

# **Masterarbeit**

Alexander Mannov

## **Entwicklung einer Tool-Landschaft zur teilautomatischen Nachweisführung der Flugzeug-Lavatories in HyperWorks-Umgebung**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Automotive and  
Aeronautical Engineering*

**Alexander Mannov**

**Entwicklung einer Tool-Landschaft zur  
teilautomatischen Nachweisführung der  
Flugzeug-Lavatories in HyperWorks-  
Umgebung**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Fahrzeugbau / Antrieb und Fahrwerk  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
Firma DIEHL Comfort Modules GmbH  
Abteilung Engineering Stress & Weight  
Hein-Saß-Weg 41  
22129 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Alexander Piskun, M.Sc.  
Zweitprüferin: Prof. Schulte-Bisping, Dr.-Ing.

Abgabedatum: 30.09.2015

## **Zusammenfassung**

**Alexander Mannov**

### **Thema der Bachelorthesis**

Entwicklung einer Tool-Landschaft zur teilautomatischen Nachweisführung der Flugzeug-Lavatories in HyperWorks-Umgebung.

### **Stichworte**

FE-Berechnungsmethoden, Prä-Prozessor, Solver, Post-Prozessor, Automatisierung, TCL-Programmierung, Benutzeroberfläche, Ausgabedatei, Excel, Verschiebung, Reaktionskraft, Spannung, Tsai-Wu, Schraubenverbindung, Verzapfungsverbindung, Modellierung.

### **Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit wurde durch die Zusammenarbeit mit der Firma DIEHL Comfort Modules GmbH ermöglicht und beschäftigt sich mit dem Umstieges von dem Berechnungsprogramm ANSYS auf HyperWorks sowie vollständiger Automatisierung der Auswertung der Berechnungsergebnisse. Durch den schnellen und einfachen objektorientierten Zugriff auf unterschiedliche Funktionen der Prä- und Post-Prozessor-Programme von HyperWorks kann die Modellierungs- und Auswertungsphase deutlich beschleunigt werden. Nach der vollständigen Umsetzung der an diese Arbeit gesetzter Anforderungen und Wünsche wurde in der Validierungsphase, anhand der Berechnungsergebnisse, nachgewiesen, dass diese programmunabhängig im Toleranzbereich liegen. Somit kann der Umstieg von einem auf das andere FE-Berechnungsprogramm erfolgen.

**Alexander Mannov**

### **Title of the paper**

Development of a tool environment for semi-automatic verification of aircraft lavatories in HyperWorks.

### **Keywords**

FE calculation methods, preprocessor, solver, postprocessor, automation, TCL programming, user interface, output file, Excel, displacement, reaction force, tension, Tsai-Wu, screw connection, mortise, modeling.

### **Abstract**

This work was made possible by cooperation with DIEHL Comfort Modules GmbH and engaged with transfer from the FE calculation program ANSYS to HyperWorks, and complete automation of the analysis calculation results. The quick and easy object-oriented access to different functions of the pre- and post-processor programs of HyperWorks enables significantly acceleration of the modeling and evaluation phases. After full implementation of all, on this work set demands and wishes, it was demonstrated in the validation phase, based on the calculation results, that the results are, independent of the program, lie within the tolerance range. Thus, the transition from one to the other FE-calculation program can be started now.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>iv</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>v</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>vi</b>
<b>1 Einleitung und Motivation .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ziel der Arbeit.....	2
1.2 Ablauf der Arbeit .....	2
<b>2 Stand der Technik.....</b>	<b>3</b>
2.1 Aufbau der FEM-Programme .....	3
2.2 Vor- und Nachteile typischer FEM-Programme.....	5
2.3 Iterationsschritte der FEM-Berechnung.....	6
2.4 Komponentenbezeichnung in einem FEM-Modell.....	7
2.5 Ausgabe der FEM-Berechnungsprogramme.....	9
2.5.1 Verschiebung .....	10
2.5.2 Reaktionskräfte .....	13
2.6 Benutzerspezifische Vereinfachungen .....	15
<b>3 Analyse der Aufgabenstellung .....</b>	<b>16</b>
3.1 Spezifikationen der zu realisierenden Makros.....	18
<b>4 Umsetzung der Aufgabenstellung.....</b>	<b>20</b>
4.1 Verschiebungen .....	21
4.2 Reaktionskräfte .....	33
4.3 Lagenabhängige Spannungen und Tsai-Wu-Versagenskriterien .....	44
4.4 Nachweis der Schraubverbindungen .....	56
4.5 Nachweis einer Verzapfungsverbindung.....	69
4.6 Einbindungen der Makros .....	79
4.7 Umsetzung der Wünsche .....	80
<b>5 Validierung .....</b>	<b>84</b>
5.1 Modell 1 .....	85
5.2 Modell 2 .....	88
5.3 Modell 3 .....	93
5.4 Modell 4 .....	97
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>104</b>
<b>7 Literatur- und Quellenverzeichnis .....</b>	<b>105</b>
<b>8 Anhang A: Flussdiagramme .....</b>	<b>106</b>

## Abkürzungsverzeichnis

APDL	ANSYS Parametrik Design Language
CAD	Computer Aided Design
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
EID	Elementtyp
FBD	Free Body Diagram
FEM	Finite Elemente Methode
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GUI	Graphical User Interface
HV	HyperView
KOS	Koordinatensystem
POST	Post-Prozessor
PRÄ	Prä-Prozessor
SID	Sektion
SOL	Solver
TCL	Tool Command Language

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.2.1: Baugruppen- und lastfallabhängige extreme Verschiebungen und Koordinate dazugehöriger Knoten.....	12
Tabelle 2.2.2: Lagerpositionen der gesamten Waschraumeinheit .....	13
Tabelle 2.2.3: Reaktionskräfte und zulässige Kräfte an den Lager.....	14
Tabelle 3.1: Definition der relevanten Lastfälle .....	17
Tabelle 5.1: Zusammenfassung der Untersuchungsparameter einzelner FE-Modelle .....	84
Tabelle 5.2: Modellsektionen mit Angabe der Aufbauten.....	84
Tabelle 5.3: MID-benogene Materialparameter.....	85
Tabelle 5.4: Berechnungsergebnisse der Verschiebung bei 60g im Modell 1 .....	86
Tabelle 5.5: Lagerreaktionskräfte, Modell 1 .....	87
Tabelle 5.6: Richtungs- und lagenabhängige maximale Spannungen, Modell 1 .....	88
Tabelle 5.7: Maximale Gesamtverschiebungen, Modell 2 .....	90
Tabelle 5.8: Lagerreaktionskräfte, Modell 2 .....	90
Tabelle 5.9: Maximal auftretenden Spannungen, Modell 2.....	91
Tabelle 5.10: Wirkende Kräfte in der Verzapfung des Modells 2 .....	92
Tabelle 5.11: Maximale Verschiebungen, Modell 3.....	94
Tabelle 5.12: Lagerreaktionskräfte, Modell 2 .....	94
Tabelle 5.13: Maximal auftretenden Spannungen, Modell 3 .....	95
Tabelle 5.14: Schraubenberechnung, Modell 3 .....	96
Tabelle 5.15: Modalanalyse, Modell 3 .....	96
Tabelle 5.16: Maximale Verschiebungen, Modell 4.....	98
Tabelle 5.17: Lagerreaktionskräfte, Modell 4 .....	99
Tabelle 5.18: Maximale Spannungen, Modell 4 .....	100
Tabelle 5.19: Maximale Tsai-Wu-Werte, Modell 5 .....	101
Tabelle 5.20: In Verzapfungsverbindung auftretende Kräfte, Modell 4.....	101
Tabelle 5.21: Modalanalyse, Modell 4 .....	103

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 : Ablaufvorgang in FEM-Berechnungsprogramm .....	4
Abbildung 2.2: Waschraum eines A380 Flugzeugs der Air Berlin Airline.....	7
Abbildung 2.3: FEM-Komponentenbezeichnung einer Waschraumeinheit.....	8
Abbildung 2.4: Verschiebungen in der vorderen Seitenwand einer Waschraumeinheit ....	10
Abbildung 2.5: Ermittlung der Koordinaten und Verschiebungen eines gesuchten Knotens in der vorderen Seitenwand einer Waschraumeinheit.....	11
Abbildung 2.6: Ermittlung der Lagerkräfte der vorderen Seitenwand .....	13
Abbildung 3.1: Allgemein gültiges Koordinatensystem der Flugzeughersteller .....	17
Abbildung 3.2: Schematische Darstellung einer Verzapfung .....	19
Abbildung 4.1: Deformation, Mind-Map-Diagramm, Benutzeroberfläche .....	21
Abbildung 4.2: Deformation, Alternativkonzepte, Benutzeroberfläche .....	22
Abbildung 4.3: Verschiebungen, Bewertungsmatrix, Benutzeroberfläche .....	22
Abbildung 4.4: Verschiebungen, Mind-Map, Ausgabedatei bilden und erstellen .....	23
Abbildung 4.5: Verschiebungen, Alternativkonzepte, Ausgabedatei bilden und erstellen	24
Abbildung 4.6: Verschiebungen, Bewertungsmatrix, Ausgabedatei bilden und erstellen .	25
Abbildung 4.7: Verschiebungen, Flussdiagramm 1, Benutzeroberfläche.....	27
Abbildung 4.8: Verschiebungen, Benutzeroberfläche .....	28
Abbildung 4.9: Flussdiagramm 1.1, Prozedur „Control“ .....	29
Abbildung 4.10: Flussdiagramm 1.2, Prozedur „GetValues“ .....	31
Abbildung 4.11: Verformung, Ausgabedatei .....	32
Abbildung 4.12: Reaktionskräfte, Mind-Map-Diagramm, Ausgabedatei.....	34
Abbildung 4.13: Reaktionskräfte, Alternativkonzepte, Ausgabedatei bilden und erstellen	34
Abbildung 4.14: Reaktionskräfte, Bewertungsmatrix, Ausgabedatei bilden und erstellen	35
Abbildung 4.15: Reaktionskräfte, Flussdiagramm 2, Benutzeroberfläche .....	37
Abbildung 4.16: Reaktionskräfte, Benutzeroberfläche .....	38
Abbildung 4.17: Flussdiagramm 2.1, Prozedur „Control“ .....	39

Abbildung 4.18: Flussdiagramm 2.2, Prozedur „GetNodeCoord“ .....	41
Abbildung 4.19: Flussdiagramm 2.3, Prozedur „GetRefo“ .....	42
Abbildung 4.20: Reaktionskräfte, Ausgabedatei.....	44
Abbildung 4.21: Spannungen & Tsai-Wu, Mind-Map-Diagramm, Ausgabedatei.....	45
Abbildung 4.22: Spannungen & Tsai-Wu, Mind-Map-Diagramm, Benutzeroberfläche ...	47
Abbildung 4.23: Spannungen & Tsai-Wu, Flussdiagramm 3, Benutzeroberfläche .....	49
Abbildung 4.24: Spannungen & Tsai-Wu, Benutzeroberfläche .....	50
Abbildung 4.25: Spannungen & Tsai-Wu, Inputdatei .....	51
Abbildung 4.26: Spannungen & Tsai-Wu, Ausgabedatei, Anfang.....	55
Abbildung 4.27: Schraubverbindung zweier Baugruppen.....	56
Abbildung 4.28: Schraubverbindungen, Mind-Map-Diagramm, Benutzeroberfläche.....	57
Abbildung 4.29: Schraubverbindungen, Alternativkonzepte, Benutzeroberfläche .....	58
Abbildung 4.30: Schraubverbindungen, Bewertungsmatrix, Benutzeroberfläche .....	59
Abbildung 4.31: Schraubverbindungen, Mind-Map-Diagramm, Ausgabedatei .....	60
Abbildung 4.32: Schraubverbindungen, Flussdiagramm 4, Benutzeroberfläche .....	62
Abbildung 4.33: Schraubverbindungen, Benutzeroberfläche .....	63
Abbildung 4.34: Schraubverbindungen, Inputdatei.....	64
Abbildung 4.35: Prozedur „CreateNodeIdListFBDTool“. Zweite Baugruppe.....	65
Abbildung 4.36: Prozedur „CreateNodeIdListFBDTool“. Erste Baugruppe .....	66
Abbildung 4.37: Schraubverbindungen, Ausgabedatei.....	68
Abbildung 4.38: FE-Modell einer Verzapfungsverbindung .....	69
Abbildung 4.39: Verzapfungsverbindung, Mind-Map-Diagramm, Benutzeroberfläche ...	70
Abbildung 4.40: Verzapfungsverbindung, Mind-Map-Diagramm, Ausgabedatei.....	71
Abbildung 4.41: Verzapfungsverbindung, Flussdiagramm 5, Benutzeroberfläche.....	73
Abbildung 4.42: Verzapfungsverbindung, Benutzeroberfläche .....	74
Abbildung 4.43: Gemeinsame Knoten und umliegende 2D-Elemente.....	76
Abbildung 4.44: Lokales KOS benachbarter Knoten .....	77
Abbildung 4.45: Verzapfungsverbindung, Ausgabedatei, Anfang .....	78



Abbildung 4.46: Eingebundene Makros .....	79
Abbildung 4.47: Einbindung der Wunsch-Makros.....	80
Abbildung 4.48: Vergrößerte Darstellung der Wunsch-Makros .....	81
Abbildung 4.49: Benutzeroberfläche des Wunsch-Makros „ <i>SHELL DATA</i> “ .....	81
Abbildung 4.50: Anwendungsergebnis des Makros „Create SET“ .....	82
Abbildung 4.51: Benutzeroberfläche des Makros „MAT“ .....	83
Abbildung 5.1: Modell 1, Gesamtansicht und Lagerung .....	85
Abbildung 5.2: Verschiebung in Belastungsrichtung, Modell 1 – links OptiStruct, rechts ANSYS.....	86
Abbildung 5.3: Maximale Spannungen in oberer GFK-Lage – links OptiStruct, rechts ANSYS.....	87
Abbildung 5.4: Modell 2 .....	89
Abbildung 5.5: Verschiebung in Belastungsrichtung, Modell 2 – links OptiStruct, rechts ANSYS.....	89
Abbildung 5.6: Lagerreaktionskräfte, Modell 2, OptiStruct .....	90
Abbildung 5.7: Spannungsverteilung in Faserrichtung, Modell 2 – links OptiStruct, rechts ANSYS .....	91
Abbildung 5.8: Modell 3 .....	93
Abbildung 5.9: Verschiebung in Belastungsrichtung, Modell 3 – links OptiStruct, rechts ANSYS.....	93
Abbildung 5.10: Darstellung der Schraubenverbindung, Modell 3 .....	95
Abbildung 5.11: Modell 4 .....	97
Abbildung 5.12: Maximale Verschiebungen, Modell 4 – links OptiStruct, rechts ANSYS.....	98
Abbildung 5.13: Lagerung des Modells 4.....	98
Abbildung 5.14: Spannungsverteilung in Faserrichtung, Modell 4 – links OptiStruct, rechts ANSYS .....	99
Abbildung 5.15: Verlauf der Tsai-Wu-Werte, Modell 4 – links OptiStruct, rechts ANSYS.....	100
Abbildung 5.16: Eigenmoden der 23 Eigenfrequenz, Modell 4 – links OptiStruct, rechts ANSYS.....	102

## 1 Einleitung und Motivation

Personenbeförderung über Luftwege hat sich fest in unserer Gesellschaft verankert und ist mit kontinuierlich steigendem Verkehrsvolumen die meist verwendete und sicherste Verkehrsart. Um das Fliegen kostengünstiger zu machen, setzen die Flugzeughersteller auf den Leichtbau. Es werden vermehrt leichte und feste Werkstoffen wie zum Beispiel der kohlenstofffaserverstärkter und glasfaserverstärkter Kunststoff (CFK) und (GFK) eingesetzt. Weiterhin erfolgt kontinuierliche gewichtsbezogene Optimierung der Bauteile.

Während der CFK zum größten Teil im Flugzeugrumpf und in dem primären sowie sekundären Leitwerksbau eingesetzt wird, besteht die Innenausstattung mit zahlreicher Anzahl an Sitzen, Küchen und insbesondere an Waschräumen aus GFK-Sandwich-Strukturen.

Diese Arbeit wurde durch die Zusammenarbeit mit dem führenden Hersteller von Waschräumen in Flugzeugen, der Firma Diehl Comfort Modules GmbH ermöglicht. Das Hauptbeschäftigungsfeld der Firma ist die Entwicklung und Herstellung der Sanitäreinrichtungen von Flugzeugen.

Jedes betriebswirtschaftliche Unternehmen ist stets bestrebt sein Potential auf der freien Marktwirtschaft zu vergrößern. Um dem Bestreben gerecht zu werden, bedarf es einer Investition in das eigene Unternehmen, was in erster Linie aus den Geldern des erwirtschafteten Gewinns erfolgt. Fällt jedoch der Gewinn kleiner als die Erwartung aus, so ist ein Unternehmen gezwungen das Investitionsvolumen zu optimieren. Das Augenmerk fällt dabei meistens auf zwei folgende Auswege: zum einen hat das Unternehmen die Möglichkeit den Preis für seine Produkte zu erhöhen, was durch den zunehmenden Wettbewerbsdruck schwer durchsetzbar ist, zum anderen besteht die Möglichkeit die Ablaufprozesse im Unternehmen zu standardisieren und zu automatisieren.

Die teil- oder vollautomatische Ausführung der Prozessschritte kann auf vielen verschiedenen Ebenen eines Unternehmens realisiert werden und wird in einem zukunftsorientierten, gesunden Unternehmen kontinuierlich betrieben. Ein hohes Optimierungspotential weist die Berechnungsabteilung auf, die sich mit der statischen Nachweisführung beschäftigt und die Finite Elemente Methoden (FEM) einsetzt.

Die Berechnungsergebnisse eines FEM-Programms werden auf zwei Arten ausgegeben. Zum einen handelt es sich um eine graphische Darstellung eines ausgewählten Parameters, wie zum Beispiel Verformung, zum anderen können die Ergebnisse in Form von Text-Dateien exportiert werden. Vor allem die Text-Dateien werden mit zunehmender Anzahl an Knotenpunkten unübersichtlich. Um die Berechnungsergebnisse interpretieren zu können, werden die Text-Dateien aufwendig und manuell in eine verständliche tabellarische Form umgewandelt. Zusätzlich müssen die im Rahmen der im Unternehmen durchgeführten Angleichung der FEM-Tools veränderten Ausgabeformate einer vordefinierten Form angepasst werden

Die Motivation für diese Arbeit ist die Automatisierung der Datenausgabe zur eindeutigen Auswertung. Die Umsetzung der Automatisierung ist an die Angleichung der FEM-Tools

gekoppelt und setzt eine Validierung der FEM-Berechnungsergebnisse unabhängig vom FEM-Tool voraus.

## 1.1 Ziel der Arbeit

Die zum Zweck der Automatisierung zu erstellende Software hat unter anderem folgende Aufgaben zu erfüllen:

- auslesen der Berechnungsergebnisse aus dem FEM-Tool,
- Ermittlung der existierenden Materialbeanspruchung mit vorgegebenen Versagenskriterien sowie
- Darstellung der ergänzten Berechnungsergebnisse in geeigneter tabellarischer Form.

## 1.2 Ablauf der Arbeit

Nach dieser Einleitung und Beschreibung der Ziele der Arbeit präsentiert Kapitel 2 im Stand der Technik die Funktionsstruktur aktueller FEM-Tools und geht auf die für diese Arbeit relevanten FEM-Bereiche detailliert ein. Drittes Kapitel beschreibt die Analyse der Aufgabenstellung und endet mit ausgearbeiteten Lastenheftspezifikationen. Für die Umsetzung der, im Lastenheft spezifizierten Anforderungen und Wünsche, in Frage kommende Konzepte werden im Kapitel 4 ausgearbeitet und bewertet. Die Realisierung des ausgewählten Konzepts wird im fünften Kapitel behandelt. Die Validierung der Berechnungsergebnisse wird im Kapitel 6 diskutiert und die Arbeit mit der Zusammenfassung und dem Ausblick im siebten Kapitel abgeschlossen.

## 2 Stand der Technik

Leichtbau wird von den Flugzeugherstellern betrieben, nicht nur um die Kosten der Fluglinien aufgrund der gestiegenen Reichweite zu senken, sondern auch um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren und somit die Umwelt zu schonen.

Moderne Flugzeuge sind im Vergleich zu 90-er Jahren etwa um 15 Prozent leichter geworden. Diese Entwicklung konnte durch den vermehrten Einsatz der fortschrittlichen Werkstoffe, wie des faserverstärkten Kunststoffes (FVK) und unter anderen der Sandwichbauweise erreicht werden.

Da die FVK in ihrem Aufbau nicht homogen sind und in meisten Fällen multiaxial ausgerichtet werden, ist die Berechnung der mechanischen Lasten an gekrümmten Bauteilen extrem schwierig. Aus diesem Grund werden spezialisierte Berechnungsmethoden, wie Finite-Elemente-Methoden (FEM), eingesetzt.

Die FEM ist ein numerisches Näherungsverfahren. Dieses Verfahren wird von den Ingenieuren eingesetzt, um hauptsächlich die Verformungen und Spannungen in Tragwerken zu berechnen. Die Hauptaufgaben der FEM sind:

- Berechnung und Visualisierung komplizierter Spannungszustände,
- rechnergestützter Belastungsnachweis mittels vordefinierter Versagens-kriterien,
- Reduktion der Kosten durch die Reduktion der Anzahl der Prototypen und
- Verkürzung der Entwicklungszeiten.

Somit rücken die FEM-Methoden immer tiefer in die Produktentwicklungsprozesse vor und bilden eine Grundlage für die Zulassung von Produkten.

### 2.1 Aufbau der FEM-Programme

Analytische Berechnung von einfachen Bauteilen erfolgt nach klassischen mechanischen Modellen. Bei komplizierten geometriehen stoßen solche Modelle schnell an ihre Grenzen. Den Ausweg aus dieser Problematik liefert die FEM. Die Grundidee ist, die komplexe Geometrie in einzelne Teilbereiche (Elemente) zu zerlegen. Jeder Teilbereich ist in Bezug auf sein Verformungsverhalten einfach beschreibbar. Die einzelnen benachbarten Elemente werden durch die sogenannten Knoten miteinander verbunden. Die Lösung für das Gesamtsystem resultiert aus der Summe der Einzellösungen der einzelnen Elemente.

Die FEM-Berechnungsprogramme bestehen in den meisten Fällen aus drei Blöcken. Dazu zählen Prä-Prozessor (PRÄ), Solver (SOL) und Post-Prozessor (POST). Die Schaltung der einzelnen Blöcke kann den Bezeichnungen entnommen werden und ist in folgender Abbildung 2.1 verdeutlicht.



Abbildung 2.1 : Ablaufvorgang in FEM-Berechnungsprogramm

Den Beginn der FEM-Berechnung stellt der Prä-Prozessor dar. In dem Prä-Prozessor werden Materialkennwerte definiert, 3D-Modelle erzeugt oder aus einem CAD-Programm importiert, dieses Modell vernetzt und dabei die Netzdichte ausgehen von Erfahrungswerten des Berechners angepasst. Nach der Vernetzung werden den einzelnen Elementen oder Elementgruppen die Eigenschaften, wie Elementtyp, Materialverhalten und gegebenenfalls vordefinierte Querschnittsfläche zugewiesen. Nachdem das Bauteil vollständig vernetzt und definiert ist, werden Lagerbedingungen eingeführt, indem bei einzelnen Knoten Freiheitsgrade gesperrt werden. Im nächsten Schritt werden die Belastungsrichtung und –art definiert.

Um den Berechnungsaufwand gering zu halten, kann dem Solver von dem Prä-Prozessor zusätzlich die Berechnungstiefe ausgewählter Elemente zugewiesen werden. Ein erfahrener Berechnungsingenieur kann somit die Güte der Ergebnisse in Bezug auf die Berechnungsdauer abstimmen. Alle diese Daten werden in eine spezielle Datei mit der Endung \*.fem gespeichert.

Die eigentliche Berechnung erfolgt in einem Solver. Dieser lädt die vom Prä-Prozessor erzeugte Datei und führt die Berechnungsschritte entsprechend der gewählten Berechnungsmethode aus. Der Solver läuft im Hintergrund und beansprucht dabei die höchste Rechnerleistung. Verläuft die Berechnung erfolgreich, werden vordefinierte Dateien für den Post-Prozessor erzeugt und gespeichert. Konvergiert jedoch die Lösung nicht, wird eine Error-Datei erstellt, die Problemsuche erleichtern soll.

Der Post-Prozessor greift auf die vom Solver erzeugte Datei und dient in erster Linie der Visualisierung der Rechenergebnisse. Der Nutzer kann wählen ob ihm beispielhaft die Verschiebungen oder die Spannungen im gesamten Bauteil angezeigt werden. Ist ein Bereich des Bauteils von Interesse, so hat der Nutzer die Möglichkeit sich diesen Bereich vergrößert darstellen zu lassen. Außerdem erlauben die meisten Post-Prozessoren den Zugriff auf die tabellarischen knotenabhängigen Berechnungsergebnisse. Somit kann der Berechnungsingenieur sich durch Zuhilfenahme weiterer Programme die gezielte Suche nach den ihn interessierenden Ergebnissen ermöglichen.

## 2.2 Vor- und Nachteile typischer FEM-Programme.

Heutzutage befinden sich auf dem Markt unterschiedliche FEM-Berechnungsprogramme. Dazu zählen unter anderem: Patran/Nastran, Ansys, HyperWorks, Abaqus.

Da es sich bei Nastran zu Beginn der Entwicklung de facto um einen reinen Solver gehandelt hat, war dieses Programm nicht besonders benutzerfreundlich. Den Durchbruch schaffte der Gründer von Ansys, Dr. John Swanson. In seinem Ur-Programm konzentrierte er sich auf Strukturmechanik mit Wärmeübertragung, koppelte diese jedoch schnell mit physikalischen Phänomenen und ergänzte dies mit der Visualisierung der Ergebnisse. Dadurch genoss Ansys hohe Verbreitung und galt als eins der Standardprogramme.

Aufgrund der vorhandenen Vor- und Nachteilen von Ansys entstand eine Lücke, die von den konkurrierenden FEM-Berechnungsprogrammen teilweise geschlossen werden konnte. Im Folgenden werden beispielhaft Vor- und Nachteile, die in dieser Arbeit verwendeten FEM-Berechnungsprogramme vorgestellt.

Vorteile von Ansys:

1. Vereinigung des Prä- und Postprozessors sowie des Solvers in einem Programm. Dadurch wird es möglich ein Netzmodell zu erstellen, es zu berechnen und anschließend die Ergebnisse visualisiert darzustellen, ohne, dass zwischen mehreren Programmen gewechselt werden muss.
2. Durch die Benutzung des ANSYS Parametric Design Languages (APDL) werden die Eingabemöglichkeiten des Graphical User Interfaces (GUI) weitgehend erweitert. Dies geschieht indem die vordefinierten Befehle eingesetzt und zuvor geschriebene Programmcodes gespeichert und ausgeführt werden.
3. Die Körpergeometrie kann durch das Einlesen der CAD-Dateien schnell erzeugt werden.

Nachteile von Ansys:

1. Erzeugtes Netzmodell kann nur durch die Veränderung des Körpermodells realisiert werden. Soll die Auswirkung eines Risses auf die mechanischen Eigenschaften des Körpers näher untersucht werden, so muss dieser in das Körpermodell integriert und das Modell neu vernetzt werden.
2. Die Prä- und Postprozessoren sind langsam im Vergleich zu den anderen FEM-Programmen. Zudem ist die Benutzung der Prä- und Postprozessoren über Konsole gewöhnungsbedürftig und somit nicht benutzerfreundlich.
3. Um den Rechenaufwand zu begrenzen, werden die flächigen Körper auf ein Mittelflächenmodell reduziert. Die Erzeugung dieses Mittelflächenmodells in Ansys ist sehr zeitaufwendig.

Die Nachteile von Ansys werden zum Beispiel von Hyper Works zum größten Teil behoben. Dabei vereint der Begriff HyperWorks eine Ansammlung von den an die jeweiligen Schwerpunkte zugeschnittene Programme.

Vorteile von HyperWorks:

1. Die Prä- und Postprozessoren sowie der Solver stellen jeweils ein, aufeinander abgestimmtes Teilprogramm dar. Die Funktionsfähigkeit des GUIs wurde deutlich erhöht, wodurch zum Beispiel die Modellbildungsphase verkürzt wird. Der Prä-Prozessor wird als HyperMesh, der Solver als OptiStruct und der Post-Prozessor als HyperView bezeichnet.
2. Eingliederung zusätzlicher Module in das Programm, welche zum Beispiel den Schwerpunkt des Körpermodells durchs Anklicken eines Buttons anzeigen oder die Chancen auf die erfolgreiche Berechnung ausgeben und bei einem möglichen Fehler die Bearbeitung des jeweiligen Elementes erlauben. Durch die frühzeitige Vermeidung von Fehlern führen die meisten Berechnung zu einem verwendbaren Ergebnis.
3. Im Gegensatz zu Ansys kann das Netzmodell des aus CAD-Datei erzeugten Körpers unabhängig von seiner Geometrie verändert werden.
4. Die Erzeugung der Mittelflächen erfolgt automatisiert durch das Anklicken des 3D-Körpermodells.

Nachteile von HyperWorks:

1. Durch die Trennung in drei Teilprogramme ist die Übertragung der programmbezogener Eigenschaften, wie zum Beispiel der Materialeigenschaften oder der Lagenaufbau der Verbundwerkstoffe aus dem HyperMesh in den HyperView, nicht mehr möglich.
2. Im Moment geringe Verbreitung in den Firmen.

Da die Entwickler des Programms sich des ersten Nachteils bewusst sind, wird an der Implementierung der Teilprogramme in ein Gesamtpaket, wie es bei Ansys der Fall ist, gearbeitet.

Viele flexible und dynamische Unternehmen haben die Vorteile von HyperWorks, insbesondere die niedrigen Lizenzkosten, erkannt und ersetzen zunehmend Ansys durch HyperWorks. Durch die steigende Verbreitung des Programms wird der Support ausgeweitet und mögliche Problemlösungen in Fachforen diskutiert.

## 2.3 Iterationsschritte der FEM-Berechnung

Die in vielen Unternehmen zwecks der Kostenreduktion eingesetzte FEM-Berechnung und von allem die Ergebnisse dieser Berechnung müssen von einem Fachspezialisten anhand seiner Erfahrungswerte und Kenntnisse in Materialwissenschaften kritisch beurteilt werden.

Da die FEM-Berechnung lediglich eine Näherung an die real im Material ablaufenden Prozesse ist, müssen, zwar im reduzierten Umfang, jedoch immer noch mechanische Tests des eingesetzten Materialien oder der gesamten Baugruppen durchgeführt werden.

Um die Anzahl der teuren Bauteilprüfungen zu reduzieren, werden die FEM-Berechnungen im jeweiligen Unternehmen optimiert, indem folgende Iterationsschritte kontinuierlich wiederholt werden:

- I. Erzeugung des Körpermodells und die Eingabe der aus der Fachliteratur bekannten Materialkennwerte im Prä-Prozessor.
- II. Kritische Auswertung der Berechnungsergebnisse im Post-Prozessor. Dabei kann erfahrener Berechner vorab beurteilen, ob ausgegebene Spannungen und Dehnungen im eingesetzten Material überhaupt vorkommen können. Der Berechner kann die Netzdichte in kritischen Bereichen anpassen und die Berechnung wiederholen.
- III. Erst nachdem, oder wenn die Berechnungsergebnisse gar nicht im erwarteten Bereich vorliegen, müssen mechanischen Prüfungen durchgeführt werden. Anhand dieser mechanischen Untersuchungen werden die Berechnungsergebnisse validiert.
- IV. Weichen die Berechnungsergebnisse von den Ergebnissen der mechanischen Prüfung ab, werden ergänzende Materialprüfungen durchgeführt und die Kennwerte im Präprozessor angepasst und das Netzmodell optimiert.

Somit schließt sich der Kreis. Nach dem vierten Iterationsschritt kehrt der FEM-Berechner zum ersten Schritt zurück. Je erfahrener der FEM-Berechner ist, desto weniger Iterationsschritte durchgeführt werden müssen, bis ein verwendbares Ergebnis vorliegt.

Obwohl in vielen Fällen die FEM-Berechnung hervorragende Ergebnisse liefert und durch den reduzierten Prüfaufwand enorme Kosten spart, schreiben viele Zulassungsnormen vor, dass die Baugruppen, wie zum Beispiel Rotorblätter der Windenergieanlagen, oder sogar das gesamte Produkt, wie ein Auto im Crash-Test, geprüft werden müssen. Die Flugzeugzulassungsnormen sind dabei am strengsten.

## 2.4 Komponentenbezeichnung in einem FEM-Modell

Zum besseren Verständnis der folgenden Unterkapitel soll zunächst das Schema der Bezeichnung der einzelnen Komponente und Materialien im FEM-Modell am Beispiel der, in dieser Arbeit behandelten, Waschräumeinheiten erläutert werden. Eine typische Waschräumeinheit ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

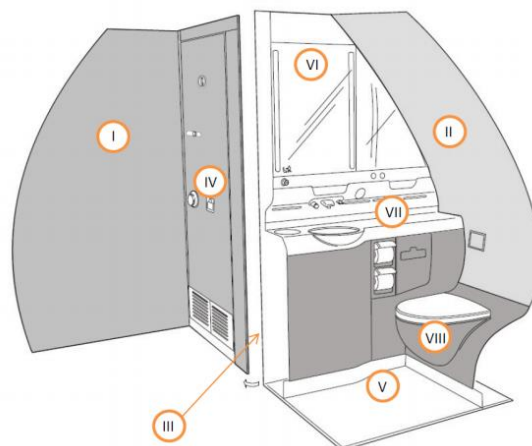


Abbildung 2.2: Waschraum eines A380 Flugzeugs der Air Berlin Airline [7]

Die in Abbildung 2.2 dargestellte Waschräumeinheit besteht aus folgenden Komponenten, die als eigene Baugruppen geführt werden: I – Gehäuse, II – Rückwand, III – Seitenwand, IV – Tür, V – Fussbodeneinheit, VI – Service Cabinet, VII – Waschtisch und VIII – Toilette.



Um die Berechnung der Baugruppen in FEM-Programmen durchzuführen, besitzen alle Komponenten eines FEM-Modells ein geordnetes Bezeichnungsschema, das sich aus den Elementtypen (EID) und der „Section ID“ (SID) zusammensetzt. Die Elementtypen werden wiederum von den Baugruppen der Waschraumeinheiten abgeleitet und können folgende Wertebereiche annehmen:

- Rückwand (EID 10...19),
- Vordere Seitenwand (EID 20...29),
- Hintere Seitenwand (EID 30...39),
- Längsgangwand (EID 40...49),
- Decke (EID 50...59),
- Bodenplatte (EID 60...69).

Werden zwei Waschraumeinheiten in einem FEM-Modell untersucht, so wird die EID-Nummer der zweiten Waschraumeinheit dreistellig. Beispielhaft kann die EID-Nummer des zweiten Rückwand-Moduls zwischen 110 und 119 liegen. Die EID-Nummer der Bodenplatte können zwischen 160 und 169 liegen.

Die SID-Nummer des zugehörigen Elementtypen kann sich in einem Wertebereich zwischen 100 und 999 bewegen und wird von dem jeweiligen Werkstoff und Profil vorgegeben.

In Abbildung 2.3 ist eine FEM-Modelldarstellung einer Waschraumeinheit schematisch, mit Angabe der Elementtypen und SectionID's ausgewählter Komponenten, abgebildet.

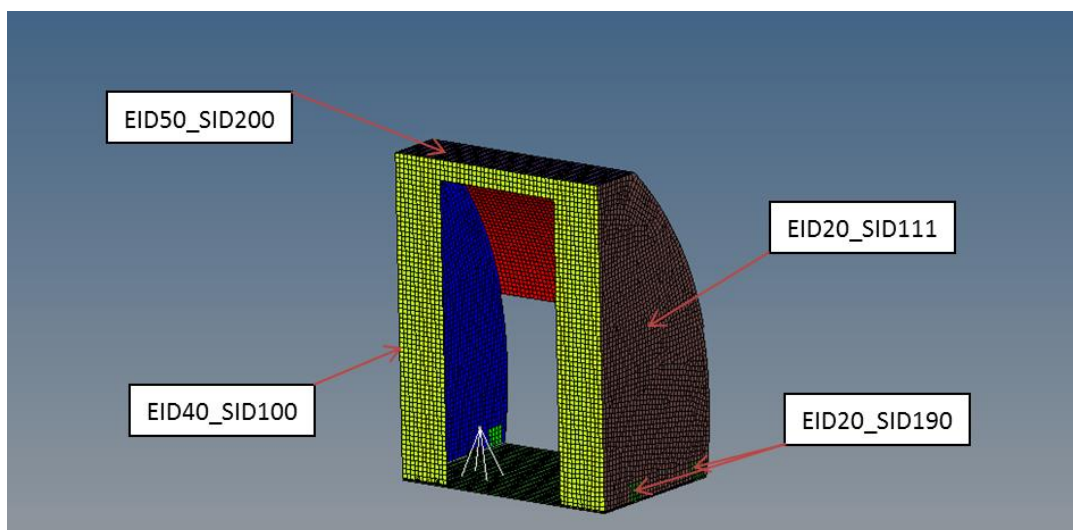


Abbildung 2.3: FEM-Komponentenbezeichnung einer Waschraumeinheit

Die in Abbildung 2.3 mit den roten Pfeilen an die zugehörige Komponente verweisenden Komponentenbezeichnungen besitzen eine feste Struktur. Die Komponentenbezeichnung beginnt mit einer Elementtypnummer und endet mit der Section-ID-Nummer.

Die Trennung der beiden Nummern erfolgt durch einen Unterstrich. Bei der genaueren Betrachtung dieser Abbildung fällt auf, dass die vordere Seitenwand aus zwei Komponenten besteht, die eine identische EID-Nummer besitzen, jedoch sich in der SID-Nummer unterscheiden. Das bedeutet, dass die Komponenten der vorderen Seitenwand sich in der

Geometrie oder Material unterscheiden. In diesem Fall besteht die vordere Seitenwand aus einer Sandwich-Wabenplatte und den darin implementierten Hartgewebereichen, die zur Befestigung der Seitenwand dienen.

Die in einem FEM-Modell verwendete Materialien besitzen eine fest definierte Struktur, die mit „MAT“ anfängt und mit einer Zahl endet. Die bei der Materialbezeichnung verwendeten Zahlen beinhalten folgende Bedeutung:

- Waben 1...9,
- GFK Dickschichten 10...29,
- CFK Dickschichten 30...39,
- Isotope/Quasiisotope 40...49,
- andere Materialien ab 50.

Erst wenn die Geometrie und Materialien festgelegt sind, kann nach der Definition der Freiheitsgrade der Lagerstellen und der Lastfälle eine FEM-Berechnung starten.

## 2.5 Ausgabe der FEM-Berechnungsprogramme

Je nach Anwendungsfall hat der FEM-Berechner immer die Möglichkeit programm-übergreifend die Ausgabe des Solvers selbst zu bestimmen. Dies geschieht bereits in der Prä-Prozessor-Phase, indem der Berechner die gewünschten Ausgabetypen definiert.

Während der Berechnung erzeugt der Solver, in Abhängigkeit von der Anzahl und dem Typ der definierten Ausgabe, mehrere Dateien, in unterschiedlichen Daten-Formaten, die die Berechnungsergebnisse beinhalten und vom jeweiligen Post-Prozessor angesehen werden können.

Als definierte Ausgabe werden in den meisten Fällen folgende Parameter gewählt: Reaktions- und Schnittkräfte, Spannungen, Verschiebungen sowie elementenabhängige Versagenskriterien. Die Auswertung der Berechnungsergebnisse läuft unabhängig von dem definierten Parameter in der gleichen Reihenfolge ab: Der Berechner wählt im Post-Prozessor den gewünschten Parameter aus und das Programm gibt ihm das Berechnungsergebnis farbig skaliert über dem geometrischen Modell wieder. Im nächsten Schritt wählt der Berechner ihn interessierende Bereiche des Modells aus und notiert sich in eine extern erzeugte Tabelle die resultierenden Werte. Aus diesen Werten können anschließend weitere nützliche Faktoren wie Sicherheitsbeiwerte ausgerechnet werden.

In den beiden folgenden Unterkapiteln wird beispielhaft die Arbeit mit der Ausgabedatei anhand der Verschiebungen (*engl.* displacement) und Reaktionskräften (*engl.* reaction forces) beschrieben. Da die Aufgabe dieser Arbeit die Automatisierung der Datenauswertung ist, wird für die Beschreibung das Programm HyperWorks eingesetzt.

Alle in folgende Tabellen eingetragenen Werte wurden zu demonstrationszwecken durch Zufallszahlen ersetzt und besitzen keine Relation zu den realen Waschraumeinheiten.

## 2.5.1 Verschiebung

Nachdem der Solver die Berechnung abgeschlossen hat, lädt der Berechnungs-Ingenieur in den Post-Prozessor, HyperView, zwei Dateien: das Modell- und das Ergebnisdatei. Beide Dateien haben das „\*.h3d“-Format und beinhalten die meisten Berechnungsergebnisse. In besonderen Fällen wird zusätzlich eine Datei mit der Erweiterung „\*.op2“ geladen.

Nachdem die Dateien erfolgreich geladen wurden, definiert der Berechnungs-Ingenieur einen für ihn relevanten Lastfall und wählt in einer Programm-Leiste die Verschiebungen aus. Das Programm stellt in Abbildung 2.4 das Ergebnis für den gewünschten Parameter grafisch dar.

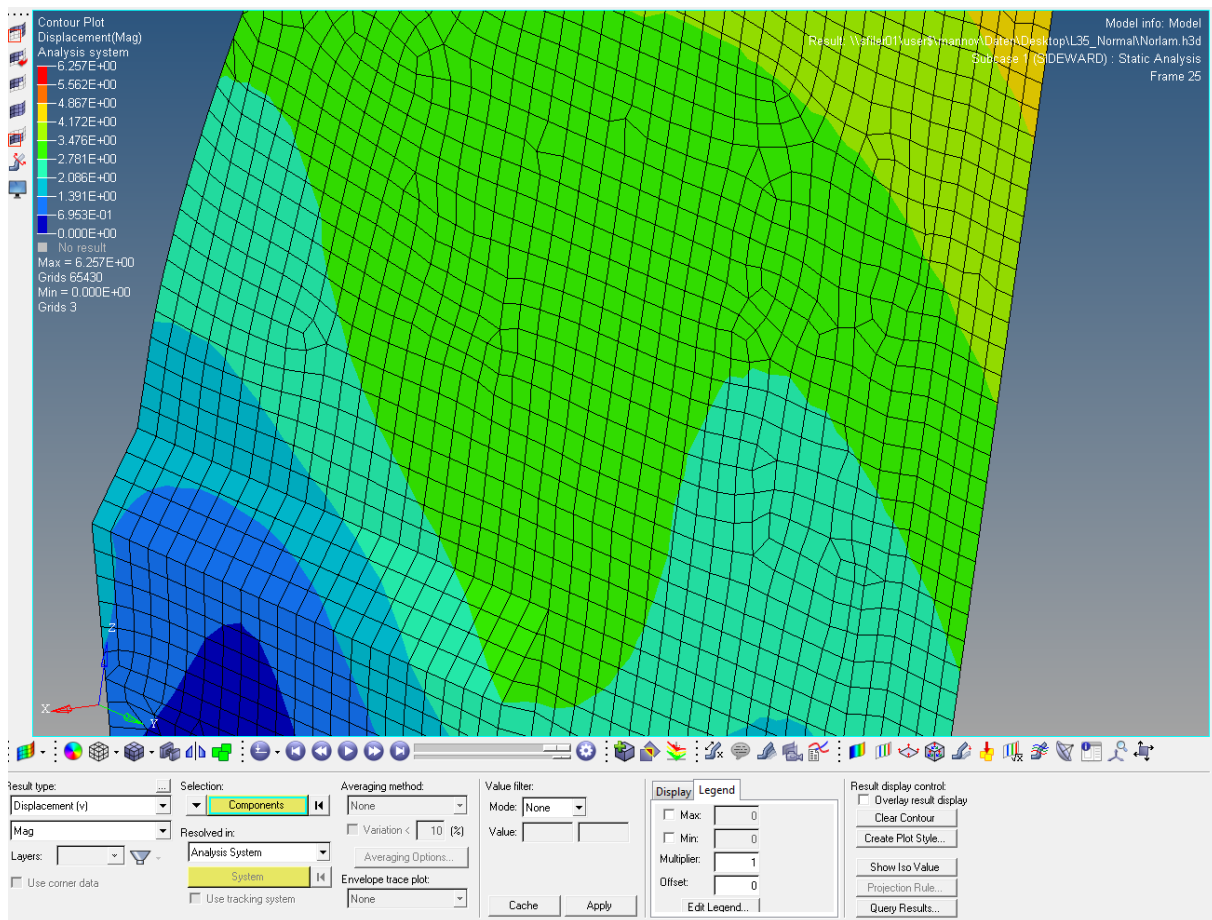


Abbildung 2.4: Verschiebungen in der vorderen Seitenwand einer Waschräumeinheit

In Abbildung 2.4 ist ein farbiger Verlauf der Verschiebungen über deutlich erkennbarem geometrischem Modell zu erkennen. Die Zuordnung der Farben zu den auftretenden Verschiebungen erfolgt anhand der sich in der oberen linken Ecke in Abbildung 2.4 befindlicher Skalen. Anhand dieser Werte lässt sich schnell erkennen, in welchem Bereich der vorderen Seitenwand die höchsten (in rot) oder niedrigsten Verschiebungen (in blau) auftreten.

Anhand der Abbildung 2.4 beschafft sich der Berechnungs-Ingenieur einen globalen Überblick über den Verschiebungsverlauf und kann einschätzen, ob solche Werte plausibel sind und für die weitere Analyse verwendet werden dürfen.

In der weiteren Analyse sind die Extremwerte von Bedeutung und können schnell unter der Farbskala in Abbildung 2.4 abgelesen werden. Die ID der betroffenen Finiten Elemente ist ebenfalls benutzerfreundlich angegeben und erleichtert die weitere Parametersuche.

Neben dem Betrag der Verschiebung sind die Einzelverschiebungen in Achsrichtungen sowie die Position des betroffenen Knotens in Bezug auf den Ausgangszustand in dem globalen 3D-KOS von Bedeutung. Zu diesem Zweck wird in dem sich unter der graphische Ergebnisdarstellung befindlichen Workpanel eine neue Messgruppe erstellt, Positionsfilter selektiert und in der in Abbildung 2.5 erschienenen Maske der gesuchte Knoten über Node ID eingegeben.

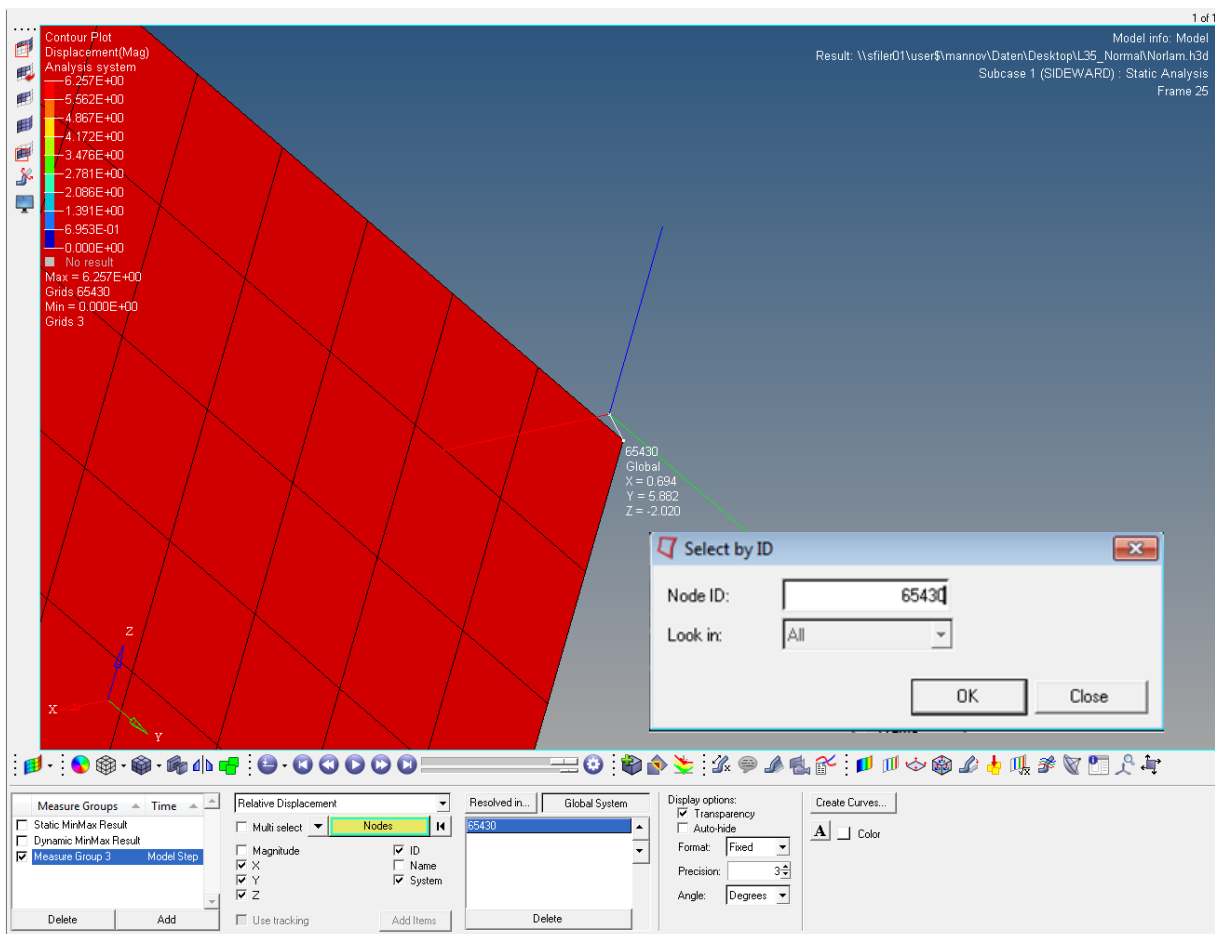


Abbildung 2.5: Ermittlung der Koordinaten und Verschiebungen eines gesuchten Knotens in der vorderen Seitenwand einer Waschräumeinheit

Nach dem Bestätigen der Eingabe erscheint in Abbildung 2.5 der gesuchte Knoten und die dazugehörigen Verschiebungen.

Für die weitere Auswertung werden die ermittelten lastfallabhängigen Werte von dem Berechnungs-Ingenieur manuell in eine externe Tabelle kopiert. Der Aufwand dieser manuellen Operation und die Anzahl der Wiederholungen hängt davon ab, wie viele Lastfälle und Knoten untersucht werden.

Um die Koordinaten des gesuchten Knotens zu ermitteln muss lediglich im Workpanel der entsprechende Filter angewandt und der Vorgang wiederholt werden. Darauf wird ersichtlich wie

aufwändig und fehlerbehaftet solche Operationen sind, denn für die Ermittlung der Extremwerte einer kompletten Waschraumeinheit wird lediglich pro Baugruppe und Lastfall eine Zeile in der zusammengefassten Tabelle 2.1 benötigt.

Tabelle 2.2.1: Baugruppen- und lastfallabhängige extreme Verschiebungen und Koordinate dazugehöriger Knoten.

EID	Node	Location			Deformation			
		X	Y	Z	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	U <sub>Sum</sub>
<b>LC 1: 9.00g fwd</b>								
10	2822	312,3	-1210,9	510,3	-1,7	7,3	-1,6	7,7
20	45616	12,5	-546,0	923,0	-33,5	-1,6	0,5	33,5
30	46244	1511,5	-542,5	950,5	-9,5	-0,2	-0,4	9,5
40	43471	322,5	-130,0	780,8	-19,1	-8,8	-1,3	21,1
50	1704	12,5	-130,0	2018,0	-5,0	-4,0	1,5	6,6
<b>LC 2: -3.00g swd</b>								
10	2836	732,0	-1210,9	510,3	0,1	9,8	0,0	9,8
20	1704	12,5	-130,0	2018,0	0,9	6,9	-2,0	7,2
30	65430	1511,5	0,0	2018,0	1,1	6,0	-2,0	6,4
40	1704	12,5	-130,0	2018,0	0,9	6,9	-2,0	7,2
50	1704	12,5	-130,0	2018,0	0,9	6,9	-2,0	7,2
<b>LC 3: 8.90g dwd</b>								
10	3524	815,2	-492,4	2018,0	0,4	8,0	-2,3	8,3
20	45614	12,5	-546,0	978,0	-7,8	3,6	-1,5	8,8
30	65430	1511,5	0,0	2018,0	0,4	6,9	-3,5	7,8
40	887	408,3	-130,0	2018,0	0,5	7,6	-4,4	8,8
50	887	408,3	-130,0	2018,0	0,5	7,6	-4,4	8,8
<b>Maximum Values</b>								
10	2836	732,0	-1210,9	510,3	0,1	9,8	0,0	9,8
20	45616	12,5	-546,0	923,0	-33,5	-1,6	0,5	33,5
30	46244	1511,5	-542,5	950,5	-9,5	-0,2	-0,4	9,5
40	43471	322,5	-130,0	780,8	-19,1	-8,8	-1,3	21,1
50	887	408,3	-130,0	2018,0	0,5	7,6	-4,4	8,8

Tabelle 2.1 besteht aus vier Hauptspalten. Zu jeder Baugruppe in der linken Spalte EID gehört ein Knoten mit einer maximalen Verschiebung. Die Nummer dieses Knotens steht in der Spalte Node. Die Koordinaten dieses Knotens sind in der Spalte Location in X-, Y- und Z-Richtung aufgeschlüsselt. Die sich ergebenden Verschiebungen sind in der rechten Spalte Deformation sind ebenfalls nach der Richtung des KOS aufgliedert.

Tabelle 2.1 ist durch die Lastfallzeilen horizontal getrennt. Im Lastfall LC 1 wird eine Belastung von 9 g in X-Richtung simuliert. Für Lastfall LC 2 gelten entsprechend -3 g in Y-Richtung und für den Lastfall LC 3 8,9 g in die negative Z-Richtung. Die relevanten maximalen Werte sind im unteren Tabellenbereich als Maximum Values für jede Baugruppe zusammengefasst.

Solche Tabellen, wie die Tabelle 2.1 werden für jeden Parameter unf gleiche, aufwendige und fehlerbehaftete Art und Weise erstellt. Dabei ist die Anzahl der Einträge in der Tabellen von dem jeweiligen Untersuchungsparameter abhängig und wird kurz anhand der Reaktionskräfte verdeutlicht.

## 2.5.2 Reaktionskräfte

Wie bei den Verschiebungen beginnt die Untersuchung der Lagerbelastung mit der grafischen Darstellung der Berechnungsergebnisse. Ein Ausschnitt der ermittelten Lagerkräfte ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

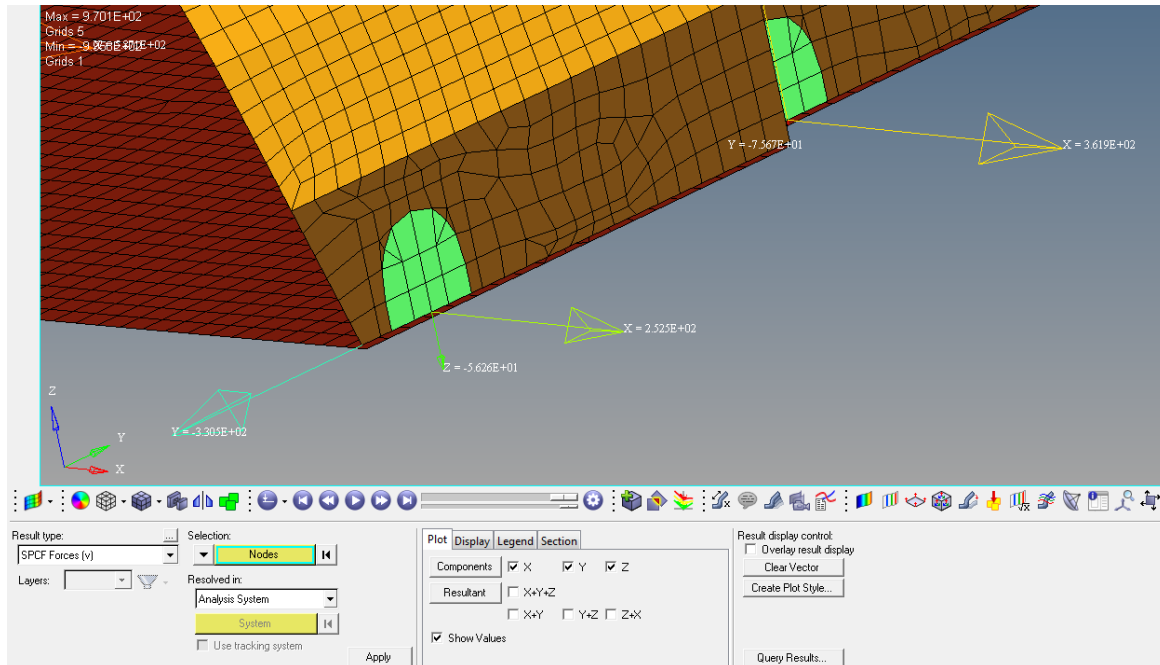


Abbildung 2.6: Ermittlung der Lagerkräfte der vorderen Seitenwand

Aus dem unteren Bereich der Abbildung 2.6 ist zu erkennen, dass für die Lagerkraftdarstellung ein anderes Workpanel verwendet wird. Die ermittelten Kräfte werden vektoriell für das globale KOS mit den dazugehörigen Beträgen dargestellt. Der Berechnungs-Ingenieur muss entsprechend wieder manuell die für seine weiteren Analysen notwendigen Werte in neue externe Tabelle übertragen.

Da für die Berechnung die Reaktionskräfte in den Lagern von Bedeutung sind, werden als erstes die Positionen der Lager, ähnlich der Bestimmung der Verschiebungen ermittelt. Diese sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Tabelle 2.2.2: Lagerpositionen der gesamten Waschraumeinheit

Location of Constraints					
Node	Type	X	Y	Z	Description
1	HP	13.0	-572.5	11.0	
2	HP	13.0	-1100.0	11.0	
3	HP	1562.3	-1075.5	11.0	
4	HP	1511.5	-572.5	11.0	
5	3D-ROD	1149.4	-800.0	1568.0	
6	3D-ROD	700.0	-454.5	2100.0	

Aus Tabelle 2.2 ist zu erkennen, dass die Waschraumeinheit an sechs Lagerstellen mit dem Flugzeugrumpf verbunden ist. Dabei werden zwei Lagertypen eingesetzt: HardPoint (HP) und

3D-Stabelement (3D-Rod). Bei den HP handelt es sich um eine feste Anbindung der Waschraumeinheit an den Schienen des Flugzeugfußbodens, während mit 3D-ROD das Dach und die Rückwand der Waschraumeinheit am Rumpf des Flugzeugs mit Hilfe der einstellbaren Stäbe befestigt werden.

Ergänzend zu der Lage der zu untersuchenden Knoten werden in Tabelle 2.3 die auftretenden Kräfte, die maximal erlaubten Kräfte sowie daraus resultierenden Sicherheitsbeiwerte zusammengefasst.

Tabelle 2.2.3: Reaktionskräfte und zulässige Kräfte an den Lager

Node	Type	Existing Force			Allowable Force			Reserve Factors				
		F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	RF <sub>x</sub>	RF <sub>y</sub>	RF <sub>z</sub>	RF <sub>xy</sub>	RF <sub>comb</sub>
<b>LC 1: 9.00g fwd</b>												
1	HP	203	-3430	10450	12000	12000	12000	59.14	3.50	1.15	3.49	
2	HP	-124	-3724	-10870	12000	12000	12000	96.70	3.22	1.10	3.22	
3	HP	13	-1965	-3214	12000	12000	12000	>100	6.11	3.73	6.11	
4	HP	-85	-91	3497	12000	12000	12000	>100	>100	3.43	96.09	
5	3D-ROD	-966	25	10	7500	225	1200	7.76	9.18	>100	5.93	
6	3D-ROD	960	-114	123	7500	225	1200	7.82	1.98	9.72	1.92	
Sum		0	-9300	-4								
<b>LC 2: -3.00g swd</b>												
1	HP	-1303	1423	23430	12000	12000	12000	9.21	8.43	<b>0.51</b>	6.22	
2	HP	-194	-1587	-4656	12000	12000	12000	61.92	7.56	2.58	7.51	
3	HP	153	-1503	-775	12000	12000	12000	78.48	7.98	15.49	7.94	
4	HP	319	1826	9343	12000	12000	12000	37.57	6.57	1.28	6.47	
5	3D-ROD	-559	17	21	7500	225	1200	13.42	13.16	58.54	9.39	
6	3D-ROD	1583	-177	223	7500	225	1200	4.74	1.27	5.38	1.23	
Sum		-1	-1	27586								
<b>LC 3: 8.90g dwd</b>												
1	HP	587	263	-996	12000	12000	12000	20.44	45.56	12.05	18.65	
2	HP	249	248	495	12000	12000	12000	48.13	48.39	24.22	34.13	
3	HP	253	-331	-56	12000	12000	12000	47.52	36.31	>100	28.85	
4	HP	362	-76	480	12000	12000	12000	33.16	>100	25.01	32.46	
5	3D-ROD	970	-30	-10	7500	225	1200	7.73	7.63	>100	5.43	
6	3D-ROD	679	-76	87	7500	225	1200	11.04	2.98	13.79	2.87	
Sum		3100	0	0								
<b>Absolute Extreme Values and Minimum Reserve Factors</b>												
1	HP	1303	3430	23430	12000	12000	12000	9.21	3.50	<b>0.51</b>	3.49	
2	HP	249	3724	10870	12000	12000	12000	48.13	3.22	1.10	3.22	
3	HP	253	1965	3214	12000	12000	12000	47.52	6.11	3.73	6.11	
4	HP	362	1826	9343	12000	12000	12000	33.16	6.57	1.28	6.47	
5	3D-ROD	970	30	21	7500	225	1200	7.73	7.63	58.54	5.43	
6	3D-ROD	1583	177	223	7500	225	1200	4.74	1.27	5.38	1.23	
											<b>MIN. RF.</b>	<b>0.51</b>

Die linke Spalte in Tabelle 2.3 mit der Bezeichnung „Node“ beinhaltet alle Knoten-IDs, der im FEM-Modell vorhandener Lagerknoten. Mit der folgenden Spalte „Type“ wird angedeutet um welche Art der Lageranbindung bei dem jeweiligen Knoten es sich handelt. In den drei folgenden Unterspalten werden die, von den verschiedenen Lastfällen verursachten Reaktionskräfte für jeden Lagerknoten komponentenweise eingetragen.

Die nächsten drei Unterspalten in Tabelle 2.3 mit der Oberbezeichnung „Allowable Force“ beinhalten für jede Lageranbindung zulässige Kräfte, die von dem Flugzeughersteller vorgegeben werden und nicht überschritten werden dürfen.

Die rechten Unterspalten in Tabelle 2.3 werden unter einer Oberbezeichnung „Reserve Factors“ zusammengefasst und beinhalten Sicherheitsfaktoren, die aus ertragbaren und herrschenden Lagerkräften gebildet werden.

Dabei soll erwähnt werden, dass die in dieser Tabelle angegebenen Reservefaktoren sich auf einer amerikanischen Reservefaktordefinition beruhen und in unserem Länderraum den Sicherheitsfaktoren entsprechen. Sind die Reservefaktoren aller drei Kraftkomponenten größer als eine Eins, so tritt an dem Lager kein Versagen auf. Daraus ist zu erkennen, dass das Lager 1 im zweiten Lastfall den Belastungen nicht standhält, was zur besseren Übersicht rot markiert ist, und dementsprechend neu ausgelegt werden muss.

Der untere Teil in Tabelle 2.3 stellt alle Ergebnisse zusammengefasst dar. Dabei wird pro Lagerknoten nach der maximalsten Reaktionskraftkomponente über alle Lastfälle gesucht und an der vorgesehenen Stelle ausgeschrieben.

## 2.6 Benutzerspezifische Vereinfachungen

Aus den oberen Kapiteln wird ersichtlich, dass nicht nur Erfahrung des Berechnungs-Ingenieurs von größter Bedeutung ist, sondern auch dass das manuelle Übertragen der Werte fehleranfällig ist. Bevor die Werte kopiert und übertragen werden können, müssen mehrere Schritte bei der Werkzeugauswahl und dem Reinzoomen in das geometrische Modell erfolgen. Besonders kritisch wird es bei der Analyse der Zug- und Druckspannungen in den einzelnen Laminatlagen. Hier steigt die Fehlerrate aufgrund hoher Wiederholungsanzahl auffällig hoch.

Um den Flüchtigkeitsfehlern entgegen zu wirken, haben die Entwickler der FEM-Programme mehrere Programmierschnittstellen vorgesehen. Die Nutzung dieser Schnittstellen hängt von der Programmierfähigkeit des jeweiligen Nutzers ab.

Die Nutzung der Schnittstellen in HyperWorks erfordert Kenntnisse in der Programmiersprache: Total Command Language (TCL). Dabei handelt es sich um eine objektbezogene grafische Anwendungsprogrammierung. Diese Programmiersprache erlaubt es, auf die Bibliotheken von HyperWorks zuzugreifen sowie spezifische Berechnungsschritte zuzufügen, und mehrere, auch unter einem Hauptmakro zusammengefasste, Makro-Buttons auf der Benutzeroberfläche zu erstellen.

Ein Makro führt vordefinierte Operationen aus und erspart somit dem FEM-Berechner das tausendfache Anklicken der benötigten Elemente. Der Auswertungsaufwand wird deutlich reduziert und Flüchtigkeitsfehler vermieden. Zusätzlich kann ein Makro die ausgewählten Ergebnisse nach Außen in ein übliches, zum Beispiel, \*.txt-Format konvertieren.

Mit dem üblichen MS-Office-Programm, Excel, können die von den Makros erstellten Textfeile eingelesen und zur Datenaufbereitung und Dokumentation der Berechnungsergebnisse benutzt werden. Hier muss auch differenziert betrachtet werden, dass auch im Excel eigene Makros erstellt werden können, die zum Beispiel die Tabellen vordefinieren und diese entsprechend automatisch ausfüllen.

Stand der Technik hat somit die Schwierigkeit der Auswertung der FEM-Berechnungsergebnisse offenbart und auf die vorhandenen Schwachstellen hingewiesen. Das nächste Kapitel beschäftigt sich mit der Analyse der notwendigen Schritte, um die Auswertung der FEM-Berechnungsergebnisse zu erleichtern und somit die Flüchtigkeitsfehler zu vermeiden.



### 3 Analyse der Aufgabenstellung

Diese Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Firma DIEHL Comfort Modules GmbH und befasst sich mit der Notwendigkeit und Realisierung der Erstellung von Makros in HyperWorks.

Im Teilkonzern Comfort Modules werden Waschräume entwickelt, berechnet und gefertigt. Vor allem die Berechnung bedarf eines hohen Rechenaufwandes, enormer Erfahrung der Berechnungs-Ingenieure und Kenntnis der luftfahrtspezifischen Normen und Lastfälle.

Standardmäßige FEM-Berechnung der Baugruppen und Elemente der Waschräume erfolgt in HyperWorks und läuft in folgenden Schritten ab:

- Einlesen in HyperMesh des, als .STP-Datei von Konstrukteuren zur Verfügung gestellten, 3D-Geometriemodells einer kompletten Waschräumeinheit.
- Bildung des Mittelflächenmodells, Vorgabe der Elementtypen und der Netzgröße sowie anschließende Vernetzung des Mittelflächenmodells in HyperMesh
- Definition der Eigenschaften: Materialeigenschaften, Elementeigenschaften, Lagerbedingungen und zu berechnenden Lastfälle in HyperMesh.
- Definition der auszugebenden Berechnungsergebnisse in HyperMesh. Hierbei muss der Berechnungs-Ingenieur eine abgewogene Entscheidung treffen, was er für die Berechnung tatsächlich braucht, denn späteres Hinzufügen der auszugebenden Berechnungsergebnisse ist erst nach der Berechnung möglich. Die Berechnung aller möglichen Parameter ist extrem rechen- und speicheraufwendig. Das kostet Ressourcen.
- Exportieren des in HyperMesh erstellten Modells mit definierten Eigenschaften in eine \*.fem-Datei, die von dem OptiStruct-Solver zur Berechnung eingelesen werden kann.
- Berechnung in OptiStruct. Dabei werden die zuvor in HyperMesh definierten Datentypen erstellt. In den meisten Fällen handelt es sich um eine \*.H3D- und eine \*.OPT2- Datei. Die H3D-Datei enthält alle vordefinierten Ausgabeparameter, bis auf die Schnittkräfte, die in der OPT2-Datei ausgegeben werden.
- Die in OptiStruct erstellten Dateien werden von HyperView zur Visualisierung der Ergebnisse eingelesen.

Die Berechnungsergebnisse werden in HyperView graphisch dargestellt. Dabei besteht die Möglichkeit die Berechnungsergebnisse eines beliebigen Knotens durch das manuelle Anklicken sich tabellarisch ausgeben zu lassen.

An dieser Stelle endet die FEM-Berechnung. Ab diesem Zeitpunkt liegt es an dem Berechnungs-Ingenieur, die ihn interessierenden Berechnungsergebnisse zu entnehmen und für weitere versagensspezifische Berechnung zu verwenden. Da in den meisten Fällen die maximalen Werte nicht nur für die Dehnungen oder Verschiebungen, sondern auch für Spannungen oder Reaktionskräfte benötigt werden, steigt der Aufwand für die Suche nach diesen Elementen enorm. Erschwerend hinzu kommt die Tatsache, dass maximale Dehnungen und maximale Spannungen nicht immer an einem oder demselben Knoten auftreten. Zusätzlich muss oben beschriebener Aufwand für jeden Lastfall wiederholt werden.

Ableitend von dem hohen manuellen Aufwand entwickeln sich Anforderungen an die zu entwickelnden Makros.

- Zuweisung eines globalen Koordinatensystems, welches sich nach dem allgemein gültigen Koordinatensystem der Flugzeughersteller richtet und in Abbildung 3.1 anschaulich dargestellt ist.

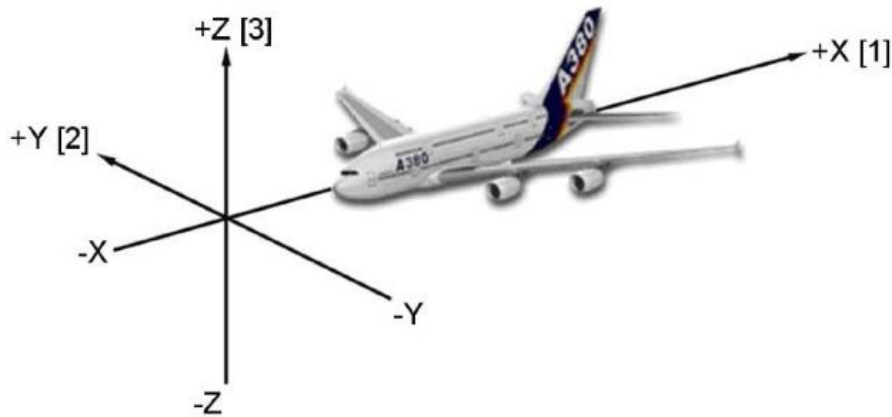


Abbildung 3.1: Allgemein gültiges Koordinatensystem der Flugzeughersteller [8]

- Ausgehend von dem oben vorgestellten Koordinatensystem werden zu prüfende Lastfälle definiert. Für den Rechennachweis der Struktur werden insgesamt fünf Lastfälle geprüft. Diese sind in Tabelle 3.1 nach FAR25.561 aufgelistet.

Tabelle 3.1: Definition der relevanten Lastfälle [9]

g-acceleration factor	Emergency loading factors FAR25.561	Max. Flight/loading factors
upward	3	4,20
forward	9	1,63
sideward	3	2,38
downward	6	8,90
rearward	1,5	1,08

In Tabelle 3.1 besteht folgender Zusammenhang zwischen den Angaben in der linken Spalte und dem eingeführten Koordinatensystem: upward entspricht +Z, forward entspricht -X, sideward entspricht -Y, downward entspricht -Z, rearward entspricht +X Koordinate.

Es wird zwischen maximaler erlaubten Belastung und der tatsächlich im Flug vorkommenden Belastung unterschieden. Bei den abweichenden Werten, wird größere Zahl für den Nachweis eingesetzt.

- Erkennen der Baugruppen und der Unterelemente anhand der betriebsspezifischen Bezeichnung der Diehl Comfort Modules, welche in Kapitel 2 beschrieben wurde.

- Möglichkeit der Erstellung einer benutzerfreundlichen zusammengefassten Schaltfläche für den Aufruf jeweiliger Makros im Programmmenü von HyperWorks.
- Start der Makroumgebung in Abhängigkeit von dem gesuchten Parameter mit der Zuweisung eines definierten Speicherortes in einem für weitere Verarbeitung optimierten Datenformat. Die entstandenen Text-Dateien sollen für den Anwender ohne zusätzliche Programme lesbar sein. Das heißt, dass die Werte tabellarisch aufgebaut und mit einem Tab oder Semikolon voneinander getrennt werden sollen.
- Durchführung der Berechnungen von zusätzlichen Werten. Dies soll anhand der einfachen in den Makros programmierbaren mathematischen Operationen geschehen.

Neben den oben beschriebenen Forderungen entstehen sinnvolle, aber nicht notwendige Wünsche. Dazu zählen:

- Die Ausgabe der verwendeten Element- und Materialeigenschaften in einer übersichtlichen tabellarischen Form.
- Zugriff auf vordefinierten Datenbanken mit Element- und Materialeigenschaften zum Zweck der Reduktion des Modellierungsaufwandes.
- Ermittlung und Archivierung modellbezogener Elemente, die die Auswertungsergebnisse vertuschen würden.

Im Laufe der Arbeit darf es passieren, dass Forderungen zu Wünschen und Wünsche zu Forderungen werden, sowie zusätzliche Anforderungen auftreten.

### **3.1 Spezifikationen der zu realisierenden Makros**

Unternehmensspezifisch werden bei Diehl Comfort Modules unter anderem folgende mechanische Reaktionen der Bauteile in Abhängigkeit von den Lastfällen für den rechnerischen Nachweis benötigt: maximale Deformationen, Reaktionskräfte, lagenabhängige Spannungen, Tsai-Wu Versagenskriterien, Schnittkräfte in Verzapfungen sowie Nachweise der Schraubverbindungen. Jedes dieser Parameter enthält eigene Spezifikationen, die im Folgenden einzeln beschrieben werden und muss vom eigenen Makro realisiert werden.

#### *Verschiebungen*

Im Falle der Deformation werden lastfallspezifisch und baugruppenbezogen maximale Verschiebungen im globalen Koordinatensystem (KOS) mit der Angabe der Baugruppe und des Knotens, in dem die maximale Verschiebung auftritt, ausgegeben. Zusätzlich müssen Koordinaten dieses Knotens und dessen vektorielle resultierende Verschiebung dem Berechnungs-Ingenieur zur Verfügung gestellt werden.

Zur besseren Übersicht müssen pro Bauteil lastfallabhängige maximale Verschiebungen in einer Untertabelle zusammengefasst werden.

### *Reaktionskräfte*

Das Makro hat die Aufgabe die ID-Nummer der im Modell gelagerten Knoten zu ermitteln und deren Position im globalen KOS auszugeben. Für diese Knoten müssen anschließend lastfallabhängige Reaktionskräfte im globalen KOS bestimmt werden.

### *Lagenabhängige Spannungen*

Hierbei soll das Makro in der Lage sein, lastfall-, baugruppen- (EID), sektions- (SID) und lagenabhängige (LID), maximal auftretende materialbezogene Zug-, Druck- sowie Schubspannungen, in und quer zur Faserrichtung, zu ermitteln. Bei der Ermittlung der zuvor genannten Spannungen sollen Elemente um die Krafteinleitungspunkte nicht ausgewertet werden.

### *Tsai-Wu Versagenskriterien*

Das Makro für's TsaiWu-Versagenskriterium hat dieselbe Ausgangslage wie das Makro für lagenabhängige Spannungen, allerdings werden hier für die höchsten TsaiWu-Werte pro Laminatlage die dazugehörigen Spannungen in und quer zur Faserrichtung ausgegeben. Zusätzlich muss dieses Makro die von dem Berechnungs-Ingenieur bestimmten zulässigen Versagensspannungen einlesen, um diese für weitere Berechnung der Reservefaktoren zu verwenden.

### *Schnittkräfte in Verzapfungen*

Eine Verzapfung ist eine Verbindung von zwei Elementen bei der das Eine in das Andere gesteckt und mit einem zusätzlichen Klebematerial zusammengehalten wird. In Abbildung 3.2 ist eine typische Verzapfung schematisch dargestellt.

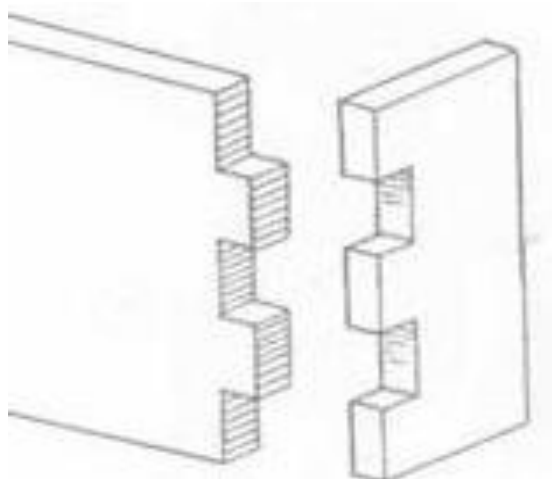


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung einer Verzapfung

Das zu realisierende Makro hat als Aufgabe lastfallabhängige Schnittkräfte von zwei definierten Baugruppen für jeden automatisch zu ermittelnden Schnittknoten in lokalen KOS zu bestimmen.

Um die Verzapfung auslegen zu können, muss dieses Makro zusätzlich die Abstände zwischen den Schnittknoten ermitteln.

### *Nachweis der Schraubverbindungen*

Für den Nachweis der Schraubverbindung muss das zu realisierende Makro automatisch zwischen zwei ausgewählten Baugruppen die Verbindungsbereiche ermitteln und die anliegenden lastfallabhängigen Kräfte im globalen KOS bestimmen. Des Weiteren sollen die globalen Koordinaten der zu analysierenden Knoten sowie die anliegenden Federsteifigkeiten ausgegeben werden.

## **4 Umsetzung der Aufgabenstellung**

Dieses Kapitel betrachtet die Umsetzung der in Kapitel 3 zusammengefassten Anforderungen. Zur besseren Leserlichkeit wird darauf geachtet, dass die Reihenfolge der aufgeführten Anforderungen beibehalten und jeweils ein separates Unterkapitel über die Realisierung der Makros erstellt wird. Jedes Unterkapitel beginnt mit einer Konzeptfindung und endet mit der detaillierten Betrachtung der softwaretechnischen Umsetzung der jeweiligen Anforderung.

Nach einer ausführlichen Analyse der vorhandenen software- und hardwaretechnischen Ressourcen, dem Erlangen vertiefter Kenntnisse über die FEM-Modellierung, Berechnung der erstellten Modelle, Auswertung der Simulationsergebnisse sowie einer auf HyperWorks objektorientierten Programmierung wird während der Konzeptfindungsphase zu jedem Themengebiet ein Brainstorming durchgeführt, dessen Ergebnisse in Mind-Map-Diagrammen festgehalten werden.

Anhand dieser Diagramme können einzelne Anforderungen aus Kapitel 3 in logische benutzerfreundliche Bausteine zerlegt werden. Die Abfolge der Bausteine führt zu der vollständigen Umsetzung der gesetzten Erwartungen.

In den meisten Fällen lassen sich einzelne Bausteine auf unterschiedliche Weise umsetzen. Diese alternativen Wege sind ebenfalls in Mind-Map-Diagramm aufgelistet. Um sich in solchen Alternativfällen für die bessere Lösung entscheiden zu können, werden alternative Konzepte in einer Bewertungsmatrix zusammengefasst und anhand der Gewichtungsfaktoren analysiert.

Eine Bewertungsmatrix gehört zu den meist eingesetzten Bewertungsmethoden mit deren Hilfe mehrere Lösungskonzepte hinsichtlich verschieden gewichteter Messgrößen verglichen werden können. Dabei werden die einzelnen Ziele gewichtet und in der Spalte „n“ des jeweiligen Alternativkonzeptes mit einer Beurteilungsnote versehen, wie es in Abbildung 4.3 zu erkennen ist. Die Multiplikation des Gewichtungsfaktors mit der zugehörigen Beurteilungsnote ergibt die gewichtete Teilzielführung der Lösungsvariante. Bereits mit der Ermittlung der Teilzielführung können Konzeptübergreifend die besseren Teilziellösungen bestimmt werden. Bei der Suche nach dem besseren Alternativkonzept müssen zusätzlich zu dem jeweiligen Alternativkonzept zugehörige Teilzielführungen aufsummiert werden. Das Alternativkonzept mit der größten Summe der Teilzielführungen soll somit für die Umsetzung gewählt werden.

## 4.1 Verschiebungen

In diesem Unterkapitel wird auf die Umsetzung der Anforderung zur Ermittlung der maximalen Verschiebungen eingegangen. Im Verlauf der Konzeptfindung werden zwei Mind-Map-Diagramme aus dem Brainstorming zu dem Layout und der Funktionsweise der Benutzeroberfläche sowie der Bestimmung der gesuchten Werte und Erstellung der endgültigen Text-Datei erarbeitet. In Abbildung 4.1 sind Anforderungen anhand eines Mind-Map-Diagramms an Benutzeroberfläche zusammengefasst dargestellt.

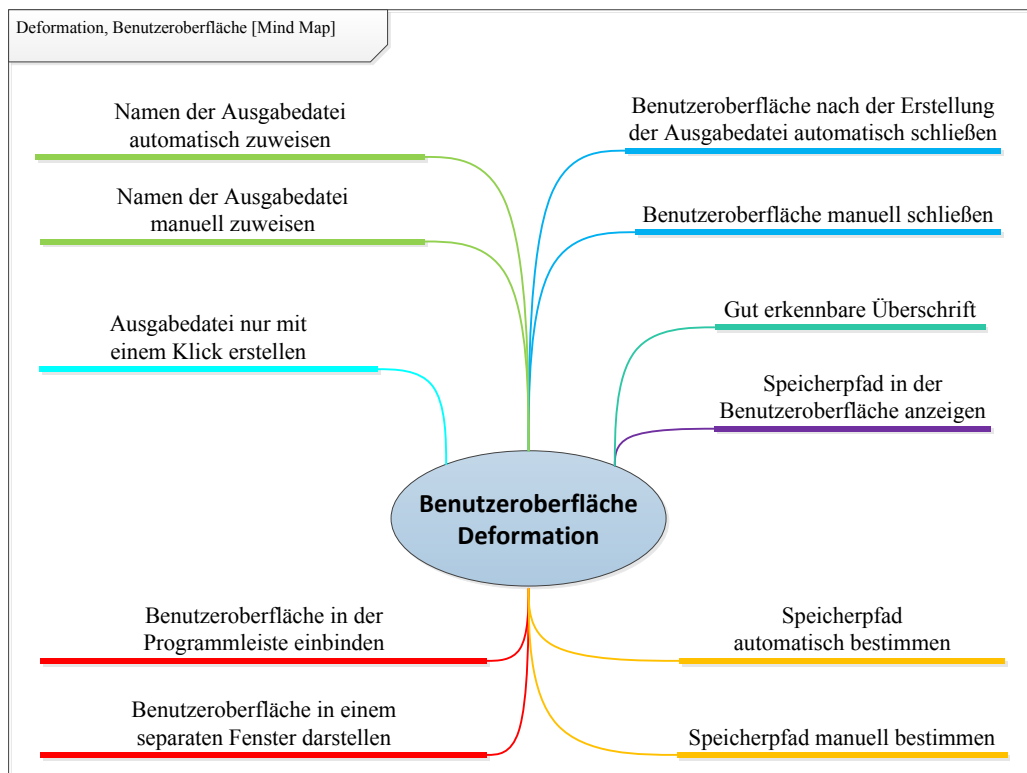


Abbildung 4.1: Deformation, Mind-Map-Diagramm, Benutzeroberfläche

In Abbildung 4.1 ist gut zu erkennen, dass die zu erstellende Benutzeroberfläche eine deutlich erkennbare Überschrift und Angabe des Speicherpfades beinhalten soll. Die zu erzeugende Ausgabedatei soll durch einen Klick auf einen definierten Button in der Benutzeroberfläche erstellt werden. Außer den zuvor genannten Anforderungen an Benutzeroberfläche soll diese, wie der Abbildung 4.1 entnommen werden kann, zusätzlich vier weitere Anforderungen erfüllen. Dazu zählen: Bestimmung des Speicherpfades, Namenszuweisung der Ausgabedatei, Schließung sowie Platzierung der Benutzeroberfläche.

Die zuvor gesondert aufgelisteten Anforderungen können auf mehreren Wegen umgesetzt werden und werden daher für die Findung der besseren Lösungsvariante zunächst in Abbildung 4.2 dargestellte Alternativkonzepte zusammengefasst.

	Alternativkonzept A	Alternativkonzept B
<i>Position von GUI</i>	In der Programmleiste	In dem separate Fenster
<i>Speicherpfadbestimmung</i>	Automatisch	Manuell
<i>GUI schließen</i>	Automatisch	Manuell
<i>Ausgabedateibezeichnung</i>	Automatisch	Manuell

Abbildung 4.2: Deformation, Alternativkonzepte, Benutzeroberfläche

In Abbildung 4.2 sind Anforderungen aus Abbildung 4.1 mit mehreren Lösungswegen an Benutzeroberfläche in zwei Alternativkonzepten tabellarisch zusammengefasst dargestellt. In dem Alternativkonzept A sollen demzufolge die Bestimmung des Speicherpfades sowie Festlegung der Ausgabedateibezeichnung automatisch erfolgen. Die zu erstellende Benutzeroberfläche soll direkt in der Programmleiste von HyperWorks eingebunden werden. Die Beendigung der Benutzeroberfläche soll unter Berücksichtigung der Anforderungen manuell nach der Erstellung der Ausgabedatei erfolgen.

Der Alternativkonzept B geht von der manuellen Bestimmung des Speicherpfades und der Ausgabedateibezeichnung aus. Die Benutzeroberfläche soll in einem separaten Fenster angezeigt und automatisch Beendet werden.

Bei der Bestimmung des besseren Lösungsweges der in Abbildung 4.2 unter zwei Alternativkonzepten aufgeführten Ziele wird zunächst eine in Abbildung 4.3 dargestellte Bewertungsmatrix aufgebaut. Der mittlere und der rechte Bereich der Bewertungsmatrix beinhalten die in Abbildung 4.2 aufgestellten Alternativkonzepte, deren einzelne Ziele in der Spalte „ $n$ “ mit Noten von 0 bis 10 beurteilt werden. Die Multiplikation des Gewichtungsfaktors mit der dazugehörigen Beurteilungsnote ergibt in der Spalte „ $n \cdot g$ “ des jeweiligen Alternativkonzeptes die sogenannte gewichtete Teilzielführung. Anhand der ermittelten Teilzielführung kann nun eine eindeutige Fallunterscheidung der in Alternativkonzepten vorhandener Lösungswege getroffen werden. Zur besseren Darstellung des gewählten Lösungsweges werden in Abbildung 4.3 ermittelten maximalen Teilzielführungen mit grüner Hintergrundfarbe hervorgerufen.

Ziel	Gewichtungsfaktor	Alternativkonzept A		Alternativkonzept B	
		$n$	$n \cdot g$	$n$	$n \cdot g$
<i>Position von GUI</i>	10	7	70	3	30
<i>Speicherpfadbestimmung</i>	10	8	80	6	60
<i>GUI schließen</i>	10	3	30	5	50
<i>Ausgabedateibezeichnung</i>	10	8	80	1	10
<b>Summe</b>	40	260		150	

Abbildung 4.3: Verschiebungen, Bewertungsmatrix, Benutzeroberfläche

Auf der linken Seite der in Abbildung 4.3 dargestellten Bewertungsmatrix sind Anforderung mit dazugehörigen Gewichtungsfaktoren aufgelistet. Die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Ziele besitzen denselben Wert und weisen dadurch auf identische Wichtigkeit.

Nach der Analyse der Alternativkonzepte und unter Kenntnis der in Abbildung 4.1 einiger eindeutig definierten Anforderungen wird nun eine vollständige an Benutzeroberfläche gestellte Anforderungsliste aufgebaut. Außer der eindeutigen Überschrift und der Angabe des Speicherortes soll die Benutzeroberfläche in die Programmleiste eingebunden werden. Des Weiteren soll die Benutzeroberfläche beim Laden eine Prozedur starten, mit deren Hilfe der Speicherpfad automatisch bestimmt wird. Um den zusätzlichen Benutzeraufwand zu reduzieren, soll die Zuweisung der Ausgabedateibezeichnung ebenfalls automatisch erfolgen. Zur Erstellung der Ausgabedatei soll nur ein Klick in der Benutzeroberfläche führen. Das Schließen der Benutzeroberfläche soll ebenfalls automatisch erfolgen.

Nachdem am Anfang dieses Unterkapitels Anforderungen an Benutzeroberfläche behandelt wurden, erfolgt im nächsten Schritt eine identische Analyse zur Ermittlung der gesuchten Werte und Erstellung der Ausgabedatei. Zu diesem Zweck wird erneut ein Brainstorming durchgeführt, dessen Ergebnisse in dem, in Abbildung 4.4 dargestellten Mind-Map-Diagramm festgehalten werden.

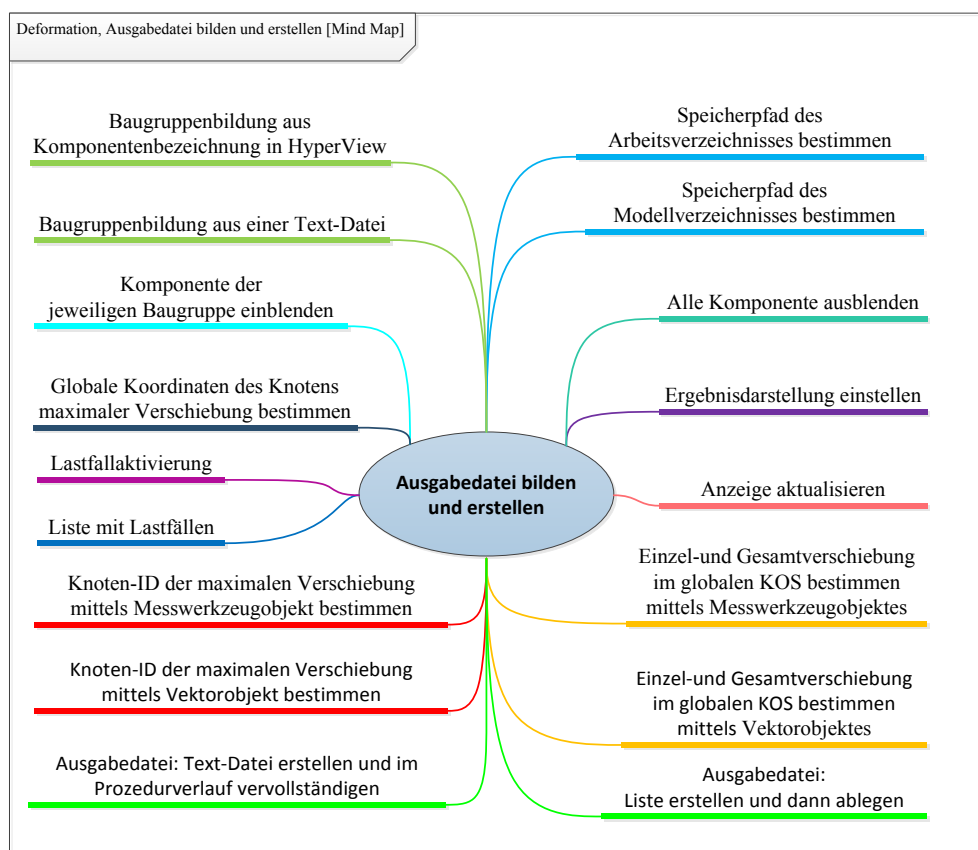


Abbildung 4.4: Verschiebungen, Mind-Map-Diagramm, Ausgabedatei bilden und erstellen

Wie in Kapitel 3 bereits beschrieben wurde, sind die gesuchten Werte vom Lastfall und Baugruppe abhängig. Die daraus resultierenden Anforderungen an das Makro aus Abbildung 4.4 beschäftigen sich zunächst mit der Bildung der Listen, im Modell vorhandener Baugruppen und Lastfälle. Um die ersten gesuchten Berechnungsergebnisse ermitteln zu können, müssen weitere



Anforderungen, wie das Ausblenden aller Modellkomponente, Aktivierung des gewünschten Lastfalls, Einblenden baugruppenbezogener Komponente, Einstellen bestimmter Ergebnisdarstellung sowie Aktualisieren der Anzeige von dem Makro an entsprechender Stelle erfüllt werden.

Nachdem die zuvor beschriebenen Anforderungen realisiert werden, soll das Makro in der Lage sein globale Koordinaten, Einzel- sowie die Gesamtverschiebung im globalen KOS des Knotens mit maximaler Verschiebung sowie dessen ID-Nummer zu bestimmen. Nach der Ermittlung der gesuchten Werte müssen diese, geordnet, einer Ausgabedatei übergeben werden. Als letzte Anforderung an das Makro aus der Abbildung 4.4 gilt die Bestimmung des Speicherpfades.

Einige der zuvor aufgelisteten Anforderungen können auf unterschiedliche Weise umgesetzt werden. Aus diesem Grund werden aus Lösungswegen Alternativkonzepte erstellt und anhand einer Bewertungsmatrix beurteilt.

In folgender Abbildung 4.5 sind tabellarisch zwei Alternativkonzepte aus den in Abbildung 4.4 zusammengefassten Anforderungen mit mehreren Lösungswegen dargestellt.

	<b>Alternativkonzept A</b>	<b>Alternativkonzept B</b>
<i>Baugruppenbildung</i>	Aus Komponentenbezeichnung	Aus einer Text-Datei
<i>Speicherpfad</i>	Des Arbeitsverzeichnisses	Des Modellverzeichnisses
<i>Knoten-ID der maximalen Verschiebung bestimmen</i>	Mittels Messwerkzeugobjekt	Mittels Vektorobjekt
<i>Verschiebungen bestimmen</i>	Mittels Messwerkzeugobjekt	Mittels Vektorobjekt
<i>Ausgabedatei</i>	Text-Datei erstellen und dann vervollständigen	Globale Liste aufstellen und dann ablegen

Abbildung 4.5: Verschiebungen, Alternativkonzepte, Ausgabedatei bilden und erstellen

In der linken Spalte sind die jeweiligen Anforderungen aufgelistet, während der mittlere und der rechte Bereich die Lösungswege des zugehörigen Alternativkonzepte beinhalten.

Damit bei der Bestimmung der gesuchten Werte die einzelnen Baugruppen nacheinander eingeblendet werden können, müssen die zu jener Baugruppe zugehörige Komponenten in separate Listen zusammengefasst werden. Der Lösungsweg des Alternativkonzeptes A schlägt vor, die ID-Nummer der Modellkomponenten anhand der Komponentenbezeichnung den jeweiligen Baugruppenlisten zuzuweisen. Im Alternativkonzept B sollen diese mit Hilfe einer vordefinierten Text-Datei durch das Makro in die entsprechenden Baugruppenlisten eingelesen werden.

Die Bestimmung der Knoten-ID, deren globale Verschiebung in der jeweiligen Baugruppe den maximalen Wert aufweist, kann ebenfalls auf zwei Weisen gelöst werden. Das in Abbildung 4.5 dargestellte Alternativkonzept A verwendet bei der Bestimmung des gesuchten Knotens ein Messwerkzeugobjekt. Ein Messwerkzeugobjekt wird aus der „Measure Klasse“ erstellt und beinhaltet zahlreiche Methoden zur Bestimmung solcher Größen, wie Extremwerte und dazugehörige Element- oder Knoten-IDs, Winkel sowie Abstand zwischen zwei Knoten, Position ausgewählter Knoten und vieles mehr. Das Alternativkonzept B verwendet anstatt des

Messwerkzeugobjektes ein Vektorobjekt. Mit Hilfe des Vektorobjektes können solche Größen, wie Verschiebungen, Kräfte und Momente für die selektierten Knoten oder auch Komponente vektoriell angezeigt werden. Des Weiteren beinhaltet ein Vektorobjekt wie auch ein Messwerkzeugobjekt eine Methode, mit deren Hilfe sofort der Maximalwert und dazugehörige Knoten-ID in der gewählten Ergebnisdarstellung ermittelt werden können.

Die Umsetzung der Anforderung zur Bestimmung der globalen Verschiebungen kann ebenfalls anhand eines Messwerkzeugobjektes oder Vektorobjektes erfolgen. Dabei müssen lediglich andere Methoden auf die jeweiligen Objekte angewandt werden.

Bei der automatischen Bestimmung des Speicherpfades geht das Alternativkonzept A von dem Speicherpfad des Arbeitsverzeichnisses aus. Bei der Umsetzung des Alternativkonzeptes B wird die Ausgabedatei in denselben Ordner, wo sich das Modell befindet, abgelegt.

Die letzte Anforderung an das Makro aus Abbildung 4.5 beschäftigt sich mit der Bildung und Erstellung der Ausgabedatei. Das Alternativkonzept A schlägt vor, zuerst eine Ausgabedatei in dem festgelegten Verzeichnis zu erstellen und im Verlauf der Ermittlung gesuchter Werte zu vervollständigen. In dem Alternativkonzept B soll dagegen zuerst eine geordnete global deklarierte Liste mit allen ermittelten Werten aufgestellt und vor Prozedurende in eine Ausgabedatei übertragen werden.

Zur Bestimmung der besseren Lösungsvariante der in Abbildung 4.5 aufgeführter Anforderungen wird eine in Abbildung 4.6 dargestellte Bewertungsmatrix verwendet.

Ziel	Gewichtung s-faktor	Alternativkonzept A		Alternativkonzept B	
		n	n*g	n	n*g
<i>Baugruppenbildung</i>	10	7	70	1	10
<i>Speicherpfad</i>	10	5	50	6	60
<i>Knoten-ID der maximalen Verschiebung bestimmen</i>	10	8	80	6	60
<i>Verschiebungen bestimmen</i>	10	8	80	6	60
<i>Ausgabedatei</i>	10	2	20	9	90
<b>Summe</b>	50	300		280	

Abbildung 4.6: Verschiebungen, Bewertungsmatrix, Ausgabedatei bilden und erstellen

Wegen der identischer Wichtigkeit der in Bewertungsmatrix aufgenommenen Anforderungen kriegen diese erneut in der Spalte „Gewichtungsfaktor“ denselben Wert. Nach Vergabe der Noten und Multiplikation dieser mit der jeweiligen Gewichtung entstehen bereits bekannte Teilzielführungen. Anhand der Teilzielführungen werden nun die beiden Alternativkonzepte verglichen. Die bessere Lösung wird mit grüner Hintergrundfarbe hervorgerufen.

Die in Abbildung 4.6 anhand der Bewertungsmatrix gefundenen Lösungswege sind zum größten Teil selbsterklärend. Lediglich bei der Bestimmung der Verschiebungen und dazugehöriger Knoten-IDs soll die Entscheidung zu Gunsten des Messwerkzeugobjektes erläutert werden. Der Zugriff auf die ermittelten Werte durch den Messwerkzeug- und Vektorobjekt erfolgt auf

ähnliche Art und Weise. Der Unterschied liegt lediglich in der Performance: die Darstellung der Ergebnisse mit Hilfe der Vektoren, bei einer hohen Anzahl an Knoten, fordert eine größere Rechenleistung und verlängert dadurch den Prozedurablauf.

Nach der Herleitung der Anforderungen an das Makro zur Ermittlung der Verformungen, werden ausschließlich grün markierte Lösungskonzepte in einem Programm Quellcode umgesetzt. Im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels wird etwas genauer auf die Funktionsweise und den Ablauf des Quellcodes anhand der Flussdiagramme eingegangen. Dabei fällt die Betrachtung nur auf die wichtigsten Prozeduren.

In dem Flussdiagramm 1, das in Abbildung 4.7 graphisch dargestellt ist, wird ein Verlauf aller im Makro vorhandener Prozeduren abgebildet.

Wie dem Flussdiagramm 1 entnommen werden kann, erfolgt nach dem Aufruf des Makros eine Deklaration der globalen Variablen. Im nächsten Schritt wird die Prozedur namens „*GetAllHandles*“ aufgerufen, mit deren Hilfe relevante programmspezifische Objekte global deklariert werden.

Nach der Deklaration der für dieses Makro benötigten Variablen und Objekte erfolgt der Aufruf der Prozedur namens „*BuildInitialUF*“. Diese Prozedur erstellt ein neues, größendefiniertes, in der Programmleiste von HyperView eingebundenes Fenster und füllt dieses mit an Anforderungen geknüpften Objekten. Das Resultat dieser Prozedur wird mittels folgender Abbildung 4.8 dargestellt.

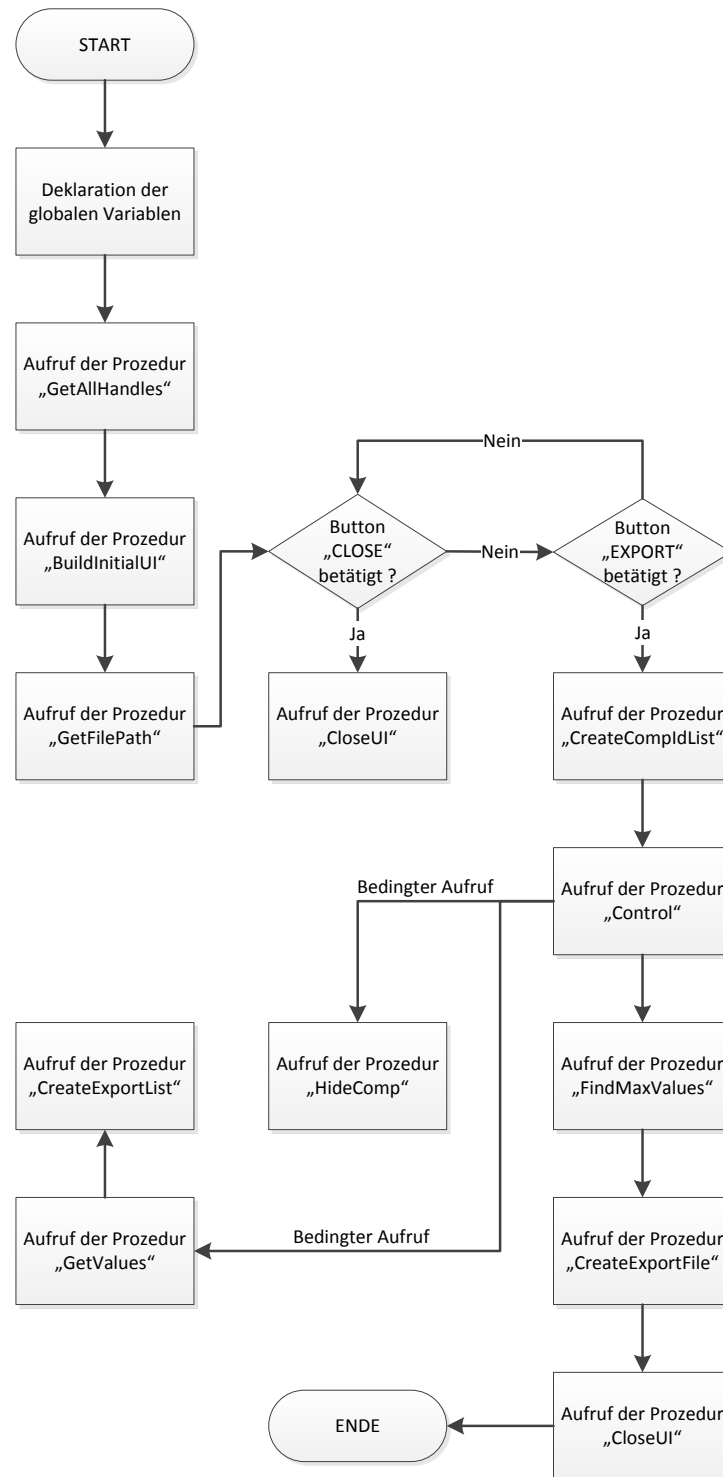


Abbildung 4.7: Verschiebungen, Flussdiagramm 1, Aufbau der Benutzeroberfläche und Prozedurenabfolge

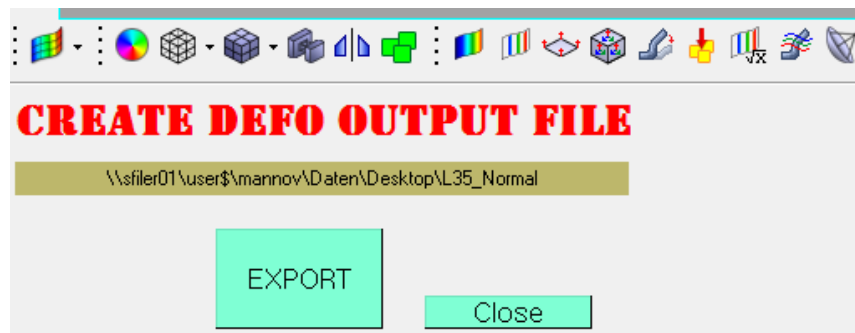


Abbildung 4.8: Verschiebungen, Benutzeroberfläche

In Abbildung 4.8 ist ein Ausschnitt aus dem Programm HyperView nach dem Start des Makros, mit darin eingebundener Benutzeroberfläche, angezeigt. Die erstellte Benutzeroberfläche beinhaltet anforderungsgerechte Überschrift, Angabe des Speicherpfades und einen Button namens „*EXPORT*“ mit dessen Hilfe weitere Prozeduren zur Aufstellung der Ausgabedatei aufgerufen werden können. Damit der Anwender jederzeit die Möglichkeit hat, die Benutzeroberfläche zu beenden, wird ein zusätzlicher Button namens „*Close*“ implementiert.

Die Speicherpfadbestimmung erfolgt mittels der Prozedur „*GetFilePath*“. Diese wird unmittelbar nach der Aufstellung der Benutzeroberfläche aufgerufen. Die Zuweisung des ermittelten Speicherpfades geschieht so schnell, dass der Anwender nach dem Makroaufruf sofort die in Abbildung 4.8 dargestellte Benutzeroberfläche zur Sicht bekommt.

Entscheidet sich der Benutzer für die Erstellung der Ausgabedatei, so muss der Button „*EXPORT*“ betätigt werden. Dabei wird zunächst die Prozedur namens „*CreateCompldList*“ gestartet. Mit Hilfe dieser Prozedur wird für jede Baugruppe, deren Komponente im FEM-Modell aus Schalenelementen aufgebaut werden, eine eigene global deklarierte Liste mit zugehörigen Modellkomponenten-IDs erstellt. Anhand dieser Listen wird es möglich sein, die kompletten Baugruppen bei der Bestimmung gesuchter Werte einzeln einzublenden.

Nachdem die Baugruppenlisten erstellt sind, greift die nachfolgende Prozedur namens „*Control*“ ein. Wie dem Flussdiagramm 1 aus Abbildung 4.7 entnommen werden kann, erfolgt durch die Prozedur „*Control*“ ein bedingter Aufruf weiterer Prozeduren. Diese sind wie folgt bezeichnet: „*HideComp*“, „*GetValues*“ und „*CreateExportList*“.

Zum besseren Verständnis der gesamten Prozedurabfolge werden die Prozeduren „*Control*“ und „*GetValues*“ anhand der dazugehörigen Flussdiagramme im Verlauf dieses Unterkapitels genauer erläutert und entsprechend in Abbildungen 4.9 und 4.10 dargestellt.

Wie aus Abbildung 4.9 zu erkennen ist, ist das Resultat der Prozedur „*Control*“ eine geordnete, global deklarierte Liste mit allen darin vorhandenen ermittelten Werten, die mit Hilfe der folgenden Prozedur namens „*FindMaxValues*“ aus dem Flussdiagramm 1 mit pro Bauteil lastfallabhängig maximale Verschiebungen ergänzt wird.

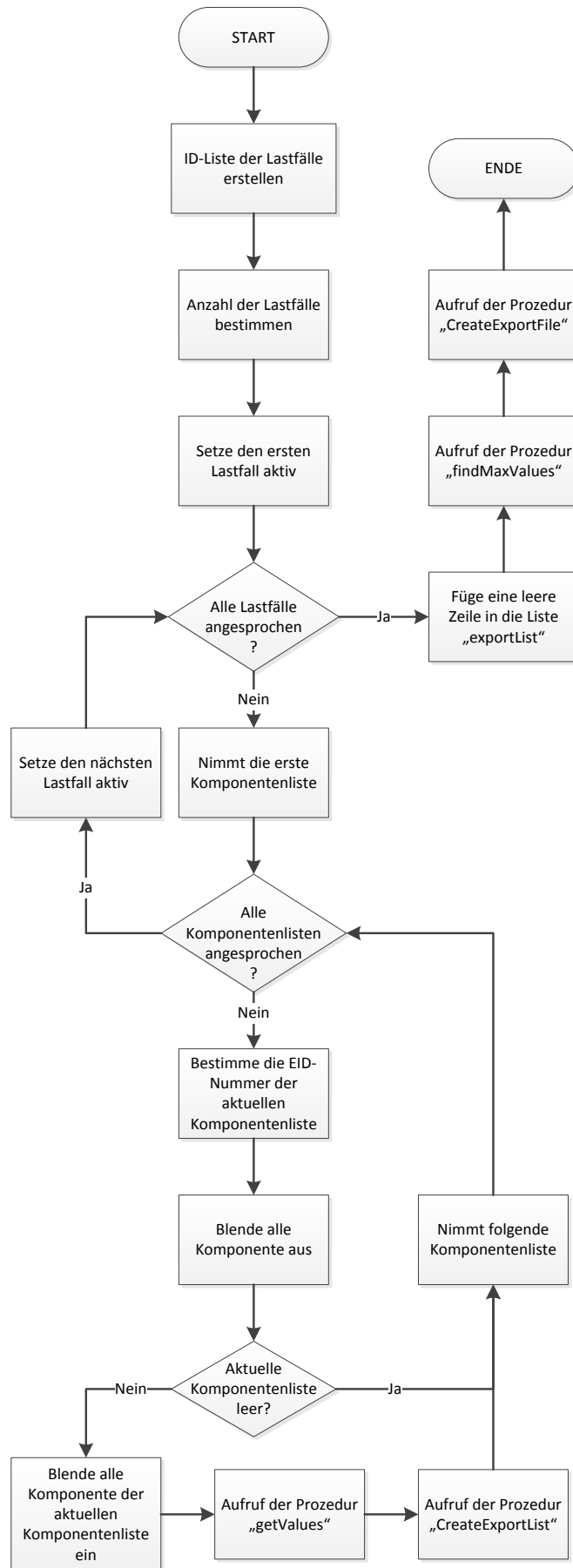


Abbildung 4.9: Flussdiagramm 1.1, Prozedur „Control“

Nachdem die zu exportierende Liste vollständig aufgebaut ist, kann diese mit Hilfe des bereits bestimmten Speicherpfades abgelegt werden. Dies geschieht mit Hilfe der Prozedur namens „*CreateExportFile*“. Diese Prozedur erstellt zunächst, unter Verwendung des ermittelten Speicherpfades, eine leere Text-Datei auf dem Laufwerk und benennt diese automatisch als „defo.dat“. Im nächsten Schritt greift die Prozedur erneut auf die zuvor erstellte Text-Datei angewandt und überträgt den gesamten Inhalt der zu exportierenden Liste.

Die in Abbildung 4.7 zuletzt aufgerufene Prozedur besitzt die Bezeichnung „*CloseUI*“ und hat die Aufgabe die Benutzeroberfläche mit allen zuvor deklarierten Variablen und Objekten zu vernichten.

Anhand des Flussdiagramms 1 aus der Abbildung 4.7 ist eine prinzipielle Funktionsweise des Makros zur Ermittlung der maximalen Verschiebungen dargestellt. Nun wird etwas tiefer in die Bestimmung der zu ermittelnden Werte und Aufbau der zu exportierenden Liste eingegangen. Bei der Betrachtung dieser Problemstellung soll zunächst die Prozedur „*Control*“, deren Ablauf in einem Flussdiagramm 1.1 in Abbildung 4.9 dargestellt ist, behandelt werden.

Nach dem Aufruf der Prozedur „*Control*“ erstellt diese eine ID-Liste mit allen im Modell vorhandenen Lastfällen und bestimmt deren Anzahl. Im nächsten Schritt wird der erste Lastfall aus der erstellten Lastfall-ID-Liste aktiviert und die ID-Liste der Komponenten erster Baugruppe, deren EID Nummer ebenfalls bestimmt wird, herangezogen. Der nächste Schritt im Flussdiagramm 1.1 ruft die Prozedur „*HideComp*“ auf, die alle zuvor angezeigten Modellkomponenten ausblendet.

Ist die herangezogene Komponenten-ID-Liste nicht leer, so werden alle in dieser Liste vorhandenen Komponente einblendend und die Prozeduren „*GetValues*“ und „*CreateExportList*“ nacheinander aufgerufen. Diese Vorgehensweise wird für jeden Lastfall und jede vorhandene Komponentenliste wiederholt.

Die tatsächliche Bestimmung der gesuchten Werte obliegt der Prozedur namens „*GetValues*“. Die ermittelten Werte werden von der folgenden Prozedur „*CreateExportList*“ aufgefangen und zeilenweise zu einer Exportliste zusammengefasst. Zur besseren Übersicht bekommt die Exportliste eine leere Zeile nach jedem Lastwechsel.

Am Ende ruft die Prozedur „*Control*“ zwei weitere Prozeduren namens „*FindMaxValues*“ und „*CreateExportFile*“ auf, die in diesem Unterkapitel bereits beschrieben wurden.

An dieser Stelle ist die Funktionsweise des Makros zur Bestimmung der maximalen Verformung zum größten Teil beschrieben. Es soll lediglich auf eine weitere Prozedur namens „*GetValues*“, mit deren Hilfe die eigentliche Bestimmung der gesuchten Werte geschieht, eingegangen. Das folgende Flussdiagramm 1.2 aus Abbildung 4.10 stellt den Ablaufplan der Prozedur „*GetValues*“ dar. Nach dem Aufruf dieser Prozedur wird zunächst die Anzeige der Programms HyperView (HV) aktualisiert und somit gewährleistet, dass alle einblendeten Komponente einer Baugruppe tatsächlich angezeigt werden.

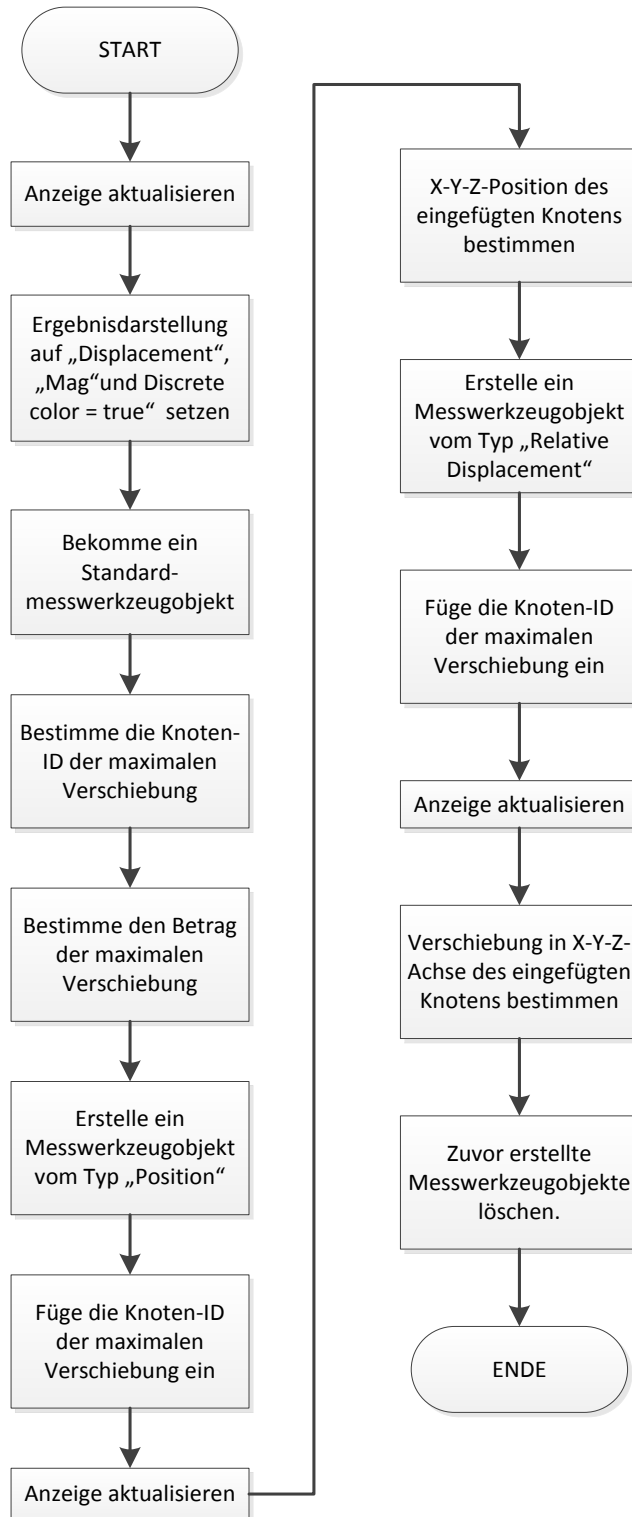


Abbildung 4.10: Flussdiagramm 1.2, Prozedur „GetValues“



Im nächsten Schritt der Prozedur „*GetValues*“ aus Abbildung 4.10 erfolgt die Auswahl der Ergebnisdarstellung im HV-Tool namens „Contour“, in diesem Fall Verschiebung (*engl. Displacement*), und Erstellung des Messwerkzeugobjektes. Anhand des Messwerkzeugobjektes werden, ohne weitere Voreinstellungen, die ersten beiden gesuchten Größen ermittelt. Dabei handelt es sich um den Betrag der maximalen Verformung angezeigter Baugruppe und die dazugehörige Knoten-ID.

Um die globale Position des gefundenen Knotens ermitteln zu können, wird zunächst ein weiteres Messwerkzeugobjekt, in diesem Fall vom Typ „Position“, erstellt. Nach der Zuweisung der Knoten-ID dem zuvor erstellten Messwerkzeugobjekt wird die Anzeige erneut aktualisiert. Dadurch werden die globalen Koordinaten direkt in HyperView angezeigt und für den folgenden Zugriff vorbereitet.

Bei der Bestimmung der einzelnen koordinatenbezogenen Verschiebungen des Knotens maximaler Verformung wird erneut ein Messwerkzeugobjekt erstellt. Dabei handelt es sich um ein Messwerkzeugobjekt vom Typ „Relative Displacement“, mit dessen Hilfe nach der Zuweisung des ermittelten Knotens und Aktualisierung der Anzeige die Bestimmung der einzelnen Verschiebungen ermöglicht wird. Am Ende dieser Prozedur werden alle zuvor erstellten Messwerkzeugobjekte vernichtet. Das Resultat der in diesem Makro umgesetzter Anforderungen ist anhand der Abbildung 4.11 dargestellt.

EID	Knoten-ID	Verschiebung in X-Richtung	Verschiebung in Y-Richtung	Verschiebung in Z-Richtung	Gesamt- verschiebung	X-Position	Y-Position	Z-Position	Lastfall-ID
2									
5									
10	2836	0.4	9.6	-0.1	10	510	-1201	510	1
20	1704	0.5	5.9	-1.7	6	2016	-124	2016	1
30	65430	0.7	5.9	-2	7	2016	6	2016	1
40	810	0.6	6.3	-1.7	8	1401	-124	1401	1
50	884	0.6	6.1	-1.7	1	2016	-124	2016	1
10	87	0.3	6.8	-2	7	1719	-747	1719	2
20	45614	-7.7	2.8	-1.2	2	977	-543	977	2
30	65430	0.1	6.3	-3.2	3	2015	6	2015	2
40	463	0	-7.8	-2.7	10	7	-138	7	2
50	891	0.2	6.1	-3.7	9	2014	-124	2014	2
10	2836	0.4	9.6	-0.1	10	510	-1201	510	1
20	1704	0.5	5.9	-1.7	6	2016	-124	2016	1
30	65430	0.7	5.9	-2	7	2016	6	2016	1
40	463	0	-7.8	-2.7	10	7	-138	7	2
50	891	0.2	6.1	-3.7	9	2014	-124	2014	2

Abbildung 4.11: Verformung, Ausgabedatei

Die Ergebnistabelle in Abbildung 4.11 ist wie folgt aufgebaut. Dabei ist die erste Zeile mit der Spaltenbezeichnung übersichtshalber eingeführt worden und ist nicht der Bestand der gesetzten Anforderungen. Die eigentliche Tabelle beginnt in diesem Fall mit der Zahl zwei. Diese und die darauf folgende Zahl geben die Anzahl der berechneten Lastfälle und entsprechend die Anzahl der analysierten Baugruppen.

Weiterhin besteht die Tabelle aus drei Zeilenblöcken. Die ersten beiden Zeilenblöcke geben baugruppenabhängig die ermittelten maximalen Verschiebungen und die dazugehörigen Koordinaten der betroffenen Knoten an. Der untere Zeilenblock gibt für jede Baugruppe lastfallabhängig jeweils den maximalen Wert an.

## 4.2 Reaktionskräfte

Dieses Unterkapitel behandelt die Umsetzung der Anforderung zur Ermittlung der im FEM-Modell vorhandener Lagerreaktionskräfte. Nach demselben Ablaufschema wird am Anfang dieses Unterkapitels die Konzeptfindung zur Definition der Anforderungen an das umzusetzende Makro betrachtet. Der Aufbau und die Funktionsweise des Makros zur Ermittlung der Reaktionskräfte werden weiterhin anhand der Flussdiagramme erläutert.

Mit dem Fortschreiten der Umsetzung im Kapitel 3 definierter Anforderungen werden die Makros immer komplizierter und die Anzahl der zugehörigen Flussdiagramme größer. Aus diesem Grund werden in darauf folgenden Unterkapitel die meisten Flussdiagramme in dem Anhang platziert und auf diese verwiesen.

Im Verlauf der Konzeptfindungsphase zur Definition der Anforderung an Benutzeroberfläche des Reaktionskräfte-Makros hat sich herauskristallisiert, dass diese Anforderungen den bereits im Unterkapitel 4.1 ermittelten Anforderungen entsprechen: Demzufolge soll die neue Benutzeroberfläche eine gut erkennbare, eindeutige Überschrift und Speicherpfadangabe aufweisen. Die Einbindung der Benutzeroberfläche soll ebenfalls in der Programmleiste von HyperView erfolgen. Die Ermittlung des Speicherpfades soll unmittelbar nach dem Aufbau der Benutzeroberfläche erfolgen. Die Zuweisung der Ausgabedatei-bezeichnung darf nicht durch die benutzerdefinierte Eingabe in Benutzeroberfläche, sondern automatisch durch das Makro erfolgen. Zur Erstellung der Ausgabedatei soll nur ein Klick in der Benutzeroberfläche führen. Das Schließen der Benutzeroberfläche soll ebenfalls automatisch erfolgen. Zusätzlich zu den zuvor aufgelisteten Anforderungen soll die Benutzeroberfläche vor Beginn der Berechnungsprozedur manuell geschlossen werden können.

Nachdem zu Beginn dieses Unterkapitels Anforderungen an Benutzeroberfläche spezifiziert worden sind, erfolgt im nächsten Schritt eine Analyse der Anforderungen zur Bestimmung der gesuchten Werte und Erstellung der Ausgabedatei. Bei der Findung relevanter Anforderungen wird zunächst ein Brainstorming durchgeführt, dessen Ergebnisse in einem Mind-Map-Diagramm, das in Abbildung 4.12 dargestellt ist, festgehalten sind.

Wie aus dem vorherigen Unterkapitel bereits bekannt ist, gibt es in Mind-Map-Diagrammen Anforderungen, die eindeutig definiert sind und andere, die auf unterschiedlichen Wegen umgesetzt werden können. In Bezug auf das Mind-Map-Diagramm aus Abbildung 4.12 werden die eindeutigen Anforderungen an das Makro wie folgt definiert. Außer der Erstellung einer Liste mit allen im Modell vorhandenen Lastfällen sollen diese nacheinander aktiviert werden können. Nach der Bestimmung der globalen Koordinaten der im Modell vorhandener Lager soll das Makro, zur Ermittlung weiterer gesuchter Parameter, die geforderte Ergebnisdarstellung setzen und die Anzeige aktualisieren können.

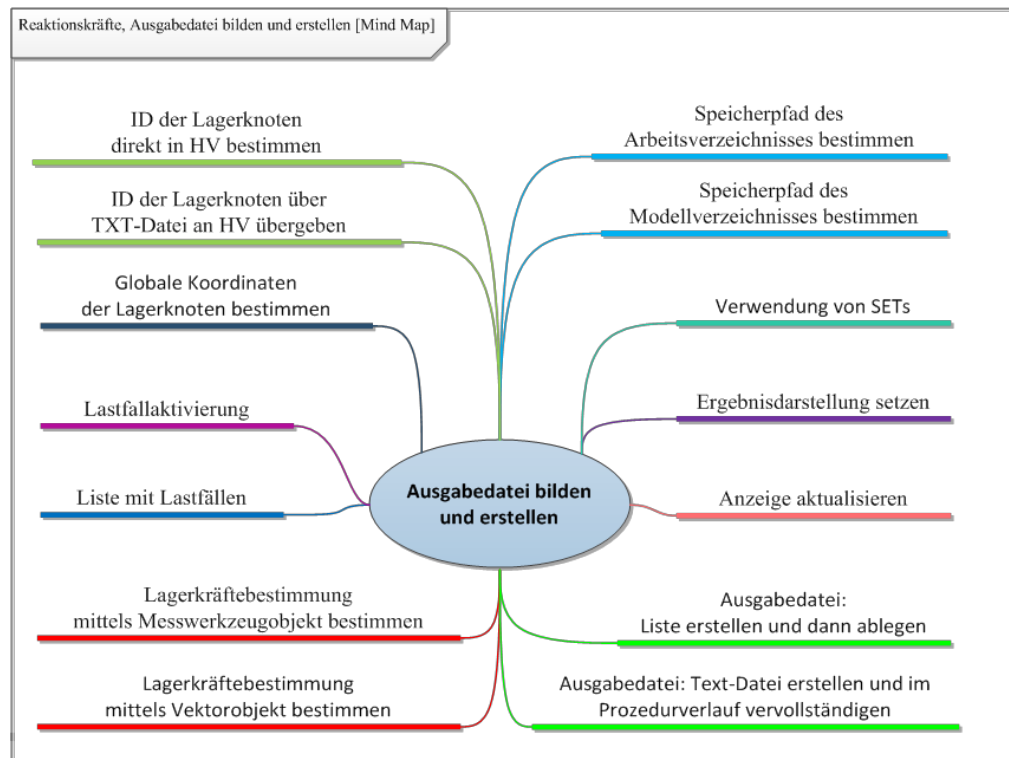


Abbildung 4.12: Reaktionskräfte, Mind-Map-Diagramm, Ausgabedatei bilden und erstellen

Nach der Bestimmung der im Modell vorhandener Lager soll das Makro in der Lage sein an den entsprechenden Stellen koordinatenbezogene Reaktionskräfte zu ermitteln. Des Weiteren müssen die dazugehörigen Knoten-ID-Nummern bestimmt und der Ausgabedatei übermittelt werden. Die letzten beiden Anforderungen an das Makro aus Abbildung 4.12 beschäftigen sich mit der automatischen Bestimmung des Speicherpfades sowie Bildung und Erstellung der Ausgabedatei.

Die zuletzt aufgelisteten Anforderungen können auf mehreren Wegen umgesetzt werden. Bei der Analyse des besseren Lösungsweges werden zunächst diese Anforderungen tabellarisch in zwei Alternativkonzepte, die folgender Abbildung 4.13 entnommen werden können, zusammengefasst.

	Alternativkonzept A	Alternativkonzept B
<i>Knoten-ID der Lage bestimmen</i>	Direkt in HyperView	Aus einer Text-Datei
<i>Speicherpfad</i>	Des Arbeitsverzeichnisses	Des Modellverzeichnisses
<i>Bestimmung der Lagerkräfte</i>	Mittels Messwerkzeugobjekt	Mittels Vektorobjekt
<i>Ausgabedatei</i>	Text-Datei erstellen und dann vervollständigen	Globale Liste aufstellen und dann ablegen

Abbildung 4.13: Reaktionskräfte, Alternativkonzepte, Ausgabedatei bilden und erstellen

Damit mit der Findung der gesuchten Werte begonnen werden kann, müssen zuerst die Stellen, an denen die gesuchten Werte angreifen, bestimmt werden. Bei der Ermittlung der

Lagerreaktionskräfte handelt es sich bei den relevanten Stellen um die Knoten-IDs, der im gesamten Modell vorhandenen Lager.

Das Alternativkonzept A aus Abbildung 4.13 schlägt vor, die Knoten-IDs der Lager direkt in HyperView zu bestimmen. Fällt die Entscheidung zu Gunsten des Alternativkonzeptes B, so werden die gesuchten Werte, mittels aus einer Text-Datei eingelesenen Lagerknoten-IDs, bestimmt.

Nach der Bestimmung der Lagerknoten kann mit der Ermittlung an denen wirkenden Reaktionskräfte begonnen werden. Das Alternativkonzept A verwenden bei der Umsetzung dieses Teilzieles das bereits bekannte Messwerkzeugobjekt, während im Alternativkonzept B ein Vektorobjekt herangezogen wird.

Die letzten beiden Anforderungen an das Makro aus Abbildung 4.13 sind bereits aus dem vorherigen Unterkapitel bekannt. Dabei handelt es sich um die Bestimmung des Speicherpfades und die Erstellung der Ausgabedatei. Bei der automatischen Bestimmung des Speicherpfades geht das Alternativkonzept A von dem Speicherpfad des Arbeitsverzeichnisses aus, während im Alternativkonzept B der Pfad des Modellverzeichnisses genommen wird. Bei der Bildung und Erstellung der Ausgabedatei wird unter Verwendung des Alternativkonzeptes A zuerst eine Ausgabedatei in dem festgelegten Verzeichnis zu erstellen und im Verlauf der Ermittlung gesuchter Werte zu vervollständigen. Im Gegensatz zu Alternativkonzept A wird im Alternativkonzept B zuerst eine geordnete globaldeklarierte Liste mit allen gesuchten Werten aufgestellt, die am Prozedurende einer Ausgabedatei übergeben wird.

Nachdem alle Anforderungen an das Makro, die auf mehreren Wegen umgesetzt werden können, in Alternativkonzepten zusammengefasst sind, werden diese mit Hilfe der in Abbildung 4.14 aufgestellter Bewertungsmatrix analysiert.

Ziel	Gewichtungsfaktor	Alternativkonzept A		Alternativkonzept B	
		n	n*g	n	n*g
<i>Knoten-ID der Lage bestimmen</i>	10	8	80	2	20
<i>Speicherpfad</i>	10	5	50	6	60
<i>Bestimmung der Lagerkräfte</i>	10	5	50	8	80
<i>Ausgabedatei</i>	10	2	20	9	90
<b>Summe</b>	50	200		250	

Abbildung 4.14: Reaktionskräfte, Bewertungsmatrix, Ausgabedatei bilden und erstellen

Im Analysenverlauf der in die Bewertungsmatrix aufgenommenen Anforderungen in Abbildung 4.14, werden diese zunächst mit einem Gewichtungsfaktor versehen. Wegen der identischen Wichtigkeit der Anforderungen kriegen diese in der Spalte „Gewichtungsfaktor“ denselben Gewichtungswert. Nach der bereit bekannten Vorgehensweise entstehen am Ende der Analyse Anforderung und Alternativkonzept abhängige Teilzielführung.

Der größte Wert der Teilzielführung je Anforderung spricht für die Wahl, des im Alternativkonzept vorgeschlagenen, Lösungsweges und wird in Abbildung 4.14 mit grüner Hintergrundfarbe hervorgerufen. Dieser Lösungsweg wird anschließend im Makro umgesetzt.

Bei der Bestimmung der Knoten-IDs im Modell vorhandener Lager gewinnt, mit einem deutlichen Vorsprung, der im Alternativkonzept A vorgeschlagene Lösungsweg. Dabei sollen die entsprechenden Knoten direkt mit den durch HyperView vorgeschlagenen Tools bestimmt werden. Die Übergabe der Knoten mit Hilfe einer Text-Datei beinhaltet einen hohen manuellen Aufwand und verstößt dadurch gegen die globale Zielsetzung dieser Arbeit.

Während im vergangenen Unterkapitel bei der Bestimmung der gesuchten Werte ein Messwerkzeugobjekt definiert wird, soll die Ermittlung der Lagerkräfte mittels eines Vektorobjektes geschehen. Eine Vektordarstellung der in globalen Koordinaten gerichteten Komponente der Reaktionskraft und die nachfolgende Ermittlung der dazugehörigen Beträge ist bei einer geringen Anzahl an der zu analysierenden Knoten deutlich einfacher als die Verwendung eines Messwerkzeugobjektes.

In Fragen zu der automatischen Bestimmung des Speicherpfades und Bildung sowie Erstellung der Ausgabedatei sollen die Lösungsansätze des Alternativkonzeptes B umgesetzt werden. Demzufolge soll die Ausgabedatei direkt in dem jeweiligen Modellverzeichnis abgelegt und die unnötigen Schritte bei der Übertragung der Ausgabedatei vermieden werden. Bei der Erstellung der Ausgabedatei soll zunächst eine global deklarierte Liste mit allen gesuchten Werten aufgebaut werden, deren Inhalt am Prozedurende einer Text-Datei übergeben wird. Diese Vorgehensweise vermeidet den ständigen Zugriff auf die im Modellverzeichnis abgelegte Text-Datei und beschleunigt das Makro.

Nachdem am Anfang dieses Unterkapitel Anforderungen an das Makro zur Ermittlung der Reaktionskräfte hergeleitet sind, wird im weiteren Verlauf auf die Umsetzung dieser in Programm Quellcode eingegangen. Die Beschreibung der Funktionsweise des erstellten Makros wird mit Hilfe der folgenden Flussdiagramme erfolgen. Dabei fällt die Betrachtung nur auf die wichtigsten Prozeduren.

Bei der Beschreibung der im Makro vorhandenen Prozeduren soll zunächst ein Überblick über alle darin vorhandenen Prozeduren und deren prinzipiellen Ablauf verschafft werden. Dabei wird das Flussdiagramm 2, das in Abbildung 4.15 graphisch dargestellt ist, verwendet.

Wie dem Flussdiagramm 2 in Abbildung 4.15 entnommen werden kann, erfolgt nach dem Aufruf des Makros eine Deklaration der globalen Variablen. Im nächsten Schritt wird die Prozedur namens „*GetAllHandles*“ aufgerufen, mit deren Hilfe relevante programmspezifische Objekte global deklariert werden.

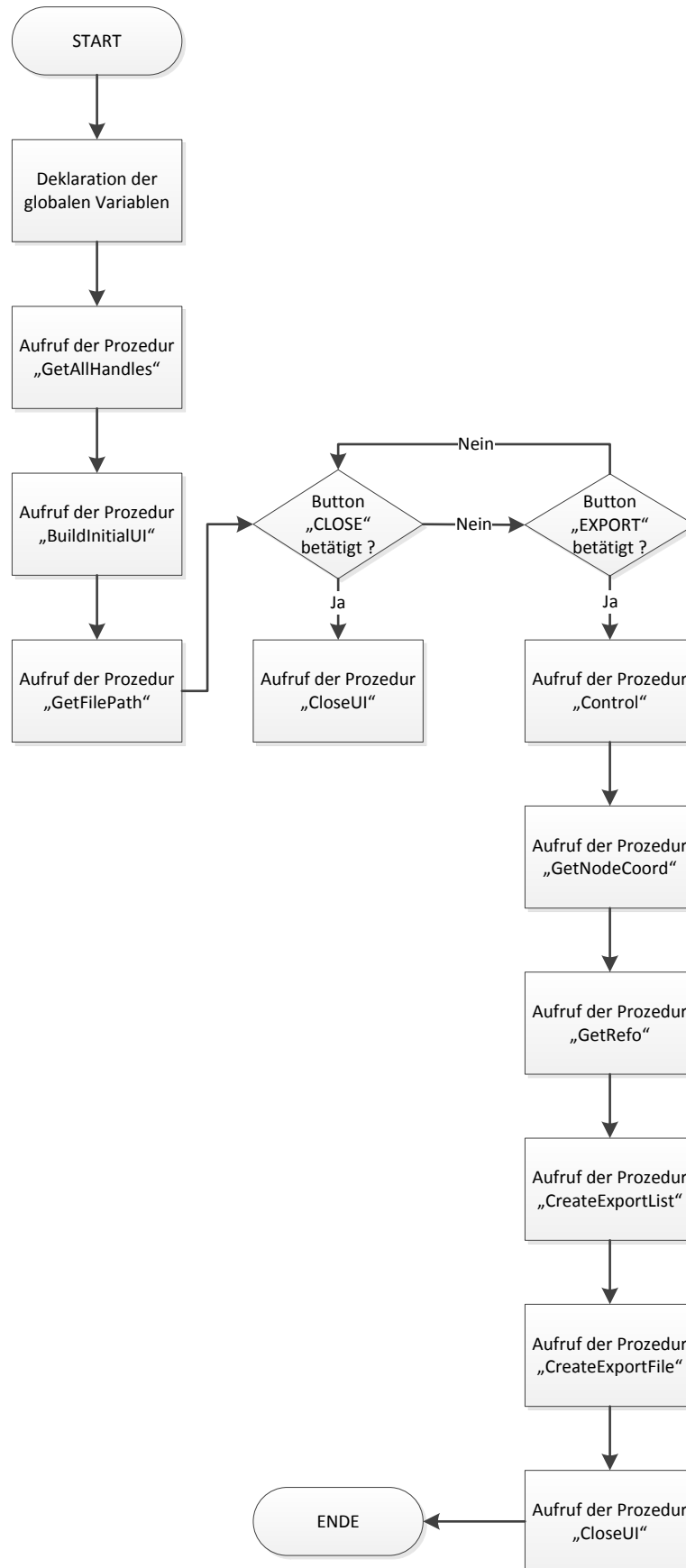


Abbildung 4.15: Reaktionskräfte, Flussdiagramm 2, Aufbau der Benutzeroberfläche und Prozedurenabfolge

Nach der Deklaration der für dieses Makro benötigten Variablen und Objekte erfolgt der Aufruf der Prozedur namens „*BuildInitialUI*“, die bereits in dem vorherigen Unterkapitel ausführlich beschrieben wurde. Aufgrund der Tatsache, dass die Anforderungen an Benutzeroberfläche in Bezug auf den Unterkapitel 4.1 sich nicht verändert haben, wird derselbe Quellcode verwendet und nur geringfügig verändert. Das Resultat dieser Prozedur wird mittels folgender Abbildung 4.16 dargestellt.

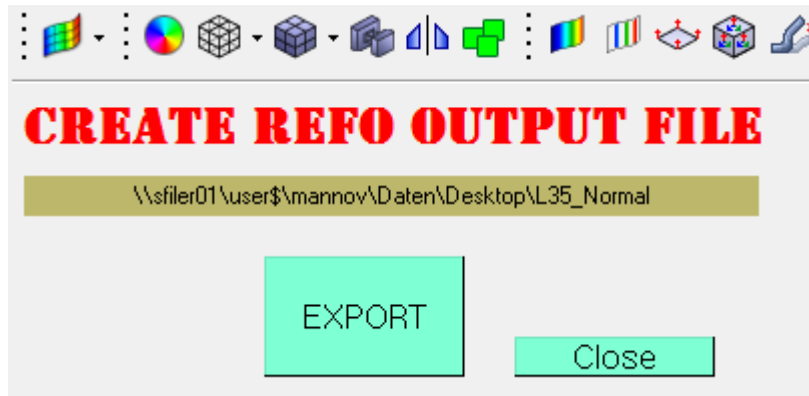


Abbildung 4.16: Reaktionskräfte, Benutzeroberfläche

Das in Abbildung 4.16 dargestellt Ausschnitt aus dem Programm HyperView zeigt eine in der Programmleiste eingebundene Benutzeroberfläche des Makros zur Ermittlung der Lagerreaktionskräfte. Neben der anforderungsgerechten Überschrift und Angabe des Speicherpfades besitzt diese Benutzeroberfläche einen Button namens „*EXPORT*“ mit dessen Hilfe weitere Prozeduren zur Aufstellung der Ausgabedatei aufgerufen werden. Damit der Anwender jederzeit die Möglichkeit hat die Benutzeroberfläche zu beenden, wurde ein zusätzlicher Button namens „*Close*“ implementiert.

Nach dem Aufbau und Implementierung der Benutzeroberfläche erfolgt der Aufruf der Prozedur namens „*GetFilePath*“. Diese Prozedur ist für die Bestimmung des Speicherpfades zuständig. Die Zuweisung des ermittelten Speicherpfades der Benutzeroberfläche erfolgt unglaublich schnell.

Für das weitere Vorgehen wird die Aktivität des Anwenders benötigt. Seine Aufgabe ist es jetzt eines der Buttons zu betätigen. Wird der Button „*Close*“ betätigt, so führt dies zu einem Aufruf der Prozedur namens „*CloseUI*“, die ebenfalls im Flussdiagramm 2 aus Abbildung 4.15 dargestellt ist. Der Aufruf der Prozedur „*CloseUI*“ führt zur Schließung der Benutzeroberfläche und Vernichtung aller zuvor deklarierten Variablen und Objekten.

Entscheidet sich der Anwender für die Erstellung der Ausgabedatei, so soll der Button „*EXPORT*“ geklickt werden. Dabei wird zunächst die Prozedur namens „*Control*“, auf die anhand des Flussdiagramms 2.1 in Abbildung 2.17 genauer eingegangen wird, aufgerufen.



Abbildung 4.17: Flussdiagramm 2.1, Prozedur „Control“



Das in Abbildung 4.17 dargestellte Flussdiagramm 2.1 behandelt den Ablauf der Prozedur namens „Control“. Diese Prozedur hat mehrere Aufgaben zu erfüllen. Zu Beginn erfolgt die Bestimmung der Knoten-IDs der im Modell vorhandener Lager und derer Anzahl. Dabei wird die Ergebnisdarstellung im HyperView-Tool „*Contour*“ auf „*SPCF Forces*“ eingestellt und alle Knoten an denen eine Reaktionskraft wirkt in ein extra dafür erstelltes „*SET*“ übertragen.

Ein „*SET*“ ist wie ein Container für die im Modell vorhandenen Knoten oder Elemente. Die Funktionsweise eines „*SETS*“ ist sehr vielfältig. Damit können beispielhaft die in einem „*SET*“ vorhandene Knoten oder Elemente bei der Findung unterschiedlicher Modellergebnisse von der Betrachtung ausgeschlossen werden. Eine objektorientierte Verwendung von „*SETS*“ beschleunigt den Prozedurablauf enorm. Werden bei der Bestimmung der Lagerknoten alle im Modell vorhandene Knoten nach der Reaktionskraft größer Null durchsuchen, so wird der Prozedurablauf deutlich verlangsamt. Mit Hilfe eines „*SETS*“ und unter Verwendung passender Methode lassen sich die gesuchten Knoten in Bruchteilen der Sekunde bestimmen.

Nachdem die Lagerknoten gefunden sind, erfolgt im nächsten Schritt der Prozedur „*Control*“ die Aufstellung einer global deklarierten Liste mit im Modell vorhandener Lastfälle und Bestimmung derer Anzahl.

Nun sind alle Vorbereitungsmaßnahmen getroffen und es kann mit der Ermittlung der im Kapitel 3 definierter Parameter begonnen werden. Dazu wird zunächst, wie der Abbildung 4.17 entnommen werden kann die Prozedur namens „*GetNodeCoord*“ aufgerufen. Das Resultat dieser Prozedur ist eine global deklarierte Liste mit darin vorhandenen Koordinaten der einzelnen Lager. Die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Koordinaten wird anhand des Flussdiagramms 2.2 aus Abbildung 4.18 erklärt.

Sofort nach dem Aufruf der Prozedur „*GetNodeCoord*“ wird ein Messwerkzeugobjekt vom Typ „*Position*“ erstellt, dem die erste Knoten-ID aus der zuvor erstellte Liste mit Lagerknoten zugewiesen wird. Damit im folgenden Prozedurablauf die Koordinaten des gewählten Knotens bestimmt und einer, dafür global deklarierten, Liste geordnet übergeben, muss die HyperView-Anzeige aktualisiert werden. Die zuvor beschriebenen Prozedurschritte werden sooft wiederholt und die dazugehörige Liste vervollständigt, bis alle Lagerknoten angesprochen sind.

Zurückkehrend zu dem Flussdiagramm 2.1 wird nach der Prozedur „*GetNodeCoord*“ eine weitere Prozedur, namens „*GetRefo*“ aufgerufen. Diese Prozedur beschäftigt sich mit der Ermittlung koordinatenbezogener Reaktionskräfte an den Lagerknoten, deren Ablauf anhand des Flussdiagramms 2.3 in Abbildung 4.19 dargestellt ist.

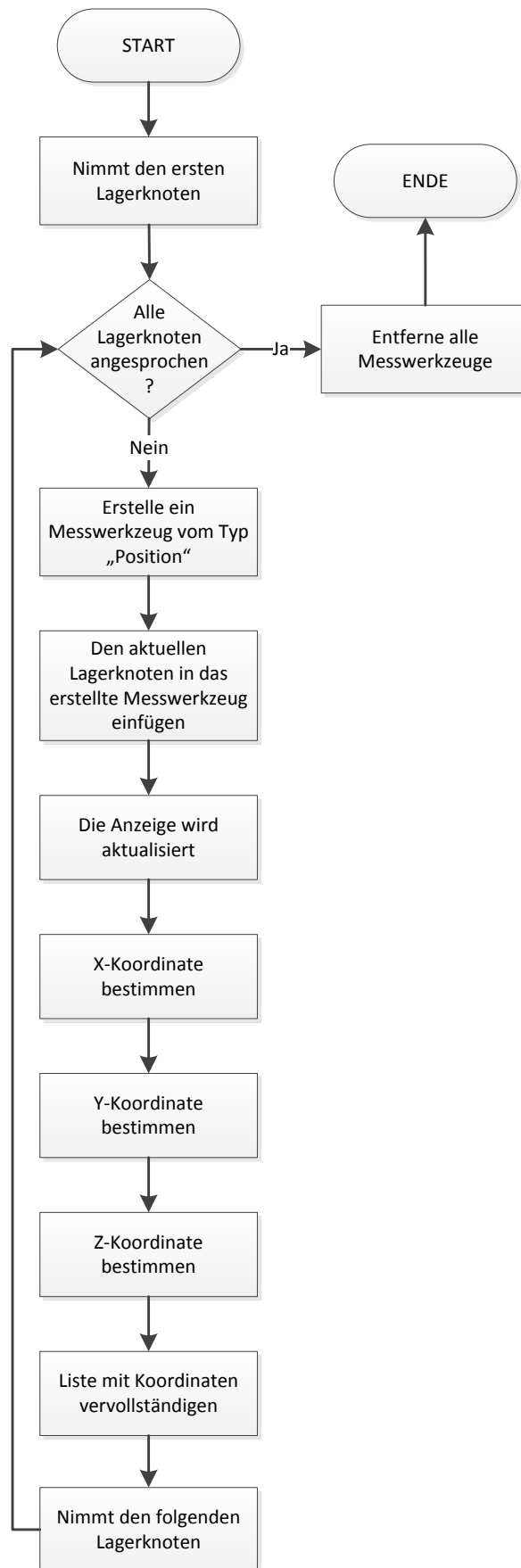


Abbildung 4.18: Flussdiagramm 2.2, Prozedur „GetNodeCoord“

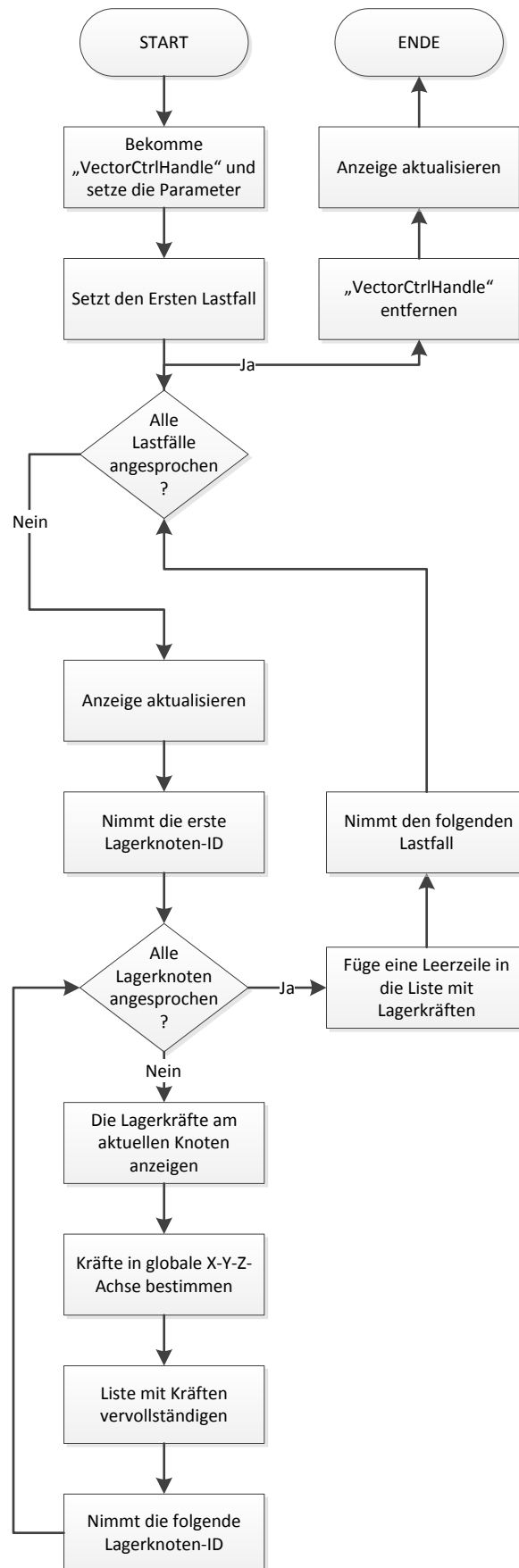


Abbildung 4.19: Flussdiagramm 2.3, Prozedur „GetRefo“

Anforderungsbedingt soll die Bestimmung der Reaktionskräfte mit Hilfe des HyperView-Tools namens „*Vector*“ erfolgen. Um auf dieses Vektor-Tool zugreifen zu können wird am Anfang der Prozedur „*GetRefo*“, dessen Flussdiagramm in Abbildung 4.19 dargestellt ist, zunächst ein Objekt der Klasse „*VectorCtrlHandle*“ erzeugt. Des Weiteren wird mit Hilfe dieses sogenannten Vektorobjektes die Ergebnisdarstellung auf „*SPCF Forces*“ eingestellt und mittels der Karte „*Plot*“ die Werteanzeige aktiviert.

Nach der Aktivierung des ersten Lastfalls und Heranziehung des ersten Lagerknotens wird die Anzeige aktualisiert. Erst jetzt kann die Bestimmung der, am selektierten Knoten angreifenden koordinatenbezogenen, Lagerreaktionskräfte erfolgen. Die gefundenen Lagerkräfte werden sofort einer dafür global deklarierten Liste geordnet übergeben. Die zuvor beschriebenen Schritte werden für jeden Lagerknoten wiederholt. Werden alle Lagerknoten angesprochen, so wird der nächste Lastfall aktiviert und die Schritte für alle Lagerknoten erneut wiederholt, bis jeder Lastfall durchgearbeitet wird.

An Ende der Prozedur „*GetRefo*“ wird das zuvor erstellte Vektorobjekt entfernt und die Anzeige erneut aktualisiert. Das Resultat dieser Prozedur ist eine global deklarierte Liste mit allen im Modell pro Lastfall vorhandenen Lagerkräften.

An dieser Stelle sind alle gesuchten Parameter bestimmt und können zu einer gemeinsamen Liste zusammengefasst werden. Dies geschieht mit Hilfe der Prozedur namens „*CreateExportList*“, die ebenfalls im Flussdiagramm 2.1 aus Abbildung 4.17 abgebildet ist.

Nachdem die zu exportierende Liste vollständig aufgebaut ist, kann diese mit Hilfe des bereits bestimmten Speicherpfades abgelegt werden. Dies geschieht mit Hilfe der Prozedur namens „*CreateExportFile*“. Diese Prozedur erstellt zunächst unter Verwendung des ermittelten Speicherpfades eine leere Text-Datei auf dem Laufwerk und benennt diese automatisch in „*refo.dat*“ um. Im nächsten Schritt greift die Prozedur erneut auf die zuvor erstellte Text-Datei und überträgt den gesamten Inhalt der zu exportierenden Liste.

Die im Flussdiagramm 2.1 zum Schluss aufgerufene Prozedur besitzt die Bezeichnung „*CloseUI*“. Diese beendet die Benutzeroberfläche und vernichtet alle zuvor deklarierten Variablen und Objekte.

Das Resultat der in diesem Makro umgesetzter Anforderungen wird anhand der Abbildung 4.20 dargestellt. Zum besseren Verständnis ist die Ausgabedatei in drei Bereiche unterteilt.

In dem Bereich I sind zwei Zahlen umrahmt. Diese sind übersichtshalber mit in die Ausgabedatei aufgenommen, um dem Betrachter einen schnellen Überblick über die in der Ausgabedatei vorhandene Anzahl an Lastfällen und Komponenten zu geben. Dabei spiegelt die zweite Zahl die Anzahl der Komponente wieder, was in diesem Fall die Anzahl der Lagerknoten ergibt. Die erste Zahl besitzt die Aussage zu der Anzahl der im Modell vorhandener Lastfälle.

Im zweiten Bereich der in Abbildung 4.20 dargestellten Ausgabedatei befinden sich die globalen Koordinaten einzelner Lagerknoten. Während in der ersten Spalte die ID-Nummer der jeweiligen Lagerknoten abgebildet sind, dienen die Spalten zwei bis vier als Platzhalter für die globalen X- Y- und Z-Koordinate an entsprechenden Lagerknoten.

1.	1.5	-57.5	1.0
2.	1.5	-107.5	1.0
3.	156.3	-107.5	1.0
4.	151.5	-57.5	1.0
5.	114.4	-77.0	174.9
6.	63.0	-45.5	212.7

1.	552.1	220.1	-836.6
2.	219.5	203.1	397.1
3.	177.3	-272.9	-17.5
4.	318.7	-61.5	387.7
5.	784.8	-23.9	-8.8
6.	596.3	-66.9	76.1

1.	14.5	-348.4	102.9
2.	-15.3	-363.0	-106.7
3.	8.5	-176.5	-31.0
4.	-6.5	-34.4	340.8
5.	-83.4	2.5	8.7
6.	82.2	-9.9	16.2

Abbildung 4.20: Reaktionskräfte, Ausgabedatei

Im dritten Bereich der Ausgabedatei werden die last- und lagerknotenbezogenen Reaktionskräfte dargestellt. Wie der ersten Zahl des ersten, so auch dem Aufbau des dritten Bereiches kann entnommen werden, dass das Modell, aus dem diese Ausgabedatei hergeleitet ist, nur zwei Lagerstellen besitzt. Die Reaktionskräfte werden übersichtshalber blockweise dargestellt. Die einzelnen Blöcke werden nach jedem Lastwechsel durch eine leere Zeile voneinander getrennt. Die erste Spalte gibt erneut die Auskunft über die Lagerknoten-ID. Die nachfolgenden Spalte beinhalten die last- und lagerknotenbezogene Reaktionskräfte. Dabei werden in der zweiten Spalte die X-Komponente, in der dritten Spalte die Y-Komponente und in der vierten Spalte die Z-Komponente der Reaktionskräfte dargestellt.

### 4.3 Lagenabhängige Spannungen und Tsai-Wu-Versagenskriterien

Nach der ausführlichen Beschreibung des Makros zur Ermittlung der Lagerreaktionskräfte, beschäftigt sich dieses Unterkapitel gleichzeitig mit zwei, im Unterkapitel 3.1 spezifizierten, Themengebieten. Das sind zu einem die Ermittlung der lagenabhängigen Spannungen und zu anderem die Bestimmung der Versagenswerte nach dem Tsai-Wu-Versagenskriterium.

Bei einer genaueren Betrachtung der Spezifikationen der zu realisierenden Makros zuvor angesprochener Themengebiete fällt auf, dass diese eine hohe Überdeckung aufweisen. In beiden Fällen hängen die gesuchten Werte von den folgenden Parameter ab: Laminatlage, Lastfall, Baugruppe, Sektion sowie Material. Aus dieser Tatsache fiel die Entscheidung beide Themengebiete in einem Makro, das ebenfalls nur eine Ausgabedatei erstellt, umzusetzen.

Abweichend von dem Schema der beiden vorhergehenden Unterkapitel, erfolgt im ersten Teil dieses Unterkapitels die Betrachtung der Konzeptfindungsphase zu der Bestimmung der gesuchten Werte und Erstellung einer Ausgabedatei. Ableitend aus den ermittelten Anforderungen des ersten Teils der Konzeptfindungsphase geschieht eine erneute Analyse zur Bestimmung an Benutzeroberfläche gestellter Anforderungen.

Im Verlauf der Konzeptfindungsphase zur Bestimmung gesuchter Werte und Erstellung der Ausgabedatei wurde zunächst ein Brainstorming durchgeführt dessen Ergebnisse in einem in Abbildung 4.21 dargestellten Mind-Map-Diagramm festgehalten werden.

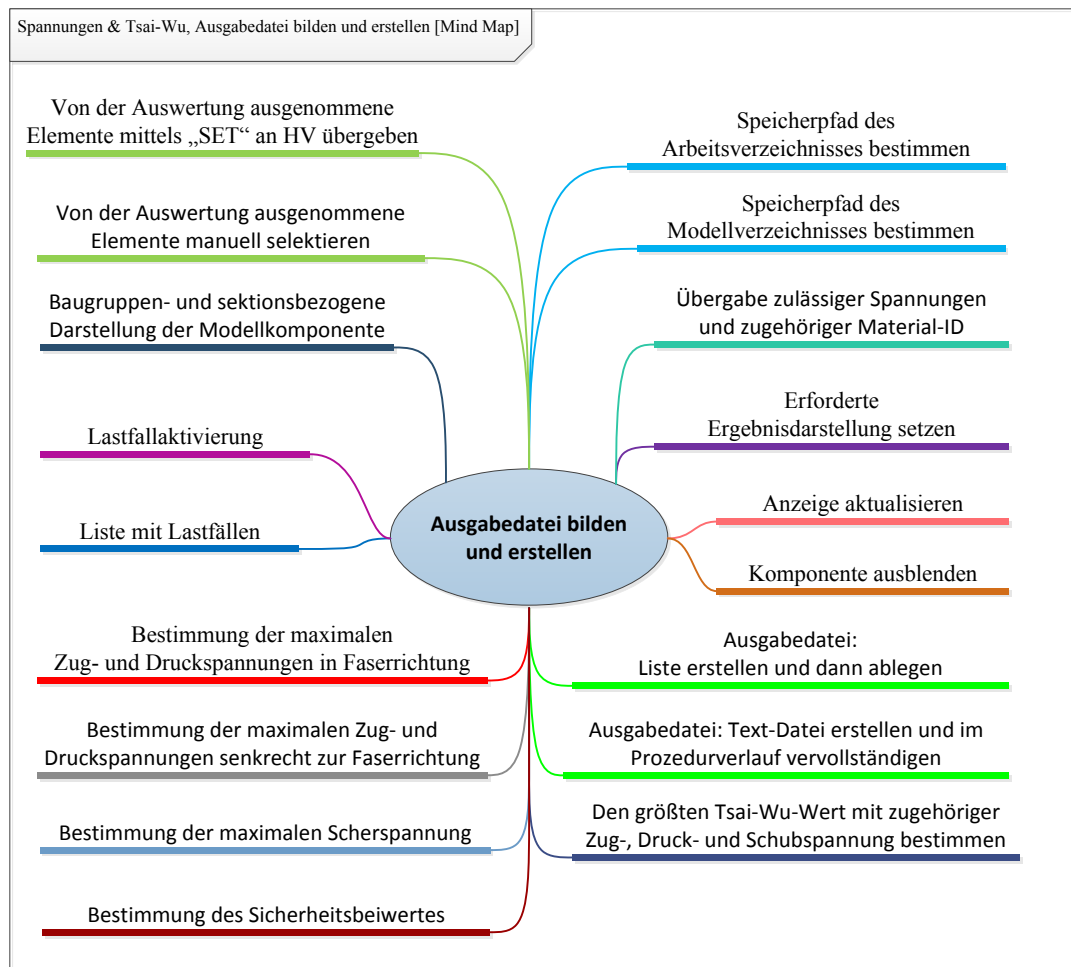


Abbildung 4.21: Spannungen & Tsai-Wu, Mind-Map-Diagramm, Ausgabedatei bilden und erstellen

Wie Abbildung 4.21 entnommen werden kann, sind die meisten an das Makro gestellten Anforderungen eindeutig definiert. Lediglich drei, der im Mind-Map-Diagramm aufgenommenen Anforderungen, besitzen einen alternativen Umsetzungsweg. Zwei davon sind bereits aus den beiden vorherigen Unterkapiteln bekannt. Das sind: die automatische Bestimmung des Speicherpfaden und das Vorgehen bei der Erstellung der Ausgabedatei. Dementsprechend sind die besseren Lösungswege dieser Teilziele bekannt und werden ebenfalls in diesem Makro umgesetzt.

Eine weitere mehrdeutige Anforderung im Mind-Map-Diagramm aus Abbildung 4.21 beschäftigt sich mit den im Modell vorhandenen Elementen, die bei der Bestimmung gesuchter Werte nicht berücksichtigt werden sollen. Solche Elemente befinden sich in den meisten Fällen im Bereich um die Krafteinleitungsknoten und weisen unrealistisch hohe Spannungswerte auf. Ein sicherer Lösungsweg aus dieser Problematik beruht auf der manuellen Selektion der unbrauchbaren Elemente. Dabei erstellt der Anwender direkt in HyprView ein „*Elementen-SET*“ und füllt diesen mit kritischen Elementen. Die in so einem erstellten „*SET*“ vorhandenen Elemente können vom Makro problemlos erkannt und von der Ermittlung gesuchter Werte ausgeschlossen

werden. Leider basiert dieser Lösungsansatz auf viel Handarbeit und somit auf dem Verlust kostbarer Zeit.

Unter Berücksichtigung aller Vor- und Nachteile des ersten Lösungsansatzes geht der zweite Lösungsansatz von der automatischen Bildung solcher „*SETS*“ bereits während der Modellbildungsphase. Die so in HyperMesh automatisch generierten „*SETS*“ werden problemlos mittels der „\*.ferri“ Datei dem Post-Prozessor HyperView nach der Berechnung mit Solver übergeben.

Das zu diesen Zwecken erstellte Makro ist Bestandteil der in dieser Arbeit definierten Wünsche und wird im entsprechenden Kapitel behandelt.

Wie am Anfang dieses Unterkapitels bereits erwähnt wurde sind die gesuchten Werte von mehreren Faktoren abhängig. Die Abhängigkeit beginnt bereits mit der Wahl des Lastfalls. Unterschiedliche Lastfälle führen nicht nur zu den unterschiedlichen Werten der gesuchten Elemente sondern auch zu unterschiedlicher Position dieser im Modell. Da sich dieses Unterkapitel mit Analyse der CFK- und GFK-Schichten aller im Modell vorhandener Wabenplatten beschäftigt, wird die Angabe der Nummer dazugehöriger Laminatlage unvermeidlich. Die einzelnen Schichten sind wiederum Bestandteil dazugehöriger Sektionen. Sektionen bilden Baugruppen. Aus der zuvor geschilderten Abhängigkeit lässt sich hoher manueller Aufwand, bei dem der Anwender für jeden Lastfall, jede Baugruppe sowie Sektion und schließlich jede einzelne Lage die gesuchten Werte ermitteln soll, schon erahnen. Dazu kommt die Angabe der zu jeder Schicht zugehöriger Material-ID.

Leider beinhaltet die Ergebnisdatei, die mittels Post-Prozessor-Programms in HyperView ausgewertet werden kann, gar keine Informationen zu den, im Modell verwendeten Material-IDs. Da diese in der Ausgabedatei vorhanden sein müssen, soll eine zwangsläufige Übertragung fehlender Informationen stattfinden, was die Anforderung in Abbildung 4.21 widerspiegelt.

Dasselbe bezieht sich auf die zulässigen Spannungen. Die zulässigen Spannungen werden von dem Solver bei der Berechnung der Versagenswerte verwendet, jedoch der Ergebnisdatei nicht zur Verfügung gestellt.

Damit das Makro mit der Ermittlung gesuchter Parameter beginnen kann, muss es weiterhin eine Reihe in Abbildung 4.21 zusammengestellter Anforderungen erfüllen. Dazu gehören: Bildung einer Liste mit im Modell vorhandenen Lastfällen, Aktivierung des gewählten Lastfalls, sektionsbezogene Darstellung der Modellkomponente, Setzen der Ergebnisdarstellung, Aktualisieren der Anzeige sowie das Ausblenden aller Komponenten.

Die letzten an das Makro gestellten Anforderungen beschäftigen sich mit der Bestimmung der von vielen Faktoren abhängigen Spannungen, Versagenswerten sowie zugehörigen Sicherheitsbeiwerten. Diese Anforderungen können nur auf einem Weg umgesetzt werden, was nicht zwangsläufig bedeutet, dass dieser Weg kompliziert oder viele Ressourcen in Anspruch nehmen würde.

An dieser Stelle sind alle an den Berechnungsteil gestellten Anforderungen behandelt und es kann mit der Aufstellung der an die Benutzeroberfläche gestellter Anforderungen begonnen werden. Nach dem erneuten Durchführen eines Brainstormings können relevanten

Anforderungen an Benutzeroberfläche herauskristallisiert werden und sind in Abbildung 4.22 anhand eines Mind-Map-Diagramms dargestellt.

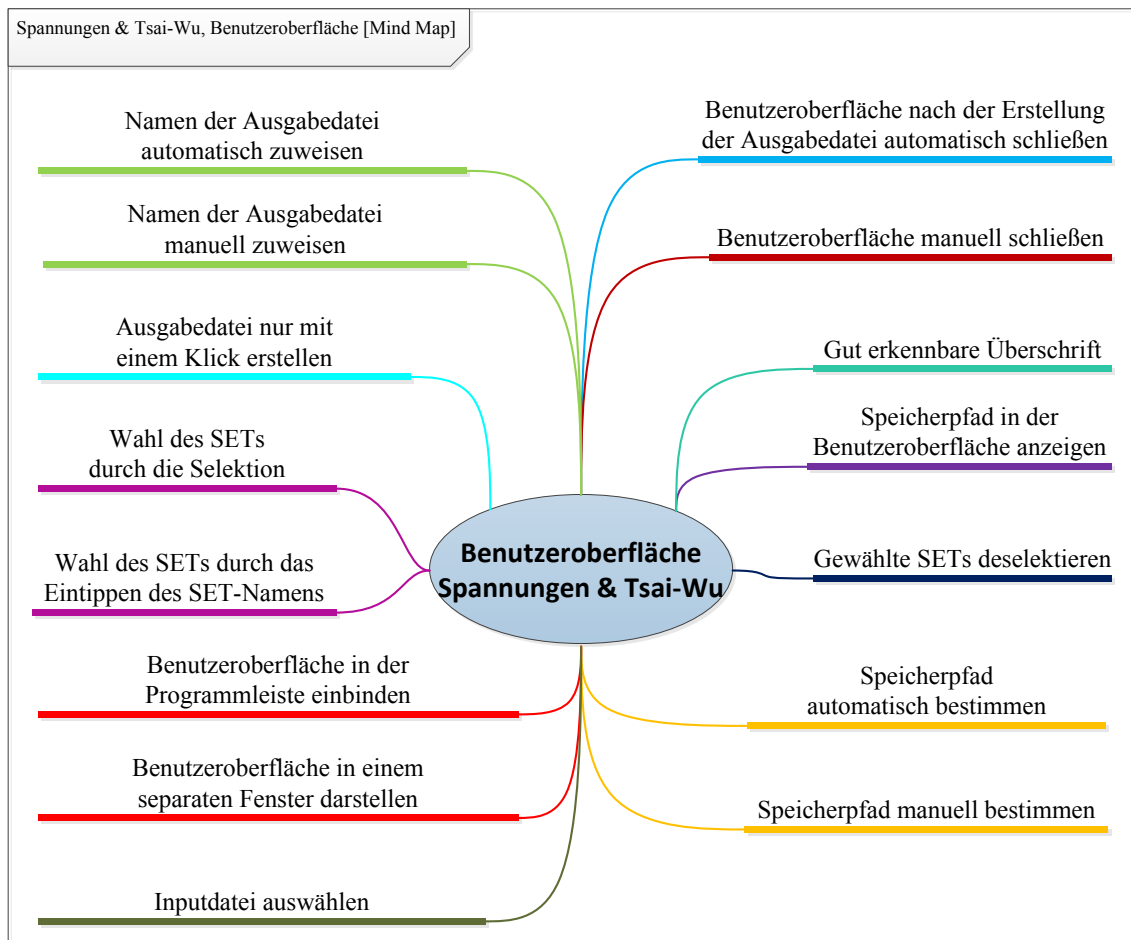


Abbildung 4.22: Spannungen & Tsai-Wu, Mind-Map-Diagramm, Benutzeroberfläche

Die meisten, der in dem Mind-Map-Diagramm in Abbildung 4.21 zusammengestellten Anforderungen an die Benutzeroberfläche sind aus den beiden vorherigen Unterkapiteln bekannt. Dementsprechend sind auch die besseren Umsetzungswege mehrdeutiger Anforderungen bekannt und werden als Voraussetzung für die noch zu erstellende Benutzeroberfläche gesetzt.

Einige Anforderungen, die neu hinzugekommen sind, beschäftigen sich mit der bereits am Anfang dieses Unterkapitels geschilderter Problematik der Selektion eines „*SETs*“ und der Wahl einer Inputdatei. Die Anforderung zur Selektion eines „*SETs*“ kann, wie in Abbildung 4.22 graphisch dargestellt ist, auf zwei Wegen umgesetzt werden. Der erste Lösungsweg sieht das Platzieren eines Textfeldes in der Benutzeroberfläche vor, mit dessen Hilfe der Name des zu selektierenden „*SETs*“ manuell eingegeben werden kann. Der somit in das Textfeld eingetragener Name wird einer Variable übergeben, das entsprechende „*SET*“ gefunden und von der Auswertung ausgeschlossen.

Nach der durchgeführten Umfrage wurde jedoch der zweite Lösungsweg deutlich besser benotet und wird somit für die Umsetzung der oben genannten Anforderung verwendet. Dabei sollen alle in der Ausgabedatei vordefinierten „*SETs*“ in der Benutzeroberfläche aufgelistet und durch das Anklicken selektiert werden.



Als nächste hinzugekommene Anforderung, die an Benutzeroberfläche gestellt wird, ist das Deselektieren zuvor gewählter „*SETS*“. Es soll gewährleistet sein, nach einer falschen Wahl des „*SETS*“ diese Einstellung rückwirkend zu machen.

Als letzte neu hinzugekommene Anforderung an Benutzeroberfläche gilt die Wahl der Inputdatei. Die an die Berechnungsprozedur zu übertragende Inputdatei soll mittels der Benutzeroberfläche ausgewählt werden können.

An dieser Stelle sind alle relevanten Anforderungen vollständig aufgestellt worden. Im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels wird etwas tiefer auf das aus den Anforderungen hergeleitete Makro eingegangen. Beendet wird dieses Unterkapitel mit der Darstellung und Beschreibung der Ausgabedatei.

Die Beschreibung der im Makro vorhandener Prozeduren und derer Funktionsweise beginnt zunächst mit dem Überblick aller Prozeduren zur Aufstellung der Benutzeroberfläche und deren, die durch Anwenderaktivität aufgerufen werden. Dabei wird das Flussdiagramm 3, das in Abbildung 4.23 graphisch dargestellt ist, verwendet.

Wie dem Flussdiagramm 3 in Abbildung 4.23 entnommen werden kann, erfolgt nach dem Aufruf des Makros eine Deklaration der globalen Variablen. Im nächsten Schritt wird die Prozedur namens „*BuildInitialUI*“ aufgerufen. Mit Hilfe dieser Prozedur wird die Benutzeroberfläche aufgebaut und in der Programmleiste von HyperView eingebunden. Das Resultat dieser Prozedur wird anhand des Ausschnittes aus dem Programm HyperView in Abbildung 4.24 graphisch dargestellt.

Sofort nach der Prozedur „*BuildInitialUI*“ erfolgt der Aufruf der Prozedur namens „*GetAllHandles*“, mit deren Hilfe relevante programmspezifische Objekte global deklariert werden.

Nach Deklaration der globalen Objekte werden nacheinander zwei weitere Prozeduren, wie dem Flussdiagramm 3 aus Abbildung 4.23 entnommen werden kann, namens „*GetFilePath*“ und „*FillListBox*“ aufgerufen. Mit Hilfe dieser beiden Prozeduren werden zwei weitere an Benutzeroberfläche definierte Anforderungen umgesetzt. Dabei beschäftigt sich die Prozedur „*GetFilePath*“ mit der automatischen Bestimmung des Speicherpfades und dessen Darstellung in der erstellten Benutzeroberfläche. Die Prozedur „*FillListBox*“ bestimmt alle in der Ergebnisdatei vorhandenen „*SETS*“ und stellt diese geordnet in einer, in Abbildung 4.24 gut erkennbaren, Liste zusammen.

Weiterhin erhält die Benutzeroberfläche in Abbildung 4.24 zwei neue Buttons mit der Bezeichnung „*DSEL*“ und „*Read Import File*“, deren Funktionsweise im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels beschrieben wird.

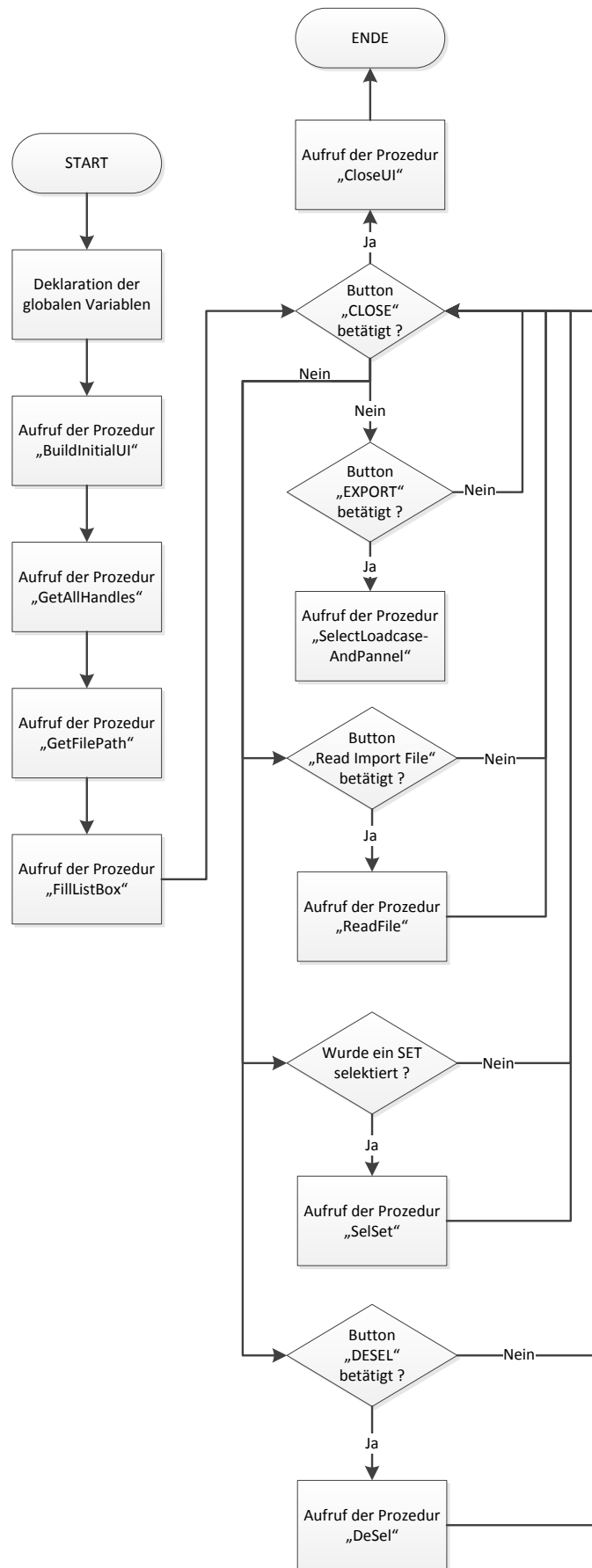


Abbildung 4.23: Spannungen & Tsai-Wu, Flussdiagramm 3, Aufbau und Aktivitäten der Benutzeroberfläche

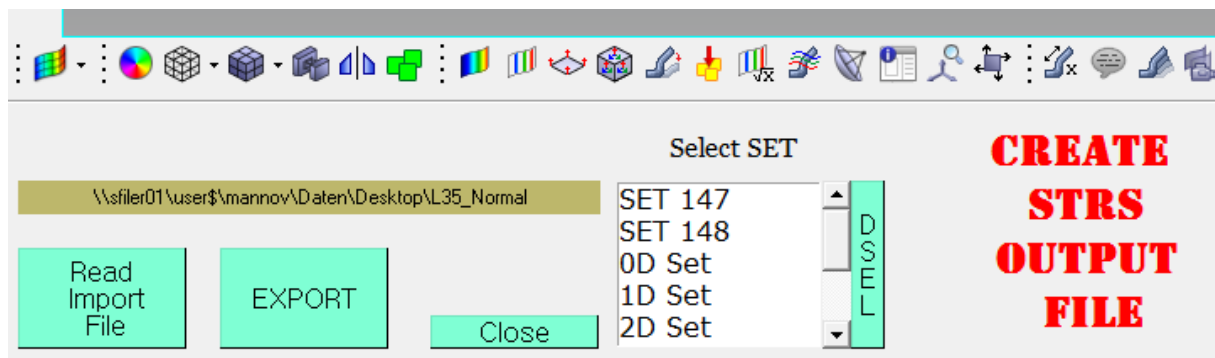


Abbildung 4.24: Spaltungen &amp; Tsai-Wu, Benutzeroberfläche

Zurückkehrend zu dem Flussdiagramm 3 in Abbildung 4.23 wird ersichtlich, dass nachdem die Prozedur „*FillListBox*“ ausgeführt worden ist, die Benutzeroberfläche als komplett aufgebaut gilt und nur noch auf Aktivität des Anwenders wartet. Im Fall eines Klicks auf einen der Listeneinträge der in Benutzeroberfläche zusammengestellter „*SETS*“, wird eine Prozedur mit der Bezeichnung „*Se/Set*“ aufgerufen. Diese Prozedur bestimmt die ID-Nummer des durch Anwender selektierten „*SETS*“ und weist dieser eine dafür global deklarierte Variable zu. Anhand dieser Variable kann das Makro auf die Elemente des ausgewählten „*SETS*“ zugreifen und diese bei der Darstellung einzelner Sektionen ausblenden.

Klickt der Anwender auf den Button „*DSEL*“ in der Benutzeroberfläche aus Abbildung 4.24, so erfolgt der Aufruf einer Prozedur namens „*DeSet*“. Diese Prozedur hat die Aufgabe die mit einer SET-ID-Nummer belegte globale Variable zu leeren. Das Makro ist in der Lage zu erkennen, ob die angesprochene Variable eine SET-ID-Nummer beinhaltet oder leer ist. Im Fall, dass diese Variable leer ist, werden alle zutreffenden Elemente ausgewertet. Wurde jedoch eine SET-ID-Nummer vergeben, so werden alle darin vorhandenen Elemente von der Auswertung ausgeschlossen.

Beim Klick auf den Button „*Close*“, wird die Prozedur namens „*CloseUt*“ aufgerufen. Mit Hilfe dieser Prozedur wird die Benutzeroberfläche geschlossen und alle zuvor deklarierten Variablen und Objekten vernichtet.

Bevor nun die Prozeduren zur Bestimmung gesuchter Werte und Erstellung der Ausgabedatei gestartet wird, soll zunächst die bereits bekannte Inputdatei geladen werden. Dies geschieht durch einen Klick auf den Button „*Read Import File*“. Die dabei aufgerufene Prozedur besitzt die Bezeichnung „*ReadFile*“ und wird an einer anderen Stelle dieses Unterkapitels beschrieben. Zunächst soll die Struktur und der Inhalt solcher Inputdateien erläutert werden.

Wiederholend lässt sich folgende Aussage treffen. Ein in HyperView geladenes Modell besitzt keine Verknüpfung der im Modell vorhandenen Komponente zu den jeweiligen Material-IDs sowie zulässigen Spannungen, da diese einfach fehlen und mittels einer Text-Datei zur Verfügung gestellt werden müssen.

Damit der Automatisierungsgrad weiterhin maximal bleibt, wird ein weiteres Makro entworfen, das im Prä-Prozessor aufgerufen wird und die gewünschte Text-Datei im Arbeitsverzeichnis

ablegt. Wie diese Text-Datei aufgebaut ist und was diese beinhaltet wird anhand der folgenden Abbildung 4.25 beschrieben.

```

10; 201; 1; 10; 10; 215; 175; 66
10; 201; 3; 10; 10; 215; 175; 66
20; 111; 1; 11; 23; 169; 169; 50
20; 111; 2; 11; 23; 169; 169; 50
20; 111; 4; 11; 23; 169; 169; 50
20; 111; 5; 11; 23; 169; 169; 50
20; 113; 1; 11; 24; 169; 169; 50
20; 113; 2; 11; 24; 169; 169; 50
20; 113; 3; 30; 24; 1250; 40; 50
20; 113; 5; 30; 24; 1250; 40; 50
20; 113; 6; 11; 24; 169; 169; 50
20; 113; 7; 11; 24; 169; 169; 50

```

Abbildung 4.25: Spannungen & Tsai-Wu, Inputdatei

Die in Abbildung 4.25 dargestellte Inputdatei besitzt insgesamt acht Spalten. Bereits auf den ersten Blick fällt auf, dass die Inputdatei deutlich mehr Einträge enthält als dem HyperView für die Erzeugung der Ausgabedatei fehlen. Dies ist auf die zuvor erläuterte Abhängigkeit der benötigten Parameter untereinander zurückzuführen. Mit Hilfe solcher in Abbildung 4.25 dargestellter Inputdateien wird der zerstörte Informationsfluss in Bezug auf aktuelle Aufgabenstellung komplett beseitigt.

In der ersten Spalte der Inputdatei werden die Elementtypen (EID), mit deren Hilfe Aussage über verwendete Baugruppe getroffen werden kann, platziert. Demzufolge besitzt das Modell, aus dem diese Inputdatei abgeleitet ist, nur zwei Baugruppen mit der ID 10 und 20.

Die zweite Spalte der Inputdatei beinhaltet die ID-Nummer der in Baugruppen vorhandenen Sektionen. Bei einer genaueren Betrachtung der Inputdatei fällt auf, dass die Baugruppe mit der ID 10 nur aus einer Sektion mit der ID 201 besteht, während die Baugruppe mit der ID 20 zwei Sektionen mit den IDs 111 und 113 beinhaltet.

In der dritten Spalte werden die Nummer der Lagen angegeben. Demzufolge besteht die Sektion mit der ID 201 aus insgesamt drei Lagen. Zu sehen sind lediglich die erste und die dritte. Mit Hilfe der zweiten Lage wird allein die Wabe modelliert, die für diese Aufgabenstellung keine Relevanz besitzt und nicht ausgewertet wird.

Die vierte Spalte beinhaltet die zu jener Lage zugehörige Material-ID. In den letzten drei Spalten werden schließlich die zulässigen Spannungen dargestellt.

Bei der Ermittlung der gesuchten Werte in den beiden vorherigen Unterkapiteln wurden von den Makros sogenannte Baugruppenlisten erstellt. Mit Hilfe dieser Listen können alle im Modell vorhandenen Baugruppen zwecks der Wertebestimmung einzeln eingeblendet werden. Bei der Bestimmung der Spannungen sowie der Versagenswerte werden die einzelnen Sektionen mit darin vorhandenen Lagen in den Vordergrund gestellt. Jeder im Modell vorhandenen Sektion wird eine eindeutige Komponenten-ID zugewiesen, anhand dieser die Sektionen einzeln angezeigt werden und die Bestimmung gesuchter Werter erfolgen kann. Die zu den Sektionen zugehörigen Komponenten-IDs befinden sich in der fünften Spalte der Inputdatei und werden ebenfalls an HyperView übergeben.

Zurück zu der Prozedur „*ReadFile*“. Nach dem Aufruf dieser Prozedur erscheint zugleich ein Explorer-Fenster mit dessen Hilfe die Inputdatei gefunden und geöffnet werden kann. Dabei wird die so selektierte Inputdatei zunächst in die als Liste deklarierte Variable komplett übergeben. Im weiteren Prozedurschritt werden die durch Semikolon getrennten Listeneinträge einer global deklarierten Matrix übergeben. Mit Hilfe dieser Matrix wird der Zugriff auf die einzelnen Einträge deutlich beschleunigt und der Quellcode reduziert.

An dieser Stelle sind alle vorbereitenden Maßnahmen getroffen und es kann mit der Bestimmung gesuchter Werne und Erstellung einer Ausgabedatei begonnen werden. Dazu muss der Anwender den Button mit der Bezeichnung „*EXPORT*“ betätigen. Dabei wird zunächst eine Prozedur namens „*SelectLoadcaseAndPannel*“ aufgerufen, deren Ablaufschema mittels des Flussdiagramms aus dem Anhang A.3.1 im Folgenden genauer betrachtet wird. Alle Flussdiagramme aus dem Anhang beinhalten Kommentare zu den einzelnen Prozedurschritten, um einen noch besseren Überblick über den gesamten Prozedurablauf zu verschaffen.

Sofort nach dem Start der Prozedur „*SelectLoadcaseAndPannel*“ wird eine Liste mit allen im Modell vorhandenen Lastfällen aufgebaut und deren Anzahl bestimmt. Im weiteren Prozedurschritt erfolgt die Aktivierung des ersten, aus der zuvor erstellten Liste, Lastfalles. Für alle weiteren Schritte werden zunächst die Einträge aus der nullten Zeile der bereits erwähnten Matrix für den späteren Zugriff vorbereitet.

Nachdem mit Hilfe der Prozedur „*HideComp*“ alle angezeigten Komponenten ausgeblendet werden, erfolgt im nächsten Schritt die Zuweisung der vorbereiteten Matrixeinträge den dazugehörigen globalen Variablen. Anhand dieser Variablen wird die Ausgabedabei zum späteren Zeitpunkt mit folgenden Angaben ergänzt: Baugruppen- sowie Sektionsnummer, Material-ID, Lagenummer und zulässige Spannungen.

Nun wird die zu analysierende Sektion mittels der in nullter Zeile der Matrix vorhandener Komponenten-ID eingeblendet und die Prozedur „*ShowComp*“ aufgerufen. Alle die in der Prozedur „*SelectLoadcaseAndPannel*“ aufgeführten Zwischenschritte werden für jede Komponenten-ID der Inputmatrix und jeden Lastfall wiederholt.

Der letzte, in dem Flussdiagramm aus dem Anhang A.3.1, ausgeführte Schritt ruft die Prozedur namens „*CreateExportFile*“. Diese Prozedur erstellt zunächst unter Verwendung des ermittelten Speicherpfades eine leere Text-Datei auf dem Laufwerk und benennt diese automatisch in „*strs.dat*“ um. Im darauf folgenden Schritt greift die Prozedur erneut auf die zuvor erstellte Text-Datei und überträgt dahin den gesamten Inhalt der zu exportierenden Liste.

Zurück zu der Prozedur „*ShowComp*“. Diese Prozedur kann als ein Steuerglied verstanden werden, das alle nötigen Schritte einleitet, damit zum Schluss eine fertige Liste mit gesuchten Werten für den Export erstellt wird. Das dazugehörige Flussdiagramm befindet sich im Anhang A.3.2.

Als Übergabeparameter bekommt diese Prozedur die Nummer der auszuwertenden Lage angezeigter Sektion. Sofort nachdem die Anzeige aktualisiert wird, erfolgt im nächsten Prozedurschritt die Festlegung der Ergebnisdarstellung. Dabei wird zunächst die Ergebnisdarstellung in dem HV-Tool „*Contour*“ auf „*Composite Stresses*“ und „*Normal X*“

*Stress* gesetzt. Mit Hilfe dieser Einstellung lassen sich die in einem kompositen Werkstoff in Faserrichtung vorhandenen Spannungen darstellen. Dazu muss lediglich eine weitere Voreinstellung getroffen werden, und zwar die Angabe der Lagenummer, an der die Spannungen dargestellt werden sollen.

Nach der Festlegung der Ergebnisdarstellung wird im nächsten Prozedurschritt eine Variable namens „*case*“ mit einem bestimmten Textinhalt befüllt. Diese Variable wird an einer anderen Stelle große Bedeutung haben, wo es um eine Fallunterscheidung geht. Da es sich am Anfang der Prozedur um die Bestimmung der Spannungen in Faserrichtung geht, wird der Variable „*case*“ zunächst ein String „NormalX“ zugewiesen.

Sofern ein Elementen-Set durch den Anwender in der Benutzeroberfläche selektiert ist, erfolgt im nächsten Prozedurschritt die Ausblendung der darin vorhandenen Elemente aus der angezeigten Modellkomponente. Dadurch findet keine Auswertung vordefinierter Elemente, bei denen unrealistische Spannungswerte zu erwarten sind, statt.

An dieser Stelle ist das Makro so weit angekommen, dass es an die Bestimmung der in Faserrichtung vorhandenen Spannungen übergehen kann. Dies geschieht mittels der Prozedur „*MinMaxMeasure*“, auf die im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels genauer eingegangen wird.

Nach der Bestimmung der in Faserrichtung vorhandenen maximalen Zug- und Druckspannungen erfolgt im nächsten Prozedurschritt erneute Festlegung der Ergebnisdarstellung. In diesem Fall dient es dem Zweck der Ermittlung der maximalen Zug- und Druckspannungen senkrecht zur Faserrichtung. Damit die ermittelten Werte im Verlauf der Prozedur „*MinMaxMeasure*“ den dafür global deklarierten Variablen richtig zugeordnet werden können, wird der Variable „*case*“ der String „NormalY“ zugeordnet.

Analog zu der zuvor beschriebenen Vorgehensweise erfolgt im weiteren Verlauf der Prozedur „*ShowComp*“ die Bestimmung noch fehlender Werte. Nachdem am Ende dieser Prozedur die gesuchten Größen den jeweiligen globalen Variablen zugewiesen sind, geschieht der Aufruf der Prozedur „*CreateExportList*“.

Die Prozedur „*CreateExportList*“ hat die Aufgabe eine global deklarierte Liste mit den aktuell ermittelten Werten geordnet zu ergänzen. Auf Basis dieser Liste wird mittels der Prozedur „*CreateExportFile*“ eine endgültige Ausgabedatei im Arbeitsverzeichnis erstellt.

Wie bereits erwähnt, erfolgt die eigentliche Bestimmung gesuchter Werte mittels der Prozedur „*MinMaxMeasure*“, deren Flussdiagramm sich im Anhang A.3.3 dieser Arbeit befindet. Als Übergabeparameter bekommt diese Prozedur eine Variable namens „*case*“. Anhand dieser Variable erfolgt die Zuweisung gefundener Werte den jeweiligen global deklarierten Variablen. Der eigentliche Verlauf der Bestimmung gesuchter Werte wird zu Beginn in dem dazugehörigen Flussdiagramm dargestellt. Dabei wird das bereits bekannte Messwerkzeugobjekt erstellt und mit Hilfe einer Methode auf die minimalen sowie maximalen Werte der dargestellten Ergebnisdarstellung zugegriffen. Die so erstellte Liste enthält außer den gesuchten Werten zusätzlich die dazugehörigen Elementen-IDs. Aus diesem Grund erfolgt im nächsten Prozedurschritt des, sich im Anhang A.3.3 befindenden, Flussdiagramms die Zuweisung relevanter Werte den temporären Variablen.

Je nach der eingestellten Ergebnisdarstellung sollen die ermittelten Werte sinngemäß den jeweiligen globalen Variablen zugewiesen werden. Dies geschieht mittels der im Flussdiagramm aus dem Anhang A.3.3 dargestellten Fallunterscheidung, bei der die bereits bekannte Variable „*case*“ die ausschlaggebende Rolle besitzt. Besitzt diese Variable den Inhalt „*NormalX*“, so erhält die globale Variable „*SigmaTenX*“ die maximale Zugspannung und die globale Variable „*SigmaComX*“ die maximale Druckspannung, jeweils in Faserrichtung.

Besitzt die Variable „*case*“ den Inhalt „*TsaiWu*“, so wird zunächst der maximal auftretender Versagenswert der dazugehörigen globalen Variable zugewiesen. Im nächsten Schritt erfolgt ein Aufruf der Prozedur mit der Bezeichnung „*StressOnMaxTsaiWu*“. Mit Hilfe dieser Prozedur werden zu dem größten Tsai-Wu-Wert die zugehörige Zug-, Druck- sowie Schubspannungen ermittelt. Die Vorgehensweise bei der Bestimmung der, am Element mit dem größten Versagenswert angreifenden Spannungen wird mittels des im Anhang A.3.4 abgebildeten Flussdiagramms dargestellt. Die dabei eingesetzten Methoden wurden bereit im Verlauf dieses Unterkapitels behandelt. Aus diesem Grund wird bei der Beschreibung dieser Prozedur nur auf wesentliche Unterschiede eingegangen.

Als Übergabeparameter bekommt Prozedur „*StressOnMaxTsaiWu*“ die ID-Nummer des Elementes mit dem größten Versagenswert. Damit diese Prozedur an dem zu analysierenden Element die gesuchten Spannungen ermitteln kann, darf momentan nur dieses Element angezeigt werden. Dazu wird zunächst ein Elementen-SET benutzt, worin die an diese Prozedur zu übergebene Element-ID abgelegt wird. Nachdem alle Komponente ausgeblendet sind, erfolgt die Darstellung des zuvor erstellten „*SETS*“ und damit des darin vorhandenen Elementes. Im weiteren Verlauf dieser Prozedur werden die gesuchten Spannungen mittels bereits bekannter Vorgehensweise bestimmt und das zuvor benutzte „*SET*“ geleert.

Eine der an dieses Makro gestellter Anforderung behandelt die Bestimmung der Sicherheitsbeiwerte an den Stellen mit dem größten Versagenswert. Die dafür zuständige Prozedur besitzt die Bezeichnung „*GetStrengthRatioValue*“ und wird, wie dem Anhang A.3.4 entnommen werden kann, am Ende der Prozedur „*StressOnMaxTsaiWu*“ aufgerufen.

Die Berechnung des Sicherheitsbeiwertes basiert auf den an dieses Makro mit Hilfe der Inputdatei übertragenen zulässigen Spannungen sowie der zuvor ermittelten Spannungen an dem Element mit dem größten Versagenswert.

Die Betrachtung zur Umsetzung an das Makro gestellten Anforderungen gilt hiermit als abgeschlossen. Das Resultat wird mittels der folgenden Abbildung 4.26 diskutiert. Die darauf dargestellte Ausgabedatei ist in der Realität durchgehend und ist übersichtshalber in zwei Bereiche getrennt. Des Weiteren sind alle relevanten Spalten durchnummeriert.

In der ersten Spalte der in Abbildung 4.26 dargestellten Ausgabedatei wird die Laufnummer des verwendeten Lastfalls angezeigt. Die Spalten 2 bis 5 sind bereits aus der Inputdatei in Abbildung 4.25 bekannt und werden nicht erneut erläutert. Die Spalten 6 und 7 stellen jeweils die Zug- und Druckspannungen in Faserrichtung dar. In die Spalten 8 und 9 werden maximalen Zug- und Druckspannungen, die senkrecht zur Faserrichtung wirken, eingetragen. Die Spalte 10 beinhaltet die maximal auftretenden Schubspannungen. In der Spalte 11 werden die gefundenen Versagenswerte dargestellt. Spalten 12 bis 14 beinhalten die zulässigen Spannungen. Spalte 15

zeigt die berechneten Sicherheitsfaktoren. In den letzten drei Spalten der in Abbildung 4.26 dargestellten Ausgabedatei werden die Zug-, Druck- sowie Schubspannungen des Elementes mit dem größten Versagenswert dargestellt.

2 12	1	2	3	4	5	6	7	8
1.00	10.00	201.00	1.00	10.00	7.01	-6.26	8.00	
1.00	10.00	201.00	3.00	10.00	10.28	-7.82	7.09	
1.00	20.00	111.00	1.00	11.00	36.62	-45.02	21.11	
1.00	20.00	111.00	2.00	11.00	36.62	-44.70	21.22	
1.00	20.00	111.00	4.00	11.00	37.11	-24.92	29.36	
1.00	20.00	111.00	5.00	11.00	37.12	-24.71	29.47	
1.00	20.00	113.00	1.00	11.00	3.55	-2.95	10.95	
1.00	20.00	113.00	2.00	11.00	3.45	-2.86	10.68	
1.00	20.00	113.00	3.00	30.00	21.22	-19.06	5.41	
1.00	20.00	113.00	5.00	30.00	22.28	-24.32	0.68	
1.00	20.00	113.00	6.00	11.00	3.39	-3.92	1.58	
1.00	20.00	113.00	7.00	11.00	3.48	-4.03	1.62	
2.00	10.00	201.00	1.00	10.00	9.44	-10.46	13.70	
2.00	10.00	201.00	3.00	10.00	8.41	-15.17	3.84	
2.00	20.00	111.00	1.00	11.00	19.92	-50.72	22.20	
2.00	20.00	111.00	2.00	11.00	19.86	-51.45	22.03	
2.00	20.00	111.00	4.00	11.00	18.31	-115.80	25.20	
2.00	20.00	111.00	5.00	11.00	18.90	-116.71	25.81	
2.00	20.00	113.00	1.00	11.00	14.58	-11.61	4.50	
2.00	20.00	113.00	2.00	11.00	14.21	-11.31	4.43	
2.00	20.00	113.00	3.00	30.00	88.22	-69.65	2.36	
2.00	20.00	113.00	5.00	30.00	65.70	-77.33	5.92	
2.00	20.00	113.00	6.00	11.00	10.66	-12.51	10.14	
2.00	20.00	113.00	7.00	11.00	10.97	-12.87	10.37	

Abbildung 4.26: Spannungen &amp; Tsai-Wu, Ausgabedatei, Anfang

9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
-10.36	5.89	0.03	215.00	175.00	66.00	9.10	-6.26	-10.36	5.89
-4.98	3.78	0.01	215.00	175.00	66.00	16.27	-7.14	-1.15	3.00
-25.63	19.72	0.17	169.00	169.00	50.00	2.42	29.41	-0.33	18.71
-25.51	19.69	0.17	169.00	169.00	50.00	2.42	29.42	-0.26	18.67
-16.50	17.42	0.14	169.00	169.00	50.00	2.73	29.76	4.23	16.34
-16.38	17.39	0.14	169.00	169.00	50.00	2.74	29.77	4.29	16.31
-1.28	2.84	0.01	169.00	169.00	50.00	9.88	-0.59	9.23	-4.20
-1.24	2.76	0.01	169.00	169.00	50.00	10.17	-0.58	9.01	-4.07
-0.52	2.68	0.02	1250.00	40.00	50.00	11.62	-4.57	4.59	-3.93
-4.29	4.99	0.02	1250.00	40.00	50.00	9.78	3.91	-3.76	4.99
-8.60	5.11	0.01	169.00	169.00	50.00	8.94	0.51	-7.46	5.11
-8.86	5.23	0.01	169.00	169.00	50.00	8.71	0.52	-7.68	5.23
-15.41	2.83	0.03	215.00	175.00	66.00	11.75	-5.41	-14.57	-2.20
-9.04	5.73	0.04	215.00	175.00	66.00	8.39	-15.17	-4.55	5.48
-19.98	12.98	0.13	169.00	169.00	50.00	2.78	-3.52	-18.58	-17.24
-19.37	13.20	0.13	169.00	169.00	50.00	2.76	-3.70	-18.51	-17.44
-18.11	28.64	0.47	169.00	169.00	50.00	1.45	-115.80	1.13	1.88
-18.18	28.85	0.48	169.00	169.00	50.00	1.44	-116.71	1.02	1.91
-8.48	2.41	0.01	169.00	169.00	50.00	8.44	-6.24	-6.00	-5.64
-8.24	2.33	0.01	169.00	169.00	50.00	8.58	-6.10	-5.84	-5.55
-5.03	2.25	0.02	1250.00	40.00	50.00	0.97	-37.34	-3.77	-5.49
-3.85	4.03	0.02	1250.00	40.00	50.00	54.13	31.27	5.92	-1.02
-6.12	4.18	0.01	169.00	169.00	50.00	10.96	4.34	-2.70	4.18
-6.23	4.32	0.01	169.00	169.00	50.00	10.62	4.46	-2.78	4.32

Abbildung 4.26: Spannungen &amp; Tsai-Wu, Ausgabedatei, Fortsetzung

Weiterhin enthält die Ausgabedatei in Abbildung 4.26 zwei Zahlen im oberen linken Bereich, anhand deren der Anwender auf den ersten Blick erfahren kann, wie viele Lastfälle in der Ausgabedatei berücksichtigt worden sind und wie viele Zeilen es pro Lastfall ergab. Dem entsprechend weist die Ausgabedatei aus der Abbildung 4.26 zwei Lastfälle auf und enthält 12 Zeilen pro Lastfall.

Diese so geordnet aufgebaute Ausgabedatei kann problemlos in Excel zur weiteren Verarbeitung und Darstellung der Berechnungsergebnisse eingelesen werden.



## 4.4 Nachweis der Schraubverbindungen

In diesem Unterkapitel wird die Umsetzung, der in Kapitel 3 definierten Anforderungen zur Bestimmung der Kräfte an den Schraubverbindungsknoten behandelt. Dabei fällt die Betrachtung nicht nur auf einzelne Schraubverbindungen, sondern auf alle durch Schraubverbindungen miteinander verbundenen Baugruppen einer Waschraumeinheit.

Bevor jedoch mit der Beschreibung der Konzeptfindungsphase begonnen werden kann, soll anhand der folgenden Abbildung 4.27 die Modellierung solcher Schraubverbindungen erläutert werden.

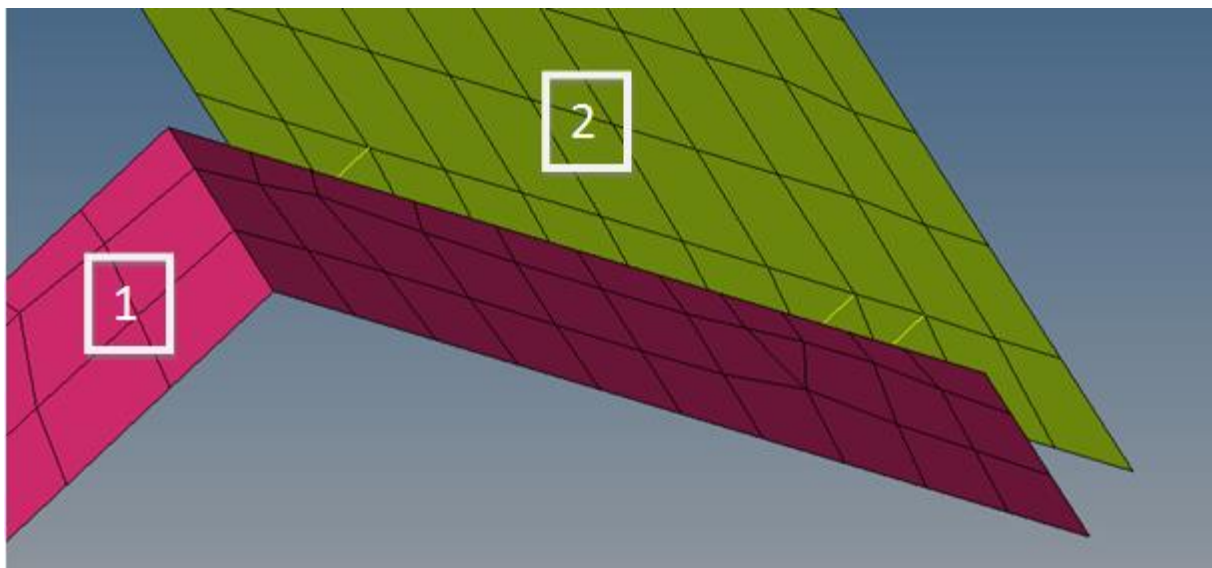


Abbildung 4.27: Schraubverbindung zweier Baugruppen

Eine der gängigsten Möglichkeiten der Berechnung einer Schraubverbindung bei der FEM-Modellierung basiert auf der Verwendung von Federelementen. Dabei erstellt der Berechnungsingenieur an der Verschraubungsstelle zweier Komponenten drei Federelemente mit unterschiedlichen Wirkrichtungen. Diese drei einzelnen Federelemente werden in globale X-Y- und Z-Richtung, deren Steifigkeiten durchaus unterschiedlich sein können, definiert. Das Resultat dieser Aktivität wird beispielhaft anhand der in Abbildung 4.27 dargestellten Schraubverbindung zweier Baugruppen dargestellt. Wie dieser Abbildung entnommen werden kann, sind die darauf farbig und mit Zahlen gekennzeichneten Baugruppen durch drei einzelne Striche, die die Federelemente darstellen, verbunden. Pro Schraubverbindung, Strich im FEM-Modell, werden drei Federelemente erstellt. Da die zu einer Schraubverbindung zugehörigen Federelemente immer zwischen zwei Knoten erstellt werden, sieht es im Modellbild wie ein Strich aus. Im Wahren sind an dieser Stelle drei unterschiedliche Federelemente modelliert.

Am Ende der Einführung soll die Anforderung des dritten Kapitels zur Bestimmung der Schnittkräfte erneut konkretisiert werden. Wie im Modellbild aus Abbildung 4.27 bereits ersichtlich ist, kann die Bestimmung der Schnittkräfte nur an Modellknoten erfolgen. Da ein Federelement immer zwischen zwei Knoten aufgebaut wird, soll der Anwender definieren können, an welcher Baugruppe die Verbindungsknoten analysiert werden sollen.

Anhand der an den Verbindungsknoten ermittelten Schnittkräfte kann ein Berechnungsingenieur, unter Kenntnis der zulässigen Kräfte, die Bildung der Sicherheitsfaktoren vornehmen und somit eine Aussage über das Versagensverhalten jeder einzelnen Schraubverbindung treffen.

An dieser Stelle wird mit der eigentlichen Konzeptfindung begonnen. Im Verlauf der Konzeptfindung werden erneut zwei Mind-Map-Diagramme aus dem Brainstorming zu dem Layout und der Funktionsweise der Benutzeroberfläche sowie der Bestimmung der gesuchten Werte und Erstellung der endgültigen Text-Datei erarbeitet.

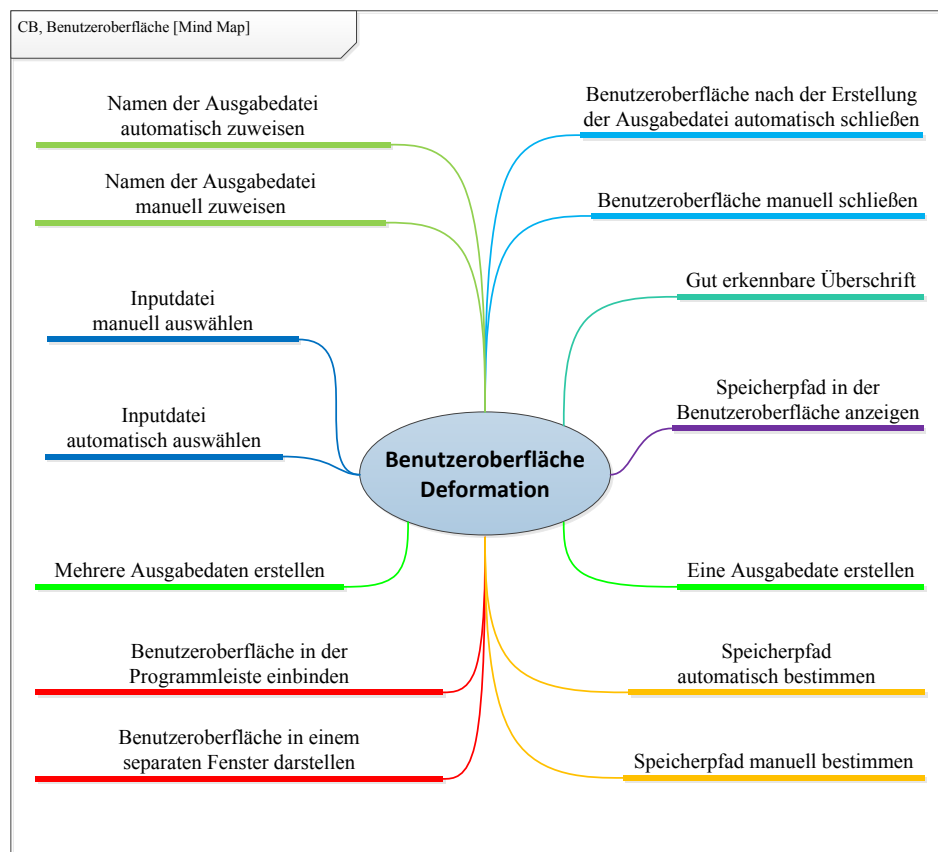


Abbildung 4.28: Schraubverbindungen, Mind-Map-Diagramm, Benutzeroberfläche

In Abbildung 4.28 sind Anforderungen anhand eines Mind-Map-Diagramms an Benutzeroberfläche zusammengefasst dargestellt. Einige der darauf abgebildeten Anforderungen sind eindeutig definiert und bereits aus den vorherigen Unterkapiteln bekannt. Dazu gehören: gut erkennbare Überschrift des betroffenen Makros sowie die Angabe des Speicherpfades. Alle weiteren an Benutzeroberfläche gestellten Anforderungen weisen einen alternativen Umsetzungsweg auf und müssen anhand einer Bewertungsmatrix zwecks der Ermittlung des besseren Lösungsweges analysiert werden. Dazu werden zunächst die strittigen Anforderungen in zwei, in folgender Abbildung 4.29 dargestellte, Alternativkonzepte zusammengefasst.

	Alternativkonzept A	Alternativkonzept B
<i>Position von GUI</i>	In der Programmleiste	In dem separaten Fenster
<i>Speicherpfadbestimmung</i>	Automatisch	Manuell
<i>GUI schließen</i>	Automatisch	Manuell
<i>Ausgabedateibezeichnung</i>	Automatisch	Manuell
<i>Inputdatei auswählen</i>	Automatisch	Manuell
<i>Anzahl der Ausgabedateien</i>	Eine	Mehrere

Abbildung 4.29: Schraubverbindungen, Alternativkonzepte, Benutzeroberfläche

Demzufolge sollen im Alternativkonzept A die Bestimmung des Speicherpfades sowie Festlegung der Ausgabedateibezeichnung automatisch erfolgen. Die zu erstellende Benutzeroberfläche soll direkt in der Programmleiste von HyperWorks eingebunden werden.

Die Beendigung der Benutzeroberfläche soll ebenfalls automatisch nach der Erstellung der Ausgabedatei erfolgen.

Wie der aufmerksame Leser sich vorstellen kann, müssen bei der statischen Nachweisführung der Schraubverbindungen gesamter Waschraumeinheit mehrere Ausgabedateien erstellt werden. Eine für zwei zu verbindenden Baugruppen. Das Alternativkonzept A schlägt vor, jeweils eine Ausgabedatei pro zwei, in der Benutzeroberfläche eingegebenen, Baugruppen in einem Makro-Durchlauf zu erstellen. Sollen die Schraubverbindungen zweier weiteren Baugruppen ausgewertet werden, so müssen diese erneut in der Benutzeroberfläche eingetragen und die Prozedur erneut gestartet werden. Als letzte, in den Alternativkonzept A aufgenommene, Anforderung an Benutzeroberfläche, ist die Auswahl der Inputdatei.

Mit Hilfe dieser Inputdatei kann eine im Kapitel 3 definierte Anforderung an Berechnungsprozedur zur Angabe der Steifigkeiten verwendeter Federelemente umgesetzt werden. Wie bereits bekannt, werden nicht alle Modellinformationen nach der Berechnung an die Ergebnisdatei weitergeleitet. Darunter auch die Informationen über die, in den Federelementen verwendeten, Steifigkeiten. Da diese in der Ausgabedatei vorhanden sein müssen, führt kein Weg daran vorbei, die Steifigkeiten an das Makro über eine Text-Datei zu übergeben. Das Alternativkonzept A basiert auf der automatischen Findung der Inputdatei und Übergabe des dazugehörigen Speicherpfades einer global deklarierten Variable.

Das Alternativkonzept B aus Abbildung 4.29 beseitigt diese Problematik auf dem manuellen Weg. Dabei soll der Anwender die in einem bestimmten Verzeichnis abgelegte Inputdatei manuell selektieren und laden können. Bei der Anforderung zur Definition der Anzahl zu erstellender Ausgabedateien, schlägt das Alternativkonzept B vor, in einem Prozedurdurchlauf mehrere Ausgabedateien zu erstellen. Die Bestimmung des Speicherpfades sowie die Festlegung der Ausgabedateibezeichnung sollen manuell erfolgen. Die zu erstellende Benutzeroberfläche soll im eigenen Fenster erscheinen und nach dem alle Ausgabedateien erstellt sind, automatisch geschlossen werden.

Nachdem alle Anforderungen an Benutzeroberfläche, die auf mehreren Wegen umgesetzt werden können, in Alternativkonzepten zusammengefasst sind, kann deren Analyse anhand der, in folgender Abbildung 4.30 dargestellten, Bewertungsmatrix erfolgen.

Ziel	Gewichtungs- faktor	Alternativkonzept A		Alternativkonzept B	
		n	n*g	n	n*g
Position von GUI	10	7	70	3	30
Speicherpfad- bestimmung	10	8	80	6	60
GUI schließen	10	3	30	5	50
Ausgabedatei- bezeichnung	10	9	90	1	10
Inputdatei auswählen	10	5	50	8	80
Anzahl der Ausgabedateien	10	3	30	8	80
<b>Summe</b>	60	350		310	

Abbildung 4.30: Schraubverbindungen, Bewertungsmatrix, Benutzeroberfläche

Bei der Analyse der in die Bewertungsmatrix aufgenommenen Anforderungen in Abbildung 4.30 werden diese zunächst mit einem Gewichtungsfaktor versehen. Wegen der identischen Wichtigkeit der Anforderungen kriegen diese in der Spalte „Gewichtungsfaktor“ denselben Gewichtungswert. Nach Vorgabe der Note und Multiplikation dieser mit den jeweiligen Gewichtungsfaktoren werden die Ergebnisse, die sogenannten Teilzielführungen, in die konzeptbezogene Spalten „n\*g“ eingetragen. An dieser Stelle ist die zu realisierende Anforderung des jeweiligen Zieles eindeutig bestimmt und ist in Abbildung 4.30 mit grüner Hintergrundfarbe hervorgehoben.

Außer den zuvor eindeutig definierten Anforderungen wird demzufolge von der Benutzeroberfläche erwartet, dass diese nach dem Aufruf direkt in der Programmleiste von HyperView erstellt wird. Sofort nach dem Aufbau der Benutzeroberfläche soll eine Prozedur zur automatischen Speicherpfadbestimmung gestartet werden, um eine zeitgleiche Darstellung des ermittelten Speicherpfades in der Benutzeroberfläche gewährleisten zu können.

Bei der Anzahl der, in einem Makro-Durchlauf zu erstellenden, Ausgabedateien gewann mit einem deutlichen Vorsprung das Alternativkonzept B. Dementsprechend soll die Benutzeroberfläche die Möglichkeit bieten, mehrere Baugruppen definieren zu können, zwischen denen die Analyse der Schraubverbindungen betrieben werden soll.

Die Bezeichnung der am Ende der Prozedur erstellten Ausgabedateien soll automatisch erfolgen. Dem ableitend entstand eine Anforderung an einem einheitlichen Bezeichnungsmuster, das nach einer Meinungsumfrage wie folgt definiert wurde: „CB\_10\_20“. Dabei wird „CB“ als Abkürzung für den Nachweis der Schraubverbindungen verwendet und die beiden folgenden Zahlen geben an, zwischen welchen Baugruppen die betroffene Analyse erfolgte.

Die Auswahl einer Inputdatei soll manuell erfolgen. Dadurch bekommt der Anwender etwas mehr Freiheit bei der Bestimmung des Ablageortes solcher Inputdateien und ist nicht immer auf

das Modellverzeichnis fokussiert. Das Beenden der Benutzeroberfläche soll ebenfalls manuell erfolgen.

An dieser Stelle gilt die Betrachtung der an Benutzeroberfläche gestellten Anforderungen als abgeschlossen und es kann eine identische Analyse zur Bestimmung der gesuchten Werte und Erstellung der Ausgabedateien erfolgen. Zu diesem Zweck wurde erneut ein Brainstorming durchgeführt, dessen Ergebnisse in einem in Abbildung 4.31 dargestellten Mind-Map-Diagramm festgehalten sind.

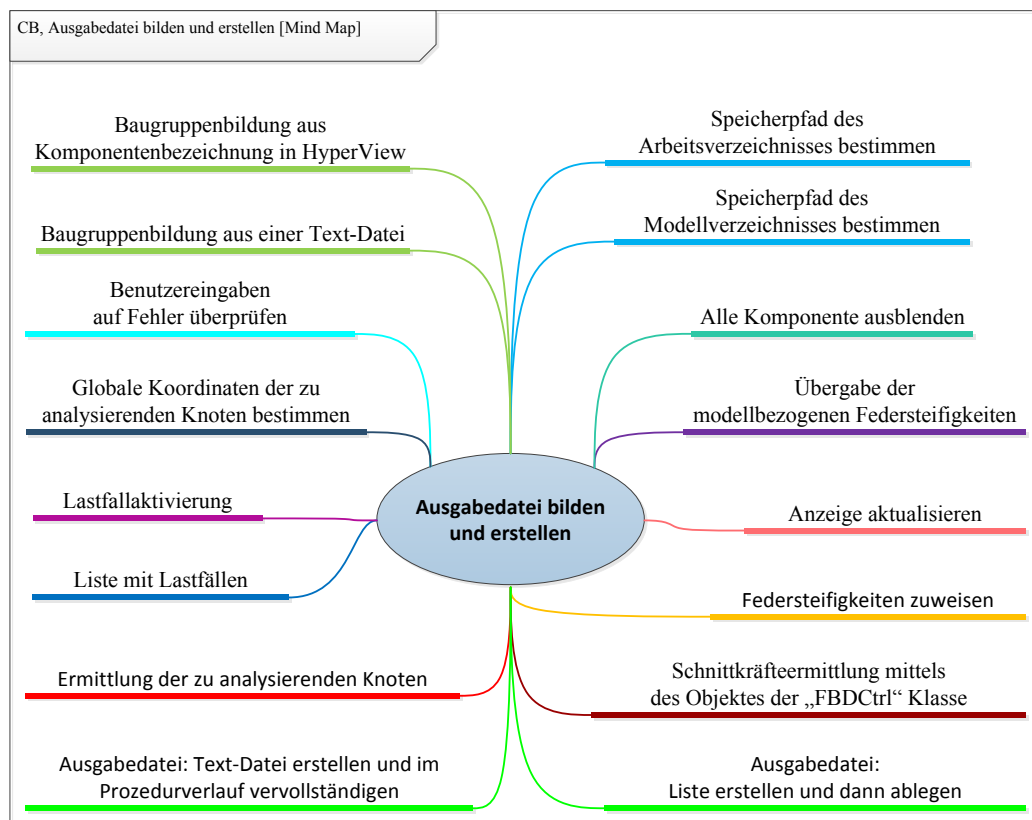


Abbildung 4.31: Schraubverbindungen, Mind-Map-Diagramm, Ausgabedatei bilden und erstellen

Die meisten, der in das Mind-Map-Diagramm aus Abbildung 4.31 aufgenommenen, Anforderungen an die Berechnungsprozedur sind erneut eindeutig definiert. Diese Verhaltensweise ist auf die beschränkte Darstellungsmöglichkeiten der Berechnungsergebnisse in den FEM-Programmen zurückzuführen. Aus diesem Grund weist die Ermittlung der gesuchten Werte in den meisten Fällen keinen alternativen Weg auf. So auch bei der Bestimmung der Schnittkräfte. Es gibt zurzeit nur einen Weg, wie diese Kräfte mittels des Post-Processor-Programms HyperView ermittelt werden können. Diese Thematik wird an einer später folgenden Stelle genauer aufgegriffen. Zunächst sollen Anforderungen, die einen alternativen Lösungsweg aufweisen, behandelt werden. Dazu zählen: die Bildung der Baugruppe, Erstellung der Ausgabedatei sowie die automatische Festlegung des Speicherpfades.

Da diese Anforderungen bereits in den vorherigen Unterkapitel ausführlich analysiert wurden, werden die darin definierte Lösungsweg für die Umsetzung in dem aktuellen Makro verwendet.

Zu den eindeutig definierten Anforderungen an des Berechnungsteils gehören unter anderem die Bekanntgabe der im Modell definierten Federsteifigkeiten sowie die Überprüfung der benutzerdefinierten Eingabe der Baugruppen.

Ausgehend von der Tatsache, dass bei einer Schraubverbindung die Federelemente zwischen zwei Knoten unterschiedlicher Baugruppen erstellt werden und die Ermittlung der Schnittkräfte nur an Knoten einer der dazugehörigen Baugruppe stattfindet, soll das Makro in der Lage sein, anhand der in Benutzeroberfläche eingegebener Baugruppen, die zu analysierenden Knoten ermitteln zu können.

Des Weiteren soll das Makro in der Lage sein, die globale Koordinate der zuvor gefundenen Knoten zu bestimmen und an einer geeigneten Stelle zusammen mit den daran definierten Federelementsteifigkeiten in der Ausgabedatei zu vermerken.

Wegen der fehlenden Alternative, soll der Zugriff auf die Schnittkräfte mittels des Objektes der „*FBDCtrl*“ Klasse erfolgen. Dieses Objekt bietet den vollen Zugriff auf das in dem Post-Prozessor-Programm HyperView vorhandenes Tool mit der Bezeichnung „*FBD*“, mit dessen Hilfe knotenbezogene Schnittkräfte ermittelt werden können.

Die Ermittlung gesuchter Werte muss für jeden im Modell vorhandenen Lastfall erfolgen. Aus diesem Grund soll das Makro in der Lage sein, eine Liste mit allen Lastfällen zu erstellen und diese bei der Kräftebestimmung einzeln zu aktivieren.

Die letzten beiden Anforderungen aus dem in Abbildung 4.31 dargestellten Mind-Map-Diagramm beschäftigen sich mit dem Ausblenden aller im Modell vorhandenen Komponenten und Aktualisierung der Anzeige.

An dieser Stelle sind alle relevanten Anforderungen vollständig aufgestellt und es kann mit der Beschreibung des, aus den Anforderungen hergeleiteten Makros, begonnen werden. Beendet wird dieses Unterkapitel mit der Darstellung und Beschreibung einer beispielhaften Ausgabedatei.

Nach der bereits bekannten Vorgehensweise beginnt die Beschreibung, der im Makro vorhandener Prozeduren, mit dem Aufbau und Funktionen der Benutzeroberfläche. Das dazugehörige Flussdiagramm 4 ist in Abbildung 4.32 graphisch dargestellt.

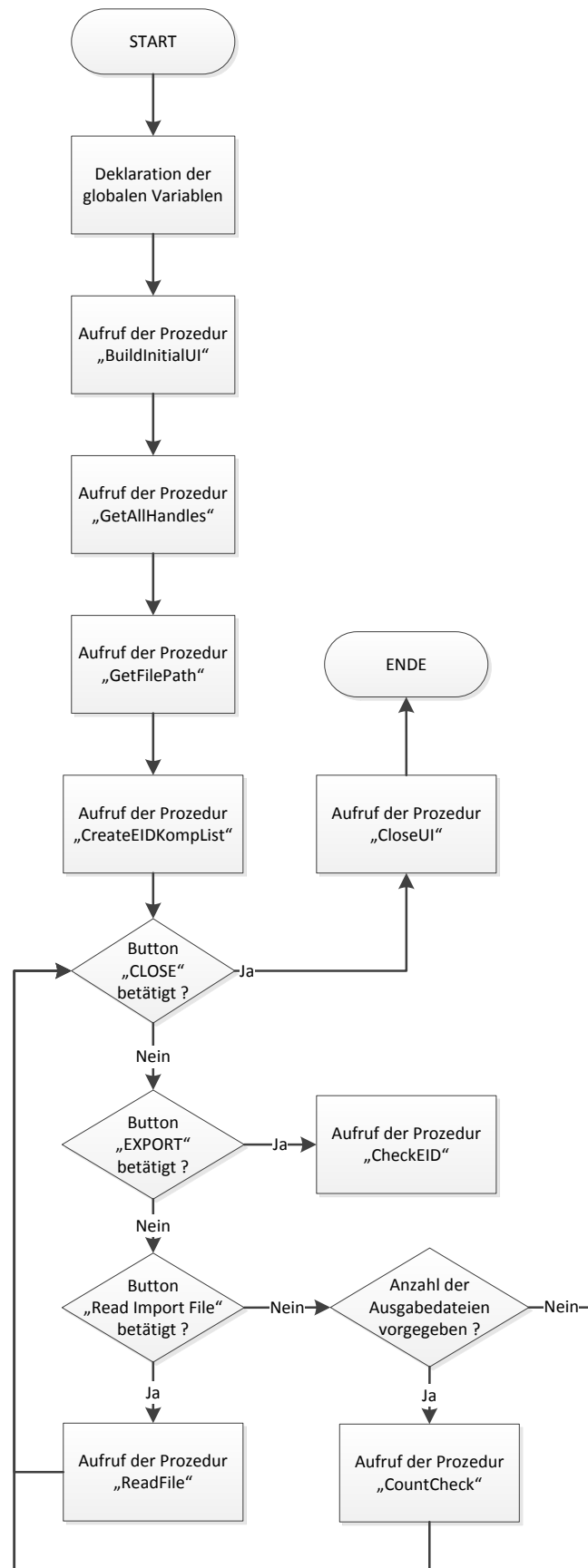


Abbildung 4.32: Schraubverbindungen, Flussdiagramm 4, Aufbau und Aktivitäten der Benutzeroberfläche

Wie dem Flussdiagramm 4 in Abbildung 4.32 entnommen werden kann, erfolgt sofort nach dem Aufruf des Makros Deklaration der globalen Variablen. In dem nachfolgenden Schritt wird die Prozedur namens „*BuildInitialUt*“ aufgerufen. Mittels dieser Prozedur wird die Benutzeroberfläche aufgebaut und in der Programmleiste von HyperView eingebunden. Das Ergebnis dieser Prozedur ist in etwas weitergreifender Form in Abbildung 4.33 graphisch dargestellt.

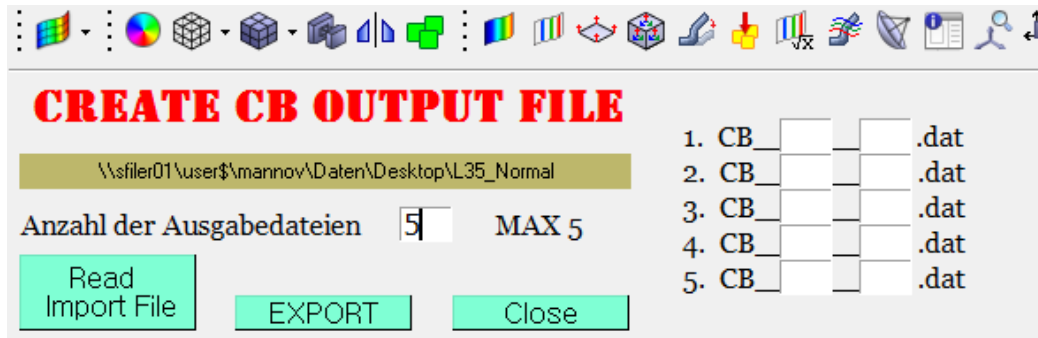


Abbildung 4.33: Schraubverbindungen, Benutzeroberfläche

Die Ermittlung gesuchter Werte und die damit verbundenen Prozedurschritte basieren auf dem Zugriff programmspezifischer Objekte. Die meisten davon werden bereits am Anfang des Makros, für den späteren Zugriff, global deklariert. Die zu diesem Zweck erstellte Prozedur besitzt die Bezeichnung „*GetAllHandles*“ und wird sofort nach der Aufstellung der Benutzeroberfläche aufgerufen.

Nach Deklaration der globalen Objekte werden zwei weitere Prozeduren mit den Bezeichnungen „*GetFilePact*“ und „*CreateEIDKompList*“ nacheinander aufgerufen. Mittels der bereits bekannten Prozedur „*GetFilePact*“ wird der Speicherpfad des Modellverzeichnisses ermittelt und der Benutzeroberfläche zur Darstellung übermittelt. Mit Hilfe der Prozedur „*CreateEIDKompList*“ werden zwei, für das Makro relevante, Listen erstellt. Die eine von den global deklarierten Listen beinhaltet Bezeichnungen aller im Modell vorhandenen zwei dimensional Baugruppen. Die andere Liste besitzt die ID-Nummern der dazugehörigen Modellkomponente.

Wie dem Flussdiagramm 4 aus Abbildung 4.32 entnommen werden kann, gilt die Benutzeroberfläche nach der ausgeführten Prozedur „*CreateEIDKompList*“ als vollständig aufgebaut. Alle weiteren Prozeduren werden mittels Anwenderaktivität aufgerufen.

Die Beschreibung der in die Benutzeroberfläche gesetzter Funktionalitäten beginnt zunächst mit den drei darauf platzierten Buttons. Im Fall eines Klicks auf den Button „*Close*“ in der Benutzeroberfläche in Abbildung 4.33 wird die Prozedur namens „*CloseUt*“ aufgerufen. Mit Hilfe dieser Prozedur wird die Benutzeroberfläche geschlossen und alle zuvor deklarierten Variablen und Objekten zu vernichten.

Bevor mit der eigentlichen Ermittlung der gesuchten Werte und Erstellung der Ausgabedateien begonnen werden kann, müssen die Inputdatei geladen und die Baugruppen eingegeben werden. Das Laden der Inputdatei erfolgt durch den Klick auf den Button „*Read Import File*“. Dabei wird



die Prozedur mit der Bezeichnung „*ReadFile*“ aufgerufen, die alle in der Inputdatei vorhandenen Werte einer global deklarierten Matrix übergibt.

Der Aufbau solcher Inputdateien ist mittels folgender Abbildung 4.34 dargestellt. Wie dieser Abbildung entnommen werden kann, ist die Inputdatei aus drei Spalten aufgebaut. Die erste Spalte beinhaltet die ID-Nummer aller in Modell vorhandenen Federelemente. In der zweiten Spalte erfolgt die Angabe, der zu einem Federelement zugehörigen Steifigkeit. Mittels der dritten Spalte kann die Wirkrichtung des jeweiligen Federelementes ermittelt werden. Dabei werden die Zahlen eins und zwei den Wirkrichtungen X und Y sowie die Zahl drei der Wirkrichtung Z zugeordnet.

```
72810;1000;1  
72813;1000;1  
72816;1000;1  
72819;1000;2  
72822;1000;2  
72825;1000;2  
75570;1000;3  
75573;1000;3  
75576;1000;3
```

Abbildung 4.34: Schraubverbindungen, Inputdatei

Bei der Erstellung solcher Inputdateien wird wieder ein großer Wert auf Automatisierung gelegt. Aus diesem Grund wird ein weiteres Makro entwickelt, das aus dem Prä-Prozessor Programm HyperMesh vollautomatisch die gewünschten Inputdateien erstellt und in einem benutzerdefinierten Verzeichnis ablegt.

Bevor die Eingabe der Baugruppen erfolgen kann, wird der Anwender von der Benutzeroberfläche aufgefordert die Anzahl der zu erstellenden Ausgabedateien einzugeben. Aus Performancegründen fiel die Entscheidung die Anzahl der in einem Makro-Durchlauf zu erstellenden Ausgabedateien auf maximal fünf zu begrenzen. Sobald eine Zahl zwischen eins und fünf eingegeben wird, erfolgt der Aufruf einer Prozedur „*CountCheck*“. Diese Prozedur hat die Aufgabe benutzerdefinierte Eingaben zu kontrollieren und gegebenenfalls zu korrigieren. Des Weiteren wird mittels dieser Prozedur eine weitere Prozedur aufgerufen, die die Bezeichnung „*CreateNewMenuElems*“ trägt und weitere GUI-Elemente erstellt, mit deren Hilfe die zuvor angesprochenen Baugruppen eingegeben werden können. Diese Angabefelder sind deutlich in Abbildung 4.33 hervorgerufen.

Nachdem alle vorbereitenden Schritte erfolgt sind, kann mit der Ermittlung der gesuchten Werte und Erstellung der Ausgabedateien begonnen werden. Zu diesem Zweck muss der Button „*EXPORT*“ betätigt werden. Wie dem Flussdiagramm 4 in Abbildung 4.32 entnommen werden kann, bezwingt ein Klick auf den „*EXPORT*“ Button den Aufruf der Prozedur mit der Bezeichnung „*CheckEID*“. Die darin vorhandenen Prozedurschritte werden anhand des, sich im Anhang A.4.1 befindenden, Flussdiagramms dargestellt.

Die wesentliche Aufgabe der Prozedur „*CheckEID*“ besteht darin, die benutzerdefinierten Eingaben der Baugruppen auf Sinnhaftigkeit zu überprüfen. Dazu dienen, wie dem zugehörigen Flussdiagramm entnommen werden kann, drei Fallunterscheidungen. Mit Hilfe dieser Fallunterscheidungen wird zunächst überprüft, ob die benutzerdefinierte Eingabe lückenhaft was. Trifft es zu, so wird die Prozedur verlassen und der Anwender aufgefordert die Eingaben zu

vervollständigen. Erfolgte die Eingabe vollständig, wird die zweite Fallunterscheidung aktiv. Das Ziel der zweiten Fallunterscheidung ist zu überprüfen, ob die eingegebenen Baugruppen mit denen aus der Ergebnisdatei übereinstimmen. Wird diese Prüfung bestanden, erfolgt anhand der letzten Fallunterscheidung eine Überprüfung der beiden zu verschraubenden Baugruppen. Wie bereits erwähnt, ist die Verschraubung einen und derselben Baugruppe nicht möglich und wird mit Hilfe der letzten Fallunterscheidung herausgefiltert.

Werden tatsächlich alle Prüfungen bestanden, so wird eine Prozedur namens „*CreateNodeIdListFBDTool*“ aufgerufen, die die weiteren Schritte zu Ermittlung gesuchter Werte und Erstellung der Ausgabedateien einleitet. Diese Prozedur wird für jede in der Benutzeroberfläche definierte Ausgabedatei aufgerufen. Die darin vorhandenen Prozedurschritte sind in dem Flussdiagramm dargestellt, das sich im Anhang A.4.2 befindet.

Mit Hilfe der Prozedur „*CreateNodeIdListFBDTool*“ wird eine global deklarierte Liste, die die ID-Nummer der zu analysierenden Knoten enthält, erstellt. Da bei der Bestimmung der Schnittkräfte nur eine der zu verbindenden Baugruppen in Frage kommt, wird definitionsgemäß die erste aus den beiden, in der Benutzeroberfläche definierten, Baugruppen verwendet. Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Bestimmung der zu analysierenden Knoten anhand der einzelnen Schritte des dazugehörigen Flussdiagramms erläutert. Zur besseren Verständnis werden die Ergebnisse einiger Prozedurschritte graphisch dargestellt.

Sofort nach dem Aufruf der Prozedur „*CreateNodeIdListFBDTool*“ werden die Komponenten-IDs der zweiten Baugruppe bestimmt, die komplette Waschraumeinheit ausgeblendet und nur die Komponente der zweiten Baugruppe wieder eingeblendet. Um die an der zweiten Baugruppe anliegenden Federelemente bestimmen zu können, wird zunächst ein Elementen-SET erstellt und mit allen Elementen, die mit der zweiten Baugruppe in Berührung kommen, befüllt. Im nächsten Schritt wird das zuvor erstellte Elementen-SET eingeblendet. Das Ergebnis dieses Zwischenschrittes wird anhand der folgenden Abbildung 4.35 dargestellt.

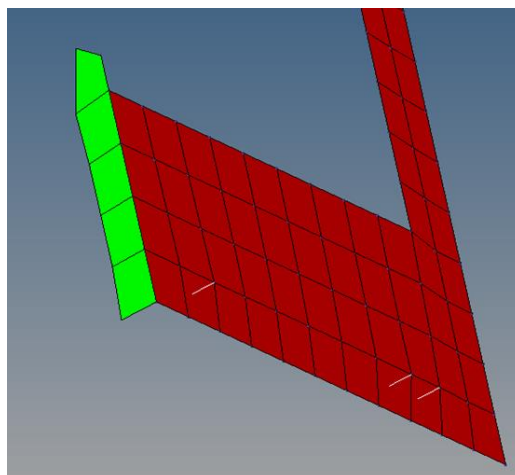


Abbildung 4.35: Prozedur „*CreateNodeIdListFBDTool*“. Zweite Baugruppe und die anliegenden Elemente

Wie der aufmerksame Leser anhand der Abbildung 4.35 bereits gemerkt hat, handelt es sich bei der dargestellten Baugruppe um die zweite Baugruppe der, in Abbildung 4.27 dargestellten, Schraubverbindung.

Nachdem alle an der zweiten Baugruppe anliegenden Federelemente angezeigt sind, wird im nächsten Schritt ein weiteres Elementen-SET erstellt, dem die dargestellten Federelemente zugewiesen werden.

Bei der Findung der durch die beiden Baugruppen eingeschlossenen Federelemente werden die zuvor beschriebenen Schritte für die erste Baugruppe wiederholt. Dabei werde zunächst die Komponenten, die der ersten Baugruppe angehören bestimmt und eingeblendet. Mittels der aktuellen Darstellung werden erneut die anliegenden Elemente dem neu erstellten Elementen-SET zugewiesen. Das Ergebnis dieses Zwischenschrittes wird nach dem einblenden des neu erstellten Elementen-SETs in Abbildung 4.36 graphisch dargestellt.

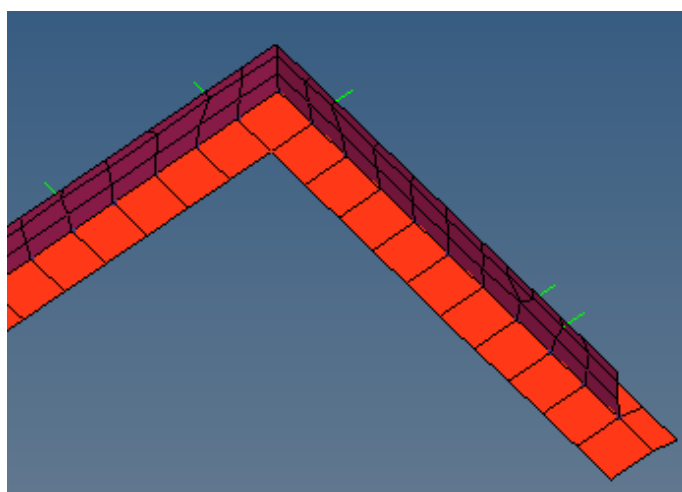


Abbildung 4.36: Prozedur „*CreateNodeIdListFBDTool*“. Erste Baugruppe und die anliegenden Elemente

Im nächsten Schritt werden mittels der in Abbildung 4.36 dargestellten Elemente die angezeigten Federelemente in das neue Elementen-SET übertragen.

An dieser Stelle sind die beiden Elementen-SETs mit den an zuvor betrachteten Baugruppen anliegenden Federelementen erstellt und es kann mit der Suche nach gemeinsamen Federelementen begonnen werden. Bei der Findung der gemeinsamen Federelemente werden zunächst zwei Listen erstellt. Diesen Listen werden die ID-Nummer der in beiden Elementen-SETs vorhandene Federelemente zugewiesen. Nach dem Vergleich der beiden Listen untereinander wird im folgenden Prozedurschritt eine Liste erstellt, die die gemeinsamen ID-Nummer der Federelemente beinhaltet.

Nun können die zu analysierenden Knoten eindeutig bestimmt werden. Dazu werden zwei Knotenlisten verglichen und übereinstimmenden Knoten in eine separate global deklarierte Liste übertragen. Die erste für den Vergleich herangezogene Knotenliste wird aus dem Knoten-SET der ersten Baugruppe erstellt. Die zweite Knotenliste beinhaltet alle Knoten, zwischen denen die gemeinsamen Federelemente aufgebaut sind.

Dadurch wird gewährleistet, dass nur die Knoten zur weiteren Ermittlung der gesuchten Werte herangezogen werden, die zugleich an den gemeinsamen Federelementen und den Elementen der ersten Baugruppe anliegen.

Nachdem eine global deklarierte Liste vollständig mit zu analysierenden Knoten aufgebaut ist, erfolgt in den letzten Schritten der Prozedur „*CreateNodeIdListFBDTool*“ die Entfernung aller

zuvor erstellten „*SETS*“ und der Aufruf folgender Prozeduren: „*CreateHeader*“, „*CrossSection*“ sowie „*CreateExportFile*“.

Während die Prozedur „*CreateExportFile*“, die für die Erstellung der endgültigen Ausgabedatei zuständig ist und bereits in den vorhergehenden Unterkapiteln ausführlich behandelt wurde, erfolgt die Betrachtung der Prozeduren „*CreateHeader*“ und „*CrossSection*“ mittels der zugehörigen Flussdiagramme im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels.

Die im Flussdiagramm aus dem Anhang A.4.3 dargestellte Prozedur „*CreateHeader*“ beschäftigt sich mit dem ersten Teil der Ausgabedatei. Darin werden die Koordinaten der untersuchten Knoten sowie die Federsteifigkeiten der an diesen Knoten anliegenden Feder vermerkt.

Zur Bestimmung der globalen Koordinaten relevanter Knoten wird sofort nach dem Aufruf der Prozedur „*CreateHeader*“ ein Messwerkzeugobjekt vom Typ „Position“ erstellt. Dem erstellten Messwerkzeugobjekt wird der erste Knoten, aus der Liste zu analysierender Knoten, übergeben und die Anzeige aktualisiert. Nun wird die Position des gewählten Knotens angezeigt und kann somit den dafür deklarierten Variablen übergeben werden. Bei der Findung der Steifigkeiten der an dem aktuellen Knoten angreifenden Federelemente wird, wie im Flussdiagramm aus Anhang A.4.3 dargestellt, zunächst ein Elementen-SET erstellt, das alle Elemente, die an dem aktuellen Knoten angreifen, enthält. Im weiteren Schritt werden alle Einträge aus dem neu erstellten SET einer Liste übergeben. Anhand dieser Liste und der am Anfang dieses Unterkapitels erstellten Matrix wird eine eindeutige Zuweisung der an dem aktuellen Knoten angreifenden Feder und der zugehörigen Federsteifigkeit aus der Matrix durchgeführt.

Die somit ermittelten Koordinaten und Federsteifigkeiten werden geordnet einer global deklarierten Liste übergeben und die zuletzt beschriebenen Schritte für den nächsten zu analysierenden Knoten wiederholt.

Nun kann mit der eigentlichen Ermittlung der, an den zu analysierenden Knoten wirkenden, Schnittkräfte begonnen werden. Zu diesem Zweck wird zunächst bereits erwähnte Prozedur „*CrossSection*“, dessen Flussdiagramm sich im Anhang A.4.4 befindet, aufgerufen. Wie diesem Flussdiagramm entnommen werden kann, erfolgt sofort nach dem Aufruf dieser Prozedur die Erstellung eines Objektes der „*FBDCtrl*“ Klasse. In den weiteren Schritten wird mit Hilfe dieses Objektes in dem HyperView Tool „*FBD*“ eine sogenannte „*Section*“ erstellt und mit 2D-Elementen, die an den zu analysierenden Knoten angreifen, erweitert. Im letzten Prozedurschritt des im Anhang A.4.4 dargestellten Flussdiagramms wird die Prozedur mit der Bezeichnung „*GetForces*“ aufgerufen.

Die einzelnen, in der Prozedur „*GetForces*“ vorhandenen, Prozedurschritte werden mittels des Flussdiagramms aus dem Anhang A.4.5 beschrieben.

Die Prozedur „*GetForces*“ besitzt die Aufgabe, die Schnittkräfte der zu analysierenden Knoten graphisch darzustellen und diese geordnet der zuvor global deklarierten Liste zu übergeben. Zu diesem Zweck wird am Anfang dieser Prozedur der erste zu analysierende Knoten genommen und in die zuvor erstellte „*Section*“ eingefügt. Dieser Schritt bewirkt eine graphische Darstellung der an dem eingefügten Knoten vorhandener Schnittkräfte und ermöglicht dadurch den vollen Zugriff auf die angezeigten Werte. In den nächsten Prozedurschritten werden die einzelnen

Kraftkomponenten den dazugehörigen Variablen und folglich der global deklarierten Ausgabeliste übergeben. Die zuvor beschriebenen Schritte werden für jeden zu analysierenden Knoten und Lastfall durchgeführt.

Am Ende der Prozedur „*GetForces*“ sind alle zu ermittelnden Werte gefunden und in einer global deklarierten Liste geordnet zusammengestellt.

Die Betrachtung zur Umsetzung an das Makro gestellten Anforderungen gilt hiermit als abgeschlossen. Das Resultat wird mittels der in folgender Abbildung 4.37 dargestellten Ausgabedatei diskutiert.

7							
3							
100							
40							
	20807	74.2	-144.5	40.5	1000	1000	1000
	20810	249.2	-144.5	40.5	1000	1000	1000
	27130	274.2	-144.5	40.5	1000	1000	1000
	20807	201.61	6.77	-69.78			
	20810	172.43	31.94	27.02			
	27130	161.47	62.13	62.27			
	20807	19.73	12.87	-232.45			
	20810	15.75	34.27	100.27			
	27130	5.19	37.32	377.50			
	20807	-9.31	-6.07	109.70			
	20810	-7.43	-16.17	-47.32			
	27130	-2.45	-17.61	-178.15			
	20807	387.71	3.43	-104.64			
	20810	316.56	13.74	52.90			
	27130	290.13	22.87	88.71			
	20807	-258.47	-2.29	69.76			
	20810	-211.04	-9.16	-35.27			
	27130	-193.42	-15.25	-59.14			
	20807	67.20	2.26	-23.26			
	20810	57.48	10.65	9.01			
	27130	53.82	20.71	20.75			
	20807	2.22	1.45	-26.12			
	20810	1.77	3.85	11.27			
	27130	0.58	4.19	42.42			

Abbildung 4.37: Schraubverbindungen, Ausgabedatei

Wie der Abbildung 4.37 entnommen werden kann, beginnt die Ausgabedatei mit vier untereinander stehenden Zahlen. Die oberste Zahl gibt die Anzahl der in Ergebnisdatei betrachteten Lastfälle an. Die darauf folgende Zahl trägt die Information über die Anzahl der analysierten Knoten. Die beiden letzten Zahlen geben an, zwischen welchen Baugruppen (EID) die Schraubverbindungen analysiert wurden. Des Weiteren besteht diese Ausgabedatei aus acht weiteren Zeilenblöcken. Die erste Spalte aller in der Ausgabedatei vorhandener Zeilenblöcke beinhaltet die ID-Nummer der analysierten Knoten. Der erste Zeilenblock allein betrachtet stellt in den Spalten zwei bis vier, die X- Y- und Z-Koordinate des jeweiligen Knotens dar. In den drei folgenden Spalten des ersten Zeilenblocks werden die Federsteifigkeiten, der an dem jeweiligen Knoten anliegenden Federelemente angegeben. Alle folgenden Zeilenblöcke beinhalten die X- Y- und Z-Kraftkomponente der an dem jeweiligen Knoten vorhandenen Schnittkräfte.

## 4.5 Nachweis einer Verzapfungsverbindung

Dieses Kapitel beschreibt die Umsetzung der letzten im Kapitel 3 aufgezählten Anforderung. Dabei handelt es sich um den Nachweis der Verzapfungsverbindung, die auf Englisch als Mortise bezeichnet wird.

Die real vorkommende Verzapfungsverbindung ist in Abbildung 3.2 dargestellt, wird jedoch in der FE-Modellierung als Schnittlinie zweier sich berührenden Baugruppen mit den darauf resultierenden gemeinsamen Knoten realisiert und ist in Abbildung 4.38 dargestellt.

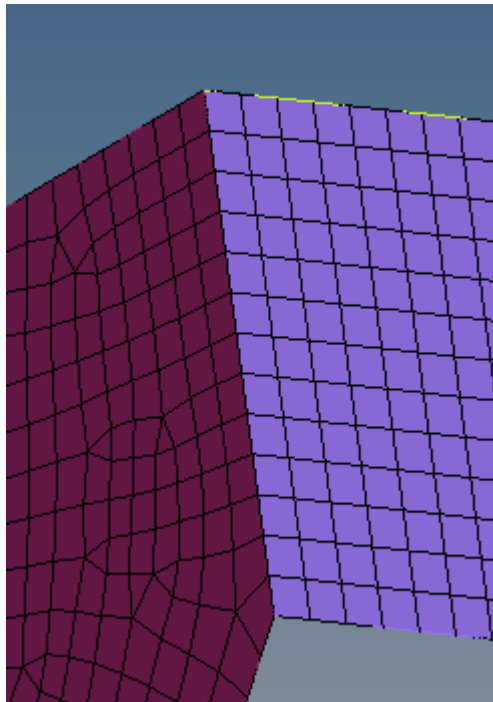


Abbildung 4.38: FE-Modell einer Verzapfungsverbindung

In Abbildung 4.38 sind zwei farbig hervorgehobene Baugruppen dargestellt. Im Schnittbereich sind Elemente und entsprechend gemeinsame Knoten zu erkennen. Die FEM-Berechnung basiert auf der Auswahl gemeinsamer Knoten beider Baugruppen, wobei wie bei der Schraubenberechnung nur eine der Baugruppen verwendet wird.

Zu diesem Zweck müssen die gemeinsamen Knoten ermittelt und eine der Baugruppen ausblendet werden. In der verbleibenden Baugruppe werden für jedes Element, jeweils an zwei sich an der Schnittlinie befindlichen Knoten, Schnittkräfte und –momente ermittelt. Diese Größen werden dann für jedes Element summiert und durch zwei geteilt. Somit ergibt sich eine auf den Abstand zwischen den Knoten bezogene Streckenbelastung.

Im nächsten Schritt muss der Berechnungsingenieur die in einem genormten Zugversuch ermittelten Größen mit den aus Kenntnis der Elementgröße und deren Anzahl in der berechneten Strecke sich ergebenden Streckenbelastungen verglichen und daraus ein Sicherheitsbeiwert ermitteln. Liegt dieser unter Eins, so hat die Verzapfung in dem berechneten Bereich versagt.

Nachdem am Anfang dieses Unterkapitels der Leser mit der bestehenden Problematik vertraut gemacht wurde, kann mit der Konzeptfindung begonnen werden.

Wie aus den vorhergehenden Unterkapiteln bereits bekannt ist, werden im Verlauf der Konzeptfindung zwei Mind-Map-Diagramme aus dem Brainstorming zu dem Layout und der Funktionsweise der Benutzeroberfläche sowie der Ermittlung der gesuchten Werte und Erstellung der endgültigen Text-Datei erarbeitet.

In Abbildung 4.39 sind Anforderungen an Benutzeroberfläche anhand eines Mind-Map-Diagramms zusammengefasst dargestellt.

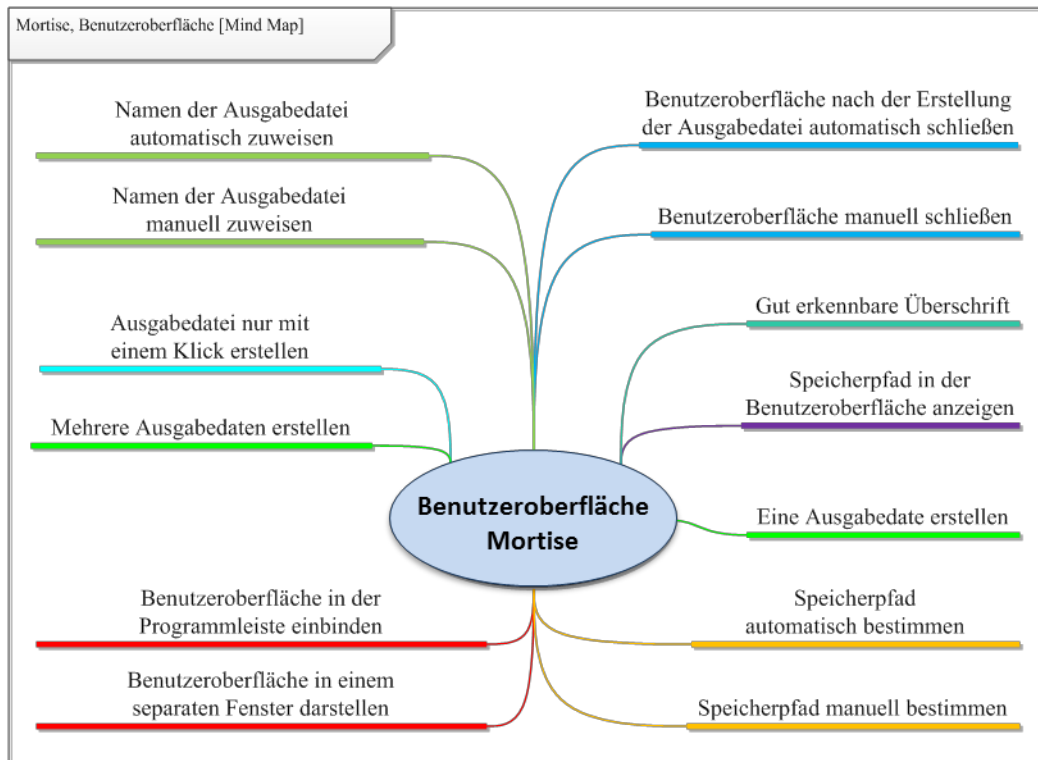


Abbildung 4.39: Verzäpfungsverbindung, Mind-Map-Diagramm, Benutzeroberfläche

Alle die in Abbildung 4.39 anhand eines Mind-Map-Diagramms dargestellten Anforderungen an Benutzeroberfläche, sind bereits in den vorhergehenden Unterkapiteln ausführlich diskutiert worden. Dementsprechend soll die zu erstellende Benutzeroberfläche eine gut erkennbare Überschrift sowie Speicherpfadangabe aufweisen. Der Speicherpfad soll ebenfalls, zwecks der Vereinheitlichung, automatisch bestimmt werden. Bei der Frage zu der Anzahl der in einem Makro-Durchlauf zu erstellenden Ausgabedateien fiel die Entscheidung wieder zu Gunsten mehrerer Ausgabedateien, die nach der vollständigen Definition verbundener Baugruppen mit nur einem Klick in der Benutzeroberfläche erstellt werden sollen. Die Bezeichnungen sollen ebenfalls automatisch den jeweiligen Ausgabedateien zugewiesen werden. Die letzten beiden Anforderungen an Benutzeroberfläche beschäftigen sich mit der Beendigung der Benutzeroberfläche und Löschung deren Entstehungsortes.

Dabei soll die Benutzeroberfläche erneut in die Programmleiste von HyperView eingebunden und nur manuell Beendet werden können.

An dieser Stelle sind alle an Benutzeroberfläche gestellten Anforderungen vollständig aufgebaut und es kann mit der Konzeptfindung und den damit verbundenen Anforderungen an die Berechnungsprozedur begonnen werden.

Das zu diesem Zwick in Abbildung 4.40 dargestellte Mind-Map-Diagramm enthält Anforderungen an Berechnungsprozedur, die mittel des durchgeführten Brainstormings ermittelt wurden.

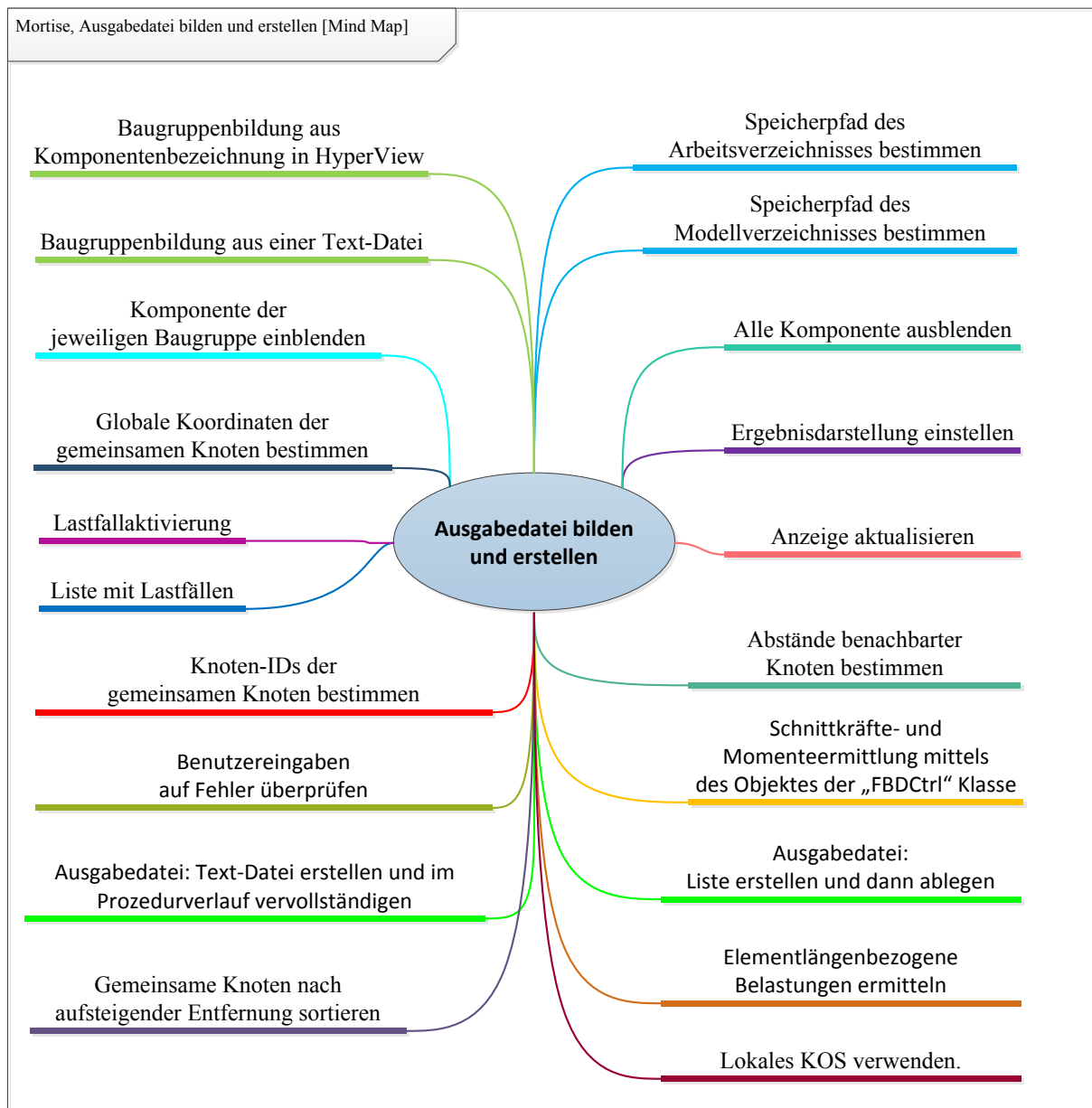


Abbildung 4.40: Verzafungsverbindung, Mind-Map-Diagramm, Ausgabedatei bilden und erstellen

Wie der Abbildung 4.40 entnommen werden kann, sind die darauf dargestellten Anforderungen an Berechnungsprozedur eindeutig definiert. Anforderungen, die auf mehreren Wegen umgesetzt werden können, wurden bereits in den vorherigen Unterkapiteln ausführlich behandelt und müssen nicht erneut anhand einer Bewertungsmatrix analysiert werden. Dazu zählen: automatische Speicherpfadbestimmung, Baugruppenbildung sowie Erstellung der Ausgabedateien.

Damit die Berechnungsprozedur sich an die Ermittlung der gesuchten Werte herantasten kann, muss sie einige grundlegende Anforderungen erfüllen. Zunächst soll das Makro eine Liste mit, in der Ergebnisdatei vorhandenen, Lastfällen aufstellen und deren Anzahl bestimmen. Weiterhin wird von dem Makro verlangt, dass es zwecks der Ermittlung baugruppenbezogener



Informationen, alle Modellkomponenten ausblenden und gewünschte Baugruppen wieder darstellen kann. Des Weiteren soll das Makro in der Lage sein die geforderte Ergebnisdarstellung zu aktivieren und die Anzeige zu aktualisieren.

Zur Bestimmung der in einer Verzäpfungsvorbindung herrschenden Kräfte und Momente soll das Makro als erstes die, zwischen den beiden verbundenen Baugruppen eingeschlossenen, Knoten ermittelt und auf eine besonderen Weise sortieren. Das Sortieren der zur Berechnung herangezogenen Knoten soll nicht nach der aufsteigenden Knoten-ID, sondern nach der aufsteigenden Entfernung erfolgen. Die so erstellte Liste mit zu analysierenden Knoten ermöglicht eine problemlose Analyse benachbarter Knoten eines Elementes.

Aus dem zuvor genannten Grund und der Tatsache, dass die Elementlage zwischen den benachbarten, zu analysierenden, Knoten einen wichtigen Beitrag zum Versagensnachweis leistet, soll das Makro die Koordinaten und Abstände der betrachteten Knoten ermitteln können.

Die Bestimmung der Schnittkräfte und –momente soll mittels des Objektes der „FBDCtrl“ Klasse unter Verwendung lokal erstellter Koordinatensysteme erfolgen. Die so ermittelten Größen müssen zum Schluss auf die, am Anfang dieses Unterkapitels erwähnten, Streckenbelastungen umgerechnet werden.

Als letzte Anforderung an die Berechnungsprozedur gilt die Überprüfung der benutzerdefinierter Eingabe. Dabei soll das Makro untersuchen, ob die von dem Anwender eingegebenen Baugruppen tatsächlich im Modell vorhanden und nicht identisch sind.

An dieser Stelle wurden alle relevanten Anforderungen vollständig aufgestellt und es kann mit der Beschreibung des, aus den Anforderungen hergeleiteten Makros begonnen werden. Beendet wird dieses Unterkapitel mit der Darstellung und Beschreibung einer beispielhaften Ausgabedatei.

Nach der bereits bekannten Vorgehensweise beginnt die Beschreibung, der im Makro vorhandener Prozeduren, mit dem Aufbau und Funktionen der Benutzeroberfläche. Das dazugehörige Flussdiagramm 5 ist in Abbildung 4.41 graphisch dargestellt.

Sofort nach dem Aufruf des Makros erfolgt, wie im Flussdiagramm 5 dargestellt, eine Deklaration der globalen Variablen. Nachdem alle für dieses Makro relevante globale Variablen deklariert sind, wird im nächsten Schritt die Prozedur mit der Bezeichnung „BuildInitialUI“ aufgerufen. Mittels dieser bereits bekannten Prozedur wird eine Benutzeroberfläche in der Programmleiste von HyperView erstellt.

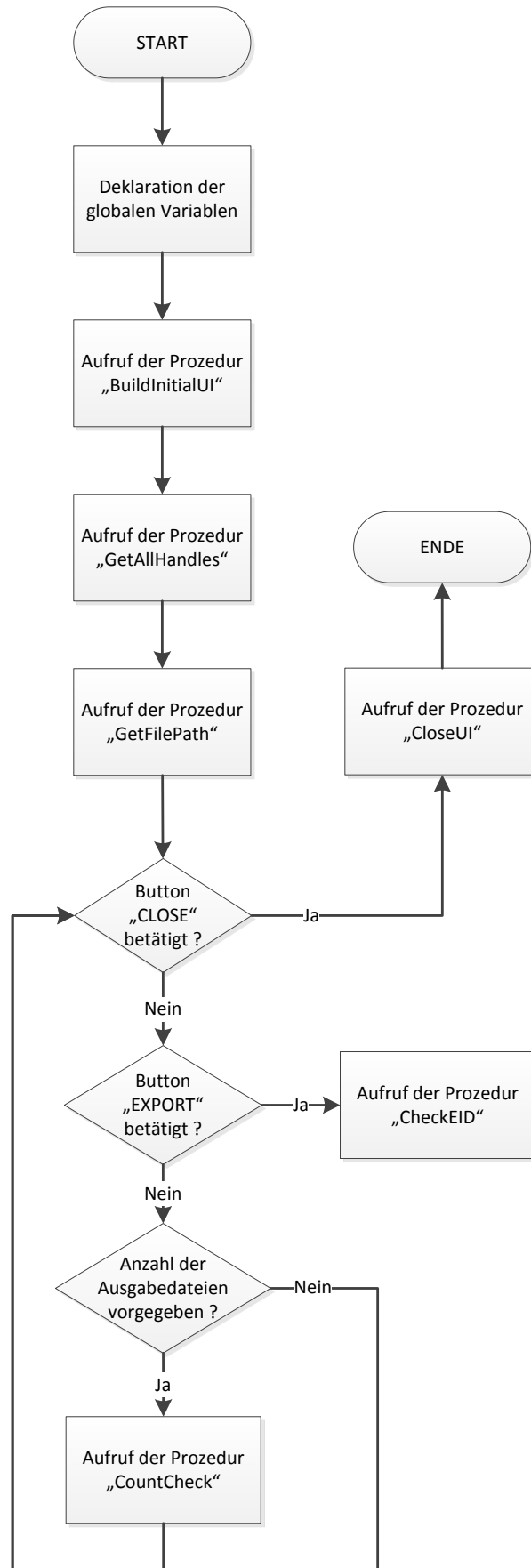


Abbildung 4.41: Verzapfungsverbindung, Flussdiagramm 5, Aufbau und Aktivitäten der Benutzeroberfläche

Das Resultat der Prozedur ist als erstellte Benutzeroberfläche in Abbildung 4.42 graphisch dargestellt.

Sofort nach der Prozedur „*BuildInitialUI*“ erfolgt im Flussdiagramm 5 in Abbildung 4.41 der Aufruf einer Prozedur namens „*GetAllHandles*“, mit deren Hilfe relevante programmspezifische Objekte global deklariert werden.

Nachdem alle programmspezifischen Objekte deklariert sind, wird im nächsten Schritt mittels der Prozedur „*GetFilePath*“ der Speicherpfad ermittelt und in der Benutzeroberfläche zur Sicht gebracht.

An dieser Stelle ist die Benutzeroberfläche vollständig aufgebaut. Alle weiteren im Flussdiagramm 5 dargestellten Prozeduren basieren auf Aktivität des Anwenders und werden mit Hilfe der in Abbildung 4.42 dargestellten Benutzeroberfläche beschrieben.

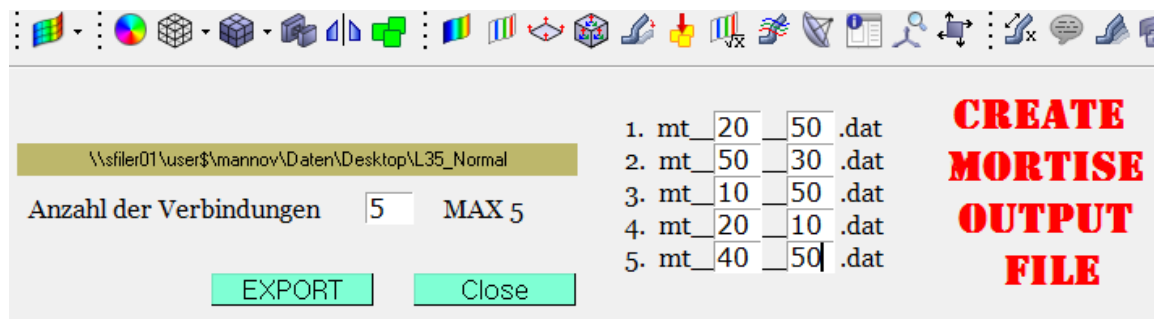


Abbildung 4.42: Verzapfungsverbindung, Benutzeroberfläche

Wird der Button „*Close*“ betätigt, erfolgt der Aufruf der Prozedur namens „*CloseUI*“. Mit Hilfe dieser Prozedur wird die Benutzeroberfläche geschlossen und alle zuvor deklarierten Variablen und Objekte zu vernichten.

Bevor mit der eigentlichen Ermittlung der gesuchten Werte und Erstellung der Ausgabedateien begonnen werden kann, soll der Anwender zunächst die Anzahl, die in einem Makro-Durchlauf, zu erstellenden Ausgabedateien und dem ableitend die zugehörigen Baugruppen definieren. Auf identische Art, wie im Unterkapitel 4.4 bereits beschrieben wurde, erfolgt sofort nach Eingabe der Anzahl der Ausgabedateien ein Aufruf der Prozedur namens „*CountCheck*“. Da die Anzahl der in gleichen Zug zu erstellenden Ausgabedateien auf fünf beschränkt wurde, beschäftigt sich die Prozedur „*CountCheck*“ in erster Linie mit Korrektur fehlerhafter Eingaben. Ist die Eingabe richtig erfolgt, so wird mittels derselben Prozedur eine weitere Prozedur, die die Bezeichnung „*CreateNewMenuElems*“ trägt, aufgerufen. Diese Prozedur erstellt anhand der eingegebenen Anzahl der zu erstellenden Ausgabedateien neue GUI-Elemente, mit dessen Hilfe die zu analysierenden Baugruppen eingegeben werden können.

An dieser Stelle wurden alle vorbereitende Maßnahmen getroffen und es kann mit der Ermittlung der gesuchten Werte und Erstellung der Ausgabedateien begonnen werden. Zu diesem Zweck soll der Button „*EXPORT*“ betätigt werden. Mittels der Betätigung des „*EXPORT*“ Buttons erfolgt, wie dem Flussdiagramm 5 in Abbildung 4.41 entnommen werden kann, Aufruf einer Prozedur mit der Bezeichnung „*CheckEID*“. Die darin vorhandenen Prozedurschritte werden anhand des, sich im Anhang A.5.1 befindenden, Flussdiagramms dargestellt.

Sofort nach dem Aufruf der Prozedur „*CheckEID*“ werden die lokalen Variablen deklariert und mittels der ersten Fallunterscheidung untersucht, ob alle zu untersuchenden Baugruppen in der Benutzeroberfläche eingegeben sind.

Mit Hilfe beider darauf folgender Fallunterscheidungen werden weitere benutzerdefinierten fehlerhaften Baugruppeneingaben vermieden. Zum einen untersucht die Prozedur ob die eingegebenen Baugruppen in der Ergebnisdatei vorhanden sind, zum anderen wird überprüft ob die verbundenen zu analysierenden Baugruppen identisch sind. Sind einige Baugruppen nicht in der Ergebnisdatei vorhanden oder die zu analysierenden Baugruppen identisch, wird die Prozedur sofort abgebrochen und der Anwender über die mögliche Fehlerursache benachrichtigt. Die Benutzeroberfläche wird dabei nicht beendet.

Hat die benutzerdefinierte Eingabe alle Prüfungen bestanden, erfolgt im nächsten Prozedurschritt ein Aufruf der Prozedur „*CreateEIDKompList*“. Diese Prozedur erstellt für jede in der Ergebnisdatei vorhandene Baugruppe eine global deklarierte Liste mit zugehörigen Modellkomponenten.

Wie dem Flussdiagramm aus Anhang A.5.1 entnommen werden kann, erfolgt am Ende der Prozedur „*CheckEID*“ ein bedingter Aufruf weiterer Prozedur namens „*CreateElemToSecList*“. Diese Prozedur wird genau einmal für jede in der Benutzeroberfläche definierte Verzapfungsverbindung aufgerufen und bestimmt, zur weiteren Ermittlung der gesuchten Werte, die zu analysierenden Knoten sowie alle relevanten Elemente für das FBD-Tool. Die in der Prozedur „*CreateElemToSecList*“ vorhandenen Prozedurschritte werden im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels anhand des Flussdiagramms, das sich im Anhang A.5.2 befindet, beschrieben.

Sofort nach dem Aufruf der Prozedur „*CreateElemToSecList*“ werden die Komponenten der ersten Baugruppe eingeblendet und die Anzeige aktualisiert. Um die Missverständnisse im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels zu vermeiden, soll zunächst erläutert werden, welche der, in der Benutzeroberfläche definierten Baugruppen einer Verzapfungsverbindung als erste und welche als zweite Baugruppe bezeichnet wird. Dazu muss die Aufmerksamkeit wieder auf die Abbildung 4.42 fokussiert werden. Die darauf abgebildeten Baugruppen sind tabellarisch aufgebaut. Alle Baugruppen, die in der linken Spalte aufgelistet sind, werden vom Makro es erste Baugruppen verstanden. Dementsprechen gehören alle Baugruppen aus der rechten Spalte zu der zweiten zu analysierenden Baugruppe.

In dem folgenden Schritt der Prozedur „*CreateElemToSecList*“ wird zunächst ein Knoten-SET erstellt und mit den Knoten-IDs der angezeigten Baugruppe befüllt. Im nächsten Prozedurschritt wird eine Liste erstellt, der der Inhalt des zuvor erstellten Knoten-SETs übertragen wird. Bei der Ermittlung gemeinsamer Knoten einer Verzapfungsverbindung müssen zunächst die zuvor beschriebenen Schritte für die zweite Baugruppe wiederholt werden. Dazu werden alle Modellkomponenten ausgeblendet und die der zweiten Baugruppe angezeigt. Nachdem die Anzeige erneut aktualisiert wird, wird eine neues Knoten-SET erstellt und mit den dargestellten Knoten der zweiten Baugruppe befüllt. Dem ableitend wird eine neue Liste erstellt, der der Inhalt des zuvor erstellten Knoten-SETs übertragen wird.

Die zuvor erstellten Listen mit Knoten-IDs verbundener Baugruppen werden nun verglichen und die Knoten mit derselben ID in eine separate, global deklarierte Liste abgelegt.

Wie aus den vorhergehenden Unterkapitel bereits bekannt ist, werden zur der Darstellung der Schnittkräfte und –momente an den zuvor gefundenen gemeinsamen Knoten die umliegenden 2D-Elemente benötigt. Die Ermittlung dieser Elemente ist Bestandteil des nächsten Prozedurschrittes. Die dabei gefundenen Elemente werden nur der ersten Baugruppe entnommen und mittels der folgenden Abbildung 4.43 visualisiert.

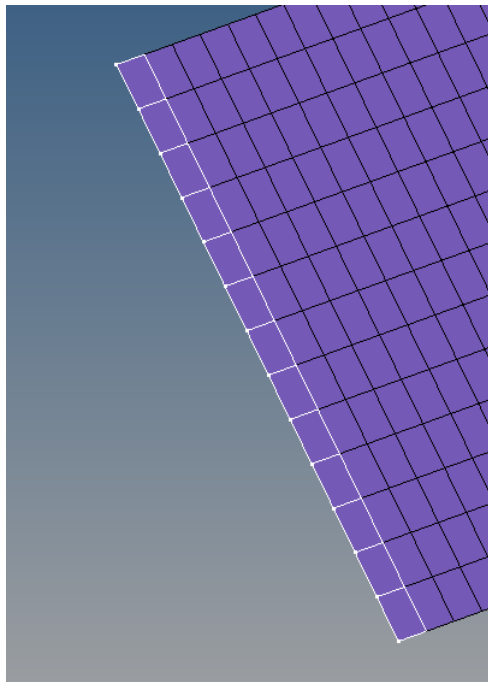


Abbildung 4.43: Gemeinsame Knoten und umliegende 2D-Elemente

In Abbildung 4.23 werden beispielhaft die gemeinsamen Knoten einer in Abbildung 4.38 dargestellter Verzapfungsverbindung mittels weißer Punkte dargestellt. Weiterhin werden die, an den gemeinsamen Knoten anliegenden Elemente der ersten Baugruppe dargestellt.

Wie am Anfang dieses Unterkapitels bereits erwähnt wurde, sollen zu der Bestimmung der Streckenbelastung jeweils die benachbarten Knoten eines Elementes herangezogen werden.

Zu diesem Zweck muss die zuvor erstellte Liste mit gemeinsamen Knoten sortiert werden. Zunächst müssen jedoch die globalen Koordinaten einzelner Knoten dieser Liste ermittelt werden. Anhand der globalen Koordinaten kann eine eindeutige Reihenfolge festgelegt werden und zugleich die Abstände einzelner Knoten bestimmt werden.

In dem letzten Prozedurschritt wird, wie dem Flussdiagramm A.5.2 entnommen werden kann, die Prozedur namens „*CrossSection*“ aufgerufen. Diese Prozedur erstellt im ersten Schritt das bereits bekannte Objekt der „*FBDCtrl*“ Klasse mit dessen Hilfe der Zugriff auf das HyperView Tool „FBD“ erfolgen kann. Um die gesuchten Werte ermitteln zu können wird im nächsten Schritt die sogenannte „*Section*“ in dem FBD-Tool erstellt und mit den bereits gefundenen 2D-Elementen der ersten Baugruppe befüllt.

In dem letzten Schritt der Prozedur „*CrossSection*“ wird eine weitere Prozedur, mit der Bezeichnung „*ExportForces*“, aufgerufen. Die in der Prozedur „*ExportForces*“ vorhandenen Prozedurschritte werden im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels anhand des Flussdiagramms, das sich im Anhang A.5.3 befindet, beschrieben.

Als Übergabeparameter bekommt die Prozedur „*ExportForces*“ die ID-Nummer der zuvor erstellte „*Section*“ des FBD-Tools. Sofort nach dem Aufruf dieser Prozedur wird die Anzahl der gemeinsamen Knoten bestimmt und eine Liste mit in den in der Ergebnisdatei vorhandenen Lastfällen erzeugt. Alle folgenden Schritte dieser Prozedur werden für jeden aktiv gesetzten Lastfall aus der zuvor erstellten Liste wiederholt.

In dem nächsten Prozedurschritt des Flussdiagramms A.5.3 werden die ersten beiden benachbarten Knoten zur weiteren Auswertung herauskristallisiert. Damit die an den Knoten wirkende Schnittkräfte und –momente richtig dargestellt und herausgelesen werden können, muss zunächst anhand des zugehörigen Elementes ein lokales Koordinatensystem erstellt und der „*Section*“ übermittelt werden. Zu diesem Zweck wird im nächsten Prozedurschritt eine Prozedur mit der Bezeichnung „*createUserSystem*“ aufgerufen.

Zur der Bestimmung des lokalen KOS werden der Prozedur „*createUserSystem*“ die beiden benachbarten Knoten übergeben. Anhand dieser Knoten wird zunächst das anliegende 2D-Element ermittelt und die X-Richtung festgelegt. Mittels des anliegenden 2D-Elementes wird ein dritter Knoten gefunden, um das lokale KOS eindeutig definieren zu können. Diese Vorgehensweise wird mittels der folgenden Abbildung 4.44 beispielhaft veranschaulicht.

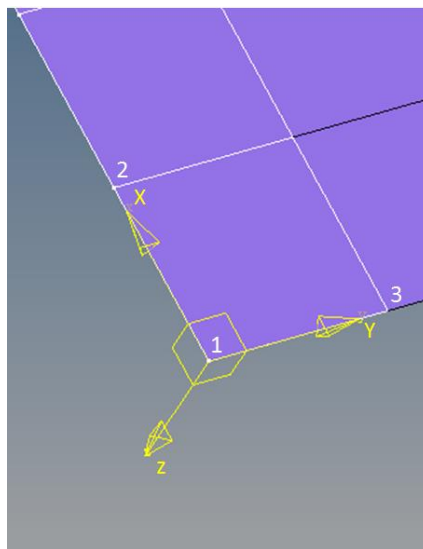


Abbildung 4.44: Lokales KOS benachbarter Knoten

Wie der Abbildung 4.44 entnommen werden kann, wird die X-Richtung des lokalen KOS ausgehend vom ersten Knoten, der immer den Ursprung des neuen lokalen KOS darstellt, zu dem zweiten, an diese Prozedur übergebenen Knoten, definiert. Damit das zu erstellende KOS vollständig definiert wird, soll die Y-Richtung festgelegt werden. Dazu verwendet diese Prozedur den dritten, zuvor bestimmten und in Abbildung 4.44 durch die entsprechende Zahl gekennzeichneten, Knoten.

Nachdem das lokale KOS erstellt ist, werden in den nächsten Prozedurschritten der Prozedur „*ExportForces*“ die benachbarten Knoten einzeln der „*Section*“ zur Ermittlung gesuchter Werte übergeben. In dem darauf folgenden Prozedurschritt wird die Prozedur „*getForcesAndMom*“ aufgerufen. Anhand der, an den Knoten wirkenden Belastungen, werden mit Hilfe dieser Prozedur die einzelnen Streckenbelastungen ermittelt.

In den beiden folgenden Schritten der Prozedur „*ExportForces*“ werden die Prozeduren „*getDirection*“ und „*getDistans*“ aufgerufen. Die erste von den Beiden ist für die Ausgabe der Koordinaten und die zweite für Ermittlung der Abstände benutzter Knoten zuständig.

Sobald alle gesuchten Werte der benachbarten Knoten ermittelt sind, erfolgt der Aufruf einer weiteren Prozedur mit der Bezeichnung „*CreateExportList*“. Diese nimmt die zuvor ermittelten Werte und füllt damit eine global deklarierte Liste, die am Ende der Prozedur „*ExportForces*“ an eine Text-Datei übergeben wird.

Vollständigkeitshalber soll erwähnt werden, dass die zuvor beschriebenen Schritte bei der Ermittlung gesuchter Werte für jedes benachbarte Knotenpaar aus der Liste mit gemeinsamen Knoten wiederholt werden.

Wurden alle Knoten betrachtet, so erfolgt am Ende der Prozedur „*ExportForces*“ der Aufruf der Prozedur namens „*createExportFile*“. Diese erstellt bekannterweise eine Text-Datei in dem festdefinierten Modellverzeichnis und benennt diese nach folgendem Schema „*mt\_10\_50.dat*“ um. Die erste Zahl in der Ausgabedateibezeichnung gibt die Nummer der ersten Baugruppe wieder, während die zweite Zahl für die Nummer der zweiten Baugruppe zuständig ist.

Die Betrachtung zur Umsetzung an das Makro gestellten Anforderungen gilt hiermit als abgeschlossen. Das Resultat wird mittels der, in folgender Abbildung 4.45 dargestellten, Ausgabedatei diskutiert.

2 4 50 30	1	2	3	4	5	6	7
241908	1511.50	-478.45	2018.00	3500	69503	69481	
241911	1511.50	-450.57	2018.00	69503	69502	69570	
241910	1511.50	-422.70	2018.00	69502	69501	69563	
241899	1511.50	-394.82	2018.00	69501	69500	69563	
241908	1511.50	-478.45	2018.00	3500	69503	69481	
241911	1511.50	-450.57	2018.00	69503	69502	69570	
241910	1511.50	-422.70	2018.00	69502	69501	69563	
241899	1511.50	-394.82	2018.00	69501	69500	69563	

Abbildung 4.45: Verzapfungsverbindung, Ausgabedatei, Anfang

Die in Abbildung 4.45 dargestellte Ausgabedatei wurde Zwecks der besseren Übersicht in zwei Bereiche geteilt und die relevanten Spalten durchnummeriert.

	8	9	10	11	12	13	14
27.88	-2.16	-0.40	0.88	56.69	7.13	29.81	
27.88	-1.31	0.17	1.00	75.75	8.97	33.11	
27.88	-1.32	0.73	0.73	75.44	7.05	26.09	
27.88	-1.41	0.97	0.62	77.31	5.02	19.09	
27.88	-14.18	3.87	-0.33	-56.69	1.60	-5.05	
27.88	-16.74	2.03	-0.09	-71.83	3.37	-7.71	
27.88	-18.08	0.59	0.26	-61.80	3.15	-3.67	
27.88	-18.34	0.03	0.61	-47.69	4.50	7.43	

Abbildung 4.45: Verzapfungsverbindung, Ausgabedatei, Fortsetzung

Wie dem oberen linken Bereich des ersten Teils der Abbildung 4.45 entnommen werden kann, beginnt die Ausgabedatei mit vier Zahlen. Die oberste Zahl gibt die Anzahl der, in der Ergebnisdatei betrachteten, Lastfälle an. Die darauf folgende Zahl trägt die Information über die Anzahl der analysierten Elemente einer Verzapfungsverbindung. Die beiden letzten Zahlen geben an, welche EIDs der Baugruppen einer Verzapfungsverbindung zur Analyse herangezogen wurden. Dementsprechend wurden in der dargestellten Ausgabedatei zwei Lastfälle berücksichtigt. Die dabei analysierte Verzapfungsverbindung besteht aus zwei Baugruppen. Die erste mit der EID 50 und die zweite mit der EID 30. Pro Lastfall wurden vier Elemente der ersten Baugruppe analysiert. Dementsprechend beinhaltet die Schnittlinie der betrachteten Verzapfungsverbindung fünf Knoten, deren ID-Nummer ebenfalls in der Ausgabedatei vermerkt wird.

An dieser Stelle wird direkt auf die einzelnen durchnummerierten Spalten der Ausgabedatei eingegangen. Die erste Spalte beinhaltet alle ID-Nummern der in die „*Section*“ eingefügten 2D-Elemente der ersten Baugruppe, zwischen denen sich die analysierten Knoten befanden. Die Spalten 2 bis 4 beinhalten Koordinaten des virtuellen Mittenknotens einer Verbindung benachbarter Knoten. In den Spalten 5 und 6 befinden sich die ID-Nummern der benachbarten Knoten, die zur Analyse der Streckenbelastungen herangezogen wurden. In der Spalte 7 werden die ID-Nummern der Knoten vermerkt, mit deren Hilfe lokale Koordinatensysteme eindeutig definiert werden. Mittels der Spalte 8 wird der Abstand benachbarter Knoten angegeben. Die folgenden Spalten 9 bis 11 beinhalten die streckenbezogene X-, Y- und Z-Kräfte. In den letzten drei Spalten sind die streckenbezogene Momente um die X-, Y- und Z-Achse vermerkt.

## 4.6 Einbindungen der Makros

Die Einbindung der Makros erfolgt direkt in die Befehlsleiste des Programms HyperView und ist in Abbildung 4.46 dargestellt.

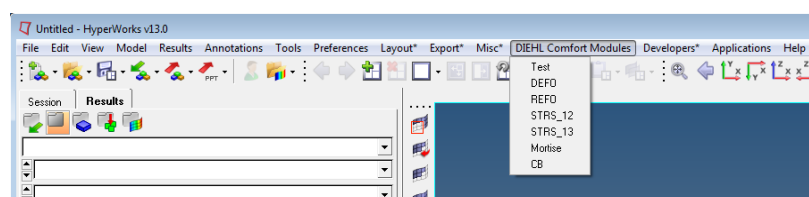


Abbildung 4.46: Eingebundene Makros



In Abbildung 4.46 ist ein Ausschnitt der Benutzeroberfläche von HyperView dargestellt. In der oberen Befehlsleiste sind programmtypische zusammengefasste Befehlsblöcke wie „*File*“, „*Edit*“, „*View*“, etc. zu erkennen. Die Makros wurden in diese Befehlsleiste als Befehlsblock „*DIEHL Comfort Modules*“ eingefügt. Durch das Klicken auf diesen Button eröffnet sich ein Untermenü mit den eingebundenen Makros.

Wie der Abbildung 4.46 weiterhin entnommen werden kann, wurden insgesamt sieben Makros umgesetzt. Dabei handelt es sich bei dem Makro mit der Bezeichnung „*Test*“ um ein Hilfsmakro welches dazu die Funktionsfähigkeit von Teilquellcodes zu prüfen. Die weiteren Makros stellen die umgesetzten Anforderungen dar und sind anhand deren Bezeichnungen zu erkennen.

## 4.7 Umsetzung der Wünsche

Neben den umgesetzten Anforderungen waren in der Aufgabenstellung Wünsche aufgelistet, die nach Möglichkeit realisiert werden sollten. Diese Wünsche sollten dazu dienen, die Benutzerfreundlichkeit des Gesamtpaketes zu verbessern und dadurch den manuellen Aufwand zu reduzieren.

In Kapitel drei aufgelisteten Wünsche konnten im vollen Umfang umgesetzt und in die Benutzeroberfläche von HyperMesh eingebunden werden. Die Platzierung der Wunschmakros ist in Abbildung 4.47 graphisch dargestellt.

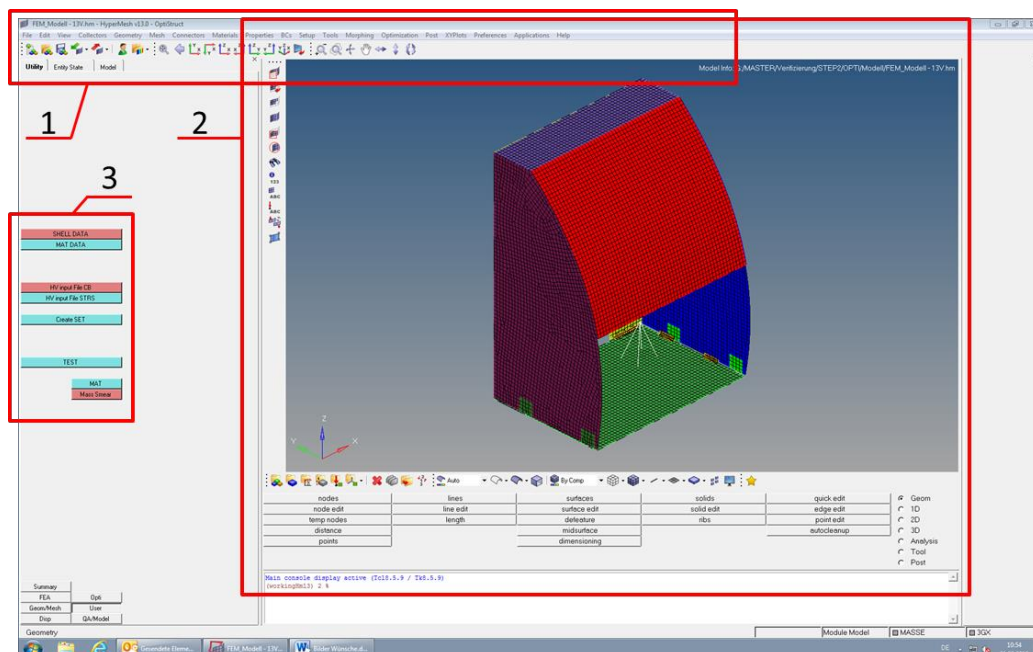


Abbildung 4.47: Einbindung der Wunsch-Makros

In Abbildung 4.47 ist typische Benutzeroberfläche des Programms HyperMesh nach dem Laden eines FE-Modells dargestellt und übersichtshalber in drei Blöcke unterteilt. Block 1 stellt die Befehlsleiste des Programms dar. Block 2 visualisiert das vernetzte FE-Modell einer beispielhaften Waschräumeinheit. Im unteren Bereich dieses Blockes sind meist verwendete Befehle zusammengefasst. Im Block 3 sind umgesetzte Wunschmakros dargestellt und werden anhand der Abbildung 4.48 vergrößert präsentiert und erläutert.

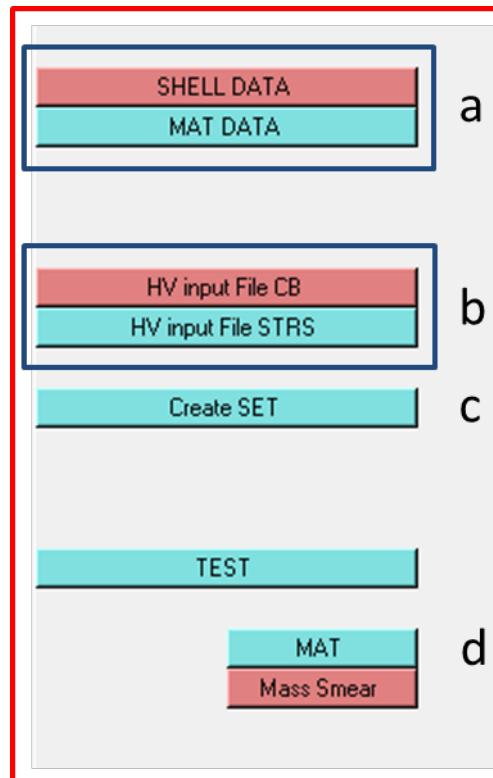
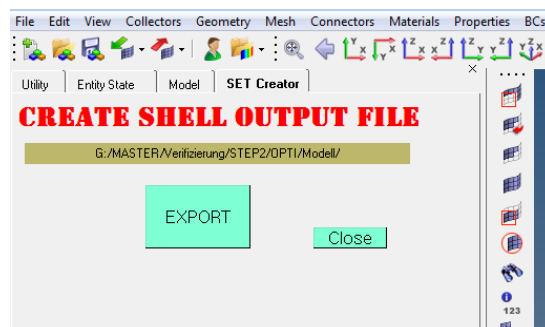


Abbildung 4.48: Vergrößerte Darstellung der Wunsch-Makros

In Abbildung 4.48 zusammengefassten Wunsch-Makros-Blöcke sind in vier Gruppen unterteilt. Die Gruppe a ist dafür zuständig, in dem Modell verwendeten Sektionsaufbau sowie die dazugehörigen Materialdaten in separaten Ausgabedateien zu erstellen. Die in der Gruppe b dargestellten Makros dienen zur Erstellung von Inputdateien zur Schraubenberechnung und Spannungsnachweis, die in HyperView verwendet werden. Das Makro mit der Gruppenbezeichnung c filtert Elemente mit unrealistisch hohen Messwerten aus, die die Berechnung verfälschen würden. Das zuletzt unter der Gruppenbezeichnung d aufgeführte Makro stellt ein Hilfsprogramm zur automatischen Erstellung datebankbasierter Material- und Elementeneigenschaften dar.

In der Gruppe a zusammengefasste Makros haben ähnliche Funktionsweise. Bei Betätigung einer des Buttons erscheint eine in Abbildung 4.49 für „*SHELL DATA*“ beispielhaft dargestellte Benutzeroberfläche.

Abbildung 4.49: Benutzeroberfläche des Wunsch-Makros „*SHELL DATA*“

In der Mitte in Abbildung 4.49 ist außer der eindeutigen Makrobezeichnung der Speicherpfad sowie Buttons „EXPORT“ und „Close“ zu erkennen. In Abhängigkeit davon um welches der beiden Makros der Gruppe a es sich handelt, entstehen unterschiedliche Ausgabedateien.

Die Ausgabedatei des Makros „SHELL DATA“ beinhaltet den Aufbau der Sektionen mit Angabe der verwendeten Materialien inklusive der Lagenanzahl, -richtung und deren Dicke. Im Gegensatz dazu enthält die Ausgabedatei des Makros „MAT DATA“ alle im Modell verwendeten Material-IDs sowie deren richtungsabhängige Materialeigenschaften.

Die Makros der Gruppe b sind im Zuge der Umsetzung der Anforderungen als Hilfsmakros entstanden und dienen der Ergänzung der jeweiligen Anforderung fehlender Informationen. Dabei handelt es sich um Federsteifigkeiten und entsprechend Material-IDs.

Wie oben beschrieben dient das Makro in der Gruppe c der Vermeidung unrealistischer Berechnungsergebnisse. In Abbildung 4.50 ist das Ergebnis der Anwendung dieses Makros auf ein beispielhaftes FE-Modell bei der Analyse der Spannungen und Ermittlung der Tsai-Wu-Werte zu sehen.

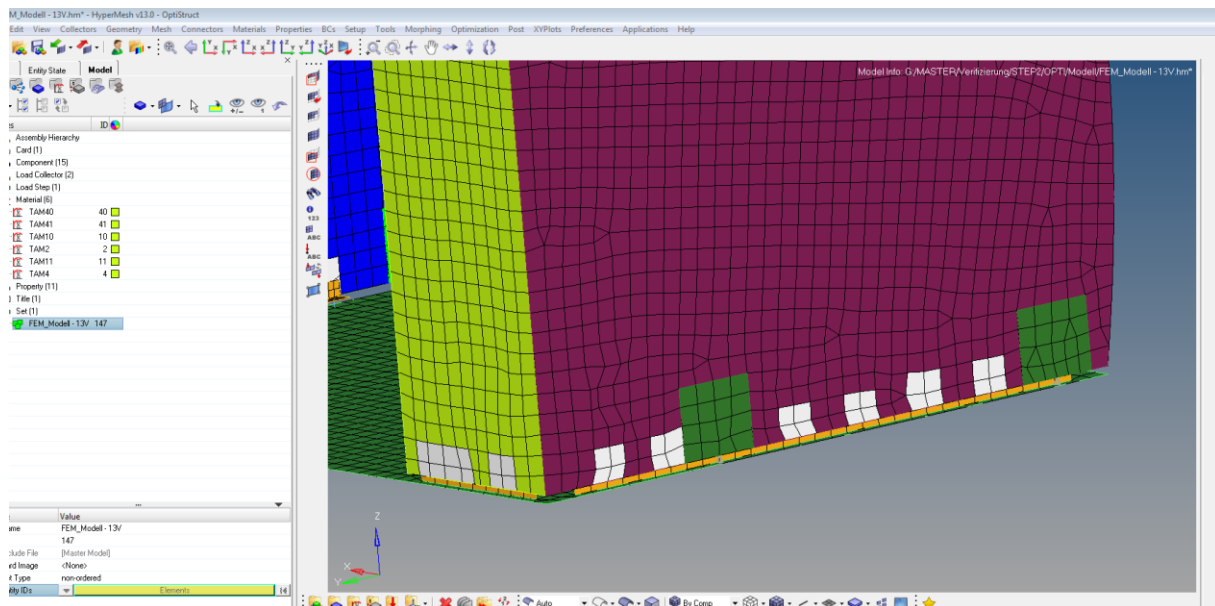


Abbildung 4.50: Anwendungsergebnis des Makros „Create SET“

In Abbildung 4.50 sind im unteren Bereich des FE-Modells einige weiß markierte Elemente zu sehen, die durch das Anklicken des sich im links aufgelisteten Strukturbaum befindlichen und blau markierten SET aktiviert werden. Wenn der Berechnungsingenieur mit der Auswahl einverstanden ist, so kann er diese Elemente von der FE-Analyse ausschließen. Durch automatische Ermittlung betroffener Elemente und deren Visualisierung stellt dieses Makro ein nützliches Hilfswerkzeug dar.

Wird das Makro „MAT“ aus Gruppe d ausgeführt, eröffnet sich eine in Abbildung 4.51 dargestellte Benutzeroberfläche, die übersichtshalber in vier Blöcke aufgeteilt ist.

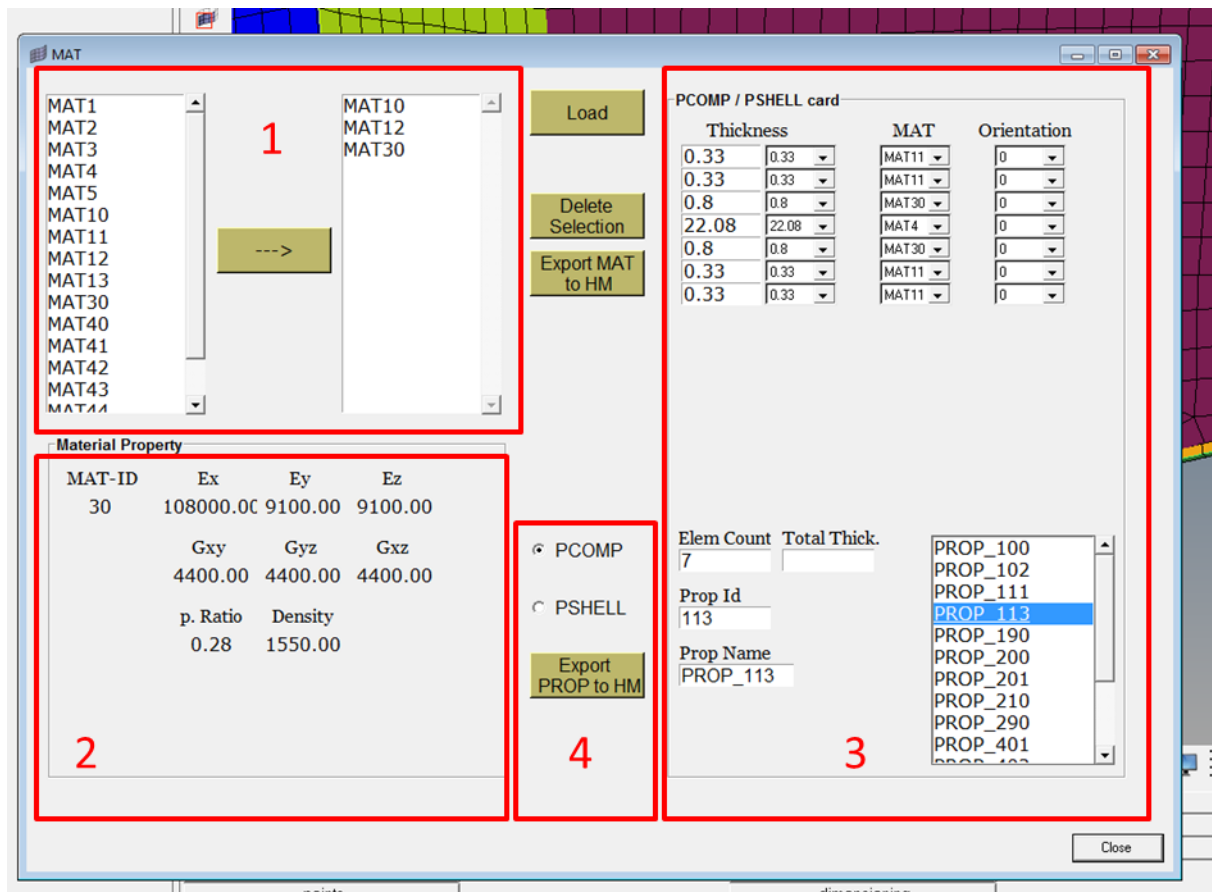


Abbildung 4.51: Benutzeroberfläche des Makros „MAT“

In Abbildung 4.51 dargestellte Benutzeroberfläche enthält mehrere in Blöcke aufgeteilten Funktionen. Block 1 stellt dabei die Bibliothek der Materialeigenschaften dar, die durch den Pfeil in aktives sich rechts befindliches Feld übertragen lassen. Wird eins der Material-IDs angeklickt, so erscheinen in Block 2 die dazugehörigen Materialeigenschaften. Mittels des dritten Blockes können bereits vordefinierte Eigenschaften von Wabenplatten und Verbindungselementen angezeigt oder manuell erstellt werden. Zum Erstellen der besagten Eigenschaften muss im Block vier zwischen „PCOMP“ und „PSHELL“ gewählt werden. Es erscheint eine leere Tabelle. Wird anschließend der Button „Export“ betätigt, so werden die Daten an HyperMesh übertragen. Während dieses Vorganges analysiert das Makro die Anwesenheit dieser Datensätze in HyperMesh und bei Abwesenheit ergänzt die HyperMesh Bibliothek.

Somit wurden in Kapitel 4 alle gesetzten Anforderungen und Wünsche umgesetzt. Im nächsten Kapitel erfolgt die Validierung der durch die beiden FE-Programme: ANSYS und HyperWorks ermittelten Berechnungsergebnisse zwecks der Feststellung deren Glaubwürdigkeit und Erfüllung der Aufgabenstellung im Bezug auf den möglichen Umstieg von ANSYS auf HyperWorks.

## 5 Validierung

Die Validierung der erstellten Makros erfolgt anhand des Vergleiches der Berechnungsergebnisse beider verwendeten FE-Programme. Zu diesem Zweck werden vier beispielhafte, bauteilähnliche Modelle erstellt, in jeweiligen Programm die Berechnung gestartet und anhand der in Tabelle 5.1 zusammengefasste Untersuchungsparameter miteinander verglichen. Dabei gilt es möglichst geringe Abweichungen zwischen beiden FE-Programmen zu erreichen.

Tabelle 5.1: Zusammenfassung der Untersuchungsparameter einzelner FE-Modelle

Untersuchungsparameter	Modell			
	1	2	3	4
Verschiebungen	x	x	x	x
Lagerreaktionskräfte	x	x	x	x
Spannungen	x	x	x	x
Verzapfungsverbindung		x		x
Tsai-Wu				x
Schraubennachweis			x	
Modalanalyse			x	x

Der Tabelle 5.1 kann entnommen werden, dass je nach Modell insgesamt sieben Untersuchungsparameter berücksichtigt werden. Während die Verschiebungen, Lagerreaktionskräfte sowie die Spannungen bei allen vier Modellen untersucht werden, werden weitere Untersuchungsparameter in Abhängigkeit von Modellart zusätzlich untersucht.

Damit die Berechnung einheitlich verlaufen kann, müssen beiden FE-Programmen identische Modelle mit gleichen Elementtypen und der Netzdichte zur Verfügung gestellt werden. Die Übersicht der Bestandteile von Modellen ist in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Modellsektionen mit Angabe der Aufbauten

LID	Name	MID	Thickness	Orientation
			[mm]	[°]
<b>SID:120</b>			<b>25,00</b>	
1	GFRP	101	0,33	0
2	GFRP	101	0,33	0
3	Core	10	23,68	0
4	GFRP	101	0,33	0
5	GFRP	101	0,33	0
<b>SID:190</b>			<b>10,00</b>	
1	GFRP	110	0,33	0
2	Core	20	9,34	0
3	GFRP	110	0,33	0
<b>SID:150</b>			<b>25,00</b>	
1	HGW	400	25,00	0
<b>SID:401</b>			<b>2,00</b>	
1	HGW	40	2,00	0
<b>SID:170</b>			<b>1,50</b>	
1	Alu	401	1,50	0

Tabelle 5.2 kann entnommen werden, dass zum Beispiel die Modellsektion mit der Bezeichnung SID120 ein Sandwich-Bauteil darstellt und insgesamt aus fünf Lagen besteht. Dabei befinden sich oben und unten jeweils zwei GFK-Lagen. Die Gesamtdicke dieses Bauteils beträgt 26 millimeter. Weiterhin kann für jede Lage der mittleren Spalte die Materialidentifikationsnummer (MID) entnommen werden. Beiden FE-Programmen zur Verfügung gestellten Materialparametern sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.3: MID-benogene Materialparameter

MID	Young's Modulus			Shear Modulus			P. Ratio	Density
	$E_x$	$E_y$	$E_z$	$G_{xy}$	$G_{yz}$	$G_{xz}$	$\nu$	$\rho$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]
20	100	100		30	30	30	0,00	48
40	100	100		30	30	30	0,00	80
100	22898	22898		4945	4945	4945	0,04	1800
101	16749	16749		4316	4316	4316	0,04	1800
400	8000						0,30	1400
401	72000						0,30	2700

Aus Grundlage dieser einheitlichen Eingabedaten kann die Validierung der Berechnungsergebnisse beider FE-Programme und demzufolge die Funktionsfähigkeit der erstellten Makros gestartet werden.

## 5.1 Modell 1

Beim Modell 1 handelt es sich zum vereinfachten Start der Validierung um eine einfache Wabenplatte mit der Baugruppennummer EID10, die zugleich die Sektionsnummer SID190 darstellt. Diese Wabenplatte hat insgesamt drei Lagen und ist in Abbildung 5.1 visualisiert.

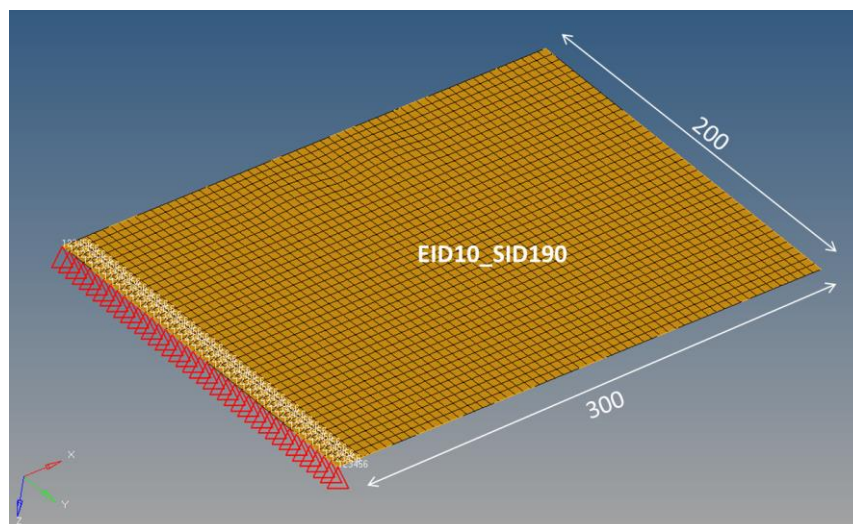


Abbildung 5.1: Modell 1, Gesamtansicht und Lagerung

Aus Abbildung 5.1 ist zu erkennen, dass die Wabenplatte Außenmaße von 200x300 millimeter hat.

Weiterhin ist der Abbildung 5.1 zu entnehmen, dass die kürzere Kante in voller Länge mit Festlagern gegen Verschiebung und Verdrehung gesichert ist. Dabei ist das KOS so definiert, dass X-Richtung entlang der langen, Y-Richtung entlang der kurzen Kante liegt und die Z-Richtung senkrecht auf den beiden steht.

Um messbare Ergebnisse zu erhalten, wird in diesem Modell eine Belastung von 60g in globale Z-Richtung aufgebracht. Als erstes wird die Verschiebung in Belastungsrichtung ausgewertet. Das optische Ergebnis der FE-Berechnungen beider Programme ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

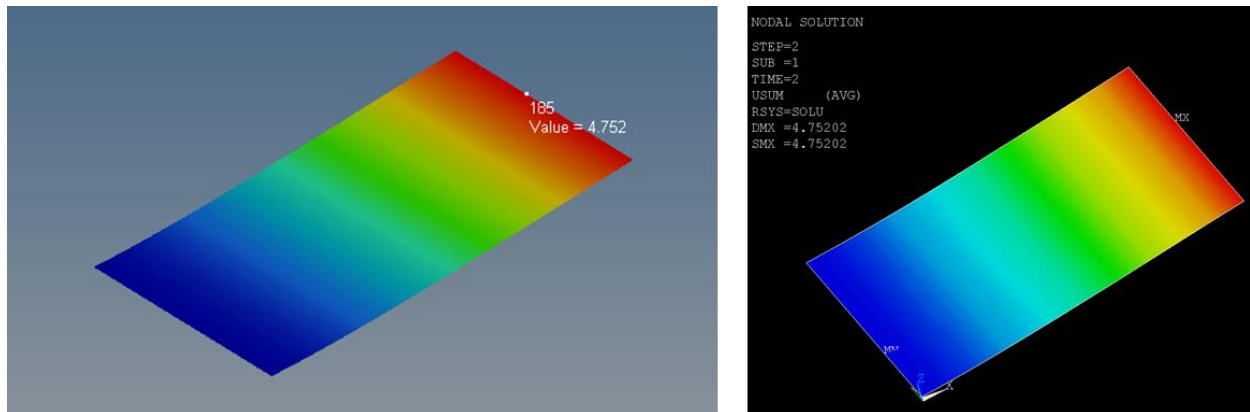


Abbildung 5.2: Verschiebung in Belastungsrichtung, Modell 1 – links OptiStruct, rechts ANSYS

Anhand der Farbverläufe in Abbildung 5.2 kann auf ähnliche Verformung der Wabenplatte geschlossen werden. Die tatsächlich vorliegenden maximalen Verschiebungen sind in Tabelle 5.4 in Abhängigkeit von dem Berechnungsprogramm zusammengefasst.

Tabelle 5.4: Berechnungsergebnisse der Verschiebung bei 60g im Modell 1

Solver	Knoten-ID	Gesamtverschiebung [mm]
ANSYS	185	4,752
OptiStruct	185	4,752
Differenz	185	0

Wie der Tabelle 5.4 entnommen werden kann, sind aufgetretene Verschiebungen, die als Durchbiegung der Wabenplatte betrachtet werden können, identisch. Zusätzlich zu diesem herorragenden Ergebnis tritt diese Verschiebung an einem und demselben Knoten auf.

Als nächster Untersuchungsparameter werden die Lagerreaktionskräfte ermittelt. Wabenplatte wird ebenfalls mit 60g in Z-Richtung beschleunigt. Die aufgetretenen Lagerreaktionskräfte werden für jeden gelagerten Knoten ermittelt und die Berechnungsergebnisse beispielhaft für sechs Knoten in Tabelle 5.5 zusammengefasst.

Wie Tabelle 5.5 entnommen werden kann, sind Berechnungsergebnisse bei beiden Programmen annähernd identisch. Die pro Knoten ermittelte Differenz zwischen den Berechnungsergebnissen liegt mit bis zu drei Nachkommastellen bei Null.

Tabelle 5.5: Lagerreaktionskräfte, Modell 1

Solver	Knoten-ID	Reaktionskraft [N]
ANSYS	61	0,97781
	62	2,0796
	63	2,2013
	64	2,2791
	65	2,3341
	66	2,3746
OptiStruct	61	0,9781
	62	2,08
	63	2,202
	64	2,279
	65	2,334
	66	2,375
Differenz	61	0,00029
	62	0,0004
	63	0,0007
	64	0,0001
	65	1E-04
	66	0,0004

Als dritter Untersuchungsparameter werden die maximal auftretenden Spannungen, in Faserrichtung, senkrecht dazu und Schubspannungen, in beiden GFK-Lagen ermittelt. Die Berechnungsergebnisse beider Programme sind beispielhaft anhand der Spannung senkrecht zur Faserrichtung in der oberen GFK-Lage in Abbildung 5.3 visualisiert.

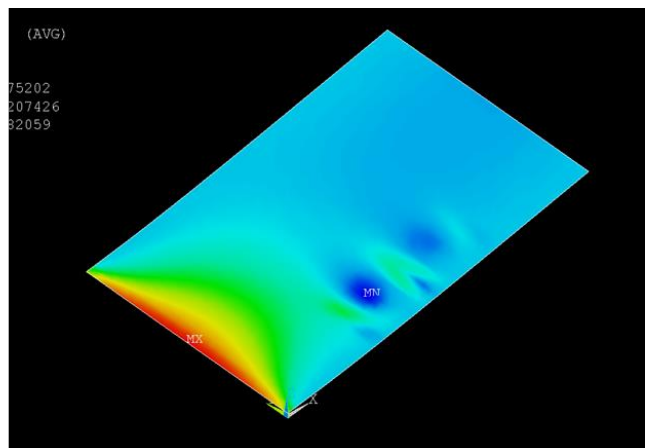
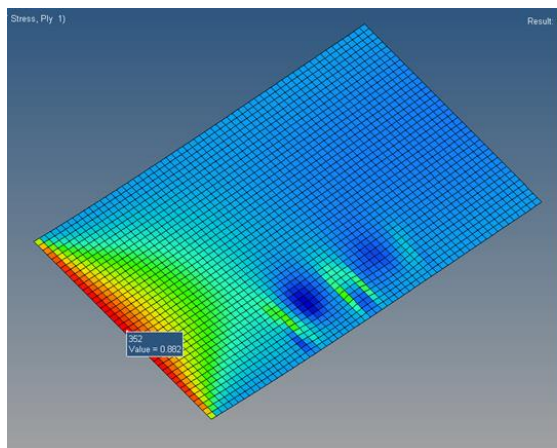


Abbildung 5.3: Maximale Spannungen in oberer GFK-Lage – links OptiStruct, rechts ANSYS

Ebenso wie bei den Verschiebungen ist der Farbverlauf der ermittelten Spannungen oberer GFK-Lage senkrecht zur Faserrichtung annähernd gleich, was ähnlich gute Ergebnisse vermuten lässt. Die exakten ermittelten richtungs- und lagenabhängige Spannungen sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst.



Tabelle 5.6: Richtungs- und lagenabhängige maximale Spannungen, Modell 1

Solver	Element-ID	Lagennummer	Max.Elementspannung in X [MPa]
ANSYS	954	1	22,1239
	1439	3	-0,00239
OptiStruct	954	1	22,124
	1439	3	-0,003
Differenz	954	1	0,0001
	1439	3	0,0006
Solver	Element-ID	Lagennummer	Max. Elementspannung in Y [MPa]
ANSYS	352	1	0,88205
	291	3	0,2074
OptiStruct	352	1	0,882
	291	3	0,2
Differenz	352	1	0,0000
	291	3	0,0074
Solver	Element-ID	Lagennummer	Max. Scherspannung [MPa]
ANSYS	192	1	0,8909
	226	3	0,832
OptiStruct	192	1	0,908
	226	3	0,798
Differenz	192	1	0,0171
	226	3	0,034

Tabelle 5.6 besteht an sich aus drei Untertabellen. In dem oberen Teil der Tabelle werden lagenabhängige Berechnungsergebnisse in Faserrichtung miteinander verglichen. Es ist zu erkennen, dass nicht nur die auftretenden Spannungen, sondern auch Elemente, an denen diese angreifen, identisch sind.

Der mittlere Bereich der Tabelle 5.6 stellt die lagenabhängigen Berechnungsergebnisse senkrecht zur Faserrichtung dar, während der untere Bereich dieser Tabelle für die Schubspannungen zuständig ist. Ebenso wie bei den Spannungen in Faserrichtung sind die Abweichungen der Berechnungsergebnisse minimal.

Anhand der untersuchten Parameter kann für Modell 1 bestätigt werden, dass durch die Unterstützung der Makros entstandene Ausgabedateien nötige und korrekte Ergebnisse enthalten. Somit gilt die erste, einfache, Prüfung der Makros sowie der programmabhängigen Solver als bestanden.

## 5.2 Modell 2

Bei dem zweiten Modell handelt es sich um zwei senkrecht aufeinander stehende Wabenplatten, die durch eine Verzäpfung miteinander verbunden sind. Dieses Modell ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

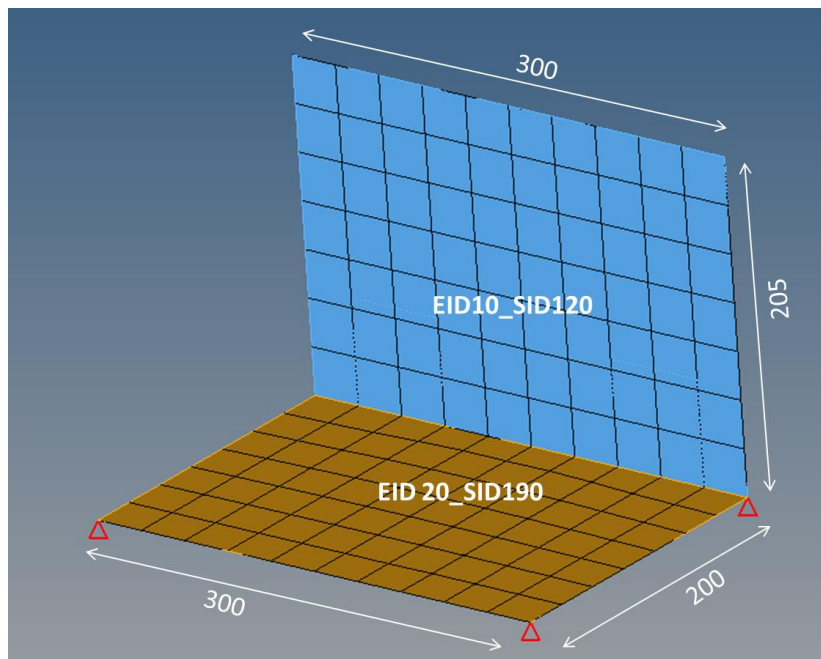


Abbildung 5.4: Modell 2

Aus Abbildung 5.4 ist zu erkennen, dass zu dem bekannten Modell 1, welches aus der SID190 bestand, eine weitere Wabenplatte mit der SID120 hinzugefügt wurde. Wabenplatte SID120 besteht aus fünf Lagen, deren Aufbau Tabelle 5.2 entnommen werden kann.

Die Funktionsfähigkeit der Makros wird nun wieder zu Beginn anhand der auftretenden Verschiebungen, hier bei einer Belastung von 60g in Y-Richtung, untersucht. Das visuelle Ergebnis der Berechnungen ist der Abbildung 5.5 zu entnehmen.

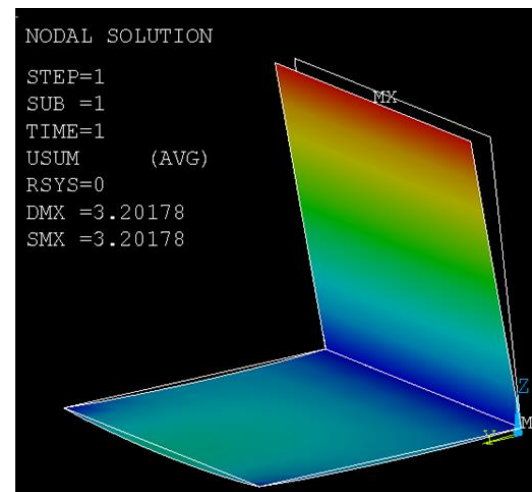
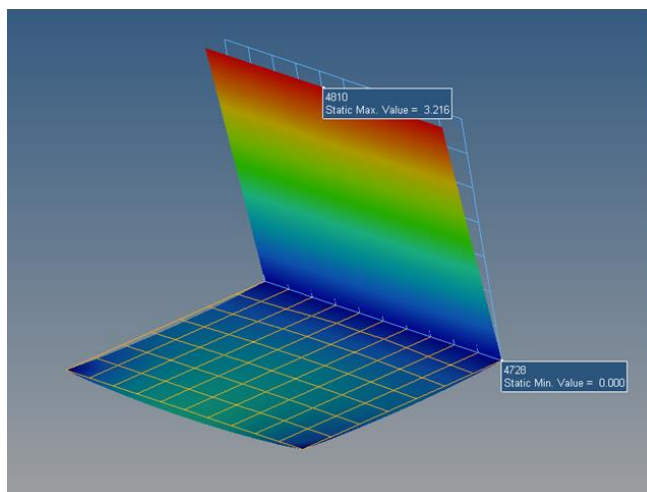


Abbildung 5.5: Verschiebung in Belastungsrichtung, Modell 2 – links OptiStruct, rechts ANSYS

Aus den Farbverläufen in Abbildung 5.5 ist vorläufig zu erkennen, dass die Berechnungsergebnisse nahe beieinander liegen. Die tatsächlich ermittelten maximalen Gesamtverschiebungen sind in Tabelle 5.7 zusammengefasst.

Tabelle 5.7: Maximale Gesamtverschiebungen, Modell 2

Solver	Knoten-ID	Maximalverschiebung [mm]
ANSYS	4810	3,2017
OptiStruct	4810	3,216
Differenz	4810	0,0143

Wie der Tabelle 5.7 zu entnehmen ist, treten die maximalen Verschiebungen an einem und demselben Knoten auf. Die ermittelten Werte sind annähernd identisch und haben eine Differenz, die weit unter einem Prozent der Messwerte liegt.

Als nächstes werden die Lagerreaktionskräfte überprüft. Das visuelle Ergebnis der Berechnung ist hier beispielhaft anhand des Solvers OptiStruct in Abbildung 5.6 dargestellt.

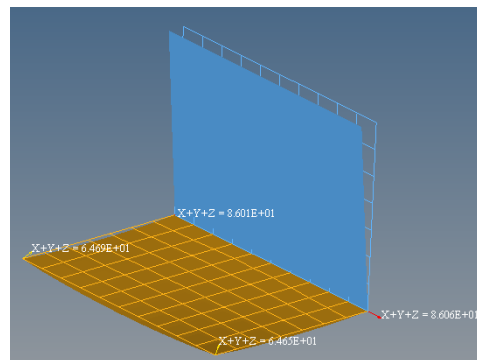


Abbildung 5.6: Lagerreaktionskräfte, Modell 2, OptiStruct

In Abbildung 5.6 ist anhand der blauen Wabenplatte eine deutliche Verschiebung zu erkennen. Die Knoten, an denen die Lagerreaktionskräfte ermittelt wurden, sind mit Pfeilen gekennzeichnet. Die tatsächlich programmabhängig ermittelten Lagerreaktionskräfte sind in Tabelle 5.8 zusammengefasst.

Tabelle 5.8: Lagerreaktionskräfte, Modell 2

Solver	Knoten-ID	Reaktionskraft [N]
ANSYS	4711	62,6598
	4721	62,6111
	4728	89,9960
	4738	89,9594
OptiStruct	4711	64,6900
	4721	64,6500
	4728	86,0600
	4738	86,0100
Differenz	4711	2,0302
	4721	2,0389
	4728	3,9360
	4738	3,9494

Aus Tabelle 5.8 ist zu erkennen, dass die ermittelten Werte nahe aneinander liegen, jedoch die Differenz zwischen den programmabhängigen Werten im Gegensatz zu den zuvor durchgeführten Untersuchungen zunimmt, aber trotzdem unterhalb von zwei Prozenten der Messwerte liegt.

Als dritter Parameter werden die jeweils maximalen auftretenden Spannungen im gesamten Bauteil untersucht. Die visuellen Ergebnisse der ermittelten Spannungen in Faserrichtung sind programmabhängig in Abbildung 5.7 dargestellt.

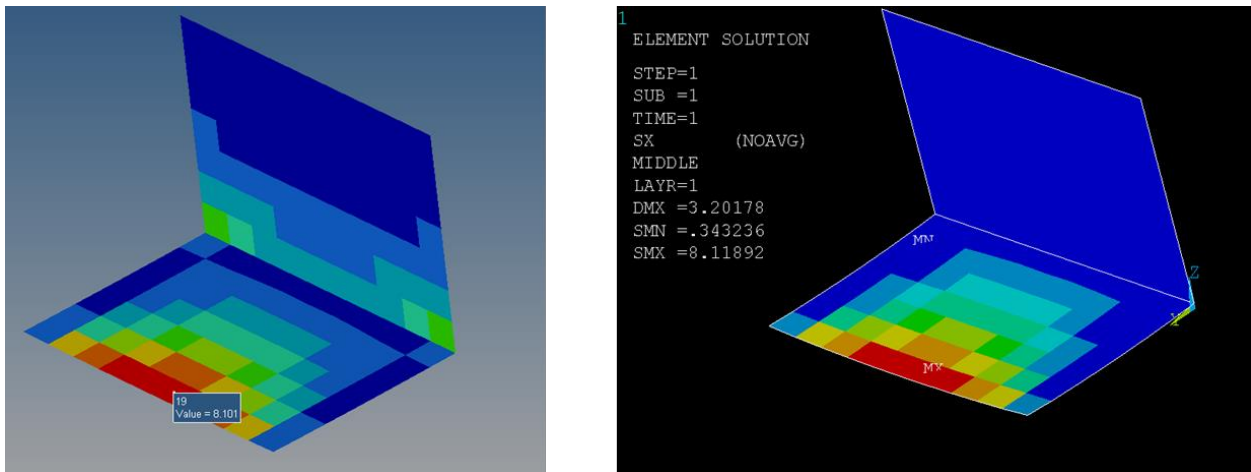


Abbildung 5.7: Spannungverteilung in Faserrichtung, Modell 2 – links OptiStruct, rechts ANSYS

Aus Abbildung 5.7 ist zu erkennen, dass die maximalen Spannungen in Faserrichtung im Einspannungsbereich zwischen den Lagern liegen. Die tatsächlich ermittelten Werte sind in Abhängigkeit von der Faserorientierung in Tabelle 5.9 zusammengefasst.

Tabelle 5.9: Maximal auftretenden Spannungen, Modell 2

Solver	EID	Lagennummer	Element-ID	Max.Elementspannung in X [Mpa]
ANSYS	20	1	19	8,1189
OptiStruct	20	1	19	8,101
Differenz	20	1	19	0,0179
Solver	EID	Lagennummer	Element-ID	Max.Elementspannung in Y [Mpa]
ANSYS	20	1	12	19,2228
OptiStruct	20	1	12	19,131
Differenz	20	1	12	0,0918
Solver	EID	Lagennummer	Element-ID	Max. Scherspannung [Mpa]
ANSYS	20	3	26	3,90071
OptiStruct	20	3	26	3,889
Differenz	20	3	26	0,01171

Der Tabelle 5.9 kann entnommen werden, dass die höchsten Spannungen in Faserrichtung und senkrecht dazu in der ersten Lage der Baugruppe mit der EID20 auftraten, während die höchsten Schubspannungen in derselben Baugruppe, jedoch in der dritten Lage vorzufinden sind. Es ist

zu erkennen, dass die Differenz zwischen den Messwerten in den gewohnten niedrigen Bereich gefallen ist. Das deutet darauf hin, dass die umgesetzten Makros herfforragend funktionieren.

Ergänzend zu den aus Modell 1 bekannten Untersuchungsparameter, wird hier die Berechnung einer Verzäpfung an der Baugruppe mit der EID20 durchgeföhrt und die ermittelten Ergebnisse in Tabelle 5.10 zusammengefasst.

Tabelle 5.10: Wirkende Kräfte in der Verzäpfung des Modells 2

Solver	Element-ID	Knoten-ID von	Knoten-ID bis	Kraftkomponente in lok. X-Richtung [N]	Kraftkomponente in lok. Y-Richtung [N]	Kraftkomponente in lok. Z-Richtung [N]
ANSYS	12	4728	4729	14,63	17,4	7,63
	14	4729	4730	4,73	-14,67	8,7
	9	4730	4731	2,59	-14,85	7,53
	3	4731	4732	1,82	-14,28	6,72
	5	4732	4733	0,63	-14,05	6,12
	47	4733	4734	-0,63	-14,05	6,09
	49	4734	4735	-1,82	-14,28	6,67
	44	4735	4736	-2,59	-14,85	7,53
	38	4736	4737	-4,73	-14,67	8,72
	40	4737	4738	-14,62	17,37	7,64
OptiStruct	12	4728	4729	14,37	17,2	7,44
	14	4729	4730	4,79	-15,25	8,6
	9	4730	4731	2,92	-15,22	7,59
	3	4731	4732	2,05	-14,61	6,87
	5	4732	4733	0,74	-14,39	6,29
	47	4733	4734	-0,74	-14,39	6,3
	49	4734	4735	-2,05	-14,61	6,87
	44	4735	4736	-2,93	-15,22	7,59
	38	4736	4737	-4,79	-15,25	8,6
	40	4737	4738	-14,36	17,17	7,44
Differenz	12	4728	4729	0,26	0,2	0,19
	14	4729	4730	0,06	0,58	0,1
	9	4730	4731	0,33	0,37	0,06
	3	4731	4732	0,23	0,33	0,15
	5	4732	4733	0,11	0,34	0,17
	47	4733	4734	0,11	0,34	0,21
	49	4734	4735	0,23	0,33	0,2
	44	4735	4736	0,34	0,37	0,06
	38	4736	4737	0,06	0,58	0,12
	40	4737	4738	0,26	0,2	0,2

Anhand der zweiten Spalte in Tabelle 5.10 ist zu erkennen, dass die Berechnung einer Verzäpfungsverbindung an zehn FE-Elementen entlang der Verbindungsseite durchgeföhrt wurde. Die dazugehörigen Knoten-IDs sowie die daran ermittelten Kräfte sind den sich rechts befindlichen Spalten zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass programmübergreifend die ermittelten Werte annähernd identisch sind. Die Differenz zwischen den Messwerten ist minimal.

Die anhand des Modells 2 durchgeföhrteten Untersuchungen zeigen, dass die entwickelten Makros auch mit der gesteigerten Komplexität zurecht kommen und in dieser Phase der Umstieg von ANSYS auf HyperWorks ohne Bedenken realisiert werden kann.

### 5.3 Modell 3

Der Unterschied zwischen dem Modell 2 und Modell 3 liegt daran, dass anstatt einer Verzapfungsverbindung eine Schraubenverbindung eingesetzt wurde. Das dritte FE-Modell ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

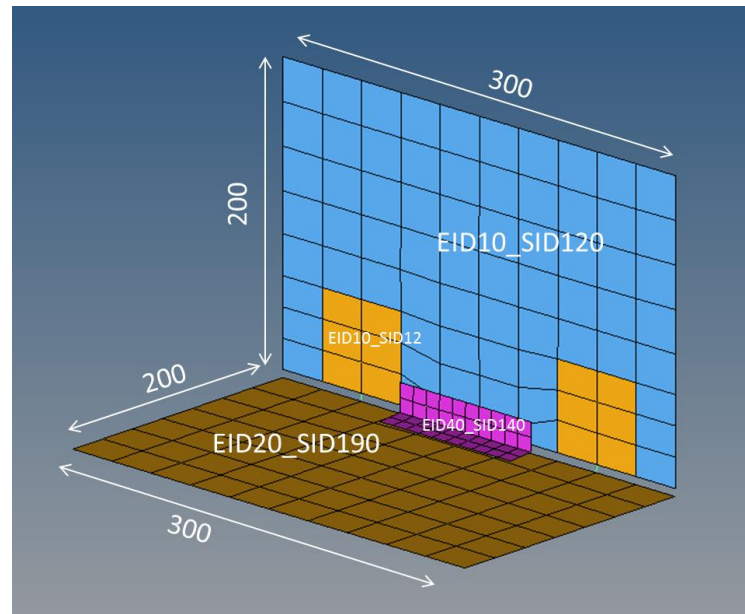


Abbildung 5.8: Modell 3

Um eine Schraubenverbindung zu ermöglichen, musste der Sandwichkern im Verschraubungsbereich verstärkt werden. Zu diesem Zweck wurde in der Wabenplatte SID120 der Wabenkern lokal entfernt und durch Hartgewebeklotz ersetzt. Diese Bereiche sind in Abbildung 5.8 anhand der orangefarbenen Farbe gekennzeichnet und tragen eine SID-Nummer 10. Zusätzlich werden die beiden Wabenplatten mit einem Aluminiumwinkel verschraubt. Dieser Winkel ist in Abbildung 5.8 mit der lila Farbe dargestellt und trägt die SID-Nummer 140.

Nach der bekannten Vorgehensweise werden als erstes die maximalen Verschiebungen am gesamten Bauteil unter Einwirkung einer Beschleunigung von 3g in globale Y-Richtung, die in entlang der kürzeren Kante der Wabenplatte SID190 definiert ist, ermittelt.

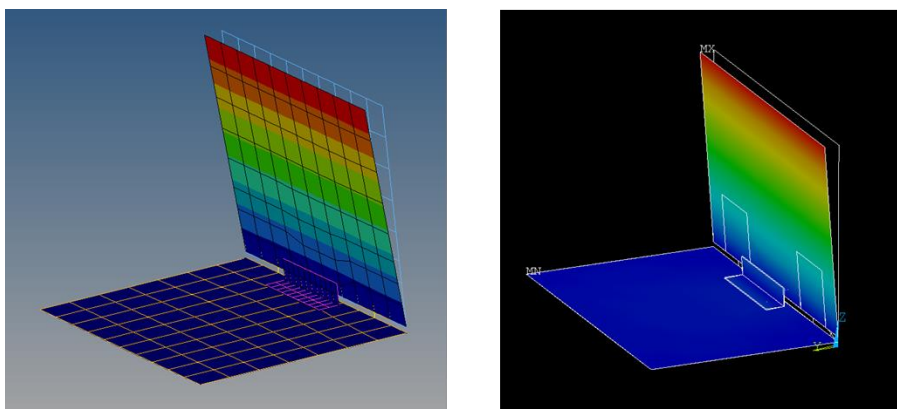


Abbildung 5.9: Verschiebung in Belastungsrichtung, Modell 3 – links OptiStruct, rechts ANSYS

In Abbildung 5.9 sind programmübergreifende Verschiebungsverläufe visuell dargestellt. Es ist ein ähnliches Muster zu erkennen, welches auf identische Berechnungswerte schließen lässt. Die ermittelten maximalen Verschiebungen sind in Tabelle 5.11 zusammengefasst.

Tabelle 5.11: Maximale Verschiebungen, Modell 3

Solver	Knoten-ID	Maximalverschiebung [mm]
ANSYS	1740	16,8513
OptiStruct	1740	16,92
Differenz	1740	0,0687

Aus Tabelle 5.11 ist, entsprechend den Erwartungen, zu erkennen, dass die maximalen Verschiebungen an demselben Knoten angreifen, der sich auf der oberen Kante der SID120 befindet, und vom Betrag her beinahe identisch sind. Die Differenz zwischen beiden, programmbezogenen, Werten liegt umgerechnet unter einem halben Prozent.

Als nächstes werden die Lagerreaktionskräfte analysiert und die Berechnungsergebnisse in Tabelle 5.12 zusammengefasst.

Tabelle 5.12: Lagerreaktionskräfte, Modell 2

Solver	Knoten-ID	Reaktionskraft [N]
ANSYS	793	10,1508
	803	10,1962
	776	7,7002
	786	7,6627
OptiStruct	793	10,0800
	803	10,1300
	776	7,7650
	786	7,7320
Differenz	793	0,0708
	803	0,0662
	776	0,0648
	786	0,0693

Wie im Modell 2 befinden sich die Lager in den Ecken der unteren Wabenplatte mit der SID190. Tabelle 5.12 kann entnommen werden, dass die Lagerreaktionskräfte programmübergreifend annähernd identisch sind und die Differenz zwischen den programmbezogenen Werten für jeweiligen Knoten nicht über einem Prozent liegen.

Im nächsten Schritt werden maximalen im Gesamtbauteil auftretenden Spannungen in Abhängigkeit von der Faserrichtung untersucht. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 5.13 zusammengefasst.

Tabelle 5.13: Maximal auftretenden Spannungen, Modell 3

Solver	EID	Lagennummer	Element-ID	Max.Elementspannung in X [Mpa]
ANSYS	20	1	390	7,276
OptiStruct	20	1	390	7,22
Differenz	20	1	390	0,0560
Solver	EID	Lagennummer	Element-ID	Max. Elementspannung in Y [Mpa]
ANSYS	20	1	393	3,6275
OptiStruct	20	1	393	3,667
Differenz	20	1	393	0,0395
Solver	EID	Lagennummer	Element-ID	Max. Scherspannung [Mpa]
ANSYS	20	1	391	2,449
OptiStruct	20	1	391	2,399
Differenz	20	1	391	0,05

Aus Tabelle 5.13 folgt, dass unabhängig von der Faserrichtung die maximalen Spannungen in der ersten, oberen, Lage der unteren Wabenplatte mit der SID190 (EID20) auftreten. Die Differenz zwischen den Messwerten ist minimal und deutet auf eine fehlerfreie Berechnung hin.

Als neuer Untersuchungsparameter wird hier zur Validierung der Makros die Schraubensimulation durchgeführt. Das zugehörige FE-Modell ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

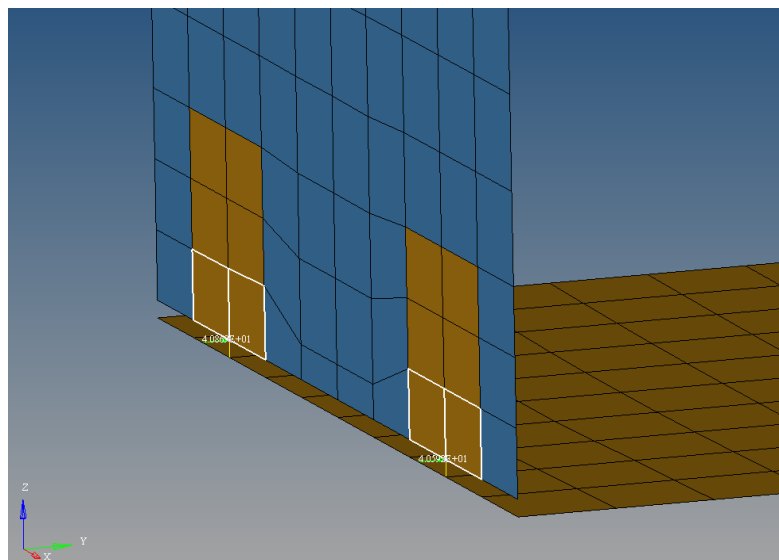


Abbildung 5.10: Darstellung der Schraubenverbindung, Modell 3

In Abbildung 5.10 ist der weiß markierte Bereich zur Schraubensimulation zu erkennen. Die Knoten, an denen die schraubensimulierenden Federn angreifen, sind von jeweils zwei weiß markierten Elementen umgeben. Die Ergebnisse der Schraubensimulation sind in Tabelle 5.14 zusammengefasst.



Tabelle 5.14: Schraubenberechnung, Modell 3

EID20 + EID10				
Solver	Knoten	Fx	Fy	Fz
ANSYS	1165	0,3	40,5	-45,6
	1168	-0,3	40,3	-45,2
OptiStruct	1165	0,3	40,9	-45,6
	1168	-0,3	40,6	-45,2
Differenz	1165	0	0,4	0
	1168	0	0,3	0

Die Gegenüberstellung programmübergreifend ermittelter Kräfte der Schraubenverbindung zeigt dass in diesem Fall die Differenz von Null erreicht werden konnte.

Als letzte Untersuchungsart wird nun die Modalanalyse durchgeführt. Diese ist nicht der Bestandteil der Makros, wird jedoch Zwecks des geplanten Umstieges von ANSYS auf HyperWorks ebenfalls untersucht. Es wird eine Untersuchung bis zu einer Anregungsfrequenz von 100 Hz durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.15 zusammengefasst.

Tabelle 5.15: Modalanalyse, Modell 3

Modalanalyse bis 100 Hz			
Solver	Mode	Eigenfrequenz [Hz]	Max. Verschiebung [mm]
ANSYS	1	8,7795	104,181
	2	64,812	50,556
	3	74,02	91,066
OptiStruct	1	8,789	104,513
	2	64,373	50,464
	3	73,391	90,98
Differenz	1	0,0095	0,332
	2	0,439	0,092
	3	0,629	0,086

Wie Tabelle 5.15 entnommen werden kann, traten im Anregungsbereich drei eigenfrequenten auf. Beide Berechnungsprogramme haben sowohl die auftretenden Eigenfrequenzen, als auch die dadurch verursachten Verschiebungen präzise ermitteln können. Die Differenz zwischen den programmbezogenen Messwerten ist minimal.

Somit kann festgehalten werden, dass nicht nur die Makros sondern auch die Solver einwandfrei funktionieren und geringe Abweichungen zwischen den Messwerten die Entscheidung für den Umstieg von ANSYS auf HyperWorks erleichtern.

## 5.4 Modell 4

Bei dem Modell 4 handelt es sich um ein kompliziertes FE-Modell, welches in großer Näherung dem Aufbau einer gesamten Waschräumeinheit entspricht. Dieses FE-Modell ist in Abbildung 5.11 dargestellt.

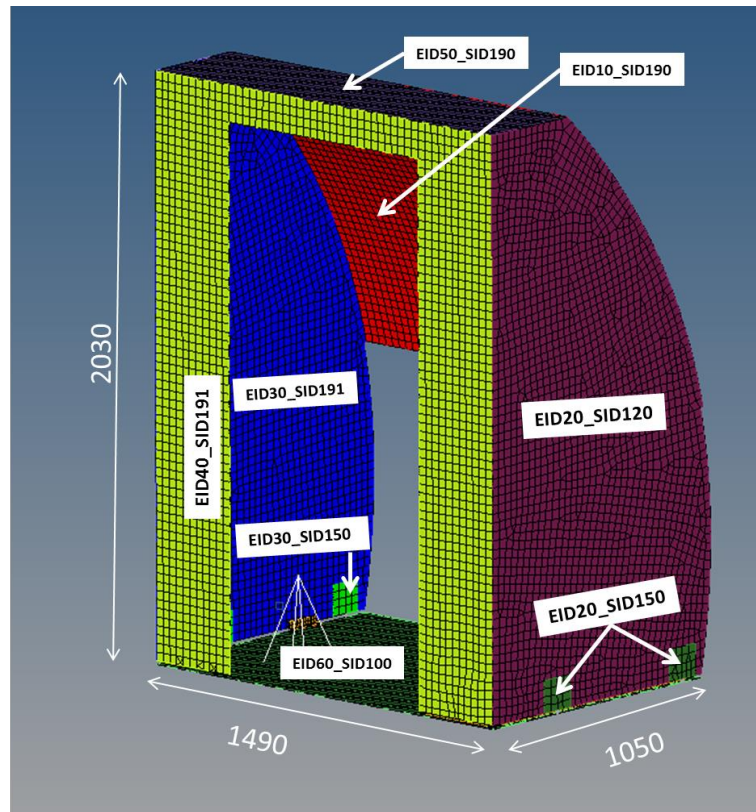


Abbildung 5.11: Modell 4

In Abbildung 5.11 sind Boden, zwei Seitenwände, Vorder- und Rückwand sowie die Decke einer waschräumeinheitähnlichen Struktur dargestellt. In diesem Modell treten alle zuvor untersuchte Verbindungsarten, wie Verzapfungs- und Schraubenverbindung auf, was die Komplexität des Modells verdeutlicht. Zusätzlich ist im Bereich der Bodenplatte ein RBE-Element zu erkennen. An der Spitze dieses Elementes befindet sich ein Massenelement, welches beispielhaft den Massenschwerpunkt der Toiletteneinheit repräsentiert. Einzelne Baugruppen sind wie gewohnt durch EID und SID gekennzeichnet.

Als erstes werden die maximal auftretenden Verschiebungen im ganzen Modell untersucht. Zu diesem Zweck wird das FE-Modell mit einer Beschleunigung von 3g in globale X-Richtung, entlang der langen Kante der Bodenplatte, belastet. Das visuelle Ergebnis der Berechnungen ist in Abbildung 5.12 dargestellt.

Aus Abbildung 5.12 ist zu erkennen, dass die maximalen Verschiebungen auf der unteren Kante der Rückwand auftreten. Diese Verformung wird durch die Durchbiegung der Seitenwände in Belastungsrichtung verursacht.

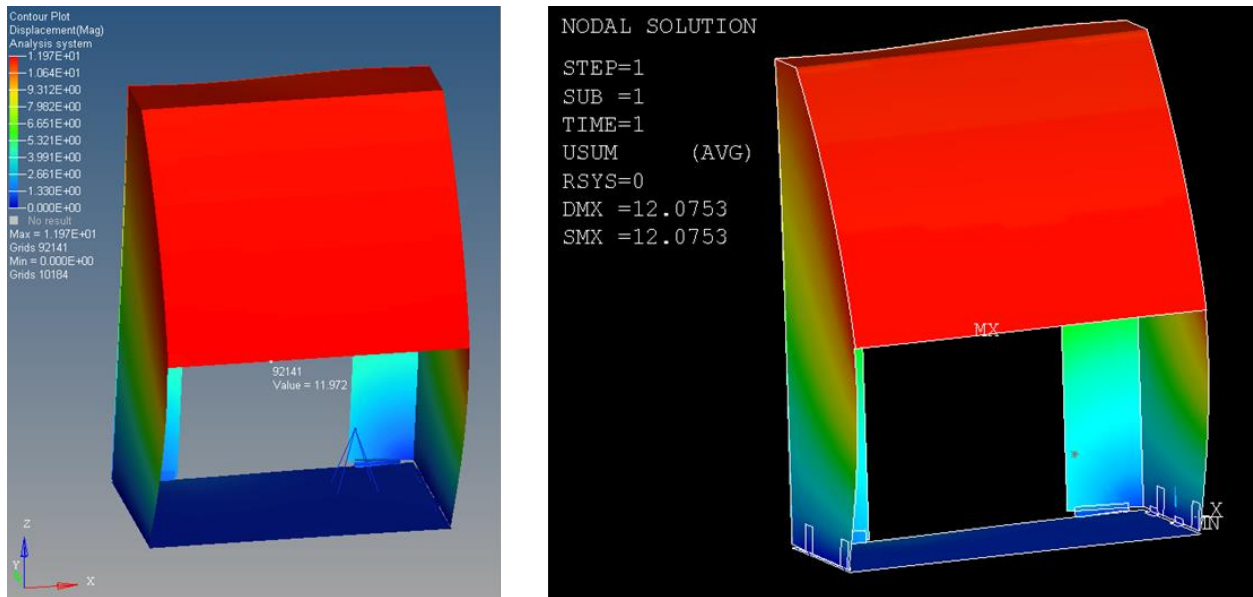


Abbildung 5.12: Maximale Verschiebungen, Modell 4 – links OptiStruct, rechts ANSYS

Die in Abbildung 5.12 dargestellten Berechnungsergebnisse beider Programme weisen einen ähnlichen Farb- und Konturverlauf, was auf identische Ergebnisse hindeutet. Die exakten aufgetretenen maximalen Verschiebungen sind in Tabelle 5.16 zusammengefasst.

Tabelle 5.16: Maximale Verschiebungen, Modell 4

Solver	Knoten-ID	Maximalverschiebung [mm]
ANSYS	92141	12,075
OptiStruct	92141	11,972
Differenz	1740	0,103

Tabelle 5.16 ist zu entnehmen, dass programmübergreifend die maximalen Verschiebungen ähnlich sind und die Differenz zwischen den beiden Werten unter einem Prozent liegt.

Im nächsten Schritt werden die Lagerreaktionskräfte untersucht. Dabei werden die, durch Schrauben mit der Bodenplatte verschraubten, Seitenwände gelagert, wie es anhand der Abbildungen 5.11 und 5.13 zu erkennen ist.

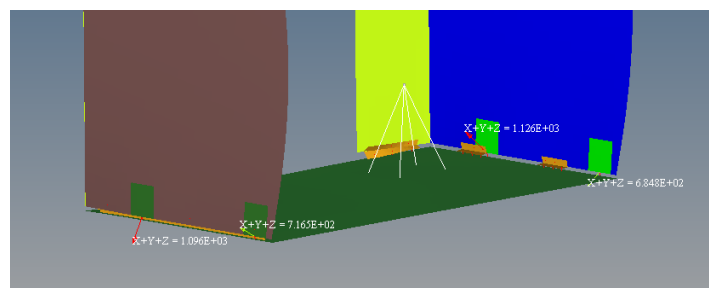


Abbildung 5.13: Lagerung des Modells 4

Die berechneten Lagerreaktionskräfte sind programmübergreifend in Tabelle 5.17 zusammengefasst.

Tabelle 5.17: Lagerreaktionskräfte, Modell 4

Solver	Knoten-ID	Reaktionskraft [N]
ANSYS	10184	687,56
	13045	1129,43
	137294	718,60
	139273	1097,90
OptiStruct	10184	684,80
	13045	1126,00
	137294	716,50
	139273	1096,00
Differenz	10184	2,76
	13045	3,43
	137294	2,10
	139273	1,90

Tabelle 5.17 ist zu erkennen, dass die ermittelten betragmäßigen Lagerreaktionskräfte bei beiden Programmen annähernd gleich sind. Die Differenz zwischen den Messwerten liegt unterhalb einem halben Prozent.

Weiterhin werden die maximal auftretenden Spannungen in dem gesamten Modell analysiert. Die visuellen Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildung 5.14 dargestellt.

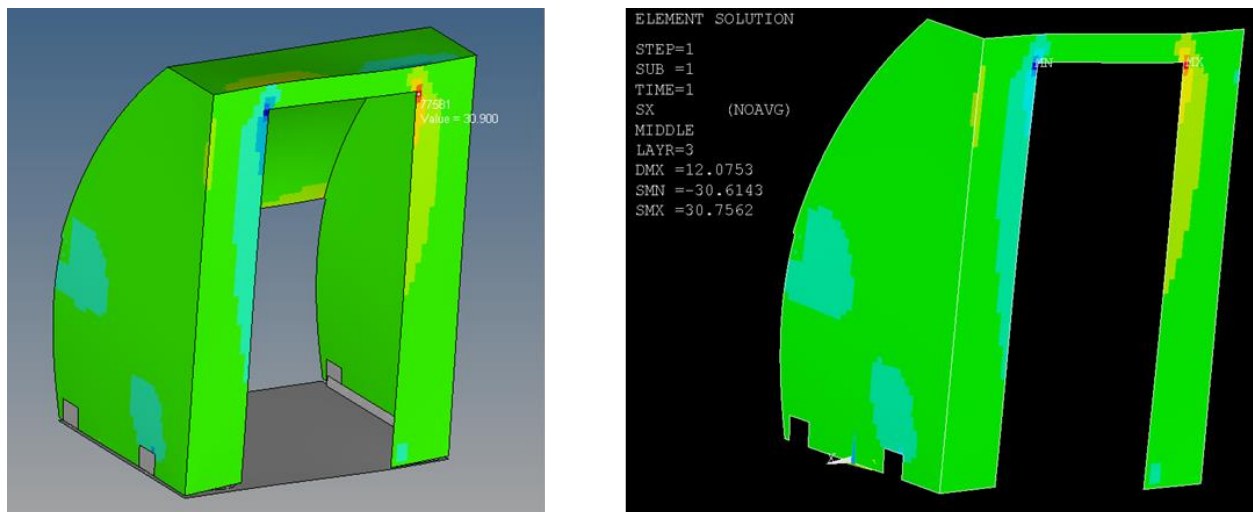


Abbildung 5.14: Spannungsverteilung in Faserrichtung, Modell 4 – links OptiStruct, rechts ANSYS

Wie Abbildung 5.14 zu entnehmen ist, zeigen beide Programme, gekennzeichnet durch die rote Farbe, dass die maximal auftretenden Spannungen in Faserrichtung im Bereich des Türausschnittes vorliegen. Die exakten Werte sind Tabelle 5.18 zu entnehmen.

Tabelle 5.18: Maximale Spannungen, Modell 4

Solver	EID	Lagennummer	Element-ID	Max.Elementspannung in X [Mpa]
ANSYS	40	3	77581	30,756
OptiStruct	40	3	77581	30,900
Differenz	40	3	77581	0,144
Solver	EID	Lagennummer	Element-ID	Max. Elementspannung in Y [Mpa]
ANSYS	40	3	77612	44,873
OptiStruct	40	3	77612	45,070
Differenz	40	3	77612	0,197
Solver	EID	Lagennummer	Element-ID	Max. Scherspannung [Mpa]
ANSYS	40	3	78099	6,663
OptiStruct	40	3	78099	6,596
Differenz	40	3	78099	0,067

Aus Tabelle 5.18 folgt, dass beide Programme unabhängig von der Faserrichtung annähernd gleiche Werte liefern. Die Differenz zwischen den programmbezogenen Messwerten liegt nicht über einem Prozent.

Um bei drei weiteren Untersuchungsparametern messbare Ergebnisse erzielen zu können, wurde die das Modell belastende Beschleunigung von 3 auf 9g erhöht. Folglich werden in Abbildung 5.15 die visuellen Ergebnisse der Versagenswerte nach dem Tsai-Wu-Verfahren dargestellt.

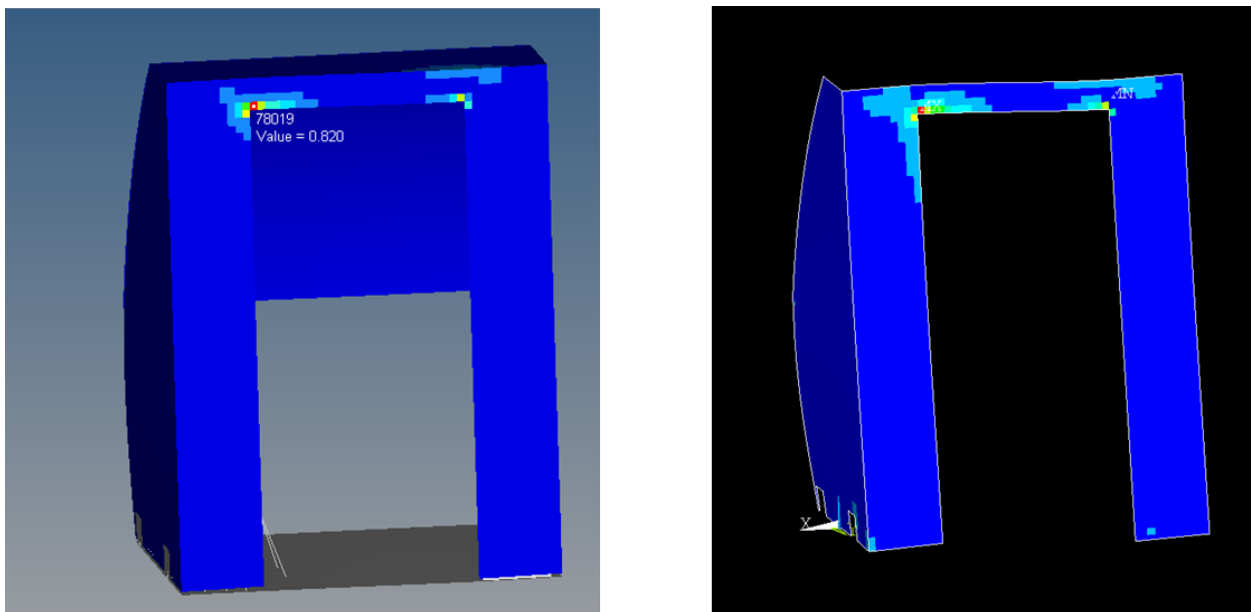


Abbildung 5.15: Verlauf der Tsai-Wu-Werte, Modell 4 – links OptiStruct, rechts ANSYS

Wie dem programmübergreifenden Farbverlauf in Abbildung 5.15 zu entnehmen ist, liegt der höchste Tsai-Wu-Wert, und somit der mögliche Versagensbereich, in der oberen linken Ecke des Türschwells.

Die exakt ermittelten maximalen Tsai-Wu-Werte sind in Tabelle 5.19 zusammengefasst.

Tabelle 5.19: Maximale Tsai-Wu-Werte, Modell 5

Solver	EID	Lagennummer	Element-ID	Tsai-Wi
ANSYS	40	3	78019	0,79
OptiStruct	40	3	78019	0,82
Differenz	40	3	78019	0,03

Aus Tabelle 5.19 folgt, dass die höchsten Tsai-Wu-Werte in der dritten Lage der Vorderwand mit der EID-Nummer 40 auftreten. Dabei liefert OptiStruct einen um ca. 3,7 Prozent höheren Wert. Zwar ist das die höchste zuvor aufgetretene Differenz, jedoch ist eine Abweichung unter fünf Prozent zulässig.

Um die Funktionsfähigkeit der Makros in einem komplizierten Modell zu prüfen, wird die Berschnung einer Verzapfungsverbindung durchgeführt und die Ergebnisse in Tabelle 5.20 zusammengefasst.

Tabelle 5.20: In Verzapfungsverbindung auftretende Kräfte, Modell 4

Solver	Element-ID	Knoten-ID von	Knoten-ID bis	Kraftkomponente in lok. X-Richtung [N]	Kraftkomponente in lok. Y-Richtung [N]	Kraftkomponente in lok. Z-Richtung [N]
ANSYS	71161	77998	89338	-5,99	0,19	-12,72
	71167	89338	89339	-4,23	-6,64	-3,31
	71179	89339	89340	-8,35	-4,89	-1,4
	71190	89340	89341	-11,27	-3,13	-1
	71199	89341	89342	-12,02	-1,33	-1,62
	71207	89342	89343	-10,92	0,44	-3,14
	71214	89343	89344	-8,03	2,17	-5,41
	71220	89344	89345	-3,31	3,93	-8,3
	71225	89345	89346	3,21	5,8	-11,6
	71229	89346	89347	11,13	7,85	-14,91
	71232	89347	89348	19,09	10,13	-17,07
	71234	89348	89349	23,56	12,23	-14,79
71235	89349	89350	14,24	28,53	1,88	
OptiStruct	71161	77998	89338	-7,38	0,97	-12,02
	71167	89338	89339	-5,35	-5,98	-1,97
	71179	89339	89340	-8,6	-4,29	-1,02
	71190	89340	89341	-11,34	-2,84	-0,84
	71199	89341	89342	-11,96	-1,23	-1,56
	71207	89342	89343	-10,73	0,4	-3,14
	71214	89343	89344	-7,7	1,99	-5,45
	71220	89344	89345	-2,88	3,62	-8,29
	71225	89345	89346	3,71	5,31	-11,52
	71229	89346	89347	11,56	7,13	-14,75
	71232	89347	89348	19,12	9,98	-16,99
	71234	89348	89349	22,57	11,44	-15,62
71235	89349	89350	15,56	28,46	2,4	
Differenz	71161	77998	89338	1,39	0,78	0,70
	71167	89338	89339	1,12	0,66	1,34
	71179	89339	89340	0,25	0,60	0,38
	71190	89340	89341	0,07	0,29	0,16
	71199	89341	89342	0,06	0,10	0,06
	71207	89342	89343	0,19	0,04	0,00
	71214	89343	89344	0,33	0,18	0,04
	71220	89344	89345	0,43	0,31	0,01
	71225	89345	89346	0,50	0,49	0,08
	71229	89346	89347	0,43	0,72	0,16
	71232	89347	89348	0,03	0,15	0,08
	71234	89348	89349	0,99	0,79	0,83
71235	89349	89350	1,32	0,07	0,52	

Der Aufbau der Tabelle 5.20 ist aus Kapitel 5.2 bereits bekannt. Hier wird lediglich darauf hingewiesen, dass die Berechnung der Verzapfungsverbindung zwischen den Wabenplatten EID30, Seitenwand, und EID50, Decke, erfolgt. Aus Tabelle 5.20 ist zu erkennen, dass beide Solver etwas abweichende Berechnungsergebnisse liefern. Die Abweichungen bleiben jedoch in den meisten Fällen im Fünf-Prozent-Bereich.

Zuletzt wird erneut die Modalanalyse bis zu einer Anregungsfrequenz von 100 Hz am Gesamtmodell durchgeführt. Die visualisierten Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 5.16 dargestellt.

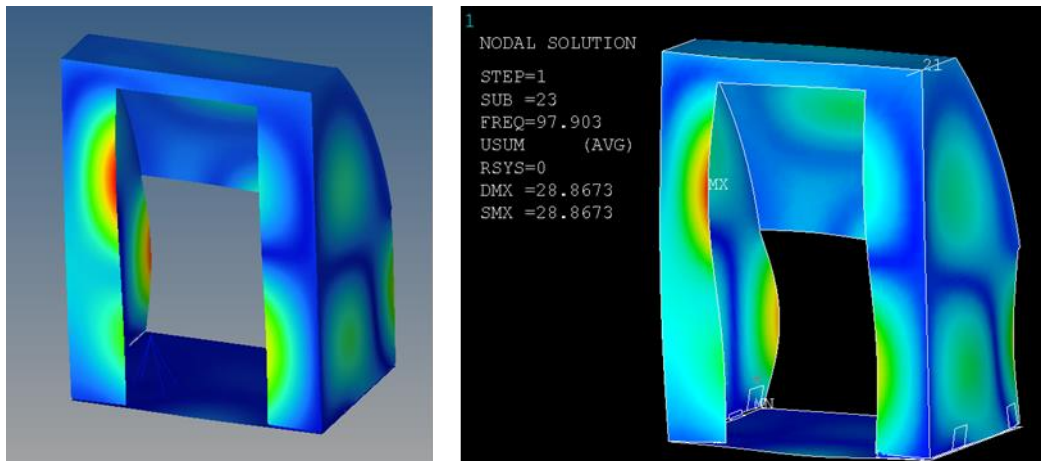


Abbildung 5.16: Eigenmoden der 23. Eigenfrequenz, Modell 4 – links OptiStruct, rechts ANSYS

Die in Abbildung 5.16 dargestellten Berechnungsergebnisse basieren auf der letzten, im Anregungsbereich bis 100 Hz vorliegenden, auftretenden Eigenfrequenz. Die hohe Anzahl der vorkommenden Eigenfrequenzen resultiert aus der hohen Anzahl der modellierten Komponenten.

Übersichtshalber werden in Tabelle 5.21 die ersten sechs und die letzten zwei vorkommenden Eigenfrequenzen mit den dadurch verursachten Verschiebungen zusammengefasst.

Trotz der hohen Anzahl an Komponenten lässt sich aus Tabelle 5.21 ablesen, dass die beiden FE-Programme zehlich hohe Genauigkeit aufweisen. Bis auf die 22-te Eigenfrequenz, deren Abweichung unter vier Prozent liegt, haben weitere Eigenfrequenzen deutlich geringere Abweichungen.

Die durchgeführten Untersuchungen sowie kontinuierlich gesteigerte Komplexität der FE-Modelle haben die Funktionsfähigkeit der erstellten Makros, inklusive realisierter Wünsche aber auch die übersichtlichen und verständlichen Ausgabedateien haben gezeigt, dass mit Hilfe dieser Arbeit der Umstieg von ANSYS auf HyperWorks im geforderten Toleranzbereich bewerkstelligt werden kann.

Tabelle 5.21: Modalanalyse, Modell 4

Modalanalyse bis 100 Hz			
Solver	Mode	Eigenfrequenz [Hz]	Max. Verschiebung [mm]
ANSYS	1	8,63	9,82
	2	13,41	7,24
	3	22,83	13,50
	4	34,25	74,80
	5	36,37	6,71
	6	39,65	9,99
	.		
	.		
	22	96,49	39,15
	23	97,90	28,86
OptiStruct	1	8,68	9,80
	2	13,39	7,29
	3	27,71	13,46
	4	34,34	74,91
	5	36,24	6,83
	6	39,39	9,97
	.		
	.		
	.		
	22	96,89	40,69
23	98,44	28,98	
Differenz	1	0,05	0,02
	2	0,02	0,04
	3	4,89	0,04
	4	0,09	0,11
	5	0,14	0,12
	6	0,25	0,02
	.		0,00
	.		0,00
	.		0,00
	22	0,40	1,54
23	0,53	0,12	



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, einem Industrieunternehmen, DIEHL Comfort Modulen GmbH, den Umstieg von einem FEM-Berechnungsprogramm auf das Andere, von ANSYS auf HyperWorks, zu ermöglichen und dabei möglichst hohen Automatisierungsgrad zu gewährleisten.

Die Umsetzung der Anforderungen und die anschließende Validierung haben gezeigt, dass die gestellten Ziele im vollen Umfang realisiert werden konnten. Die erstellten Makros haben ihre Funktionsweise erfolgreich bewiesen und konnten in die Benutzeroberflächen der Teilprogramme von HaperWorks, HyperView und HyperMesh, erfolgreich implementiert werden. Der hohe Automatisierungsgrad in Bezug auf Ermittlung der jeweiligen Berechnungsergebnisse, Findung des Speicherpfades sowie die Bildung und Erstellung der Ausgabedateien, wurden von den testenden Anwendern als äußerst bequem und selbsterklärend empfunden.

Die Ergebnisse der Validierung haben gezeigt, dass die Abweichungen in den Berechnungsergebnissen zwischen ANSYS und HyperWorks im Toleranzbereich liegen, wodurch der erforderter Umstieg auf HyperWorks bedenkenlos gestartet werden kann. Außerdem wurden die Ausgabedateien so konzipiert, dass sie problemlos von den weiterführenden im MS-Excel programmierbaren Makros eingelesen und zur Dokumentationserstellung eingesetzt werden können.

Somit konnten alle gesetzten Anforderungen erfüllt und zusätzliche Wünsche umgesetzt werden. Die Auswertungsdauer konnte erheblich reduziert werden.

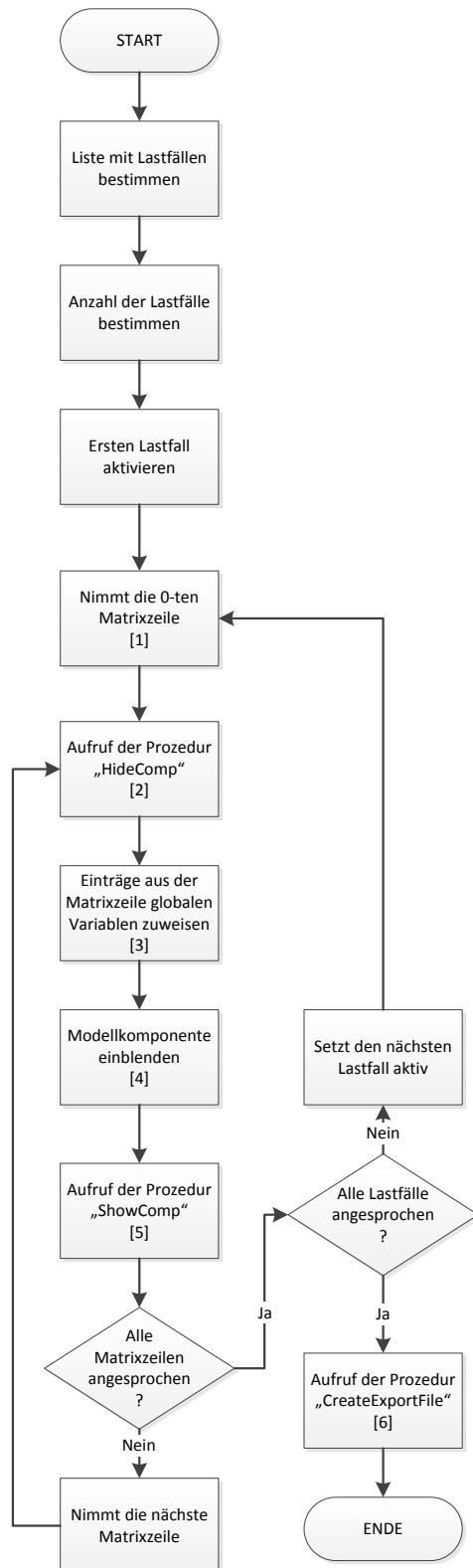
Wird die Firmenleitung die Entscheidung fällen, den Umstieg von ANSYS auf HyperWorks zu starten, so wird diese Abreit zu einem erheblichen Einsparungspotential in diesem Unternehmen beitragen.

Als weiterführendes Ziel kann die Automatisierung der Modellierungsphase genannt werden. Dabei könnte es sich um die automatische Modellierung einer Schraubenverbindung handeln, indem Federelemente durch einfaches Anklicken der zu verbindenden Knoten erstellt werden. Weiterhin wäre es wünschenswert, wenn ein weiteres Makro beim Modellieren anhand der IDs den jeweiligen Strukturen die zugehörigen Materialeigenschaften und Lagenaufbauten zuweist.

## 7 Literatur- und Quellenverzeichnis

- 1 Miguel Luiz Bucelem & Klaus-Jürgen Bathe, The Mechanics of Solids and Structures- Hierarchical Modeling and the Finite Element Solution, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011
- 2 Bernd Klein, Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, Springer Vieweg Verlag 2012
- 3 Thomas Westermann, Modellbildung und Simulation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- 4 Johan Blaauwendraad, Plates and FEM, Springer Science + Business Media B.V. 2010
- 5 Schröder Will & Martin Ken, The Visualization Toolkit, An Object-Oriented Approach To 3D Graphics, vierte Ausgabe, Kitware Inc. 2006
- 6 HyperWorks Desktop Reference Guide, <http://www.altairhyperworks.com>
- [7] DIEHL Comfort Modules GmbH, interne Unterlagen
- [8] DIEHL Comfort Modules GmbH, interne Unterlagen
- [9] DIEHL Comfort Modules GmbH, interne Unterlagen

## 8 Anhang A: Flussdiagramme



## Kurzbeschreibung ausgewählter Prozeduren und Prozedurschritten

- [1] In diesem Prozedurschritt greift das Programm auf die nullte Zeile der Matrix mit relevanten Modellangaben, auf die im weiteren Verlauf des Flussdiagramms zurückgegriffen wird.
- [2] Aufruf der Prozedur „HideComp“, die alle Komponente des Modells ausblendet.
- [3] In diesem Prozedurschritt greift das Programm auf die Einträge der aktuellen Matrixzeile und weist diese für einen folgenden Zugriff den globalen Variablen zu.
- [4] Zur Bestimmung relevanter Größen soll zunächst die entsprechende Modellkomponente wieder eingeblendet werden. Dies geschieht in diesem Prozedurschritt. Die Angaben zu der betroffenen Modellkomponente werden der aktuellen Matrixzeile entnommen.
- [5] Aufruf der Prozedur „ShowComp“. Zu jeder in [4] dargestellten Komponente werden mit Hilfe dieser Prozedur folgende Parameter ermittelt:

Maximale und minimale Zug- und Druckspannungen in Faserrichtung und senkrecht dazu sowie die maximale Scherspannung. Des Weiteren wird der größte Tsai-Wu-Wert ermittelt und die dazugehörigen Zug- und Druckspannungen sowie Scherspannung.

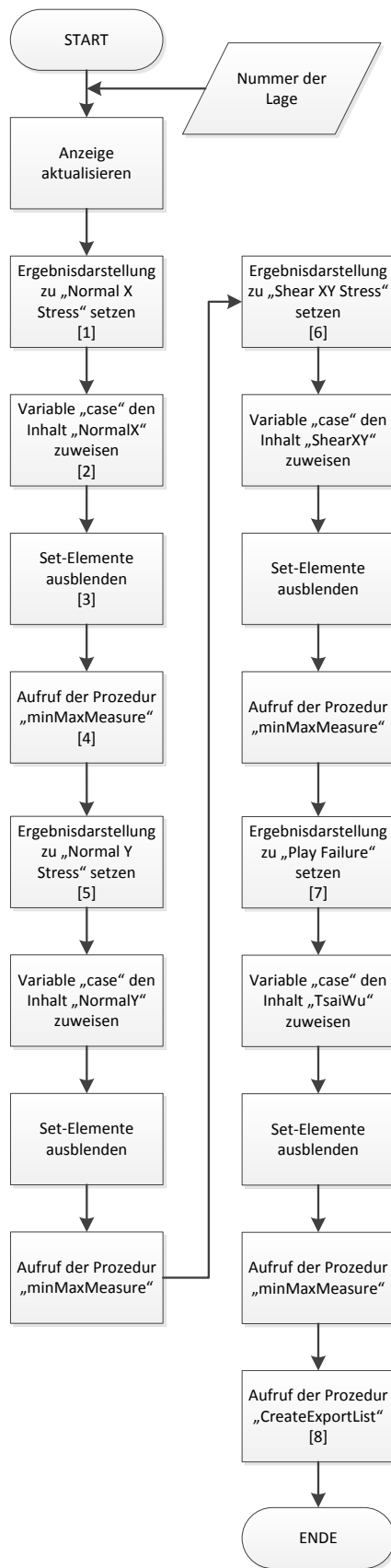
Nachdem die gesuchten Größen zu der aktuellen Komponente gefunden wurden, wird eine global deklarierte Liste namens „exportList“ mit diesen Größen ergänzt.

Während des Prozedurablaufes von „ShowComp“ werden weitere Prozeduren kontrolliert aufgerufen, auf die gesondert in folgenden Flussdiagrammen eingegangen wird.

Als Übergabeparameter bekommt diese Prozedur die Nummer der Lage aktueller Modellkomponente.

- [6] Falls die zuvor beschriebenen Schritte für jeden Lastfall ausgeführt wurden, so ist die zu exportierende Liste komplett aufgebaut und kann auf dem Datenträger abgelegt werden. Dies geschieht durch das Aufrufen der Prozedur namens „CreateExportFile“.

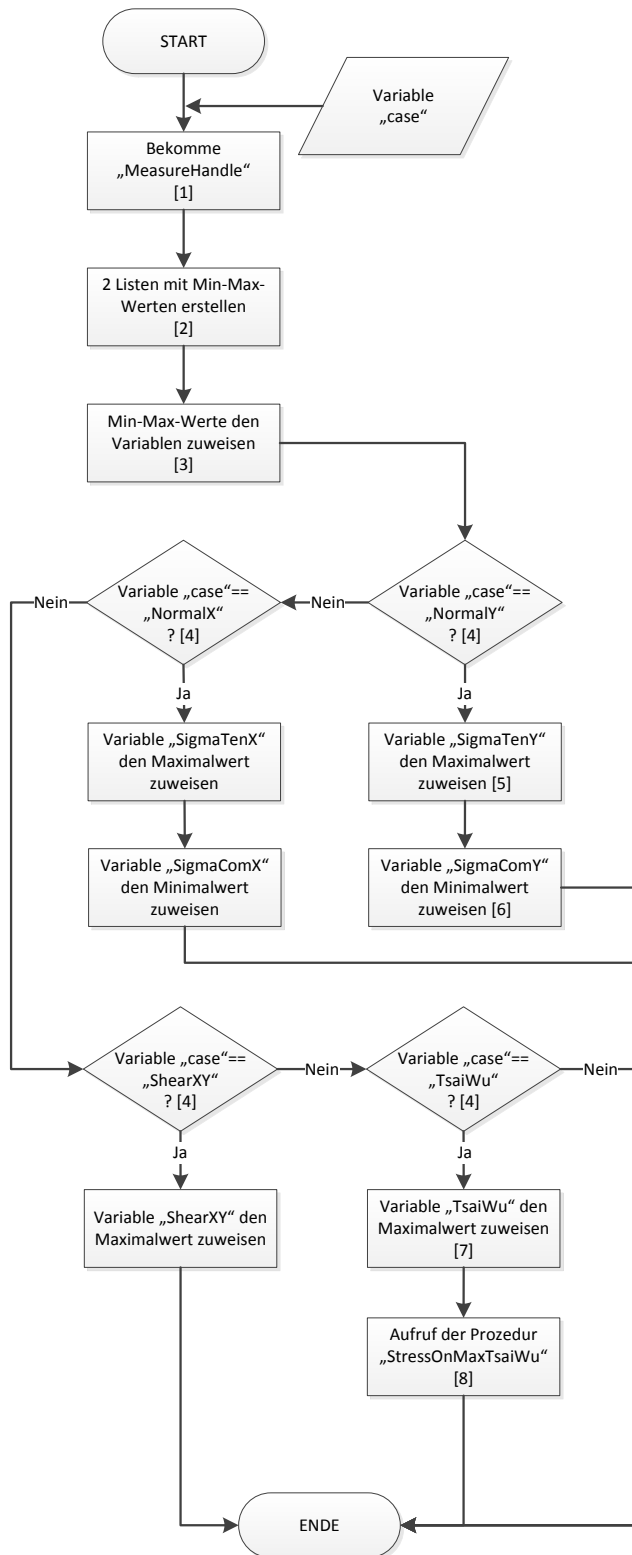
Abbildung A.3.1: Prozedur „SelectLoadcaseAndPanel“



**Kurzbeschreibung ausgewählter Prozeduren und Prozedurschritten**

- [1] In diesem Prozessschritt wird die Ergebnisdarstellung im HV-Tool namens „Contour“ auf folgende Ausgabe umgestellt:
  - Result Type = „Composite Stresses“, „Normal X Stress“ und „Layer Nummer“
  - Discrete color = true.
- [2] In diesem Prozedurschritt wird einer Variable namens „case“ ein String „Normal X“ zugewiesen. Mit Hilfe dieser Variable wird in der folgenden Prozedur „minMaxMeasure“ eine Fallunterscheidung bei der Ermittlung der gesuchten Werten getroffen.
- [3] Sofern ein Elementen-Set durch den Anwender in der Benutzeroberfläche selektiert wurde, werden darin vorhandenen Elemente in der angezeigten Modellkomponente ausgeblendet. Dadurch erfolgt keine Auswertung vordefinierter Elemente, bei denen unrealistische Spannungswerte zu erwarten sind.
- [4] Aufruf der Prozedur „minMaxMeasure“. Diese Prozedur bestimmt den größten und den kleinsten Wert der angezeigten Elemente aktueller Modellkomponente bei zuvor eingestellter Ergebnisdarstellung und weist diese je nach Fallunterscheidung den jeweiligen globalen Variablen zu.
- [5] In diesem Prozessschritt wird die Ergebnisdarstellung im HV-Tool namens „Contour“ auf folgende Ausgabe umgestellt:
  - Result Type = „Composite Stresses“, „Normal Y Stress“ und „Layer Nummer“
  - Discrete color = true.
- [6] In diesem Prozessschritt wird die Ergebnisdarstellung im HV-Tool namens „Contour“ auf folgende Ausgabe umgestellt:
  - Result Type = „Composite Stresses“, „Shear XY Stress“ und „Layer Nummer“
  - Discrete color = true.
- [7] In diesem Prozessschritt wird die Ergebnisdarstellung im HV-Tool namens „Contour“ auf folgende Ausgabe umgestellt:
  - Result Type = „Composite Failure“, „Ply Failure“ und „Layer Nummer“
  - Discrete color = true.
- [8] Nachdem im Schritt [4] alle gesuchten Größen den jeweiligen globalen Variablen zugewiesen wurden, wird eine global deklarierte Liste namens „exportList“ mit Hilfe der Prozedur „CreateExportList“ durch neu ermittelten Werte ergänzt. Auf Basis dieser Liste wird im weiteren Verlauf die endgültige Datei mit der Bezeichnung „strs.dat“ auf dem Datenträger erstellt.

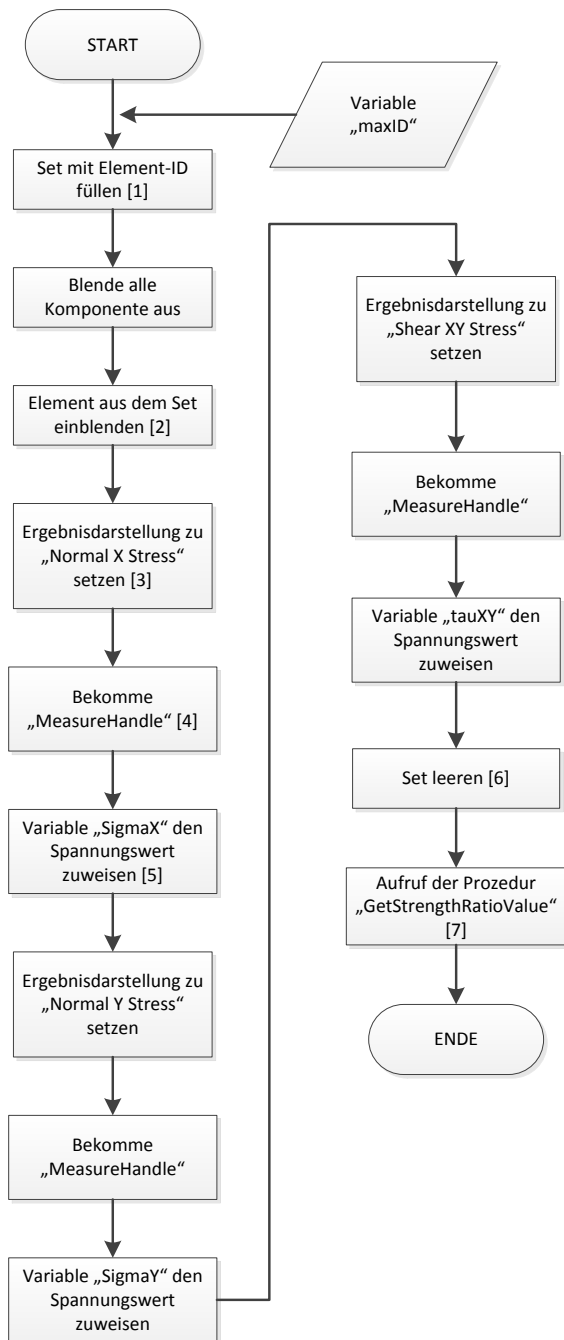
**Abbildung A.3.2: Prozedur „ShowComp“**



**Kurzbeschreibung ausgewählter Prozeduren und Prozedurschritten**

- [1] In diesem Prozedurschritt wird ein Objekt der Messwerkzeug-Klasse erstellt. Ohne dass dieses Objekt weiter spezifiziert wird, beinhaltet es Angaben zu den Minimal- und Maximalwerten und dazugehörigen Knoten-ID's.
- [2] Nach dem Erstellen des Messwerkzeugobjektes werden in diesem Prozedurschritt zwei Listen erstellt. Eine der beiden Listen enthält minimale und maximale Größen der gewählten Ergebnisdarstellung. Die andere Liste beinhaltet zu den Extremwerten dazugehörige Knoten ID's.
- [3] In diesem Prozedurschritt werden die Extremwerte und die dazugehörige ID's aus den zuvor erstellten Listen den jeweiligen lokalen Variablen zugewiesen.
- [4] Die gesuchten Werte werden nun je nach Fallunterscheidung den zugehörigen globalen Variablen übergeben.
- [5] [6] Beinhaltet die Übergabe-Variable „case“ den String: „NormalY“, so werden in der Fallunterscheidung [4] die Prozedurschritte [5] [6] ausgeführt. Dabei werden der Maximalwert der globalen Variable „SigmaTenY“ und der Minimalwert der globalen Variable „SigmaComY“ zugewiesen.
- [7] Beinhaltet die Übergabe-Variable „case“ den String: „TsaiWu“, so findet eine Zuweisung des Maximalwertes der global deklarierten Variable „TsaiWu“ statt. Des Weiteren wird eine Prozedur namens „StressOnMaxTsaiWu“ aufgerufen.
- [8] In diesem Prozedurschritt wird eine Prozedur namens „StressOnMaxTsaiWu“ aufgerufen. Mit Hilfe dieser Prozedur werden zu dem größten TsaiWu-Wert die zugehörige Zug- Druck- und Schubspannungen ermittelt. Diese Prozedur wird ausführlicher in den Flussdiagramm 3.4 behandelt.

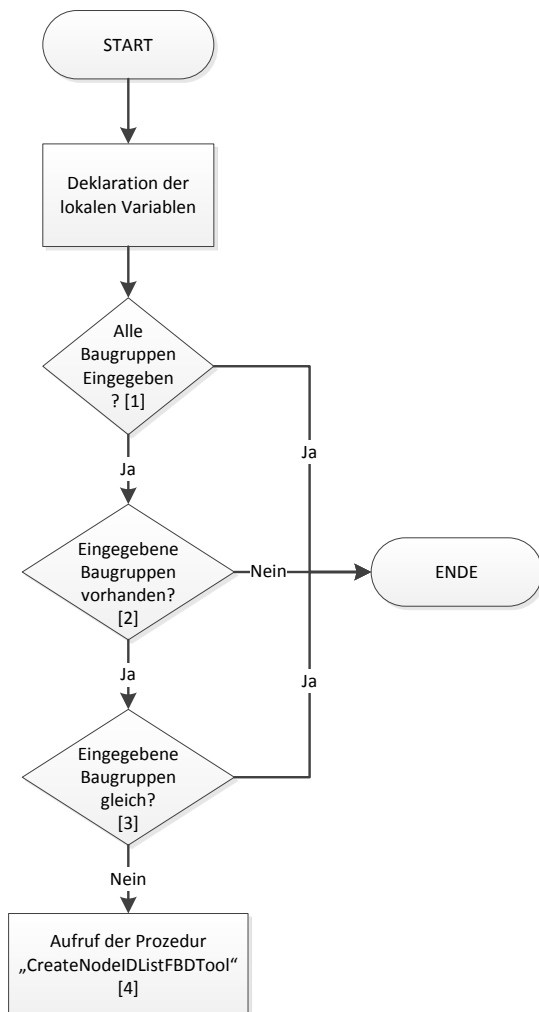
**Abbildung A.3.3: Prozedur „MinMaxMeasures“**



### Kurzbeschreibung ausgewählter Prozeduren und Prozedurschritten

- [1] Zur Bestimmung der Spannungen an dem Element mit dem größten Tsai-Wu-Wert, wird dieser der Prozedur die Variable „maxID“ übergeben.
- In diesem Prozedurschritt wird ein bereits erstellter Set mit der zuvor erwähnten Element-ID befüllt.
- [2] Nachdem alle Komponente des Modells ausgeblendet sind, wird das Element aus dem Set, zu dem maximalen TsaiWu-Wert, eingeblendet.
- [3] In diesem Prozessschritt wird die Ergebnisdarstellung im HV-Tool namens „Contour“ auf folgende Ausgabe umgestellt:
- Result Type = „Composite Stresses“, „Normal X Stress“ und „Layer Nummer“
  - Discrete color = true.
- [4] In diesem Prozedurschritt wird ein Objekt der Messwerkzeug-Klasse erstellt. Dieses Objekt beinhaltet bereits ohne weitere Spezifizierung Angaben zu dem gesuchten Maximalwert.
- [5] In diesem Prozedurschritt wird der globalen Variable der gesuchte Spannungswert zugewiesen. Dies erfolgt durch den Zugriff auf das in Prozedurschritt [4] erstellte Objekt der Messwerkzeug-Klasse.
- [6] Nachdem die zu dem größten Tsai-Wu-Wert dazugehörigen Spannungen ermittelt worden, wird in diesem Prozedurschritt der benutzte Set entleert.
- [7] In diesem Prozedurschritt wird die Prozedur namens „GetStrengthRatioValue“ aufgerufen. Mit Hilfe dieser Prozedur wird sogenannter „Strength Ratio (SR)“ aus allen zuvor ermittelten Spannungen bestimmt.

**Abbildung A.3.4:** Prozedur „StressOnMaxTsaiWu“

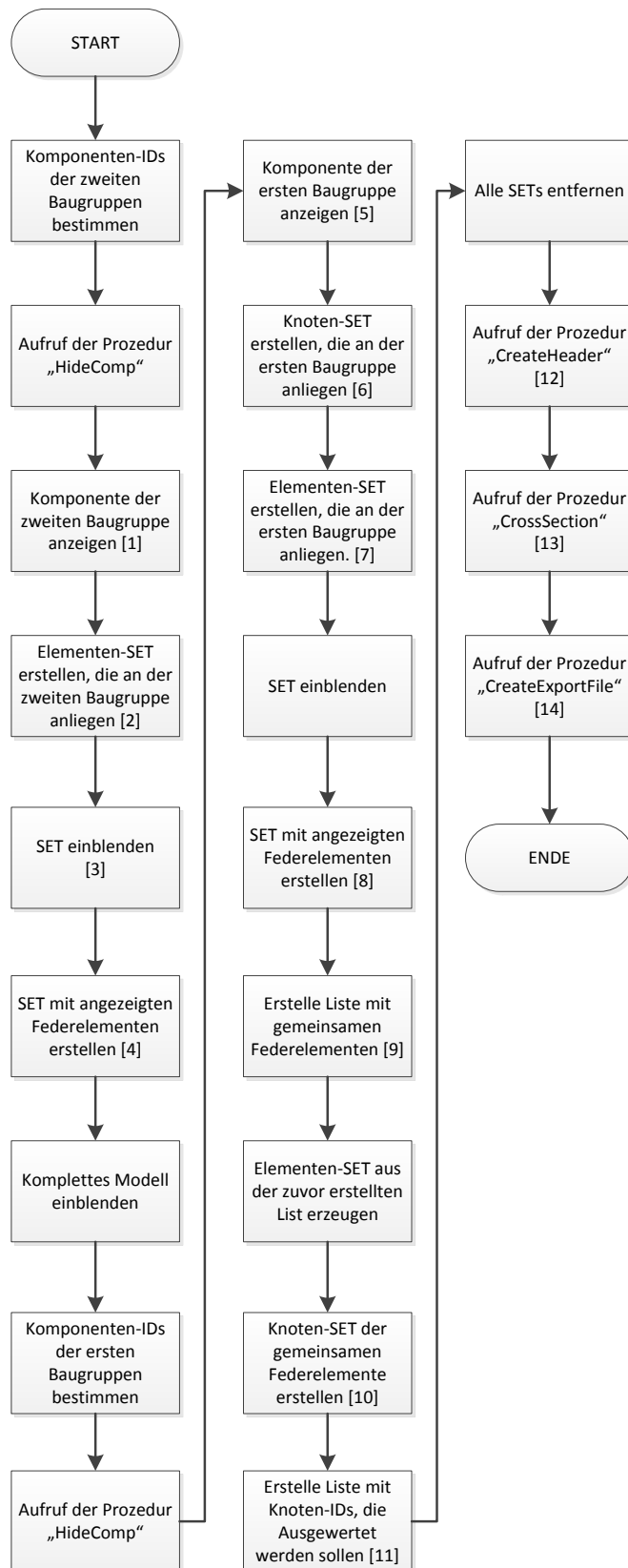


### Kurzbeschreibung ausgewählter Prozeduren und Prozedurschritten

Mit Hilfe dieser Prozedur wird die Anwendereingabe auf die Richtigkeit untersucht.

- [1] Diese Fallunterscheidung überprüft, ob alle, für die Erstellung der Ausgabedateien, nötigen Eingaben erfolgt und somit keine leeren Felder vorhanden sind.
- [2] Mit Hilfe dieser Fallunterscheidung wird überprüft, ob die eingegebenen Baugruppen auch im Modell vorhanden sind.
- [3] Da die Analyse der Schraubverbindungen zwischen zwei denselben Baugruppen nicht möglich ist, werden mit Hilfe dieser Fallunterscheidung solche fehlerhaften Eingaben ausgeschlossen.
- [4] Wurde alles richtig eingegeben, so kann die Bestimmung der gesuchten Werte und die Erstellung der Ausgabedatei erfolgen. Dazu wird zunächst die Prozedur „CreateNodeIDListFBDTool“ aufgerufen. Diese Prozedur wird für jede, in der Benutzeroberfläche definierte, Ausgabedatei aufgerufen.

**Abbildung A.4.1:** Prozedur „CheckEID“

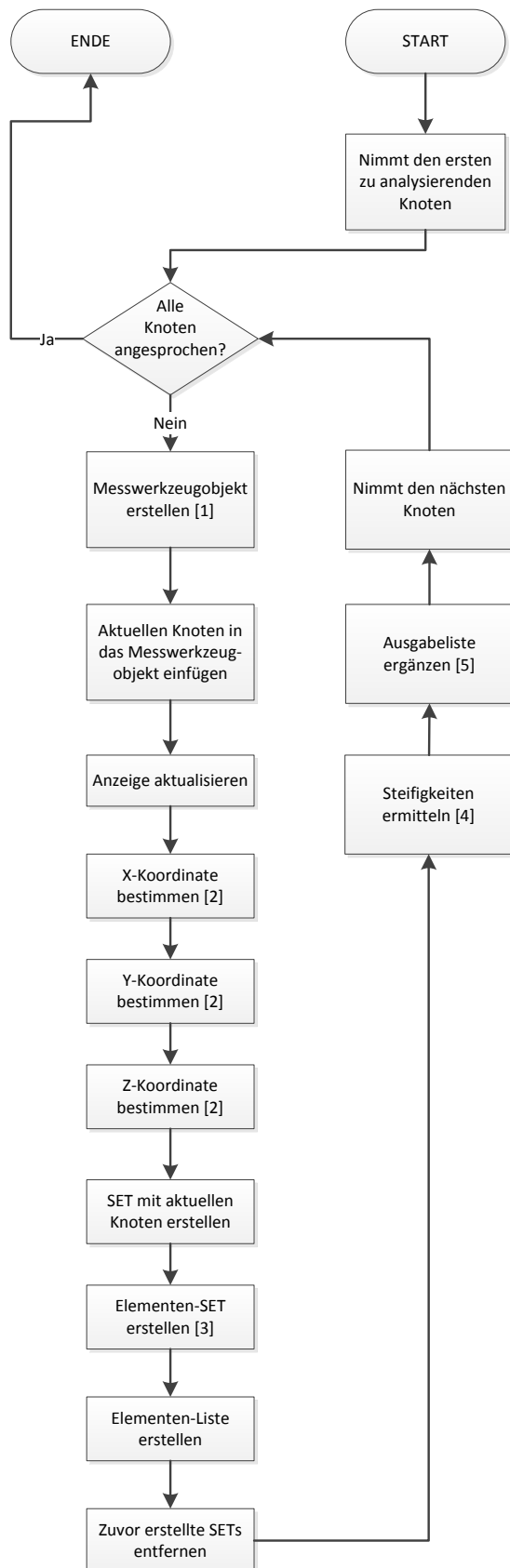


### Kurzbeschreibung ausgewählter Prozeduren und Prozedurschritten

- [1] In diesem Prozedurschritt werden alle Komponente, die zu der zweiten Baugruppe angehören, eingeblendet.
- [2] An dieser Stelle werden alle, an der zweiten Baugruppe anliegenden Elemente in einem SET zusammengestellt.
- [3] Alle Elemente aus dem zuvor erstellten SET werden angezeigt.
- [4] Mittels aller angezeigten Elemente wird nun ein SET erstellt, der nur die Federelemente beinhaltet.
- [5] In diesem Prozedurschritt werden nur die Komponenten, die zu der ersten Baugruppe angehören, eingeblendet.
- [6] An dieser Stelle wird ein SET erstellt, der alle Knoten zu der ersten Baugruppe beinhaltet.
- [7] In diesem Prozedurschritt werden alle, an der ersten Baugruppe anliegenden Elemente, in einem SET zusammengestellt und eingeblendet.
- [8] Nun wird ein zweiter SET mit Federelementen erstellt. Diesmal mit denen, die an der ersten Baugruppe anliegen.
- [9] Aus den beiden SETs mit Federelementen wird in diesem Prozedurschritt eine Liste mit gemeinsamen Federelementen erstellt.
- [10] Von den gefundenen, gemeinsamen Federelementen wird in diesem Prozedurschritt eine Knotenliste erstellt, zwischen denen diese Federelemente aufgebaut worden sind.
- [11] An dieser Stelle werden im Schritt [10] und [6] erstellte Listen verwendet. Aus diesen beiden Knotenlisten wird eine Liste erstellt, die die gemeinsamen Knoten beinhaltet und somit bei der Bestimmung gesuchter Werte verwendet wird.
- [12] Aufruf der Prozedur „CreateHeader“. Mit Hilfe dieser Prozedur wird der erste Teil der Ausgabedatei erstellt. Darin werden die Koordinaten sowie die Steifigkeiten der untersuchter Knoten festgehalten.
- [13] Aufruf der Prozedur „CrossSection“. Diese Prozedur leitet alle vorbereitenden Maßnahmen zur Bestimmung der gesuchten Werte ein. Dabei wird zunächst ein Objekt der „FBDCtrl“ Klasse erstellt, um den vollen Zugriff auf das HyperView FBT-Tool zu gewährleisten.
- [14] An dieser Stelle ist die zu exportierende List komplett aufgebaut und kann exportiert werden. Dies geschieht mittels der Prozedur „CreateExportFile“.

Abbildung A.4.2: Prozedur „CreateNodeIDListFBTool“



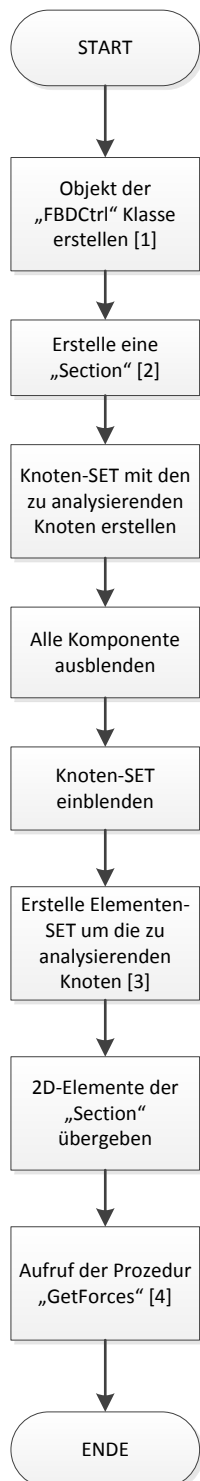


### Kurzbeschreibung ausgewählter Prozeduren und Prozedurschritten

- [1] Zur Bestimmung der Koordinaten an den zu analysierenden Knoten wird in diesem Prozedurschritt zunächst ein Messwerkzeugobjekt vom Typ „Position“ erstellt.
- [2] Nachdem der aktuelle Knoten dem Messwerkzeugobjekt zur Verfügung gestellt und die Anzeige aktualisiert wird, erfolgt in diesen Schritten die Bestimmung der zugehörigen globalen Koordinaten.
- [3] Bei der Bestimmung der am aktuellen Knoten angreifenden Federelemente wird in diesem Prozedurschritt ein Elementen-SET mit allen an diesem Knoten angreifenden Elementen erzeugt.
- [4] Anhand der am ermittelten Elemente anliegenden Knoten und der Importdatei kann eine eindeutige Zuweisung der Steifigkeiten den jeweiligen Federelemente getroffen werden.
- [5] Nachdem an dieser Stelle die Koordinaten und die Steifigkeiten des aktuellen Knotens ermittelt worden sind, erfolgt die Vervollständigung der Ausgabeliste.

Die zuvor beschriebenen Prozedurschritte werden für jeden zu analysierenden Knoten durchgeführt.

**bbildung A.4.3:** Prozedur „CreateHeader“

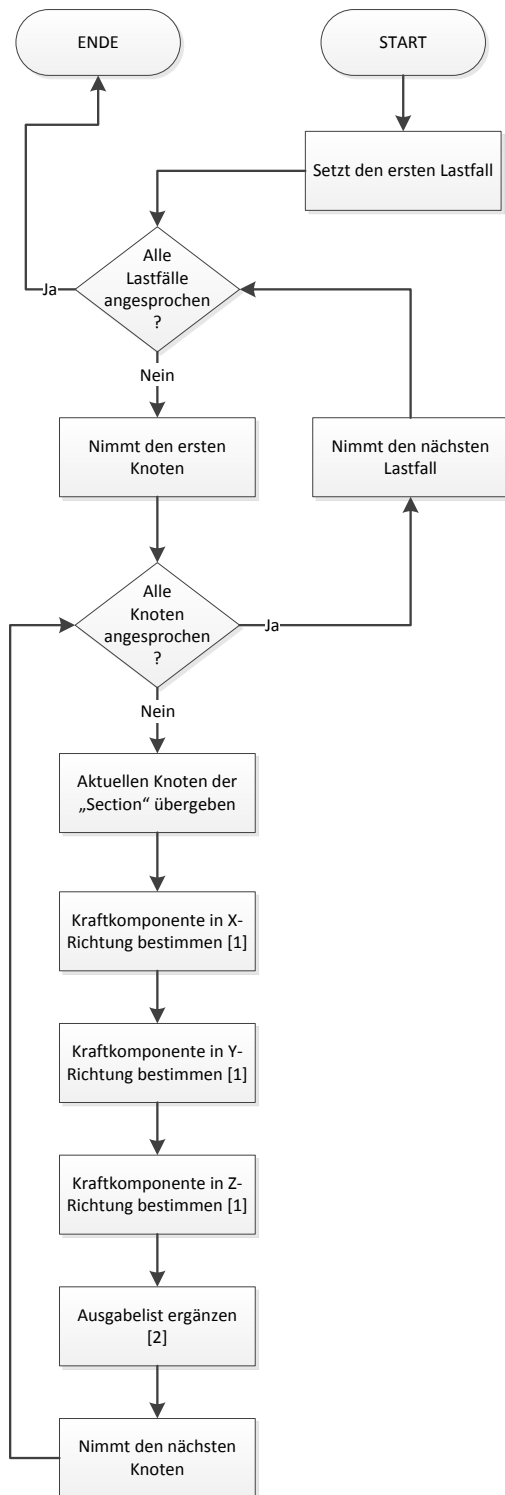


#### Kurzbeschreibung ausgewählter Prozeduren und Prozedurschritten

Mit Hilfe dieser Prozedur werden alle vorbereitenden Maßnahmen zur Bestimmung der an den zu analysierenden Knoten wirkenden Schnittkräfte getroffen.

- [1] Bei der Bestimmung der Schnittkräfte in HyperView wird ein Tool mit der Bezeichnung „FBD“ verwendet. Um darauf den Zugriff zu erlangen, wird in diesem Prozedurschritt ein Objekt der „FBDctrl“ Klasse erzeugt.
- [2] Die eigentliche Bestimmung der Schnittkräfte erfolgt mittels einer In FBD-Tool erstellten „Section“. Zur Visualisierung der Schnittkräfte soll diese „Section“ die zu analysierenden Knoten und die umliegenden 2D-Elemente von dem Anwender erhalten.
- [3] Bei der Findung der 2D-Elemente um die zu analysierenden Knoten wird zunächst ein Knoten-SET mit betroffenen Knoten und ableitend davon ein Elementen-SET erstellt.
- [4] Nachdem die gefundenen 2D-Elemente der „Section“ zur Verfügung gestellt sind, erfolgt der Aufruf der Prozedur „GetForces“. Mit Hilfe dieser Prozedur werden die Schnittkräfte an den betroffenen Knoten ermittelt.

**Abbildung A.4.4:** Prozedur „CrossSection“

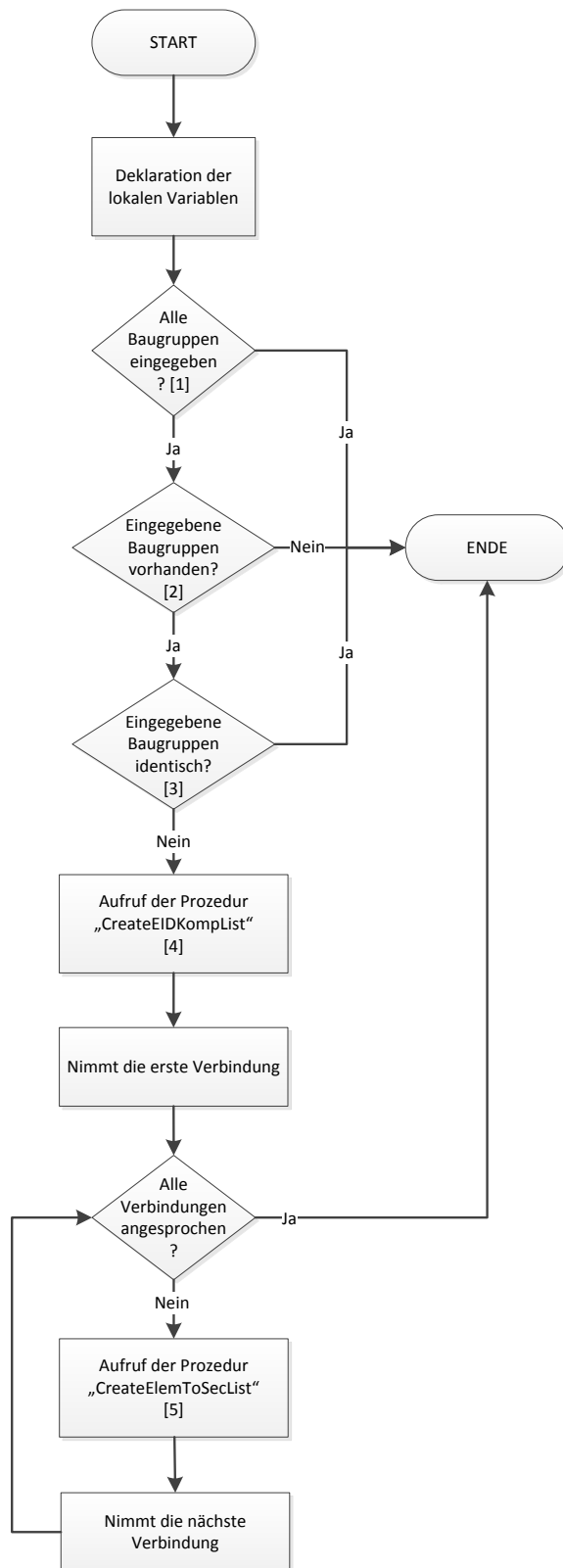


#### Kurzbeschreibung ausgewählter Prozeduren und Prozedurschritten

Mit Hilfe dieser Prozedur erfolgt die Bestimmung der Schnittkräfte an den zuvor ermittelten Knoten. Die darin vorhandenen Prozedurschritte werden für jeden Lastfall sowie für jeden zu analysierenden Knoten wiederholt.

- [1] Nachdem ein bestimmter Lastfall aktiviert und ein Knoten zur Auswertung der „Section“ übergeben wurde, erfolgt in diesen Prozedurschritten die Bestimmung der einzelnen Kraftkomponenten.
- [2] Die zuvor bestimmten Kraftkomponenten werden in diesem Prozedurschritt geordnet der Ausgabeliste übergeben.

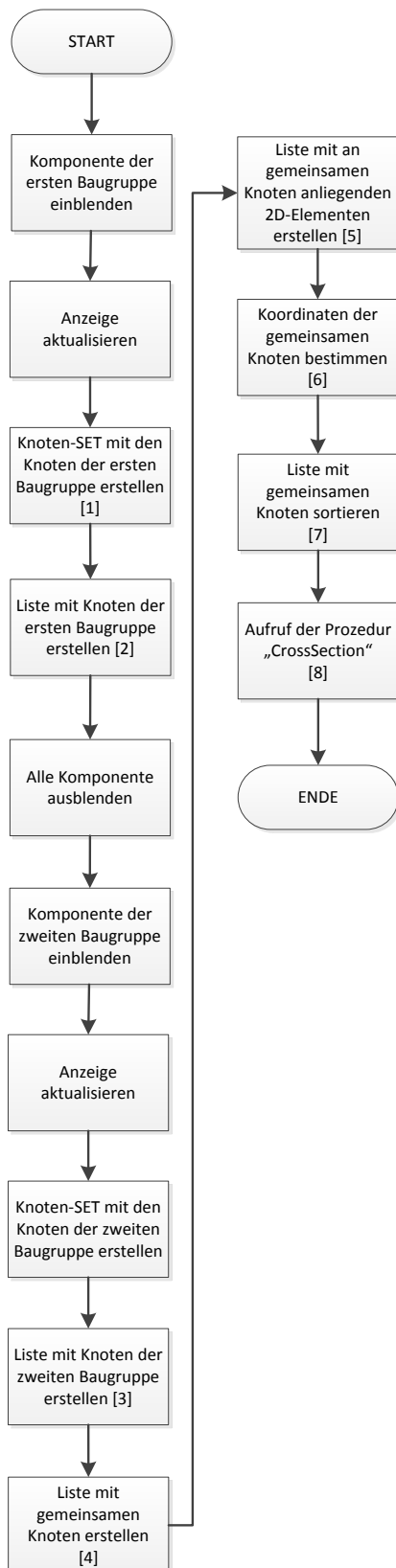
**Abbildung A.4.5:** Prozedur „GetForces“



#### Kurzbeschreibung ausgewählter Prozeduren und Prozedurschritten

- [1] Diese Fallunterscheidung überprüft, ob alle für die Erstellung der Ausgabedateien nötigen Eingaben erfolgt und somit keine leeren Felder vorhanden sind.
- [2] Mit Hilfe dieser Fallunterscheidung wird überprüft, ob die eingegebenen Baugruppen auch im Modell vorhanden sind.
- [3] Diese Fallunterscheidung überprüft, ob es bei den eingegebenen Baugruppen um die gleichen handelt.
- [4] Aufruf der Prozedur „CreateEIDKompList“. Diese Prozedur erstellt für jede im Modell vorhandene EID-Nummer eine eigene global deklarierte Liste und füllt diese mit zugehörigen Komponenten-IDs.
- [5] Aufruf der Prozedur „CreateElemToSecList“. Mit Hilfe dieser Prozedur wird eine sortierte Liste mit Knoten-IDs verbundener Baugruppen zur weiteren Analyse erstellt. Des Weiteren wird ein Elementen-SET erzeugt, dessen Elemente bei der Ermittlung der Schnittkräfte in die „Sektion“ eingefügt werden.

**Abbildung A.5.1:** Prozedur „CheckEID“

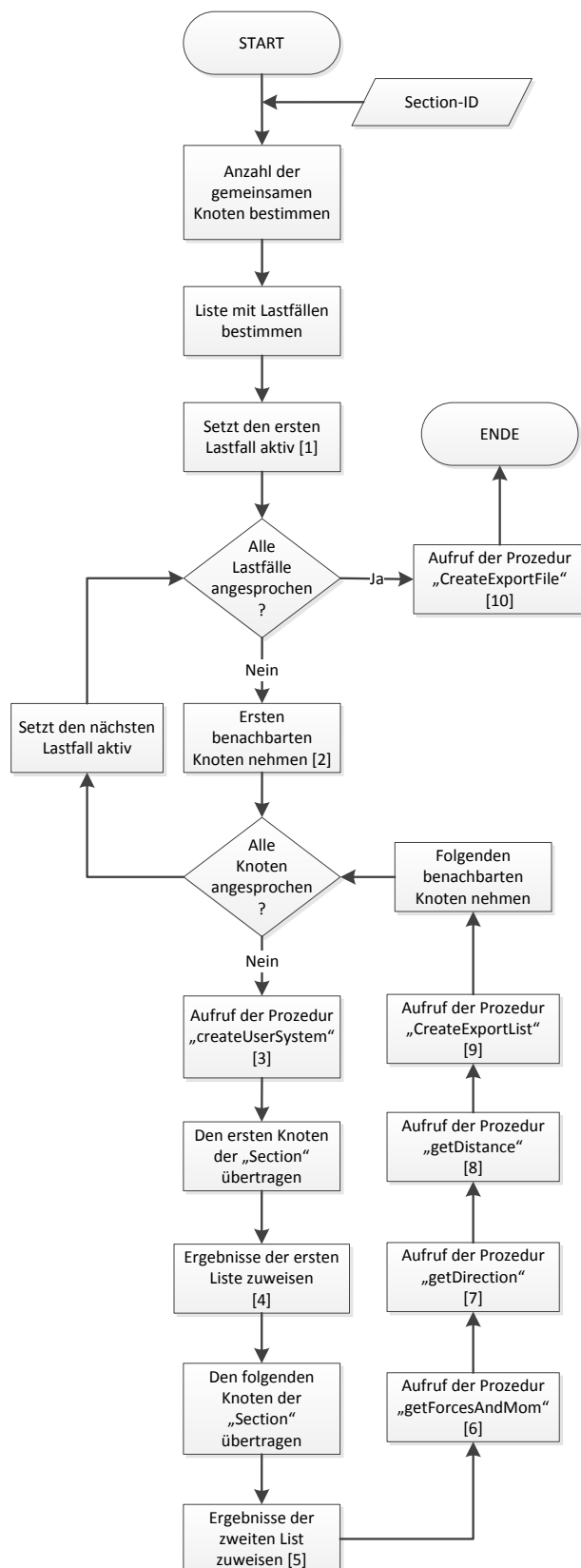


### Kurzbeschreibung ausgewählter Prozeduren und Prozedurschritten

- [1] Bei der Bestimmung gemeinsamer Knoten der in Verzafungsverbinding zusammengesetzter Baugruppen werden zunächst die Komponente der ersten Baugruppe einblendend und die Anzeige aktualisiert. Mittels der aktuellen Darstellung werden in diesem Prozedurschritt alle angezeigten Knoten der ersten Baugruppe einem dafür erstellten Knoten-SET übergeben.
- [2] Mit Hilfe des im Prozedurschritt [1] erstellten Knoten-SETs wird eine Liste erstellt und mit im Knoten-SET vorhandenen Knoten-IDs befüllt.
- [3] Bei der Findung der gemeinsamen Knoten müssen weiterhin die zuvor beschriebenen Schritte [1] und [2] wiederholt werden. In diesem Prozedurschritt wird eine neue Liste erstellt und mit Knoten-IDs aus dem zweiten Knoten-SET befüllt.
- [4] In diesem Prozedurschritt werden die zuvor erstellten Listen mit Knoten-IDs verglichen. Alle übereinstimmenden Knoten werden einer separaten global deklarierten Liste übergeben.
- [5] In diesem Prozedurschritt werden an den gemeinsamen Knoten anliegenden Elemente der ersten Baugruppe ermittelt. Mit Hilfe dieser Elemente wird eine fehlerfreie Darstellung gesuchten Schnittkräfte und -momente ermöglicht.
- [6] In diesem Prozedurschritt werden die globalen Koordinaten der gemeinsamen Knoten ermittelt.
- [7] In diesem Prozedurschritt wird mittels der zuvor ermittelten globalen Koordinaten die Liste mit gemeinsamen Knoten in der richtigen Reihenfolge sortiert.
- [8] Aufruf der Prozedur „CrossSection“. Diese Prozedur erstellt zunächst Objekt der „FBDctrl“ Klasse, in dem zusätzlich eine „Secrion“ erzeugt wird. Dadurch wird die folgende Ermittlung der gesuchten Werte ermöglicht.

Am Ende dieser Prozedur wird eine weitere Prozedur namens „exportForces“ aufgerufen.

Abbildung A.5.2: Prozedur „CreateElemToSecList“



### Kurzbeschreibung ausgewählter Prozeduren und Prozedurschritten

- [1] Nach der Bestimmung der Anzahl gemeinsamer Knoten wird eine Liste von, in der Ergebnisdatei vorhandenen, Lastfällen erstellt. In diesem Prozedurschritt wird der erste Lastfall aus der zuvor erstellten Liste aktiviert.  
  
Alle weiteren Prozedurschritte werden für jeden weiteren Lastfall wiederholt.
- [2] In diesem Prozedurschritt werden die ersten beiden benachbarten Knoten zur Ermittlung der Streckenbelastung selektiert.
- [3] Aufruf der Prozedur „createUserSystem“. Diese Prozedur erstellt mittels der beiden benachbarten Knoten ein lokales KOS.
- [4] In diesem Prozedurschritt wird die erste Liste mit zuvor ermittelten Schnittkräften und -momenten am ersten Knoten gebildet.
- [5] In diesem Prozedurschritt wird die zweite Liste mit zuvor ermittelten Schnittkräften und -momenten am zweiten Knoten gebildet.
- [6] Aufruf der Prozedur „getForcesAndMom“. Mit Hilfe dieser Prozedur werden die einzelnen Streckenbelastungen ermittelt.
- [7] Aufruf der Prozedur „getDirection“. Diese Prozedur übergibt die Koordinaten der jeweiligen Knoten den dafür global deklarierten Variablen.
- [8] Aufruf der Prozedur „getDistance“. Diese Prozedur bestimmt den Abstand benachbarter Knoten und übergibt diesen der dafür global deklarierten Variable.
- [9] Aufruf der Prozedur „CreateExportList“. Mit Hilfe dieser Prozedur wird die zu exportierende Liste geordnet vervollständigt.
- [10] Aufruf der Prozedur „CreateExportFile“. Diese Prozedur exportiert die zuvor erstellte Ausgabeliste in das Modellverzeichnis. Die so entstandene Text-Datei wird von derselben Prozedur definitionsgemäß umbenannt.

**Abbildung A.5.3:** Prozedur „ExportForces“