.

Weiters sollte so gut es geht, auf Dreieckelemente verzichtet werden, was allerdings nicht immer möglich ist.

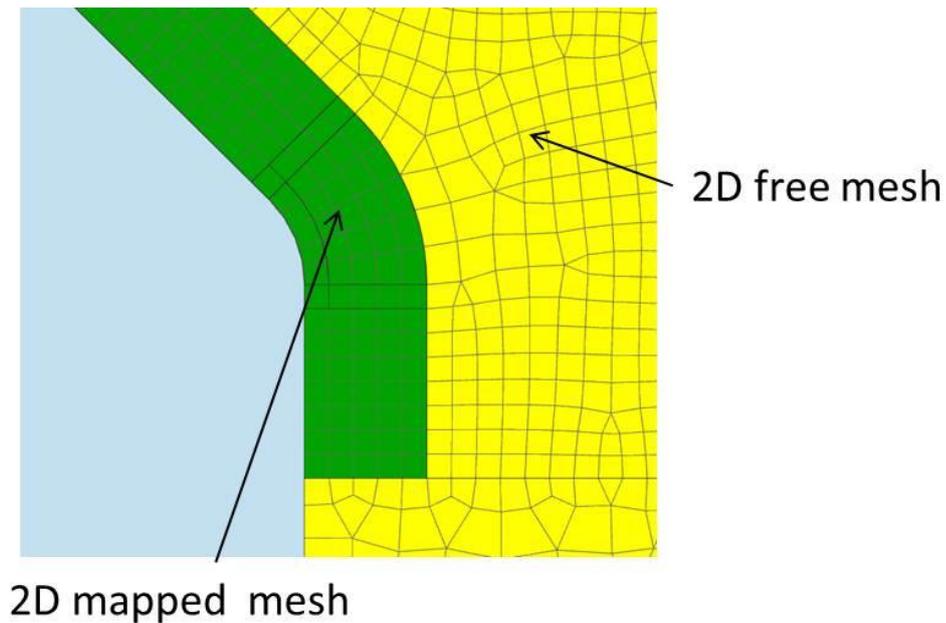


Abb. 5.9: 2D-Vernetzung

Die gesamten hier erstellten CQUAD8 Elemente dienen ausschließlich der Vorgabe eines klar definierten, stabil funktionierenden FEM-Netzes und werden nicht an den Solver weitergeleitet.

5.4.2. Definition der Mesh Control

Wie zuvor erwähnt, wird die gesamte Oberfläche des Modells im idealisierten Part-File in vier Bereiche unterteilt. Nun wird festgelegt, dass auf den Kanten der beiden äußeren Bereiche immer fünf Knotenpunkte angebracht sind (*Number on Edge*) und in den beiden inneren Bereichen die Länge der Elemente 0,2 mm beträgt (*Size on Edge*). Dies hat den Sinn, dass in der Mitte, wo schlussendlich die effektiven Kerbspannungen abgegriffen werden, quadratische CHEXA20 Elemente mit einer hohen Genauigkeit entstehen und in den Randbereichen ausreichend viele Knotenpunkte vorhanden sind, um eine homogene Kraft- bzw. Momenteinleitung gewährleisten zu können. Hierbei ist besonders darauf zu achten, dass die *mesh-control* ausschließlich auf den äußersten Kanten angebracht werden, da ansonsten kein durchgehendes Netz generiert werden kann.

5.4.3. Erstellung und Gruppierung der CHEXA20 Elemente

Die CHEXA20 Volumselemente werden anschließend mittels *3D-Swept-Mesh* in x-Richtung durch das Modell erzeugt. Da das Modell nun aus vielen Einzelteilen besteht, muss jeder Teil einzeln diesem Sweep unterzogen werden. Dies beansprucht viel Zeit und Geduld, kann aber mit der derzeitigen Softwareversion nicht anders gemacht werden.

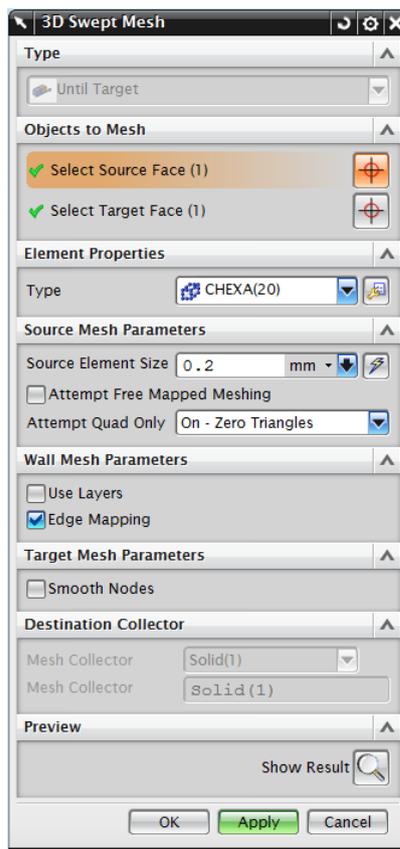


Abb. 5.10: Einstellungen 3D swept mesh

Anschließend werden die an die Kerbregionen angrenzenden 3D-Mesh zu einer Gruppe zusammengefasst. Für diese Gruppe werden in weiterer Folge die Berechnungsergebnisse in ein Punch-File (.pch) übertragen, welches danach für die Auswertung herangezogen wird.

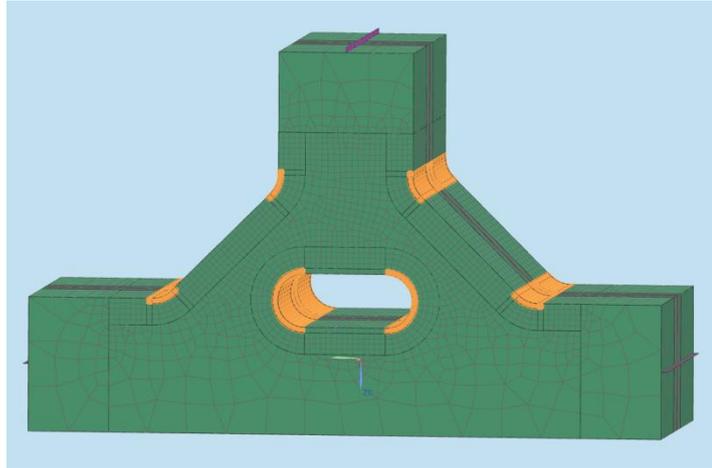


Abb. 5.11: Gruppierung der Kerbregionen

5.4.4. Anbringen der CROD-Elemente

Um die Lage der einzelnen Knotenpunkte in der Auswertung eindeutig definieren zu können und somit den genauen Ort, die Kerbe, mit der höchsten Belastung ermitteln zu können, werden alle Kerbregionen mit 1-dimensionalen CROD Elementen versehen. Jedem CROD Element wird ein eigener Collector zugeordnet, in welchem eine Fläche von $1 \cdot e^{-20} \text{ mm}^2$ definiert wird, um alle mechanischen Eigenschaften ausschließen zu können. Die CRODs müssen einer gleichbleibenden Nummerierung unterliegen, da sie ansonsten nicht weiterverarbeitet werden können. Diese Nummerierung ist bei allen Submodellen eines Schweißstoßes immer gleichbleibend einzuhalten. Abbildung 5.13 zeigt die Nummerierung für einen T_FD Stoß mit einer Gurtstärke über 6 mm. [5]

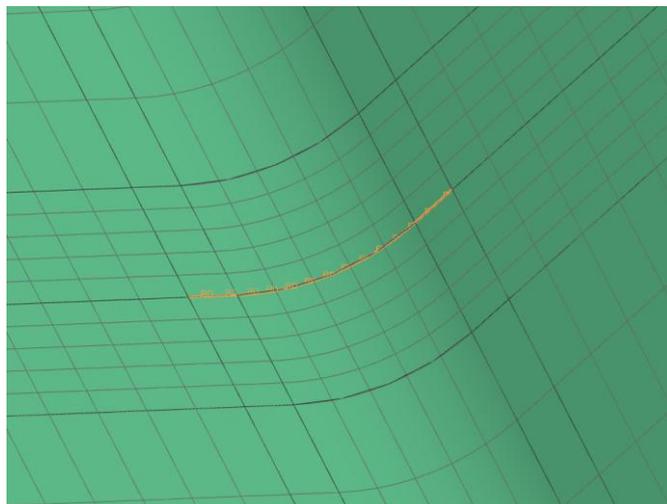


Abb. 5.12: CROD in Kerbe

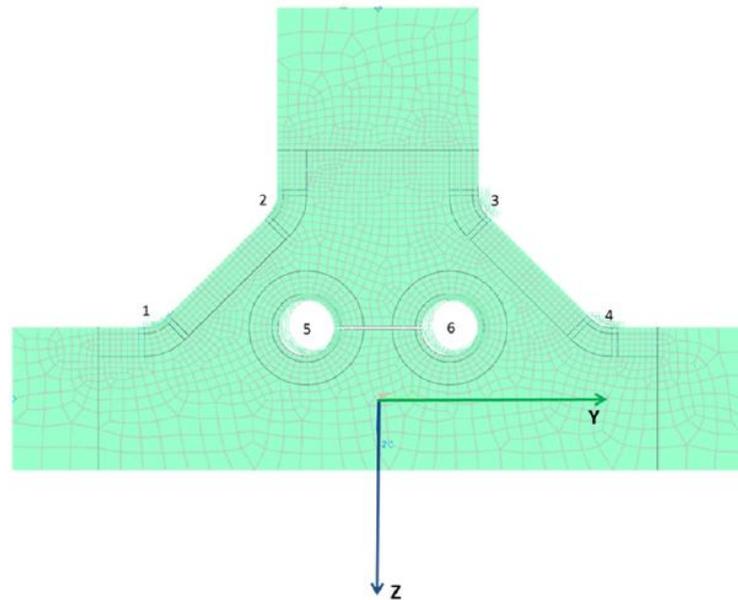


Abb. 5.13: Nummerierung CROD T_FD > 6 mm

Die genaue Anordnung und Nummerierung der CROD-Regionen jedes einzelnen Modells ist dem Anhang der Diplomarbeit von DI Matthias Wozasek zu entnehmen.

5.4.5. CQUAD8 Elemente auf Anschlusschalen

Als letztes müssen im FEM-File noch die Anschlusschalen mit 0,2 mm großen CQUAD8 Elementen vernetzt werden, wobei diese sehr wohl im Solver berücksichtigt werden müssen. Die Dicke der Schalen entspricht der Dicke des angrenzenden Schnittufers und wird mittels Expressions im Rahmen der Automatisierung selbstständig aktualisiert.

5.5. Sim-File

Nachdem das Modell vollständig generiert und vernetzt wurde, muss zuerst eine Verknüpfung der Anschlusschalen mit dem Modell erfolgen. Danach werden die Kräfte bzw. Momente an den Schalen angebracht und in die Schnittufer eingeleitet.

Die Verknüpfung der Schalen und des Modells erfolgt mittels der *Edge-Surface-Gluing* Funktion, welche erstmals in der 8. NX Version zur Verfügung steht. Hierfür müssen die angrenzenden Kanten der Anschlusschale und die vier unterteilten Bereiche des

5 Modellerstellung

Schnittufer ausgewählt und verbunden werden. Diese Methode ist nur mit einem geringen Aufwand verbunden und liefert sehr gute Ergebnisse.

Anfängliche Überlegungen bezüglich einer Verbindung durch RBE3 Spider-Elemente, wie in der Diplomarbeit von DI Robert Demal beschrieben, erwiesen sich im Rahmen dieser Arbeit als nicht zielführend. Genauere Erläuterungen hierzu sind in Kapitel 8 angeführt.

An jedem Schnittufer werden anschließend drei Kräfte und zwei Momente eingeleitet und einzeln berechnet:

- Normalkraft (N): positiver Zug vom Schnittufer weg
- Querkraft (Q): positiv am 1. Schnittufer, gegen Uhrzeigersinn umlaufend
- Schub (S): positiv in x-Richtung
- Biegemoment (M_b): um x-Achse
- Torsionsmoment (M_t): um y-Achse

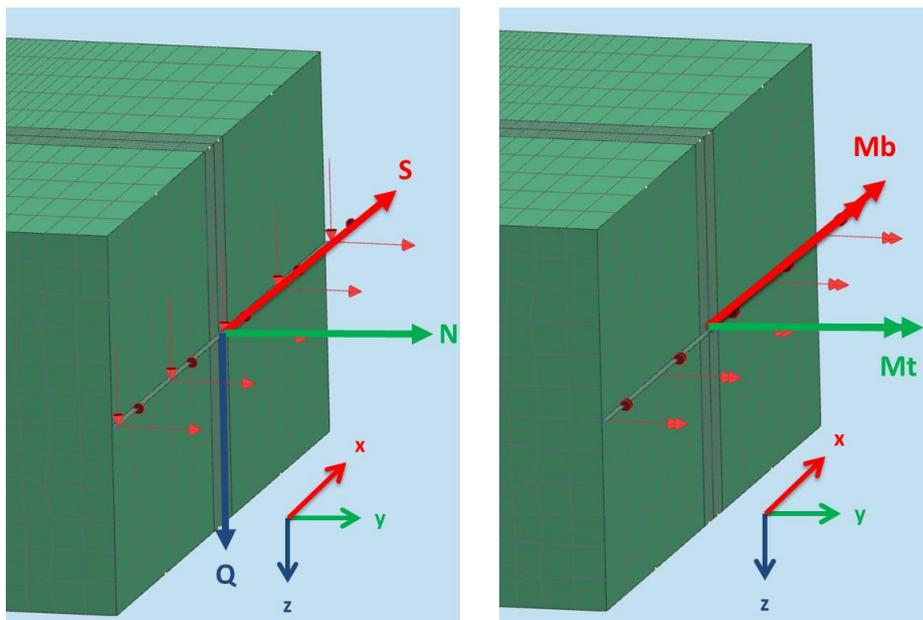


Abb. 5.14: Kraft- (links) und Momenteinleitung (rechts) am ersten Schnittufer

Die Richtung der Schnittgrößen verändert sich entsprechend den üblichen Konventionen. Da die Ergebnisse dieser Simulation zu einem Kerbfallkatalog zusammengefasst werden und dieser mit den Belastungen aus den globalen Strukturmodellen abgeglichen wird, werden alle Kräfte mit 1 N und alle Momente mit 1 Nmm versehen.

Für jeden Lastfall wird in NX ein eigener Subcase angelegt, sodass die Spannungsergebnisse für jeden Subcase einzeln berechnet werden können, d.h., dass jeder

5 Modellerstellung

Subcase nur eine Belastung für ein bestimmtes Schnittufer enthält. In NX sieht die Unterteilung des Solution-Baumes folgendermaßen aus:



Abb. 5.15: Subcases

Für einen Stumpfstoß ergeben sich somit für zwei Schnittufer und jeweils drei aufgebrauchten Einheitskräfte und jeweils 2 aufgebrauchten Einheitsmomenten insgesamt 10 Subcases. Ein T-Stoß besitzt 15 (3 x 5), ein Kreuzstoß 20 (4 x 5).

Wie in den Theorie-Kapiteln vorweggenommen erfolgt die gesamte Simulation linear-statisch mit dem Solver *Sestatic 101*, welcher in den Solver Einstellungen zu definieren ist. Weiters muss hier *Inertia Relief* ausgewählt werden.

Unter dem Menüpunkt *Output Requests* ist die Gruppe der CRODs auszuwählen und ein Punch-File als gewünschter Ergebnis-Output zu definieren. Somit werden nur die für die spätere Auswertung relevanten Spannungsergebnisse der Kerbbereiche in das Punch-File geschrieben. Ist keine Gruppe definiert, liefert der Solver zu viele Daten, was die Matlab-Auswertung beinahe unmöglich macht.

6. Unterstützende Tools

6.1. NX-Journal

Aufgrund der Vielzahl an für den Kerbfallkatalog relevanten Modellen und deren Variationen von Gurt- und Stegblechstärken kann keine manuelle Modellerstellung und Simulation mehr von statten gehen. Deshalb wurde von DI Matthias Wozasek ein Tool entwickelt, das ausgehend von einem Basismodell die Ableitung aller weiteren Modelle desselben Typs ermöglicht.

6.1.1. Allgemein

Dieses Tool wird in NX als Journal bezeichnet und ist nichts anderes als ein selbstständig ablaufendes Makro. Allerdings bietet es die Möglichkeit, zusätzliche Befehle manuell einzuprogrammieren und somit eine gezielte Steuerung zu ermöglichen. NX unterstützt die Programmierung durch die Schnittstelle NXOpen. Grundsätzlich werden alle gängigen Programmiersprachen wie C#, Java oder Visual Basic unterstützt.

Im vorliegenden Fall fiel die Entscheidung der Programmiersprache auf vb.net, der neuesten Version von Visual Basic, da hier die Programmierung mit einem überschaubaren Aufwand einfach umzusetzen war.

Aufgrund der unterschiedlichsten Speicherorte und Charakterisierungen steht für jedes Detailmodell ein eigenes Journal zur Verfügung. Der meiste Programmcode wurde mittels der Recorder-Funktion aufgezeichnet und anschließend klar strukturiert, damit nur die wichtigsten Befehle ausgeführt werden. Somit kann hier einiges an Erstellungszeit eingespart werden.

6.1.2. Aufbau des Journals

Ein wichtiger Punkt dieser Arbeit ist, die Vorgehensweise des Makros zu verstehen, um es in weiterer Folge auf ähnliche Anwendungsgebiete übertragen zu können. Aus diesem Grund wird nun der Ablauf genauer beschrieben. Obwohl jedes Journal individuell auf das jeweilige Modell angepasst ist, ist der grundsätzliche Ablauf bei jedem gleich.

Abbildung 6.1 zeigt den vereinfachten Aufbau der verwendeten Journals, welcher für alle Modelle gültig ist. In weiterer Folge werden anhand eines Kreuzstoßes die wichtigsten Bereiche des Skripts erläutert und durch Auszüge des Codes unterlegt. Der gesamte Programmcode am Beispiel des behandelten Kreuzstoßes ist dem Anhang zu entnehmen.

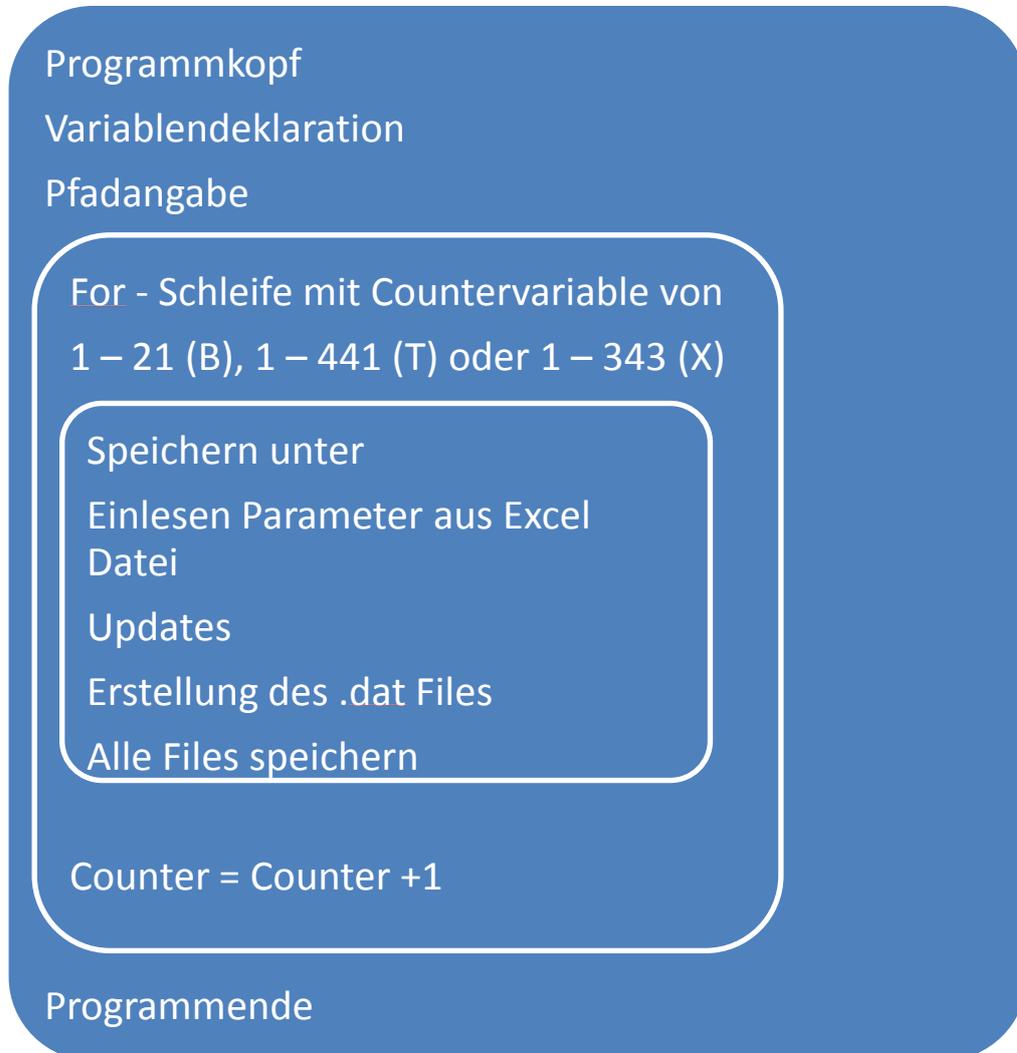


Abb. 6.1: Aufbau NX Journal

Nach den üblichen Definitionen der Importe und Standardvariablen im Programmkopf, werden als erstes die Variablen für den Dateinamen des Speicherpfades und der Excel-Parameter-Datei deklariert. Anschließend folgt die Definition eines Blockes aus Variablen, welche im Rahmen der fortlaufenden Aktualisierung im Part-File verändert werden müssen. Alle Variablen dieses Blockes besitzen die Endung „_location“, was ein Indiz für die Einlesung aus dem Excel-File darstellt. Um auf die laufenden Prozesse des Betriebssystems zugreifen und diese auch sinnvoll nutzen zu können, müssen folgende Systembefehle in das Skript importiert werden:

6 Unterstützende Tools

- Imports System.Collections
- Imports System.Diagnostics
- Imports System.Threading

Ansonsten würde der Code aufgrund der zunehmenden Längen der Befehlsbezeichnungen nur unnötig verkompliziert werden.

```
' -----  
'   Variablendeklaration  
' -----  
  
Dim Counter As Integer = 1  
  
Dim Filename As String           = "X_YS_YB_"  
Dim Ifileending As String        = "_fem1_i"  
Dim Femfileending As String      = "_fem1"  
Dim Simfileending As String      = "_sim1"  
  
Dim Pathname As String =  
"C:\Users\mbican\Documents\Edge-Face-Gluing\X_YS_YB\Solutions1\  
Dim xls_name As String =  
"C:\Users\mbican\Documents\Edge-Face-Gluing\X_YS_YB\X_YS_YB_0.xlsx"  
Dim tab_name As String = "Tabelle1"  
  
Dim tgurt_location As String  
Dim tsteg1_location As String  
Dim tsteg2_location As String  
Dim abackYB_location As String  
Dim adeckYB_location As String  
Dim cYB_location As String  
Dim alphabackYB_location as String  
Dim alphadeckYB_location As String  
Dim eYB_location As String  
Dim aYS_location As String  
Dim cYS_location As String  
Dim alphaYS_location As String
```

6 Unterstützende Tools

Als zentraler Punkt des Skripts wird eine For-Schleife ausgeführt, welche eine Durchlaufvariable („Counter“) von 1 bis zum Endwert des jeweiligen Stoßes variiert. Stumpfstöße laufen demnach von 1 – 21, T-Stöße von 1 – 441 und Kreuzstöße von 1 – 343. Innerhalb dieser Schleife laufen alle notwendigen Prozesse ab. Ist der Endwert der Schleife erreicht, wird auch das Skript beendet. Tritt innerhalb der Schleife an irgendeiner Stelle ein Fehler bei der Generierung des Modells auf, wird das Skript an exakt dieser Stelle gestoppt und es kann manuell eingegriffen und die Fehler behoben werden. Soll danach das Journal wieder weiterlaufen, muss der Start entsprechend dem nächsten Modell angepasst werden. Weiters kann eine Schrittweite angegeben werden, die aber im vorliegenden Fall immer 1 beträgt. Die Schleife ist einfach definiert durch:

```
For Counter = 1 To 343 Step 1
```

Speziell bei Schweißstößen mit mehreren Submodellen ist es unbedingt notwendig, ein Entscheidungskriterium festzulegen, unter welchen Voraussetzungen das jeweilige Submodell zu wählen ist. Dies ist im speziellen bei T_FD, T_YS und allen Kreuzstößen (X_...) der Fall. Aus diesem Grund wird als nächstes eine *If*-Bedingung implementiert, die diese Auswahl trifft. Ist die Bedingung nicht erfüllt, wird die Variation der Counter-Variable unverzüglich fortgesetzt. Alle Definitionen sind in den Tabellen des Kapitels 4 zusammengefasst.

Im beschriebenen Fall eines X_YS_YB Stoßes mit dem ersten Submodell sieht dies folgendermaßen aus:

```
If (tsteg1 < 11 And tsteg2 < 11 And tsteg1 >= tsteg2) Then
```

Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Werte für die Parameter-Variablen vorliegen, müssen diese aus dem Excel-File importiert werden, um sie anschließend miteinander vergleichen zu können. Die Auslesung aus dem Excel-File erfolgt über die Funktion *ug_cell_read*. Unter Verwendung von jeweils drei Anführungszeichen vor und nach dem jeweiligen Wert werden zuerst die Bezeichnung der Excel-Datei, der Name des Tabellenblattes und abschließend die Zelle angegeben.

6 Unterstützende Tools

```
' -----  
'   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)
```

Da nun das nächste Modell eindeutig definiert wurde, kann mit der eigentlichen Modellerstellung begonnen werden. Als erstes werden ausgehend vom Part-File alle vier zur Simulation notwendigen Dateien unter einem neuem Namen gespeichert. Dies erfolgt mittels einer Reihe von einfachen Save As Befehlen, wobei das neue Modell den Dateinamen entsprechend ihrer im Excel-File definierten Counter-Variable erhält.

6 Unterstützende Tools

```
' -----  
'   Menu: File->Save As...  
' -----  
  
Dim partSaveStatus1 As PartSaveStatus  
partSaveStatus1 =  
workPart.SaveAs(Pathname + Filename + CStr(Counter) + ".prt")  
partSaveStatus1.Dispose()  
  
Dim part2 As Part = CType(theSession.Parts.FindObject(  
Filename + CStr(workpartcounter) + 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(workpartcounter) + 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(workpartcounter) + Simfileending), CAE.SimPart)  
Dim partSaveStatus4 As PartSaveStatus  
partSaveStatus4 = simPart1.SaveAs(Pathname + Filename +  
CStr(Counter) +Simfileending +".sim")  
partSaveStatus4.Dispose()
```

Als nächstes werden im neu kreierte Part-File die alten Parameter ersetzt. Dies erfolgt, wie zuvor bereits angedeutet, durch Expressions. Jede Expression muss eindeutig im Part-File des Detailmodells angelegt werden. Nun wird aus einer bestimmten Zelle des Excel-Files der Wert ausgelesen und der entsprechenden Expression zugeordnet. Die Einpflegung in NX geschieht schließlich durch *workpart.Expressions.EditwithUnits*. Demnach müssen ebenfalls die verwendeten Einheiten, unit1 für Längenbemaßungen in Millimeter und unit2 für Winkel in Grad, festgelegt werden. Die genaue Programmierung ist nachfolgendem Code zu entnehmen, mit welchem 12 Expressions geladen werden. Beispielsweise sind die ersten vier angeführt:

6 Unterstützende Tools

```
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("tsteg1"), Expression)
workPart.Expressions.EditWithUnits(expression2, unit1,
"ug_cell_read(""" &xls_name &""", "" &tab_name & "!"
&tsteg1_location &""")")

Dim expression3 As Expression =
CType(workPart.Expressions.FindObject("tsteg2"), Expression)
workPart.Expressions.EditWithUnits(expression3, unit1,
"ug_cell_read(""" &xls_name &""", "" &tab_name & "!"
&tsteg2_location &""")")

Dim expression4 As Expression =
CType(workPart.Expressions.FindObject("abackYB"), Expression)
abackYB_location = "E" + CStr(Counter+1)
workPart.Expressions.EditWithUnits(expression4, unit1,
"ug_cell_read(""" &xls_name &""", "" &tab_name & "!"
&abackYB_location &""")")
.
.
Dim nErrs1 As Integer
nErrs1 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId2)
```

Sollte sich nach diesem Schritt eine Fehlermeldung ergeben, so ist das Modell defekt und muss ausgehend von der ersten Skizze im Part-File komplett neu aufgebaut werden. Meistens sind *constraints* nicht ausreichend definiert oder *offsets* verlieren ihre Bezugskante.

6 Unterstützende Tools

Als nächstes werden das idealisierte Part-File, das FEM-File und schließlich das Sim-File upgedated. Die mit Abstand häufigste Abbruchmeldung tritt auf, wenn alle Updates durchlaufen sind und das Journal schließlich versucht, dem Solver einen schadhafte Input zu übermitteln. Zu 90% konnte in diesem Fall der mittlere 2D-free-mesh nicht auf ein CHEXA20 Netz übergeführt werden. Abhilfe kann durch kleinere, oder in Ausnahmefällen auch größere, Elemente erreicht werden. Hierfür gibt es leider kein allgemein gültiges Rezept, sondern das passende Netz muss entsprechend dem „trial and error“ Prinzip ausgeforscht werden.

Aufgrund der Lasteinbringung über 2D-Schalenelemente muss deren Dicke entsprechend der Breite des Schnittufers individuell angepasst werden. Aus diesem Grund müssen auch in das FEM-File Expressions eingebaut werden. Sowohl das Definieren der Variablen und der Einheiten, als auch das Einlesen aus dem Excel-File funktioniert analog zum Part-File. Der große Unterschied zu den zuvor erläuterten Expressions liegt darin, dass hier eine Reihe von manuellen Aktionen durchlaufen werden müssen, da keine expliziten Befehle zur Eingabe von Werten in einen bestimmten Meshcollector von NXOpen unterstützt werden. Jedes Fenster muss, wie in der manuellen Verarbeitung, zuerst geöffnet und am Ende wieder geschlossen werden, bis sich schließlich der gewünschte Wert im Meshcollector der Schale befindet. Aus diesem Grund müssen im FEM-File die Anschlussschalen immer einem bestimmten Meshcollector zugeordnet sein, da sonst die Automatisierung nicht funktionieren würde. Nachfolgend der Code für die Definition der Gurtstärke, die beiden Stegdicken sind analog definiert:

6 Unterstützende Tools

```
' -----  
'   Expressions für Schalendicke --> tgurt  
' -----  
  
Dim expression13 As Expression =  
CType(workFemPart.Expressions.FindObject("tgurt"), Expression)  
Dim unit3 As Unit =  
CType(workFemPart.UnitCollection.FindObject("MilliMeter"), Unit)  
  
workFemPart.Expressions.EditWithUnits(expression13, unit3,  
"ug_cell_read(""" &xls_name &""", "" &tab_name & ""!"  
&tgurt_location &""")")  
  
Dim nErrs100 As Integer  
nErrs1 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId100)  
  
Dim markId101 As Session.UndoMarkId  
markId101 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible,  
"Start")  
  
Dim fEModel2 As CAE.FEModel =  
CType(workFemPart.FindObject("FEModel"), CAE.FEModel)  
  
Dim meshManager1 As CAE.MeshManager =  
CType(fEModel2.Find("MeshManager"), CAE.MeshManager)  
  
Dim meshCollector1 As CAE.MeshCollector =  
CType(meshManager1.FindObject("MeshCollector[ThinShell(1)]"),  
CAE.MeshCollector)  
  
Dim meshCollectorBuilder1 As CAE.MeshCollectorBuilder  
meshCollectorBuilder1 =  
meshManager1.CreateCollectorBuilder(meshCollector1, "ThinShell")  
  
theSession.SetUndoMarkName(markId101, "Mesh Collector Dialog")  
  
Dim markId102 As Session.UndoMarkId  
markId102 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible,  
"Start")
```

6 Unterstützende Tools

```
Dim physicalPropertyTable1 As CAE.PhysicalPropertyTable =
CType(workFemPart.PhysicalPropertyTables.FindObject("PhysPropTable[P
SHELL1]"), CAE.PhysicalPropertyTable)

Dim propertyTable1 As CAE.PropertyTable
propertyTable1 = physicalPropertyTable1.PropertyTable

theSession.SetUndoMarkName(markId102, "PSHELL Dialog")

' -----
'   Dialog Begin Expressions
' -----

Dim markId103 As Session.UndoMarkId
markId103 = theSession.SetUndoMark(
Session.MarkVisibility.Invisible, "PSHELL")

Dim markId104 As Session.UndoMarkId
markId104 = theSession.SetUndoMark(
Session.MarkVisibility.Invisible, Nothing)

propertyTable1.SetTablePropertyWithoutValue("bending material")
propertyTable1.SetTablePropertyWithoutValue(
"transverse shear material")
propertyTable1.SetTablePropertyWithoutValue(
"membrane-bending coupling material")
propertyTable1.SetScalarWithDataPropertyValue(
"element thickness", "tgurt", unit1)

Dim nErrs101 As Integer
nErrs101 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId104)

theSession.DeleteUndoMark(markId104, Nothing)
theSession.DeleteUndoMark(markId103, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId102, "PSHELL")
theSession.DeleteUndoMark(markId102, Nothing)

Dim markId105 As Session.UndoMarkId
```

6 Unterstützende Tools

```
markId105 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible,  
"Mesh Collector")
```

```
Dim nXObject1 As NXObject  
nXObject1 = meshCollectorBuilder1.Commit()
```

```
theSession.DeleteUndoMark(markId105, Nothing)  
theSession.SetUndoMarkName(markId101, "Mesh Collector")  
meshCollectorBuilder1.Destroy()  
theSession.DeleteUndoMark(markId101, Nothing)
```

Weiters kann aufgrund der langen Rechenzeiten nicht mehr ein standardisiertes Zeitfenster für die Simulation vorgegeben werden. Deswegen wird direkt auf den Prozess „*nastran.exe*“ zugegriffen und abgewartet, bis dieser beendet wird. Die Umsetzung erfolgt im Rahmen einer *for*-Schleife, die mit einer kurzen Pause sehr oft durchlaufen wird. Dies ist keine elegante Methode, verlangsamt aber die zur Verfügung stehenden Kapazitäten tolerierbar.

```
Try  
    Dim i As Integer  
    Dim processName As String = "nastran"  
    Dim nastranProcess As Process()  
  
    For i=0 To 1000000000  
        nastranProcess = Process.GetProcessesByName(ProcessName)  
  
        If nastranProcess.Length=0 Then  
            Exit For  
  
            Else  
                Sleep(2000)  
            End If  
        Next i  
        Catch ex As Exception  
            MsgBox("Error!")  
    End Try
```

Zum Schluss werden alle offenen Bedingungen und Schleifen beendet.

6.2. Batch-File

Da es aufgrund der enormen Rechenzeiten unmöglich ist, Modellerstellung und Simulation ähnlich wie bei den 2D Modellen in einer Abfolge auf dem lokalen Rechner ablaufen zu lassen, erfolgt die Berechnung auf einer externen Workstation mit deutlich mehr Arbeitsspeicher und schnelleren Prozessoren. Der Zugriff auf diese Workstation erfolgt per Remote-Desktop.

Um den Solver NX Nastran direkt und ohne die Benutzeroberfläche NX ansteuern zu können, bedarf es einer kleinen ausführbaren Datei, dem Batch-File (.bat).

6.2.1. Allgemeines zum Batch-File

Batch-Files ermöglichen eine vereinfachte Handhabung von gleichbleibenden, sich oft wiederholenden Handlungen in Windows Betriebssystemen. Diese beinhalten eine Reihe von einzelnen Befehlen, die schließlich, ähnlich wie in alten MS DOS Versionen, im Kommandofenster („cmd.exe“) ausgeführt werden. Die eindeutige Kennzeichnung erfolgt durch die Endung *.bat* im Dateinamen. Üblicherweise werden Kommandos wie *for*, *goto* oder *if* verwendet. [11]

6.2.2. Aufbau des Batch-Files im speziellen Fall

Beispielsweise ist für den X_YS_YB Stoß ein Code angeführt. Die Farbgestaltung entspricht der des verwendeten Programms Notepad++, einem Freeware Text-Editor. Folgende Zeilen sind in einen Text-Editor zu schreiben und anschließend als *.bat* abzuspeichern:

6 Unterstützende Tools

```
set %%i = 1

for /L %%i IN (1 1 343) DO (

call "C:\Program Files\Siemens\NX 8.0\NXNASTRAN\nxn8p1\em64tnt1\
nastran.exe" -j
"D:\daten\Berechnungen\X_YS_YB\Solutions2\x_ys_yb_%%i_sim1-
solution_1.dat" memory=50gb sdir="F:\temp"

del x_ys_yb_%%i_sim1-solution_1.DBALL )
```

Als erstes wird mittels *set* die Durchlaufvariable definiert. Definitionsgemäß braucht diese zu Beginn einen Wert, weswegen sie mit 1 deklariert wird. Als nächstes wird eine *for*-Schleife gestartet, die von ersten bis zur letzten Modellnummer durchläuft. Der erste Wert in der Klammer gibt den Startwert, der zweite die Schrittweite und der dritte den Endwert der Schleife an. Als nächstes wird mittels *call* der Solver direkt aufgerufen und unmittelbar danach das Solver-Input-File ausgewählt. Das Kommando *call* besitzt den entscheidenden Vorteil, dass es wartet, bis das Programm ordnungsgemäß beendet wurde und erst dann den nächsten Schritt in der *for*-Schleife zulässt. Deshalb wurde sie dem üblicherweise verwendeten *start* Befehl vorgezogen. Die restlichen Beiwerte definieren den zu verwendenden Arbeitsspeicher (*memory*) und den Speicherort der temporären Files (*sdir*). Zum Schluss wird eine spezielle Datei (.DBALL) gelöscht, da diese zwar als Sicherungsdatei von NX Nastran abgespeichert wird, trotz ihres enormen Speicherplatzbedarfs von etwa 50 GB jedoch keine verwertbaren Informationen enthält.

Für alle anderen Stöße wird lediglich der Endwert der *For*-Schleife und der Speicherort des Solver-Input-Files geändert.

6.2.3. Erweiterungsmöglichkeiten

Mittels eines Batch-Files können noch weitere Parameter dem Solver-Input-File mitgegeben werden. Diese sind dem NX Nastran Quick Reference Guide (Nastran-Hilfe) unter *The nastran Command* zu entnehmen.

Speziell für langwierige, aufwendige Festigkeitsberechnungen bietet es sich an, die einzelnen Kerne der Prozessoren individuell anzusteuern. Somit kann die Rechenzeit

6 Unterstützende Tools

deutlich verkürzt werden, da es zu keinen Überschneidungen zwischen den gleichzeitigen Ein- und Auslagerungen der temporären Daten kommt. Die Ansteuerung kann mittels *affinity* vorgenommen werden.

Die Einbindung kann beispielsweise folgendermaßen aussehen:

```
start /affinity 0000ffff notepad.exe → Notepad: Start auf ersten 16 Kernen
```

```
start /affinity ffff0000 notepad.exe → Notepad: Start auf letzten 16 Kernen
```

Die Ansteuerung erfolgt laut Definition über eine Hexadezimalzahl. Zuvor muss allerdings eine Binaryzahl erstellt werden, wobei jedem Kern eine Stelle zugeschrieben wird. Bei zwei Prozessoren mit je 16 Kernen ergeben sich somit 32 Stellen, wobei der erste Kern an der letzten Stelle angesteuert wird. Setzt man die Stelle auf 0, ist der Kern nicht aktiv. Setzt man sie auf 1, ist er aktiv. [12]

Im Rahmen dieser Arbeit konnte *affinity* nach intensivsten Bemühungen leider nicht eingesetzt werden, da es nicht mit der *call* Funktion kompatibel ist.

7. Auswertung der Spannungsergebnisse und Erstellung der Kerbfalltafeln

Nachdem nun alle Simulationsschritte abgeschlossen sind, werden die erhaltenen Ergebnisse im letzten Schritt zu Kerbfallmatrizen weiterverarbeitet. Diese Kerbfallmatrizen werden anschließend von *Siemens* im Rahmen der Betriebsfestigkeitsbewertung nach IIW mit den Ergebnissen aus ihren globalen Strukturmodellen zusammengeführt. Der genaue Algorithmus zur Betriebsfestigkeitsbewertung wird von *Siemens* selbst programmiert. Hierfür wird ein Matlab-Tool verwendet, welches DI Uwe Oßberger für zweidimensionale Fälle entwickelte. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Programm zur Lösung der 3D-Problematik weiterentwickelt und in manchen Bereichen erweitert. Diese Weiterentwicklung umfasste neben der Umstellung von CQUAD8 Elementen auf CHEXA20 Elementen auch die Integration von variablen Modelllängen und die Bestimmung von räumlichen Hauptnormalspannungen. Somit ergibt sich, dass nun für jede Stoßart ein eigenes Tool zur Verfügung steht.

7.1. Vorgehensweise

Grundsätzlich gliedert sich die Auswertung in zwei Bereiche:

- eine manuelle Eingabemaske, in der die Eigenschaften des jeweiligen Stoßes festgelegt werden
- ein automatisch ablaufendes Matlab-Skript, das bestimmte Parameter aus dem Solver-Input-File (.dat) und dem Ergebnis-File (.pch) ausliest und anschließend zu einer fertigen Kerbfalltafel weiterverarbeitet

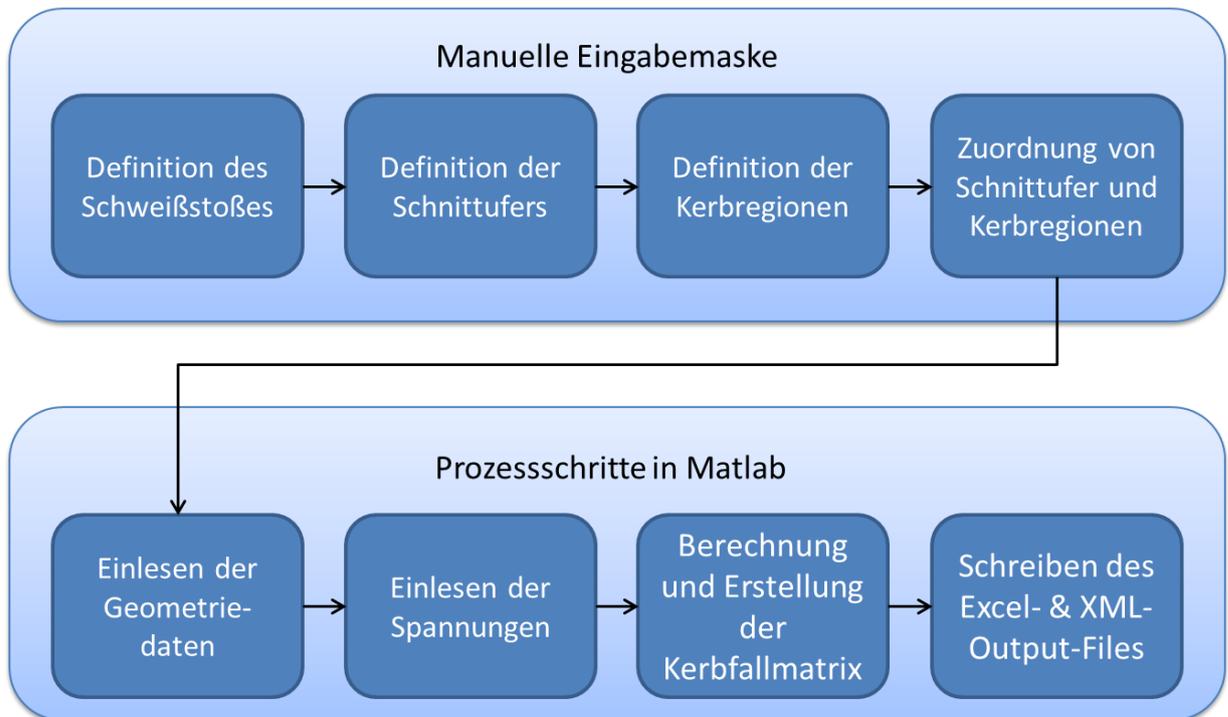


Abb. 7.1: Vorgehensweise Matlab-Skript

Beide Bereiche sind in das Matlab-Tool einprogrammiert und werden Schritt für Schritt durch eine *Executing-File* gesteuert ausgeführt. Da das Tool aus insgesamt zehn Einzelskripten und zwei Funktionen besteht, bietet es sich an, alle zusammen in eine selbstaufführende *.exe-Datei* zu kompilieren. Hierbei läuft das gesamte Tool nach Eingabe der erforderlichen Parameter im Hintergrund ab, ohne jegliche Informationen bezüglich des Bearbeitungsstandes zu übermitteln, bis es sich schließlich selbstständig schließt. Falls eine Überwachung der ablaufenden Schritte notwendig sein sollte, um somit den genauen Ort einer Fehlermeldung zu eruieren, bietet es sich an, alle Einzelskripte und Funktionen in den Ordner der *.dat* und *.pch*-Files zu kopieren und diese dort in Matlab auszuführen. Wichtig hierbei ist, dass sich alle notwendigen Dateien immer im gleichen Ordner befinden müssen. Aufgrund der variablen Modelllänge, muss sich auch das Excel-Parameter-File in diesem Ordner befinden.

7.2. Manuelle Eingabemaske

Für die Auswertung muss für jeden Schweißstoß die manuelle Eingabemaske extra ausgefüllt werden. Nachdem die erforderlichen Dateien aller Submodelle in einen gemeinsamen Ordner zusammengeführt wurden, kann das Tool gestartet werden und die Eingabe, wie in Abbildung 7.2 genau beschrieben, erfolgen.

Sind alle erforderlichen Daten vorhanden, beginnt das Skript mit der automatischen Auswertung. Die Auswertung kann je nach Anzahl der Schnittufer und auswertbaren Kerben mitunter mehrere Tage dauern.

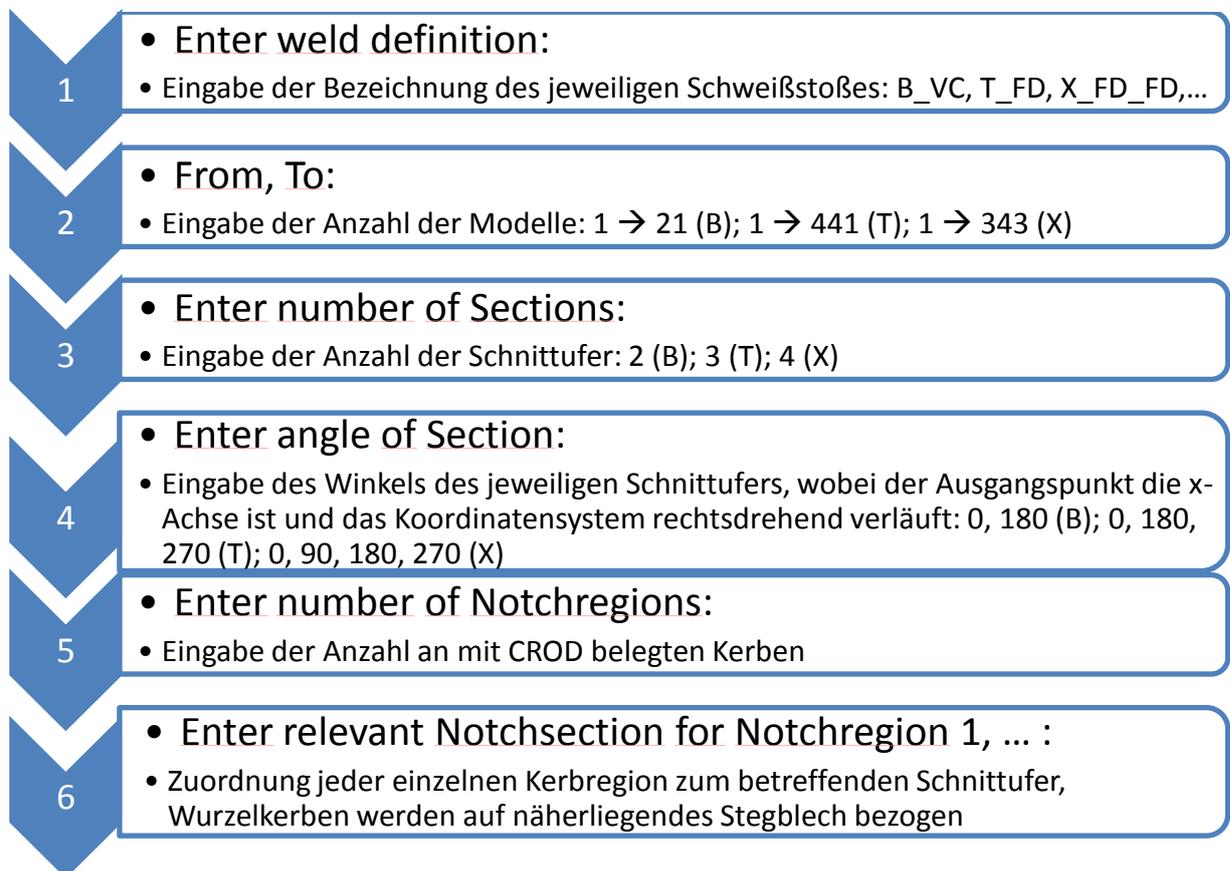


Abb. 7.2: Eingabemaske Matlab-Tool

7 Auswertung der Spannungsergebnisse und Erstellung der Kerbfalltafeln

Nachfolgende Abbildung zeigt die Nummerierung der vorhin erwähnten Bezeichnung anhand eines X_FD_FD- Stoßes. Für alle anderen Modelle erfolgt die Nummerierung analog.

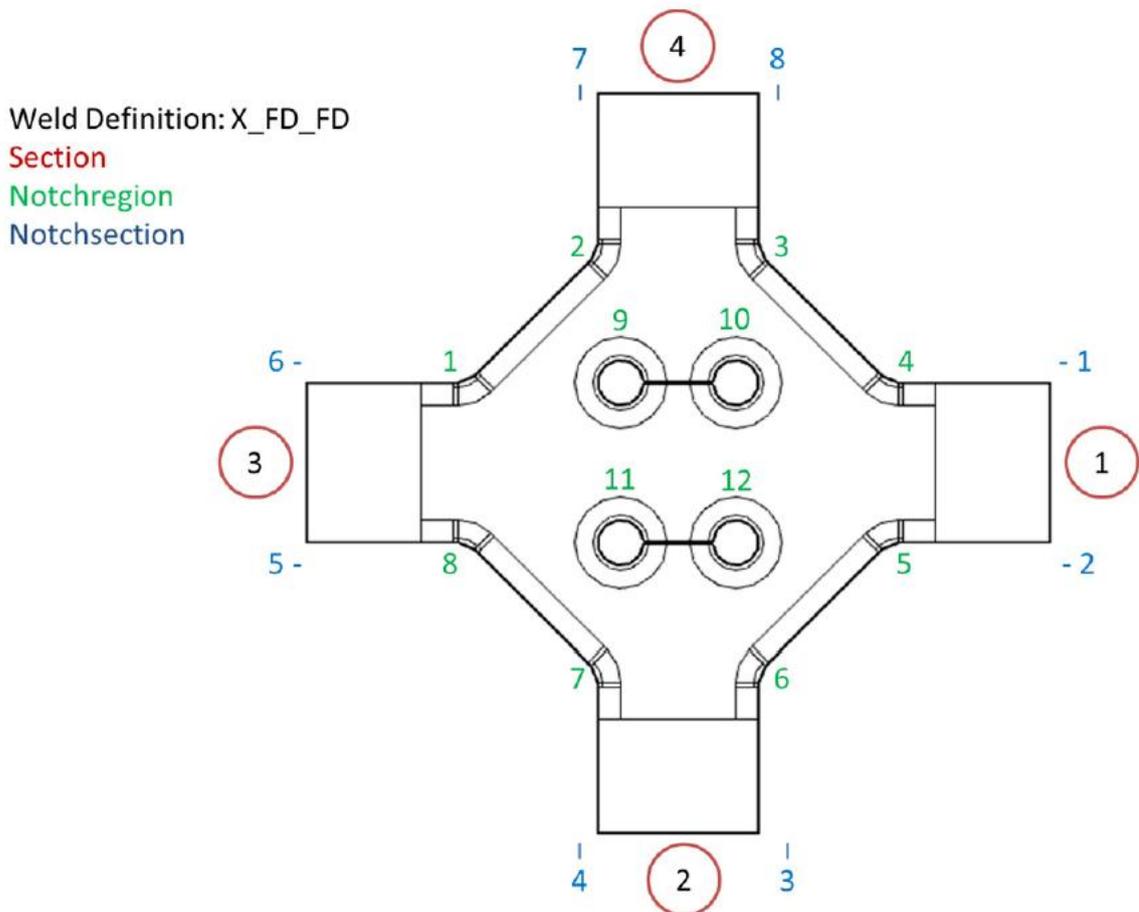


Abb. 7.3: Eingabeparameter X_FD_FD [5]

7.3. Aufbau Matlab Skript

Da zur Anpassung auf die dreidimensionale Problemstellung einige Änderungen im Auswerteprogramm vorgenommen werden mussten, wird in diesem Kapitel auf den Aufbau etwas genauer eingegangen. Während das Hauptskript genau erläutert wird, werden bei den Restlichen nur die wichtigsten Bereiche hervorgehoben. Die einzelnen Skripten werden am Beispiel für das Tool für Stumpfstöße beschrieben.

Grundsätzlich setzt sich der gesamte Ablauf aus zehn Einzelskripten und zwei Funktionen zusammen:

Skripten:

- ExecutingFile
- Grid_einlesen
- Lc_einlesen
- Chexa_einlesen
- Crod_einlesen
- Stress_CHEXA
- Nodes
- Notch_stress_output
- Add_def
- Xml_output

Funktionen:

- GRIDtransform
- Delete_lines

7.3.1. Executing File

Die zentrale Einheit des Ablaufes ist das *Executing File*, welches alle anderen Skripten der Reihe nach aufruft und abhandelt. Aus diesem Grund muss dieses auch bei einer etwaigen Kompilation als Main-File angegeben werden. Das Skript ist entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise in Abbildung 7.1. aufgebaut und wird auf den nächsten Seiten zur Gänze dargestellt. Die Codierung und Farbgebung ist direkt aus Matlab übernommen.

Als erstes wird die manuelle Eingabemaske erstellt und die eingegebenen Werte als Variablen oder Matrizen angelegt.

7 Auswertung der Spannungsergebnisse und Erstellung der Kerbfalltafeln

```
%Schweißnahtdetail
typ1=inputdlg('Enter weld definition');
typ1=typ1{1,1};
typ2=inputdlg({'from:', 'to:'}, 'Enter Models Number');
typ2_from=str2double(typ2{1,1});
typ2_to=str2double(typ2{2,1});
clear('typ2');
typ3=str2double(inputdlg('Enter number of SECTIONS'));

%Anlegen der Parameter Matrix;
par1=zeros(1+typ2_to-typ2_from, typ3*3+1);

%Aufblasen der Schnittufer Abfrage:
typ4_abfrage=cell(typ3,1);
for i=1:typ3
    typ4_abfrage{i,1}=['Enter angle for SECTION number: ',int2str(i)];
end

%Einlesen der Schnittufer Winkelangaben
typ4=inputdlg(typ4_abfrage, 'ANGLE assignment');
for i=1:typ3
    par1(:,3*i-1)=str2double(typ4{i,1});
end
clear('i', 'typ4', 'typ4_abfrage');

%Notch Regions einer Section zuordnen:
reg=str2double(inputdlg('Enter number of NOTCHREGIONS'));
sec=typ3*2;
secreg=zeros(sec, reg);
k=cell(reg,1);
for i=1:reg
    k{i,1}=['Enter relevant NOTCHSECTION for NOTCHREGION ',int2str(i)];
end

k_abfrage=inputdlg(k, 'NOTCH assignment');
```

7 Auswertung der Spannungsergebnisse und Erstellung der Kerbfalltafeln

Anschließend wird die Excel-Datei erstellt, in der als erstes die zur Definition des Schweißstoßes notwendigen Parameter und anschließend die fertigen Kerbfalltafeln importiert werden. Ist die Excel-Datei schon vorhanden, wird diese weiterverwendet. Ebenfalls werden das .dat- und .pch-File zur Weiterverwendung deklariert.

```
xls_file=[typ1, '.xlsx'];

if exist(xls_file, 'file')==0
xlswrite(xls_file, typ1, 'info');
xlswrite(xls_file, typ1, 'def')
end

for j=typ2_from:typ2_to

disp(['Bearbeite Simulation Nr ', int2str(j), '.....']);
%Parameter
dat_file=[typ1, '_', int2str(j), '_sim1-solution_1', '.dat'];
pch_file=[typ1, '_', int2str(j), '_sim1-solution_1', '.pch'];
disp('Parameter eingelesen');
```

Nunmehr können der Reihe nach die Geometriedaten aus dem .dat-File und die Spannungen aus dem .pch-File herausgelesen werden. Für diese Aufgaben wurden eigene Skripten geschrieben, um einen überschaubaren Programmieraufwand gewährleisten zu können.

```
% Geometriedaten aus dem DAT File:
grid_einlesen;
lc_einlesen;
chexa_einlesen;
crod_einlesen;
disp('Geometriedaten eingelesen');

% Kerbfallmatrix berechnen:
stress_CHEXA;
disp('Spannungen eingelesen');
```

Im nächsten Schritt erfolgen die Berechnung der Kerbfallmatrizen und deren Übertragung in die Excel-Datei. Da die Dicke eines jeden Modells als Maximum aus Gurt- und Stegdicken

7 Auswertung der Spannungsergebnisse und Erstellung der Kerbfalltafeln

festgelegt wurde, muss dieser maximale Wert aus dem Parameter-File eingelesen werden, um daraus standardisierte Werte erhalten zu können. Da den Mittelknoten keine Spannungswerte zugeordnet werden, müssen diese aus der Kerbfallmatrix entfernt werden. Dies erfolgt durch die Funktion *Delete_Lines*.

```
% Kerbfallmatrix berechnen:
stress_CHEXA;
disp('Spannungen eingelesen');
nodes;
notch_stress_output;

%Dicke des Modells bestimmen und Kerbfallmatrix anpassen:
xls_file2=[typ1, '_0.xlsx'];
cell_gurt=['B',int2str(j+1)];
num=xlsread(xls_file2,'Tabelle1',cell_gurt);
notch_matrix2=notch_matrix(:,3:12) .* (2*num);
notch_matrix1=notch_matrix(:,1:2);

notch_matrix_output=[notch_matrix1, notch_matrix2];
notch_matrix_output = deleteLines(notch_matrix_output);

xlswrite(xls_file,notch_matrix_output,int2str(j));
tmpMAT{j,1}=notch_matrix_output;
```

Als letztes werden schließlich die Ergebnisse in eine Matlab-Tabelle und ein XML-File zusammengefasst, welches in das von *Siemens* intern verwendete Tool zur Bewertung der Betriebsfestigkeit (*FatAss*) eingespielt wird.

7 Auswertung der Spannungsergebnisse und Erstellung der Kerbfalltafeln

```
%Ausgabevariable schreiben
assignin('base', typ1, tmpMAT)
if exist('WELD_Notchtables.mat', 'file') > 0
    save('WELD_Notchtables', typ1, '-append');
else
    save('WELD_Notchtables', typ1);
end

%XML File schreiben
xml_output;
disp('Output Files geschrieben');
```

7.3.2. Grid einlesen

Mithilfe dieses Skriptes werden alle Informationen bezüglich des eingesetzten FEM-Netzes aus der .dat-Datei ausgelesen. Das Herauslesen erfolgt mittels *textscan*, womit die gesamte Datei nach bestimmten Keywörtern durchsucht wird und anschließend jede Information der Zeile einzeln herausgelesen wird, um diese schlussendlich in einer weiterverwendbaren Matrix zusammenzufassen. Diese Funktion liefert natürlich nur bei einer immer gleich angeordneten Dateistruktur brauchbare Ergebnisse. Sie wird bei allen Einlese-Schritten verwendet und in weiterer Folge nicht mehr genauer erwähnt.

Der Einlesevorgang ist in eine *while*-Schleife gebettet und liefert nur bei vorhandenen Daten ein Ergebnis. Ergibt sich irgendwo ein Fehler, wird die Auswertung sofort abgebrochen und eine Fehlermeldung angezeigt.

Das Einlesen der Spalteninformationen für jeden Grid-Point erfolgt folgendermaßen:

7 Auswertung der Spannungsergebnisse und Erstellung der Kerbfalltafeln

```
% Liest Zeile für Zeile des ASCII Files bis zum Fileende
while ischar(C0)
if strcmp(C0, 'GRID', 4)==1

% Einlesen der Spalteninformation pro GRID Point
i=i+1;
C1=textscan(C0, '%*8c%16c%16c%16c', 'Delimiter', '\n', 'WhiteSpace', '')
C0=fgetl(fid);
C2=textscan(C0, '%*8c%16c%16c', 'Delimiter', '\n', 'WhiteSpace', '');

% Ausgabe der eingelesenen Werte in die Ausgabematrix GRID
GRID(i,1)=str2double(C1(1,1));      %Elementknotennummer, Spalte 1
GRID(i,2)=str2double(C1(1,2));      %Koordinatensystem ID
GRID(i,3)=str2double(C1(1,3));      %x-Koordinate
GRID(i,4)=str2double(C1(1,4));      %y-Koordinate
GRID(i,5)=str2double(C2(1,1));      %z-Koordinate
GRID(i,6)=str2double(C2(1,2));      %Displacement Koordinatens. ID
end

C0=fgetl(fid);
end
```

7.3.3. Loadcases einlesen

Das Einlesen und Zusammenfassen der Lastfallbezeichnungen erfolgt analog zu der Vorgehensweise der Grid-Points.

7 Auswertung der Spannungsergebnisse und Erstellung der Kerbfalltafeln

```
% Liest Zeile für Zeile des ASCII Files bis zum Fileende
while ischar(C0)
if strcmp(C0, 'SUBCASE', 7)==1

% Einlesen der Spalteninformation pro LC
i=i+1;
C1=textscan(C0, '%*s%f');
C0=fgetl(fid);
C2=textscan(C0, '%*s%*s%s');

% Ausgabe der eingelesenen Werte in die Ausgabematrix LC:
LC(1,C1{1,1})=C2(1,1);           %Loadcase Bezeichnung
end
C0=fgetl(fid);
end
```

Die Matrix für die Loadcases sieht für Stumpfstöße demnach folgender Maßen aus:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1N	1Q	1S	1Mb	1Mt	2N	2Q	2S	2Mb	2Mt

Tab. 7.1: Loadcases

7.3.4. CHEXA einlesen

Nun werden alle verwendeten CHEXA20 Volumselemente aus der .dat-Datei herausgefiltert und mitsamt ihren Knotennummern gespeichert.

7 Auswertung der Spannungsergebnisse und Erstellung der Kerbfalltafeln

```
% Liest Zeile für Zeile des ASCII Files bis zum Fileende
while ischar(C0)
if strcmp(C0, 'CHEXA', 5)==1

% Einlesen der Spalteninformation pro CHEXA Element
i=i+1;
C1=textscan(C0, '%*8c%8c%8c%8c%8c%8c%8c%8c%8c', 'Delimiter', '\n',
'WhiteSpace', '');
C0=fgetl(fid);
C2=textscan(C0, '%*8c%8c%8c%8c%8c%8c%8c%8c%8c', 'Delimiter', '\n',
'WhiteSpace', '');
C0=fgetl(fid);
C3=textscan(C0, '%*8c%8c%8c%8c%8c%8c', 'Delimiter', '\n',
'WhiteSpace', '');

% Ausgabe der eingelesenen Werte in die Ausgabematrix GRID
CHEXA(i,1)=str2double(C1(1,1));      %Element ID
CHEXA(i,2)=str2double(C1(1,2));      %Property ID
CHEXA(i,3)=str2double(C1(1,3));      %GRID Point 1
CHEXA(i,4)=str2double(C1(1,4));      %GRID Point 2
CHEXA(i,5)=str2double(C1(1,5));      %GRID Point 3
CHEXA(i,6)=str2double(C1(1,6));      %GRID Point 4
CHEXA(i,7)=str2double(C1(1,7));      %GRID Point 5
CHEXA(i,8)=str2double(C1(1,8));      %GRID Point 6
CHEXA(i,9)=str2double(C2(1,1));      %GRID Point 7
CHEXA(i,10)=str2double(C2(1,2));     %GRID Point 8
CHEXA(i,11)=str2double(C2(1,3));     %GRID Point 9
CHEXA(i,12)=str2double(C2(1,4));     %GRID Point 10
CHEXA(i,13)=str2double(C2(1,5));     %GRID Point 11
CHEXA(i,14)=str2double(C2(1,6));     %GRID Point 12
CHEXA(i,15)=str2double(C2(1,7));     %GRID Point 13
CHEXA(i,16)=str2double(C2(1,8));     %GRID Point 14
CHEXA(i,17)=str2double(C3(1,1));     %GRID Point 15
CHEXA(i,18)=str2double(C3(1,2));     %GRID Point 16
CHEXA(i,19)=str2double(C3(1,3));     %GRID Point 17
```

7.3.5. CROD einlesen

Um die Spannungsergebnisse in den Kerben identifizieren zu können, müssen aus dem .dat-File auch die Knotennummern der CROD-Elemente festgestellt werden. Da jedes CROD nur zwei Elemente miteinander verbindet, ist die resultierende Matrix entsprechend klein.

```
% Liest Zeile für Zeile des ASCII Files bis zum Fileende
while ischar(C0)
if strcmp(C0, 'CROD', 4) == 1

% Einlesen der Spalteninformation pro CROD Element
i=i+1;
C1 =textscan(C0, '%*8c%8c%8c%8c', 'Delimiter', '\n', 'WhiteSpace', '');

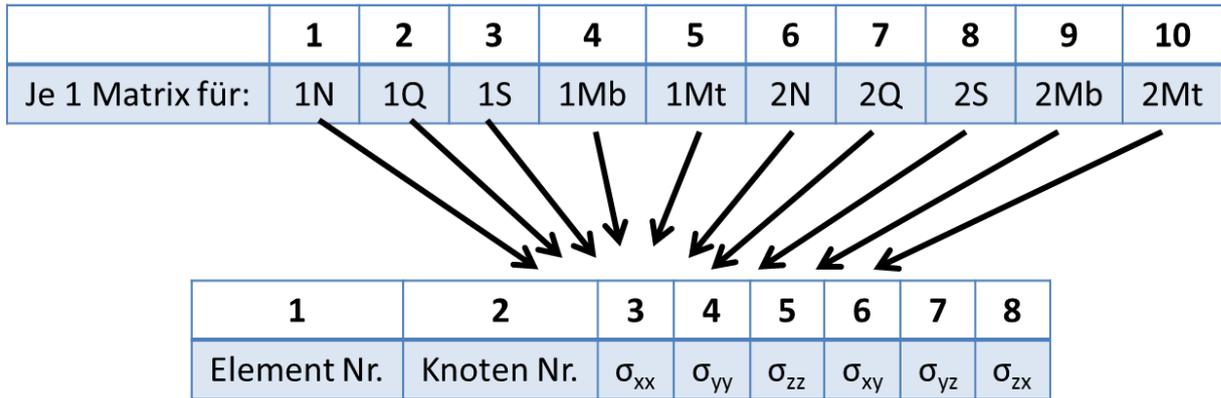
% Ausgabe der eingelesenen Werte in die Ausgabematrix CROD
CROD(i,1)=str2double(C1(1,1));      %Element ID
CROD(i,2)=str2double(C1(1,2));      %Property ID
CROD(i,3)=str2double(C1(1,3));      %GRID Point 1
CROD(i,4)=str2double(C1(1,4));      %GRID Point 2
end
C0=fgetl(fid);
end
```

7.3.6. Spannungen einlesen

Als letzten Schritt dieser langen Daten-Implementation müssen schließlich noch die Spannungen für alle CHEXA20 Elemente und Lastfälle aus den Punch-Files eingelesen werden. Durch die umständliche Programmierung mittels *textscan* umfasst dieses Skript 240 Zeilen, ehe es eine Matrix, die zuerst in die unterschiedlichen Lastfälle und weiterführend nach den Elementnummern unterteilt ist, auswirft.

Das Schema dieser umfassenden Matrix sieht folgendermaßen aus:

7 Auswertung der Spannungsergebnisse und Erstellung der Kerbfalltafeln



Tab. 7.2: Spannungsmatrix nach dem Einlesen

Als erstes werden allgemeine Informationen aus dem Header eingelesen:

```

while ischar(C0)
% Einlesen der Header Information
if strcmp(C0, '$', 1)==1
    C0=fgetl(fid);           % $SUBTITLE
    C0=fgetl(fid);           % $LABEL
    C0=fgetl(fid);           % $ELEMENT STRESSES
    H1=textscan(C0, '%17c%*10c', 'Delimiter', '\n', 'WhiteSpace', '');
    C0=fgetl(fid);           % $REAL OUTPUT
    H2=textscan(C0, '%12c%*10c', 'Delimiter', '\n', 'WhiteSpace', '');
    C0=fgetl(fid);           % $SUBCASE ID
    H3=str2double(textscan(C0, '%*13c%12c%*10c', 'Delimiter', '\n',
'WhiteSpace', ''));
    C0=fgetl(fid);           % $ELEMENT TYPE
    H4=str2double(textscan(C0, '%*15c%12c%*10c', 'Delimiter', '\n',
'WhiteSpace', ''));
    C0=fgetl(fid);
end

```

Danach werden die Ergebnisdaten der CHEXA20 Elemente, wie Elementnummer, Knotennummer und die sechs Spannungen, bestimmt, wobei hier nur ein Datensatz hervorgehoben ist:

7 Auswertung der Spannungsergebnisse und Erstellung der Kerbfalltafeln

```
% Einlesen der Ergebnisdaten
if strcmp(C0, '$', 1)==0
if strcmp(H1(1,1), '$ELEMENT STRESSES',17)==1 && strcmp(H2(1,1), '$REAL
OUTPUT',12)==1 && H4==67
%Einleseprozedur pro Datensatz
C1 =textscan(C0, '%18c%*18c%*18c%*18c%*10c', 'Delimiter', '\n',
'WhiteSpace', '');
C0=fgetl(fid); C0=fgetl(fid); C0=fgetl(fid); C0=fgetl(fid);
C0=fgetl(fid); C0=fgetl(fid); C0=fgetl(fid); C0=fgetl(fid);
... → weiter zum nächsten Absatz
```

Abschließend werden die so eingelesenen Spannungsdaten in die entsprechende Spalte der *localstress* Matrix übertragen:

```
tmpstress1(1,1)=str2double(C1(1,1)); % Elementknotennummer
tmpstress1(1,2)=str2double(C2(1,1)); % Node ID
tmpstress1(1,3)=str2double(C2(1,2))/1000; % Sxx
tmpstress1(1,4)=str2double(C3(1,1))/1000; % Syy
tmpstress1(1,5)=str2double(C4(1,1))/1000; % Szz
tmpstress1(1,6)=str2double(C2(1,3))/1000; % Sxy
tmpstress1(1,7)=str2double(C3(1,2))/1000; % Syz
tmpstress1(1,8)=str2double(C4(1,2))/1000; % Szx
... → wird für alle Lastfälle und Knoten durchgeführt
```

```
localstress{1,H3}=[localstress{1,H3},
tmpstress1,
tmpstress2,
tmpstress3,
tmpstress4,
tmpstress5,
tmpstress6,
tmpstress7,
tmpstress8];
```

7.3.7. Zuordnung der Knoten

Sind alle Geometrie- und Spannungsdaten eingelesen, werden als erstes die CRODs mit den Knoten des Hexaeder-Mesh abgeglichen und alle nicht übereinstimmenden Knoten sowie die ohne Spannungsergebnisse versehenen Mittelknoten entfernt.

```
notch_matrix=unique(CROD(:,3:4));
n=size(notch_matrix,1);
% Ausmustern der Zwischenknoten
for i=1:n
    notch_matrix(i,2)=size(find(CHEXA(:,3:22)==notch_matrix(i,1)),1);
end
% Hilfsvektor A beschreibt jene Zellen, die keine Zwischenknoten sind.
A=find(notch_matrix(:,2)~=0);
notch_matrix=notch_matrix(A,1);
clear('A','i','n');
% Zuordnung einer Region
n=size(notch_matrix,1);
for i=1:n
    A=find(CROD(:,3:4)==notch_matrix(i,1));
    if A(1,1)<=size(CROD,1)
        notch_matrix(i,2)=CROD(A(1,1),2);
    end
    if A(1,1)>size(CROD,1)
        notch_matrix(i,2)=CROD(A(1,1)-size(CROD,1),2);
    end
end
end
```

7.3.8. Berechnung der Spannungsergebnisse

In diesem Schritt werden nun die Hauptnormalspannungen, wie im Theorieblock erläutert, bestimmt. So wird jeder einzelne Knoten eines jeden Lastfalles abgearbeitet und die maximale Hauptnormalspannung in die Kerbfallmatrix geschrieben. Dieser Wert ist schließlich das gewünschte Resultat der gesamten Automatisierungskette.

7 Auswertung der Spannungsergebnisse und Erstellung der Kerbfalltafeln

```
for n1=1:size(notch_matrix,1)
    %Einlesen der entsprechenden Knotennummer
    nodeID=notch_matrix(n1,1);
    for n2=1:size(LC,2)
        A=find(localstress{1,n2}(:,2)==nodeID);
        S=localstress{1,n2}(A,3:8);
    %Berechnung der Mittelwerte (Averaged stresses)
        Sxx=mean(S(:,1));
        Syy=mean(S(:,2));
        Szz=mean(S(:,3));
        Sxy=mean(S(:,4));
        Syz=mean(S(:,5));
        Szx=mean(S(:,6));

    %Berechnung des räumlichen Spannungszustandes:
        %Invarianten:
        I1=Sxx+Syy+Szz;
        I2=Sxx*Syy+Syy*Szz+Szz*Sxx-Sxy^2-Syz^2-Szx^2;
        I3=Sxx*Syy*Szz+2*Sxy*Syz*Szx-Sxx*Syz^2-Syy*Szx^2-Szz*Sxy^2;
        %Hauptnormalspannungen:
        if I1<0||I1>0
            p=[1 -I1 I2 -I3];
            r=roots(p);
            if max(abs(r)) > max(r)
                S_notch=-max(abs(r));
            else
                S_notch=max(r);
            End end

        %Ausschreiben des Kerbfaktors
        notch_matrix(n1,n2+2)=S_notch;

    end end
```

Die somit erstellten Kerbfallmatrizen werden schlussendlich in das Excel-File und in ein XML-File geschrieben, sodass eine Weiterverwendung im FatAss möglich ist. Auf diese Schritte wird hier nicht genauer eingegangen, da es keine Unterschiede zwischen 2D und 3D gibt.

7.4. Aufbau der Kerbfall-Excel Datei

Diese Excel-Dateien besitzen für jedes Modell ein eigenes Tabellenblatt, in dem die Kerbfalltafeln angeführt sind. Weiters ist die Anführung der gesamten Parameterliste, welche zur Erstellung der Modelle notwendig ist, und ein eigenes Definitionssheet mit detaillierten Informationen zu den Schnittufern vorgesehen.

Die Kerbfalltafel ist so aufgebaut, dass in der ersten Spalte die Knotennummer, in der zweiten die Kerbregion und anschließend die Spannungen entsprechend des angebrachten Lastfalles angeführt sind. Je nach der Größe der Modelle kann die Anzahl der Knoten schwanken. Ebenfalls ist zu erwähnen, dass durch die automatische Vernetzung die Bezeichnungen der einzelnen Knoten stark variieren und somit nur sehr schwer allgemeine Vergleiche durchgeführt werden können.

Die einzelnen Spannungen aus der Kerbfalltafel werden anschließend mit den ermittelten Belastungen aus den globalen Strukturmodellen multipliziert. Somit erhält man die eigentlichen Spannungen an den einzelnen Knoten in den Kerben. Diese Knotenspannungen fließen schlussendlich in die Bewertung nach IIW ein.

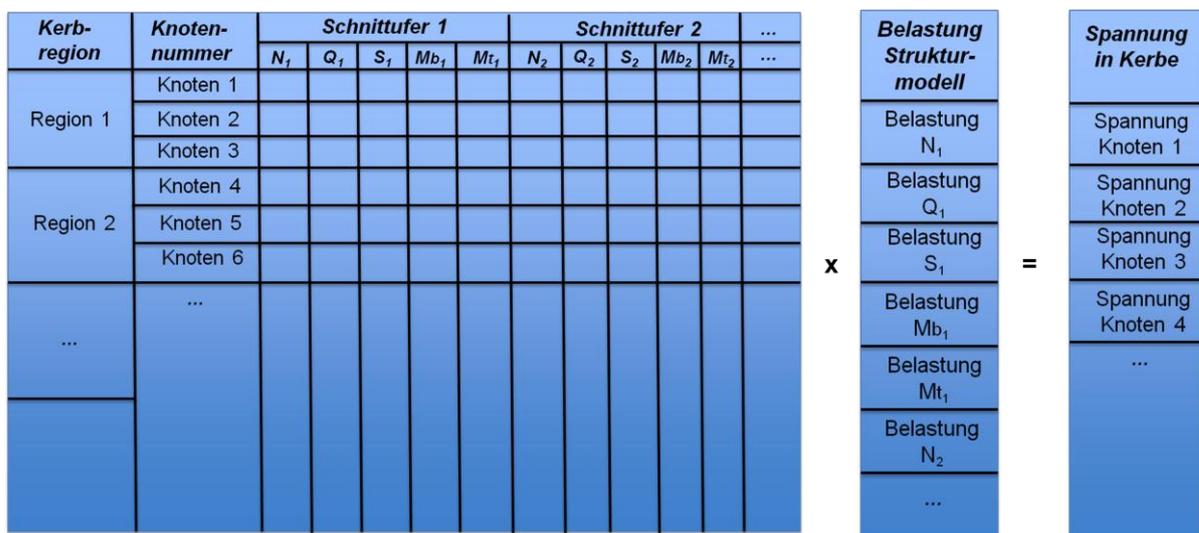


Abb. 7.4: Aufbau Kerbfallmatrix

8. Vergleich 2D/3D Modelle

Nachdem nun die fertigen Kerbfalltafeln vorliegen, kann ein Vergleich von zwei- und dreidimensionalen Modellen erfolgen. Dieser Vergleich gestaltet sich äußerst schwierig, da speziell in den Wurzelkerben, trotz der Festlegung einer Elementgröße von 0,2 mm, die Anzahl der Elemente variieren kann. Dies passiert aufgrund der automatischen Erstellung der FE-Netze. Weiters müssen die Spannungsergebnisse manuell ausgelesen werden, da die Knotennummern ebenfalls keinem fixen Schema folgen. Der erste Versuch, die Einleitung der Schnittkräfte bei der Modellerstellung automatisiert ablaufen zu lassen, erfolgte nach einer genauer Analyse der Diplomarbeit von DI Robert durch RBE3-Spiderelemente. Da sehr lange an diesem Konzept gearbeitet wurde, wird dieses Verfahren und die Gründe, weshalb es schließlich verworfen wurde, in diesem Kapitel kurz erläutert.

8.1. RBE3-Spiderelemente

8.1.1. Exkurs: Modellbildung mittels RBE3-Spiderelementen

Ganz allgemein versteht man unter einem Spiderelement eine eindimensionale Verbindung zwischen einzelnen Knoten. Ausgangspunkt ist ein Kernknoten, der entweder mit nur einem oder auch mit mehreren Beinknoten verknüpft ist und somit Lasten oder Massenkräfte zielgerichtet aufgeteilt werden können. Übliche Einsatzgebiete solcher Elemente sind die Verbindung von Stiften und Bolzen in Bohrungen und das Aufbringen von einer auf einem bestimmten Punkt auftretenden Last auf eine Fläche. Deshalb erschien vorerst diese Möglichkeit als zielführend. [8]

Im Speziellen wurde anfangs zur Automatisierung das RBE3-Element eingesetzt und mehrere dieser Elemente zu einem Spider zusammengefügt. Das RBE3-Element besitzt den großen Vorteil, dass alle Knoten den gleichen Anteil an der Bewegung besitzen und es daher nicht endlos starr ist. Es fügt daher keine zusätzlichen Steifigkeiten dem Modell hinzu.

8 Vergleich 2D/3D Modelle

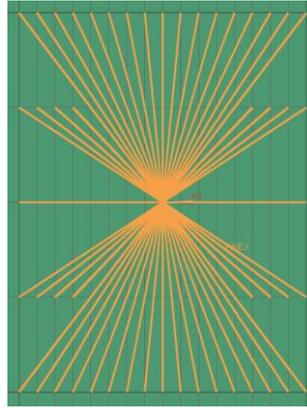


Abb. 8.1: RBE3-Spider

Die Einbindung in ein 3D-Schweißstoßmodell erfolgt nun folgendermaßen:

Als erstes wird jede Schnittuferfläche in gleich große Flächen unterteilt, die später von den RBE3-Spider-elementen angegriffen werden. Die Abmessungen dieser Unterteilungen müssen mit der gewünschten Vernetzung einhergehen, da schon bei minimalsten Abweichungen kein durchgehendes FE-Netz mehr generiert werden kann. Im vorliegenden Fall wird das Modell in den Randbereichen mit CHEXA20 Elementen mit einer Elementlänge von 1 mm vernetzt. Im Zentrum, wo schließlich, gleich wie bei der Aufbringung durch Schalenelemente, die Spannungen abgegriffen werden, beträgt die Elementlänge 0,2 mm. Somit ergeben sich hier wiederum würfelförmige Elemente mit einer hohen Genauigkeit.

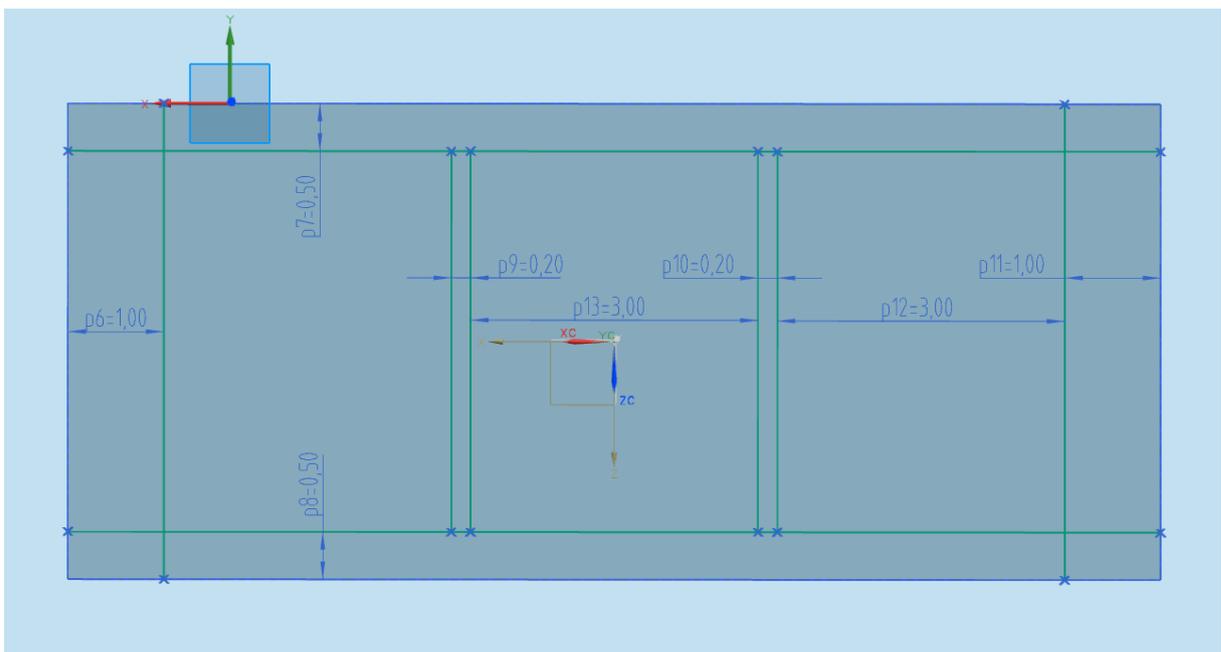


Abb. 8.2: Abmessungen Seitenunterteilung

8 Vergleich 2D/3D Modelle

Die Kraft- bzw. Momenteinleitung erfolgt schließlich über drei gleichmäßig verteilte Punkte, die durch die RBE3-Spiderelemente mit den Schnittoberflächen verbunden sind. Die gesamten Randflächen und die Bereiche, in denen es zu einer doppelten Belastung der Schnitoberknoten kommen würde, sind von dieser Verbindung ausgenommen. An den Rändern würde es aufgrund der dortigen geringeren Steifigkeit zu zu großen Verformungen kommen. Die Punkte werden auf einer Ebene mit Abstand $x = 0$ im Part-File erstellt. Bei der Definition der Kräfte und Momente ist darauf zu achten, dass alle drei Punkte eines Schnitufers zugleich ausgewählt werden und *geometric distribution* aktiviert ist. Diese Funktion ermöglicht eine Aufteilung der Belastungen entsprechend der gewählten geometrischen Fläche.

Obwohl die Modellbildung aufgrund der Unterteilungen sehr viel Zeit in Anspruch nimmt, läuft die Automatisierung sehr stabil ab und liefert kaum Fehlermeldungen.

Abbildung 8.3 zeigt ein Schnittufer mit der dazugehörigen Unterteilung und Lastaufbringung.

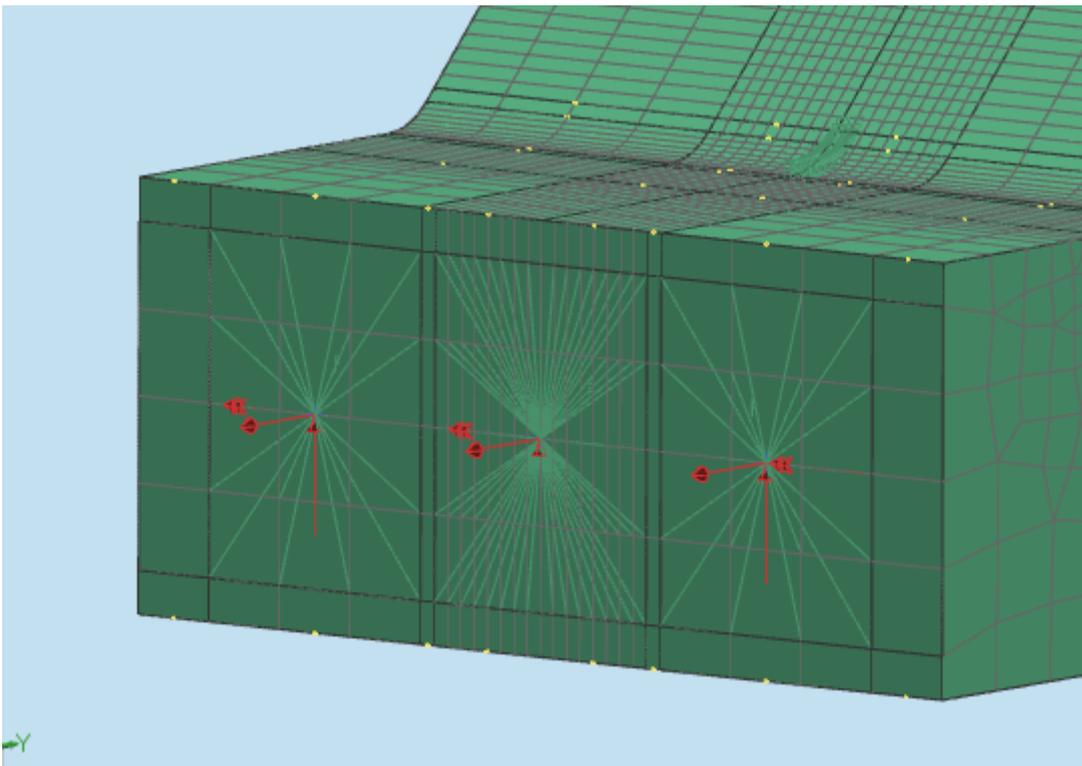


Abb. 8.3: Lastaufbringung durch RBE3-Spiderelemente

8.1.2. Vergleich 2D/3D-Spider

Bei der Gegenüberstellung der 2D- und 3D-Kerbfalltafeln kam es bei Anwendung dieses Verfahrens überraschenderweise zu teilweise erheblichen Abweichungen. Während die Ergebnisse in den Kerbregionen auf der weiter entfernten Seite sehr gut korrelieren, variieren sie in den nahe liegenden Kerben recht stark. Beispielshaft sind die Ergebnisabweichungen für zwei gegenüberliegende Kerbregionen eines B_VC-Stoßes angeführt. In den folgenden Diagrammen ist auf der Abszisse die Abweichung der 3D-Modelle in Bezug auf die Ergebnisse der 2D-Kerbfalltafeln in Prozent und auf der Ordinate die Knotennummer aufgetragen. Da bei den 2D-Kerbfalltafeln nur die Ergebnisse der Normal- und Querkräfte, sowie des Biegemomentes um die x-Achse vorliegen, können nur diese Parameter miteinander verglichen werden.

Weiters werden für jeden Anwendungsfall nur die Kerben 1 und 3 explizit herausgegriffen, da die Kerben 2 und 3 aufgrund der Symmetrie identische Ergebnisse liefern. Dies wird auch später bei der Lasteinbringung durch die Schalenelemente so angewandt.

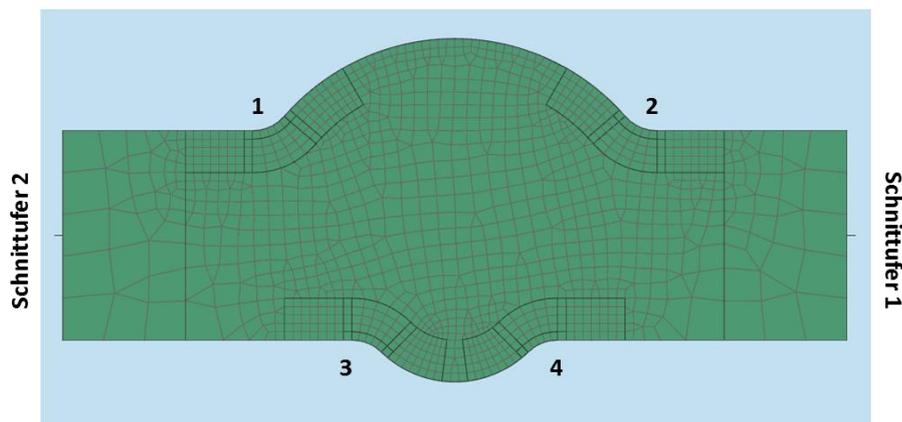


Abb. 8.4: Definition der Kerben und Schnittufer bei B_VC Stoß

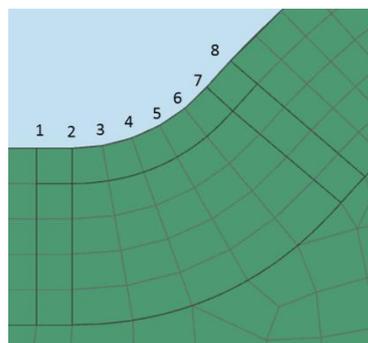


Abb. 8.5: Bezeichnung der einzelnen Kerbknoten (Kerbe 1)

Die Bezeichnung der einzelnen Knoten in Kerbe 3 erfolgt äquivalent.

8 Vergleich 2D/3D Modelle

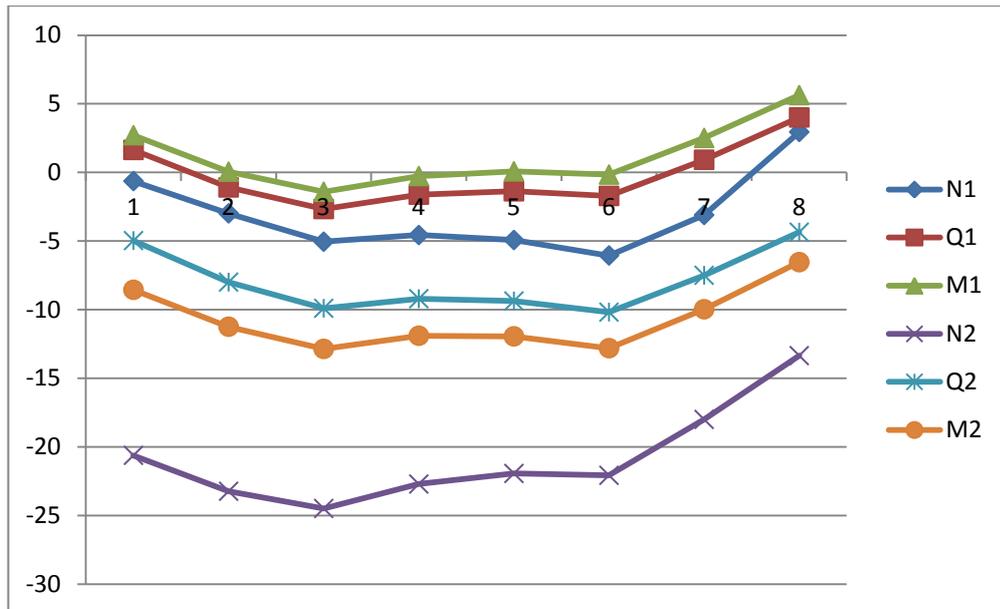


Abb. 8.6: Vergleich 2D/3D Kerbe 1 B_VC_1

Wie in Abbildung 8.6 deutlich zu erkennen, weicht die Normalkraft des näher liegenden 2. Schnittufer drastisch von den anderen Spannungsergebnissen ab. Diese Abweichung beträgt im schlimmsten Fall rund 25%, was eindeutig einen viel zu hohen Wert darstellt, da dieses Maximum zusätzlich noch in den höchst belasteten Bereichen der Kerbe auftritt. Die Lasten vom gegenüberliegenden Schnittufer korrelieren allerdings sehr gut mit den zweidimensionalen Modellen.

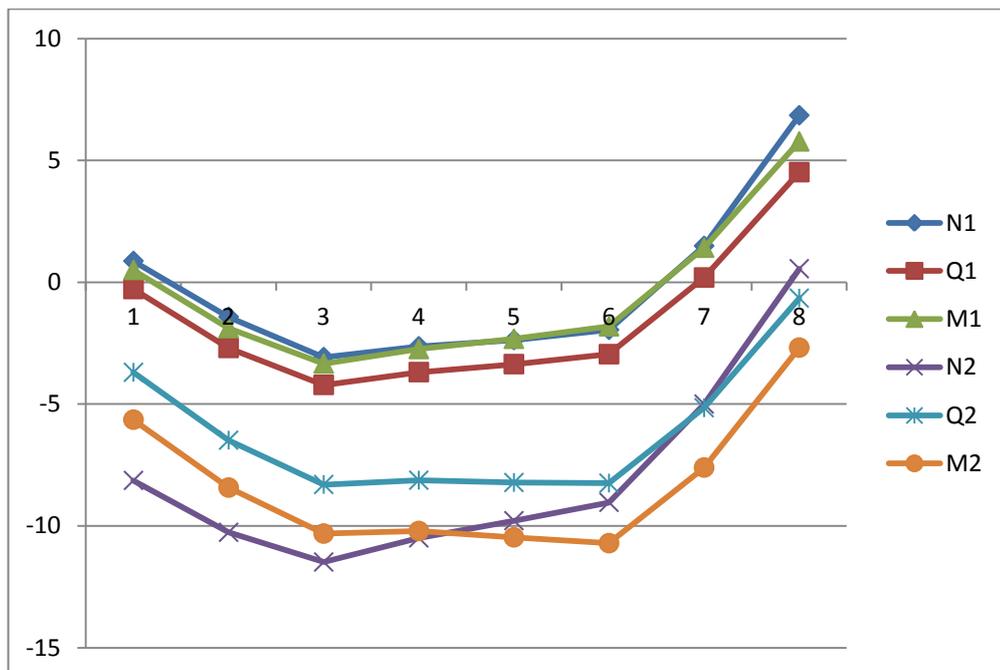


Abb. 8.7: Vergleich 2D/3D Kerbe 3 B_VC_1

8 Vergleich 2D/3D Modelle

Die untere Kerbe besitzt zwar deutlich geringere Gesamtabweichungen als Kerbe 1, allerdings sind Werte über 10% rund um die höchst belasteten Bereiche der Naht immer noch zu hoch.

Der Hauptgrund für diese Abweichungen ist, dass der Abstand zwischen dem lasteinbringenden Schnittufer und der ersten Kerbe nicht ausreicht, sodass sich die Spannungen über die Breite des Bauteils homogenisieren können. Im vorliegenden Fall geschieht diese Vergleichmäßigung der Spannungen unmittelbar nach der ersten Kerbe und liefert deshalb keine brauchbaren Ergebnisse. Durch die Einbringung mittels RBE3-Spiderelemente werden die einzelnen Knoten der Schnittuferfläche punktuell beansprucht, wie die Abbildung 8.8 klar darstellt, wobei die Deformation in der Grafik zur Übersichtlichkeit bei 10% angesetzt wurde. Die Abbildung zeigt die Reaktionen bei Aufbringung einer Normalkraft auf das erste Schnittufer.

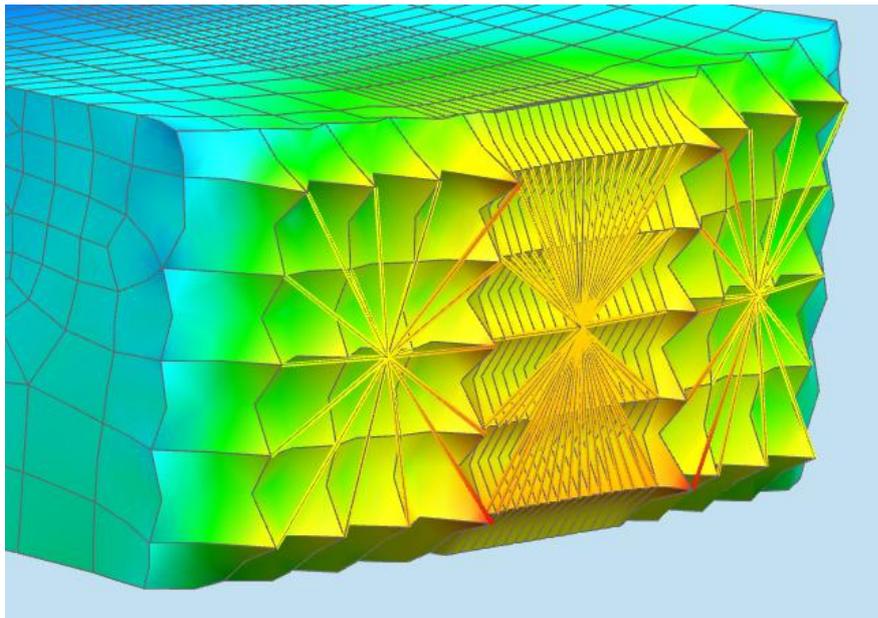


Abb. 8.8: RBE3-Spider: Normalkraftaufbringung auf Schnittufer

8 Vergleich 2D/3D Modelle

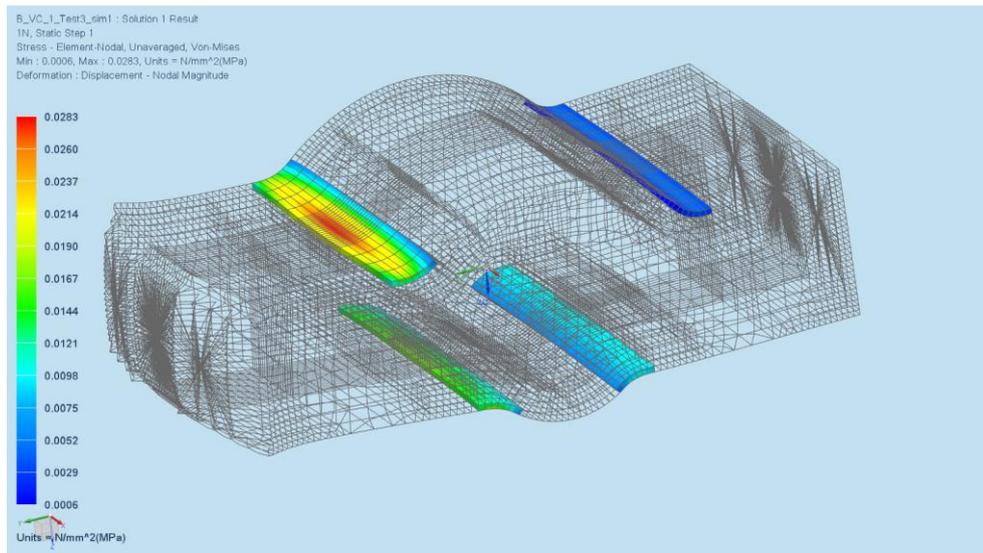


Abb. 8.9: RBE3-Spider: Spannungsverteilung in Kerben

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die Mesh-Genauigkeit speziell in den Bereichen rund um die Schnittufer erhöht. Die nunmehr große Anzahl an kleineren Elementen sollte eine schnellere Vergleichmäßigung ermöglichen und die vorhin beschriebenen Probleme beseitigen. Obwohl die Rechenzeit enorm angehoben wurde, konnte keine Verbesserung hinsichtlich der Ergebnisqualität erzielt werden. Aus diesem Grund wurde schließlich das gesamte Konzept der RBE3-Spiderlemente für diesen Anwendungszweck verworfen und auf die Lasteinbringung durch Schalenelemente umgestellt.

Hierbei ist allerdings anzumerken, dass grundsätzlich jede Verfeinerung eines FE-Netzes zu genaueren Simulationsergebnissen führt, da die Simulation viel besser an das reale Bauteil angepasst werden kann. Im vorliegenden Fall trat dieses Phänomen auch ein, allerdings konnten die Vergleichmäßigungsprobleme nicht behoben werden.

Weitere Nachteile der RBE3-Spiderlemente sind unter anderem:

- Schwierige Koordination bei der Einleitung von Torsionsmomenten, da jeder einzelne Spider nur innerhalb seines Elementverbundes übertragen kann
- Variable Modelldicke nur sehr schwer realisierbar

8 Vergleich 2D/3D Modelle

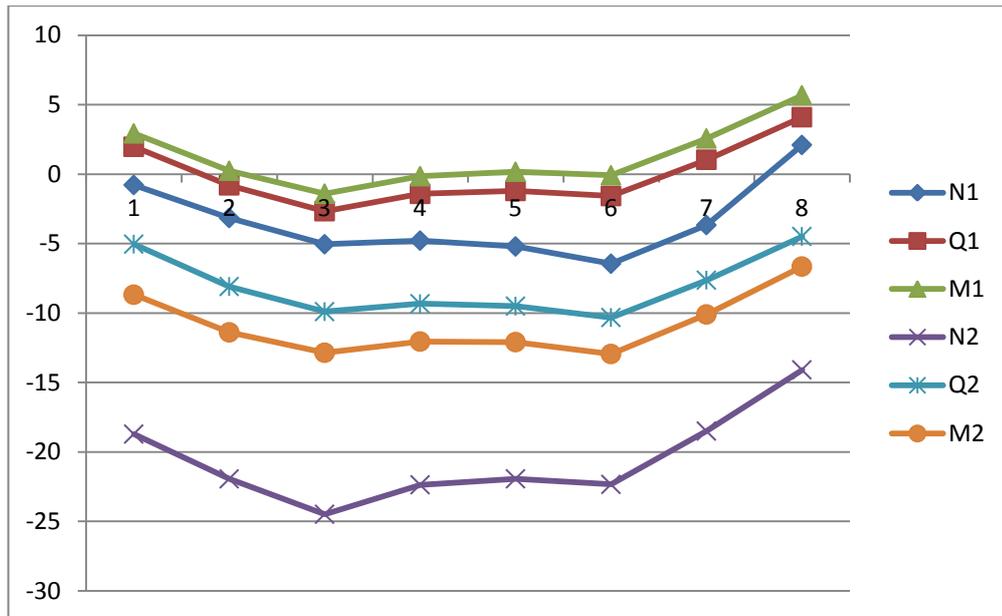


Abb. 8.10: Vergleich 2D/3D Kerbe 1 B_VC_1 (finerer Mesh)

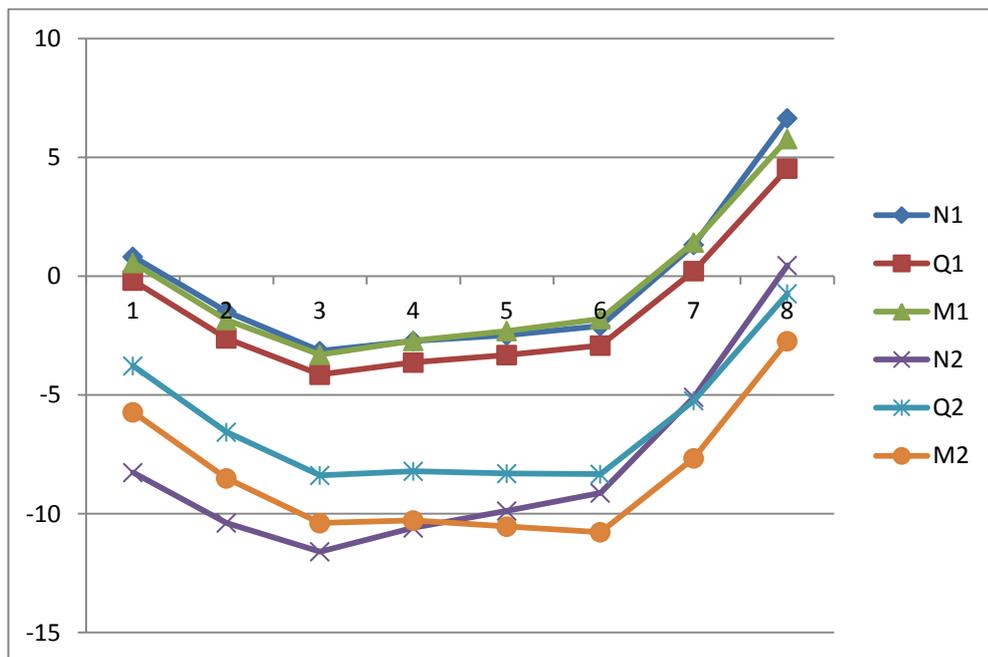


Abb. 8.11: Vergleich 2D/3D Kerbe 3 B_VC_1 (finerer Mesh)

8.2. Anschlussschalen

Erfolgt die Lastaufbringung durch die Anschlussschalen, korrelieren die 3D-Ergebnisse sehr gut mit den 2D-Kerbfallkatalogen. Die Abweichungen betragen in keinem Fall mehr als 10% und bei der problematischen Normalkraft am nahe liegenden Schnittufer konnte sogar die geringste Abweichung erzielt werden.

Ganz allgemein betrachtet liefern die 3D-Modelle geringere Werte für die Kerbfalltafeln als die 2D-Modelle. Dies ist auf sämtliche Vereinfachungen der zweidimensionalen Betrachtungsweise, wie zum Beispiel dem ebenen Spannungszustand, zurückzuführen, da aufgrund der konstanten Schalendicken keine Dehnungen in Querrichtung berücksichtigt werden.

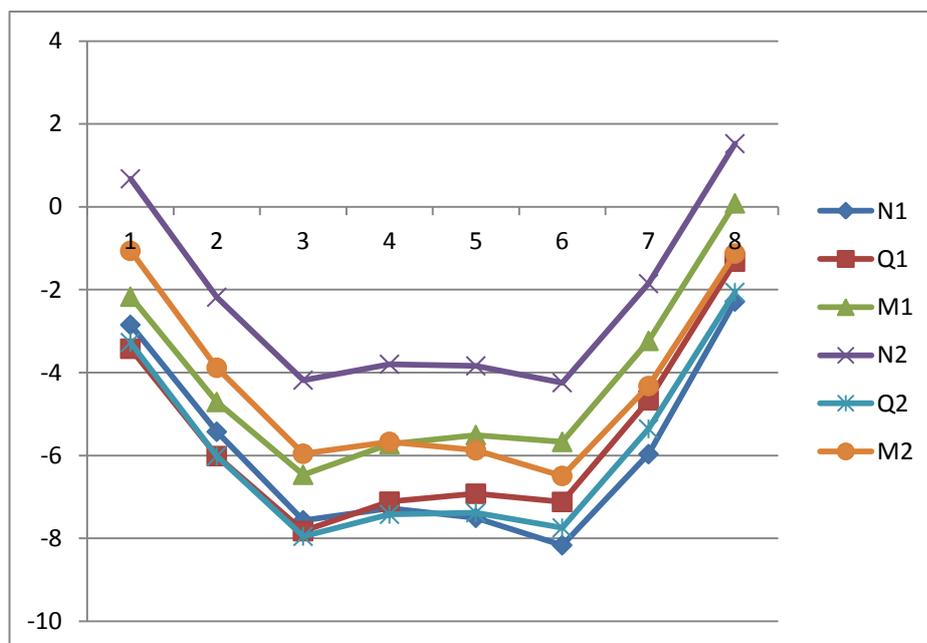


Abb. 8.12: Vergleich 2D/3D Kerbe 1 B_VC_6

8 Vergleich 2D/3D Modelle

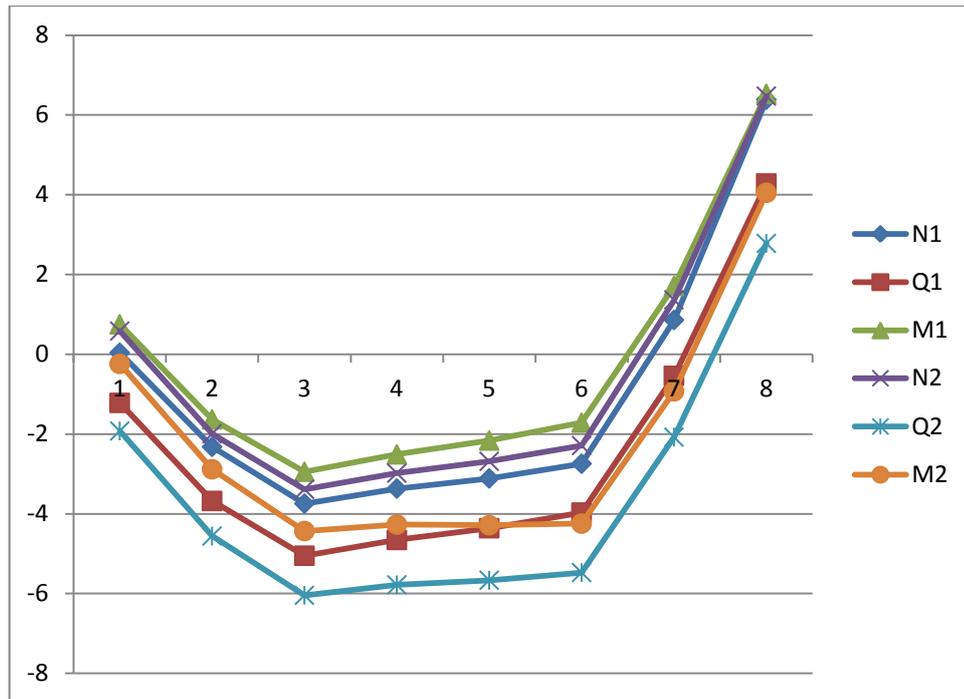


Abb. 8.13: Vergleich 2D/3D Kerbe 3 B_VC_6

Wird nun die Spannungsverteilung in den Kerben detailliert betrachtet, kann deutlich eine Verbesserung gegenüber den RBE3-Spiderelementen festgestellt werden. Während bei den Spiderelementen nur in der Mitte ein kleiner Bereich brauchbare Ergebnisse lieferte, können hier keine unregelmäßigen entlang der Modellbreite festgestellt werden.

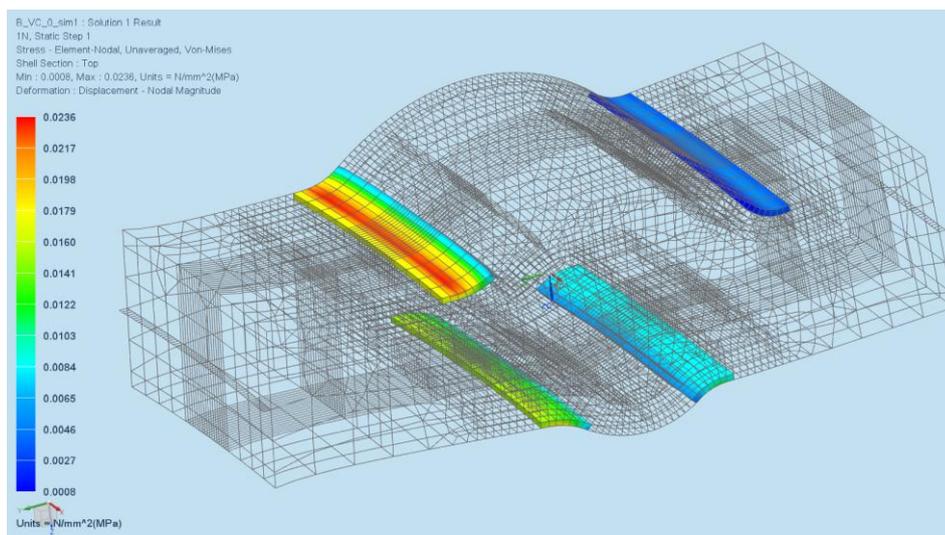


Abb. 8.14: Edge-Face: Spannungsverteilung in Kerben

9. Zusammenfassung

Nach genauen Untersuchungen der bisherig erstellten Diplomarbeiten wurde anfangs eine Methode gesucht, um eine stabile automatische Erstellung von Schweißstößen ermöglichen zu können. Nach der baldigen Erkenntnis, dass dies nur mit einem hinterlegten *polygon body* stabil ablaufen kann, wurden anfangs Bestrebungen hinsichtlich der Verwendung von RBE3 Spiderelementen als Schnittstelle zur Belastungseinleitung gemacht. Dieses Konzept wurde aber schließlich verworfen, da es eine unzureichende Ergebnisqualität in den zum Schnittrufer nahen Kerben lieferte. Durch die Umstellung der Simulationssoftware von NX 7.5 auf 8.0 konnte die neue Funktion *Edge-Surface-Gluing* als zielführend evaluiert werden und somit wurde die Kraft- und Momenteinleitung auf Schalenelemente umgestellt. Ebenfalls wurde der Kerbfallkatlog um Schub und Torsion erweitert. Diese Erstellung der Schweißnahtmodelle stellte den Hauptteil gegenständlicher Arbeit dar.

Als nächstes wurde das unterstützende Journal auf die dreidimensionale Problemstellung angepasst, optimiert und durch neue Funktionen, wie zum Beispiel die Möglichkeit variable Wandstärken zu simulieren, erweitert. Des Weiteren konnte durch die Programmierung einer Batch-Schleife die Modellerstellung von der FE-Simulation getrennt werden und dadurch die gesamte Berechnung auf eine leistungsstarke externe Workstation ausgelagert werden.

Weiters erfolgte eine Anpassung der Matlab-Auswertemechanismen vom ebenen auf den räumlichen Spannungszustand. Hierfür mussten die bisher verwendeten CQUAD8 Elemente durch CHEXA20 Elemente ersetzt werden und dadurch sowohl Änderungen der Einlesemechanismen als auch Änderungen in der Spannungsermittlung vorgenommen werden.

Schließlich konnten die somit ermittelten Ergebnisse in Kerbfalltafeln zusammengefasst werden. Die Kerbfalltafeln wurden schließlich in einer Excel-, einer Matlab- und einer XML-Datei ausgegeben.

10. Ausblick

Derzeit werden bei *Siemens* die 2D-Kerbfalltafeln implementiert und deren sinnvoller Einsatz erprobt. Wenn sich diese in der Praxis bewähren, ist es das Ziel, diese in geraumer Zeit durch die 3D-Kataloge ersetzt werden. Des Weiteren wird in einer schon laufenden Diplomarbeit untersucht, ob der Ort der maximal auftretenden Belastungen je nach Belastungsart klar definiert werden kann und somit die Kerbbereiche einfacher gestaltet werden können. Dies würde eine deutliche Verkleinerung der Kerbfalltafeln zur Folge haben und eine leichtere Verknüpfung mit den Strukturmodellen ermöglichen. Diese Untersuchung findet auf Basis der 2D-Modelle statt.

Weiters ist zu erwähnen, dass die zur vollständigen Beschreibung der Spannungen in Längsrichtung notwendige Lasteinbringung auf den beiden Stirnseiten der Schweißnähte nicht in einen automatisierten Prozess übergeführt werden konnte. Deshalb muss diese Lasteinbringung noch in weiterer Folge genauer untersucht werden.

Diese Diplomarbeit dient ebenfalls als Grundstein für eine Erweiterung der 3D-Modelle, sodass in Zukunft auch die Bewertung von Schweißnahtenden und Winkelversätzen möglich ist. Hierzu können die entwickelten und beschriebenen Automatismen hinsichtlich der Auswertung und Berechnung beinahe vollständig übernommen werden. Allerdings müssen alle Modelle von Grund auf neu aufgebaut und eine geeignete Parametrisierung gefunden werden.

Als letztes ist zu erwähnen, dass derzeit eine Überarbeitung der Modellierungsvorschriften der Radaj-Modelle laut IIW stattfindet und somit in naher Zukunft eine Anpassung aller verwendeten Modelle erfolgen muss.

11. Literaturverzeichnis

- [1] A. Hobbacher, Recommendations for fatigue design of welded joints and components, Version XIII-2151r1-07/XV-1254r1-07 Hrsg., Paris: International Institut of Welding (IIW), 2007.
- [2] M. Sander, Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008.
- [3] D. Radaj, Ermüdungsfestigkeit, 3., erweiterte Auflage Hrsg., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [4] E. Haibach, Betriebsfestigkeit, 3., erweiterte Auflage Hrsg., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [5] M. Wozasek, Kerbfallkatalog für die Schweißnahtberechnung nach IIW, Technische Universität Graz, Institut für Leichtbau, 2012.
- [6] C. C. Celigoj, Vorlesungsskriptum: Festigkeitslehre, Technische Universität Graz, 2004.
- [7] U. W. B. Simon, Skriptum: Mathematische Modellbildung und Simulation in der Mechanik 1, Ulmer Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen, 2011.
- [8] Hilfe NX Nastran.
- [9] R. Demal, Erweiterung eines Kerbfallkataloges zur Anwendung des Kerbspannungskonzeptes für die Berechnung von Schweißnahtverbindungen, Technische Universität Graz, Institut für Leichtbau, 2011.
- [10] F. Wolmersdorfer, Diplomarbeit: Bewertung von Schweißnähten auf Basis des Kerbspannungskonzeptes, Graz: Technische Universität Graz, Institut für Leichtbau, 2009.
- [11] Microsoft. [Online]. Available: <http://www.microsoft.com/resources/documentation/windows/xp/all/proddocs/en-us/batch.msp?mfr=true>. [Zugriff am 16 07 2013].
- [12] Technet Microsoft. [Online]. Available: <http://technet.microsoft.com/de-de/library/cc759098%28v=WS.10%29.aspx>. [Zugriff am 17 07 2013].

11 Literaturverzeichnis

- [13] U. Oßberger, Diplomarbeit: Analyse und Bewertung von Berechnungsvorschriften zum Ermüdungsverhalten von Schweißverbindungen, Technische Universität Graz, Institut für Leichtbau, 2010.

12. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Prinzipielle Vorgehensweise zur Betriebsfestigkeitsbewertung nach IIW	3
Abb. 2.1: Spannungsanteile laut IIW [1]	5
Abb. 2.2: Nennspannung laut IIW [1]	6
Abb. 2.3: Strukturspannung laut IIW [1]	7
Abb. 2.4: reale und fiktive Kerbspannung an scharfer Kerbe [9].....	9
Abb. 2.5: Ersatzstrukturlänge in Abhängigkeit von der Fließgrenze (Neuber) [1].....	9
Abb. 2.6: Radaj Modell [1].....	10
Abb. 2.7: Spannungskomponenten [6]	11
Abb. 2.8: Mohr'scher Spannungskreis [7].....	12
Abb. 2.9: CROD [6].....	13
Abb. 2.10: CQUAD8 [6].....	14
Abb. 2.11: CHEXA20 [6]	14
Abb. 2.12: Inertia Relief	16
Abb. 2.13: fixe Einspannung	16
Abb. 3.1: Schweißnahtarten [10].....	17
Abb. 3.2: Radaj-Modell B_VC	19
Abb. 3.3: Auszug B_VC Excel-Parameter	19
Abb. 3.4: Radaj-Modell T_FD für Stegblechstärke > 6 mm	20
Abb. 3.5: Radaj-Modell T_FD für Stegblechstärke bis einschließlich 6 mm.....	20
Abb. 3.6: Auszug T_FD Excel-Parameter	21
Abb. 3.7: Radaj-Modell X_YS_YB.....	22
Abb. 3.8: Auszug X_YS_YB Excel-Parameter.....	23
Abb. 4.1: Ablauf der automatischen Erstellung.....	25
Abb. 4.2: Ordner- und Dateienstruktur	26
Abb. 4.3: Automatische Modellgenerierung.....	27
Abb. 5.1: Dateihierarchie	28
Abb. 5.2: Koordinatensystem	30
Abb. 5.3: Basisskizze.....	30
Abb. 5.4: Expressions	31
Abb. 5.5: Definition der Kerbregionen	32
Abb. 5.6: Einstellungen <i>Split Body</i>	33
Abb. 5.7: fertiges idealisiertes Part-File.....	34
Abb. 5.8: Überblick FEM-File	35
Abb. 5.9: 2D-Vernetzung	36
Abb. 5.10: Einstellungen 3D swept mesh.....	37

12 Abbildungsverzeichnis

Abb. 5.11: Gruppierung der Kerbregionen	38
Abb. 5.12: CROD in Kerbe.....	38
Abb. 5.13: Nummerierung CROD T_FD > 6 mm	39
Abb. 5.14: Kraft- (links) und Momenteinleitung (rechts) am ersten Schnittufer	40
Abb. 5.15: Subcases.....	41
Abb. 6.1: Aufbau NX Journal.....	43
Abb. 7.1: Vorgehensweise Matlab-Skript	57
Abb. 7.2: Eingabemaske Matlab-Tool	58
Abb. 7.3: Eingabeparameter X_FD_FD [5].....	59
Abb. 7.4: Aufbau Kerbfallmatrix	73
Abb. 8.1: RBE3-Spider.....	75
Abb. 8.2: Abmessungen Seitenunterteilung	75
Abb. 8.3: Lastaufbringung durch RBE3-Spiderelemente	76
Abb. 8.4: Definition der Kerben und Schnittufer bei B_VC Stoß	77
Abb. 8.5: Bezeichnung der einzelnen Kerbknoten (Kerbe 1)	77
Abb. 8.6: Vergleich 2D/3D Kerbe 1 B_VC_1	78
Abb. 8.7: Vergleich 2D/3D Kerbe 3 B_VC_1	78
Abb. 8.8: RBE3-Spider: Normalkraftaufbringung auf Schnittufer	79
Abb. 8.9: RBE3-Spider: Spannungsverteilung in Kerben	80
Abb. 8.10: Vergleich 2D/3D Kerbe 1 B_VC_1 (feinerer Mesh)	81
Abb. 8.11: Vergleich 2D/3D Kerbe 3 B_VC_1 (feinerer Mesh)	81
Abb. 8.12: Vergleich 2D/3D Kerbe 1 B_VC_6	82
Abb. 8.13: Vergleich 2D/3D Kerbe 3 B_VC_6	83
Abb. 8.14: Edge-Face: Spannungsverteilung in Kerben.....	83

13. Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Schweißnahtbezeichnungen	18
Tab. 3.2: Stumpfstoßarten	19
Tab. 3.3: T-Stoßarten.....	21
Tab. 3.4: Kreuzstoßarten	24
Tab. 7.1: Loadcases	66
Tab. 7.2: Spannungsmatrix nach dem Einlesen	69