

Bachelorthesis

Prüfungsexemplar

Name: André Greschat
Matrikelnummer: 1858061
Studiengang: Maschinenbau,
Entwicklung/Konstruktion

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät: Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion

Thema:

Automatisierter Aufbau von Finite-Element-Modellen zur Verbindung von Faserverbundbauteilen

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing Thomas Grätsch
2. Prüfer: Dipl.-Ing. Bengt Abel (Bertrandt AG)

Abgabe: 28.02.2011

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung

Formelverzeichnis

Indizes

Abkürzungen

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Einleitung

1.	Grundlagen.....	1
1.1	Faser-Kunststoff-Verbunde im Flugzeugbau	1
1.2	Laminatverbindungen	3
1.3	Huthformel	4
1.4	Klassische Laminattheorie	9
1.5	Bruchkriterium nach Tsai-Wu	12
1.6	Programmablaufpläne.....	14
1.7	Finite-Element-Methode.....	15
2	Laminieren von Übergängen	19
2.1	Problemstellung.....	19
2.2	Vorgehensweise	20
2.3	Das 2D-Modell.....	23
2.3.1	Aufbau des 2D-Modells	23
2.3.2	Vorbereitungen der Rechnungen.....	26
2.3.3	Erzeugung der Nastran-Eingabedateien	29
2.3.4	Programmierte Auswertung der durch Nastran erstellten Punch-Dateien.....	35
2.3.5	Auswertung der 2-Schicht-Kombinations-Berechnungen.....	36
2.4	Das 3D Modell	44
2.4.1	Aufbau des Modells	44
2.4.2	Auswertung und Vergleich.....	46
2.5	Aufstellen der Bewertungsmatrix.....	48
2.6	Realisierung des Programms zur Rampenerstellung	51
2.6.1	Vorgehensweise	51
2.6.2	Programmbeschreibung.....	54
2.6.3	Ergebnisse	56
2.6.4	Auswertung	59
2.7	Aussicht.....	65
3	Vernieten und Verschrauben von Laminaten.....	66
3.1	Schwerpunktsspinne	68
3.1.1	Vorgehensweise	68
3.1.2	Realisierung des Programms	71
3.2	Orthogonalspinne.....	74
3.2.1	Vorgehensweise	74
3.2.2	Realisierung des Programms	78

3.3	Bolzen-Steifigkeitsbestimmung.....	82
3.3.1	Vorgehensweise	82
3.3.2	Realisierung des Programms	85
	<i>Zusammenfassung.....</i>	91
	<i>Literaturverzeichnis.....</i>	92
	<i>Anlagen</i>	

Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von Herrn André Greschat

Matrikel-Nummer: 1858061

Thema: Automatisierter Aufbau von Finite-Element-Modellen zur Verbindung von Faserverbundbauteilen

Schwerpunkte:

Wenn CFK-Bauteile/Baugruppen optimal, fasergerecht ausgelegt werden, können in unterschiedlichen Bereichen eines Bauteils/Baugruppe unterschiedliche Lagenaufbauten entstehen. Verbindet man diese Bereiche in der FEM entstehen oft Störstellen durch Steifigkeitssprünge. In der FEM „ziehen“ solche Störstellen die Last an, was meistens dazu führt, dass die Struktur nicht nachgewiesen werden kann. Durch eine Verfeinerung der Störstelle in der FEM mit z.B. elastischen Nieten oder „sanften“ Übergängen kann man das Verhalten verbessern. Diese Übergänge sind allerdings aufwendig zu modellieren.

André Greschat wird im Rahmen seiner Bachelorthesis das Thema „Automatisierter Aufbau von Finite-Element-Modellen zur Verbindung von Faserverbundbauteilen“ bearbeiten und zwei bis drei Prozesse für Laminatverbindungen erarbeiten. Die Aufgabe umfasst folgende Einzelpunkte:

- Einarbeitung in die klassische Laminattheorie
- Einarbeitung in das Versagenskriterium nach Tsai-Wu
- Einarbeitung in die CAE Infrastruktur des Unternehmens
- 1. Verbindung: Laminieren von Übergängen:
 - Untersuchung von 2-Schicht und 3-Schicht Stößen mittels eines einfachen Schalen-FEM-Modells hinsichtlich der Hauptdehnungen und des Versagenskriteriums nach Tsai-Wu
 - Untersuchung von Stößen von Laminaten mit unterschiedlicher Lagenanzahl mittels eines einfachen Schalen-FEM-Modells hinsichtlich der Hauptdehnungen und des Versagenskriteriums nach Tsai-Wu
 - Überprüfung einzelner Stoßgeometrien mittels eines Volumen-FEM-Modells
 - Ableitung von Gestaltungs- und Modellierungs-Regeln für Laminatstöße
 - Automatisierung der laminierten Übergänge in Altair HyperMesh
- 2. Verbindung: Nieten von Laminaten
 - Einarbeitung in die HUTH-Formel zur Bestimmung von Nietsteifigkeiten
 - Automatisierung der Nietmodellierung in HyperMesh
 - Automatische Steifigkeitsbestimmung der Nieten nach der HUTH-Formel
- Anwendung der automatisierten Prozesse auf ein exemplarisches Bauteil
- Kritische Diskussion und Dokumentation der Ergebnisse

Formelverzeichnis

a	Huthformelfaktor zur Unterscheidung der Bolzenverbindung
b	Huthformelfaktor zur Unterscheidung der Materialien
c	Huthformelfaktor zur Unterscheidung der Schnittigkeit
K	Steifigkeit
T, t	Materialstärke
E	Elastizitätsmodul
d	Durchmesser
A	Fläche, Steifigkeit des Mehrschichtverbundes
σ	Spannung
τ	Scherspannung
F	Kraft
v	Querkontraktionszahl
ε	Dehnung
γ	Scherdehnung
Q	Steifigkeit
G	Schubmodul
X	Maximal zulässige Spannung in x-Richtung
Y	Maximal zulässige Spannung in y-Richtung
S	Maximal zulässige Scherspannung
SR	„Strength Ratio“
n	Anzahl
P	Hauptdehnung
f, g	Funktion
s	Schrittweite
L	Länge

Indizes

x	x-Richtung im Laminatkoordinatensystem
y	y-Richtung im Laminatkoordinatensystem
z	z-Richtung im Laminatkoordinatensystem
1	x-Richtung im Materialkoordinatensystem
2	y-Richtung im Materialkoordinatensystem
3	z-Richtung im Materialkoordinatensystem
6	Rotation um z-Achse im Materialkoordinatensystem
s	Senkrecht
p	Parallel
t	„tension“, Zug
c	„compression“, Druck
S	Schwerpunkt

Abkürzungen

CFK	Kohlenstoffverstärkter Kunststoff
PAP	Programmablaufplan
UD	Unidirektional
FEM	Finite-Elemente-Methode
1D	Eindimensional
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
E-Modul	Elastizitätsmodul
PCOMP	Layered Composite Element Property
TCL	Tool command language
B	bolted (Verschraubt)
R	riveted (Vernietet)
M	Metallverbindung
C	Composit (Laminat)
Ti	Titan
Al	Aluminium

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Phönix [SFG Wershofen e.V.].....	1
Abbildung 1.2: Vergleich Aluminium – CFK [Bergmann, 1992]	2
Abbildung 1.3: CFK-Einsatz im A380 [Rückert, Airbus].....	2
Abbildung 1.4: CBUSH-Koordinatensystem [MSC Nastran Quick Reference Guide, 2008].....	4
Abbildung 1.5: Ersatz einer Schraubverbindung durch Federelemente.....	5
Abbildung 1.6: Koordinatentransformation [Schürmann, 2005]	10
Abbildung 1.7: Ablauf einer FEM-Rechnung.....	15
Abbildung 2.2: Elementnetz des 2D-Modells.....	24
Abbildung 2.7: Programmablaufplan zur Nastran-Eingabedatei-Erzeugung (Teil 1)	33
Abbildung 2.8: Programmablaufplan zur Nastran-Eingabedatei-Erzeugung (Teil 2)	34
Abbildung 2.9: Ausweichen des Bauteils durch Schubbelastung	41
Abbildung 2.10: max. Hauptdehnungsdifferenz zwischen Laminat A und B bei variiertem Lagendifferenz.....	43
Abbildung 2.11: min. Hauptdehnungsdifferenz zwischen Laminat A und B bei variiertem Lagendifferenz.....	43
Abbildung 2.12: Aufbau des 3D-Modells in der xy-Ebene	44
Abbildung 2.13: Modellierung der Rampe	45
Abbildung 2.14: maximale Hauptdehnungen des 3D-Modells an der Rampe	46
Abbildung 2.15: Spannungsbild zur Veranschaulichung der Lastaufnahme.....	46
Abbildung 2.16: Vergleich 2D-3D Ergebnisse; Auszug der Dehnungen hinter der Rampe (Laminat A).....	47
Abbildung 2.17: Fragestellung zu den Lagenorientierungen	48
Abbildung 2.18: Bewertung einer Rampen-Schicht anhand der Lagenorientierungen der umliegenden.....	51
Abbildung 2.19: Gewichtungsfunktion	52
Abbildung 2.20: Bewertung einer Schicht mit Einfluss der Gewichtungsfunktion	53
Abbildung 2.21: Gliederung des Programms zur Lagenbestimmung der Rampe.....	54
Abbildung 2.23: industrielles Beispiel für eine Rampe.....	56
Abbildung 2.24: Dehnungsverlauf in der Rampe des industriellen Beispiels.....	57
Abbildung 2.25: Dehnungsverlauf der Rampe, erstellt mit Hilfe der Dehnungsbewertungsmatrix.....	60
Abbildung 2.26: Dehnungsverlauf der Rampe, erstellt mit Hilfe der Dehnungsdifferenzbewertungsmatrix	60
Abbildung 2.27: Querkontraktionszahl v_{yx} der Lagenergebnisse, in Abhängigkeit der Bewertungs-Basis.....	61
Abbildung 2.28: Querkontraktionszahl v_{xy} der Lagenergebnisse, in Abhängigkeit der Bewertungs-Basis.....	62
Abbildung 2.29: Elastizitätsmodul E_x der Lagenergebnisse, in Abhängigkeit der Bewertungs-Basis	63
Abbildung 2.30: Elastizitätsmodul E_y der Lagenergebnisse, in Abhängigkeit der Bewertungs-Basis	64
Abbildung 2.31: Dehnungsübergang eines symmetrischen Lagenaufbaus	65
Abbildung 3.1: Schwerepunktspinne	67
Abbildung 3.2: Orthogonalspinne	67
Abbildung 3.3: Beispiel einer modellierten Bohrung	69
Abbildung 3.4: an der Bohrung beteiligte Knoten	69
Abbildung 3.5: Variante zur Ermittlung des Bohrungsschwerpunktes	70
Abbildung 3.6: Programmablaufplan zur Erzeugung von Schwerepunktspinnen	72
Abbildung 3.7: Programmresultat für die Schwerepunktspinne	73
Abbildung 3.8: Knotenreihe am Durchmesser der Bohrung	76
Abbildung 3.9: Knotenreihe in Achsrichtung der Bohrung	76
Abbildung 3.10: Ebenen-Durchlauf in der Bohrung	77
Abbildung 3.11: Plotelemente an den Bohrungskanten.....	79
Abbildung 3.13: Programmablaufplan zur Erzeugung von Orthogonalspinnen	81
Abbildung 3.14: Beispiel einer Zweischnittigen Verbindung	82
Abbildung 3.15: Verbindungsvarianten.....	83
Abbildung 3.16: Kernfunktion des Programms zur Steifigkeitsbestimmung.....	84
Abbildung 3.17: Programmablauf, Schritt 1	86
Abbildung 3.18: Programmablauf, Schritt 2	87
Abbildung 3.19: Programmablauf, Schritt 3.....	87
Abbildung 3.20: Programmablauf, Schritt 4	88
Abbildung 3.21: Nastran-Eingabeformat.....	89
Abbildung 3.22: Programmablaufplan zur Bestimmung der Steifigkeit einer Bolzenverbindung	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Faktoren der Huth-Formel.....	6
Tabelle 1.2: Symbole des Programmablaufplans	14
Tabelle 1.3: Serendipity-Elemente.....	18
Tabelle 2.1: Lagenorientierungsmöglichkeiten in den Laminaten.....	21
Tabelle 2.2: Nastran-spezifische Eingangsparameter [MSC Nastran Quick Reference Guide, 2008].....	25
Tabelle 2.3: Kurzzeichen-Schlüssel für Lagenorientierungen.....	27
Tabelle 2.4: Auswirkung der Kombinationsreduzierung.....	29
Tabelle 2.5: Anforderungsliste für die Nastran-Eingabedateien-Erzeugung.....	29
Tabelle 2.6: programmiertechnische Umsetzung der Kombinationsreduzierung.....	31
Tabelle 2.7: Anforderungsliste für die Punch-Datei-Auswertung	35
Tabelle 2.8: maximale Hauptdehnungen beim Zuglastfall	37
Tabelle 2.9: minimale Hauptdehnungen beim Zuglastfall	37
Tabelle 2.10: Fehlerindex beim Zuglastfall	37
Tabelle 2.11: maximale Hauptdehnungen in normierter Form (Zug)	38
Tabelle 2.12: minimale Hauptdehnungen in normierter Form (Zug)	38
Tabelle 2.13: Fehlerindex in normierter Form (Zug)	38
Tabelle 2.14: maximale Hauptdehnungen in normierter Form (Schub)	40
Tabelle 2.15: minimale Hauptdehnungen in normierter Form (Schub)	40
Tabelle 2.16: Fehlerindex in normierter Form (Schub)	40
Tabelle 2.17: maximale Hauptdehnungsdifferenzen (Zug)	42
Tabelle 2.18: minimale Hauptdehnungsdifferenzen (Zug)	42
Tabelle 2.19: Extrahieren von Werten, zur Erstellung einer Bewertungsmatrix.....	49
Tabelle 2.20: Dehnungs-Bewertungsmatrix.....	49
Tabelle 2.21: Element-Dehnungsdifferenzen.....	50
Tabelle 2.22: Dehnungsdifferenzen-Bewertungsmatrix.....	50
Tabelle 2.23: Basiseinfluss auf die Ergebnisse, bewertet durch Dehnungskriterium.....	58
Tabelle 2.24: Basiseinfluss auf die Ergebnisse, bewertet durch Dehnungsdifferenzenkriterium	59
Tabelle 3.1: Anforderungslist für die automatische Erzeugung der Schwerepunktsspinne	68
Tabelle 3.2: Anforderungslist für die automatische Erzeugung der Orthogonalspinne	74
Tabelle 3.3: Schlüssel für die Knoten-Setnamen.....	85

Einleitung

Faserbundwerkstoffe finden im Flugzeugbau immer mehr Anwendung. Wo zuvor noch Aluminium und andere Werkstoffe zu finden waren, werden nun verstärkt Faserverbundwerkstoffe verwendet. Sie weisen eine hohe spezifische Festigkeit auf. Dadurch werden metallische Werkstoffe zunehmend verdrängt. Es lässt sich viel Gewicht einsparen, was sich positiv auf die Betriebskosten auswirkt.

Ein Faserverbundwerkstoff besteht aus gerichteten Fasern, die in einer Matrix eingebettet sind. Als Fasern werden u.a. Kohlenstofffasern und Glasfasern verwendet, welche in einer Matrix aus einem Polymer (Duroplast, Thermoplast oder Elastomere) eingebettet sind. Ein solcher Werkstoff hat eine sehr hohe Festigkeit in Faserrichtung. Baut man diesen Werkstoff schichtweise auf und variiert die Faserrichtungen, erhält man einen Mehrschichtverbund (ein Laminat), den man vielseitig anwenden kann.

Solche Mehrschichtverbunde werden inzwischen häufig beim Bau von Flugzeugen benutzt. Wie bei jedem Werkstoff, der verbaut wird, müssen auch Faserverbunde an die Flugzeugkonstruktion angebunden werden. Dafür können auf klassische Verbindungselemente des Maschinenbaus zurückgegriffen werden. Häufige Verbindungselemente sind Bolzenverbindungen. Dazu gehören u.a. Schraub- und Nietverbindungen. Lamine lassen sich damit untereinander aber auch mit anderen Werkstoffen verbinden.

Eine andere Verbindungsmethode beschäftigt sich mit der Verbindung von zwei Laminaten, die eine unterschiedliche Lagenanzahl aufweisen und ineinander übergehen müssen. Dies kann z.B. bei Kräfteinleitungspunkten eines Laminates der Fall sein. Hier wird das Laminat lokal durch Erhöhung der Lagenanzahl verstärkt. Wenn im restlichen Bauteil diese Verstärkung nicht mehr notwendig ist, muss ein Übergang zwischen den Abschnitten mit unterschiedlicher Lagenzahl existieren.

Diese Verbindungsmethoden müssen konstruktiv umgesetzt werden. Soll eine Konstruktion, die diese Verbindungselemente enthält, mit der Finite-Element-Methode berechnet werden, müssen diese in einem Finite-Element-Modell berücksichtigt werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich daher mit der Implementierung solcher Verbindungselemente in Finite-Element-Modellen. Diese Implementierung soll dabei automatisch erfolgen, um die Vorbereitungszeit zur Erstellung solcher Modelle zu optimieren.

1. Grundlagen

Im Folgenden werden allgemeine Grundlagen geschaffen, die eine Einführung in das Thema bieten. Damit soll ein Grundverständnis für das Thema geschaffen werden.

1.1 Faser-Kunststoff-Verbunde im Flugzeugbau

Faser-Kunststoffverbund (Glasfaser-Kunststoff) wurde das erste Mal 1957 im „Phönix“ der Akaflieg Stuttgart verwendet (Abbildung 1.1). Bald folgten bereits die nächsten Segelflzeuge, die auf diese Weise gebaut worden sind (1962: SB6 Akaflieg Braunschweig; 1962: D34 Akaflieg Darmstadt). Es wurde Pionierarbeit geleistet. Man benötigte Verarbeitungsmethoden, Prüfmethode und Werkstoffkennwerte. Zudem musste Entwicklungsarbeit in den Bereichen Bauweise, Berechnung und Verarbeitung gemacht werden.



Abbildung 1.1: Phönix [SFG Wershofen e.V]

Vor allem die Akaflieg aus Braunschweig trieben die Forschung im Bereich Leistungsverbesserung an. Um den Flieger leistungsfähiger zu machen, sollten längere Flügel her. Aber aufgrund des geringen E-Moduls des Glasfaser-Kunststoffverbundes war dies zunächst nicht möglich. Die Studenten der Akaflieg wagten sich an die damals neu entwickelten Kohlenstofffasern. Daraus entstand das erste Flugzeug bei dem ein hochbelastetes Bauteil (mittlerer Flügelteil) aus Kohlenstofffasern gefertigt worden ist (Spannweite 29m) [Schürmann, 2005].

Das Material zeichnet sich durch seine Korrosionsbeständigkeit, freie Formgebung und eng tolerierbare Eigenschaften aus. Gegen Aluminium ist der größte Vorteil die Ermüdungsfestigkeit. In der Abbildung 1.2 ist der Vergleich CFK-Aluminium zu sehen. Mit gleichen Zugproben wird einmal eine statische Belastung aufgebracht und einmal eine dynamische Belastung.

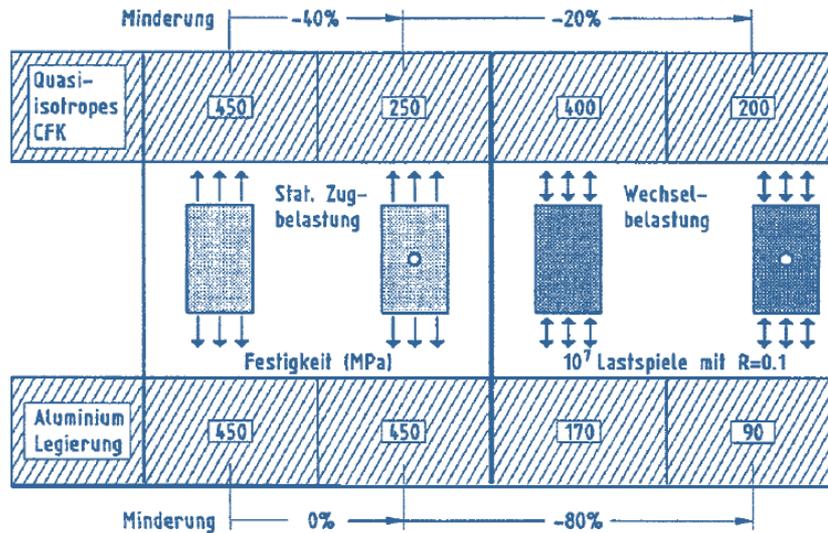


Abbildung 1.2: Vergleich Aluminium – CFK [Bergmann, 1992]

Man betrachtet hier einmal eine normale Zugprobe und eine gekerbte Probe. Bei einer statischen Belastung ist der Festigkeitsunterschied zwischen einer normalen und einer gekerbten Probe bei einer Aluminiumlegierung fast nicht vorhanden. Das CFK dagegen wird durch die Kerbe deutlich geschwächt (um 40%). Wird nun eine dynamische Belastung aufgebracht, schneidet diesmal die Festigkeit des CFK's deutlich besser ab. Man sieht hier gut, dass das CFK eine sehr gute Werkstoffwahl bei dynamisch belasteten Bauteilen ist. Statisch belastete Bauteile sollten weiterhin aus Aluminium gefertigt werden.

Beim neuen Flugzeug A380 wird bereits CFK in vielen Bereichen eingesetzt. Unter anderem wird der Druckdom, die Center Wing Box, das Höhen- und Seitenleitwerk etc. aus CFK gefertigt (Abbildung 1.3).

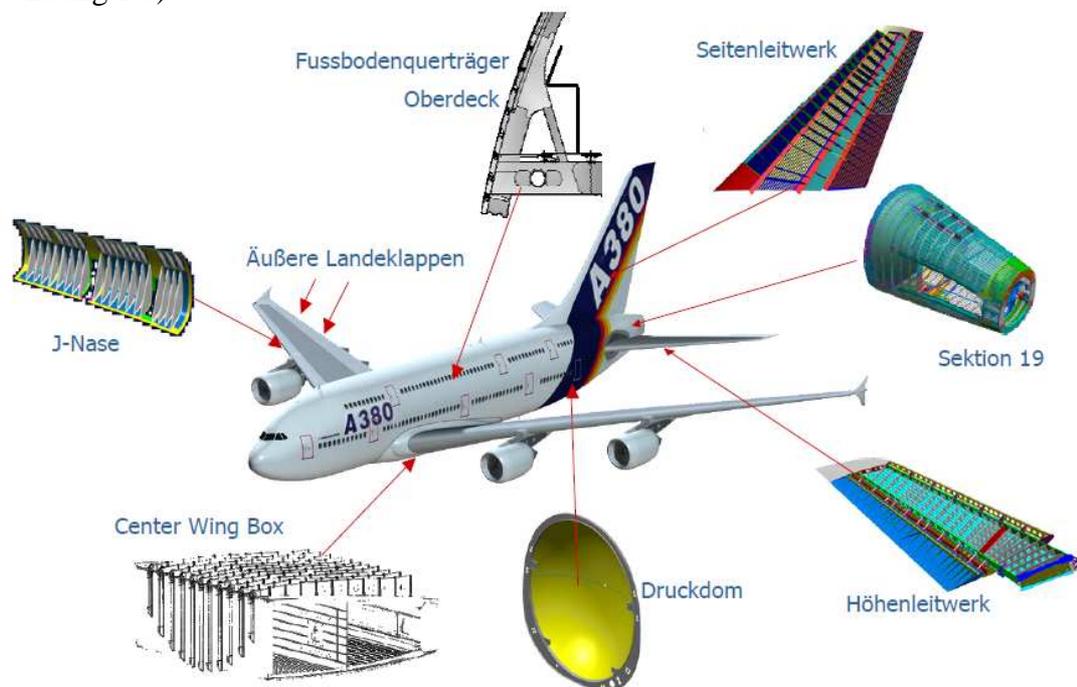


Abbildung 1.3: CFK-Einsatz im A380 [Rückert, Airbus]

1.2 Laminatverbindungen

Bolzenverbindungen [Schürmann, 2005]

Schraub- und Nietverbindungen gehören in der Technik zu den ältesten Fügeverfahren. Auch im Flugzeugbau ist das Verschrauben/Vernieten eine gängige Verbindungsmethode (Übergeordneter Begriff: Bolzenverbindung). Hier wird viel mit Faser-Kunststoff-Verbindungen gearbeitet. Bolzenverbindungen werden dort gewählt, wo flächige, dickwandige Bauteile miteinander gefügt werden müssen.

Vorteile:

- ungleichartige Werkstoffe lassen sich miteinander fügen. (gut geeignet für eine Laminat-Metall-Verbindung)
- lösbare Verbindungen
- preisgünstig
- eine gute Qualität und mit geringer Streuung gefertigt.
- können hohe Deformationsarbeiten aufnehmen.

Nachteile:

- Schwächung des Bauteils durch die Bohrung
- Überlappungen von Material und Bolzen haben ein hohes Gewicht
- optische „Störung“ durch Nietköpfe an Oberflächen

Klebeverbindung [Schürmann, 2005]

Klebeverbindungen gehören zu den wärmearmen Fügeverfahren. Beim Fügen finden kein Aufschmelzen der Fügepartner wie beim Schweißen und keine Diffusionsvorgänge wie beim Löten statt. Das Verbinden der Fügepartner geschieht hier physikalisch durch Adhäsion/Kohäsion. Das Kleben weist allerdings eine geringere Festigkeit auf als das Schweißen oder das Löten auf.

Im Flugzeugbau wird das Kleben beim Fügen von dünnwandigen Bauteilen verwendet.

Vorteile:

- unterschiedliche Werkstoffe miteinander ffügbar
- keine thermische Belastung
- keine Schwächung des Material durch Bohrungen wie bei den Bolzenverbindungen
- dienen als Dichtmittel und sind dazu steifigkeitsfördernd
- bei groben Passungen kann der Sitz durch den Kleber erreicht werden
- eignen sich als lokale Verstärkungen und Rissstopper
- wirken dämpfend

Nachteile:

- es liegen keine gleichmäßigen Spannungsverteilungen vor.
- Anfällig gegen Schälung
- temperaturempfindlich
- Fügeteil-Vorbehandlung notwendig, um eine gute Verbindungsqualität zu gewährleisten.
- die Streuung bei Klebefestigkeiten sind sehr hoch

1.3 Huthformel

Komplexe Finite-Element-Modelle enthalten Verbindungselemente, um das zu berechnende Bauteil möglichst realitätsnah zu gestalten. Hier werden Bolzen und Niete in Form von Federelementen in das Modell eingebracht. Diese Federelemente sind 1D-Elemente, verlaufen in der Bolzenachse und werden bei z.B. Volumenmodellen mittels Beam-Elementen mit den Knoten der 3D-Elementen innerhalb der Bohrung verbunden (Abbildung 1.5).

Das Modell soll später mit Nastran gelöst werden. Nastran stellt u.a. für Federelemente den Elementtyp „CBUSH“ zur Verfügung. [MSC Nastran Quick Reference Guide, 2008] Dieser Elementtyp hat die Eigenschaft, dass dem Element Steifigkeiten für alle Freiheitsgrade zugewiesen werden können. Dabei ist bei diesen Federelementen das Koordinatensystem bereits festgelegt.

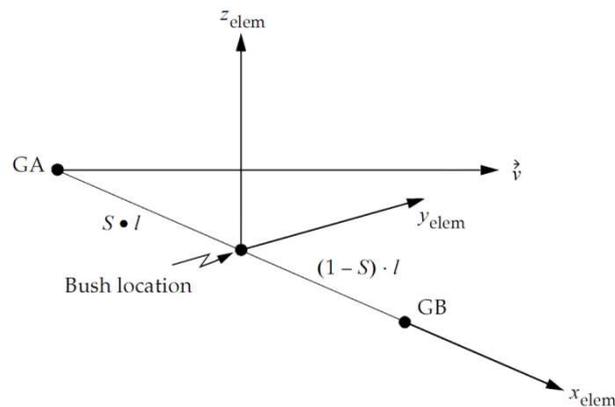


Abbildung 1.4: CBUSH-Koordinatensystem [MSC Nastran Quick Reference Guide, 2008]

In der Abbildung 1.4 ist zu erkennen, wie das lokale Koordinatensystem des Federelementes liegt. Die lokale x-Achse liegt in Achsrichtung und die y-z-Ebene liegt im Querschnitt des Federelementes/Verbindungselementes.

Jetzt ist die Definition des lokalen Koordinatensystems bekannt. Nun müssen dem Federelement die richtigen Steifigkeiten zugeordnet werden und auf das lokale Koordinatensystem übertragen werden. Dazu kann man sich der Huthformel bedienen. [Airbus, 2008] Die Formel errechnet aus den Materialeigenschaften der Verbindungspartner und des Bolzens eine Gesamtsteifigkeit der Verbindung. Diese wird dem Federelement zugeordnet.

Bevor die Huthformel angewandt werden kann, müssen zuvor noch für die Formel notwendige Materialkennwerte (Elastizitätsmodule und Bauteildicken) und Faktoren ermittelt bzw. festgelegt werden. In der Abbildung 1.5 ist beispielhaft eine zweiseitige Schraubverbindung dargestellt, die durch Federelemente simuliert werden soll. In diesem Fall sind zwei 3D- und eine 2D-Komponente an der Verbindung beteiligt. Man benötigt die Elastizitätsmodule der drei Verbindungspartner und deren Dicke.

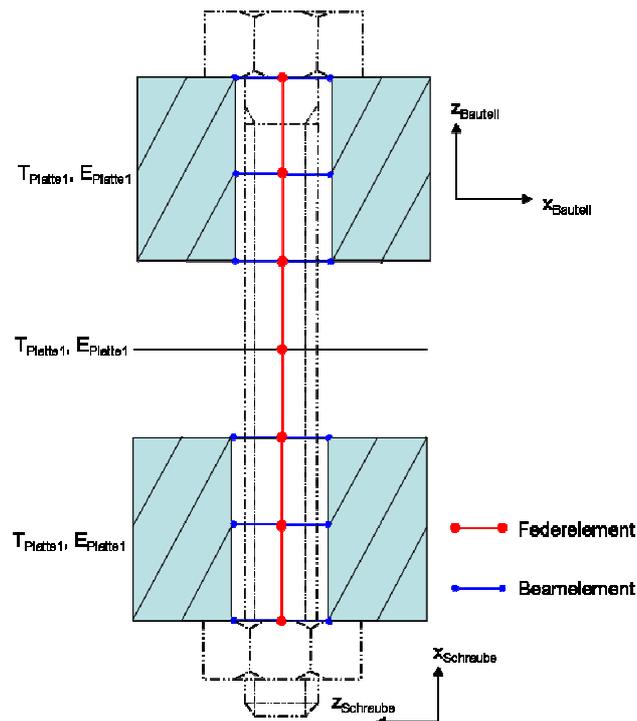


Abbildung 1.5: Ersatz einer Schraubverbindung durch Federelemente

Zusätzlich sind, wie oben angedeutet, noch bestimmte Faktoren zu bestimmen:

- Faktor ,a'
- Faktor ,b'
- Faktor ,c'

Der Faktor ,a' beschreibt die Art der Verbindung. Hier wird zwischen der Niet- und der Schraubverbindung unterschieden.

Der Faktor ,b' beschreibt die zu verbindenden Materialien. Es wird unterschieden, ob es sich um eine reine Metall-Schraubverbindung, eine reine Metall-Nietverbindung oder um eine Verbindung mit einem Laminatbauteil handelt.

Der Faktor ,c' beschreibt die Schnittigkeit der Verbindung.

In der Tabelle 1.1 sind die Faktoren und deren Bedeutung noch mal zusammengefasst.

Tabelle 1.1: Faktoren der Huth-Formel

Faktor	Wert	Erklärung
a	2/3	geschraubt
	2/5	genietet
b	3	Verschraubtes Metall
	2.2	Genietetes Metall
	4.2	Laminat an der Verbindung beteiligt
c	1	Einschnittig
	2	Zweischchnittig

Zusätzlich zu den oben genannten Informationen wird noch die Lage des Schraub- / Nietkopfes und der Mutter/Schließkopfes benötigt. Es ist also relevant an welcher Seite der Verbindung der Bolzenkopf liegt. In dieser Arbeit wird es festgelegt. Der Schraubkopf/Nietkopf befindet sich immer an dem Bauteil 1! Die Mutter/der Schließkopf befindet sich am Bauteil 2 oder 3 (abhängig von der Schnittigkeit der Verbindung).

Nun sind alle Informationen vorhanden, um mit der Huthformel rechnen zu können. Die Formeln für die lokalen y- und z-Steifigkeiten K_y und K_z einer einschnittigen Verbindung sind in (1) und (2) zu sehen. Diese Formeln entstammen dem Technischen Report „Boxes load extraction and distribution for composite attachment profile unfolding sizing process-exportable version“ von Airbus. Diese benötigen als Eingangswerte die Bauteildicken ($T_{Platte1}$, $T_{Platte2}$), die Elastizitätsmodule der Bauteile und des Bolzens ($E_{1Platte1}$, $E_{1Platte2}$, $E_{2Platte1}$, $E_{2Platte2}$, E_{Bolzen}), den Bolzendurchmesser (d_{Bolzen}) und die oben genannten Variablen.

$$K_y = \frac{1}{\left[\frac{T_{Platte1} + T_{Platte2}}{2 \cdot d_{Bolzen}} \right]^a \cdot \frac{b}{c} \left[\frac{1}{T_{Platte1} \cdot E_{2Platte1}} + \frac{1}{T_{Platte2} \cdot E_{2Platte2}} + \frac{1}{2 \cdot T_{Platte1} \cdot E_{Bolzen}} + \frac{1}{2 \cdot T_{Platte2} \cdot E_{Bolzen}} \right]} \quad (1)$$

$$K_z = \frac{1}{\left[\frac{T_{Platte1} + T_{Platte2}}{2 \cdot d_{Bolzen}} \right]^a \cdot \frac{b}{c} \left[\frac{1}{T_{Platte1} \cdot E_{1Platte1}} + \frac{1}{T_{Platte2} \cdot E_{1Platte2}} + \frac{1}{2 \cdot T_{Platte1} \cdot E_{Bolzen}} + \frac{1}{2 \cdot T_{Platte2} \cdot E_{Bolzen}} \right]} \quad (2)$$

Liegt eine Zweischchnittigkeit vor, wird diese Verbindung zunächst wie zwei einschnittige Verbindungen betrachtet (Formel (3) bis (6)). Man rechnet erst die y- und z-Steifigkeiten zwischen dem ersten und dem zweiten Bauteil aus und anschließend berechnet man sich die Steifigkeit zwischen dem zweiten und dem dritten Bauteil.

$$K_{y1-2} = \frac{1}{\left[\frac{T_{Platte1} + T_{Platte2}}{2 \cdot d_{Bolzen}} \right]^a \cdot \frac{b}{c} \cdot \left[\frac{1}{T_{Platte1} \cdot E_{2Platte1}} + \frac{1}{T_{Platte2} \cdot E_{2Platte2}} + \frac{1}{2 \cdot T_{Platte1} \cdot E_{Bolzen}} + \frac{1}{2 \cdot T_{Platte2} \cdot E_{Bolzen}} \right]}$$

(3)

$$K_{z1-2} = \frac{1}{\left[\frac{T_{Platte1} + T_{Platte2}}{2 \cdot d_{Bolzen}} \right]^a \cdot \frac{b}{c} \cdot \left[\frac{1}{T_{Platte1} \cdot E_{1Platte1}} + \frac{1}{T_{Platte2} \cdot E_{1Platte2}} + \frac{1}{2 \cdot T_{Platte1} \cdot E_{Fastener}} + \frac{1}{2 \cdot T_{Platte2} \cdot E_{Fastener}} \right]}$$

(4)

$$K_{y2-3} = \frac{1}{\left[\frac{T_{Platte1} + T_{Platte3}}{2 \cdot d_{Bolzen}} \right]^a \cdot \frac{b}{c} \cdot \left[\frac{1}{T_{Platte2} \cdot E_{2Platte2}} + \frac{1}{T_{Platte3} \cdot E_{2Platte3}} + \frac{1}{2 \cdot T_{Platte2} \cdot E_{Bolzen}} + \frac{1}{2 \cdot T_{Platte3} \cdot E_{Bolzen}} \right]}$$

(5)

$$K_{z2-3} = \frac{1}{\left[\frac{T_{Platte1} + T_{Platte3}}{2 \cdot d_{Bolzen}} \right]^a \cdot \frac{b}{c} \cdot \left[\frac{1}{T_{Platte2} \cdot E_{1Platte2}} + \frac{1}{T_{Platte3} \cdot E_{1Platte3}} + \frac{1}{2 \cdot T_{Platte2} \cdot E_{Bolzen}} + \frac{1}{2 \cdot T_{Platte3} \cdot E_{Bolzen}} \right]}$$

(6)

Um K_y und K_z der gesamten Verbindung zu ermitteln, wird der kleinere Wert von K_{y1-2} und K_{y2-3} bzw. K_{z1-2} und K_{z2-3} genommen. Für den Fall, dass z.B. nun $K_{y1-2} < K_{y2-3}$ wäre, würde $K_y = K_{y1-2}$ sein.

Im Regelfall sind K_y und K_z gleich groß. Ist dies nicht der Fall, wird auch hier der größere Wert dem Kleineren angepasst, um den ungünstigeren Fall zu betrachten.

$$K_y \approx K_z$$

Um die Steifigkeit in Achsrichtung zu bestimmen, benötigt man noch die Steifigkeiten von dem Schraubenkopf/Nietkopf, der Schraubenmutter/dem Schließkopf und der Schraube/ des Nietes selbst. Diese lassen sich nach den Formeln (7), (8) bzw. (9) und (10) berechnen.

Kopfsteifigkeit :

$$K_{Kopf} = \pi \cdot E_{3Platte1} \cdot \left(\frac{d_{Kopf}^2 - d_{Bolzen}^2}{4 \cdot T_{Platte1}} \right)$$

(7)

Mutter-/Schließkopfsteifigkeit:

bei Einschnittigkeit:

$$K_{Mutter} = \pi \cdot E_{3Platte2} \cdot \left(\frac{d^2_{Mutter} - d^2_{Bolzen}}{4 \cdot T_{Platte2}} \right) \quad (8)$$

bei Zweischnittigkeit:

$$K_{Mutter} = \pi \cdot E_{3Platte3} \cdot \left(\frac{d^2_{Mutter} - d^2_{Bolzen}}{4 \cdot T_{Platte3}} \right) \quad (9)$$

Schrauben-/Nietsteifigkeit :

$$K_{Bolzen} = \frac{A_{Bolzen} \cdot E_{Bolzen}}{T_{Platte1} + T_{Platte2} + T_{Platte33}} \quad (10)$$

Die Axialsteifigkeit lässt sich dann wie in (11) berechnen.

Gesamt-Axialsteifigkeit des Verbindungselementes:

$$K_x = \frac{1}{\frac{1}{K_{Kopf}} + \frac{1}{K_{Mutter}} + \frac{1}{K_{Bolzen}}} \quad (11)$$

Die rotatorischen Steifigkeiten der Schraube/des Nietes werden um x, y und z festgelegt.

$$K_{rot_x} = 1000$$

$$K_{rot_y} = 600000$$

$$K_{rot_z} = 600000 \quad (12)$$

z.B. bei Airbus wurde es wie folgt festgelegt:

„Concerning the rigidity in rotation the value K_{Rot_z} (around z axis) has no impact on the results, so it has been decided to consider the arbitrary value of $K_{rz}=10^3$.

It has been shown that a value of $K_{Rot_x}=K_{Rot_y}=6 \cdot 10^5$ for the two other stiffness, provides good results. This point would need to be further investigated. “ [Airbus, 2008]

Bei Erstellung der Formeln bezieht sich Airbus auf ein anderes Koordinatensystem (hier ist z die Axialrichtung). Dies wurde hier so abgeändert, dass sich die Huthformel auf das lokale Achsensystem der Federelemente beziehen lässt.

1.4 Klassische Laminattheorie

Die in dieser Arbeit verwendete Laminattheorie bezieht sich nur auf den ebenen Spannungszustand. Betrachtet wird ein infinitesimales Element, indem nur Kräfte (F_x, F_y, F_{xy}) und Spannungen ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$) in der Scheibenebene auftreten.

Das Ziel der Klassischen Laminattheorie ist die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des Mehrschichtverbundes anhand der jeweiligen Ingenieurkonstanten der einzelnen Lagen. Damit lassen sich die Spannungen und Dehnungen sowohl des ganzen Laminates, als auch der einzelnen Lagen ermitteln. Dabei ist zu beachten [Schürmann, 2005]:

- Die Schnitt-Kraftflüsse, bzw. Schnittspannungen sind über die Dicke des Scheibenelementes konstant
- an Bauteilrändern liegt meist kein gleichförmiger Spannungszustand vor; man findet dort z.B. Krepelmomente und interlaminare Spannungen.
- Die Einzelschichten sind eben und parallel zur Mittelebene des Mehrschichtverbundes
- Es liegt eine konstante Dicke der einzelnen Schichten vor
- Die Werkstoffe weist eine linear, ideal elastische Eigenschaft auf
- Der Werkstoff wird als homogenes Kontinuum modelliert; die Umgebung von Rissen, Lufteinschlüssen usw. wird von der Theorie nicht erfasst, da dort ein komplexer Spannungszustand vorliegt.

Wie schon oben erwähnt besitzt jede Schicht ihren eigenen Elastizitätsmodul. Das lineare Elastizitätsgesetz einer Unidirektionalen Schicht (UD-Schicht) lautet:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_p}{1 - \nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} & \frac{\nu_{sp} \cdot E_p}{1 - \nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} & 0 \\ \frac{\nu_{sp} \cdot E_s}{1 - \nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} & \frac{E_s}{1 - \nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{sp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{21} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Die Unidirektionale Schicht ist durch die Grundelastizitätsgrößen E_p, E_s, G_{sp} und ν_{sp} beschrieben. Dabei steht der Index „s“ für „senkrecht“ und der Index „p“ für „parallel“. E_p ist der Elastizitätsmodul in Faserrichtung der unidirektionalen Schicht und das Elastizitätsmodul E_s steht senkrecht zu der Faserorientierung. Bei den Querkontraktionszahlen gibt der 1. Index die Richtung der Querdehnung und der 2. Index die Richtung der primären Dehnung (Krafrichtung) an. Die Matrix mit den Elastizitätsgrößen stellt die Steifigkeitsmatrix der UD-Schicht dar.

Ein Mehrschichtverbund besteht aus mehreren einzelnen UD-Schichten mit verschiedenen Faserwinkeln. Jede UD-Schicht besitzt ein eigenes 1,2-Koordinatensystem (Schichtkoordinatensystem). Um nun die gewünschte Steifigkeiten des Mehrschichtverbundes zu ermitteln, müssen die lokalen Schichtkoordinatensysteme in das Laminat-Koordinatensystem (x, y-Koordinatensystem) transformiert werden.

Das Elastizitätsgesetz der unidirektionalen Schicht mit der Steifigkeitsmatrix, beschrieben im Laminatkoordinatensystem, lautet also:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Die Formel (15) beschreiben die Koordinatentransformation. Der Winkel α beschreibt den Winkel zwischen der 1-Achse des Schichtkoordinatensystems und der x-Achse des Laminatkoordinatensystems (Abbildung 1.6). Dabei ist festgelegt, dass der Winkel α immer positiv ist.

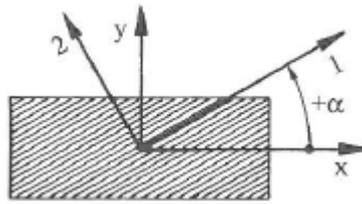


Abbildung 1.6: Koordinatentransformation [Schürmann, 2005]

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= \frac{E_p}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} \cdot \cos^4 \alpha + \frac{E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} \cdot \sin^4 \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{\nu_{sp} \cdot E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} + 2G_{sp} \right) \cdot \sin^2 \alpha \\ \bar{Q}_{22} &= \frac{E_p}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} \cdot \sin^4 \alpha + \frac{E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} \cdot \cos^4 \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{\nu_{sp} \cdot E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} + 2G_{sp} \right) \cdot \sin^2 \alpha \\ \bar{Q}_{66} &= G_{sp} + \frac{1}{4} \left(\frac{E_p}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} + \frac{E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} - 2 \frac{\nu_{sp} \cdot E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} - 4G_{sp} \right) \cdot \sin^2 \alpha \\ \bar{Q}_{12} &= \frac{\nu_{sp} \cdot E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} + \frac{1}{4} \left(\frac{E_p}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} + \frac{E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} - 2 \frac{\nu_{sp} \cdot E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} - 4G_{sp} \right) \cdot \sin^2 \alpha \\ \bar{Q}_{16} &= -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{E_p}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} + \frac{E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} - 2 \frac{\nu_{sp} \cdot E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} - 4G_{sp} \right) \cdot \sin^2 \alpha - \left(\frac{E_p}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} - \frac{\nu_{sp} \cdot E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} - 2G_{sp} \right) \right] \cdot \sin^2 \alpha \\ \bar{Q}_{26} &= -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} - \frac{\nu_{sp} \cdot E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} - 2G_{sp} \right) - \left(\frac{E_p}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} + \frac{E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} - 2 \frac{\nu_{sp} \cdot E_s}{1-\nu_{sp} \cdot \nu_{ps}} - 4G_{sp} \right) \cdot \sin^2 \alpha \right] \cdot \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad (15)$$

Nun wurde die Steifigkeitsmatrix einer UD-Schicht im Laminatkoordinatensystem berechnet. Ein Mehrschichtverbund besteht aus mehreren einzelnen unidirektionalen Schichten. Bei n Lagen liegen n Steifigkeitsmatrizen vor. Diese werden zu einer einzigen Steifigkeitsmatrix

zusammengefasst, die das gesamte Laminat beschreibt. Dazu werden alle Matrixelemente \bar{Q}_{ij} der Steifigkeitsmatrizen jeder UD-Schicht zunächst mit der jeweiligen Schichtdicke t_k multipliziert. Summiert man nun alle entsprechende Steifigkeiten der n Lagen miteinander auf, erhält man die Steifigkeitsmatrix des gesamten Laminates (16).

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{11k} \cdot t_k & \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{12k} \cdot t_k & \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{16k} \cdot t_k \\ \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{12k} \cdot t_k & \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{22k} \cdot t_k & \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{26k} \cdot t_k \\ \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{16k} \cdot t_k & \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{26k} \cdot t_k & \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{66k} \cdot t_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Damit lautet für den Mehrschichtenverbund das mechanische Elastizitätsgesetz (17):

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{t} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Mit der Steifigkeitsmatrix $[A]$ lassen sich des Weiteren die Ingenieurskonstanten des Mehrschichtenverbundes wie folgt ermitteln (18):

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{1}{A_{11}^{-1} \cdot t} \\ E_y &= \frac{1}{A_{22}^{-1} \cdot t} \\ G_{xy} &= \frac{1}{A_{66}^{-1} \cdot t} \\ \nu_{xy} &= \frac{A_{12}^{-1}}{A_{22}^{-1}} \\ \nu_{yx} &= \frac{A_{12}^{-1}}{A_{11}^{-1}} \end{aligned} \quad (18)$$

1.5 Bruchkriterium nach Tsai-Wu

Ein Bruchkriterium ist eine mathematische Funktion, die das Versagen des Werkstoffs voraussagen soll, ähnlich der Vergleichsspannungen bei isotropen Werkstoffen (z.B. Gestaltsänderungshypothese). Im Gegensatz zu den isotropen Werkstoffen, legen Faserverbundwerkstoffe ein anisotropes Verhalten an den Tag (richtungsabhängig). Das bedeutet, dass eine elastische Anisotropie, eine Anisotropie der Festigkeitswerte und eine Anisotropie des Bruchverhaltens, vorliegen. Es muss bei Faserverbundwerkstoffen der Bruchtyp unterschieden werden. Zum Einen gibt es den Faserbruch (das Versagen der Fasern) und zum Anderem den Zwischenfaserbruch (das Versagen der Matrix). Diese werden durch die einzelnen Spannungen σ_1 oder σ_2 oder τ_{12} verantwortlich gemacht. Dies ist aber sehr unsicher, da das Zusammenspiel von τ_{12} und σ_2 bei der Erzeugung eines Zwischenfaserbruches vernachlässigt wird.

Das Bruchkriterium nach Tsai-Wu behandelt eine unidirektionale Schicht wie ein homogenes, anisotropes Material. Auf dieses Material werden dann die gängigen Fließkriterien für duktile Metalle angewandt. Die Kriterien wurden so weit abgeändert, dass sie richtungsabhängige Festigkeitswerte zulassen. Der Nachteil dieses Kriteriums ist, dass bei einem kombinierten Spannungszustand von σ_2 und τ_{12} der Druckbereich von der Zugfestigkeit abhängt und der Zugbereich von der Druckfestigkeit. [Bergmann, 1992] Dadurch werden Faserbruch und Faserzwischenbruch nicht unterschieden. Dieses Bruchkriterium ist für eine Bruchanalyse nur bedingt geeignet.

Im Rahmen dieser Bachelorthesis wird dieses Kriterium dennoch gewählt, weil Tsai-Wu der aktuelle Stand der Technik ist und dieses Verfahren in Solvern wie Nastran implementiert ist. Die Implementierung von genaueren Kriterien, wie das Bruchkriterium nach Puck, ist aktuell noch Stand der industriellen Forschung.

Für den ebenen Spannungszustand lautet das Bruchkriterium nach Tsai-Wu [Bergmann, 1992]:

$$FI = F_1 \cdot \sigma_x + F_2 \cdot \sigma_y + F_{11} \cdot \sigma_x^2 + F_{22} \cdot \sigma_y^2 + 2 \cdot F_{12} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + F_{66} \cdot \tau_{xy}^2 \quad (19)$$

(F_6 , F_{16} und F_{26} werden eliminiert, da ein Vorzeichenwechsel von τ_{21} die Festigkeitsparameter nicht beeinflussen darf.)

F_1 , F_2 , F_{11} , F_{66} und F_{12} werden wie folgt berechnet:

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_t \cdot X_c}$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_t \cdot Y_c}$$

$$F_{66} = \frac{1}{S_{xy}^2}$$

$$F_{12} = \frac{-0,5}{\sqrt{X_t \cdot X_c \cdot Y_t \cdot Y_c}} \quad (20)$$

X_t , X_c , Y_t , Y_c und S_{xy} sind Materialkennwerte. Für eine UD-Schicht mit Duroplastharz sind folgende Festigkeitskennwerte gegeben [Airbus]:

$$\begin{aligned} X_t &= 2600 \text{ MPa} \\ X_c &= -1400 \text{ MPa} \\ Y_t &= 50 \text{ MPa} \\ Y_c &= -280 \text{ MPa} \\ S_{xy} &= 100 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Nun können die Faktoren aus dem Tsai-Wu Kriterium für dieses Material berechnet werden:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{2600 \text{ MPa}} - \frac{1}{1400 \text{ MPa}} = -330 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{MPa}} \\ F_2 &= \frac{1}{50 \text{ MPa}} - \frac{1}{280 \text{ MPa}} = 16,43 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{MPa}} \\ F_{11} &= \frac{1}{2600 \text{ MPa} \cdot 1400 \text{ MPa}} = 274,73 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{MPa}^2} \\ F_{22} &= \frac{1}{50 \text{ MPa} \cdot 280 \text{ MPa}} = 71,43 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{MPa}^2} \\ F_{12} &= \frac{-0,5}{\sqrt{2600 \text{ MPa} \cdot 1400 \text{ MPa} \cdot 50 \text{ MPa} \cdot 280 \text{ MPa}}} = -2,22 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{MPa}^2} \\ F_{66} &= \frac{1}{(100 \text{ MPa})^2} = 100,00 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{MPa}^2} \end{aligned} \quad (21)$$

Die Sicherheit lässt sich wie in (22) berechnen.

$$SR = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4a}}{2a}$$

mit

$$a = F_{11} \cdot \sigma_x^2 + F_{22} \cdot \sigma_y^2 + 2 \cdot F_{12} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + F_{66} \cdot \tau_{xy}^2$$

und

$$b = F_1 \cdot \sigma_x + F_2 \cdot \sigma_y \quad (22)$$

Man kann nun entweder den Fehlerindex betrachten oder die Sicherheit. Betrachtet man den Fehlerindex (FI), darf dieser den Wert 1 nicht überschreiten. Ein Erreichen des Wertes „1“ würde ein Versagen des Bauteils bedeuten.

Wertet man mit der Sicherheit (SR → Strength-Ratio) aus, darf dieser den Wert „1“ nicht unterschreiten. Ein Unterschreiten des Wertes würde ein Versagen des Bauteils bedeuten.

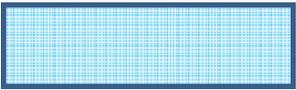
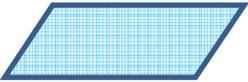
Der Fehlerindex macht zwar eine Aussage darüber, ob der Werkstoff hält, aber er macht keine Aussage wie viele Reserven der Werkstoff noch hat. Aus dem Sicherheitsfaktor dagegen kann man diese Information ablesen. Ein SR=1,1 bedeutet gleichzeitig, dass die Reserve bei 10% liegt.

1.6 Programmablaufpläne

Ein Programmablaufplan (PAP) ist in der Informatik ein Hilfsmittel, um Programmstrukturen und Vorgänge anschaulich darzustellen. Programmablaufpläne greifen auf Symbole zurück, die für bestimmte Programmprozesse stehen. Diese Symbole sind in der DIN 66001 festgelegt.

In der folgenden Tabelle 1.2 werden diese Symbole aufgeführt und erklärt:

Tabelle 1.2: Symbole des Programmablaufplans

Symbol	Erklärung
	Start/Ende: Das Symbol stellt den Anfang oder das Ende eines Programms dar
	Der Pfeil zeigt auf das nächstfolgende Element
	Das Rechteck steht für eine Operation, die durchgeführt wird.
	Das Rechteck mit zwei vertikalen Linien steht für ein Unterprogramm, das aufgerufen wird
	Die Raute zeigt eine Verzweigung. Dies könnte eine Schleife oder eine if-Bedingung sein. Es ist eine ja-nein-Abfrage.
	Das Parallelogramm steht für eine manuelle Eingabe oder Ausgabe

1.7 Finite-Element-Methode

Die Finite-Element-Methode ist ein Hilfsmittel zur Beschreibung von physikalischen Problemen. In der Praxis hat man es meist mit komplexen Systemen zu tun, und um diese mathematisch beschreiben zu können, stößt man schnell an die analytischen Grenzen. Hier baut die FE-Methode auf die Lösung von Differenzialgleichungen. Diese Differenzialgleichungen beschreiben ein physikalisches Problem in einer mathematischen Gleichung. Diese Gleichung lässt sich in der Praxis analytisch meist nicht lösen und muss in einem numerischen Näherungsverfahren ausgerechnet werden.

Dazu wird z.B. ein Bauteil, dessen Verhalten unter bestimmten Randbedingungen untersucht werden soll, in einzelne Elemente gegliedert. In diesen Elementen werden Ansatzfunktionen definiert, mit denen sich die Differenzialgleichung lösen lässt. Die Qualität dieser Ansatzfunktionen beeinflusst die Qualität der Lösung. Je besser die Ansatzfunktion gewählt wird, desto näher liegt die Lösung der Differenzialgleichung an der Realität.

Die Berechnungen mit der Finite-Element-Methode gliedert sich in drei Schritte Abbildung 1.7:

1. Preprocessing
2. Berechnung
3. Postprocessing

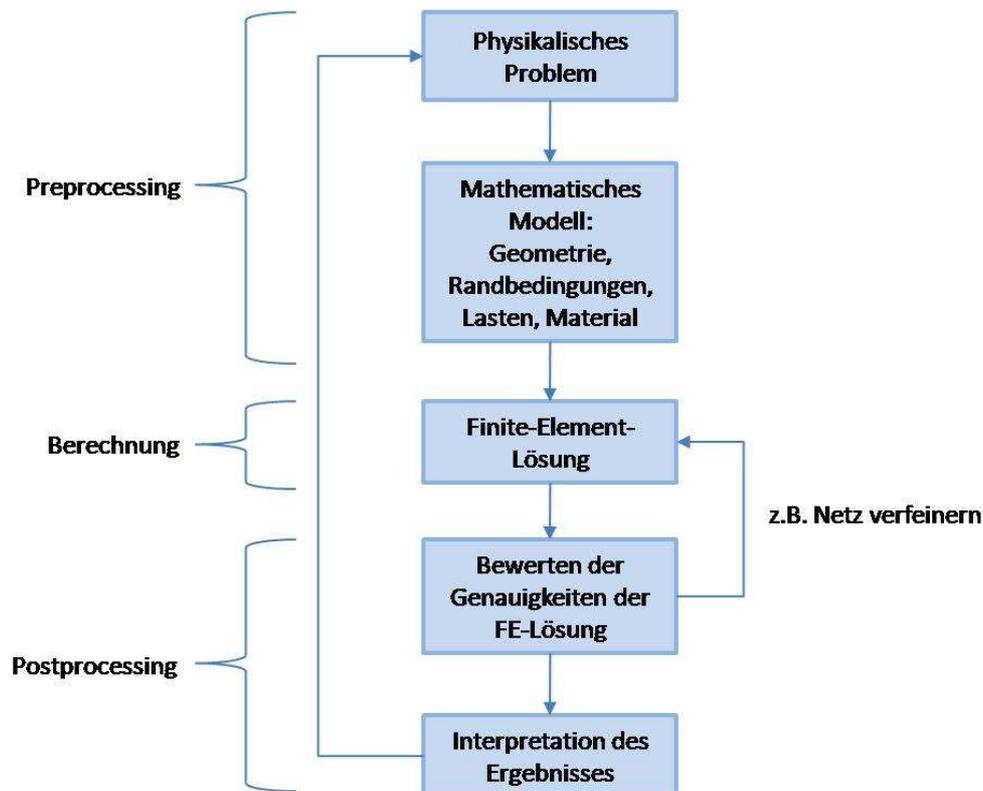


Abbildung 1.7: Ablauf einer FEM-Rechnung

Preprocessing:

Das Preprocessing beinhaltet die ganzen Modellvorbereitungen bevor ein Modell gerechnet werden kann. Es muss ein Elementnetz erzeugt werden, das die Geometrie gut abbildet und in der Lage ist genaue Ergebnisse zu erzielen. Hier können dünne Bauteile mit 2D-Elementen und große Bauteile mit viel Volumen durch ein 3D-Netz ersetzt werden. Um genaue Ergebnisse erzielen zu können, muss das FEM-Modell detailgetreu nachmodelliert werden. Oft wird aus Kostengründen auf die Detailgenauigkeit verzichtet, um Rechenzeit zu sparen. Es wird zum Beispiel anstatt eines modellierten Verbindungselementes wie eine Schraube ein einfaches 1D-Element verwendet. Um nun diesen Fehler so gering wie möglich zu halten, werden diesem Element Eigenschaften zugesprochen, die den Eigenschaften einer Schraube entsprechen. Auf diese Weise können Details weggelassen werden, ohne einen großen Fehler in der Genauigkeit der Ergebnisse zu machen. Beim Vernetzen sollte eine starke Elementverzerrung vermieden werden. Dies könnte die Ergebnisse negativ beeinflussen.

Eine weitere Komponente des Preprocessings ist das Aufbringen der Randbedingungen. Dies ist nicht immer eindeutig und bedarf manchmal Annahmen, weil nicht immer ganz geklärt ist was für Lastfälle auftreten können, wie diese Lastfälle eingeleitet werden, was für Kontakte zu setzen sind und wie die Lagerungen beschaffen sein sollen. Es ist darauf zu achten, dass das Modell mindestens statisch bestimmt gelagert wird, da es ansonsten zu Starrkörperbewegungen kommt und die Steifigkeitsmatrix des Systems dadurch singulär wird. Zusätzlich müssen dem Modell die Materialeigenschaften zugewiesen werden. Bei der Eingabe von Daten muss darauf geachtet werden in welcher Einheit dies geschieht. Das FE-Programm wird in der Regel keine Einheiten vorgeben.

Für das Preprocessing werden meist separate Programme benutzt, mit denen man das Modell aufbauen und in das Solver-spezifische Eingabeformat bringen kann.

Berechnen:

Das Berechnen übernimmt ein Solver. Als Solver werden unter anderem Nastran, Abaqus, Ansys, Radioss...etc. benutzt.

Um mit diesen Programmen rechnen zu können, muss das im Preprocessing erstellte Modell, in eine Eingabedatei mit dem Solver-spezifischen Format exportiert werden. Der Solver wird diese Datei auslesen und mit dem Berechnen beginnen. Tritt ein Fehler auf, bricht die Rechnung ab und der Benutzer wird mit einem Fehlerhinweis informiert. Tritt kein Fehler auf, rechnet das Programm solange, bis es eine Lösung für das Problem gefunden hat.

Bei den Rechnungen wird zwischen linearen und nicht-linearen Rechnungen unterschieden. Bei einer linearen Lösung wird eine Steifigkeitsmatrix des Systems aufgestellt, invertiert und mit den aufgebrachten Kräften multipliziert, um die Verschiebungen ausrechnen zu können. Die Steifigkeit bleibt hier immer gleich. Die Verschiebung skaliert mit der angreifenden Kraft.

Die nicht-lineare Rechnung dagegen geht iterativ vor. Hier wird immer wieder geprüft wie sich das System verformt und nimmt veränderte Lastangriffswinkel und Hebelarme etc. in die nächste Rechnung mit auf.

Des Weiteren werden die verschiedenen Solver durch deren Zeitintegration unterschieden. Man unterscheidet zwischen impliziter und expliziter Zeitintegration.

Postprocessing

Das Postprocessing ist das Auswerten der Rechnung und das Aufarbeiten dieser Daten. Es wird hier zunächst geprüft, ob die Ergebnisse in dem erwarteten Bereich liegen. Dies ist ein wichtiger Bestandteil der FEM und erfordert hauptsächlich Erfahrungen des Anwenders. Es müssen sich an dieser Stelle folgende Fragen gestellt werden:

- Ist das Ergebnis genau genug?
- Verhält sich das Bauteil wie erwartet (z.B. die Verschiebung)?
- Ist die Vernetzung an den Spannungsspitzen fein genug?
- Handelt es sich bei den Spannungsspitzen um Singularitäten?

Entsprechen die Ergebnisse nicht den Erwartungen, müssen die Eingaben des Preprocessings geprüft werden.

Weiterhin wird im Postprocessing versucht die Vielzahl an neuen Informationen in eine verständliche Darstellung zu bringen (Bilder und Animationen). Hierfür werden häufig separate Programme benutzt, die die Ergebnisdatei des Solvers lesen und grafisch darstellen können.

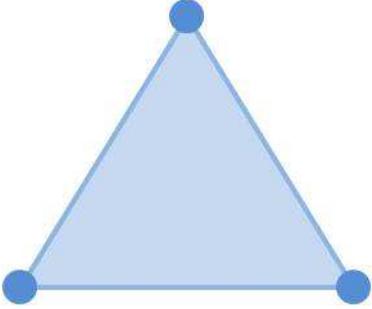
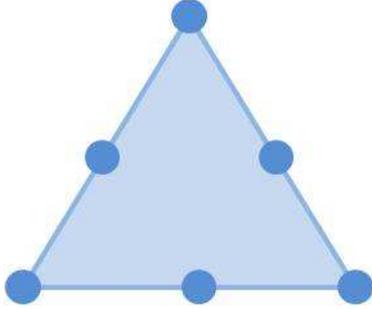
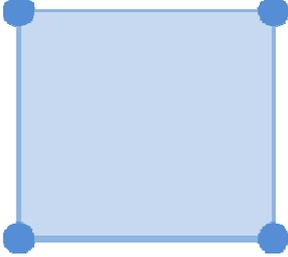
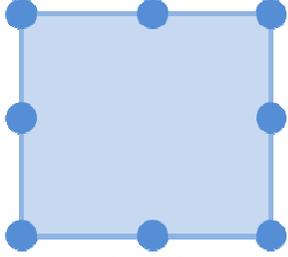
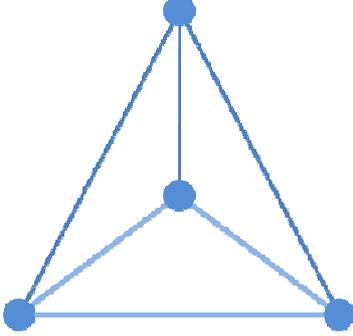
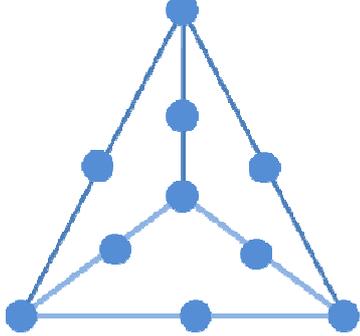
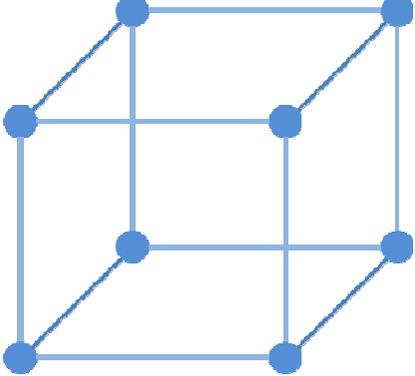
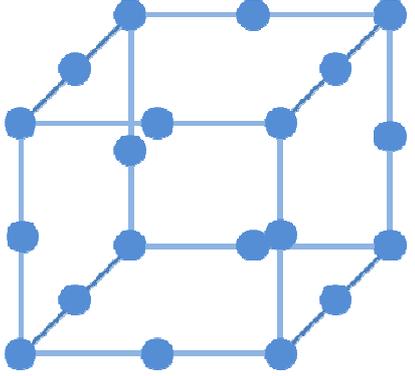
Elementtypen:

Häufig verwendete Elemente in der FEM sind Tria-, Quad, Tetraeder- und Hexaeder-Elemente. Jedes dieser Elemente kann man mit einer linearen Ansatzfunktion oder einer quadratischen Ansatzfunktion verwenden. Der Unterschied zwischen den beiden Ansätzen liegt in der Anzahl der Knoten pro Element. Ein linearer Ansatz erzeugt weniger genaue Ergebnis wie ein quadratischer Ansatz. Um also mit linearen Elementen die gleiche Ergebnisqualität zu den quadratischen Elementen zu erzeugen, muss feiner vernetzt werden. Quadratische Elemente sind gut geeignet um Spannungen und Dehnungen berechnen zu lassen. Ist dagegen nur die Verformung gesucht, können bereits wenige lineare Elemente die Verformung gut wiedergeben.

In Tabelle 1.3 sind in der linken Spalte die Elemente mit linearem Ansatz und in der rechten Spalte die Elemente mit quadratischem Ansatz zu finden. Dargestellt sind ausschließlich Serendipity-Elemente. Eine weitere Elementart wären die Lagrange-Elemente. Diese unterscheiden sich bei manchen Elementtypen durch die Anzahl der Knoten. Es werden zusätzliche Mittelknoten eingefügt. Das Äquivalent z.B. zu einem Hexa20-Serendipity-Element [Wissmann & Sarnes, 2006], wäre das Hexa27-Lagrange-Element [Herzog]. Die 7 zusätzlichen Knoten liegen in der Mitte der 6 Flächen und im Schwerpunkt des Elementes.

Es wird in dieser Arbeit auf die Serendipity-Elemente zurückgegriffen, da nur diese Elementart durch Nastran unterstützt werden. Mit diesem Solver wird im Folgenden hauptsächlich gearbeitet.

Tabelle 1.3: Serendipity-Elemente

Elementtyp	Linearer Ansatz	Quadratischer Ansatz
<p>Tria-Element (2D)</p>	 <p>Tria3 3 Knoten</p>	 <p>Tria6 6 Knoten</p>
<p>Quad-Element (2D)</p>	 <p>Quad4 4Knoten</p>	 <p>Quad8 8Knoten</p>
<p>Tetraeder-Element (3D)</p>	 <p>Tetra4 4 Knoten</p>	 <p>Terta10 10 Knoten</p>
<p>Hexaeder-Element (3D)</p>	 <p>Hexa8 8 Knoten</p>	 <p>Hexa20 20 Knoten</p>

2 Laminieren von Übergängen

Es soll ein Programm geschrieben werden, das im Preprocessing eingesetzt werden kann, um Steifigkeitssprünge bei Laminatstößen zu reduzieren. Dazu werden Voruntersuchungen gemacht, die bei der Erstellung des Programms helfen sollen.

2.1 Problemstellung

Faserverbundwerkstoffe kommen in vielen Bereichen der Technik vor. Vor allem in der Luft- und Raumfahrttechnik werden diese Werkstoffe verwendet. Beim Konstruieren mit Faserverbundwerkstoffen kommt es konstruktionsbedingt zu Dickenänderungen des Materials. Aufgrund der Faserbeschaffenheit des Werkstoffes müssen bei einer Dickenabnahme bzw. Dickenzunahme zwangsweise Lagen auslaufen bzw. neue Lagen beginnen. Den Übergang nennt man „Rampe“. In der Praxis werden solche Übergänge üblicherweise in der FEM nicht mit modelliert. Hier stößt meist Laminat A mit n Lagen auf Laminat B mit m Lagen.

Durch diesen Lagensprung entsteht ein Steifigkeitssprung (Laminatstoß), der die Ergebnisse negativ beeinflussen kann. Das Modell neigt in diesen Regionen zu Dehnungs- und Spannungserhöhungen.

Während des Preprocessings in der Praxis, werden die Lamine als 2D-Schalen modelliert. Dies hat meist die Folge, dass ein Schalenelement n -Lagen und das Nachbarelement m -Lagen zugewiesen bekommt.

Um einen zu hohen Lagensprung zu vermeiden, soll ein Programm entwickelt werden, das im Optimalfall während des Preprocessings die verschiedenen Laminat-Komponenten erkennt und zwischen diesen Komponenten eine neue Komponente erstellt. Die neue Komponente wird eine Lagenzahl zugewiesen bekommen, die zwischen den zu verbindenden Laminaten liegen wird. Es entsteht ein Laminat C (die Rampe) mit p Lagen (wobei $n < p < m$). So kann der Steifigkeitssprung verkleinert werden, indem dieser auf zwei Steifigkeitssprünge verteilt wird. Die Problematik, die sich hier stellt, sind die Lagenorientierungen in der Rampe. Diese müssen zum Einen durchgängige Lagen gewährleisten können, damit dieser Übergang auch fertigungstechnisch machbar ist, und zum Anderen müssen die Eigenschaften wie die Gesamtsteifigkeit, E-Modul u.a. zusammenpassen, dass ein glatter Dehnungs-Fehlerindex-Verlauf gewährleistet wird.

Im kommenden Kapitel geht es zunächst um die Untersuchung dieser Lagensprünge. Aus den gewonnenen Daten soll versucht werden eine Methode oder ein Hilfsmittel herzuleiten, womit eine automatische Lagengenerierung der Rampe zuverlässig erstellt werden kann. Zum Schluss soll versucht werden dieses Programm zu realisieren.

In der Konstruktion wird ein Laminataufbau bisher manuell ermittelt. Dazu gibt es diverse Modellierungsregeln. [Airbus S.A.S, 2004]

- Einhalten eines symmetrischen Lagenaufbaus
- 10%-Regel
- aufeinanderfolgende Lagenausrichtungen
- Verteilung auslaufender Lagen in Rampen
- Lagenorientierungen
- Durchgängige äußere Lagen

Einhalten eines symmetrischen Lagenaufbaus

Die Lagenorientierungen eines Laminates sollten bezüglich zur Mittellinie symmetrisch sein. Dies gewährleistet, dass die B-Matrix (aus der Steifigkeitsmatrix des Laminates) nicht ausgefüllt wird. Dies hat zur Folge, dass sich das Laminat bei z.B. einer Zugbelastung nur in Zugrichtung ausdehnt.

10%-Regel

Die jeweiligen Lagenorientierungsanteile 0° , 90° , 45° und -45° sollten einen Anteil von 10% des gesamten Laminates nicht unterschreiten.

Aufeinanderfolgende Lagenausrichtungen

Delamination kann durch interlaminaeren Schub verursacht werden. Dieser interlaminaere Schub kann gering gehalten werden, die Winkel aufeinanderfolgender Lagen gering gehalten wird. Des Weiteren sollten $+45^\circ$ und -45° -Lagen stets direkt aufeinander folgen. Diese Regeln lassen sich in der Praxis nicht immer einhalten. Es muss bei jedem Einzelfall geprüft werden.

Verteilung auslaufender Lagen in Rampen

Lagen, die innerhalb einer Rampe enden, sollten möglichst gleichmäßig im Laminat verteilt sein. In einem Bauteil sollten Lagen, die nur bereichsweise vorhanden sind (eine zusätzliche Lage im Laminat, die lokal begrenzt ist). Diese sollten möglichst nahe an der Mitte des Laminates befinden oder nahe an der Oberfläche. Dies gewährleistet einen möglichst gleichmäßigen Einfluss dieser lokal begrenzten Schicht.

Lagenorientierung

Es dürfen maximal 3 Lagen gleicher Orientieren aufeinander folgen. Dies soll Mikrorisse im Laminat verhindern.

Durchgängige äußere Lage

Die äußeren Lagen eines Laminates sollten sich möglichst über das gesamte Bauteil erstrecken. Zu vermeiden ist dabei eine 0° Lage in den äußersten Bereich zu legen, da diese für gewöhnlich eine tragende Funktion hat. An der Oberfläche ist diese Anfällig für Beschädigungen. In der Regel werden für die äußersten Schichten eine Kombination von $+45^\circ$ und -45° -Lagen verwendet.

2.2 Vorgehensweise

Um ein Programm schreiben zu können, das eine automatische Lagengenerierung gewährleisten kann, soll zunächst das Verhalten von Laminaten untersucht werden. Die Idee ist, dass über das Dehnungsverhalten, bei unterschiedlichen Faserorientierung und gleichbleibender Belastung, Informationen ermittelt werden können, die bei der Realisierung des Programms helfen könnten. Alle Berechnungen, die dazu nötig sind, sollen mit dem Solver „Nastran“ gelöst werden.

Es ergeben sich folgende Fragenstellungen, die geklärt werden sollen:

- Wie verhalten sich die Dehnungen bei unterschiedlichen Faserorientierungen?
- Lassen sich Konstruktionsregeln zur Lagenkombinationen in Rampen erstellen?
- Wie groß sind die Auswirkungen von Lagendifferenzen?
- Wie genau ist ein 2D-Modell im Vergleich zum 3D-Modell, mit dem bewussten Fehler eines Lagensprunges?
- Lässt sich ein Programm schreiben, dass sich bei einem Laminatstoß die Eigenschaftsinformationen von beiden Komponenten ausliest und anschließend eine neue Komponente dazwischen setzt, um den Lagensprung zu verkleinern?
- Lassen sich zu den Laminatkombinationen Regeln erstellen?

Bevor man aber das Dehnungsverhalten von Rampen untersucht, sollten zunächst Vergleichswerte anhand von Beispielen geschaffen werden. Diese Vergleichswerte werden durch zwei FEM-Versuche gewonnen. Dazu werden zwei miteinander verbundene Laminare (Laminat A, Laminat B) belastet, die die gleiche Lagenanzahl haben. Dazu wird ein 2D-Modell in Hypermesh erstellt. Es werden dann mehrere Rechnungen gemacht, bei denen sich die Lagenorientierungen ändern. Hierzu stehen 0° , 90° , 45° und -45° -Lagen zur Verfügung, da diese Faserrichtungen in der Luftfahrttechnik gängig sind. Es sollen also alle möglichen Kombinationen der Lagen berechnet werden, um festzustellen, wie sich die Dehnungen im „Übergangsbereich“ verhalten und was für Auswirkung bestimmte Lagenkombinationen haben. Um den Rechenaufwand gering zu halten, werden alle Lagenkombinationsmöglichkeiten bei einem 2-Schicht-Laminat und bei einem 3-Schicht-Laminat durchgeführt. In der Tabelle 2.1 sind beispielhaft die Kombinationsmöglichkeiten von Laminat A und B aufgeführt, wenn man von dem 2-Lagen-Beispiel ausgeht. Dabei müssen alle Kombinationen von Laminat A und B miteinander kombiniert werden.

Tabelle 2.1: Lagenorientierungsmöglichkeiten in den Laminaten

	Schicht 1	Schicht 2		Schicht 1	Schicht 2
Laminat A	0°	0°	Laminat B	0°	0°
	0°	90°		0°	90°
	0°	45°		0°	45°
	0°	-45°		0°	-45°
	90°	0°		90°	0°
	90°	90°		90°	90°
	90°	45°		90°	45°
	90°	-45°		90°	-45°
	45°	0°		45°	0°
	45°	90°		45°	90°
	45°	45°		45°	45°
	45°	-45°		45°	-45°
	-45°	0°		-45°	0°
	-45°	90°		-45°	90°
	-45°	45°		-45°	45°
-45°	-45°	-45°	-45°		

mögliche Kombinationsmöglichkeiten eines **2-Schicht-Laminats**:

Lagenkombinationen von Laminat A,B (4 verschiedenen Faserorientierungen auf 2 Schichten):

$$n_1 = 4^2 = 16$$

Kombinationsmöglichkeiten der beiden Lamine:

$$n = n_1^2 = 256$$

mögliche Kombinationsmöglichkeiten eines **3-Schicht-Laminats**:

Lagenkombinationen von Laminat A,B (4 verschiedenen Faserorientierungen auf 3 Schichten):

$$n_1 = 4^3 = 64$$

Kombinationsmöglichkeiten der beiden Lamine:

$$n = n_1^2 = 4096$$

Nachdem die Rechnungen mit 2 gleichlagigen Laminaten durchgeführt worden sind, und man das Dehnungsverhalten von verschiedenen Lagenkombinationen untersucht hat, wird diese Untersuchung auf 2 Lamine mit unterschiedlicher Lagenanzahl erweitert. Hierzu wird das gleiche 2D-Modell verwendet. In dem Versuch betrachtet man nur 0°-Lagen, um nur die Einflüsse der Lagenanzahl zu untersuchen.

Die zuvor gewonnenen Werte werden anschließend in einem 3D-Abaqus-Modell überprüft. Alle Versuche werden anhand von 2 Lastfällen berechnet (Zug und Schub).

Zusammenfassung der Vorgehensweise:

- Untersuchung von zwei verbundenen Zwei-Schicht-Laminaten, bei denen die Hauptdehnungen und der Fehlerindex untersucht werden soll. Dabei sind jede mögliche Lagenkombinationen abzudecken.
- Untersuchung von zwei verbundenen Drei-Schicht-Laminaten, bei denen die Hauptdehnungen und der Fehlerindex untersucht werden soll. Dabei sind jede mögliche Lagenkombinationen abzudecken. Hier sollen die Ergebnisse der 2-Schicht-Untersuchung geprüft werden.
- Untersuchung von Lagensprüngen. Hierbei soll das Verhalten eines Laminatstoßes geprüft werden, bei dem die Lagendifferenz variiert werden soll.

2.3 Das 2D-Modell

Im Folgenden wird ein 2D-Modell des Versuches erstellt und berechnet. Dazu bedarf es einer umfassenden Vorbereitung. Mit der Auswertung des Versuches soll ein Hilfsmittel erstellt werden, das einem Programm bei der automatischen Lagenerzeugung einer Rampe helfen soll.

2.3.1 Aufbau des 2D-Modells

Nachdem die Vorgehensweise ermittelt worden ist, wird nun ein 2D-Modell benötigt, um das Laminatverhalten zu untersuchen.

Das 2D-Modell wird mit Hilfe von Hypermesh (in der Nastran-Umgebung) erzeugt. Die Abmessungen eines Laminats wird auf $100\text{mm} \times 50\text{mm}$ festgelegt. Laminat A liegt an der Einspannung und Laminat B bei der Krafteinleitung. Aufgebaut wird das Modell in der x-y-Ebene (Abbildung 2.1).

Der Aufbau wird mit Hilfe von Flächen realisiert. Sind die Fläche gesetzt und damit die

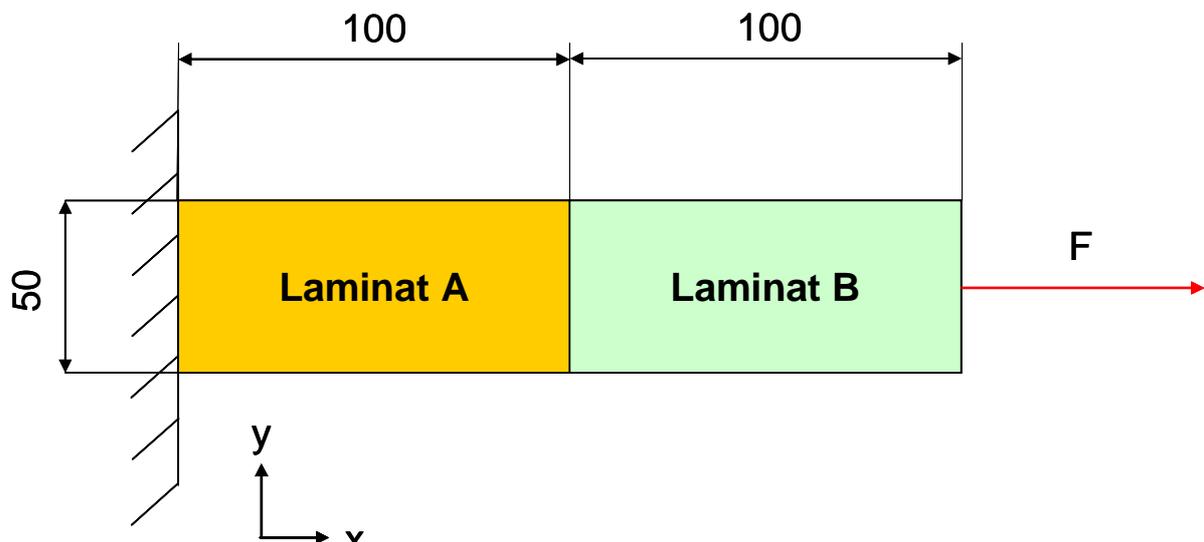


Abbildung 2.1: Aufbau des 2D-Modells

Abmaße des Bauteils bestimmt, werden die Flächen vernetzt. Beim Vernetzen werden Quad-Elemente erzeugt mit einer Kantenlänge von 1mm. Es entstehen 10000 Elemente.

Wie oben schon erwähnt, wird am Laminat A die Lagerung angesetzt. Hierfür wurde eine Einspannung gewählt, um jegliche Bewegung des Laminates zu verhindern. Am Laminat B greift eine Kraft von 1000N an. Die 1000N werden gleichmäßig über 51 Knoten verteilt. 49 Knoten werden mit 20N beaufschlagt. An den äußersten Knoten greifen nur 10 N an, da an diesen nur jeweils 1 Element grenzt, an dem die Kraft weitergeleitet werden kann. Auf diese Weise kann eine gleichmäßige Kraftverteilung gewährleistet werden. Das bis jetzt erstellte Modell sieht wie im folgenden Bild aus (Abbildung 2.2):

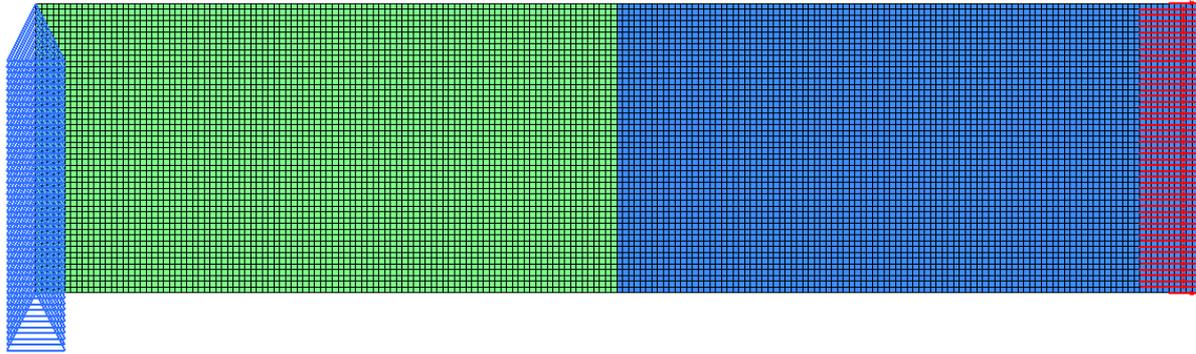


Abbildung 2.2: Elementnetz des 2D-Modells

Es soll später noch ein Schub-Lastfall eingeführt werden. Dazu wird an dieser Stelle eine Schubbelastung von 80N eingeführt. Das Modell an sich wird nicht verändert.

Das Netz von Laminat A und Laminat B wurden in separaten Komponenten gespeichert, um diesen später eine eigene Eigenschaft zuweisen zu können.

Zum Erstellen der Properties, in denen die Eigenschaften der einzelnen Lagen hinterlegt sind, wird das Hypermesh-Tool „HyperLaminate“ benutzt. Nun muss zunächst ein Werkstoff für das Laminat ausgewählt werden. Als Werkstoff wird ein unidirektionales Gelege mit Duroplastharz verwendet¹. Dazu wird eine MAT8 Karte angelegt, die eine orthotrope Materialeigenschaft für isoparametrische Elemente beschreibt. Zusätzlich zur Materialkarte benötigen wir die Eigenschaften (Properties) des Laminates. Dafür wird eine PCOMP-Karte (Layered Composite Element Property) erstellt. Diese weist dem Laminat die Anzahl der Lagen, die Orientierungen, die Lagenstärke und die Anzahl der Integrationspunkte zu. Für den Fall, dass in der Materialkarte die Versagenskriterien eingetragen worden sind, kann man in der PCOMP-Karte zusätzlich noch ein Fehlerkriterium wählen, das ausgewertet werden soll. Hier wird das TSAI-Fehlerkriterium ausgewählt. Nachdem die Properties erstellt worden sind, können diese den Komponenten (Laminat A, Laminat B) zugewiesen werden.

Anschließend muss noch das Materialkoordinatensystem festgelegt werden. Wenn dieses festgelegt ist, wird nach der x-Achse dieses Systems die Faserorientierung (0° -Richtung) festgelegt. Auf diese Weise sind alle Orientierungsrichtungen eindeutig festgelegt. Da sich das Modell in der x-y-Ebene befindet und die Hauptabmessungen in x-Richtung liegen, bietet sich hier das globale Koordinatensystem an.

Um die spätere Auswertung zu vereinfachen, wird nun ein Elementset erstellt. Dieses Set besteht aus 6 Elementen, bei denen die maximalen Dehnungen erwartet werden. Drei Elemente liegen auf Laminat A und drei auf Laminat B. Die maximalen Dehnungen werden entweder am Rand oder in der Mitte erwartet. Es werden für die äußeren Elemente aber keine Elemente direkt an der Laminatkante ausgewählt, da mögliche Randeinflüsse wie Krepelmomente und interlaminare Spannungen die Auswertung verfälschen könnte. In Abbildung 2.3 ist die schematische Anordnung dargestellt. Die ausgewählten Elemente haben im Modell die Identifikationsnummern 8049, 9234, 9016, 10981, 12242 und 12006.

¹ Genaue Materialdaten werden nicht veröffentlicht

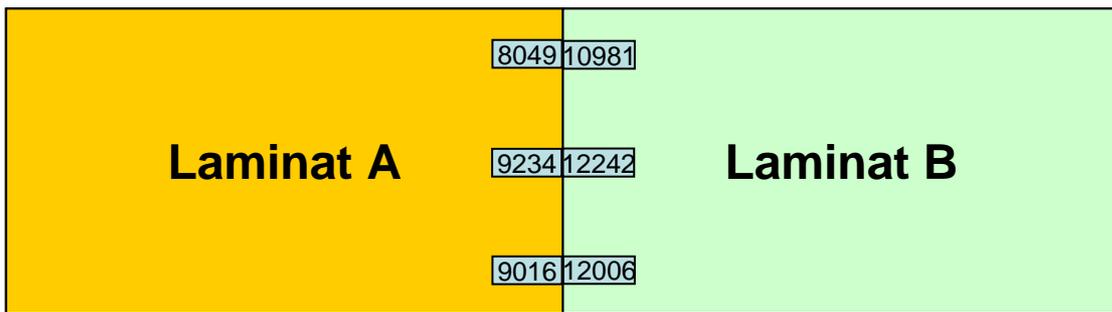


Abbildung 2.3: Elementset

Nachdem das Modell erstellt, die Randbedingungen aufgebracht und die Eigenschaften zugewiesen worden sind, müssen noch NASTRAN-spezifische Eingangsparameter erstellt werden. Diese Parameter und deren Bedeutung werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Nastran-spezifische Eingangsparameter [MSC Nastran Quick Reference Guide, 2008]

SOL 101	Statische Analyse	
DISPLACEMENT (PLOT) = ALL	DISPLACEMENT PLOT = ALL	Berechnung der Verschiebung Erstellen der Daten, und Rausschreiben in eine .OP2-Datei Auswertung aller Elemente
STRAIN (PUNCH, FIBER) = 1	STRAIN PUNCH FIBER = 1	Berechnung der Dehnungen Rausschreiben der Daten in eine .pch-Datei Die Dehnung wird für Plattenelemente berechnet Auswertung des Set's „1“
STRESS (PUNCH, VONMISES) = 1	STRESS PUNCH VONMISES = 1	Berechnung der Spannungen Rausschreiben der Daten in eine .pch-Datei Von Mises-Spannung Auswertung des Element-Set's „1“
PARAM,K6ROT,100.000	Festlegung eines Steifigkeitsfaktors (100.000) für Normalrotation von CQUAD4- und CTRIA3-Elementen	
PARAM,POST,-1	Ergebnisdateien als .OP2 rausschreiben	
PARAM,MAXRATIO,10E10	Festlegen des maximalen Steifigkeitsverhältnisses eines Steifigkeitssprunges	

Nun ist das Modell mit NASTRAN rechenbar. Dafür wird das Modell aus Hypermesh im NASTRAN-Format (.bdf) exportiert.

2.3.2 Vorbereitungen der Rechnungen

Das Modell ist bereits rechenbar und würde Ergebnisse produzieren. Die Problematik ist nun, dass man dem Modell nur eine Eigenschaft, d.h. nur eine Laminatkombination, zuweisen kann. Wie schon zuvor berechnet, benötigen alle Kombinationsmöglichkeiten von 2 Schicht- und 3-Schichtlaminaten 256 bzw. 4096 Rechnungen. Es wird eine programmiertechnische Lösung benötigt, um dieses Problem in angemessener Zeit zu lösen. Als Lösungsansatz dient hier die NASTRAN-Eingabedatei. Diese soll mit Hilfe von PERL (eine Programmiersprache) so verändert werden, dass die Eigenschaften in der PCOMP-Karte verändert werden, die eine neue Kombination aufweisen und als separate Eingabedatei gespeichert wird. Auf diese Weise würde man 256 Eingabedateien im Fall des 2-Schichtlaminates und 4096 Eingabedateien im Fall des 3-Schichtlaminates produzieren, die nacheinander gerechnet werden. Dies sollte ebenfalls automatisch geschehen.

Eine NASTRAN-Eingabedatei ist wie folgt aufgebaut (Abbildung 2.4):

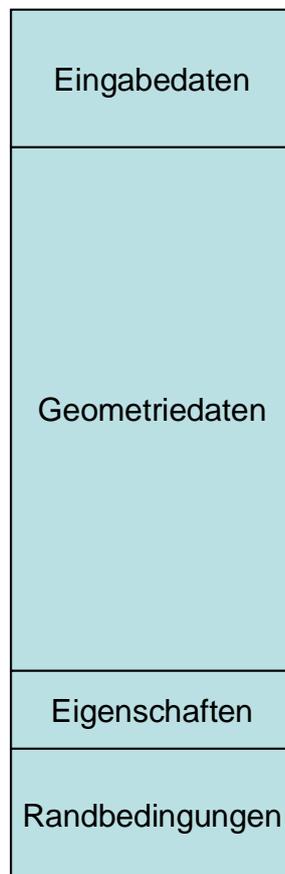


Abbildung 2.4: Aufbau der Nastran-Eingabedatei

In den „Eingabedaten“ sind die Informationen enthalten, die in der Tabelle 2.2 erläutert sind. Die „Geometriedaten“ enthalten die Koordinaten aller Knoten. Auch alle Elemente sind hier hinterlegt. Sie werden durch die Identifikationsnummern der Knoten beschrieben. Zudem enthält jedes Element die für die Programmierung relevante Information, welche Eigenschaft diesem Element zugeordnet werden soll (Property-Identifikationsnummer).

Die Idee ist nun den Aufbau der NASTRAN-Eingabedatei zu trennen und separat voneinander zu bearbeiten (Abbildung 2.5)

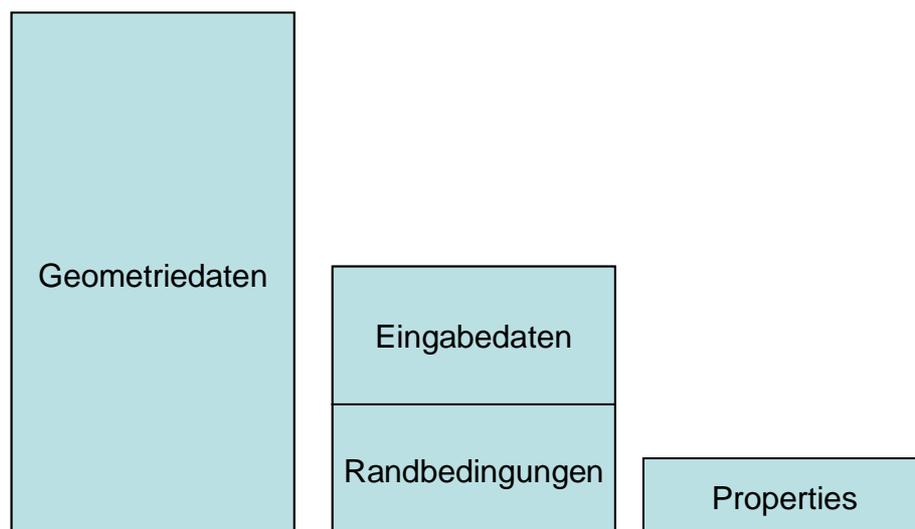


Abbildung 2.5: Trennen der Nastran-Eingabedatei

Zunächst müssen die Bezeichnungen noch festgelegt werden, um automatisch erzeugte Dateien eindeutig zuweisen zu können. Es wird festgelegt, dass sich die Bezeichnungen nach den Lagenorientierungen richten (Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Kurzzeichen-Schlüssel für Lagenorientierungen

Lagenorientierung	0°	90°	45°	-45°
Kurzzeichen	1	2	3	4

Ein Laminat mit einer 0° und einer 90°-Schicht hätte also ein Kurzzeichen von „12“ und die Laminatkombination von Laminat A (0°,90°) und B (45°, 0°) ein Kurzzeichen von „12-31“.

Mit Hilfe dieser Kurzzeichen sollen nun durch Perl die Properties erstellt werden. Der Aufbau einer PCOMP-Karte wird im folgenden Beispiel dargestellt:

```
PCOMP      423          68.0          TSAI
           1  0.184 -45.000  YES      1  0.184  90.000  YES
           1  0.184  45.000  YES
```

Hier handelt es sich um einen Eintrag für ein 3-Schichtlaminat. Bereits an der Identifikationsnummer „423“ der Eigenschaft erkennt man die Lagenorientierungen in diesem Laminat (-45°, 90°, 45°). Neben der Identifikationsnummer steht nach welchem Versagenskriterium gerechnet werden soll. In diesem Fall soll nach Tsai-Wu gerechnet werden mit einer maximal erlaubten Scherspannung von 68 MPa.

```
1  0.184 -45.000  YES
```

Dieser Eintrag beschreibt eine einzige Lage. Diese Lage hat in diesem Beispiel eine Orientierung von -45°, eine Schichtstärke von 0.184mm, sie wird der Materialidentifikationsnummer „1“ zugeordnet und die Spannungen/Dehnungen sollen ausgegeben werden.

Nachdem die Properties erstellt worden sind und eindeutige Identifikationsnummern bekommen haben, müssen die Geometriedaten verändert werden.

```
CQUAD4    5001      xx    5633    5636    5638    5632      0
CQUAD4    10001     yy    10782   10789   10778   10779      0
```

Alle Elemente haben durch manuelles Ersetzen ein xx oder yy an der Position, wo die Property-ID eingetragen werden soll. Die Elemente mit dem Eintrag ‚xx‘ gehören zum Laminat A und die anderen mit dem Eintrag ‚yy‘ zum Laminat B. Hier kann man nun alle Kombinati-

onsmöglichkeiten eintragen lassen. Dies ist nun die original Geometriedaten.bdf, mit dem gearbeitet werden soll.

Nun müssen die getrennten Eingabedateien wieder zusammengesetzt werden, damit sie gerechnet werden können. Dies wird mit dem NASTRAN-Befehl „include“ realisiert. Der Befehl z.B. „INCLUDE Geometriedaten12-23.bdf“ würde in demselben Ordner nach der Datei Geometriedaten12-23.bdf suchen. Dabei stehen die ersten zwei Zahlen für die Lagenorientierungen aus Laminat A und die letzten zwei Zahlen für die Lagenorientierungen aus Laminat B. Die Bedeutungen der Zahlen sind in dem Kurzzeichenschlüssel aus Tabelle 2.3 nachzulesen. Dieser Befehl wird nun in dem Teilskript „Eingabedaten“ implementiert. Da die Dateinamen aller Geometriedateien einzigartig sind, um eine eindeutige Zuweisung der Kombinationen zu ermöglichen, muss das dazugehörige Teilskript ebenfalls einen eindeutigen Dateinamen bekommen. Das Property-Teilskript muss dagegen nur einmal existieren, da die darin enthaltenen Informationen für alle Rechnungen gültig sind und nicht verändert werden. Um die Eingabedateien mit der Property-Datei zu verbinden, bekommt jede Eingabedatei den Befehl „INCLUDE Properties.bdf“. Im Fall der 2-Schichtlaminat-Kombinationen werden also 136 Eingabe- und Geometrieskripte und ein Property-Skript benötigt. Insgesamt wären das $2 \cdot 256 + 1 = 513$ Dateien, die erzeugt werden müssen, um alle 2-Schichtkombinationen abdecken zu können. Beim 3-Schichtlaminat wären es $2 \cdot 4096 + 1 = 8193$ Dateien.

Nach Erzeugung der NASTRAN-Input-Dateien wird noch ein Programm benötigt, um die Rechnungen nacheinander durchlaufen zu lassen. Hierfür bieten sich Batch-Dateien an. Für jede Rechnung wird eine Batch-Datei benötigt, die im Anschluss, nachdem NASTRAN gestartet worden ist, die nächste Batch-Datei aufruft. Auf diese Weise bildet man eine Kette von Rechnungen, die sich nacheinander starten.

Nachdem alle Rechnungen durchgelaufen sind, wird ein weiteres Perl-Skript benötigt, um die Ergebnisse automatisch auszuwerten. Es werden in der Berechnung hauptsächlich die Dehnungen und Spannungen von 6 Elementen ausgewertet. Diese Daten werden in .pch-Dateien geschrieben. Das Perl-Skript zur Auswertung muss also auf diese Dateien zugreifen, sich die notwendigen Informationen extrahieren, sie weiterverwerten und zum Beispiel grafisch in einer Excel-Datei raus schreiben.

Reduzierung der Kombinationsmöglichkeiten

Wie schon im Kapitel „Vorgehensweise“ erläutert, benötigen wir theoretisch beim gleichlagigen 2-Schicht-Laminat

$$n_1 = 4^2 = 16$$

$$n = n_1^2 = 256$$

256 Rechnungen für 256 Kombinationsmöglichkeiten.

Man kann davon ausgehen, dass die Krafteinleitung und die Lagerung keinen Einfluss auf den Übergang haben, da das Modell so gestaltet wird, dass der Übergang in ausreichender Entfernung zu diesen Stellen liegt. Mit dieser Voraussetzung kann man die Anzahl der Rechnungen fast halbieren, da es keinen Unterschied macht, ob nun eine $[0^\circ-90^\circ]$ Kombination oder eine $[90^\circ-0^\circ]$ Kombination vorliegt.

Tabelle 2.4: Auswirkung der Kombinationsreduzierung

		Laminat B															
		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°
Laminat A	0°/0°	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0°/90°		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0°/45°			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0°/-45°				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	90°/0°					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	90°/90°						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	90°/45°							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	90°/-45°								X	X	X	X	X	X	X	X	X
	45°/0°									X	X	X	X	X	X	X	X
	45°/90°										X	X	X	X	X	X	X
	45°/45°											X	X	X	X	X	X
	45°/-45°												X	X	X	X	X
	-45°/0°													X	X	X	X
	-45°/90°														X	X	X
	-45°/45°															X	X
	-45°/-45°																X

Die Auswirkung der Reduktion ist hier in der Tabelle 2.4 anschaulich dargestellt. Man erkennt auch, dass es sich nicht genau um die Hälfte der Kombinationsmöglichkeiten handelt, da die Diagonale der Matrix komplett ausgefüllt ist.

Aufgrund dieser Symmetrie lassen sich Rechnungen einsparen. Diese Ersparnis liegt bei dem 2-Schicht-Laminat bei 46,9% und beim 3-Schicht-Laminat bei 49,22%. Das heißt, dass im Fall des 2-Schicht-Laminates nur noch 136 Rechnungen und im Fall des 3-Schichtlaminates nur noch 2080 Rechnungen gemacht werden müssen, um alle Kombinationsmöglichkeiten abdecken zu können.

Damit ändert sich auch die Anzahl der Nastran-Eingabedateien. Für die 2-Schicht-Kombinationen werden nur noch 273 und für die 3-Schicht-Kombinationen nur noch 4161 Dateien benötigt.

2.3.3 Erzeugung der Nastran-Eingabedateien

Das Programm, das nun vorgestellt wird, hat die Aufgabe die Nastran-Eingabedateien zu erstellen. Folgende Anforderungen an das Programm werden gestellt (Tabelle 2.5):

Tabelle 2.5: Anforderungsliste für die Nastran-Eingabedateien-Erzeugung

	Anforderung	Forderung / Wunsch
1.	Keine manuellen Eingaben	W
2.	Erstellen der zu Berechnung notwendigen Eingabedateien	F
3.	.bdf- Dateiformat	F
4.	Geometriedaten von der eigentlichen Eingabedatei trennen	F
5.	Verweis der Geometriedatei in der Eingabedatei	F
6.	Ausnutzen der Symmetrie zur Rechenersparnis	W
7.	Für jede Kombinationsmöglichkeit eine separate Eingabedatei	F

Der Programmablaufplan aus Abbildung 2.7 stellt das Programm „Inputerzeugung2Schicht.pl“ dar. Dieses Programm erstellt die Geometriedaten- und Eingabe-Dateien mit eindeutiger Identifikationsnummern und individuellen Eigenschaftskombinationen.

Das Programm startet damit, dass es die die original Geometriedaten.bdf – Datei öffnet und den Inhalt in das Array „lines“ schreibt. Zudem werden die später benötigten Variablen definiert (PAP aus Abbildung 2.7 bei [1]):

$$\begin{aligned}z &= 0 \\i &= 1 \\j &= 1 \\k &= 1 \\m &= 1\end{aligned}$$

Das Programm passiert zuerst die i-for-Schleife und direkt danach die j-for-Schleife (PAP [2]), da in beiden Fällen die Variablen ≤ 4 sind. Nun wird die Variable „b“ definiert, die dafür zuständig ist, die Symmetrie der Kombinationsmatrix auszunutzen und damit unnötige Schleifendurchgänge zu vermeiden (PAP [3]). Im ersten Durchlauf beträgt der Wert für b:

$$b=1$$

Nun werden die letzten beiden for-Schleifen passiert (PAP [4]). Sowohl die k-Schleife, als auch die m-Schleife werden bestätigt, da beide Werte ≤ 4 sind. Im Anschluss wird „b“ um 1 reduziert und bekommt den neuen Wert (PAP [5]):

$$b=0$$

Ist nun der neue Wert von „b“ ≤ 0 , kann das Programm die if-Schleife passieren und mit der Dateierstellung fortfahren. Sollte dies nicht der Fall sein, wird der m-Wert um eins erhöht, b um eins verringert, und die if-Abfrage wird erneut durchgeführt.

Im ersten Durchlauf ist es aber der Fall, dass das Programm mit dem Wert von „b“ die If-Schleife passieren kann. In dieser Schleife wird zunächst eine Datei mit dem Namen „Geometriedaten*i**j*-*k**m*.bdf“ erstellt (PAP [6]). Der Dateiname bekommt hier einen Nummernzusatz der gleichzeitig einzigartig ist und zusätzlich die Information der Lagenkombination beinhaltet. Denn nach dem Kurzzeichenschlüssel aus Tabelle 2.3, hätten wir im 1. Durchlauf den Namenszusatz „11-11“, was auf eine $[0^\circ, 0^\circ]$ - $[0^\circ, 0^\circ]$ Kombination schließen lässt. Das Laminat A besteht aus zwei 0° -Lagen und das Laminat B ebenfalls. Direkt nach Erstellung der Datei, wird das Array „lines“ mit den Originalinformationen aus „Geometriedaten.bdf“ in ein weiteres Array „var“ gespeichert, mit dem ab nun weitergearbeitet wird. Jede Position dieses Arrays stellt nun eine Zeile von „Geometriedaten.bdf“ dar.

Jetzt betritt das Programm eine foreach-Schleife (PAP [7]). Es wird geprüft, ob das Array mit Informationen gefüllt ist. Falls dies der Fall ist, wird zu der ersten Arrayposition gesprungen, was in diesem Fall die erste Zeile der „Geometriedaten.bdf“ ist. Das Array wird nun solange durchlaufen, bis es auf den Eintrag „xx“ trifft. Dieser Eintrag beschreibt die Property-Identifikationsnummer eines Elementes in Laminat A. Das „xx“ wird nun mit den Werten von „i“ und „j“ ersetzt, was im ersten Durchlauf „11“ entspricht. Trifft die Schleife nun auf die Einträge „yy“ (Property-Identifikationsnummer von Laminat B) werden diese mit „k“ und „m“ ersetzt. Ist die letzte Zeile des Arrays „var“ erreicht, wird die foreach-Schleife beendet. Die oben bereits erzeugte Datei „Geometriedaten*i**j*-*k**m*.bdf“ wird nun mit den Informationen von dem Array „var“ gefüllt (PAP [8]). Damit sind die Geometriedaten für die erste Kombination erstellt.

Nun wird die dazugehörige Eingabedatei benötigt, mit dem darin enthaltenen Verweis zu den entsprechenden Geometriedaten. Es wird wie oben eine neue Datei mit dem Namen „Eingabedatei*i**j*-*k**m*.bdf“ erzeugt (im 1. Durchgang: „Eingabedaten11-11.bdf“). Diese wird mit den Daten von der Originaldatei „Eingabedaten.bdf“ aufgefüllt. Das Original hat an der Stelle, an der die Geometriedaten eingefügt werden sollen, ein „include“ stehen. Im nachfolgenden wird in einer while-Schleife die Originaldatei „Eingabedaten.bdf“ zeilenweise durchlaufen auf der Suche nach dem Begriff „include“ (PAP [9]). Wird kein „include“ gefunden, wird

die durchgelaufene Zeile von der Originaldatei in die neue Eingabedatei geschrieben. Wird dieser Eintrag aber gefunden, ersetzt das Programm an der gleichen Stelle der „Eingabedaten11-11.bdf“ das „include“ mit „INCLUDE Geometriedaten11-11.bdf“. NASRAN würde an dieser Stelle nun nach der entsprechenden Datei im Ordner suchen.

Nun sind die Geometriedaten und die Eingabedaten für die 1. Kombination erstellt worden. Im Abschluss dieses Durchlaufes wird nun noch eine Datei „DatFiles.txt“ erzeugt und der Dateiname und der Pfad der gerade erzeugten Eingabedatei dort eingetragen (PAP [10]).

Die m-For-Schleife wird nun um 1 erhöht (PAP [11]) und durchläuft den Body (die eigentliche Funktion des Programms) erneut mit einem reduzierten „b“. Diese Durchläufe werden in dem Skript 16 Mal wiederholt. Danach wird „j“ um eins erhöht, „b“ zurückgesetzt auf das neue „z“ und anschließend wieder um 1 reduziert. Jetzt ist „b“ ≥ 0 und dieser Durchlauf passiert dieses Mal nicht die If-Schleife. Das heißt, dass die Kombination 12-11 ausgelassen wird. Dies ist auch die Aufgabe dieser Variablen bzw. der If-Schleife, um doppelte Kombinationen auszuschließen. In früheren Überlegungen wurde festgelegt, dass z.B. 12-11 gleich 11-12 ist. Die Tabelle 2.6 zeigt die Wirkungsweise der „b-If-Schleife“

Tabelle 2.6: programmiertechnische Umsetzung der Kombinationsreduzierung

		Laminat B															
		0° 0°	0° 90°	0° 45°	0° -45°	90° 0°	90° 90°	90° 45°	29° -45°	45° 0°	45° 90°	45° 45°	45° -45°	-45° 0°	-45° 90°	-45° 45°	-45° -45°
Laminat A	0° 0°	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0° 90°	b=1 →	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0° 45°	b=2 →	b=1 →	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0° -45°	b=3 →	b=2 →	b=1 →	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	90° 0°	b=4 →	b=3 →	b=2 →	b=1 →	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	90° 90°	b=5 →	b=4 →	b=3 →	b=2 →	b=1 →	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	90° 45°	b=6 →	b=5 →	b=4 →	b=3 →	b=2 →	b=1 →	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	90° -45°	b=7 →	b=6 →	b=5 →	b=4 →	b=3 →	b=2 →	b=1 →	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	45° 0°	b=8 →	b=7 →	b=6 →	b=5 →	b=4 →	b=3 →	b=2 →	b=1 →	X	X	X	X	X	X	X	X
	45° 90°	b=9 →	b=8 →	b=7 →	b=6 →	b=5 →	b=4 →	b=3 →	b=2 →	b=1 →	X	X	X	X	X	X	X
	45° 45°	b=10 →	b=9 →	b=8 →	b=7 →	b=6 →	b=5 →	b=4 →	b=3 →	b=2 →	b=1 →	X	X	X	X	X	X
	45° -45°	b=11 →	b=10 →	b=9 →	b=8 →	b=7 →	b=6 →	b=5 →	b=4 →	b=3 →	b=2 →	b=1 →	X	X	X	X	X
	-45° 0°	b=12 →	b=11 →	b=10 →	b=9 →	b=8 →	b=7 →	b=6 →	b=5 →	b=4 →	b=3 →	b=2 →	b=1 →	X	X	X	X
	-45° 90°	b=12 →	b=12 →	b=11 →	b=10 →	b=9 →	b=8 →	b=7 →	b=6 →	b=5 →	b=4 →	b=3 →	b=2 →	b=1 →	X	X	X
	-45° 45°	b=14 →	b=13 →	b=12 →	b=11 →	b=10 →	b=9 →	b=8 →	b=7 →	b=6 →	b=5 →	b=4 →	b=3 →	b=2 →	b=1 →	X	X
-45° -45°	b=15 →	b=14 →	b=13 →	b=12 →	b=11 →	b=10 →	b=9 →	b=8 →	b=7 →	b=6 →	b=5 →	b=4 →	b=3 →	b=2 →	b=1 →	X	

„b“ wird also nach jedem Zeilensprung in der Kombinationsmatrix zurück- und gleich dem neuen z –Wert gesetzt. Nach jedem Schleifendurchlauf wird „b“ um eins verringert. Solange $b > 0$ ist, werden keine Eingabe- und Geometriedaten raus geschrieben.

Dieses Programm erstellt die notwendigen Dateien für die 2-Schicht-Laminatkombinationen. Der Programmablaufplan der 3-Schicht-Laminat sieht dem für 2 Schichten sehr ähnlich (Abbildung 2.6). Es werden lediglich 2 weitere for-Schleifen eingefügt und die Initialisierung von „b“ und „z“ wird hinter die dritte for-Schleife verschoben.

Nachdem das Programm komplett durchgelaufen ist, sind alle Geometrie- und Eingabedateien erstellt. Noch würde NASTRAN nicht rechnen, da die Property-Datei noch nicht erstellt wor-

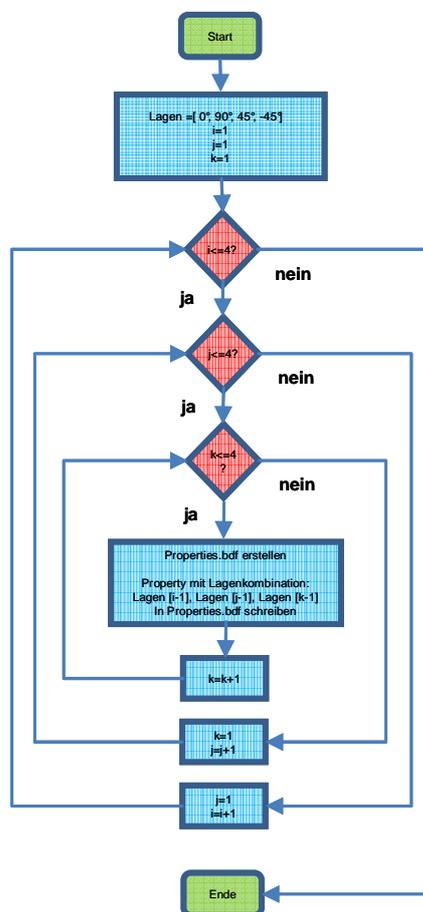


Abbildung 2.6: Programmablaufplan für die Eigenschaftsgenerierung

den ist. Dazu gibt es auch ein Programm namens „Propertyerzeugung.pl“. Der Programmablaufplan für ein 3-Schicht-Laminat ist in Abbildung 2.6 abgebildet.

Hierbei handelt es sich um drei ineinander verschachtelte for-Schleifen. Anfangs wird ein Array erstellt mit den möglichen Lagenorientierungen 0°, 90°, 45° und -45°. Nun wird ein PCOMP-Eintrag erstellt. An der Stelle der Lagenorientierungen des Eintrages, wird eine Variable gesetzt.

Bei einem Stand der for-Schleifen von:

$$\begin{aligned} i &= 1 \\ j &= 2 \\ k &= 4 \end{aligned}$$

würden in den Abschnitten der Orientierungen die Arraypositionen „1“, „2“ und „4“ eingetragen werden. Diese Arraypositionen beinhalten die oben definierten Orientierungen 0°, 90° und -45°, die in die Property eingetragen werden. Sind alle For-Schleifen durchgelaufen, wurde eine Eigenschaftskarte mit 64 verschiedenen Lagenkombinationen erstellt.

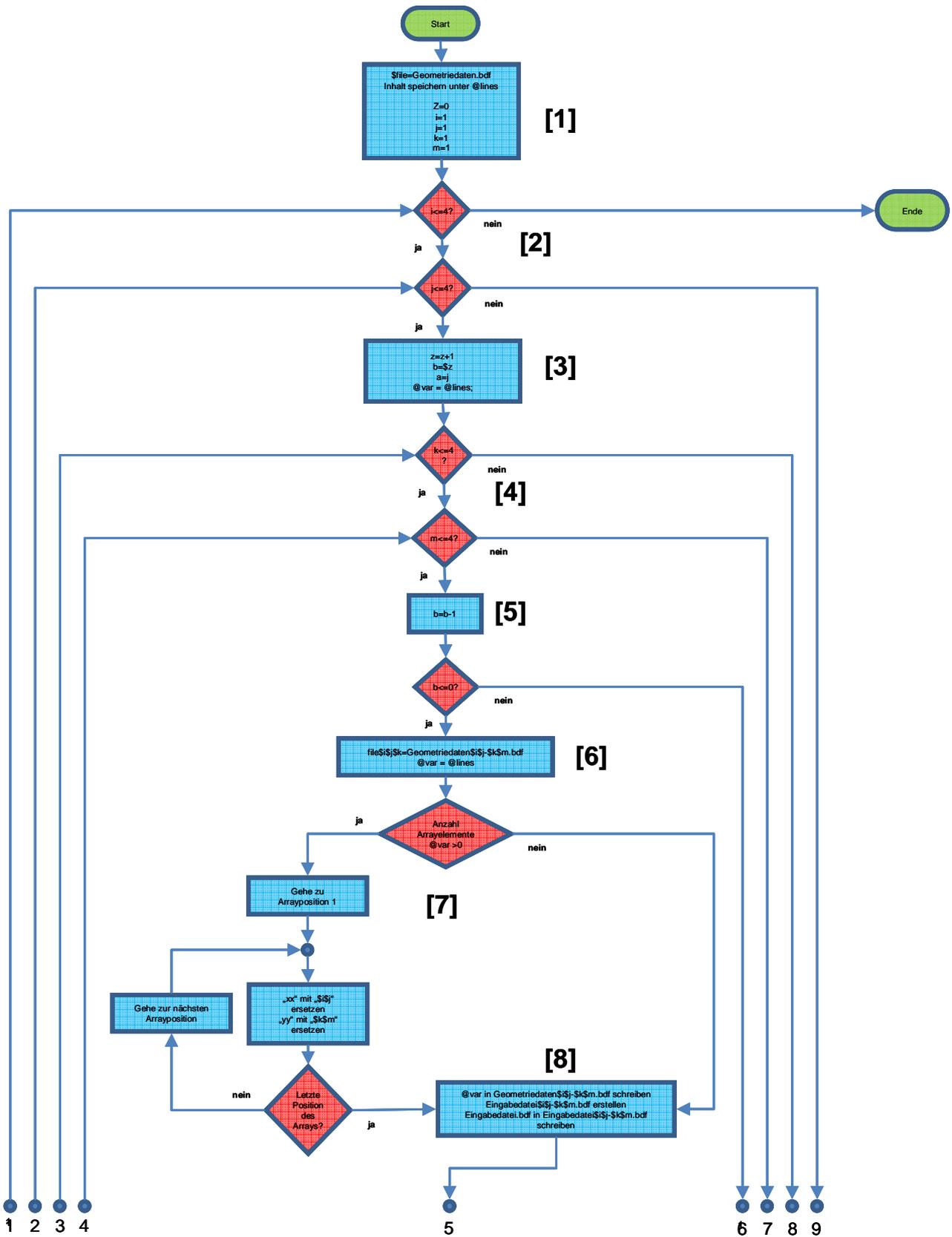


Abbildung 2.7: Programmablaufplan zur Nastran-Eingabedatei-Erzeugung (Teil 1)

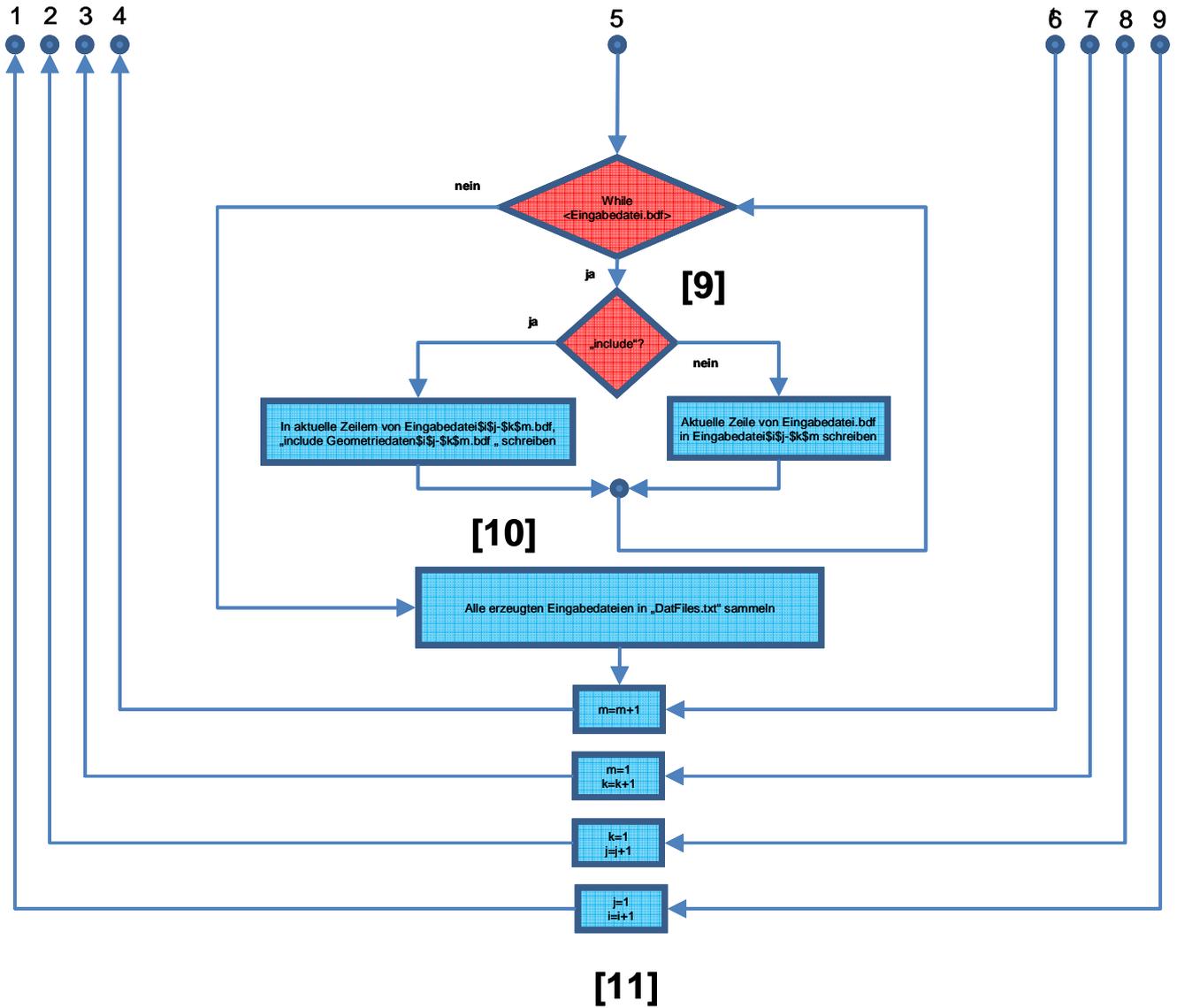


Abbildung 2.8: Programmablaufplan zur Nastran-Eingabedatei-Erzeugung (Teil 2)

2.3.4 Programmierte Auswertung der durch Nastran erstellten Punch-Dateien

Mit Nastran wurden nun alle zuvor erstellten Eingabedateien und somit alle Kombinationsmöglichkeiten berechnet. Nastran hat für jede Rechnung eine Punch-Datei herausgeschrieben, in der die Dehnungen und Spannungen der 6 Elemente hinterlegt sind. Aufgrund der Vielzahl an Rechnungen bzw. Punch-Dateien, kann die Auswertung der Dateien nicht manuell erfolgen. Folgende Punkte müssen durch ein Perl-Programm realisiert werden:

- Auslesen der Punch-Dateien
- Ermittlung der relevanter Daten (größten und kleinste Hauptdehnungen, Spannungen)
- Erstellung einer CSV-Datei, um eine Tabelle mit den gewonnenen Werten zu füllen
- Beim Rauschreiben in die CSV-Datei soll die Ausnutzung der Symmetrie optisch dargestellt werden durch das Einrücken der Daten
- Fehlerindex nach TSAI-WU für jedes Element auswerten lassen

wobei die Anforderungsliste wie folgt aussieht (Tabelle 2.7):

Tabelle 2.7: Anforderungsliste für die Punch-Datei-Auswertung

	Anforderung	Forderung / Wunsch
1.	Keine manuellen Eingaben	W
2.	Auslesen der Punch-Dateien	F
3.	Ermittlung der relevanter Daten	F
4.	Erstellung einer CSV-Datei, um eine Tabelle mit den gewonnenen Werten zu füllen	F
5.	Beim Rauschreiben in die CSV-Datei soll die Ausnutzung der Symmetrie optisch dargestellt werden durch das Einrücken der Daten	W
6.	Fehlerindex nach TSAI-WU für jedes Element auswerten lassen	W

Auslesen der Punch-Dateien:

Es werden z.B. für die 2-Schicht-Kombinations-Berechnungen 136 Punch-Dateien erstellt. Die Programmdatei (Perlskript) liegt im gleichen Ordner wie die Punch-Dateien. Nun liest das Programm jede einzelne Datei nacheinander aus. Der Inhalt der Punch-Datei wird in einem Hash gespeichert (ein assoziatives Array). Dieser Hash beinhaltet u.a.:

1. die Information, ob es sich um die Elementdehnung oder Elementspannung handelt
2. den Lastfall
3. die Elementidentifikationsnummer
4. die Lagenzahl
5. die Werte für Dehnungen und Spannungen

Ermittlung der relevanten Daten:

Für die aktuell geöffnete Punch-Datei wurde ein Hash erstellt. Nun sollen für jede Schicht und jedes der Elemente die relevanten Daten extrahiert werden. Diese Daten sind bereits einem Hash gespeichert, müssen nur noch von den irrelevanten Daten getrennt werden. Es werden folgende Werte extrahiert und in separate Arrays gespeichert:

- maximale Hauptdehnungen (P_{major})
- minimale Hauptdehnungen (P_{minor})
- x-Spannungen (σ_x)
- y-Spannungen (σ_y)
- Scherspannungen (τ_{xy})

Nun beinhalten die Arrays für die beiden Hauptdehnungen jeweils sechs Einträge (Für jedes Element ein Dehnungseintrag). Von Interesse für jede Berechnung ist aber lediglich nur das Element mit den maximalen bzw. den minimalen Hauptdehnungen. Hierfür werden die beiden Arrays auf den größten bzw. den kleinsten Wert untersucht. Diese Werte (ein Wert für die maximalen und ein Wert für die minimalen Hauptdehnungen) werden wieder jeweils in ein Array gespeichert, welches später nur die Extrema jeder Punch-Datei beinhalten soll.

Den Fehlerindex für jedes Element kann an dieser Stelle nun auch berechnet werden. Dies geschieht mit Hilfe von den zuvor gespeicherten Werten σ_x , σ_y , τ_{xy} , mit der Formel und den Faktoren aus Kapitel 1.5. Hier wird wieder aus den sechs Ergebnissen, der größte extrahiert und separat abgespeichert.

Erstellen einer Datentabelle im csv-Format

Die zuvor extrahierten Extrema sollen nun in eine Tabelle im csv-Format exportiert werden. Dabei sollen die Einträge so erfolgen, dass sich die Kombinationsreduzierung erkennen lässt. Der Aufbau sieht aus wie in Tabelle 2.4.

Jede Zeile steht für eine Lagenkombination aus Laminat A und jede Spalte für eine Lagenkombination aus Laminat B. Diese lassen sich beliebig kombinieren.

Das Rauschreiben erfolgt zeilenweise. Wird nun z.B. die Punch-Datei mit einem Laminataufbau für A mit $[0^\circ, 0^\circ]$ und B mit $[0^\circ, 0^\circ]$ bearbeitet, trägt das Programm den Wert in Zeile 1 / Spalte 1 ein. Eine solche Tabelle wird für die maximalen Hauptdehnungen, die minimalen Hauptdehnungen und den Fehlerindex erstellt. Nach jedem Zeilenwechsel wird eingerückt, um die Symmetrie darzustellen.

2.3.5 Auswertung der 2-Schicht-Kombinations-Berechnungen

Alle Kombinationen der beiden 2-Schicht-Lamine wurden berechnet und ausgewählte Daten in csv-Dateien geschrieben. Diese Tabellen gilt es nun auszuwerten.

Für die Kombinationsberechnungen der beiden 2-Schicht-Lamine, gibt es zwei Lastfälle (Zug und Schub). Durch ein Perl-Programm werden die Daten (Hauptdehnungen und Fehlerindex) in Tabellen gespeichert und dort ausgewertet.

Die folgenden Daten beziehen sich auf die 6 ausgewählten Elemente im Übergang des Laminates.

Zug:

Die Tabelle 2.8 enthält die maximalen Hauptdehnungen, die Tabelle 2.9 die minimalen Hauptdehnungen (Einheit in microstrains) und die Tabelle 2.10 den Fehlerindex nach Tsai-Wu für den Belastungsfall Zug.

Tabelle 2.8: maximale Hauptdehnungen beim Zuglastfall

[Pmajor]=μstrain		Laminat B														
		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	-4	5°	-45°/0°	-45°/90°
Laminat A	0°/0°	176	1399	1462	1462	1399	3197	3204	3204	1462	3204	3002	2112	1462	3204	2112
	0°/90°		1397	1924	1924	1397	3213	3423	3423	1630	3056	3507	2293	1630	3056	2293
	0°/45°			1307	1748	1618	3775	2792	3432	1638	3628	3116	2444	1425	3190	1852
	0°/-45°				1307	1618	3775	3432	2792	1425	3190	3274	1852	1638	3628	2444
	90°/0°					1397	3213	3056	3056	1924	3423	3507	2293	1924	3423	2293
	90°/90°						3196	3746	3746	3784	3746	3528	4295	3784	3746	4295
	90°/45°							2770	3273	3640	3620	3273	3845	3196	3227	3910
	90°/-45°								2770	3196	3227	3260	3910	3640	3620	3845
	45°/0°									1307	2792	3116	1852	1748	3432	2444
	45°/90°										2770	3273	3910	3451	3273	3845
	45°/45°											2597	3022	3295	3260	3022
	45°/-45°												2043	2447	3829	2643
	-45°/0°													1307	2792	1852
	-45°/90°														2770	3910
	-45°/45°															2043
	-45°/-45°															

Tabelle 2.9: minimale Hauptdehnungen beim Zuglastfall

[Pminor]=μstrain		Laminat B															
		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	-4	5°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°
Laminat A	0°/0°	-61	-48	-605	-605	-48	-61	-702	-702	-605	-702	-825	-1097	-605	-702	-1097	-825
	0°/90°		-30	-351	-351	-30	-58	-502	-502	-516	-629	-839	-1324	-516	-629	-1324	-839
	0°/45°			-504	-800	-508	-349	-659	-880	-823	-908	-1090	-1318	-436	-610	-976	-949
	0°/-45°				-504	-508	-349	-880	-659	-436	-610	-949	-976	-823	-908	-1318	-1090
	90°/0°					-30	-58	-629	-629	-351	-502	-839	-1324	-351	-502	-1324	-839
	90°/90°						-61	-523	-523	-353	-523	-719	-558	-353	-523	-558	-719
	90°/45°							-658	-853	-912	-574	-1124	-1337	-614	-575	-964	-897
	90°/-45°								-658	-614	-575	-897	-964	-912	-574	-1337	-1124
	45°/0°									-504	-659	-1090	-976	-800	-880	-1318	-949
	45°/90°										-658	-1124	-964	-882	-853	-1337	-897
	45°/45°											-972	-1327	-954	-897	-1327	-972
	45°/-45°												-1235	-1318	-1331	-1660	-1322
	-45°/0°													-504	-659	-976	-1090
	-45°/90°														-658	-964	-1124
	-45°/45°															-1235	-1322
	-45°/-45°																-972

Tabelle 2.10: Fehlerindex beim Zuglastfall

Fehlerindex		Laminat B															
		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	-4	5°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°
Laminat A	0°/0°	-0.016	0.385	0.220	0.220	0.385	0.986	0.963	0.963	0.220	0.963	0.679	0.254	0.220	0.963	0.254	0.679
	0°/90°		0.385	0.529	0.529	0.385	0.992	1.037	1.037	0.454	0.912	0.857	0.609	0.454	0.912	0.609	0.857
	0°/45°			0.222	0.270	0.453	1.203	0.813	1.041	0.218	1.153	0.648	0.320	0.286	0.929	0.263	0.758
	0°/-45°				0.222	0.453	1.203	1.041	0.813	0.286	0.929	0.758	0.263	0.218	1.153	0.320	0.648
	90°/0°					0.385	0.992	0.912	0.912	0.529	1.037	0.857	0.609	0.529	1.037	0.609	0.857
	90°/90°						0.986	1.189	1.189	1.206	1.189	1.107	1.397	1.206	1.189	1.397	1.107
	90°/45°							0.809	0.981	1.156	1.150	0.985	1.160	0.930	0.939	1.211	0.905
	90°/-45°								0.809	0.930	0.939	0.905	1.211	1.156	1.150	1.160	0.985
	45°/0°									0.222	0.813	0.648	0.263	0.270	1.041	0.320	0.758
	45°/90°										0.809	0.985	1.211	1.044	0.981	1.160	0.905
	45°/45°											0.502	0.564	0.761	0.905	0.564	0.501
	45°/-45°												0.245	0.322	1.161	0.333	0.564
	-45°/0°													0.222	0.813	0.263	0.648
	-45°/90°														0.809	1.211	0.985
	-45°/45°															0.245	0.564
	-45°/-45°																0.502

Diese Tabellen werden im Anschluss normiert (Tabelle 2.11 bis 2.13), indem alle Werte durch den Dehnungswert (bzw. Fehlerindex) der Kombination [0°,0°] – [0°,0°] (1. Zeile / 1. Spalte der Tabelle) geteilt worden sind, um die Werte besser miteinander vergleichen zu können.

Laminieren von Übergängen

nen. Die Werte an sich sind nicht interessant, da das Modell linear elastisch gerechnet worden ist. Die normierten Lasten gelten also für alle Lasten. Der Vergleich zwischen diesen Werten ist von Bedeutung. In normierter Form enthält die Tabelle nur noch diesen Vergleich. Zusätzlich wird, zur besseren Unterscheidung, die Zellen nach ihren Werten eingefärbt, um Muster besser erkennen zu können.

Tabelle 2.11: maximale Hauptdehnungen in normierter Form (Zug)

Pmajor normiert		Laminat B																	
		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°		
Laminat A	0°/0°	1.00	7.95	8.31	8.31	7.95	18.16	18.20	18.20	8.31	18.20	17.06	12.00	8.31	18.20	12.00	17.06		
	0°/90°		7.94	10.93	10.93	7.94	18.26	19.45	19.45	9.26	17.36	19.93	13.03	9.26	17.36	13.03	19.93		
	0°/45°			7.43	9.93	9.19	21.45	15.86	19.50	9.31	20.61	17.70	13.89	8.10	18.13	10.52	18.60		
	0°/-45°				7.43	9.19	21.45	19.50	15.86	8.10	18.13	18.60	10.52	9.31	20.61	13.89	17.70		
	90°/0°					7.94	18.26	17.36	17.36	10.93	19.45	19.93	13.03	10.93	19.45	13.03	19.93		
	90°/90°						18.16	21.28	21.28	21.50	21.28	20.05	24.40	21.50	21.28	24.40	20.05		
	90°/45°							15.74	18.60	20.68	20.57	18.60	21.85	18.16	18.34	22.22	18.52		
	90°/-45°								15.74	18.16	18.34	18.52	22.22	20.68	20.57	21.85	18.60		
	45°/0°									7.43	15.86	17.70	10.52	9.93	19.50	13.89	18.60		
	45°/90°											15.74	18.60	22.22	19.61	18.60	21.85	18.52	
	45°/45°												14.76	17.17	18.72	18.52	17.17	14.76	
	45°/-45°													11.61	13.90	21.76	15.02	17.11	
	-45°/0°														7.43	15.86	10.52	17.70	
	-45°/90°															15.74	22.22	18.60	
-45°/45°																11.61	17.11		

- x<=1
- 1<x<10
- 10<x<15
- 15<x<20
- x>20

Tabelle 2.12: minimale Hauptdehnungen in normierter Form (Zug)

Pminor normiert		Laminat B																	
		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°		
Laminat A	0°/0°	1.00	0.79	9.92	9.92	0.79	1.00	11.51	11.51	9.92	11.51	13.52	17.98	9.92	11.51	17.98	13.52		
	0°/90°		0.49	5.75	5.75	0.49	0.95	8.23	8.23	8.46	10.31	13.75	21.70	8.46	10.31	21.70	13.75		
	0°/45°			8.26	13.11	8.33	5.72	10.80	14.43	13.49	14.89	17.87	21.61	7.15	10.00	16.00	15.56		
	0°/-45°				8.26	8.33	5.72	14.43	10.80	7.15	10.00	15.56	16.00	13.49	14.89	21.61	17.87		
	90°/0°					0.49	0.95	10.31	10.31	5.75	8.23	13.75	21.70	5.75	8.23	21.70	13.75		
	90°/90°						1.00	8.57	8.57	5.79	8.57	11.79	9.15	5.79	8.57	9.15	11.79		
	90°/45°							10.79	13.98	14.95	9.41	18.43	21.92	10.07	9.43	15.80	14.70		
	90°/-45°								10.79	10.07	9.43	14.70	15.80	14.95	9.41	21.92	18.43		
	45°/0°									8.26	10.80	17.87	16.00	13.11	14.43	21.61	15.56		
	45°/90°										10.79	18.43	15.80	14.46	13.98	21.92	14.70		
	45°/45°											15.93	21.75	15.64	14.70	21.75	15.93		
	45°/-45°												20.25	21.61	21.82	27.21	21.67		
	-45°/0°													8.26	10.80	16.00	17.87		
	-45°/90°														10.79	15.80	18.43		
-45°/45°															20.25	21.67			

- x<=1
- 1<x<10
- 10<x<15
- 15<x<20
- x>20

Tabelle 2.13: Fehlerindex in normierter Form (Zug)

Fehlerindex normiert		Laminat B																	
		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°		
Laminat A	0°/0°	1.00	24.06	13.75	13.75	24.06	61.63	60.19	60.19	13.75	60.19	42.44	15.88	13.75	60.19	15.88	42.44		
	0°/90°		24.06	33.06	33.06	24.06	62.00	64.81	64.81	28.38	57.00	53.56	38.06	28.38	57.00	38.06	53.56		
	0°/45°			13.88	16.88	28.31	75.19	50.81	65.06	13.63	72.06	40.50	20.00	17.88	58.06	16.44	47.38		
	0°/-45°				13.88	28.31	75.19	65.06	50.81	17.88	58.06	47.38	16.44	13.63	72.06	20.00	40.50		
	90°/0°					24.06	62.00	57.00	57.00	33.06	64.81	53.56	38.06	33.06	64.81	38.06	53.56		
	90°/90°						61.63	74.31	74.31	75.38	74.31	69.19	87.31	75.38	74.31	87.31	69.19		
	90°/45°							50.56	61.31	72.25	71.88	61.56	72.50	58.13	58.69	75.69	56.56		
	90°/-45°								50.56	58.13	58.69	56.56	75.69	72.25	71.88	72.50	61.56		
	45°/0°									13.88	50.81	40.50	16.44	16.88	65.06	20.00	47.38		
	45°/90°										50.56	61.56	75.69	65.25	61.31	72.50	56.56		
	45°/45°											31.38	35.25	47.56	56.56	35.25	31.31		
	45°/-45°												15.31	20.13	72.56	20.81	35.25		
	-45°/0°													13.88	50.81	16.44	40.50		
	-45°/90°														50.56	75.69	61.56		
-45°/45°															15.31	35.25			

- x<=1
- 1<x<20
- 20<x<30
- 30<x<50
- x>50

Auswertung der normierten Tabellen:

maximale Hauptdehnungen:

In der Tabelle 2.11 mit den maximale Hauptdehnungen fällt als erstes auf, dass die Position in Zeile 1 / Spalte 1 den kleinsten Wert enthält. Da es sich bei der Belastung um eine reine Zugbelastung handelt, ist dieser Wert auch schlüssig, da sich an dieser Stelle alle Fasern in beidem Laminaten in Lastrichtung befinden. Die Last kann gut aufgenommen werden. Der Quadrant, in dem beide Lamine 0° -Lagen enthalten, hat im Vergleich zu allen anderen Positionen niedrige Werte (Lage des Quadranten: Zeile1-5 / Spalte1-5). Allgemein kann man sagen, dass alle Lagenkombinationen, bei denen 0° -Lagen beteiligt sind, einen verhältnismäßig kleinen Wert erzeugen.

Andersrum verhält es sich mit den Laminatkombinationen, bei denen 90° -Lagen enthalten sind. Diese Lagen verlaufen quer zur Belastungsrichtung. Die Fasern können keine Last übertragen. Die Kraftübertragung verläuft ausschließlich über das Harz. Zu erwarten wäre also, dass der größte Dehnungswert bei einer reinen Zugbelastung bei 2 Laminaten mit nur 90° -Schichten wäre. In der Tabelle findet man allerdings Werte, die höher sind. Das Maximum ist bei einer Kombination [90° - 90°] – [45° - 45°] (Zeile6/Spalte12) zu finden. Dies lässt sich nur erklären, wenn man die Verformung dieser Laminatkombination kennt. Die zwei 90° -Lagen von Laminat A werden sich in Zugrichtung ausdehnen wollen. Die beiden Schichten in Laminat B nehmen ein Kraftanteil in ihrer Faserrichtung auf. Da die beiden Lagen um 90° versetzt sind, sind dies auch die Kraftanteile. Diese Kraftanteile liegen aber nicht in einer Ebene und erzeugen dadurch ein Torsionsmoment um die Längsachse. Dies hat zur Folge, dass die Dehnungen im Übergang zu Laminat A an den Rändern besonders hoch sind.

minimale Hauptdehnungen:

In der Tabelle 2.12 der minimalen Hauptdehnung gibt sich ein anderes Bild. Die geringsten Dehnungen (blau eingefärbt) sind bei [0° - 90°]-Kombinationen zu finden. Die maximale Hauptdehnung verläuft hier in Belastungsrichtung. Die minimale liegt immer senkrecht dazu. Sie liegt dann in Faserrichtung der 90° -Lagen. Diese Lagen können die von der Last verursachte Querkontraktion des Laminates aufnehmen. Die Dehnungen in dieser Richtung werden durch die 90° -Lage behindert. Ähnlich verhält es sich bei [0° - 45°]-Kombinationen. Hier können die 45° -Lagen einen Teil der Querkontraktion auffangen. Die Dehnungen bleiben verhältnismäßig gering. Der höchste Wert ist hier in Zeile 12, Spalte 15 zu finden. Die hohe Dehnung ist hier wieder durch die Verformung zu erklären. In beiden Laminaten ist eine 45° - und eine -45° -Schicht. Der einzige Unterschied ist, dass sie in dem einen Laminat andersrum geschichtet ist. Das führt dazu, dass beide Lamine ein entgegengesetztes Torsionsmoment erzeugen infolge der Krafteinwirkung.

Fehlerindex:

Die Tabelle 2.13 für den normierten Fehlerindex bestätigen die zuvor gewonnenen Erkenntnisse. Ist bei einer reinen Zugbelastung eine 90° Lage im Laminataufbau beteiligt, schnellst der Fehlerindex in die Höhe. Je mehr solcher Lagen dabei beteiligt sind, desto schlechter ist dies für den Fehlerindex. 45° - oder -45° -Lagen in Verbindung mit 0° -Lagen ergeben vergleichsweise geringe Werte. Das Minimum liegt wie erwartet bei einem reinen 0° -Lagen-Aufbau.

Schub:

Die Tabelle 2.14 enthält die maximalen Hauptdehnungen, die Tabelle 2.15 die minimalen Hauptdehnungen (Einheiten in microstrains) und die Tabelle 2.16 den Fehlerindex für den Belastungsfall Schub.

Tabelle 2.14: maximale Hauptdehnungen in normierter Form (Schub)

[Pmajor]=μstrain		Laminat B															
		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°
Laminat A	0°/0°	1.00	1.93	1.62	1.62	1.93	7.42	5.18	7.23	1.62	5.18	4.87	3.99	1.62	7.23	3.99	6.29
	0°/90°		1.22	1.19	1.13	4.03	9.43	7.18	8.89	3.40	5.44	6.46	5.10	2.98	7.58	4.57	6.59
	0°/45°			1.05	1.21	3.17	8.74	7.07	8.44	2.95	5.49	6.57	5.08	2.60	8.14	4.69	6.84
	0°/-45°				0.75	3.48	8.98	6.85	8.25	3.04	5.22	6.12	4.40	2.93	8.10	5.06	6.87
	90°/0°					1.22	9.43	5.44	7.58	1.19	7.18	6.46	4.57	1.13	8.89	5.10	6.59
	90°/90°						7.46	6.39	10.07	8.04	6.39	6.27	9.30	7.62	10.07	9.30	8.93
	90°/45°							6.78	10.59	9.16	8.26	7.34	10.35	9.90	11.30	10.75	11.06
	90°/-45°								5.55	4.30	4.28	4.80	4.09	4.59	7.27	6.42	6.35
	45°/0°									1.05	7.07	6.57	4.69	1.21	8.44	5.08	6.84
	45°/90°										6.78	7.34	10.75	9.28	10.59	10.35	11.06
	45°/45°											6.69	8.95	8.28	9.73	8.95	9.16
	45°/-45°												4.44	4.39	9.64	6.05	8.07
	-45°/0°													0.75	8.25	4.40	6.87
	-45°/90°														5.55	4.09	6.35
	-45°/45°															4.44	8.07
	-45°/-45°																5.44

- x<=1
- 1<x<3
- 3<x<6
- 6<x<10
- x>10

Tabelle 2.15: minimale Hauptdehnungen in normierter Form (Schub)

[Pminor]=μstrain		Laminat B																
		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°	
Laminat A	0°/0°	1.00	1.94	1.63	1.64	1.94	7.51	7.32	5.25	1.63	7.32	6.36	4.02	1.64	5.25	4.02	4.93	
	0°/90°		1.23	1.16	1.23	4.06	9.55	9.00	7.27	3.00	7.68	6.67	4.61	3.43	5.51	5.14	6.54	
	0°/45°			0.75	0.80	3.50	9.09	8.35	6.93	2.95	8.20	6.95	5.10	3.06	5.28	4.44	6.20	
	0°/-45°				1.06	3.20	8.85	8.54	7.16	2.62	8.24	6.92	4.74	2.98	5.56	5.13	6.65	
	90°/0°					1.23	9.55	7.68	5.51	1.16	9.00	6.67	5.14	1.23	7.27	4.61	6.54	
	90°/90°						7.56	10.20	6.47	7.74	10.20	9.04	9.40	8.09	6.47	9.40	6.34	
	90°/45°							5.61	5.09	4.64	7.36	6.43	6.48	4.31	4.33	4.12	4.85	
	90°/-45°								6.87	10.02	11.45	11.19	10.86	9.23	8.36	10.46	7.43	
	45°/0°									0.75	8.35	6.95	4.44	0.80	6.93	5.10	6.20	
	45°/90°										5.61	6.43	4.12	6.06	5.09	6.48	4.85	
	45°/45°											5.50	5.24	5.70	4.83	5.24	4.48	
	45°/-45°												4.48	5.79	7.50	6.11	6.02	
	-45°/0°														1.06	7.16	4.74	6.65
	-45°/90°															6.87	10.86	7.43
	-45°/45°																4.48	6.02
	-45°/-45°																	6.77

- x<=1
- 1<x<3
- 3<x<6
- 6<x<10
- x>10

Tabelle 2.16: Fehlerindex in normierter Form (Schub)

Fehlerindex		Laminat B															
		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°
Laminat A	0°/0°	1.00	12.81	8.50	5.19	12.81	58.69	37.06	46.06	8.50	37.06	26.25	12.81	5.19	46.06	12.81	30.81
	0°/90°		5.19	4.00	4.81	27.00	77.44	53.06	72.69	18.63	31.63	38.56	23.31	7.69	36.44	9.75	30.13
	0°/45°			4.44	3.31	20.44	70.56	51.19	68.31	16.31	33.19	39.63	22.44	5.94	44.75	10.06	33.44
	0°/-45°				3.19	24.00	73.56	51.13	66.00	15.44	29.63	34.50	17.19	9.31	40.88	12.63	31.06
	90°/0°					5.19	77.44	31.63	36.44	4.00	53.06	38.56	9.75	4.81	72.69	23.31	30.13
	90°/90°						58.94	49.06	84.31	64.38	49.06	48.00	75.31	59.00	84.31	75.31	71.81
	90°/45°							48.06	59.69	48.63	65.44	47.63	59.81	66.19	94.19	86.94	85.44
	90°/-45°								39.38	26.94	30.56	33.06	25.81	33.69	57.00	49.81	48.50
	45°/0°									4.44	51.19	39.63	10.06	3.31	68.31	22.44	33.44
	45°/90°										48.06	47.63	86.94	74.06	59.69	59.81	85.44
	45°/45°											34.19	45.38	45.25	75.44	45.38	47.63
	45°/-45°												7.63	22.06	53.25	17.50	37.44
	-45°/0°													3.19	66.00	17.19	31.06
	-45°/90°														39.38	25.81	48.50
	-45°/45°															7.63	37.44
	-45°/-45°																25.81

- x<=1
- 1<x<20
- 20<x<30
- 30<x<50
- x>50

Bei diesen Werten wurde festgestellt, dass sich die Auswertung als schwierig erweist. Hier stellt die Verformung jedes einzelnen Falls eine große Rolle. Kann sich das Laminat aus der Belastung „rausdrehen“, bleiben die Dehnungen relativ klein. Wird das Laminat dagegen an einer Bewegung, die eine z-Komponente hat, gehindert, kann es lokal zu Dehnungsspitzen kommen. Damit jede Schichtkombination ausgewertet und miteinander verglichen werden kann, bräuchte man für jeden Fall das Verformungsbild. Um hier Ergebnisse erzielen zu können, die für eine Bewertungsmatrix verwendet werden können, müssten an der freien Seite des Modells weitere Randbedingungen angesetzt werden, die eine Bewegung in z-Richtung verhindern würden. Dies gilt analog für die minimalen Hauptdehnungen und den Fehlerindex.

In der Abbildung 2.9 ist der Effekt des „Rausdrehens“ zu sehen. Hier weicht das Bauteil in z-Richtung aus und fängt an sich um die x-Achse zu drehen. Dargestellt ist der Fall einer $[0^\circ, 45^\circ]$ - $[0^\circ, 45^\circ]$ -Kombination.

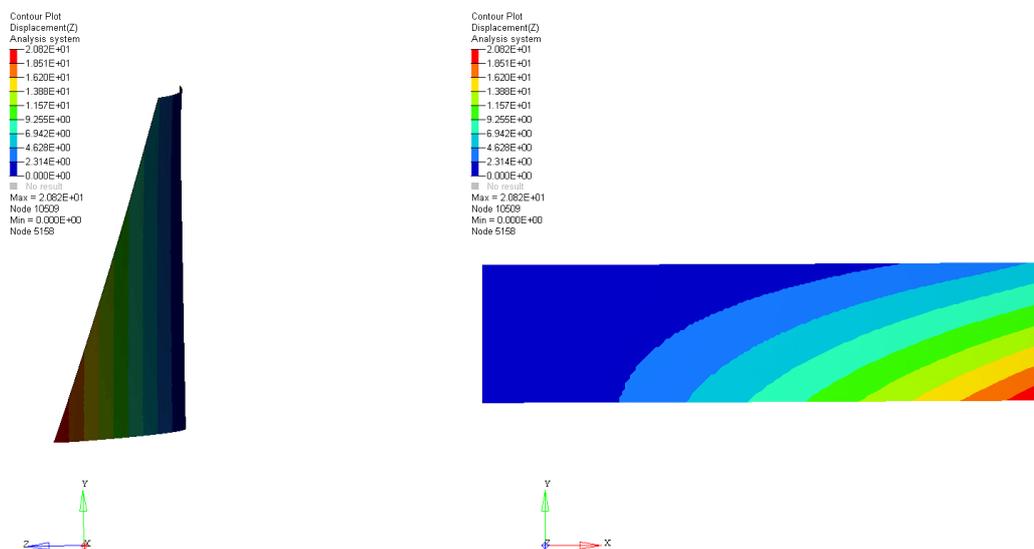


Abbildung 2.9: Ausweichen des Bauteils durch Schubbelastung

Aus diesem Grund wird an dieser Stelle festgelegt, dass sich das zu entwickelnde Programm zunächst nur auf den Zuglastfall beschränken soll.

Untersuchung des Einflusses der Lagendifferenz bei einem Laminatstoß

In dieser Untersuchung geht es um den Einfluss von Lagendifferenzen. Laminatübergänge bzw. Rampen werden meist nicht mit modelliert. Hier soll nun geprüft werden, was für ein Einfluss die Lagendifferenz bei einem solchen Lagensprung hat.

Es wird dabei wieder das gleiche 2D-Modell benutzt. Den beiden Laminaten werden nun ausschließlich 0°-Lagen zugewiesen, um den Einfluss von Lagenkombinationen auszuschließen. Die Lagenzahl von Laminat A und Laminat B sollen von zwei Lagen bis zehn Lagen variiert werden. Dabei werden die Hauptdehnungen ermittelt und die Dehnungsdifferenz zwischen den beiden Laminaten, die dabei entsteht. Zur Auswertung stehen hier wieder die am Anfang ausgewählten Elemente zur Verfügung (Abbildung 2.3).

Die folgenden Tabelle 2.17, und Tabelle 2.18 stellen die Extrema der Hauptdehnungen, in den ausgewerteten Elementen bei jeder Kombination dar.

Tabelle 2.17: maximale Hauptdehnungsdifferenzen (Zug)

[Pmajor]= μ strains		Laminat B, Lagenanzahl									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Laminat A, Lagenanzahl	2	176.5532	176.8051	177.9382	179.2319	180.5253	181.7584	182.9102	183.9761	184.9585	
	3	176.8855	117.7022	117.6843	118.0978	118.6255	119.1972	119.7782	120.3502	120.9039	
	4	178.0660	117.7236	88.2766	88.2200	88.4026	88.6670	88.9691	89.2893	89.6160	
	5	179.3911	118.1635	88.2336	70.6213	70.5850	70.6514	70.8016	70.9801	71.1753	
	6	180.7064	118.7106	88.4427	70.5690	58.8511	58.8259	58.8421	58.9351	59.0489	
	7	181.9553	119.2972	88.7203	70.6786	58.8145	50.4438	50.4253	50.4179	50.4790	
	8	183.1189	119.8897	89.0330	70.8383	58.8618	50.4167	44.1383	44.1241	44.1100	
	9	184.1937	120.4709	89.3618	71.0246	58.9618	50.4328	44.1175	39.2341	39.2228	
	10	185.1829	121.0320	89.6956	71.2264	59.0818	50.4994	44.1168	39.2175	35.3106	

Tabelle 2.18: minimale Hauptdehnungsdifferenzen (Zug)

[Pminor]= μ strains		Laminat B, Lagenanzahl									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Laminat A, Lagenanzahl	2	-61.9243	-53.7534	-49.5285	-46.9357	-45.2001	-43.9693	-43.0598	-42.3664	-41.8248	
	3	-53.7328	-41.2829	-37.2048	-34.7208	-33.0190	-31.7861	-30.8563	-30.1334	-29.5580	
	4	-49.4972	-37.1948	-30.9622	-28.5096	-26.8767	-25.6785	-24.7643	-24.0458	-23.4678	
	5	-46.8989	-34.7041	-28.5037	-24.7697	-23.1274	-21.9729	-21.0845	-20.3811	-19.8114	
	6	-45.1603	-32.9982	-26.8664	-23.1236	-20.6414	-19.4617	-18.6024	-17.9178	-17.3604	
	7	-43.9275	-31.7626	-25.6650	-21.9659	-19.4591	-17.6927	-16.8022	-16.1378	-15.5943	
	8	-43.0166	-30.8310	-24.7486	-21.0751	-18.5974	-16.8003	-15.4811	-14.7838	-14.2548	
	9	-42.3222	-30.1069	-24.0286	-20.3699	-17.9109	-16.1341	-14.7824	-13.7610	-13.1992	
	10	-41.7796	-29.5305	-23.4495	-19.7989	-17.3520	-15.5890	-14.2519	-13.1981	-12.3849	

Beide Tabellen spiegeln den gleichen Trend wieder. Je höher die Lagendifferenz ist, desto größer werden die Dehnungen am Übergang. Bei den maximalen Hauptdehnungen ist dieser Trend stärker ausgeprägt als bei den minimalen Hauptdehnungen. Diese Tabellen zeigen die Extrema über die sechs ausgewerteten Elementen. Um dies weiter zu veranschaulichen, zeigen die Abbildung 2.10 und Abbildung 2.11 die Hauptdehnungsdifferenzen der Elemente 9234 und 12242.

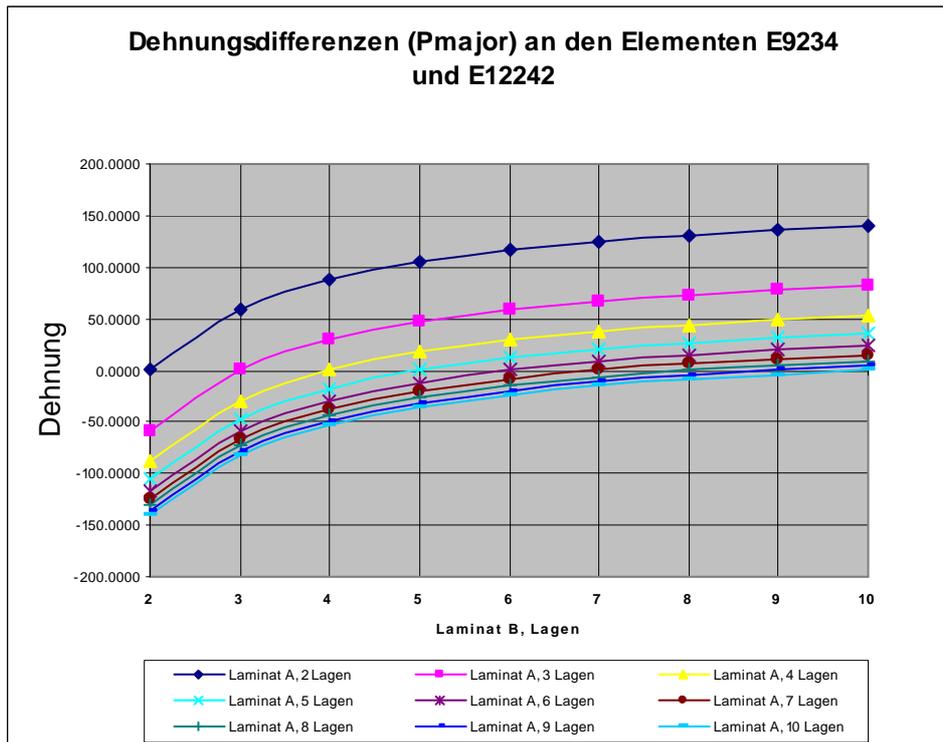


Abbildung 2.10: max. Hauptdehnungsdifferenz zwischen Laminat A und B bei variiertem Lagendefizit

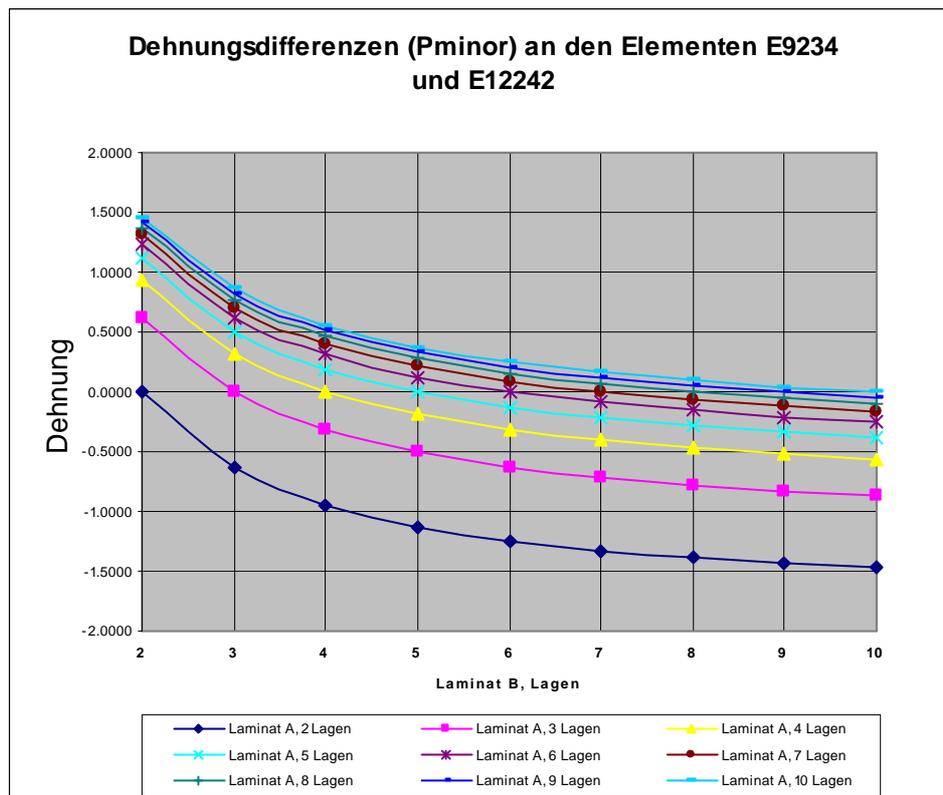


Abbildung 2.11: min. Hauptdehnungsdifferenz zwischen Laminat A und B bei variiertem Lagendefizit

In diesen Diagrammen sind auf der x-Achse die Lagenanzahl des Laminates B und auf der y-Achse die Dehnungen (in Microstrains) aufgetragen. Die einzelnen Kurven stehen für eine Lagenzahl des Laminates A. Jeder Punkt stellt nun die Dehnungsdifferenz des Laminates A

und B in den Elementen 9234 und 12242 dar². Die Dehnungsdifferenzen bei jeder Kombination haben ihren Nulldurchlauf, wenn Laminat A und Laminat B die gleiche Lagenanzahl besitzen. Es herrscht auf jeder Seite die gleich Dehnung. Die Diagramme bestätigen die zuvor gemachte Beobachtung. Je größer der Lagensprung, desto größer die Dehnungsdifferenz. Die Differenzen der minimalen Hauptdehnungen nehmen zwar ab, bestätigt aber dennoch die Aussage, da die minimalen Hauptdehnungen in der Regel ein negatives Vorzeichen haben und deswegen einen Trend zur negativen y-Achse haben.

Der Fehlerindex verhält sich analog zu den Hauptdehnungen. Es lassen sich keine neuen Informationen daraus gewinnen³.

Hinweis zu den 3-Schicht-Kombinationen:

Die gleichen Rechnungen wurden für 3-Schichtkombinationen gemacht. Aber da diese keine neuen Erkenntnisse brachten, wird auf die Ergebnisse nicht näher drauf eingegangen. Aus diesem Grund werden nur die Daten aus den 2-Schicht-Kombinationen verwendet!

2.4 Das 3D Modell

Die Aussage der zuvor ausgewerteten Daten soll mit einem 3D-Modell verglichen werden. In den Untersuchungen am 2D-Modell wurden die Einflüsse der Lagenorientierung bei einer definierten Last und die Einflüsse von Lagendifferenzen untersucht. Nun soll zusätzlich geprüft werden, inwieweit die Ergebnisse denen aus der 3D-Untersuchung gleichen.

Das Modell ist eine Kombination aus den vorherigen Untersuchungen sein. Die Geometrie entspricht der des 2D-Modells. Es werden sowohl verschiedene Lagenorientierungen, als auch eine Lagendifferenz vorkommen. Im 3D-Modell wird die Rampe mit modelliert.

2.4.1 Aufbau des Modells

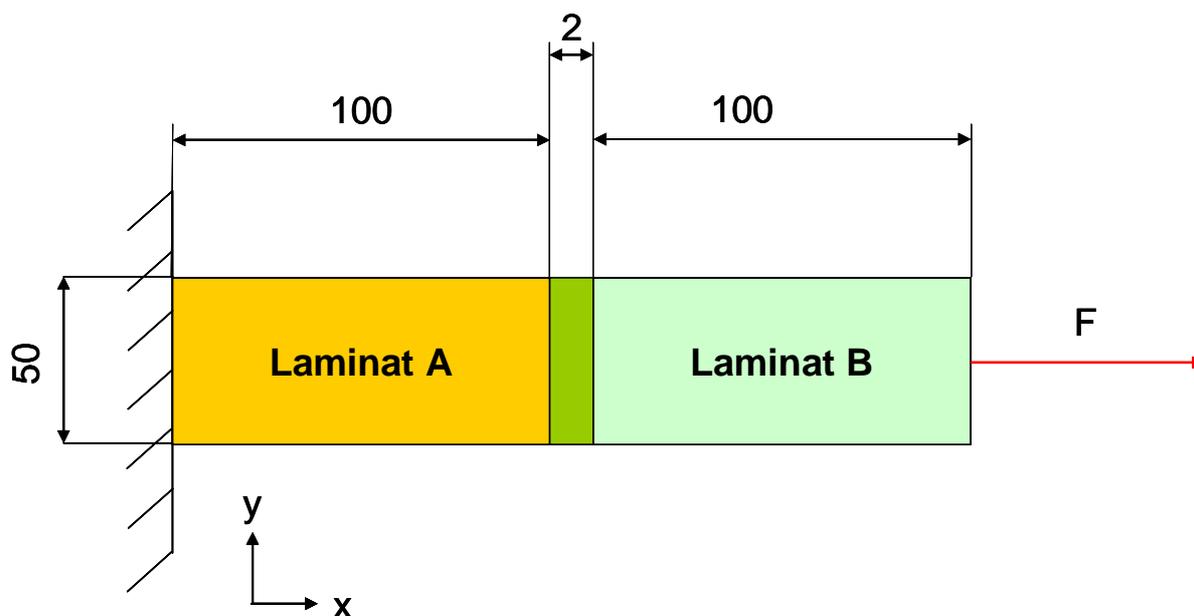


Abbildung 2.12: Aufbau des 3D-Modells in der xy-Ebene

² Die Elementdehnungsdifferenzen der Elementpaarungen 8049-10981 und 9016-12006 sind im Anhang zu finden

³ Fehlerindextabellen sind im Anhang zu finden

Das Preprocessing wird mit Hypermesh gemacht, die Berechnung soll mit Abaqus durchgeführt werden.

Die Laminat A und B haben die Maße $100\text{mm} \times 50\text{mm}$ (Abbildung 2.12). Laminat A soll drei Schichten aufweisen und Laminat B vier Schichten. Eine Schicht ist $t_s=0,184\text{mm}$ stark. Daraus folgt, dass $t_A=0,552\text{mm}$ und $t_B=0,736$ ist. Die Länge der Rampe wird auf $L=2\text{mm}$ festgelegt (Abbildung 2.13). Die zweite Lage von Laminat B soll in der Rampe enden. Die anderen drei Lagen sollen in Laminat A weitergeführt werden. Die Elementkantenlängen des Modells sind $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 0,184\text{mm}$. Das ergibt für das gesamte Modell 8825 Elemente mit 11934 Knoten. Der Elementtyp ist SC8R.

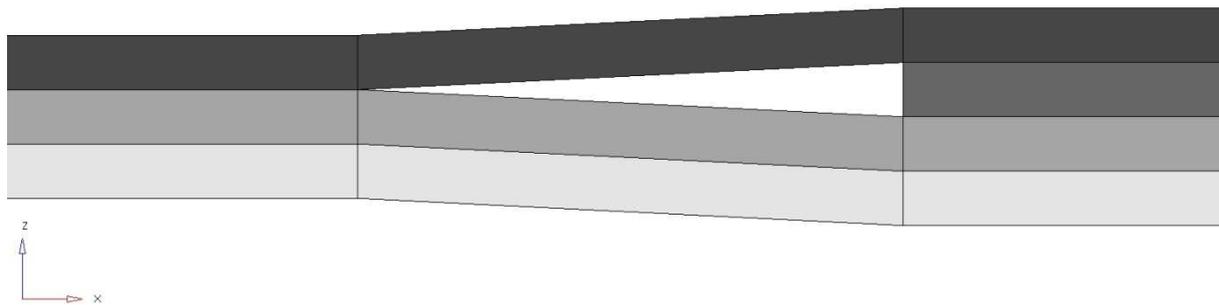


Abbildung 2.13: Modellierung der Rampe

Dies ist ein Kontinuum-Schalenelement, welches von Abaqus unterstützt wird. Das Element gewährleistet eine Dehnungsbetrachtung jeder einzelnen Schicht. Es wird für dünnwandige Strukturen verwendet und ist dreidimensional aufgebaut. Der Aufbau entspricht dem eines Hexaederelementes. Es werden aber die Ansatzfunktionen von Schalenelementen verwendet. [Abaqus Analysis User's Manual]

Es wird eine Zugbelastung von $F=1000\text{N}$ an Laminat B aufgebracht werden. Es soll bereits im vornherein vermieden werden, dass bei dem Vergleichsmodell Verschiebungen auftreten, die nicht in Kraftrichtung liegen. Dies kann gewährleistet werden, indem ein symmetrischer Lagenaufbau verwendet wird. Laminat B bekommt den Lagenaufbau $[0^\circ \ 90^\circ \ 90^\circ \ 0^\circ]$ zugewiesen. Eine 90° Lage läuft in der Rampe aus. Laminat A wird damit einen Lagenaufbau $[0^\circ \ 90^\circ \ 0^\circ]$ haben. Jede Schicht wird einer eigenen Komponente zugewiesen, die auf eine PCOMP-Eigenschaft verweist. Als Material wird ein unidirektionales Gelege mit Duroplastharz verwendet.

Was für Ergebnisse werden erwartet, basierend auf die zuvor gewonnenen Erkenntnisse?

Es wird erwartet, dass die Last eine Verschiebung hauptsächlich in Lastrichtung verursacht. Die 90° -Lagen werden die Dehnung negativ beeinflussen, da hier die Kraftübertragung nur über das Harz gehen kann. Die 0° -Lagen werden die größte Last aufnehmen. Eine erhöhte Dehnung ist im Laminat mit der kleineren Anzahl an Lagen zu erwarten, aufgrund der Lagendifferenz. Um einen direkten Vergleich mit den 2D-Ergebnissen ziehen zu können, wurde für diesen Fall eine 2D-Rechnung mit Nastran gestartet (ohne Übergang). Als Vergleich dienen die maximalen Hauptdehnungen direkt nach dem Übergang im Laminat A. Das 2D-Modell erzeugt hier Dehnungen im Bereich von $3.277 \cdot 10^{-4}$ bis $3.283 \cdot 10^{-4}$.

2.4.2 Auswertung und Vergleich

In Abbildung 2.14 ist das Ergebnis (maximale Hauptdehnungen) der Abaqus-Berechnung des 3D-Modells zu sehen.

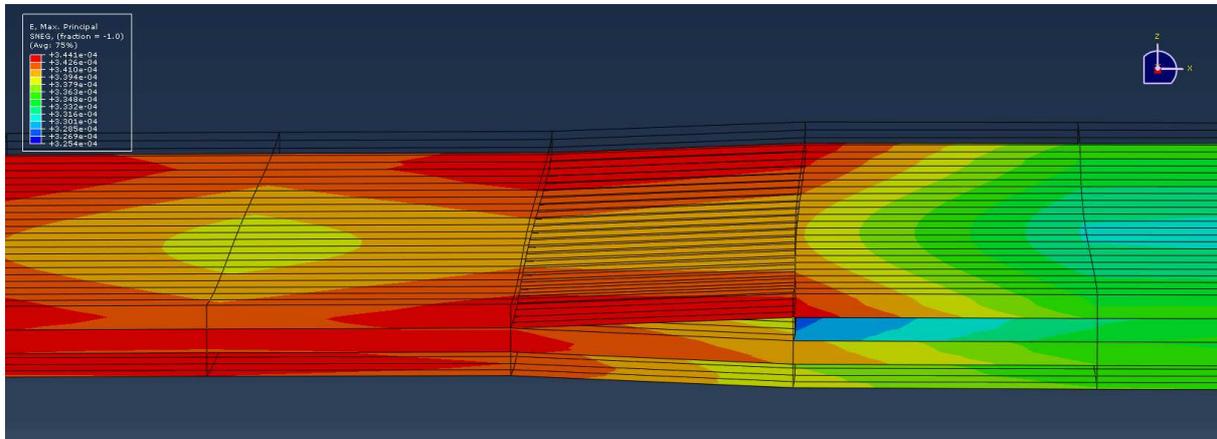


Abbildung 2.14: maximale Hauptdehnungen des 3D-Modells an der Rampe

Es ist zu erkennen, dass sich die Voraussagen bestätigt werden. Die Dehnungen nehmen im linken Abschnitt (Laminat A) zu. In Laminat B sind die Dehnungen in der auslaufenden 90°-Schicht verhältnismäßig klein.

In Abbildung 2.15 sind die Spannungen angegeben. Diese verdeutlichen, dass die 0°-Lagen den Hauptanteil der Last aufnehmen.

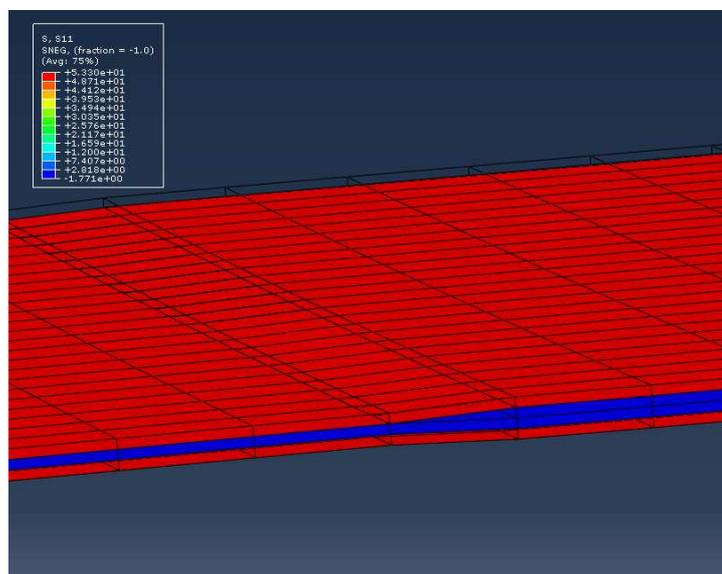


Abbildung 2.15: Spannungsbild zur Veranschaulichung der Lastaufnahme

Entnimmt man die Dehnungswerte im Laminat A, an der gleichen Stelle wie die zuvor ermittelten Werte von der 2D-Berechnung, erhält man Dehnungswerte im Bereich von $3.387 \cdot 10^{-4}$ bis $3.418 \cdot 10^{-4}$. In der Abbildung 2.16 sind die beiden Ergebnisse grafisch dargestellt. Es liegt eine Abweichung von ca. 3,5% vor. Die Abweichung des 2D-Modells zu dem 3D-Modell liegt in einem akzeptablen Bereich.

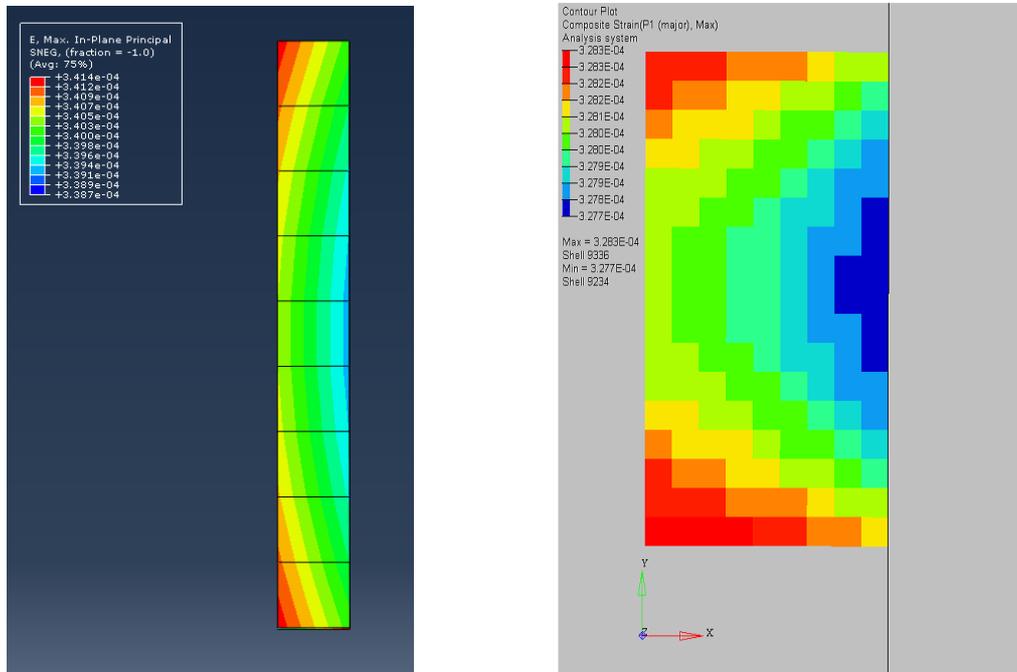


Abbildung 2.16: Vergleich 2D-3D Ergebnisse; Auszug der Dehnungen hinter der Rampe (Laminat A)

2.5 Aufstellen der Bewertungsmatrix

Es wurden mit Hilfe der 2D-Rechnungen Werte geschaffen und mit einer 3D-Rechnung verglichen. Diese Werte sollen nun dabei helfen ein Programm zu realisieren.

Das zu erstellende Programm soll anhand einer Bewertung den Lagenaufbau für eine Rampe erzeugen können. Dazu sollen die zuvor erzeugten Dehnungstabellen helfen. Das Programm beschränkt sich zunächst nur auf den Zug-Lastfall. Wenn es hier gute Ergebnisse liefern kann, wird es auf den Schub-Lastfall erweitert. Es bietet sich an aus den Tabellen eine Bewertungsmatrix zu generieren. Diese Matrix soll dem Programm dabei helfen eine Entscheidung zu fällen, wenn das Programm einen Lagenaufbau von zwei Laminaten vorgegeben bekommt und eine passende Rampe erstellen soll (Abbildung 2.17). Sucht das Programm eine Orientierung für die erste Schicht, schaut es sich die ersten Schichten der beiden Laminaten an, benutzt die Werte der Matrix als Bewertungsfaktoren und kann anhand der Ergebnisse eine Entscheidung fällen.

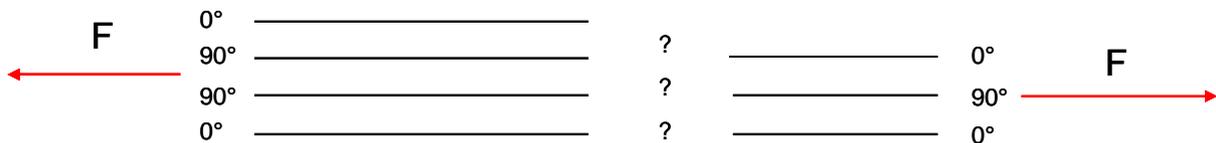


Abbildung 2.17: Fragestellung zu den Lagenorientierungen

Bewertungsmatrix 1 („Dehnungskriterium“):

Eine Möglichkeit, zur Generierung der Bewertungen, ist die normierte Tabelle für die maximalen Hauptdehnungen (Tabelle 2.8). Da für den Zug-Lastfall die maximalen Hauptdehnungen dominieren (minimale Hauptdehnungen entstehen nur durch Querkontraktion), soll diese Tabelle dafür verwendet werden. Für den Zug-Lastfall ist die beste Lagenorientierung die 0° -Lage, da die Fasern in Lastrichtung liegen.

Eine 0° -Lage ist also anderen Lagen zu bevorzugen, vorausgesetzt diese lässt sich mit mindestens einem Laminat verbinden. Haben also Laminat A und Laminat B auf gleicher Höhe eine 0° -Lage, muss in der Rampe auf gleicher Höhe ebenfalls eine 0° -Lage gesetzt werden. Ist im Laminat A eine 0° -Lage und im Laminat B eine 90° -Lage, soll auch hier wieder die 0° -Lage bevorzugt werden, da dieser für den Lastfall geeigneter ist. Lässt sich aber die 90° -Lage aus Laminat A mit einer 90° -Lage aus Laminat B verbinden, die eine Schicht unter einer 0° -Schicht liegt, ist eine durchgängige Lage (eine 90° -Lage in der Rampe) der 0° -Lösung zu bevorzugen. Es müssten also die umliegenden Schichten zusätzlich betrachtet werden.

Die Bestandteile der Bewertungsmatrix sollen als Faktoren in einer Bewertungsfunktion fungieren. Die Beschaffenheit dieser Funktion muss noch festgelegt werden. Wenn die obige Tabelle 2.8 zur Bewertung dienen soll, muss die Entscheidung des Programms nach dem kleinsten Wert der Bewertungsfunktion erfolgen. Würde man diese Tabelle als Bewertungsmatrix verwenden, bräuchte man in Laminat A und B immer eine Schichtanzahl, die durch zwei teilbar ist, da die Zeilen und Spalten immer auf zwei Lagen beziehen. Man könnte nun versuchen anhand dieser Tabelle abzuleiten, wie die Faktoren für jede einzelne Schicht wären. Welchen Faktor würde man z.B. nehmen, wenn eine 0° -Schicht von Laminat A auf gleicher Höhe liegt wie eine 90° -Schicht aus Laminat B? Für dieses Beispiel könnte man den Faktor 18.16 für eine $[0^\circ/0^\circ] - [90^\circ/90^\circ]$ Kombination verwenden. Der Gedanke hier ist, dass sich die Werte ohne weiteres auf eine Schicht übertragen lassen.

Der Querschnitt wird zwar halbiert, wenn eine Lage weggelassen wird, aber die Spannungen würden sich bei jeder Kombination gleichartig verändern. Die normierte Tabelle für „Ein-Schicht-Laminatstöße“ würde nahezu dieselben Werte hervorbringen. Mit diesem Grundgedanken werden der Tabelle 2.8 die entsprechenden Werte entnommen (Tabelle 2.19).

Tabelle 2.19: Extrahieren von Werten, zur Erstellung einer Bewertungsmatrix

Pmajor normiert		Laminat B																	
		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°		
Laminat A	0°/0°	1.00	7.95	8.31	8.31	7.95	18.16	18.20	18.20	8.31	18.20	17.06	12.00	8.31	18.20	12.00	17.06		
	0°/90°		7.94	10.93	10.93	7.94	18.26	19.45	19.45	9.26	17.36	19.93	13.03	9.26	17.36	13.03	19.93		
	0°/45°			7.43	9.93	9.19	21.45	15.86	19.50	9.31	20.61	17.70	13.89	8.10	18.13	10.52	18.60	x<=1	
	0°/-45°				7.43	9.19	21.45	19.50	15.86	8.10	18.13	18.60	10.52	9.31	20.61	13.89	17.70		
	90°/0°					7.94	18.26	17.36	17.36	10.93	19.45	19.93	13.03	10.93	19.45	13.03	19.93	1<>=10	
	90°/90°						18.16	21.28	21.28	21.50	21.28	20.05	24.40	21.50	21.28	24.40	20.05		
	90°/45°							15.74	18.60	20.68	20.57	18.60	21.85	18.16	18.34	22.22	18.52	10<>=15	
	90°/-45°								15.74	18.16	18.34	18.52	22.22	20.68	20.57	21.85	18.60		
	45°/0°									7.43	15.86	17.70	10.52	9.93	19.50	13.89	18.60	15<>=20	
	45°/90°										15.74	18.60	22.22	19.61	18.60	21.85	18.52		
	45°/45°											14.76	17.17	18.72	18.52	17.17	14.76	x>20	
	45°/-45°												11.61	13.90	21.76	15.02	17.11		
	-45°/0°													7.43	15.86	10.52	17.70		
	-45°/90°														15.74	22.22	18.60		
	-45°/45°															11.61	17.11		
	-45°/-45°																14.76		

Damit ergibt sich eine neue Tabelle, die als Bewertungsmatrix verwendet werden soll (Tabelle 2.20).

Tabelle 2.20: Dehnungs-Bewertungsmatrix

Pmajor, normiert		Laminat B			
		0°	90°	45°	-45°
Laminat A	0°	1	18.16	17.06	17.06
	90°	18.16	18.16	20.05	20.05
	45°	17.06	20.05	14.76	14.76
	-45°	17.06	20.05	14.76	14.76

Diese Bewertungsmatrix würde hauptsächlich 0°-Lagen bevorzugen.

Bewertungsmatrix 2 („Dehnungsdifferenzen-Kriterium“):

Um mehr Vergleiche schaffen zu können, sollte noch eine zweite Bewertungsmatrix hergeleitet werden. Eine Alternative wäre hier über die Element-Dehnungsdifferenzen zu gehen, die bereits bei der Untersuchung des Einflusses von Lagendifferenzen bei einem Laminatstoß verwendet worden sind. Dazu wird wie oben verfahren und die Tabellen für jede Differenz werden auf jeweils eine 4x4-Bewertungsmatrix zusammengefasst. Für die maximalen Hauptdehnungen werden aus drei 16x16-Matrizen drei 4x4-Matrizen gemacht. Nun ist für jede Elementpaar-Dehnungsdifferenz eine Matrix vorhanden. Um diese nun effektiv in einem Programm verwenden zu können, sollte man die drei Tabellen zu einer Matrix erneut zusammenfassen.

Die Tabelle 2.21 enthält die drei reduzierten Dehnungsdifferenzen.

Tabelle 2.21: Element-Dehnungsdifferenzen

[Pmajor]= μ strains Lagendifferenz 8049 - 10981		Laminat B			
		0°	90°	45°	-45°
Laminat A	0°	0	-6041	-3891	-5369
	90°		0	2781	908
	45°			0	0
	-45°				0

[Pmajor]= μ strains Lagendifferenz 9234 - 12242		Laminat B			
		0°	90°	45°	-45°
Laminat A	0°	0	-6041	-4704	-4696
	90°		0	1181	1211
	45°			0	0
	-45°				0

[Pmajor]= μ strains Lagendifferenz 9016 - 12006		Laminat B			
		0°	90°	45°	-45°
Laminat A	0°	0	-6041	-5369	-3891
	90°		0	908	2781
	45°			0	0
	-45°				0

Diese werden erneut zu einer Tabelle zusammengefasst. Dazu wird die höchste Elementpaardifferenz für jede Kombination übernommen. Dabei bleiben ein paar Werte Null. Die Null-Werte auf der Diagonalen und den Wert in Zeile 3, Spalte 4 könnten später Problemen in der Bewertung verursachen. Die Grundidee ist eine Bewertungsfunktion mit den Faktoren dieser Matrix zu füllen. Ein Faktor mit dem Wert Null, lässt die gesamte Funktion Null oder undefiniert werden, zudem sollten 0°-Lagen bei einer Zugbelastung bevorzugt werden und nicht die gleiche Gewichtung bekommen. Es wird die Matrix also noch dementsprechend abgeändert, um die gewünschte Bewertungstendenz zu erhalten (Tabelle 2.22).

Tabelle 2.22: Dehnungsdifferenzen-Bewertungsmatrix

[Pmajor]= μ strains		Laminat B			
		0°	90°	45°	-45°
Laminat A	0°	1	6041	5369	5369
	90°	6041	2	2781	2781
	45°	5369	2781	2	2
	-45°	5369	2781	2	2

Mit dieser Bewertungsmatrix muss eine Bewertungsfunktion ein Minimum erreichen, um das Optimum darzustellen, wenn die Werte aus der Matrix als Faktoren eingesetzt werden. Trifft z.B. eine 0°-Lage auf eine 0°-Lage, ist es wesentlich besser, als wenn die Lage auf eine 90°-Faserorientierung treffen würde.

Diese Matrix bevorzugt, durch ihre Beschaffenheit, einen Lagendurchgang. Ist also z.B. in einem Laminat eine 90°-Lage in der Schicht X, würde eine Lage der Rampe, die auf gleicher Höhe liegt, ebenfalls eine 90°-Lage begünstigen.

2.6 Realisierung des Programms zur Rampenerstellung

Es wurden 2 Bewertungsmatrizen erzeugt, die ein Programm dabei helfen sollen ein Lamina-
tübergang erzeugen zu können in Abhängigkeit der anzubindenden Laminare.

2.6.1 Vorgehensweise

Die Fragen, die sich vor der Programmentwicklung gestellt werden müssen sind:

- Wie soll die Bewertungsfunktion aussehen?
- Wie soll das Programm strukturiert werden?

Wie soll die Bewertungsfunktion aussehen?

Die Grundidee ist es, zwischen zwei Laminaten ein zusätzliches Laminat einzufügen, um den Steifigkeitssprung zu minimieren. Das Prinzip ist in Abbildung 2.18 zu sehen. Das Programm soll für jede Schicht in der Rampe nacheinander ermitteln, welche Orientierung für die aktuelle Schicht die Beste ist. Es müssen aber alle Lagen aus beiden Laminaten in der näheren Umgebung mit einbezogen werden.

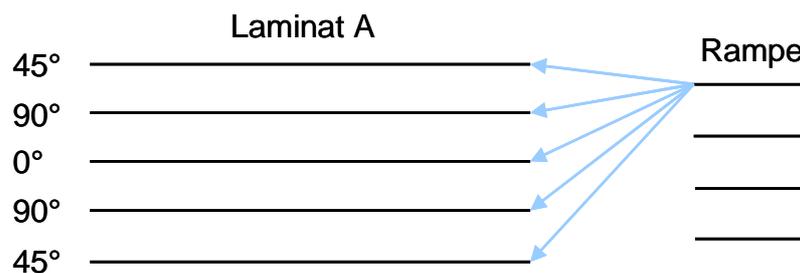


Abbildung 2.18: Bewertung einer Rampen-Schicht anhand der Lagenorientierungen der umliegenden Laminare

Das Programm soll zunächst nur eine Seite betrachten. In diesem Beispiel wird dabei das Laminat A betrachtet (Für Laminat B ist die Vorgehensweise analog). Für die aktuell zu ermittelnde Lage der Rampe wird eine der vier möglichen Orientierungen angenommen (z.B. eine 0°-Lage). Anhand der aktuellen Orientierung und der Orientierungen des Laminates A (im Fall von Abbildung 2.18), kann für jede mögliche Verbindung ein Wert aus der Bewertungsmatrix ermittelt werden. Für jede Lage des Laminates A gibt es also einen Funktionswert der Bewertungsfunktion, der mit einem Wert der Bewertungsmatrix gespeist worden ist. Summiert man nun alle Funktionswerte auf, bekommt man einen Bewertungswert des Laminates A für eine 0°-Lage der aktuellen Schicht in der Rampe. Anschließend wird der gleiche Vorgang für Laminat B durchgeführt und die Summe für die aktuelle Orientierung weiter gefüllt. Dies wird nun noch für die restlichen Orientierungen (90°, +45° und -45°) gemacht. Es ergeben sich also zum Schluss vier Summen für die erste Schicht der Rampe. Anhand der Beschaffenheit der Bewertungsmatrix, ergibt die angenommene Orientierung mit der kleinsten Summe das beste Ergebnis!

Zur Veranschaulichung wird die Bewertungsfunktion auf $f(u, v) = \sum k(u, v)$ festgelegt und anhand des Beispiels aus Abbildung 2.18 berechnet. Dabei ist $k(u, v)$ der entsprechende Wert aus der Bewertungsmatrix. u steht für die Lagenorientierung im Laminat A und v

für die Lagenorientierung in der Rampe. Wird im ersten Schritt die erste Lage der Rampe auf 0° festgelegt ergibt sich die Summe:

$$\sum_1^n f_n = k(45^\circ, 0^\circ) + k(90^\circ, 0^\circ) + k(0^\circ, 0^\circ) + k(90^\circ, 0^\circ) + k(45^\circ, 0^\circ)$$

Verwendet man die Bewertungsmatrix „Dehnungskriterium“ (Tabelle 2.20), ergibt sich die Summe:

$$\sum_1^n f_n = 17,06 + 18,16 + 1 + 18,16 + 17,06 = 71,44$$

Hier beeinflusst jede Lage des Laminates A mit gleicher Gewichtung das Ergebnis der ersten Schicht der Rampe. Dies ist aber nicht erwünscht, weil rein konstruktiv nur in der Nähe befindliche Lagen in die erste Schicht der Rampe überführt werden können. Die Gewichtung der entfernteren Lagen muss also abgeschwächt werden. Es bedarf an dieser Stelle also noch einer Gewichtung, um dieses Prinzip sinnvoll anwenden zu können. Eine Idee dazu wäre, dies abhängig von dem Lagenabstand zur ermittelnden Lage in der Rampe zu machen. Hier könnte man z.B. die Abschwächungsfunktion

$$g(x) = \frac{1}{2^{|x|}} \quad (23)$$

wählen. Mit jeder Lage, die räumlich weiter von der zu ermittelnden Schicht entfernt liegt, verringert sich der Funktionswert. In Abbildung 2.19 ist dieser Vorgang dargestellt. Dabei stellt die x-Achse den Lagenabstand der einzelnen Lagen von Laminat A zu der aktuellen Lage in der Rampe dar.

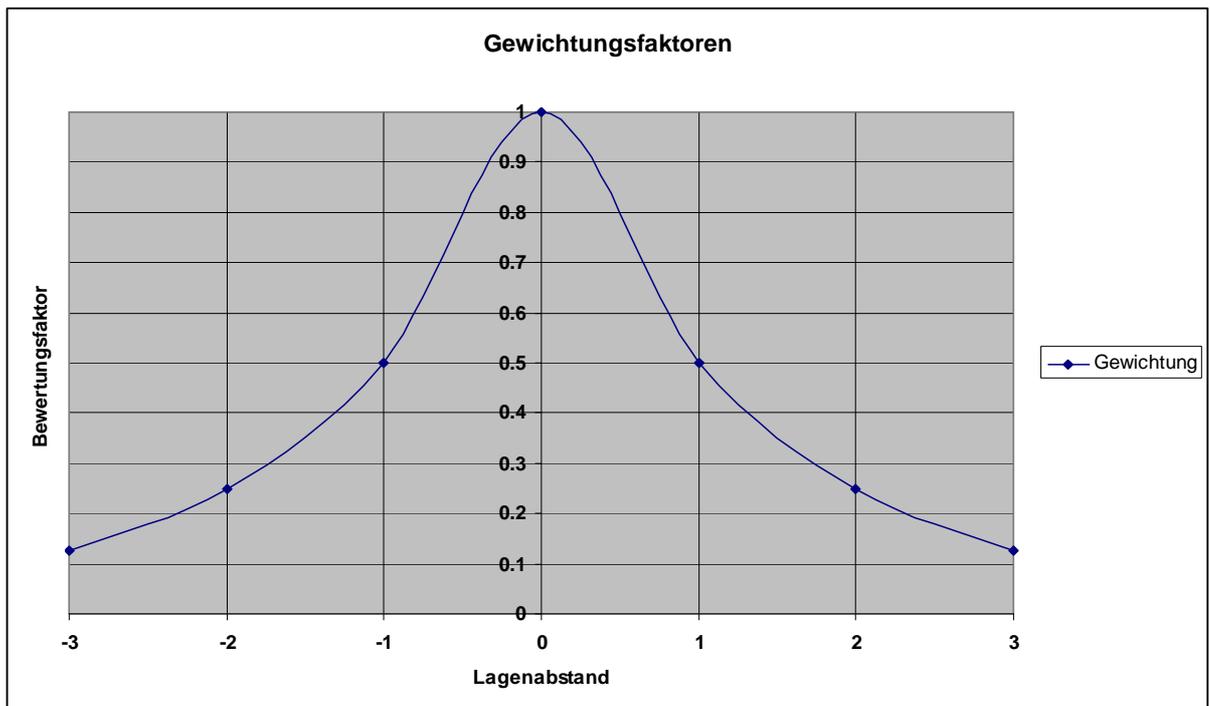


Abbildung 2.19: Gewichtungsfunktion

In der Abbildung 2.20 soll die zweite Schicht in der Rampe ermittelt werden. Die zweite und dritte Schicht des Laminates A liegen dabei im gleichen Abstand zu dieser Schicht. Dabei ist zu erwähnen, dass es immer zwei Lagen geben wird, die den Gewichtungsfaktor 1 bekommen, wenn die Lagenanzahl des einen Laminat gerade ist und die andere ungerade.

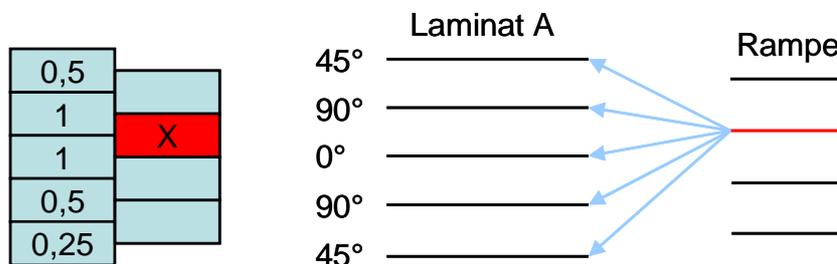


Abbildung 2.20: Bewertung einer Schicht mit Einfluss der Gewichtungsfunktion

Damit würde die neue Bewertungsfunktion wie folgt aussehen:

$$f(u, v, x) = \frac{k(u, v)}{g(x)} = k(u, v) \cdot 2^{|x|} \quad (24)$$

Es wird an dieser Stelle durch die Bewertungsfunktion geteilt, da die Bewertungsmatrizen gute Lagenpaarungen mit niedrigen Werten begünstigen. Um nun den Einfluss von entfernteren Lagen geringer werden zu lassen, muss der Funktionswert größer werden.

Wie soll das Programm strukturiert werden?

Die Programmstruktur soll in 5 Teile gegliedert werden (Abbildung 2.21). Anfangs müssen notwendige Informationen initialisiert werden. Dazu gehört der Lagenaufbau des Laminates A, des Laminates B und die Bewertungsmatrix.

Anschließend müssen die x-Werte für die Abschwächungsfunktion ermittelt werden. Die Anzahl der benötigten x-Werte kann mit der Formel

$$n_{x\text{-Werte}} = n_{\text{Lagen, Rampe}} \cdot (n_{\text{Lagen, Laminat A}} + n_{\text{Lagen, Laminat B}}) \quad (25)$$

errechnet werden. Nun können die Lagenorientierungen der Rampe ermittelt werden. Zum Schluss des Programms erfolgt die Ausgabe der Lösung.



Abbildung 2.21: Gliederung des Programms zur Lagenbestimmung der Rampe

2.6.2 Programmbeschreibung

Das Programm startet mit der Initialisierung der Lagenaufbauten der Laminat, die verbunden werden sollen, und mit der Bewertungsmatrix. Es wird festgelegt wie viele Lagen die Rampe bekommen soll. Hierfür wird ein gerundeter Mittelwert der beiden zu verbindenden Laminaten genommen. Nun startet das Programm mit der Generierung der x-Werte für die beiden Laminat, die für die spätere Gewichtung zuständig sind. Diese Werte werden in zwei Arrays gespeichert (Programmablaufplan aus Abbildung 2.22, Position [1]). Das eine Array enthält die x-Werte für Laminat A und das andere Array die Werte für Laminat B.

Nun startet die eigentliche Programmfunktion. Es soll die erste Schicht der Rampe ermittelt werden. Hierfür wird immer angenommen, dass alle Laminat die gleiche Mittellinie besitzen. Zunächst legt das Programm die erste Schicht als 0° -Schicht fest (PAP [2]). Dann bekommt jede einzelne Lage des Laminates A ihren eigenen x-Wert zugewiesen. Nun geht das Programm jede Schicht des Laminates durch, ermittelt sich die Lagenorientierung der Schichten, und ermittelt sich mit den Informationen der Lagenorientierungen im Laminat A und der festgelegten Orientierung der ersten Schicht in der Rampe die Werte aus der Bewertungsmatrix. Diese Werte werden nun in die Bewertungsfunktion eingesetzt. Für jede Schicht des Laminates A ergibt sich ein Funktionswert. Diese Funktionswerte werden aufsummiert und die Endsumme gespeichert. (PAP [3]). Nun wird die zuvor auf 0° festgelegte erste Schicht der Rampe auf 90° festgelegt. Der ganze Vorgang wiederholt sich und es ergibt sich erneut eine Summe über alle Lagen des Laminates A. Wurden alle möglichen Lagenorientierungen in der ersten Schicht der Rampe simuliert, und der gleiche Vorgang mit dem Laminat B wiederholt,

werden die Summen miteinander verglichen. Die kleinste Summe der vier Lagen Simulationen bestimmt die Lagenorientierung der ersten Schicht in der Rampe. Dieser Vorgang wiederholt sich für jede zu ermittelnden Schicht in der Rampe.

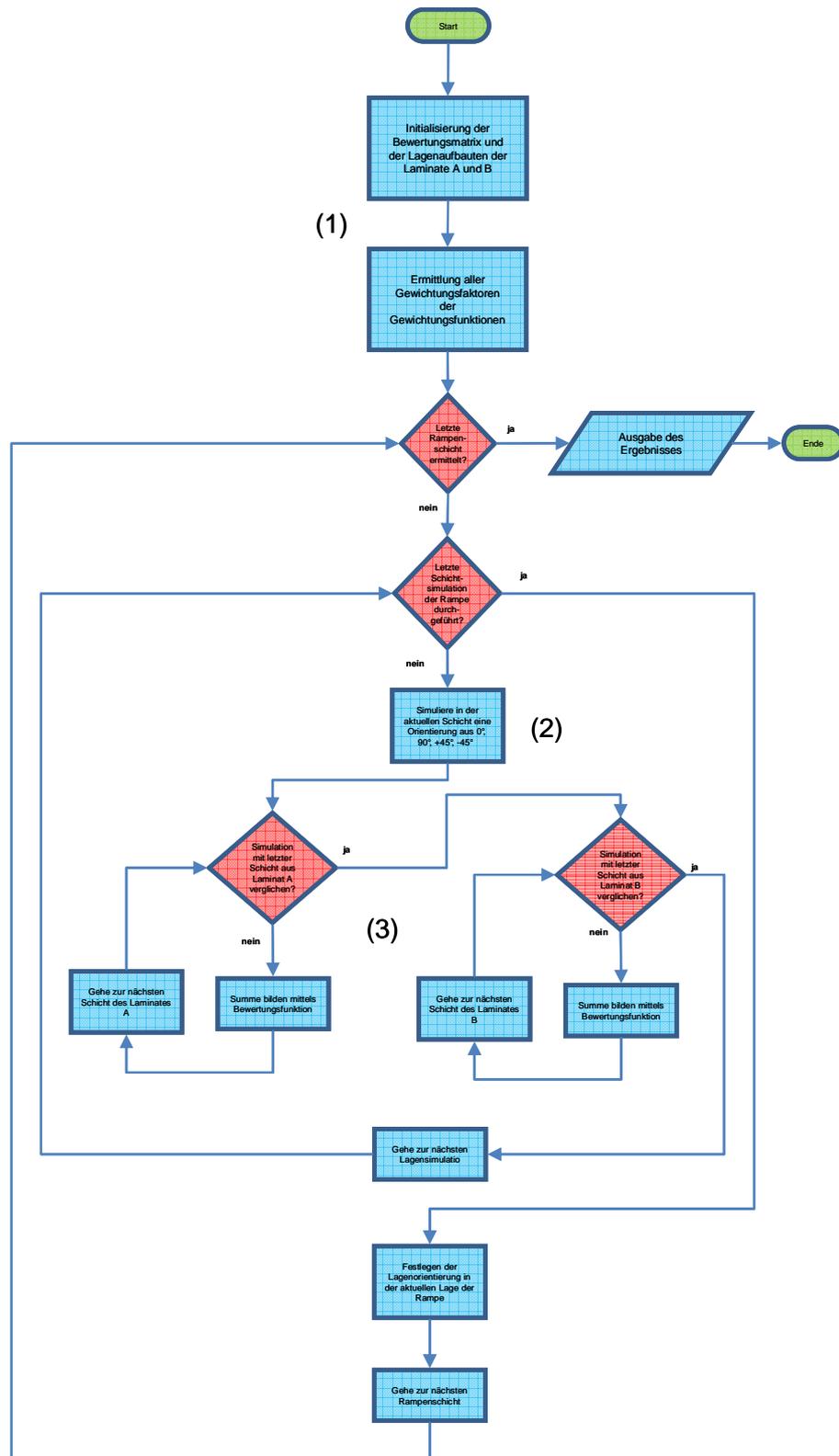


Abbildung 2.22: Programmablaufplan des Programms zur Lagengenerierung der Rampe

2.6.3 Ergebnisse

Zum Vergleich, der durch das Programm vorgeschlagenen Ergebnisse, wird ein industrielles Beispiel eines solchen Überganges hinzugezogen. Der Aufbau dieses Laminates ist in der Abbildung 2.23 zu sehen.

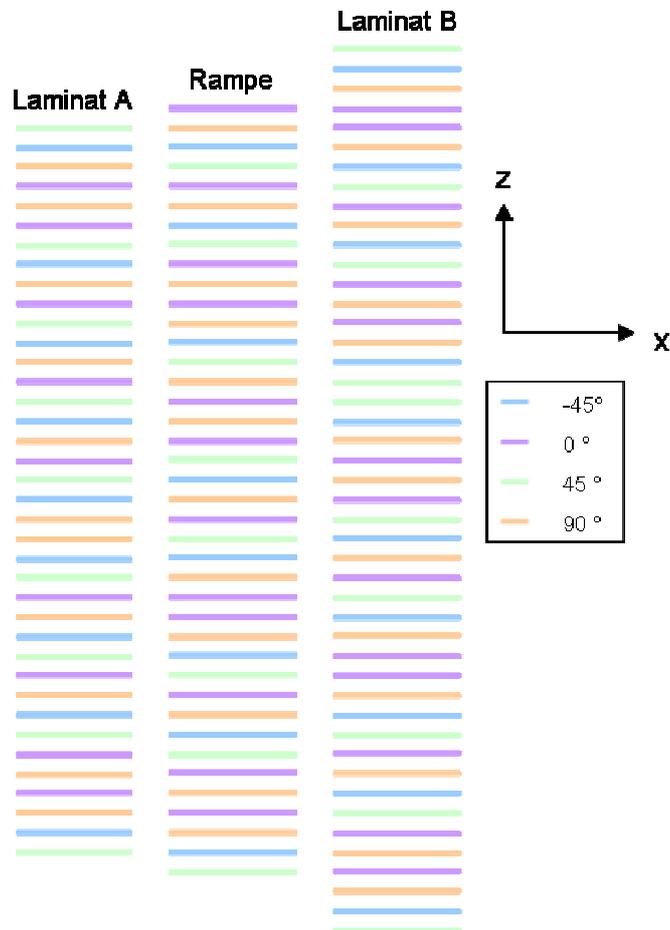


Abbildung 2.23: industrielles Beispiel für eine Rampe

Zunächst soll der Dehnungsverlauf in der Rampe des industriellen Beispiels betrachtet werden, um diesen später mit den Ergebnissen des Programms zu vergleichen. Dazu wird in Hypermesh erneut ein Modell erzeugt. Dieses ist identisch aufgebaut wie das Modell aus dem Kapitel 2.3.1. Dem Modell wird lediglich eine weitere Komponente zwischen den Laminaten A und B hinzugefügt, indem der Lagenaufbau des Übergangs hinterlegt wird.

Das Ergebnis der Berechnung des Modells mit Nastran ist in der Abbildung 2.24 zu sehen.

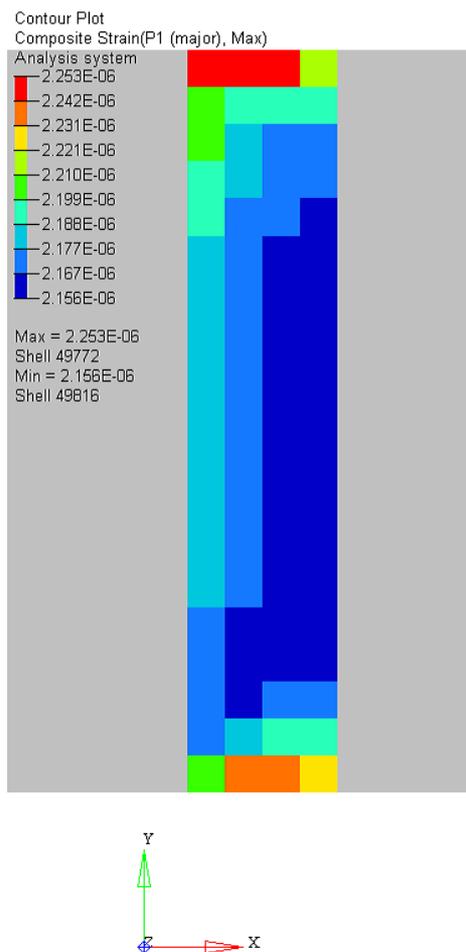


Abbildung 2.24: Dehnungsverlauf in der Rampe des industriellen Beispiels

Dieser Übergang verbindet Laminat A (linke Komponente, ausgegraut) mit Laminat B (rechte Komponente, ausgegraut). Das Laminat B hat mehr Lagen als Laminat A und daher fallen dort die Dehnungen geringer aus. Die Rampe schafft es einen gleichmäßigen Übergang der Dehnungen zu erzeugen. Die Dehnungsspitzen liegen am Rand des Laminates und sind durch Randeﬀekte zu erklären. Die Anforderungen an das Programm ist ein qualitativ ähnliches Ergebnis erzeugen zu können.

Bevor nun aber ein Programmresultat mit dem industriellen Beispiel verglichen wird, sollte noch untersucht werden, inwiefern eine Abwandlung der Bewertungsfunktion die Ergebnisse beeinflusst. Dazu wird die Basis 2 des x -Exponenten der Gewichtungsfunktion $g(x)$ variiert (Formel 23).

Die folgende Tabelle 2.23 zeigt die Unterschiede der Basis auf das Programmresultat, bewertet nach der Dehnungsbewertungsmatrix. Jedes Element der Tabelle zeigt das Programmresultat für jede Schicht in Abhängigkeit zur Basis der Bewertungsfunktion.

Tabelle 2.23: Basiseinfluss auf die Ergebnisse, bewertet durch Dehnungskriterium

Basiseinfluss, Dehnungskriterium		Basis								
		2	4	5	10	50	100	1000	10000	100000
Lage	1	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	2	0°	0°	0°	0°	0°	45°	45°	45°	45°
	3	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	4	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	5	0°	0°	0°	0°	0°	45°	45°	45°	45°
	6	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	7	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	8	0°	0°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	9	0°	0°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	10	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	11	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	12	0°	0°	0°	0°	0°	45°	45°	45°	45°
	13	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	14	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	15	0°	0°	0°	0°	0°	45°	45°	45°	45°
	16	0°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	17	0°	0°	0°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°
	18	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	19	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	20	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	21	0°	0°	0°	0°	0°	45°	45°	45°	45°
	22	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	23	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	24	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	25	0°	0°	0°	0°	0°	45°	45°	45°	45°
	26	0°	0°	0°	0°	0°	45°	45°	45°	45°
	27	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	28	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	29	0°	0°	0°	0°	0°	45°	45°	45°	45°
	30	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	31	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	32	0°	0°	0°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°
	33	0°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	34	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	35	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	36	0°	0°	0°	0°	0°	0°	45°	45°	45°
	37	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	38	0°	0°	0°	0°	0°	45°	45°	45°	45°
	39	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	40	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°

Eine Erhöhung der Basis der Gewichtungsfunktion bewirkt, dass die Funktionswerte sehr schnell, sehr klein werden. Das bedeutet, dass umliegende Lagen des zu bewertenden Laminates, einen immer geringeren Einfluss auf die Bewertungssumme haben. Die Ergebnisse des Programms, nach der Dehnungsmatrix bewertet, zeigen eine eindeutige Dominanz von 0°-Lagen. Mit einer Erhöhung der Basis der Bewertungsfunktion, kommen immer neue Lagen hinzu.

Die gleiche Untersuchung wird noch mit der Dehnungsdifferenzenbewertungsmatrix gemacht. Das Ergebnis ist in Tabelle 2.24 zu sehen.

Tabelle 2.24: Basiseinfluss auf die Ergebnisse, bewertet durch Dehnungsdifferenzkriterium

Basiseinfluss, Dehnungsdifferenz- kriterium		Basis								
		2	4	5	10	50	100	1000	10000	100000
Lage	1	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°
	2	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	3	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	0°	0°
	4	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	0°	0°
	5	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	6	45°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	0°	0°
	7	45°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	0°	0°
	8	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	9	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	10	45°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	0°	0°
	11	45°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	0°	0°
	12	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	13	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	0°	0°
	14	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	0°	0°
	15	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	16	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	17	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°
	18	-45°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	19	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°
	20	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	0°
	21	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°
	22	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	0°
	23	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	0°	0°
	24	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	0°	0°
	25	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	26	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	27	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	0°	0°
	28	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	0°	0°
	29	45°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°
	30	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°
	31	-45°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	32	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°
	33	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	34	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°
	35	-45°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	36	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°
	37	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	0°
	38	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°
	39	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	0°
	40	45°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°

Im Vergleich zur Dehnungsbewertungsmatrix fällt auf, dass hier keine 0°-Lagen-Dominanz herrscht. Mit kleiner Basis in der Bewertungsfunktion, ist der Übergang sehr +45°- und -45°-lastig. Bei steigendem Basiswert wird die Lagenorientierungsverteilung gleichmäßiger. Es lassen sich auch kleine Lagensequenzen aus dem industriellen Beispiel wiederfinden (die Folge: -45°, +45°, 90°, 0°). 90°-Lagen sind verhältnismäßig wenig enthalten.

2.6.4 Auswertung

Bei beiden Lösungswegen ist bereits, anhand der Programmergebnissen, vor einer Berechnung der Übergänge zu sehen, dass sie qualitativ nicht an das industrielle Beispiel herankommen werden, da die Lamine viel zu unausgeglichen sind. Diese Aussage wird auch durch eine FEM-Rechnung bestätigt. In den Abbildungen 2.25 und 2.26 ist der Dehnungsverlauf, der durch das Programm ermittelten Lagen, dargestellt. Gewählt wurden die Lagen mit der Basis $1 \cdot 10^5$, da diese im Verhältnis zu geringeren Basen am ausgeglicheneren scheinen.

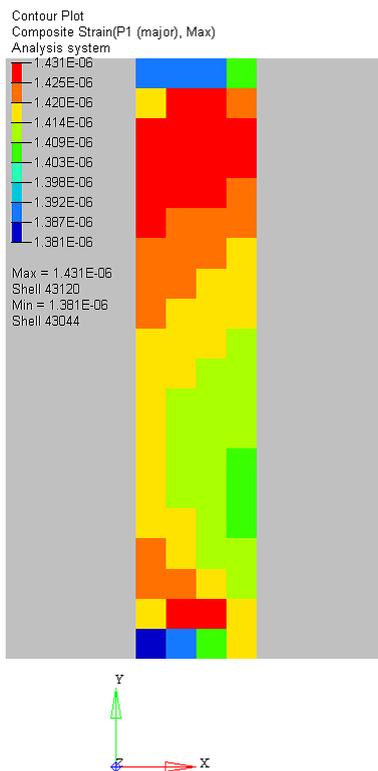


Abbildung 2.25: Dehnungsverlauf der Rampe, erstellt mit Hilfe der Dehnungsbewertungsmatrix

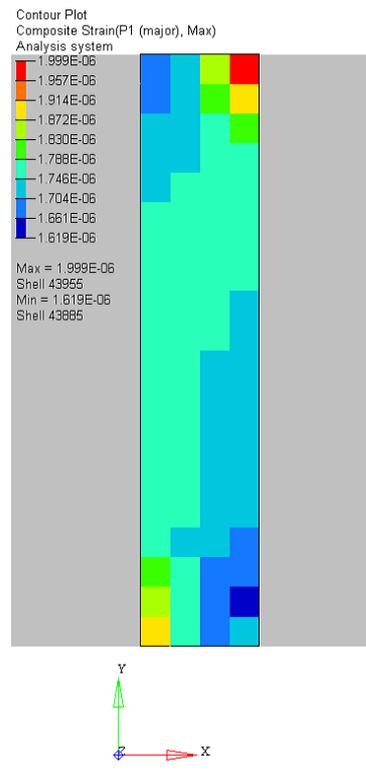


Abbildung 2.26: Dehnungsverlauf der Rampe, erstellt mit Hilfe der Dehnungsdifferenzbewertungsmatrix

Beide Lösungen haben keinen gleichmäßigen Übergang. Die durch die Dehnungsbewertungsmatrix ermittelte Lösung hat in großen Bereichen Dehnungsüberhöhungen. Diese können nicht auf Randeffekte zurückgeführt werden, da sie sich über einen großen Teil der Rampe erstrecken (Abbildung 2.25). Die Lösung durch die Dehnungsdifferenzbewertungsmatrix dagegen weist diese Überhöhungen nicht auf. Hier bleibt die Dehnung ziemlich konstant über die Breite (Abbildung 2.26) mit lokalen Minima. Beide Lösungen haben eine deutliche Abweichung der Dehnungswerte zu dem industriellen Beispiel und können keinen gleichmäßigen Dehnungsübergang vorweisen und sind somit als Übergang nicht verwendbar.

Die geringen Dehnungen lassen vermuten, dass die Steifigkeiten der beiden Übergänge in Lastrichtung zu hoch sind. Um dies festzustellen sollen nun für alle Programmvorschlage die Ingenieurskonstanten der Mehrschichtverbunde ermittelt und mit der Lösung des industriellen Beispiels verglichen werden.

Dazu wird die klassische Laminattheorie angewandt. Es werden die Querkontraktionszahlen ν_{yx} , ν_{xy} und die E-Module E_x , E_y ermittelt und in Diagrammen verglichen.

Die Abbildungen 2.27 bis 2.30 vergleichen die Ingenieurskonstanten. Dabei ist auf der y-Achse die Querkontraktion bzw. das E-Modul (in MPa) und auf der x-Achse ist der „geometrische Verlauf“ des Übergangs aufgetragen. Das soll bedeuten, dass im Punkt „1“ der entsprechende Wert für das Laminat A liegt, Punkt „2“ enthält die entsprechenden Ingenieurskonstanten der Übergänge und der Punkt „3“ steht für das Laminat B.

Querkontraktion – v_{yx} :

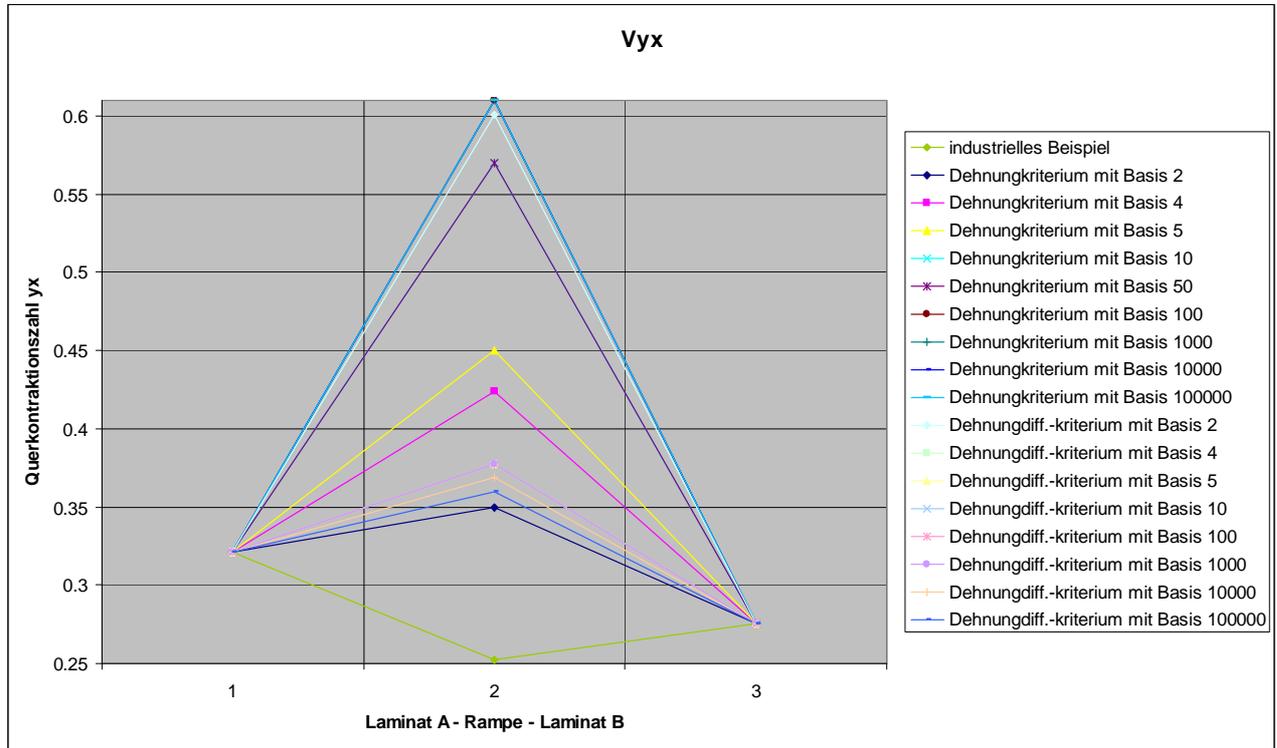


Abbildung 2.27: Querkontraktionszahl v_{yx} der Lagenergebnisse, in Abhängigkeit der Bewertungs-Basis

Bei der Querkontraktion v_{yx} liegen alle Programmvorschlüge sowohl über den Querkontraktionszahlen der Laminaten A und B, als auch über dem industriellen Beispiel. Die industrielle Lösung liegt hierbei unter den Werten von den Laminaten A und B (Abbildung 2.27). Die ermittelten Varianten „Dehnungskriterium mit Basis 2“ und „Dehnungsdifferenzenkriterium mit Basis 100.000“ liegen am dichtesten an der industriellen Lösung. Die größte Querkontraktionszahl ist bei der Variante „Dehnungskriterium mit Basis 100.000“ zu finden.

Zusammenfassung des Diagramms:

größter Wert:

- Dehnungsdifferenzenkriterium mit Basis 100.000

kleinster Wert:

- industrielle Lösung

Varianten nahe der industriellen Lösung:

- „Dehnungskriterium mit Basis 2“
- „Dehnungsdifferenzenkriterium mit Basis 100.000“

Querkontraktion – v_{xy} :

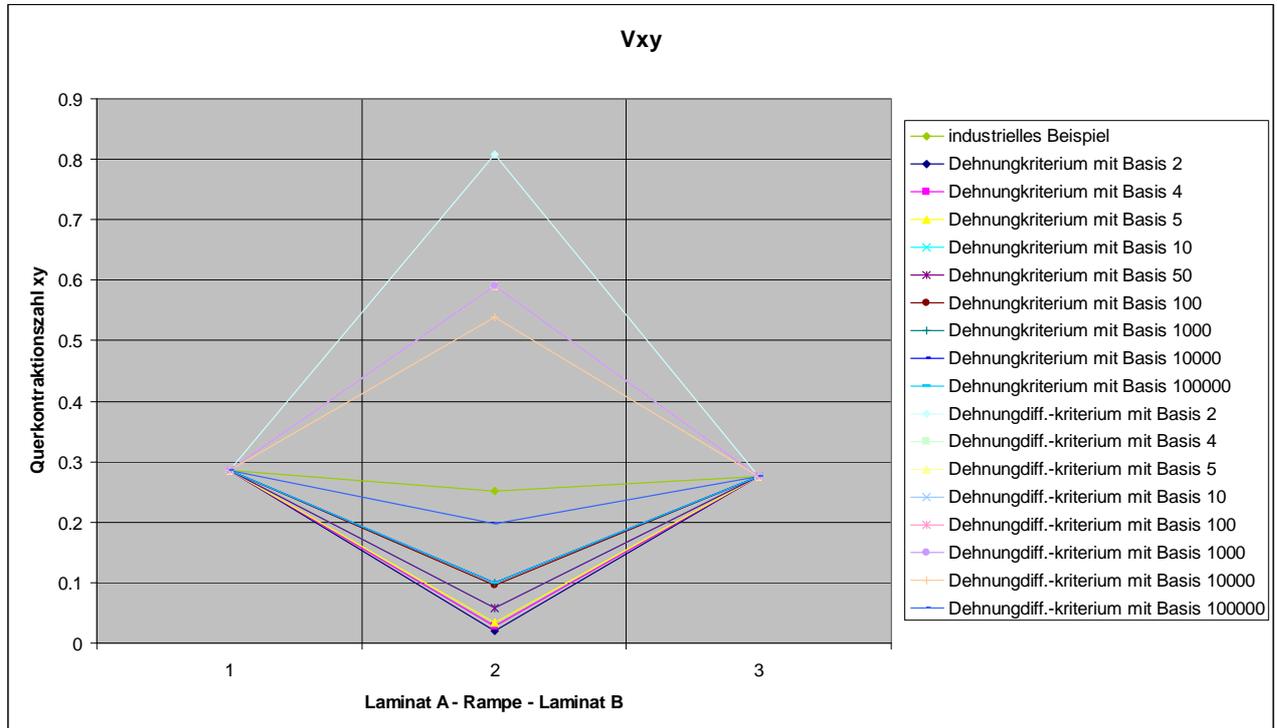


Abbildung 2.28: Querkontraktionszahl v_{xy} der Lagenergebnisse, in Abhängigkeit der Bewertungs-Basis

Zusammenfassung des Diagramms (Abbildung 2.28):

größter Wert:

- Dehnungsdifferenzenkriterium mit Basis 2

kleinster Wert:

- Dehnungskriterium mit Basis 2

Varianten nahe der industriellen Lösung:

- Dehnungsdifferenzenkriterium mit Basis 100.000

E-Modul - E_x :

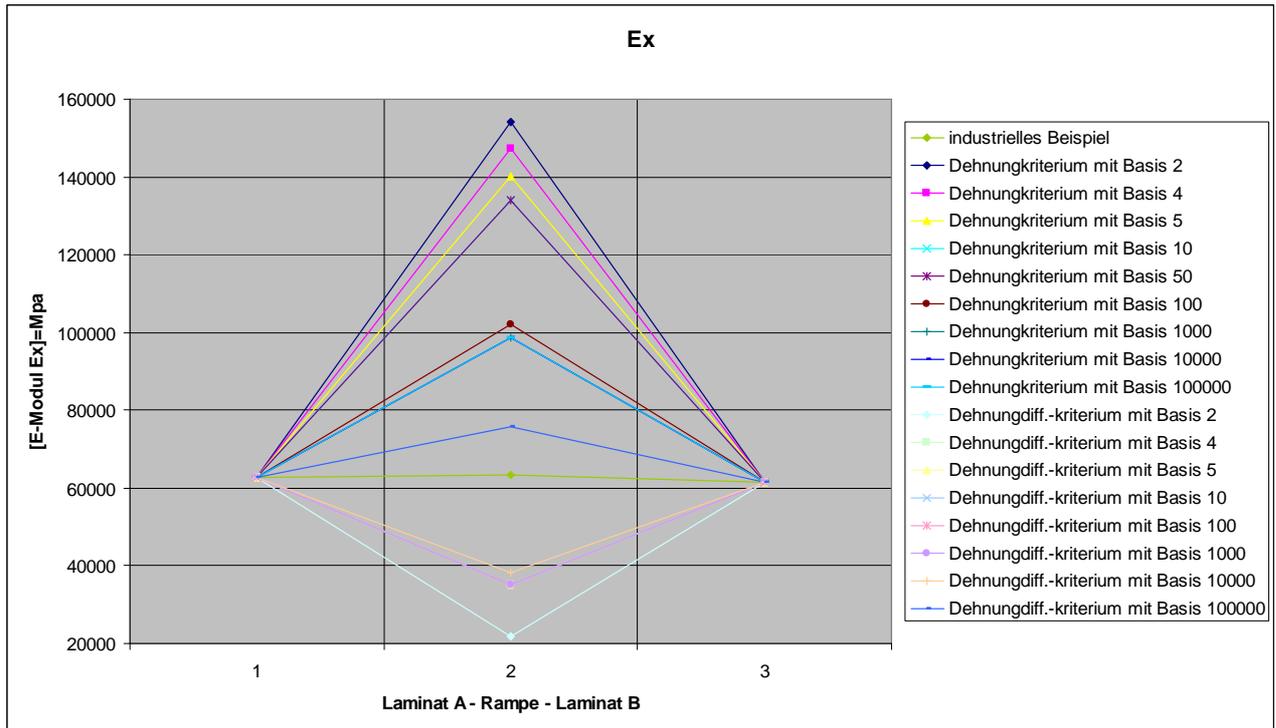


Abbildung 2.29: Elastizitätsmodul E_x der Lagenergebnisse, in Abhängigkeit der Bewertungs-Basis

Zusammenfassung des Diagramms (Abbildung 2.29):

größter Wert:

- Dehnungskriterium mit Basis 2

kleinster Wert:

- Dehnungskriterium mit Basis 2

Varianten nahe der industriellen Lösung:

- Dehnungsdifferenzenkriterium mit Basis 100.000

E-Modul - E_y :

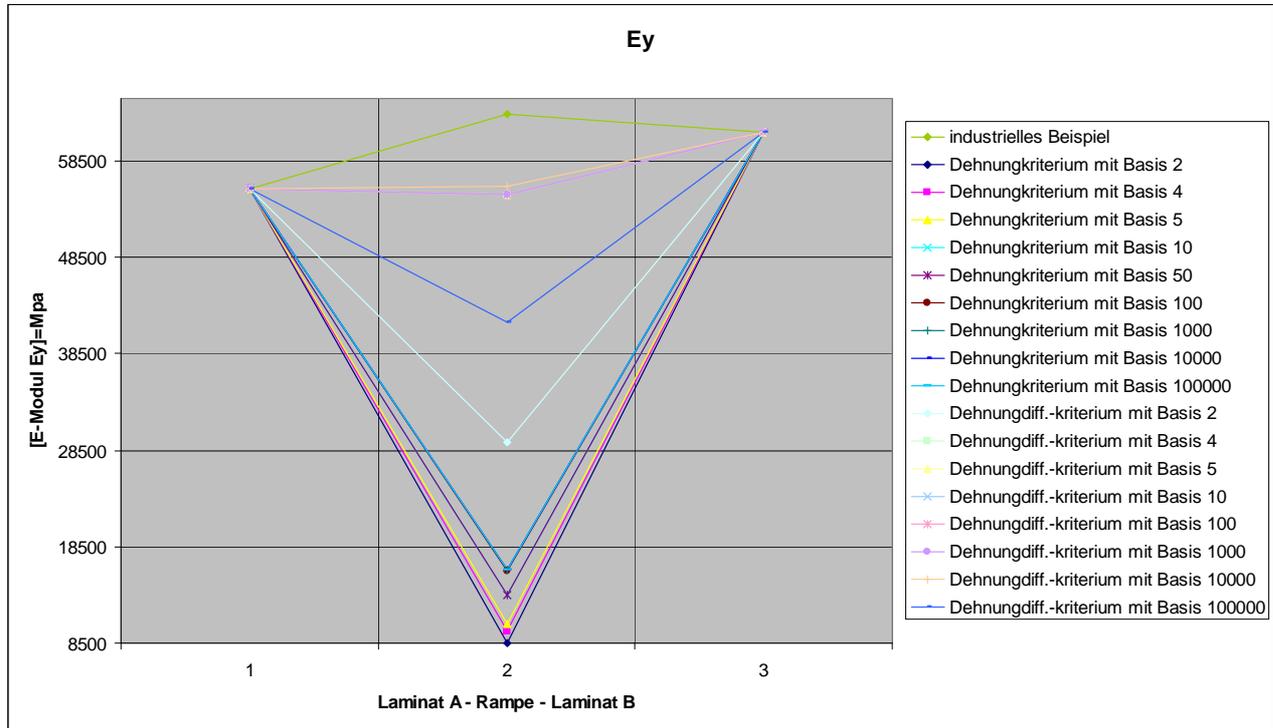


Abbildung 2.30: Elastizitätsmodul E_y der Lagenergebnisse, in Abhängigkeit der Bewertungs-Basis

Zusammenfassung des Diagramms (Abbildung 2.30):

größter Wert:

- industrielle Lösung

kleinster Wert:

- Dehnungskriterium mit Basis 2

Varianten nahe der industriellen Lösung:

- Dehnungsdifferenzenkriterium mit Basis 10.000
- Dehnungsdifferenzenkriterium mit Basis 1.000

Auswertung der Diagramme :

Alle Lösungen des Programms liegen bei keiner der ausgewerteten Ingenieurskonstanten in der Nähe der industriellen Lösung. Lediglich die Mehrschichtverbunde, die durch die Dehnungsdifferenzenbewertungsmatrix mit hoher Basis ermittelt worden sind, liegen im Vergleich zu den anderen Varianten, am dichtesten an der industriellen Variante.

Es fällt auf, dass die Werte des industriellen Beispiels immer nahe der Werte von Laminat A und B liegen. Diese Gegebenheit könnte als neuer Ansatz dienen. Man erzeugt dazu Lagenkombinationen, die in Summe den Mittelwert der Ingenieurskonstanten (und somit der Mittelwert der Steifigkeiten) von Laminat A und B ergeben.

2.7 Aussicht

In der Auswertung der Steifigkeitsdiagramme wurde auf einen neuen Ansatz hingewiesen. Der Ansatz, eine Komponente zu erzeugen, die in der Steifigkeit / den Elastizitätsgrößen zwischen den zu verbindenden Laminaten liegt, wurde geprüft und die erzeugten Ergebnisse lieferten einen flüssigen Übergang der Dehnungen in der Rampe. Eine solche Steifigkeit lässt sich schnell in der Rampe erzielen, indem man den Faserorientierungsanteil von Laminat A und B beibehält. Es sind dann prozentual genauso viele Lagen der jeweiligen Faserorientierungen in der Rampe enthalten wie bei den umliegenden Laminaten. Die Steifigkeit ist unabhängig von der Kombination dieser Faserorientierungen. Im Idealfall ordnet man nun die Lagen symmetrisch an. Im Fall des Ergebnisses aus Abbildung 2.31 wurde ein symmetrischer Lageraufbau benutzt. Es ergeben sich Ergebnisse, die besser sind als die industrielle Lösung, da der Übergang flüssiger und das Dehnungsspektrum kleiner ist. Dieses Ergebnis lässt sich verhältnismäßig leicht konstruieren. Dabei wurde nicht beachtet, ob sich diese Rampe fertigungstechnisch überhaupt machbar ist. Sie stellt lediglich den Optimalfall dar. An dieser Stelle kann in Zukunft angesetzt werden, um eine Rampe generieren zu können, die gute Dehnungswerte hervorbringt und fertigungstechnisch machbar ist.

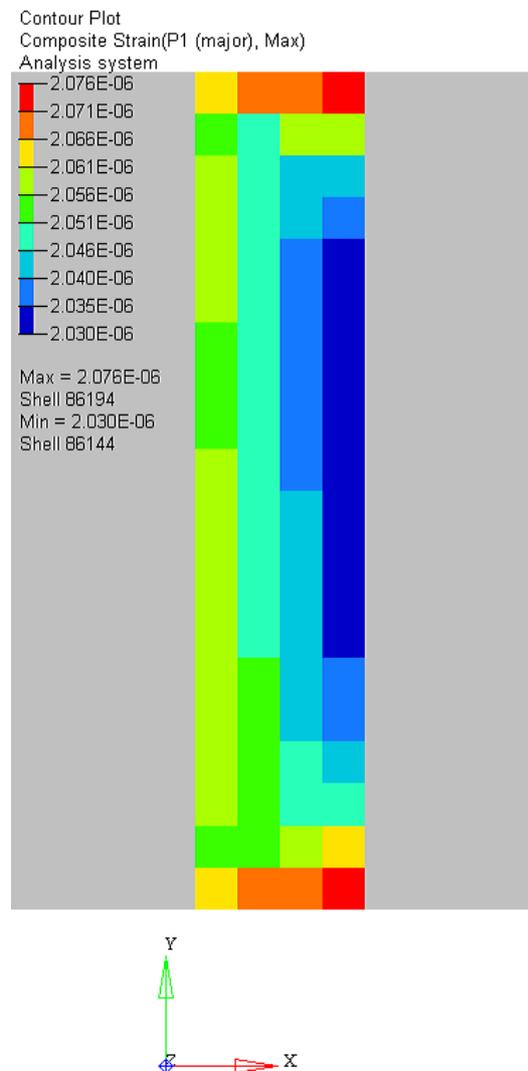


Abbildung 2.31: Dehnungsübergang eines symmetrischen Lageraufbaus

3 Vernieten und Verschrauben von Laminaten

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Verschrauben und dem Vernieten von Laminaten.

Ein Laminat kann meist aus fertigungstechnischen oder montagetechnischen Gründen nicht aus einem Stück produziert werden. Die verschiedenen Lamine müssen aber dennoch miteinander verbunden werden können. Hier können Fügeverfahren wie beim Maschinen-/Stahlbau angewandt werden wie z.B. Kleben, Verschrauben und Vernieten.

Um bei komplexen Bauteilen eine möglichst realistische Berechnung machen zu können, müssen diese Verbindungselemente in die Berechnungen mit einfließen. Dazu bedarf es einer Art Modellierung dieser Verbindungen. Hier muss abgewogen werden wie genau man diese Verbindungselemente modellieren muss/möchte. Liegt eine kritische Stelle vor, bei der der kleinste Einfluss den kritischen Ausschlag geben kann oder das Verbindungselement an sich geprüft werden soll, macht es Sinn, die Schraube oder den Niet als Solid zu modellieren. Sind dagegen nicht die genauen Einflüsse der Verbindungselemente interessant, sondern nur die Steifigkeiten, die dadurch ins System gebracht werden, können diese auch durch Ersatzelemente beschrieben werden. Die Elemente, die an dieser Stelle benutzt werden können, sind Feder-Elemente. Diese sind einfache 1D-Elemente und können Steifigkeiten für jeden Freiheitsgrad zugewiesen bekommen. Zur Ermittlung der Steifigkeiten wird die Huthformel verwendet. Auf diese Formel wird im Folgenden näher eingegangen. Die Methode hat den Vorteil, dass Rechenzeit gespart wird, da nur wenige Feder-Elemente notwendig sind, um eine Schraube/einen Niet abzubilden zu können. Eine ausmodellerte Schraube dagegen wird, abhängig von der Elementgröße, mehrere Tausend Elemente benötigen, um ein ausreichendes Netz zu generieren.

Schraub- und Nietverbindungen werden in den meisten Fällen nur vereinfacht in Modellen eingebaut in Form von Feder-Elementen. Dies gewährleistet eine schnellere Rechnung bei gleichzeitig guter Abbildung der Steifigkeit des Verbindungselementes im System.

Im Folgenden werden zwei Arten der automatischen Verbindungsmodellierung an Solids vorgestellt. Hier ist dieser Vorgang, im Vergleich zur Verbindung von zwei Schalenkomponenten, ein aufwendiger Prozess. Zur Verbindung von den zwei Schalenkomponenten ist lediglich ein Feder-Element notwendig, da hier in der Regel die Bohrungen nicht mit modelliert werden. Werden diese dennoch mit modelliert, wird das Feder-Element durch eine Beam-Spinne mit der Komponente verbunden. Solids dagegen werden im ersten Schritt mittels Beam-Spinnen mit dem Feder-Element verbunden, da hier immer eine ausmodellerte Bohrung vorliegt. Im zweiten Schritt wird die Verbindung der Spinne mit der zu verbindenden Komponente erzeugt.

Spinnenarten:

Es werden nun zwei Arten der Spinnenmodellierung vorgestellt. Dies ist zum einen eine Spinne, die alle Knoten der Bohrung mit dem Schwerpunkt der Bohrung mit Beam-Elementen verbindet (Abbildung 3.1). An dem Schwerpunkt wird dann das Feder-Element angeschlossen, das die zwei Fügepartner miteinander verbindet.

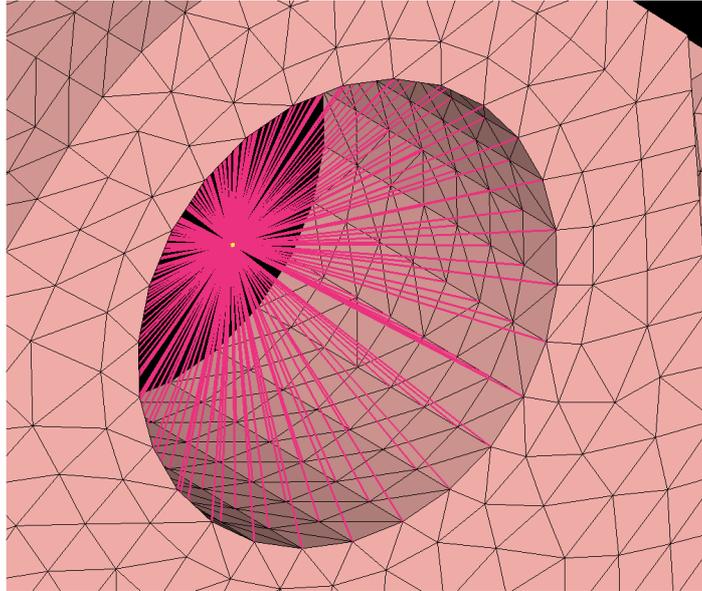


Abbildung 3.1: Schwerepunktspinne

Und zum anderen ist es eine Verbindung des Solids mit dem Feder-Element durch mehrere Spinnen, die alle senkrecht zur Bohrungsschse verlaufen. Jeder Mittelpunkt einer Spinne wird durch ein Feder-Element verbunden und die letzte Spinne mit der zu verbindende Komponente (Abbildung 3.2).

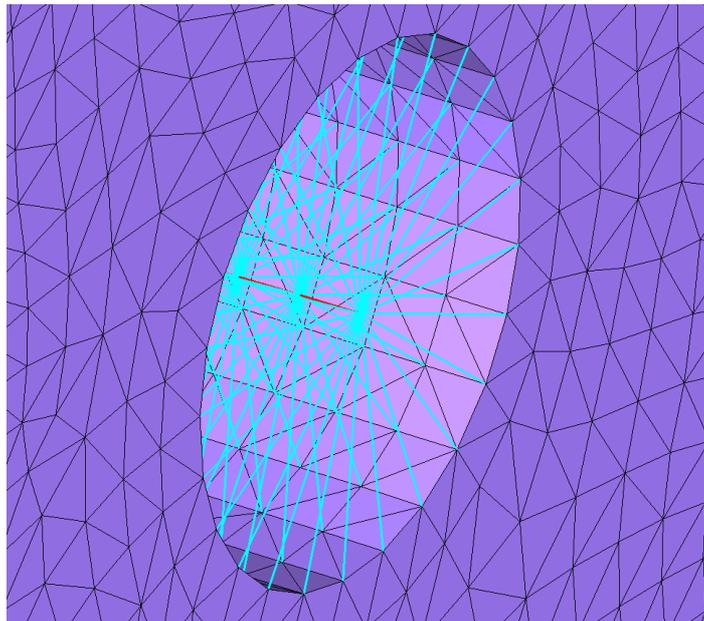


Abbildung 3.2: Orthogonalspinne

Die beiden Spinnenmodellierungsarten bringen auch leicht unterschiedliche Eigenschaften aufgrund der Beam-Anordnungen mit sich. So ergaben Vergleichsrechnungen, dass die Verschiebung (bei einer Zugbelastung des Bauteils) der Schwerepunktsspinne ca. 1,2% geringer ist als die Verschiebung des gleichen Bauteils mit einer Orthogonalspinne. Bei einer Schubbelastung liegt der Unterschied bei ca. 13%. Hier ist das Bauteil mit der Orthogonal-Spinne schubsteifer.

Beide Varianten sind in der Praxis anzutreffen und aus diesem Grund macht es Sinn für beide ein Tool zu entwickeln, das die Generierung dieser Verbindungen in der Hypermeshumgebung automatisiert. Bei größeren Modellen können schnell über 1000 Verbindungen entstehen, die erstellt werden müssen.

3.1 Schwerepunktsspinne

Dieses Kapitel befasst sich mit der Variante der Schwerepunktsspinne. Wie schon im vorherigen Kapitel beschrieben, hat diese Variante einen zentralen Knoten, der mit dem alle Knoten der Bohrungsinenseite durch Beam-Elemente verbunden wird.

3.1.1 Vorgehensweise

Vor der Erstellung sollten folgende Fragen geklärt werden:

1. Wie groß soll der Anteil der manuellen Eingaben im Tool sein?
2. Was soll das Tool alles können?
3. Auf welche Weise sollte das Programm das Problem lösen?
4. Was für Rahmenbedingungen gibt es?

Wie groß sollte der Anteil der manuellen Eingabe im Tool sein?

Die manuelle Eingabe sollte sich auf das mindeste beschränken, um einen schnelleren Programmdurchlauf gewährleisten zu können.

Was soll das Tool alles können?

Die grundlegenden Programmfunktionen sind die Generierung der Beam-Spinnen und die Verbindung der Mittelpunkte mit der zweiten Komponente durch ein Feder-Element. Hinzu könnte die automatische Orientierung von Beam- und Feder-Elementen sein. Wünschenswert wäre noch, wenn man die Wahl hätte, ob man die zweite Komponente bereits mit der Spinne verbindet oder nicht.

Für den Fall, dass die Verbindung mit der zweiten Komponente realisiert werden soll, soll dies mit Hilfe von sogenannten „Konnektoren“ geschehen.

Zusätzlich wäre eine automatische Spinnengenerierung von beliebig vielen Bohrungen wünschenswert.

Auf welche Weise sollte das Programm das Problem lösen?

Es gibt keine Anforderung durch die Abteilung.

Was für Rahmenbedingungen gibt es?

Zu verbinden sind die lediglich die Knoten auf der Innenseite der Bohrungen.

Es ist von einer gleichmäßigen Knotenverteilung in der Bohrung auszugehen.

Diese Punkte werden in der folgenden Anforderungsliste noch mal zusammengefasst (Tabelle 3.1):

Tabelle 3.1: Anforderungsliste für die automatische Erzeugung der Schwerepunktsspinne

	Anforderung	Forderung / Wunsch
1.	Möglichst wenig manuelle Eingaben	F
2.	Automatische Erzeugung der Schwerepunktsspinne	F
3.	Orientierung der Elemente	W
4.	Eine Wahl, ob die automatische Verbindung mit zweiter Komponente realisiert werden soll	W
5.	Lediglich mit den Knoten auf der Bohrungsinenseite darf gearbeitet werden	F
6.	Automatische Spinnengenerierung von mehreren Bohrungen gleichzeitig	W

Als erstes geht es um die Erzeugung der Spinne. Die Verbindung mit der zweiten Komponente hat erst mal sekundäre Priorität. Es gibt gewisse Anforderungen an diese Verbindungen. Es muss z.B. eine bestimmte Elementkantenlänge eingehalten werden und am Verbindungspunkt des Konnektors darf sich kein Tria-Element befinden (bei Verbindung mit einer Schalen-Komponente). Konnektoren sind Verbindungselemente, die durch Hypermesh zur Verfügung gestellt werden.

„Connectors are geometric entities...used to create connections between link entities. Assemblies, components, elements, surfaces, nodes, and tags may act as link entities. Connectors are used to realize FE idealizations of the physical connection between the link entities. Just as you create a FE elements on a surface, you create FE connections by realizing a connector.“ [Altair]

Diese Konnektoren haben die Eigenschaft das Netz zu verändern, wenn an dem Verbindungspunkt kein Knoten liegt. Entweder wird ein nahe gelegener Knoten zu dem Verbindungspunkt gezogen (leichte Verzerrung des Netzes) oder es wird an der Stelle automatisch neu vernetzt. Hier könnten dann ungewünschte Elemente entstehen. Aus diesem Grund soll die Verbindung zunächst nicht betrachtet werden.

Dieses Tool wird in TCL geschrieben (Skriptsprache von Hypermesh). Die erste Frage, die sich nun stellt, ist wie man automatisiert an die Knoten der Bohrungsinneseite kommt. Ausschließen kann man die Anwahl aller Elemente, die die Bohrungen beschreiben. Denn diese wird in der Regel komplett von Tetraederelementen beschrieben und jedes Tetraeder-Element besitzt 4 Knoten. Bei dem Beispiel aus Abbildung 3.3 sind über 1700 Elemente beteiligt, um diese Bohrung zu beschreiben (Abbildung 3.4).

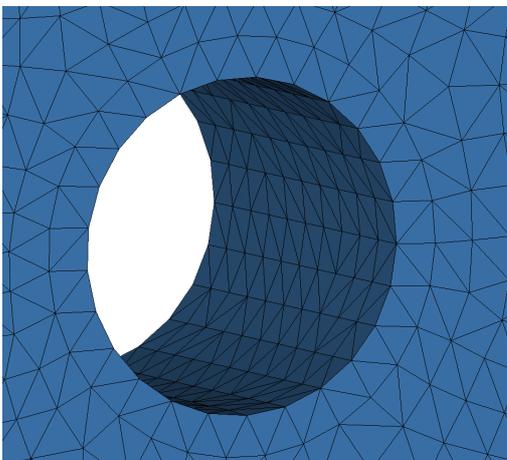


Abbildung 3.3: Beispiel einer modellierten Bohrung

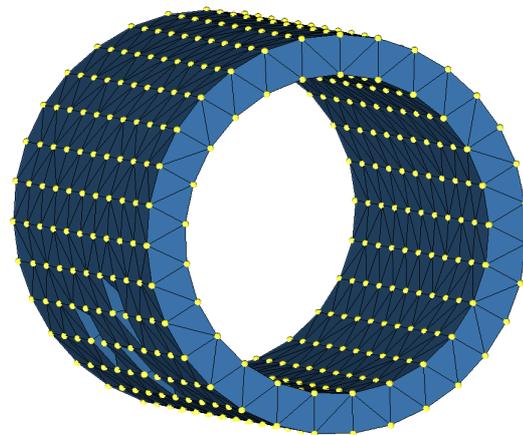


Abbildung 3.4: an der Bohrung beteiligte Knoten

Das sind insgesamt 627 Knoten. Wenn man nun lediglich manuell die Knoten an der Innenseite der Bohrung selektiert und zählen lässt, kommt man auf 275 Knoten. Diese 275 Knoten aus diesem Beispiel gilt es zu erfassen.

Die Innenseite der Bohrung wird lediglich durch die Basis der Tetraeder beschrieben. Die Basis stellt eine Fläche dar, die durch die drei Knoten beschrieben wird. Dies wäre der zweite Ansatzpunkt, dass man versucht über diese Flächen zu gehen, da diese die Bohrung beschreiben. Dazu könnte man Faces zur Hilfe nehmen. Ein Face ist eine Ansammlung von Tria-Elementen, die die gesamte Komponente umhüllen und sich dieselben Knoten mit den Tetraeder-Elementen teilen. Dies ist dann auch in der Bohrung der Fall. Bekommt man alle Tria-Elemente innerhalb der Bohrung automatisch selektiert, bekommt man alle Knoten in der

Bohrung. Mit diesem Ansatz sollte das Problem der Markierung von den richtigen Knoten gelöst sein. Diese Funktion ist in Hypermesh auch hinterlegt und nennt sich *-byface*.

Nun stellt sich die nächste Frage, wie nun diese Knoten durch Beam-Elemente mit dem Bohrungsschwerpunkt verbunden werden können. Dazu muss zunächst der Bohrungsschwerpunkt ermittelt werden. In Hypermesh gibt es zwei Wege, die dies ermöglichen aber eine manuelle Eingabe erfordern würden. Die eine wäre die Ermittlung der Kreismittelpunkte an den Bohrungsenden, um anschließend zwischen den beiden Kreismittelpunkten die Länge ausmessen zu lassen und bei $L/2$ einen temporären Knoten zu setzen. Dazu müssen pro Seite 3 Knoten ausgewählt werden, damit der Kreismittelpunkt ermittelt werden kann. Das wären hier also 6 Knoten, die man innerhalb des Programmablaufes anwählen müsste. Das Ausmessen und setzen des Punktes bei $L/2$ würde wieder automatisch ablaufen.

Die andere Möglichkeit wäre die Funktion *-nodebetween*. Diese Funktion setzt automatisch zwischen zwei angewählten Knoten auf $L/2$ einen Knoten (wäre ebenfalls anwendbar auf die erste Möglichkeit mit der Verbindung der beiden Kreismittelpunkten). Hierzu wählt man 2 Knoten an, die jeweils am anderen Bohrungsrand liegen. Der erste Knoten kann willkürlich gewählt werden, der zweite muss auf einer Ebene, die die Bohrung halbiert, mit dem ersten Knoten liegen. Der nun erzeugte Knoten zwischen diesen beiden liegt nun automatisch im Schwerpunkt der Bohrung (Abbildung 3.5). Dies benötigt aber erneut zwei manuelle Eingaben.

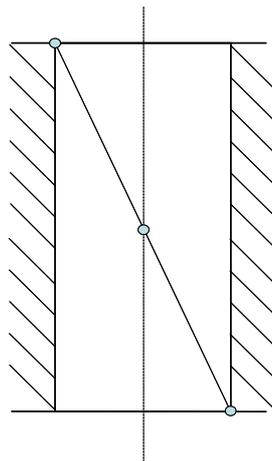


Abbildung 3.5: Variante zur Ermittlung des Bohrungsschwerpunktes

Keine bekannte Funktion von Hypermesh könnte die Ermittlung dieses Punktes automatisch übernehmen. Nun bleibt noch die Möglichkeit diesen Punkt mit Hilfe der Knotenkoordinaten der zuvor ermittelten Knoten zu bestimmen. Anhand dieser Koordinaten könnte wie folgt der Schwerpunkt ermittelt werden:

$$x_s = \frac{\sum_{i=1}^n x_n}{n} \quad y_s = \frac{\sum_{i=1}^n y_n}{n} \quad z_s = \frac{\sum_{i=1}^n z_n}{n} \quad (26)$$

Die x-, y-, und z-Koordinaten aller Knoten werden aufaddiert und durch die Anzahl der Knoten geteilt. Der Schwerpunkt wäre damit bestimmt und es ist keine manuelle Eingabe erforderlich. Aus diesem Grund soll dieser Ansatz im Programm umgesetzt werden. Der Ansatz setzt allerdings voraus, dass alle Knoten in der Bohrung gleichmäßig verteilt sind.

Nun müssen die Knoten nur noch alle mit diesem Schwerpunkt verbunden werden. Damit wären die Hauptfunktion des Programms und alle Festanforderungen erfüllt.

3.1.2 Realisierung des Programms

Das Programm startet mit einer Abfrage. Es soll ein Element in der Bohrung angewählt werden. Dieses Element muss ein Tria-Element eines Faces sein. Ist kein Face vorhanden, muss dieses vor Anwendung des Programms erstellt werden. Im Programm ist an dieser Stelle noch eine Funktion hinterlegt, die zuvor ein Face auf der Komponente erzeugt. Diese Funktion kann bei Bedarf auskommentiert werden. In der Anwendung ist es aber meist der Fall, dass die Faces bereits bestehen, bevor das Programm benötigt wird. Während der manuellen Eingabe ist es möglich eine Mehrfachauswahl von beliebig vielen Bohrungen zu tätigen. Man markiert für jede weitere Bohrung ein weiteres Element auf der Bohrungssinnenseite. Die Element-Identifikationsnummern der Elemente werden in einer Liste gespeichert. Diese Aktionen sind im Programmablaufplan (Abbildung 3.6) unter dem Punkt (1) zu finden.

Mit den zuvor gewonnenen Informationen geht es in eine *for-Schleife* (PAP [2]), die so viele Durchläufe macht wie Bohrungen bzw. Elemente markiert worden sind. Im ersten Durchlauf (PAP [3]) wird die Identifikationsnummer des ersten Elementes des Arrays separat in eine Variable `$bore_elem` abgespeichert. Dieses Element wird nun erneut aufgerufen und alle angrenzenden Elemente mit Hilfe der Hypermeshfunktion

```
*appendmark elems 1 "by face" $bore_elem
```

markiert. Es sind nun alle Elemente innerhalb der Bohrung markiert. Diese werden nun in eine Liste `$all_bore_elems` gespeichert. Alle Face-Elemente sind in der Bohrung markiert und gespeichert. Nun müssen nur noch die Knoten dieser Elemente ermittelt werden. Dafür wird der Befehl

```
*findmark elements 1 1 1 nodes 0 2
```

verwendet. Auf die Bedeutungen der einzelnen Elemente der Befehle wird hier nicht näher eingegangen. Diese können in der Hypermesh-Dokumentation nachgelesen werden. Nun sind alle Knoten der Bohrung ermittelt und diese werden abgespeichert. Da jetzt alle Knoten bekannt sind, können die Knotenkoordinaten ausgelesen werden. Dazu geht eine *foreach-Schleife* (PAP [4]) jeden Knoten einzeln durch und speichert die x-, y- und z-Koordinaten in den Listen `$x1`, `$y1` und `$z1`. Nachdem die Schleife durchgelaufen ist, beinhaltet z.B. die Liste `$x1` die x-Koordinaten aller Knoten in der Bohrung. Nun müssen die x-, y- und z-Koordinaten noch separat aufsummiert werden. Dies geschieht in einer *for-Schleife*, die so viele Durchläufe macht, wie Knoten in der Bohrung sind. Die x-, y- und z-Summen müssen jetzt nur noch durch die Anzahl der Knoten geteilt werden. Der Schwerpunkt der Bohrung ist nun ermittelt und an dieser Koordinate wird ein temporärer Knoten erzeugt.

Anschließend muss eine manuelle Eingabe getätigt werden. Der Benutzer soll einen Knoten auswählen, an dem die Beam-Elemente orientiert werden sollen. In der Regel ist es der Knoten, mit dem später der Bohrungsschwerpunkt mit der zweiten Komponente verbunden werden soll. Ist es zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich diesen Knoten zu bestimmen, weil z.B. das Netz der zweiten Komponente noch nicht erzeugt worden ist, kann einfach irgendein Knoten gewählt werden. Die Orientierung kann im Nachhinein geändert werden.

Nun kommt die eigentliche Programmfunktion, die die Beam-Spinne erzeugt. Hierfür wird der Befehl

```
*barelement $mas_node $k 0 $ori_node 1 0 0 ""
```

verwendet. Diese Funktion ist in eine *foreach-Schleife* eingebettet, die die Liste der Knoten innerhalb der Bohrung durchläuft (Laufvariable `$k`). Die Variable `$mas_node` steht für den Schwerpunksknoten und `$ori_node` für den manuell ausgewählten Orientierungsknoten. Nun wird in jedem Durchgang ein Beam-Element zwischen `$mas_node` und `$k` generiert,

welches nach $\$ori_node$ orientiert wird. Nach Durchlauf dieser Schleife ist die Spinne generiert und orientiert.

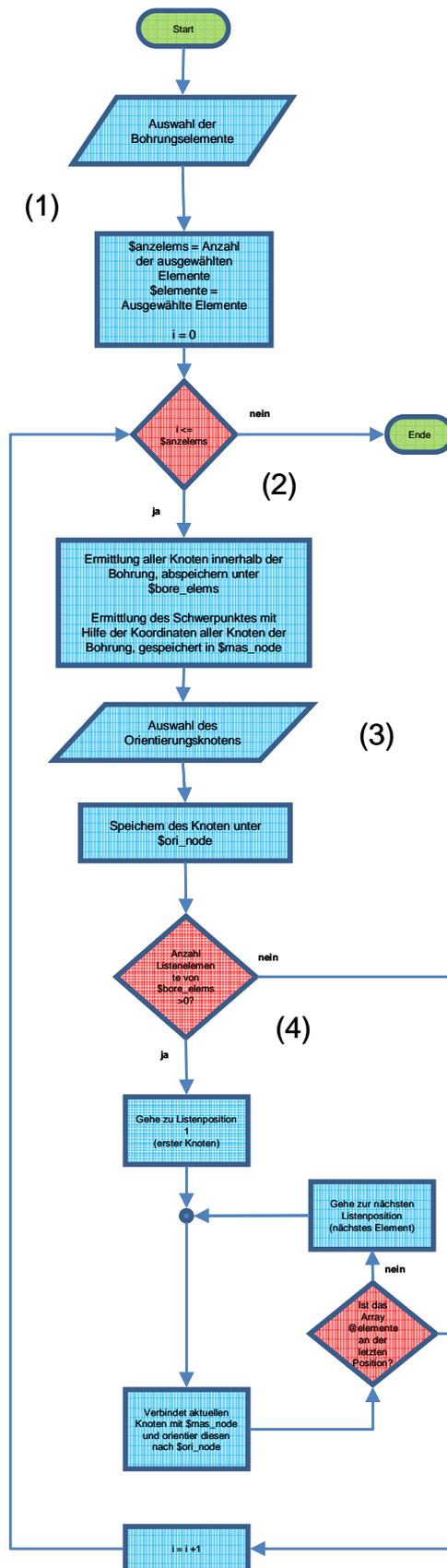


Abbildung 3.6: Programmablaufplan zur Erzeugung von Schwerpunktspinnen

Eine Feder-Verbindung mit der zweiten Komponente wird an dieser Stelle nicht realisiert, da sich im praktischen Test dies zunächst als unkomfortabel herausgestellt hat, da die Realisierung der Verbindung durch einen Konnektor das Netz der zweiten Komponente negativ beeinflussen kann, wenn dieses noch nicht auf die Verbindung vorbereitet worden ist.

Das Ergebnis des Beispiels ist in der Abbildung 3.7 zu sehen. Man kann gut erkennen, dass das Programm die Spinne so erzeugt hat wie es vorgesehen war. Wie oben schon erwähnt, ist dieses Programm nur bei Bohrungen zulässig, die eine gleichmäßige Knotenverteilung aufweisen können. Ansonsten würde die Schwerpunktermittlung durch die Knotenkoordinaten nicht den Bohrungsschwerpunkt ermitteln können. Es gäbe eine Abweichung in Richtung der höheren Knotendichte.

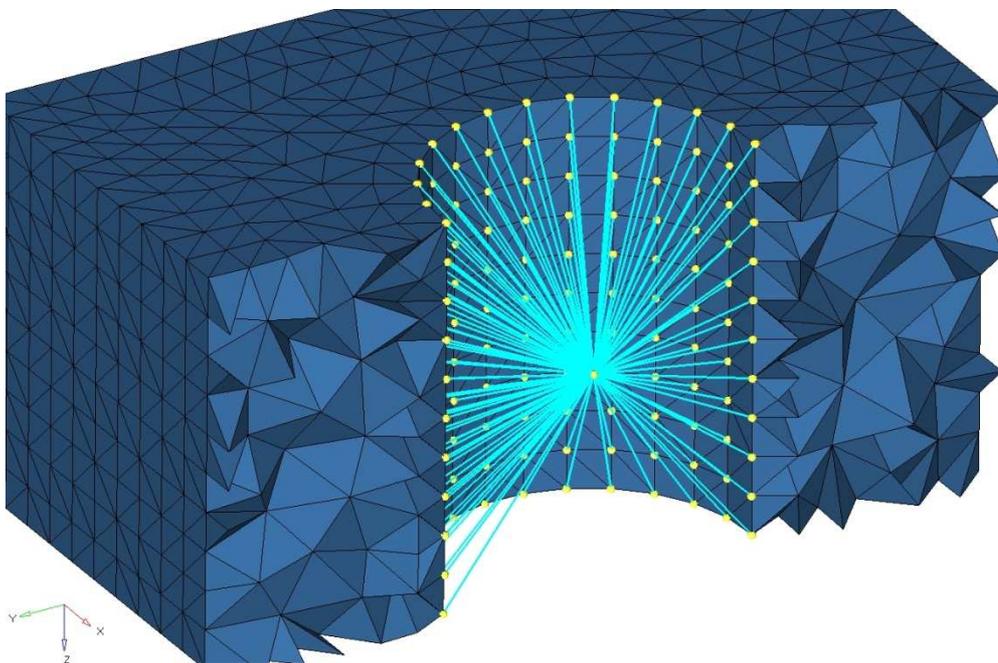


Abbildung 3.7: Programmresultat für die Schwerpunktsrinne

3.2 Orthogonalspinne

Es soll hier eine weitere Spinnenart, zur Verbindung der Federelemente mit dem Solid, erzeugt werden. In der Abbildung 3.2 ist ein Beispiel dieser Spinne aufgeführt.

3.2.1 Vorgehensweise

Vor der Erstellung sollten folgende Fragen geklärt werden:

1. Wie groß soll der Anteil der manuellen Eingaben im Tool sein?
2. Was soll das Tool alles können?
3. Auf welche Weise sollte das Programm das Problem lösen?
4. Was für Rahmenbedingungen gibt es?

Wie groß sollte der Anteil der manuellen Eingabe im Tool sein?

Die manuelle Eingabe sollte sich auf das mindeste beschränken, um einen schnelleren Programmdurchlauf gewährleisten zu können.

Was soll das Tool alles können?

Die grundlegenden Programmfunktionen sind die Generierung der einzelnen Beam-Spinnen und die Verbindung untereinander durch Feder-Elemente.

Spinnen sollen senkrecht zur Bohrungsachse stehen.

Hier sollte die Orientierung der Beam- und Feder-Elemente möglichst automatisch gesetzt werden.

Für den Fall, dass die Verbindung mit der zweiten Komponente realisiert werden soll, geschieht dies mit Hilfe der sogenannten „Konnektoren“.

Zusätzlich wäre eine automatische Spinnengenerierung von beliebig vielen Bohrungen wünschenswert.

Auf welche Weise sollte das Programm das Problem lösen?

Es gibt keine Anforderung durch die Abteilung.

Was für Rahmenbedingungen gibt es?

Lediglich die Knoten auf der Innenseite der Bohrungen dürfen angesprochen werden.

Die Mittelpunkte der einzelnen Spinnen sollten möglichst gut fluchten.

Diese Punkte werden in der folgenden Anforderungsliste zusammengefasst (Tabelle 3.2):

Tabelle 3.2: Anforderungsliste für die automatische Erzeugung der Orthogonalspinne

	Anforderung	Forderung / Wunsch
1.	Möglichst wenig manuelle Eingaben	F
2.	Automatische Erzeugung der Schwerepunktspinne	F
3.	Orientierung der Elemente	F
4.	Lediglich mit den Knoten auf der Bohrungsinnenseite darf gearbeitet werden	F
5.	Mittelpunkte der verschiedenen Spinnen sollten fluchten	F
6.	Spinnen sollen senkrecht zur Bohrungsachse stehen	F
7.	Automatische Spinnengenerierung von mehreren Bohrungen gleichzeitig	W

Die Idee mit den Knotenkoordinaten, die im Kapitel zuvor aufgegriffen worden ist (Ermittlung des Bohrungsschwerpunktes durch Knotenkoordinaten), kann hier nicht aufgegriffen werden. Da hier mehrere Spinnen erzeugt werden sollen, die senkrecht zur Bohrungsschwerachse stehen. Die Information des Schwerpunktes hätte in diesem Fall keinen Informationswert.

Wenn man hier wieder von einer Gleichverteilung der Knoten innerhalb der Bohrungen ausgeht, bilden sich Knotenreihen. Diese Knotenreihen stehen senkrecht zur Bohrungsschwerachse und haben untereinander den gleichen Abstand zueinander.

Wie im vorherigen Kapitel soll das Programm in der Skriptsprache TCL geschrieben werden, damit es direkt in Hypermesh genutzt werden kann. Die Haupt-Problematik in diesem Fall liegt in der Erfassung der richtigen Knoten, die zu einer Spinne zusammengefügt werden. Es dürfen lediglich die Knoten miteinander verbunden werden, die senkrecht auf der Bohrungsschwerachse auf einer Höhe liegen (Abbildung 3.8).

Eine Idee die zu verbindenden Knoten zu ermitteln, wäre die Hypermeshfunktion *-bypath*. Diese Funktion ermittelt alle Knoten, die zwischen zwei Knoten liegen. Es wird der kürzeste Weg zwischen den beiden Knoten ermittelt und alle Knoten auf dem Weg markiert. Man könnte versuchen auf diese Weise eine Knotenreihe längs der Bohrungsschwerachse zu erzeugen (Abbildung 3.9). Die Knoten werden dann in einem Array gespeichert.

$$\text{Knotenreihe}_1 = [k_{11}, k_{12}, k_{13}, \dots, k_{1n}]$$

Das Array beinhaltet jetzt n Elemente. Das gleiche wird nun mit der parallel liegenden Knotenreihe gemacht.

$$\text{Knotenreihe}_2 = [k_{21}, k_{22}, k_{23}, \dots, k_{2n}]$$

Es wird aus diesen Werten nun eine Matrix erzeugt. Diese Matrix sieht wie folgt aus:

$$\text{Knotenreihen} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2n} \\ \dots & & \dots & & \dots \\ \dots & & & & \dots \\ k_{m1} & k_{m2} & k_{m3} & \dots & k_{mn} \end{bmatrix}$$

Dabei ist der Index m die Anzahl der Knoten in Umfangsrichtung. In der Matrix würden nun alle Knoten, die in einer Spalte stehen, zusammengehören. Diese würden auf dem Umfang der Bohrung, in einer Ebene liegen. Dies setzt aber voraus, dass die Knotenreihen immer gleich generiert werden. Sie müssen immer von einer Seite ausgehen. Ansonsten hätten wir z.B. an der Matrixposition Zeile1-Spalte1 einmal den ersten Knoten ausgehend von der Seite A und an der Position Zeile2-Spalte1 hätte man den ersten Knoten der Seite B. Die Knoten würden also anstatt nebeneinander, versetzt und auf der gegenüberliegenden Seite liegen.

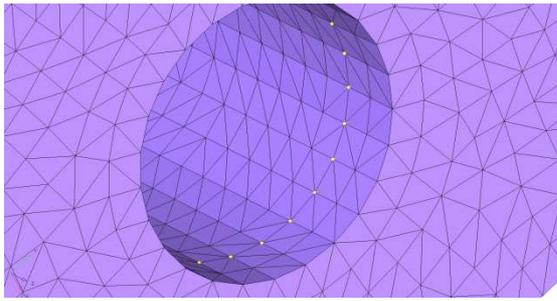


Abbildung 3.8: Knotenreihe am Durchmesser der Bohrung

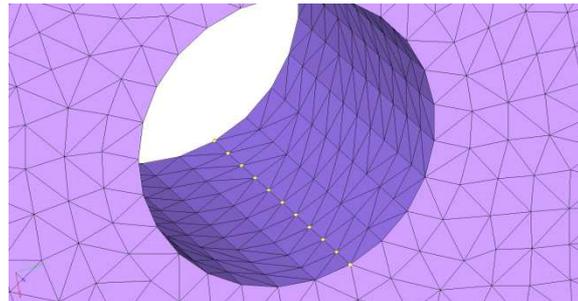


Abbildung 3.9: Knotenreihe in Achsrichtung der Bohrung

Das größte Problem stellt sich aber früher: Wenn nun auf Seite A ein Knoten ausgewählt worden ist, von dem aus die Knotenreihe starten soll, woher soll das Programm wissen zu welchem Knoten auf Seite B verbunden werden soll? Dazu ist kein Ansatz vorhanden und eine manuelle Eingabe wäre hier notwendig. Wenn nun der Durchmesser der Bohrung durch 15 Knoten beispielsweise beschrieben wird, müsste der Benutzer 30 Eingaben (für eine Knotenreihe müssen mit der *-bypath* Funktion 2 Knoten ausgewählt werden) an dieser Stelle machen. Dieser Lösungsansatz ist daher nicht akzeptabel!

Ein anderer Ansatz wäre über die *-byplane* Funktion in Hypermesh zu gehen. Diese Funktion könnte alle Knoten auf einer beliebigen Ebene ansprechen. Nimmt man eine Ebene, die senkrecht zur Bohrungsachse liegt, könnte man automatisch alle Knoten auf einer Höhe ansprechen. Die Idee ist nun, diese Ebene schrittweise durch die Bohrung laufen zu lassen (Abbildung 3.10). Mit jedem Schritt werden alle Knoten auf gleicher Höhe selektiert und mit dem Mittelpunkt der Bohrung durch Beam-Elemente verbunden. Im nächsten Schritt wird, wie im vorhergehenden Schritt, eine Spinne erzeugt. Zusätzlich wird nun noch ein Feder-Element zwischen den Mittelpunkten der zuletzt erzeugten Spinnen generiert. Um die Spinnen generieren zu können, müsste man vorher noch die Schrittweite automatisch errechnen lassen. Denn wenn diese Schrittweite falsch errechnet wird, könnte es passieren, dass die Ebene genau zwischen zwei Knotenreihen liegt. Es werde dann entweder kein Knoten oder alle Knoten dieser zwei Knotenreihen angesprochen. Dies wäre abhängig von der Toleranz der Funktion. Bei der *-byplane* Variante müsste man zusätzlich drauf achten, dass auch wirklich nur die Knoten innerhalb der Bohrung von der Ebene angesprochen werden und keine, die sich auf gleicher Höhe im Solid befinden.

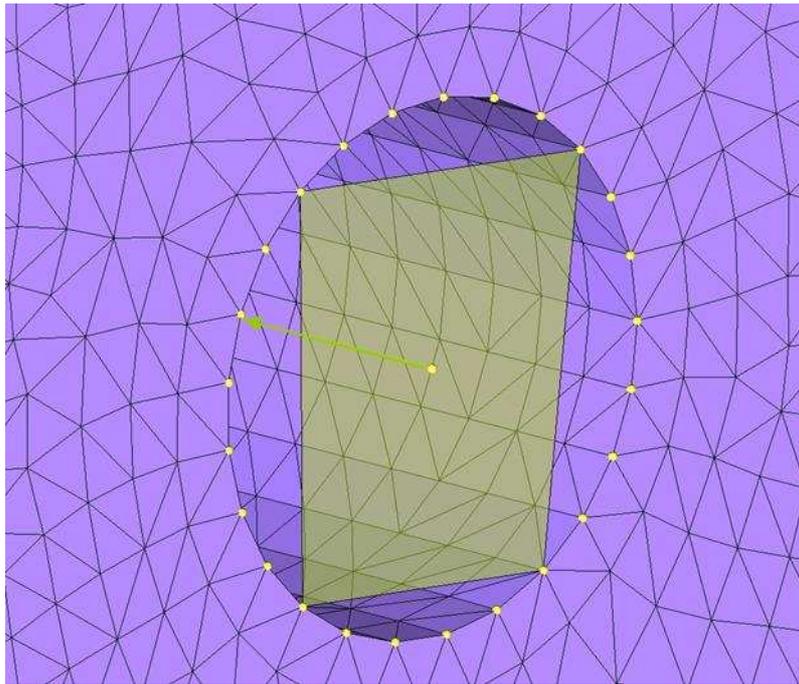


Abbildung 3.10: Ebenen-Durchlauf in der Bohrung

Um also die Information der Schrittweite der Ebene zu bestimmen, benötigt man die Gesamtzahl der Knoten in der Bohrung, die Zahl der Knoten einer Knotenreihe über den Bohrungsumfang und die Gesamtlänge der Bohrung. Diese Schrittweite wird in folgender Formel zusammengefasst:

$$s = \frac{n_{\text{Knoten,Umfang}}}{n_{\text{Knoten,gesamt}}} \cdot L \quad (27)$$

Dies ist die Weglänge pro Ebenen-Schritt.

Die Gesamtzahl an Knoten kann schnell ermittelt werden. Wie im Kapitel zuvor werden durch die *-byface* Funktion alle Elemente und damit alle Knoten in der Bohrung ermittelt. Die Gesamtlänge der Bohrung könnte man durch die Ermittlung der beiden Bohrungsmittelpunkte der beiden Bohrungsränder bestimmen. Diese müssten noch automatisch erkannt werden. Bleibt noch die Knotenanzahl auf dem Durchmesser. Diese könnte man mit der Hypermesh-funktion *-findedges* bestimmen. Damit würde Hypermesh die Bohrungsränder durch Plot-Elemente markieren. Nun können alle Knoten gefunden werden, die zu diesen Plot-Elementen gehören. Sind diese nun abgespeichert, können mit diesen Knoten die oben erwähnten Mittelpunkte der Bohrungsränder ermittelt werden. Nun wäre die Länge der Bohrung, die Gesamtanzahl der Knoten, die Knoten am Durchmesser und somit die Schrittweite der Ebene definiert.

Dieser Lösungsansatz soll im Weiteren in TCL realisiert werden.

3.2.2 Realisierung des Programms

Das Programm startet mit einer manuellen Abfrage. Es soll ein Face-Element innerhalb einer Bohrung markiert werden (Programmablaufplan in Abbildung 3.13, Punkt [1]). Ist kein Face vorhanden, wird das Programm mit einer Fehlermeldung abbrechen. An dieser Stelle können nun mehrere Bohrungen angewählt werden, die nacheinander abgearbeitet werden sollen (PAP [2]). Nun wird das erste der angewählten Bohrungselemente markiert und in einer Variablen abgespeichert. Mit dem Befehl

```
*appendmark elems 1 "by face" $bore_elem
```

werden nun alle Tria-Elemente des Faces markiert und unter einem Array gespeichert. Nun können alle Knoten, die den Tria-Elementen angehören, durch den Befehl

```
*findmark elements 1 1 1 nodes 0 2
```

gefunden und abgespeichert werden. Durch Ausgeben der Größe des Arrays, bekommen wir die Anzahl der Knoten. Für die Schrittweite benötigen wir nun noch die Knotenzahl am Umfang und die Länge der Bohrung. Zur Ermittlung der Knoten am Umfang, werden zunächst durch den Befehl `*findedges elements 1 0` die Kanten der Bohrung durch Plot-Elemente markiert und anschließend unter dem Array `$edgeelems` gespeichert. Dieses Array beinhaltet nun die Plot-Elemente beider Bohrungskanten. Um die Mittelpunkte und die Anzahl der Knoten an diesen Elementen bestimmen zu können, muss nun zwischen den Plotelementen unterschieden werden. Sie müssen in zwei Arrays aufgeteilt werden. Ein Array für jeden Bohrungsrand. Das Array mit allen Plotelementen beinhaltet die Elementidentifikationsnummern. Die einfachste Lösung wäre dieses Array zu halbieren und die eine Hälfte in Array A und die andere Hälfte in Array B speichern. Das Problem dabei ist, dass das Array scheinbar willkürlich befüllt wird. Anhand der Identifikationsnummern kann man nicht unbedingt darauf schließen zur welcher Seite die Elemente gehören. Dazu müsste man wissen nach welchem Algorithmus Hypermesh vernetzt. Dieses Wissen ist nicht vorhanden und das Problem muss anders gelöst werden. Dazu wird zunächst das erste Element aus dem Array `$edgeelems` markiert. Nun startet eine *while-Schleife*. In dieser Schleife werden nun alle Elemente markiert, die an diesem Plot-Element grenzen und unter dem Array `$VAR` gespeichert. Dieser Befehl markiert aber auch die Tetraederelemente, die an dem markierten Plot-Element grenzen. Wie in der Abbildung 3.11 zu sehen, grenzen im ersten Durchlauf an einem Plot-Element zwei weitere Plot-Elemente (Plot-Elemente werden in Hypermesh in der Regel rot markiert). Mit dem Wissen, dass die Plot-Elemente zeitlich nach den Tetraederelementen erzeugt worden sind und deswegen eine höhere Identifikationsnummer haben, werden die Plotelemente in einem sortierten Array (Standardfall) im letzten Abschnitt des Arrays platziert sein. Es werden also im ersten Durchlauf die letzten drei Stellen des Arrays (das Ausgangs-Plot-Element und beide benachbarten Plot-Elemente) herausgeschnitten und erneut unter `$VAR` abgespeichert (überschrieben). Nun wird das erste Element des neuen Arrays geprüft, ob es ein Plot-Element ist. Wäre dies nicht der Fall, würde die Schleife beendet werden. Am Ende der Schleife werden alle bisherigen Plot-Elemente markiert und die Schleife wird erneut durchlaufen. Nun sind drei Plot-Elemente der Ausgangswert. Hier können wieder nur 2 weitere Plot-Elemente gefunden werden. Dieser Prozess geht solange weiter, bis alle Plot-Elemente der Kante ermittelt worden sind. Zu diesem Zeitpunkt würde das Programm ein Tetraeder-Element mit ins neue Array überführen. Da dieses Element eine niedrigere Elementidentifikationsnummer als die Plot-Elemente hat, würde dies am Anfang des Arrays stehen. An dieser Stelle wird nach jedem Durchgang geprüft, was für ein Elementtyp sich hier befindet. Da es sich nun um ein Tetraeder-Element handelt, bricht die Schleife ab. Der erste Wert des Arrays wird gelöscht

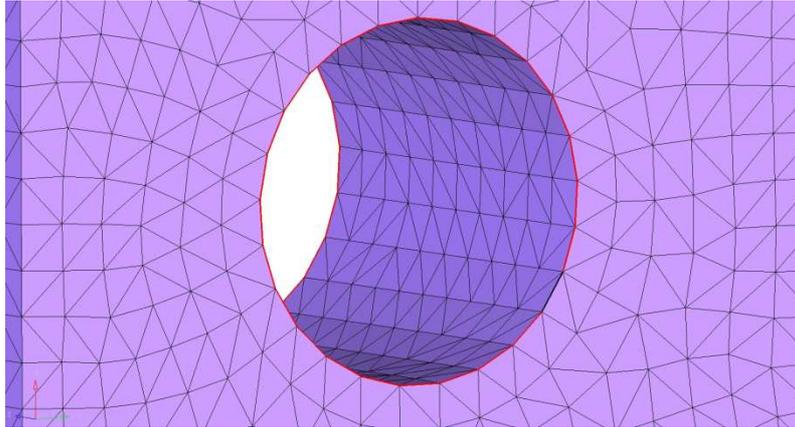


Abbildung 3.11: Plotelemente an den Bohrungskanten

(der Tetraedereintrag). Zusätzlich wird noch die zweite Arrayposition überprüft. Nun sind alle Plot-Elemente einer Kante gespeichert. Nun können erneut mit dem Befehl

```
*findmark elements 1 1 1 nodes 0 2
```

alle Knoten an den Plot-Elementen gefunden werden und damit hätte man auch die Knotenzahl am Durchmesser.

Um alle Knoten der anderen Kante zu ermitteln, brauch der Vorgang der ersten Kante nicht wiederholt werden. Stattdessen wird das Array mit allen Plot-Elementen mit dem Array verglichen, das gerade erstellt worden ist. Alle Identifikationsnummer-Einträge, die nicht in dem gerade erstellten Array vorkommen, gehören zwangsweise zur anderen Kante. Da nun die Knoten beider Kanten ermittelt worden sind, können die beiden Kreismittelpunkte der Bohrungskanten erstellt werden. Zwischen diesen beiden neu erzeugten Knoten, kann nun ein Vektor gespannt werden. Der Betrag dieses Vektors spiegelt die Bohrungslänge wieder. Es sind nun alle Informationen vorhanden, um die Schrittweite der Ebene berechnen zu können (Formel 27).

Wie bereits erwähnt, könnte es mit der Ebenen-Lösung zu Problemen kommen, dass Knoten markiert werden, die auf der Ebene aber nicht in der Bohrung liegen. Dies kann nur vorgebeugt werden, indem das Programm alle Knoten des Modells ausblendet ausgenommen von den Bohrungsknoten.

Der zentrale Befehl, der für die Ermittlung der Knoten auf eine Ebene zuständig ist, lautet

```
*createmark nodes 1 "on plane" $xstep $ystep $zstep $normalX $normalY $normalZ $toleranz 1 1
```

Dieser Befehl benötigt sieben Eingaben, um zu funktionieren. Dies sind zum einen die Koordinaten eines Punktes (x_{step} y_{step} z_{step}) und ein Normalenvektor ($normalX$ $normalY$ $normalZ$). Die Ebene ist dadurch vollständig definiert. Der letzte Eintrag, der gefüllt

werden muss ist die Toleranz. Diese wird auf $\frac{s}{4}$ festgelegt.

Nun wird eine *for-Schleife* gestartet (PAP [4]). In dieser Schleife werden mit jedem Durchlauf alle Knoten der aktuellen Ebene markiert und durch Beam-Elemente mit dem Mittelpunkt verbunden. Die Mittelpunktidentifikationsnummer wird in einem Array gespeichert (mas_nodes). In jedem weiteren Durchlauf werden nur die Koordinaten x_{step} , y_{step} und z_{step} verändert. Der neue Punkt liegt erneut auf der Bohrungsschse und ist um den Betrag s verschoben.

Ist die Schleife beendet, sind alle Beam-Spinnen erzeugt. Sie müssen nun noch durch Feder-Elemente miteinander verbunden werden. Dazu werden die zuvor abgespeicherten Mittelpunkte aus `mas_nodes` miteinander durch Federelemente verbunden. Das Ergebnis ist in der Abbildung 3.12 zu sehen.

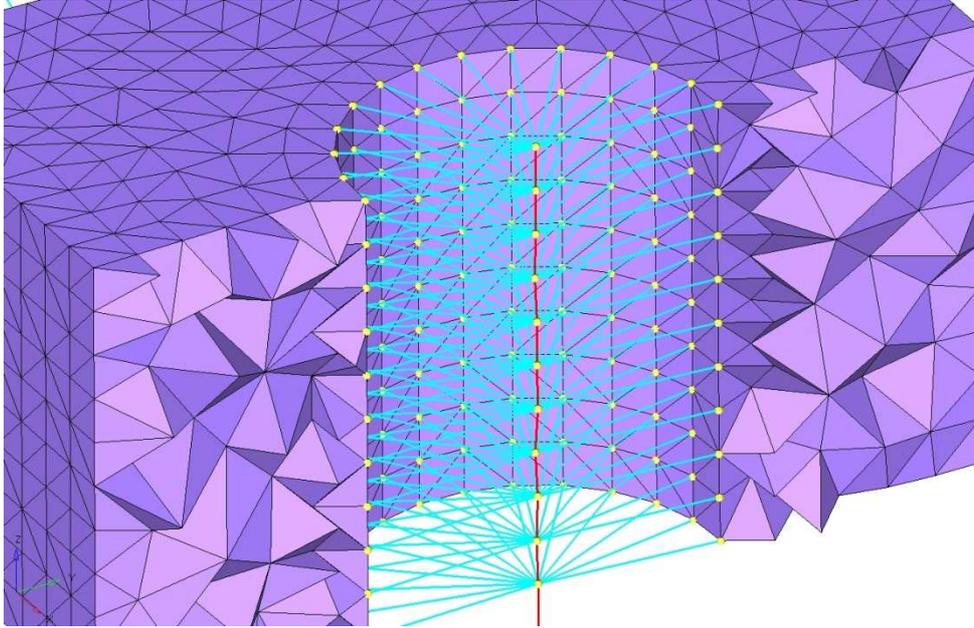


Abbildung 3.12: Programmresultat für die Orthogonalspinne

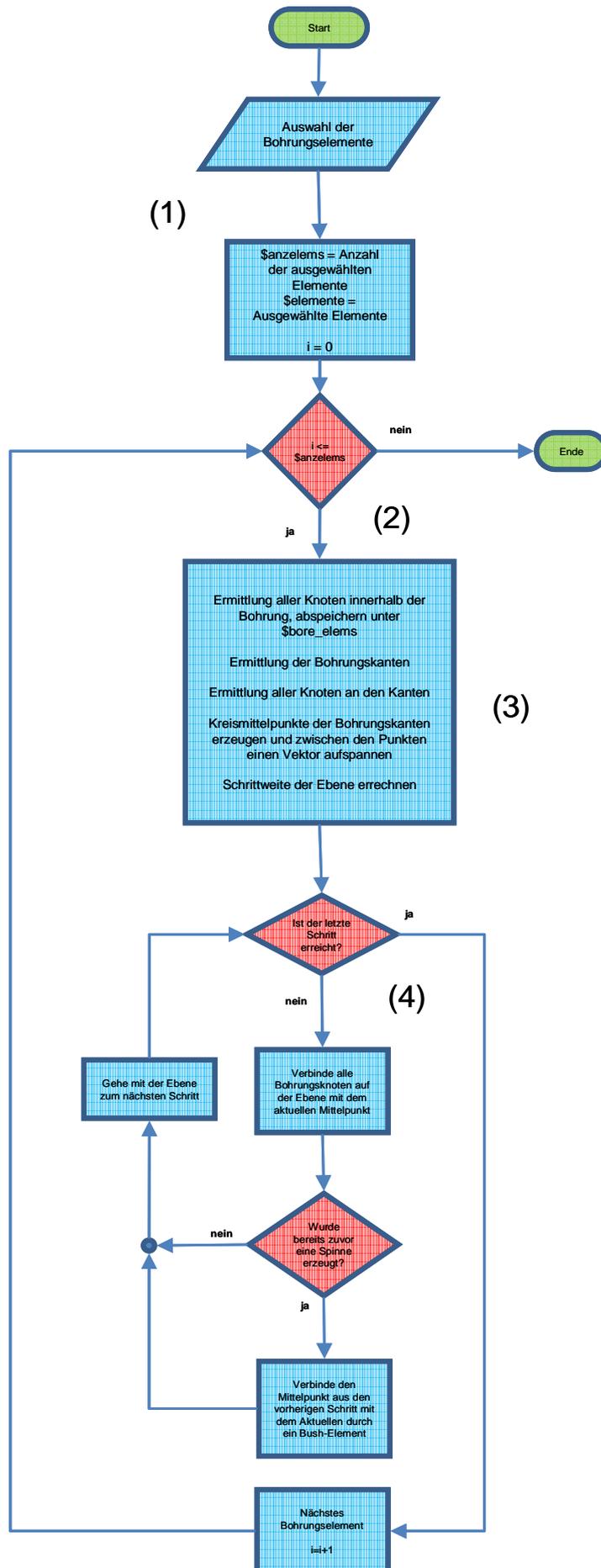


Abbildung 3.13: Programmablaufplan zur Erzeugung von Orthogonalspinnen

3.3 Bolzen-Steifigkeitsbestimmung

Um ein realitätsnahes Abbild in der FEM erzeugen zu können, kann man es oft nicht vermeiden detailgetreu zu modellieren. Um eine Niet- und/oder Schraubverbindung zu simulieren, kann auf sogenannte Feder-Elemente zurückgegriffen werden. Damit diese Elemente die Schraube oder den Niet realitätsnah simulieren können, müssen den Elementen die richtigen Eigenschaften zugewiesen werden. Mit Hilfe der Huth-Formel kann man die Federeigenschaft der Elemente bestimmen. Dies ist aber meist ein sehr aufwendiger Prozess, da für alle Verbindungspartner die Bauteildicke und das E-Modul bestimmt werden müssen. Ist ein Kohlefaserverbundstoff an der Verbindung beteiligt, bedarf es zusätzliche Arbeit zur Bestimmung des E-Moduls des Mehrschichtverbundes mit Hilfe der klassischen Laminattheorie. Zusätzlich erhöht die große Anzahl an Verbindungselementen in vielen Modellen den Arbeitsaufwand enorm.

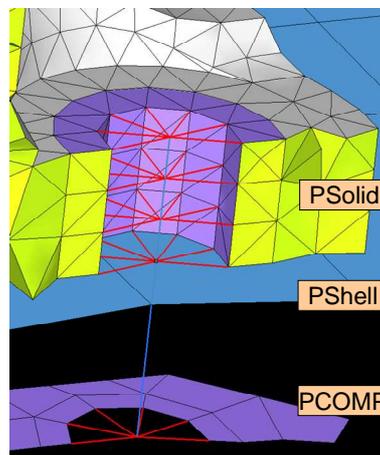


Abbildung 3.14: Beispiel einer Zweischnittigen Verbindung

In der Abbildung 3.14 sieht man einen Schnitt durch eine zweischnittige Verbindung. Diese Verbindung besteht aus einer Komponente mit Solid-Eigenschaften, und zwei 2D-Komponenten, welche einmal Shell- und einmal Laminat-Eigenschaften besitzen. Man sieht im Bild deutlich, wie die Fügepartner mit den Feder-Elementen verbunden sind. Sowohl das Solid, als auch die unterste 2D-Komponente werden mittels Beam-Spinnen verbunden (rot). Das mittlere Bauteil teilt sich dagegen den gleichen Knoten mit dem Feder-Element (blau).

Der Vorgang der Steifigkeitsbestimmung dieser Feder-Elemente wiederholt sich bei jedem Niet. Es bietet sich daher an, diesen Vorgang zu automatisieren, um sowohl einen zeitlichen Vorteil zu gewinnen, als auch manuelle Fehleingaben ausschließen zu können.

Im Folgenden wird ein Tool vorgestellt, das diese Punkte gewährleisten soll und Bestandteil dieser Arbeit ist.

3.3.1 Vorgehensweise

Die Grundidee ist, dass der Benutzer einen Knoten am Feder-Element auswählt und das Programm startet. Das Programm soll von Knoten zu Knoten der Feder-Elemente springen und sich die Eigenschaften der umliegenden Komponente ermitteln, die sich den aktuellen Knoten mit dem Feder-Element teilt. Ist ein Solid an der Verbindung beteiligt, wird dieser immer mittels Beam-Elementen mit dem Feder-Element verbunden. Das Programm soll dies erkennen,

sich den 2. Knoten eines Beam-Elementes suchen, und die Propertycard des Solids auslesen. Beim Solid lässt sich dort lediglich die Materialidentifikationsnummer auslesen. Mit dieser Information kann das E-Modul aus der Materialkarte ausgelesen werden.

Die Dicke des Bauteils lässt sich weder aus der Propertycard, noch aus der Materialkarte auslesen. Programm muss also nebenbei die Feder-Längen aufaddieren, bis das Solid endet. Es könnte aber auch vorkommen, dass Schalen-Elemente mittels Beam-Elementen am Federelement befestigt sind. Hier muss das Programm zwischen einem Solid- und einem Shell-Element am Beam-Element unterscheiden können. Die Kombinationen aus Abbildung 3.15 müssen abgedeckt sein. Hierbei markiert der grüne Pfeil den Ausgangsknoten von dem das Programm den Ablauf starten soll. Die blauen Linien stellen die Feder-Elemente dar und die roten Linien die Beam-Elemente. In jeder der 6 Kombinationsmöglichkeiten ist die dritte Schicht optional, da das Programm sowohl Einschnittigkeit, als auch Zweischnittigkeit beherrschen und unterscheiden muss. Bei jeder Kombination muss damit gerechnet werden, dass auch 2D-Komponenten über Beam-Elementen mit dem Feder-Element verbunden sein könnten.

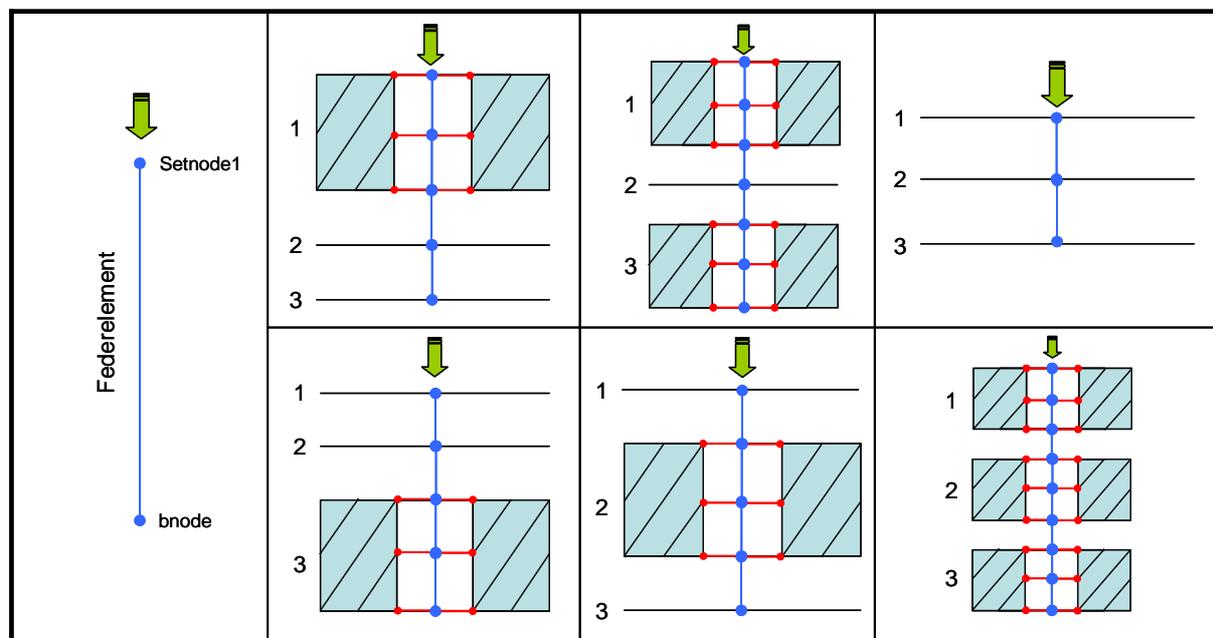


Abbildung 3.15: Verbindungsvarianten

Aus diesen Überlegungen entsteht die Kernfunktion des Programms, die in dem Programmablaufplan (Abbildung 3.16) dargestellt wird.

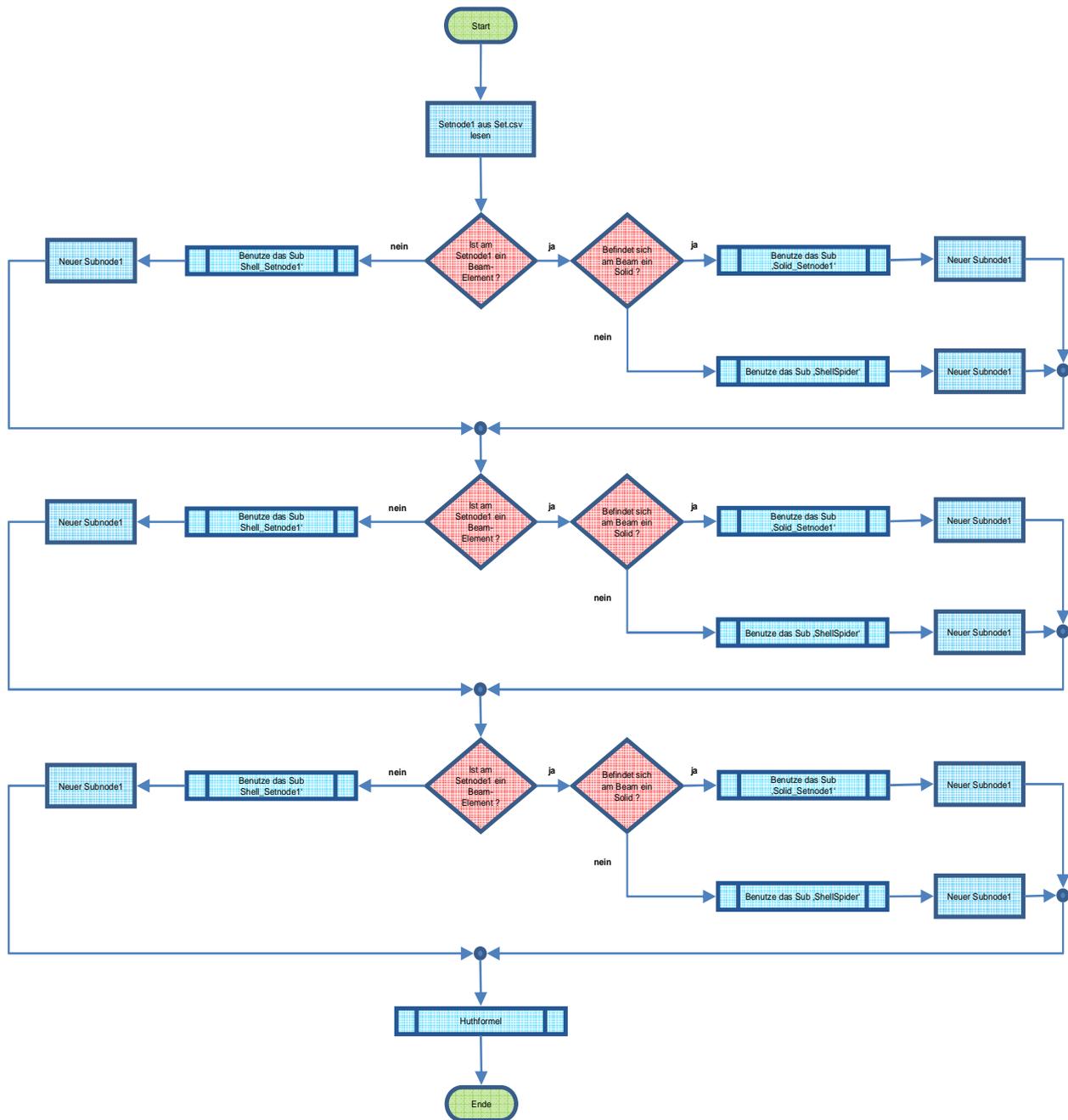


Abbildung 3.16: Kernfunktion des Programms zur Steifigkeitsbestimmung

Diese Kernfunktion durchläuft drei Mal die gleichen Abfragen. Hinter jedem Durchlauf steht einer der drei Fügepartner. Bei zwei Fügepartnern müsste der dritte Ablauf durch eine Abbruchfunktion abgefangen werden. Wie oben schon angedeutet wird zunächst gefragt, ob sich ein Beam-Element am Ausgangsknoten befindet. Ist dies der Fall, bleibt noch zu klären, ob sich Tetraederelemente oder Quadelemente am Ende des Beams befinden. Es wird daraufhin die entsprechende Funktion ausgeführt. Wird die Frage nach einem Beam negativ beantwortet, kommt nur noch eine 2D-Komponente in Frage. Hier wird die Funktion ‚Shell_Setnode1‘ gestartet. Jeder dieser Funktionen hat als Ausgabewert den letzten Knoten des durchlaufenden Federelementes. Beim Solid können hier mehrerer Federelemente durchlaufen werden. Dies ist abhängig von der Modellierungsgenauigkeit der Bohrung.

Nach allen Abfragen in den 2 bzw. 3 Abläufen, wird die Funktion zur Berechnung der Huthformel aufgerufen und mit den zuvor gewonnenen Bauteilinformationen gespeist.

3.3.2 Realisierung des Programms

Das Programm „Autohuth“ (aktuelle Version 1.1.0) startet als erstes mit der Überprüfung, ob die benötigten Dateien für alle weiteren Vorgänge existieren. Es muss eine Nastran Input-Datei (.bdf-Format) und eine oder mehrere csv-Datei/en mit den zu untersuchenden Feder-Knoten erstellt und in den gleichen Ordner kopiert werden, in dem die Perl-Datei „Autohuth“ liegt. Existieren die benötigten Dateien, wird damit angefangen die erste csv-Datei auszulesen. In dieser Datei ist der Setname der Knoten enthalten. Aus diesem Setnamen kann das Programm erkennen um was für eine Verbindung es sich handelt. Ist der Setname zum Beispiel BCTi4.83 bedeutet dies:

„Ein Titanschraube mit 4.83mm Nenndurchmesser, die unter anderem ein Laminat verbindet.“

Diese Setnamen sind nach folgendem Schlüssel aufgebaut (Tabelle 3.3):

Tabelle 3.3: Schlüssel für die Knoten-Setnamen

B	M	Ti	4.17
			4.83
R	C	Al	6.35
			7.94

B: Bolted (Verschraubt)

R: Riveted (Vernietet)

M: Metallverbindung

C: Ein Laminat ist an der Verbindung beteiligt (Composit)

Ti: Titan-Niet

Al: Aluminium-Niet

Dieser Schlüssel ist notwendig, um dem Programm notwendige Informationen (Faktoren) zu vermitteln, die später in der Huth-Formel benötigt werden. Hinter dem Buchstaben „R“ steht zum Beispiel der Faktor $a = 0,4$ (siehe Kapitel 1.3).

Nachdem der Setname interpretiert worden ist, liest das Programm sämtliche Geometrie- und Eigenschaftsinformationen aus der Nastran-Input-Datei (.bdf-Format) ein (PAP [1]) und speichert diese Informationen in Hashes (assoziative Arrays). In dem unten aufgeführten Beispiel ist ein solcher Hash abgebildet. Der Name des Hashes ist „grids“. Würde man nun in diesem Hash eine Knotenidentifikationsnummer eintragen, könnte man mit der entsprechenden Arrayposition die x-, y- oder z-Koordinate dieses Knotens bekommen.

```
$grids{$nodeID}[0]=$x
$grids{$nodeID}[1]=$y
$grids{$nodeID}[2]=$z
```

Beispiel:

```
$grids{1001}[2]
```

Ausgabe der z-Koordinate des Knotens mit der Identifikationsnummer ‚1001‘.

Die notwendigen Ausgangsdaten sind nun eingelesen und die eigentliche Programmprozedur kann beginnen. Diese liegt in einer foreach-Schleife. Die foreach-Schleife hat die Aufgabe alle Sets, die durchsucht werden sollen, nacheinander zu bearbeiten. Es folgt eine for-Schleife (PAP [2]) deren Durchläufe durch die Anzahl der zu untersuchenden Knoten in der „Set.csv“ festgelegt werden. Beinhaltet die Datei Set.csv drei Knoten (und damit drei zu untersuchende Niete/Schrauben), wird die for-Schleife auch drei Mal durchlaufen. Innerhalb dieser Schleife befindet sich eine weitere for-Schleife, die die Aufgabe hat die Schnittigkeit zu simulieren (PAP [3]). Da bei einer Zweischnittigkeit drei Fügepartner beteiligt sind, wird diese for-Schleife auch drei Mal durchlaufen. Hier wird gefragt, ob an dem aktuellen Knoten Beam-Elemente sind. Ist dies der Fall, muss noch unterschieden werden, ob diese zu einem Solid oder zu einer 2D-Komponente führen. Ist kein Beam-Element vorhanden muss ein 2D-Modell vorliegen. Es bleibt nur noch der Unterschied zwischen Shell- und Laminat-Eigenschaften zu klären. Wird eine der Abfragen positiv beantwortet, greift das Programm auf ein „Sub“ zu. (Ein Sub ist eine selbst programmierte Funktion.) Für den Fall, dass ein Solid gefunden wird, startet das Sub „Solid_Setnode1“. Als Eingabewert wird hier „Subnode1“ benutzt. Dies ist die Knotenidentifikationsnummer aus der zu untersuchenden Set.csv – Datei (der erste Ausgangsknoten).

Weiterer Programmablauf anhand eines Beispiels:

Schritt 1 (Abbildung 3.17):

Von diesem Ausgangsknoten („Setnode1“, grün) wird nun der zweite Knoten eines Beam-Elementes gesucht (orange). Nachdem dieser gefunden ist, wird geprüft, ob es sich an diesem Knoten um ein Tetraederelement oder ein Quadelement handelt. Es liegt hier ein Tetraederelement vor. Nun wird die Propertycard dieses Elementes ausgelesen. Diese enthält den Verweis auf die Materialidentifikationsnummer. Hier kann nun das benötigte E-Modul entnommen werden. Die Identifikationsnummer der Propertycard wird gespeichert, da diese im weiteren Verlauf wichtig sein wird, um zu prüfen, ob die im nächsten Schritt gefundene Identifikationsnummer gleich der gespeicherten ist. Dies ist die Abbruchbedingung der kommenden while-Schleife.

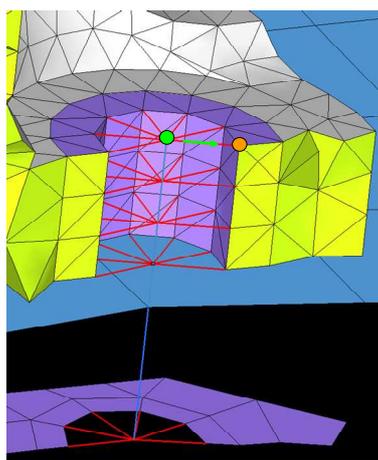


Abbildung 3.17: Programmablauf, Schritt 1

Schritt 2 (Abbildung 3.18):

In der nun aktiven While-Schleife wird der zweite Knoten des Feder-Elementes mit Hilfe eines Hashes ermittelt („bnode“, gelb). An diesem Knoten wird erneut ein Beam-Element gesucht, der zweite Knoten ermittelt und die Eigenschaft der anliegenden Komponente ermittelt. Ist diese Propertycard nun nicht mehr dieselbe wie aus dem vorherigen Schritt, wird die whi-

le-Schleife abgebrochen. In diesem Fall liegt aber wieder die gleiche Propertycard vor. Bevor das Programm die Schleife erneut durchläuft, wird der „bnode“ zum neuen „Setnode1“. Dieser Vorgang wird nun solange durchlaufen, bis am „bnode“ neue Eigenschaften auftreten. Während jedes Durchlaufs der Schleife wurden ein Vektor und dessen Länge zwischen dem aktuellen „Setnode1“ und dem „bnode“ berechnet. Nachdem eine andere Eigenschaft am „bnode“ des Feder-Elementes gefunden worden ist, wird die Länge des zuletzt berechneten Feder-Elementes wieder subtrahiert. Damit ist die Länge der Bohrung bestimmt. Über das Solid sind jetzt alle notwendigen Informationen vorhanden (Dicke, E-Modul).

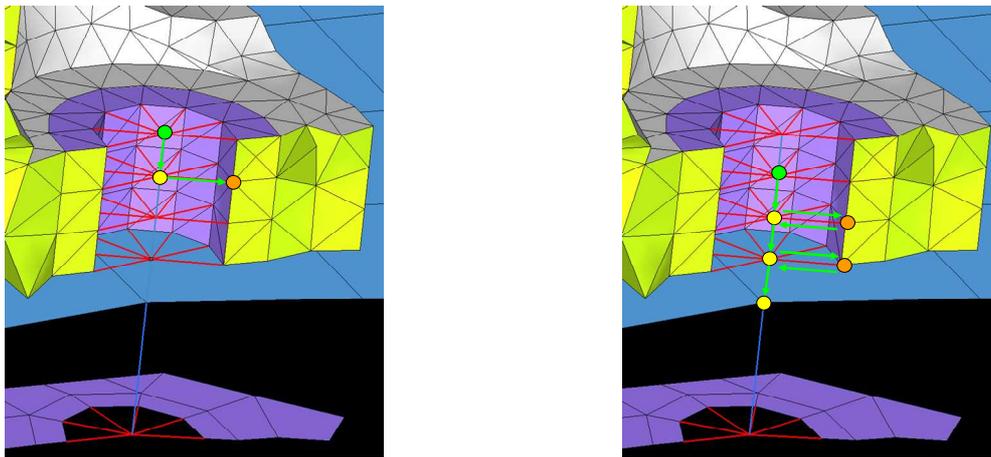


Abbildung 3.18: Programmablauf, Schritt 2

Schritt 3 (Abbildung 3.19):

Mit dem neuen „Setnode1“ an der 2D-Komponente, geht die for-Schleife in den zweiten Durchlauf. Es wird wieder geprüft, ob ein Beam-Element am Knoten grenzt. Dies ist nicht der Fall und somit fällt der Fall eines Solids oder einer 2D-Komponente mit Spinne weg. Bleibt nur noch die Möglichkeit, dass sich ein Quad-Element am Knoten befindet. Diese Abfrage wird positiv bestätigt und nun ruft das Programm das Sub „Shell_Subnode1“ auf. Dieses Sub kann sofort auf die Propertycard des Quad-Elementes zugreifen. An diesem Quadelement finden sich Shell-Eigenschaften. Aus der Propertycard entnimmt sich nun das Programm die Bauteildicke und (mithilfe der Materialidentifikationsnummer) das E-Modul. Im Anschluss wird der ‚bnode‘ bestimmt. Wäre die Verbindung einschnittig, würde sich kein weiterer ‚bnode‘ finden lassen und die for-Schleife würde keinen dritten Durchlauf starten. Der Wert für den ‚bnode‘ wäre leer und kann mit einer if-Abfrage abgefangen werden.

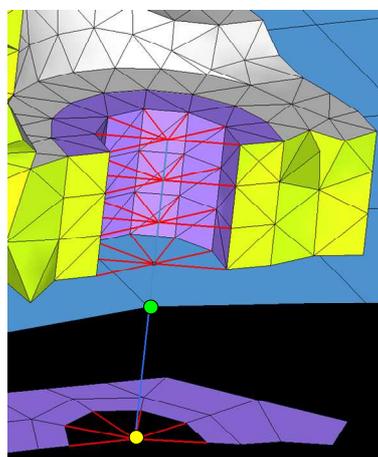


Abbildung 3.19: Programmablauf, Schritt 3

Schritt 4 (Abbildung 3.20):

Der dritte Durchlauf der for-Schleife startet mit einem neuen ‚Setnode1‘. Wieder werden Beam-Elemente erkannt und zwischen Tetraeder- und Quad-Elementen unterschieden. Hier findet sich nun ein Quadelement mit Lamineigenschaften (PCOMP). Das Programm wird nun auf den Sub ‚Laminat‘ zurückgreifen, welches die klassische Laminattheorie anwendet, um ein Gesamt-E-Modul über alle Lagen bestimmen zu können. Es werden zusätzlich alle Schichtdicken aufaddiert, um die Gesamtdicke zu ermitteln.

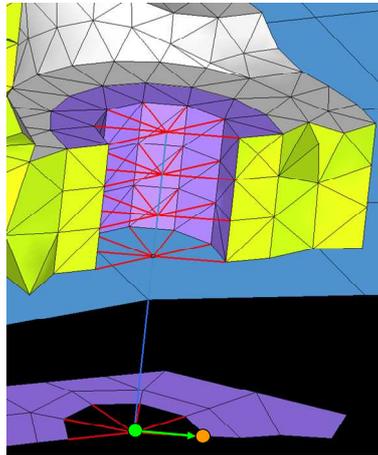


Abbildung 3.20: Programmablauf, Schritt 4

Nun sind alle notwendigen Informationen über die Verbindung bekannt und die Huthformel kann mit diesen Daten angewandt werden (Huthformel Kapitel 1.3). Dies geschieht, indem die Funktion ‚Huth‘ aufgerufen wird (PAP [4]). Die Funktion ist im Programm als ‚Sub‘ hinterlegt. Neben den aus dem Setnamen gewonnenen Faktoren für die Steifigkeitsberechnung, benötigt die Huthformel noch die Information von welcher Seite genietet bzw. geschraubt wird. Dies wird per Definition des Sets (Set.csv) erreicht. Alle dort enthaltenden Knoten sind auch gleichzeitig die Positionen der Nietköpfe bzw. Schraubenköpfe.

Nachdem die Niet-/Schraubensteifigkeit ermittelt worden ist, wird eine neue Propertycard für die Federelemente in eine separate Textdatei raus geschrieben zusammen mit den dazugehörigen Elementen, bei denen der Eigenschaftsverweis an die neu erstellte Propertycard angepasst worden sind. Da es sich um ein Nastran-Format handelt, wird als Federelement ‚CBUSH‘ verwendet.

Dies könnte wie folgt aussehen:

```
PBUSH 99912041 K78967.4 64231.4 64231.4 1000.0 600000.0600000.0
CBUSH 548527 999120411647775916477751
CBUSH 548528 999120411647775116477743
CBUSH 548529 999120411647774317013048
CBUSH 2270959 999120411701304817013050
CBUSH 2270960 999120411701305016477733
```

Der PBUSH-Eintrag ist die Federeigenschaft, die dem Niet/Schraube zugewiesen werden soll. Damit es für Nastran lesbar ist, muss ein bestimmtes Format eingehalten werden. Jede Information muss in einem Feld untergebracht werden, das maximal 8 Zeichen aufweisen kann.

In der Abbildung 3.21 sind diese 8er-Abschnitte aufgeführt an dem zuvor genannten Beispiel. Die Busheigenschaft (PBUSH) enthält insgesamt 9 Informationen. Die Federelemente sind unter CBUSH zu finden und haben 5 Einträge.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
PBUSH	99912041	K	78967.4	64231.4	64231.4	1000.0	600000.0	600000.0
CBUSH	548527	99912041	16477759	16477751				
CBUSH	548528	99912041	16477751	16477743				
CBUSH	548529	99912041	16477743	17013048				
CBUSH	2270959	99912041	17013048	17013050				
CBUSH	2270960	99912041	17013050	16477733				

Abbildung 3.21: Nastran-Eingabeformat

PBUSH:

Die 1 aus der Abbildung 3.21 sagt aus, um was es sich handelt. Je nachdem was hier steht, werden andere Informationen im Folgenden erwartet. In der 2. Spalte ist die Eigenschafts-Identifikationsnummer hinterlegt. Die 3. Spalte ist ein Indikator dafür, was nun in den folgenden Spalten kommt. Das ‚K‘ weist darauf hin, dass im Folgenden Steifigkeitsangaben kommen werden. Die nächsten sechs Einträge stellen die Steifigkeiten der 6 Freiheitsgrade dar. Diese Steifigkeiten beziehen sich auf das lokale Koordinatensystem des Bushelementes (Abbildung 1.4). [MSC Nastran Quick Reference Guide, 2008]

CBUSH:

Die 1. Spalte sagt das gleich wie bereits bei PBUSH beschrieben. In Spalte 2 ist die Element-identifikationsnummer des Federeslementes zu finden. Ein Verweis auf die Eigenschaften des Elementes findet sich in der Spalte 3. Spalte 4 und 5 enthalten die Identifikationsnummern der Bush-Knoten. In den restlichen Spalten wird die Orientierung des Elementes eingetragen, wenn dieses nach einem Knoten oder einem Vektor orientiert worden ist. [MSC Nastran Quick Reference Guide, 2008]

In der Abbildung 3.22 ist der vereinfachte Programmablaufplan des Programms zu sehen.

Damit sind die Steifigkeiten der Bolzenverbindung ermittelt und können ins Modell übertragen werden.

Zusammenfassung

Ziel der Arbeit „Automatisierter Aufbau von Finite-Element-Modellen zur Verbindung von Faserverbundbauteilen“ war eine Automatisierung von Laminat-Verbindungen. Dabei wurden Laminatübergänge und Bolzenverbindungen betrachtet.

Für die Laminatübergänge (oder auch Rampen genannt), sollte mit Hilfe von 2D- und 3D-Modellen das Dehnungsverhalten, bei Variation der Faserorientierung, untersucht werden. Der Hintergrund der ermittelten Daten war dabei zu helfen Entscheidungsmöglichkeiten für ein Perl-Programm zu schaffen, um einen optimalen Lagenaufbau der Rampe generieren zu können. Die gewählten Ansätze zur automatischen Bewertung der einzelnen Faserorientierungen in der Rampe führten zu keinen ausreichenden Ergebnissen. Dabei wurde allerdings ein neuer Ansatz entdeckt, der für zukünftige Versuche zu besseren Ergebnissen führen könnte.

Für die Automatisierung von Bolzenverbindungen wurden zwei Programme geschrieben, die verschiedene Modellierungsweisen dieser Verbindungen in Hypermesh realisieren können. Zusätzlich wurde ein Programm realisiert, das die Steifigkeit einer solchen Verbindung ermittelt, um die Bolzen mit angebrachten Eigenschaften versehen zu können.

Literaturverzeichnis

- [Abaqus Analysis User's Manual] Abaqus Analysis User's Manual
- [Airbus S.A.S, 2004] Airbus S.A.S. (2004). AM2207-Composite Stacking Rules.
- [Airbus] Airbus. Summary of Design Allowables for A350xwb composite materials.
- [Airbus, 2008] Airbus. (27. Oktober 2008). Technischer Report: Boxes load extraction and distribution for composite attachment profile unfolding sizing process-exportable version.
- [Altair] Altair. Hypermesh and Batchmesher Documentation.
- [Bergmann, 1992] Bergmann, H. (1992). *Konstruktionsgrundlagen von Faserverbundbauteilen*. Springer Verlag.
- [Herzog] Herzog, P. D. *Technische Universität Chemnitz*. Abgerufen am 14. Februar 2011 von http://www.tu-chemnitz.de/mathematik/part_dgl/teaching/SS2010_Numerik_von_PDEs/Beiblatt_Lagrange-Elemente.pdf
- [MSC Nastran Quick Reference Guide, 2008] MSC Nastran Quick Reference Guide. (2008).
- [Rückert, Airbus] Rückert, C. (Airbus).
- [Schürmann, 2005] Schürmann, H. (2005). *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer.
- [SFG Wershofen e.V] *SFG Wershofen e.V.* Abgerufen am 17. Februar 2011 von <http://www.sfg-wershofen.de/segelfluggeschichte.html>
- [Wissmann & Sarnes, 2006] Wissmann, J., & Sarnes, K. D. (2006). *Finite Elemente in der Strukturmechanik*. Springer Verlag.

Anlagen

Verzeichnis

Tabellen zu den 2-Schicht-Lagenkombinationen

Tabellen zum Lagendifferenzeneinfluss-Tabellen zu den 3-Schicht-Lagen-Kombinationen

Handout für das Programm Autohuth

Selbständigkeitserklärung

<i>Tabelle A- 1: max. Hauptdehnungsdifferenzen der ausgewerteten Elemente.....</i>	<i>i</i>
<i>Tabelle A- 2: max. Hauptdehnungsdifferenzen der ausgewerteten Elemente.....</i>	<i>ii</i>
<i>Tabelle B- 1: Fehlerindex-Element-Dehnungsdifferenz bei variablen Lagenanzahlen.....</i>	<i>iii</i>
<i>Tabelle B- 2: max. Hauptdehnungsdifferenz bei variabler Lagenanzahl</i>	<i>iv</i>
<i>Tabelle B- 3: min. Hauptdehnungsdifferenz bei variabler Lagenanzahl</i>	<i>iv</i>
<i>Tabelle B- 4: Dehnungsdiagramme, Dehnungen in Abhängigkeit zu der Lagendifferenz von Laminat und B</i>	<i>v</i>
<i>Tabelle C- 1: max. Hauptdehnungen bei einer 3-Schicht-Kombination, Zug.....</i>	<i>vi</i>
<i>Tabelle C- 2: min. Hauptdehnungen bei einer 3-Schicht-Kombination, Zug.....</i>	<i>vii</i>
<i>Tabelle C- 3: Fehlerindex bei einer 3-Schicht-Kombination, Zug</i>	<i>viii</i>
<i>Tabelle C- 4: max. Hauptdehnungen bei einer 3-Schicht-Kombination, Schub.....</i>	<i>ix</i>
<i>Tabelle C- 5: main Hauptdehnungen bei einer 3-Schicht-Kombination, Schub.....</i>	<i>x</i>
<i>Tabelle C- 6: Fehlerindex bei einer 3-Schicht-Kombination, Schub</i>	<i>xi</i>

Tabellen zu den 2-Schicht-LagenKombinationen

Tabelle A- 1: max. Hauptdehnungsdifferenzen der ausgewerteten Elemente

Pmajor Legendifferenz		Laminat B															
8049 - 10981; Zug		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°
Laminat A	0°/0°	0	-194	-360	-148	-2434	-6041	-4483	-5989	-2309	-4479	-3891	-3092	-1618	-4358	-733	-5369
	0°/90°		0	603	-32	-2246	-5863	-3984	-6201	-1922	-4005	-2972	-2256	-1652	-4382	-866	-5840
	0°/45°			0	6	-2667	-6566	-4989	-6261	-2530	-4896	-4079	-3326	-2250	-5118	-2667	-5884
	0°/-45°				0	-1269	-4699	-3535	-4957	-1566	-4249	-3440	-2872	309	-2245	-291	-4348
	90°/0°					0	-3584	-2835	-2938	1461	-589	-1007	1376	7	-2692	650	-3100
	90°/90°						0	340	1194	5257	3139	2781	5626	3285	617	2994	908
	90°/45°							0	1	4715	2507	2282	4332	2252	-846	619	-525
	90°/-45°								0	4371	1934	2129	4915	3159	1033	3092	285
	45°/0°									0	-2548	-3188	-959	-4	-2017	-742	-2401
	45°/90°										0	-852	1784	2010	-1	235	-66
	45°/45°											0	1730	2402	65	611	0
	45°/-45°												0	736	-239	0	-612
	-45°/0°													0	-2546	-123	-3115
	-45°/90°														0	3369	-253
	-45°/45°															0	-1729
	-45°/-45°																0

Pmajor Legendifferenz		Laminat B																
9234 - 12242; Zug		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°	
Laminat A	0°/0°	0	-198	-303	-306	-2446	-6041	-5450	-5436	-1997	-4402	-4704	-2705	-2008	-4407	-2733	-4696	
	0°/90°		0	-115	-108	-2246	-5828	-5060	-5033	-1834	-4263	-4441	-2083	-1842	-4264	-2120	-4422	
	0°/45°			0	9	-2251	-5865	-5027	-5349	-1541	-3814	-4139	-2264	-2102	-4622	-2602	-4883	
	0°/-45°				0	-2261	-5879	-5369	-5027	-2106	-4626	-4906	-2605	-1573	-3846	-2298	-4138	
	90°/0°					0	-3589	-2908	-2907	270	-2094	-2245	47	285	-2071	53	-2225	
	90°/90°						0	741	734	3802	1381	1181	3523	3829	1414	3563	1211	
	90°/45°								0	1	3695	1252	922	3551	2777	262	2354	188
	90°/-45°									0	2753	237	148	2291	3711	1263	3561	947
	45°/0°										0	-2556	-3011	-646	2	-2259	-837	-2362
	45°/90°											0	-527	2236	2262	0	1389	2
	45°/45°												0	2338	2354	-3	1198	0
	45°/-45°													0	837	-1391	0	-1198
	-45°/0°														0	-2556	-664	-3017
	-45°/90°															0	2197	-539
	-45°/45°																0	-2338
	-45°/-45°																	0

Pmajor Legendifferenz		Laminat B																
9016 - 12006; Zug		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°	
Laminat A	0°/0°	0	-194	-148	-360	-2434	-6041	-5989	-4483	-1618	-4358	-5369	-733	-2309	-4479	-3092	-3891	
	0°/90°		0	-32	603	-2246	-5863	-6201	-3984	-1652	-4382	-5840	-866	-1922	-4005	-2256	-2972	
	0°/45°			0	-43	-1269	-4699	-4957	-3535	309	-2245	-4348	-291	-1566	-4249	-2872	-3440	
	0°/-45°				0	-2667	-6566	-6261	-4989	-2250	-5118	-5884	-2667	-2530	-4896	-3326	-4079	
	90°/0°					0	-3584	-2938	-2835	7	-2692	-3100	650	1461	-589	1376	-1007	
	90°/90°						0	1194	340	3285	617	908	2994	5257	3139	5626	2781	
	90°/45°								0	-2	3159	1033	285	3092	4371	1934	4915	2129
	90°/-45°									0	2252	-846	-525	619	4715	2507	4332	2282
	45°/0°										0	-2546	-3115	-123	16	-2433	-680	-2091
	45°/90°											0	-253	3369	2458	1	2856	1141
	45°/45°												0	2741	2128	-1140	1539	0
	45°/-45°													0	709	-2850	0	-1538
	-45°/0°														0	-2548	-959	-3188
	-45°/90°															0	1784	-852
	-45°/45°																0	-2741
	-45°/-45°																	0

Tabelle A- 2: max. Hauptdehnungsdifferenzen der ausgewerteten Elemente

Pminor		Laminat B																
Lagendifferenz		Laminat B																
8049 - 10981; Zug		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°	
Laminat A	0°/0°	0	-21	279	48	-21	0	473	239	121	337	305	55	51	422	-578	770	
	0°/90°		0	-283	112	0	15	-128	308	130	314	-177	-443	71	407	-1222	819	
	0°/45°			0	-5	-72	-50	175	223	140	316	346	219	244	593	103	893	
	0°/-45°				0	-253	-226	281	167	26	326	334	387	-856	-457	-723	539	
	90°/0°					0	27	509	234	238	384	441	306	278	652	-772	1113	
	90°/90°						0	488	157	309	543	643	521	381	765	150	1184	
	90°/45°							0	-1	369	620	641	644	393	874	747	1094	
	90°/-45°								0	-179	113	111	193	-840	-467	-952	442	
	45°/0°									0	310	721	333	0	215	338	514	
	45°/90°										0	533	57	-215	0	569	320	
	45°/45°											0	-100	-515	-320	83	0	
	45°/-45°												0	-341	-569	0	-83	
	-45°/0°													0	312	283	559	
	-45°/90°														0	-148	297	
	-45°/45°															0	99	
-45°/-45°																0	0	

Pminor		Laminat B																
Lagendifferenz		Laminat B																
9234 - 12242; Zug		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°	
Laminat A	0°/0°	0	-3	145	147	-3	0	294	295	132	439	502	44	135	440	56	500	
	0°/90°		0	168	162	0	6	310	304	155	477	613	32	160	479	67	613	
	0°/45°			-1	-9	-125	-104	173	219	-99	226	390	-4	219	545	7	588	
	0°/-45°				-1	-125	-104	217	174	221	547	593	1	-87	236	7	388	
	90°/0°					0	6	273	275	260	573	656	131	262	573	147	654	
	90°/90°						0	260	263	282	595	701	190	281	592	199	696	
	90°/45°							0	0	-214	121	297	-258	172	493	148	544	
	90°/-45°								0	179	501	556	158	-203	131	-236	300	
	45°/0°									0	313	425	34	0	240	50	298	
	45°/90°										0	175	-269	-241	0	-81	77	
	45°/45°											0	-296	-295	-77	-106	0	
	45°/-45°												0	-49	81	0	106	
	-45°/0°													0	313	36	427	
	-45°/90°														0	-260	178	
	-45°/45°															0	296	
-45°/-45°																0	0	

Pminor		Laminat B																
Lagendifferenz		Laminat B																
9016 - 12006; Zug		0°/0°	0°/90°	0°/45°	0°/-45°	90°/0°	90°/90°	90°/45°	90°/-45°	45°/0°	45°/90°	45°/45°	45°/-45°	-45°/0°	-45°/90°	-45°/45°	-45°/-45°	
Laminat A	0°/0°	0	-21	48	279	-21	0	239	473	51	422	770	-578	121	337	55	305	
	0°/90°		0	112	-283	0	15	308	-128	71	407	819	-1222	130	314	-443	-177	
	0°/45°			0	42	-253	-226	167	281	-856	-457	539	-723	26	326	387	334	
	0°/-45°				0	-72	-50	223	175	244	593	893	103	140	316	219	346	
	90°/0°					0	27	234	509	278	652	1113	-772	238	384	306	441	
	90°/90°						0	157	488	381	765	1184	150	309	543	521	643	
	90°/45°							0	1	-840	-467	442	-952	-179	113	193	111	
	90°/-45°								0	393	874	1094	747	369	620	644	641	
	45°/0°									0	312	559	283	-1	259	223	390	
	45°/90°										0	297	-148	-260	0	-194	4	
	45°/45°											0	-348	-397	-4	-50	0	
	45°/-45°												0	-227	193	0	50	
	-45°/0°													0	310	333	721	
	-45°/90°														0	57	533	
	-45°/45°															0	348	
-45°/-45°																0	0	

Tabellen zum Lagendifferenzeneinfluss

Tabelle B- 1: Fehlerindex-Element-Dehnungsdifferenz bei variablen Lagenanzahlen

Fehlerindex-Differenz zwischen den Elementen 8069-10981		Laminat B, Lagenanzahl								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Laminat A, Lagenanzahl	2	0.0000	0.8817	1.1873	1.3318	1.4141	1.4671	1.5044	1.5323	1.5541
	3	-0.8823	0.0000	0.2948	0.4276	0.4989	0.5421	0.5706	0.5908	0.6058
	4	-1.1885	-0.2950	0.0000	0.1304	0.1987	0.2388	0.2644	0.2819	0.2944
	5	-1.3335	-0.4279	-0.1304	0.0000	0.0675	0.1066	0.1311	0.1474	0.1589
	6	-1.4161	-0.4994	-0.1988	-0.0676	0.0000	0.0388	0.0628	0.0786	0.0895
	7	-1.4693	-0.5427	-0.2390	-0.1067	-0.0388	0.0000	0.0239	0.0395	0.0501
	8	-1.5067	-0.5714	-0.2647	-0.1312	-0.0628	-0.0239	0.0000	0.0155	0.0260
	9	-1.5347	-0.5916	-0.2822	-0.1476	-0.0787	-0.0395	-0.0155	0.0000	0.0105
	10	-1.5566	-0.6067	-0.2948	-0.1590	-0.0896	-0.0502	-0.0260	-0.0105	0.0000

Fehlerindex-Differenz zwischen den Elementen 9234-12242		Laminat B, Lagenanzahl								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Laminat A, Lagenanzahl	2	0.0000	0.8956	1.1984	1.3313	1.3987	1.4359	1.4577	1.4709	1.4790
	3	-0.8950	0.0000	0.3096	0.4495	0.5231	0.5656	0.5919	0.6089	0.6203
	4	-1.1971	-0.3094	0.0000	0.1414	0.2167	0.2610	0.2888	0.3073	0.3199
	5	-1.3296	-0.4492	-0.1413	0.0000	0.0758	0.1206	0.1491	0.1682	0.1814
	6	-1.3966	-0.5225	-0.2166	-0.0757	0.0000	0.0451	0.0738	0.0931	0.1066
	7	-1.4336	-0.5649	-0.2608	-0.1206	-0.0450	0.0000	0.0288	0.0483	0.0619
	8	-1.4552	-0.5911	-0.2885	-0.1490	-0.0738	-0.0288	0.0000	0.0195	0.0332
	9	-1.4683	-0.6080	-0.3069	-0.1680	-0.0931	-0.0483	-0.0195	0.0000	0.0137
	10	-1.4764	-0.6193	-0.3195	-0.1812	-0.1066	-0.0619	-0.0332	-0.0137	0.0000

Fehlerindex-Differenz zwischen den Elementen 9016-12006		Laminat B, Lagenanzahl								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Laminat A, Lagenanzahl	2	0.0000	0.8817	1.1873	1.3318	1.4141	1.4671	1.5044	1.5323	1.5541
	3	-0.8823	0.0000	0.2948	0.4276	0.4989	0.5421	0.5706	0.5908	0.6058
	4	-1.1885	-0.2950	0.0000	0.1304	0.1987	0.2388	0.2644	0.2819	0.2944
	5	-1.3335	-0.4279	-0.1304	0.0000	0.0675	0.1066	0.1311	0.1474	0.1589
	6	-1.4161	-0.4994	-0.1988	-0.0676	0.0000	0.0388	0.0628	0.0786	0.0895
	7	-1.4693	-0.5427	-0.2390	-0.1067	-0.0388	0.0000	0.0239	0.0395	0.0501
	8	-1.5067	-0.5714	-0.2647	-0.1312	-0.0628	-0.0239	0.0000	0.0155	0.0260
	9	-1.5347	-0.5916	-0.2822	-0.1476	-0.0787	-0.0395	-0.0155	0.0000	0.0105
	10	-1.5566	-0.6067	-0.2948	-0.1590	-0.0896	-0.0502	-0.0260	-0.0105	0.0000

Tabelle B- 2: max. Hauptdehnungsdifferenz bei variabler Lagenanzahl

ΔPmajor zwischen den Elementen 8069-10981		Laminat B, Lagenanzahl								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Laminat A, Lagenanzahl	2	-0.0041	58.8110	88.8631	107.4866	120.3550	129.8838	137.2826	143.2283	148.1314
	3	-58.8410	-0.0027	29.3488	47.1552	59.2421	68.0649	74.8393	80.2366	84.6594
	4	-88.9263	-29.3618	-0.0020	17.5954	29.4055	37.9386	44.4316	49.5647	53.7433
	5	-107.5791	-47.1826	-17.6029	-0.0016	11.7255	20.1394	26.5001	31.4985	35.5452
	6	-120.4715	-59.2842	-29.4205	-11.7306	-0.0014	8.3733	14.6744	19.6037	23.5776
	7	-130.0195	-68.1205	-37.9619	-20.1489	-8.3772	-0.0012	6.2790	11.1752	15.1096
	8	-137.4339	-74.9066	-44.4631	-26.5147	-14.6809	-6.2820	-0.0010	4.8831	8.7977
	9	-143.3922	-80.3143	-49.6040	-31.5185	-19.6137	-11.1801	-4.8856	-0.0009	3.9062
	10	-148.3056	-84.7459	-53.7896	-35.5705	-23.5913	-15.1168	-8.8015	-3.9083	-0.0008

ΔPmajor zwischen den Elementen 9234-12242		Laminat B, Lagenanzahl								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Laminat A, Lagenanzahl	2	0.0018	58.4785	87.6879	105.1826	116.8223	125.1194	131.3300	136.1516	140.0022
	3	-58.4474	0.0013	29.2415	46.7782	58.4586	66.7918	73.0335	77.8815	81.7547
	4	-87.6162	-29.2292	0.0009	17.5453	29.2393	37.5876	43.8440	48.7057	52.5913
	5	-105.0761	-46.7483	-17.5390	0.0007	11.6970	20.0507	26.3139	31.1826	35.0752
	6	-116.6881	-58.4108	-29.2237	-11.6931	0.0006	8.3551	14.6207	19.4929	23.3891
	7	-124.9635	-66.7280	-37.5617	-20.0414	-8.3524	0.0005	6.2664	11.1398	15.0379
	8	-131.1571	-72.9558	-43.8081	-26.2981	-14.6146	-6.2644	0.0005	4.8739	8.7727
	9	-135.9651	-77.7921	-48.6607	-31.1603	-19.4825	-11.1355	-4.8723	0.0004	3.8991
	10	-139.8046	-81.6552	-52.5380	-35.0465	-23.3742	-15.0306	-8.7695	-3.8979	0.0004

ΔPmajor zwischen den Elementen 9016-12006		Laminat B, Lagenanzahl								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Laminat A, Lagenanzahl	2	-0.0041	58.8110	88.8631	107.4866	120.3550	129.8838	137.2826	143.2283	148.1314
	3	-58.8410	-0.0027	29.3488	47.1552	59.2421	68.0649	74.8393	80.2366	84.6594
	4	-88.9263	-29.3618	-0.0020	17.5954	29.4055	37.9386	44.4316	49.5647	53.7433
	5	-107.5791	-47.1826	-17.6029	-0.0016	11.7255	20.1394	26.5001	31.4985	35.5452
	6	-120.4715	-59.2842	-29.4205	-11.7306	-0.0014	8.3733	14.6744	19.6037	23.5776
	7	-130.0195	-68.1205	-37.9619	-20.1489	-8.3772	-0.0012	6.2790	11.1752	15.1096
	8	-137.4339	-74.9066	-44.4631	-26.5147	-14.6809	-6.2820	-0.0010	4.8831	8.7977
	9	-143.3922	-80.3143	-49.6040	-31.5185	-19.6137	-11.1801	-4.8856	-0.0009	3.9062
	10	-148.3056	-84.7459	-53.7896	-35.5705	-23.5913	-15.1168	-8.8015	-3.9083	-0.0008

Tabelle B- 3: min. Hauptdehnungsdifferenz bei variabler Lagenanzahl

ΔPminor zwischen den Elementen 8069-10981		Laminat B, Lagenanzahl								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Laminat A, Lagenanzahl	2	0.0013	-5.4984	-8.7233	-11.0990	-13.0255	-14.6610	-16.0843	-17.3419	-18.4648
	3	5.4950	0.0009	-2.7074	-4.4769	-5.8155	-6.9126	-7.8538	-8.6837	-9.4283
	4	8.7117	2.7070	0.0006	-1.6142	-2.7492	-3.6313	-4.3617	-4.9915	-5.5495
	5	11.0802	4.4728	1.6144	0.0005	-1.0726	-1.8672	-2.5001	-3.0299	-3.4893
	6	13.0009	5.8078	2.7475	1.0731	0.0004	-0.7647	-1.3537	-1.8328	-2.2385
	7	14.6318	6.9016	3.6275	1.8666	0.7652	0.0004	-0.5728	-1.0275	-1.4041
	8	16.0514	7.8399	4.3559	2.4981	1.3535	0.5733	0.0003	-0.4451	-0.8071
	9	17.3060	8.6673	4.9838	3.0266	1.8317	1.0275	0.4456	0.0003	-0.3559
	10	18.4264	9.4098	5.5401	3.4847	2.2364	1.4035	0.8072	0.3564	0.0003

ΔPminor zwischen den Elementen 9234-12242		Laminat B, Lagenanzahl								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Laminat A, Lagenanzahl	2	-0.0034	-0.6315	-0.9423	-1.1254	-1.2450	-1.3286	-1.3901	-1.4369	-1.4737
	3	0.6239	-0.0023	-0.3166	-0.5042	-0.6282	-0.7156	-0.7804	-0.8300	-0.8692
	4	0.9323	0.3119	-0.0017	-0.1904	-0.3158	-0.4048	-0.4711	-0.5222	-0.5627
	5	1.1134	0.4986	0.1869	-0.0014	-0.1271	-0.2168	-0.2839	-0.3357	-0.3769
	6	1.2313	0.6216	0.3119	0.1244	-0.0011	-0.0910	-0.1583	-0.2105	-0.2521
	7	1.3136	0.7081	0.4005	0.2139	0.0888	-0.0010	-0.0684	-0.1207	-0.1626
	8	1.3740	0.7719	0.4662	0.2806	0.1559	0.0665	-0.0009	-0.0533	-0.0952
	9	1.4199	0.8209	0.5167	0.3321	0.2080	0.1188	0.0516	-0.0008	-0.0427
	10	1.4560	0.8594	0.5567	0.3729	0.2493	0.1605	0.0935	0.0412	-0.0007

ΔPminor zwischen den Elementen 9016-12006		Laminat B, Lagenanzahl								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Laminat A, Lagenanzahl	2	0.0013	-5.4984	-8.7233	-11.0990	-13.0255	-14.6610	-16.0843	-17.3419	-18.4648
	3	5.4950	0.0009	-2.7074	-4.4769	-5.8155	-6.9126	-7.8538	-8.6837	-9.4283
	4	8.7117	2.7070	0.0006	-1.6142	-2.7492	-3.6313	-4.3617	-4.9915	-5.5495
	5	11.0802	4.4728	1.6144	0.0005	-1.0726	-1.8672	-2.5001	-3.0299	-3.4893
	6	13.0009	5.8078	2.7475	1.0731	0.0004	-0.7647	-1.3537	-1.8328	-2.2385
	7	14.6318	6.9016	3.6275	1.8666	0.7652	0.0004	-0.5728	-1.0275	-1.4041
	8	16.0514	7.8399	4.3559	2.4981	1.3535	0.5733	0.0003	-0.4451	-0.8071
	9	17.3060	8.6673	4.9838	3.0266	1.8317	1.0275	0.4456	0.0003	-0.3559
	10	18.4264	9.4098	5.5401	3.4847	2.2364	1.4035	0.8072	0.3564	0.0003

Tabelle B- 4: Dehnungsdiagramme, Dehnungen in Abhängigkeit zu der Lagendifferenz von Laminat und B

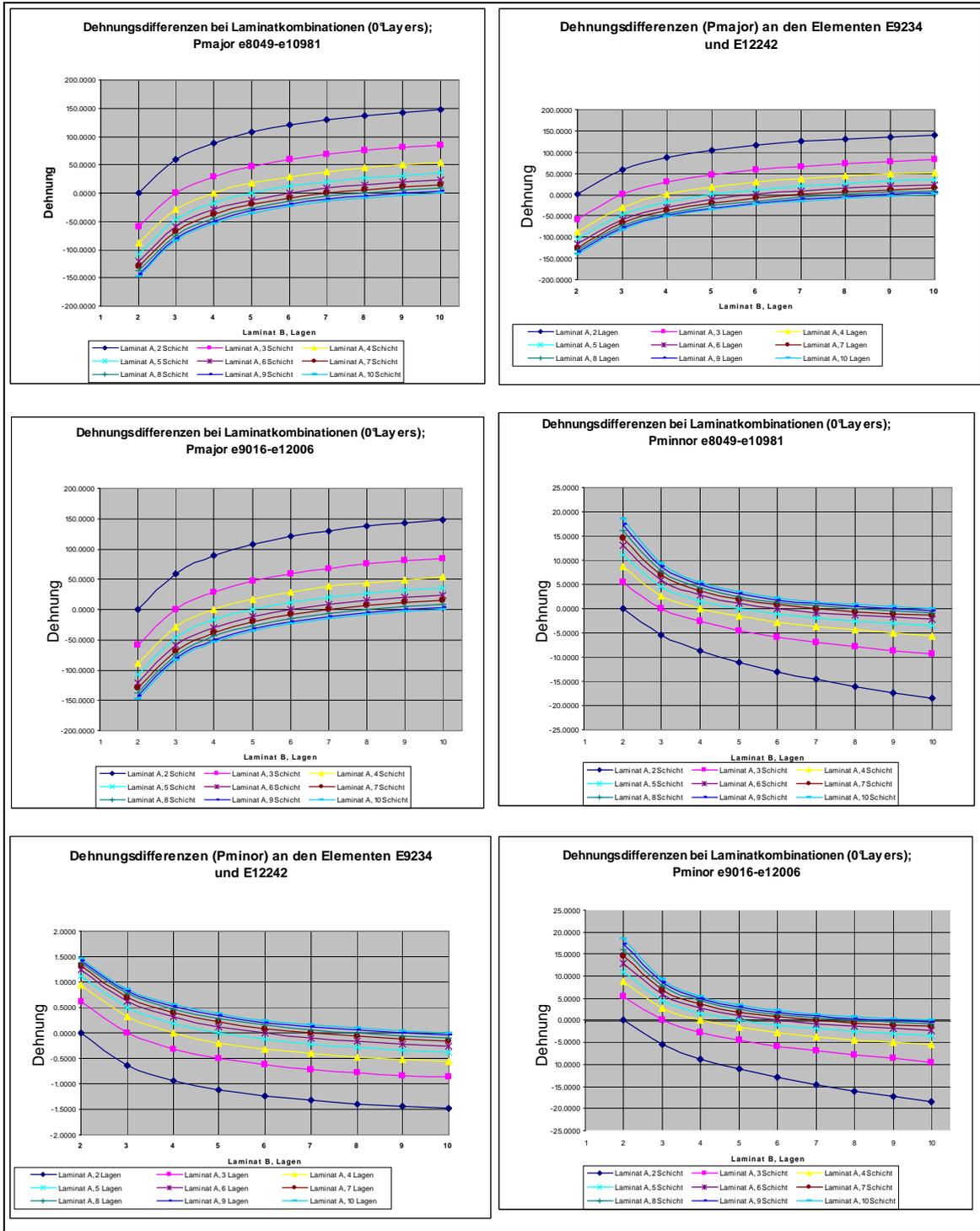


Tabelle C- 6: Fehlerindex bei einer 3-Schicht-Kombination, Schub

Fehlerindex	Laminat B																																																																														
	111	112	113	114	121	122	123	124	131	132	133	134	141	142	143	144	211	212	213	214	221	222	223	224	231	232	233	234	241	242	243	244	311	312	313	314	321	322	323	324	331	332	333	334	341	342	343	344	411	412	413	414	421	422	423	424	431	432	433	434	441	442	443	444															
111	-0.01	0.12	0.07	0.07	0.04	0.55	0.39	0.39	0.03	0.51	0.28	0.13	0.03	0.51	0.13	0.28	0.12	0.08	0.10	0.10	0.55	0.62	0.84	0.84	0.51	0.45	0.48	0.60	0.51	0.45	0.60	0.48	0.07	0.10	0.06	0.05	0.39	0.84	0.44	0.47	0.28	0.48	0.42	0.32	0.13	0.60	0.09	0.32	0.07	0.10	0.05	0.06	0.39	0.84	0.47	0.44	0.13	0.60	0.32	0.09	0.28	0.48	0.32	0.42															
112		0.12	0.15	0.15	0.12	0.55	0.31	0.31	0.12	0.48	0.34	0.23	0.12	0.48	0.23	0.34	0.12	0.12	0.14	0.14	0.55	0.62	0.85	0.85	0.51	0.47	0.56	0.68	0.51	0.47	0.68	0.56	0.14	0.13	0.12	0.15	0.39	0.79	0.46	0.46	0.31	0.17	0.53	0.16	0.28	0.14	0.13	0.15	0.12	0.39	0.79	0.46	0.46	0.13	0.60	0.32	0.16	0.31	0.47	0.36	0.51																		
113			0.07	0.07	0.09	0.63	0.42	0.37	0.07	0.62	0.30	0.10	0.07	0.62	0.14	0.30	0.14	0.13	0.10	0.13	0.59	0.70	0.79	0.87	0.55	0.50	0.48	0.62	0.47	0.52	0.65	0.52	0.06	0.16	0.07	0.07	0.41	0.95	0.43	0.53	0.27	0.52	0.43	0.30	0.15	0.77	0.14	0.36	0.10	0.11	0.08	0.09	0.37	0.76	0.44	0.43	0.18	0.51	0.33	0.15	0.33	0.54	0.30	0.47															
114				0.07	0.09	0.63	0.42	0.37	0.07	0.62	0.30	0.14	0.07	0.47	0.10	0.30	0.14	0.13	0.13	0.10	0.59	0.70	0.87	0.79	0.47	0.52	0.52	0.65	0.55	0.50	0.62	0.48	0.10	0.11	0.09	0.08	0.37	0.76	0.43	0.44	0.33	0.54	0.47	0.30	0.18	0.51	0.15	0.33	0.06	0.16	0.07	0.41	0.95	0.53	0.43	0.15	0.77	0.36	0.14	0.27	0.52	0.30	0.43																
121					0.04	0.55	0.36	0.36	0.04	0.51	0.30	0.16	0.04	0.51	0.16	0.30	0.12	0.08	0.10	0.10	0.55	0.62	0.85	0.85	0.51	0.46	0.52	0.60	0.51	0.46	0.60	0.52	0.09	0.10	0.07	0.05	0.36	0.85	0.47	0.43	0.30	0.52	0.50	0.31	0.16	0.60	0.13	0.31	0.09	0.10	0.05	0.07	0.36	0.85	0.43	0.47	0.16	0.60	0.31	0.13	0.30	0.52	0.31	0.50															
122						0.55	0.84	0.84	0.55	0.60	0.82	0.83	0.55	0.60	0.83	0.82	0.55	0.55	0.59	0.59	0.55	0.62	0.81	0.81	0.60	0.55	0.65	0.88	0.60	0.55	0.88	0.65	0.59	0.57	0.56	0.61	0.73	0.76	0.56	0.91	0.68	0.58	0.59	0.87	0.61	0.67	0.60	0.73	0.59	0.57	0.61	0.56	0.73	0.60	0.67	0.73	0.60	0.68	0.58	0.87	0.59	0.67	0.59																
123							0.34	0.48	0.39	0.61	0.39	0.61	0.39	0.83	0.49	0.55	0.39	0.35	0.36	0.40	0.72	0.91	0.63	1.03	0.66	0.69	0.58	0.74	0.59	0.73	0.52	0.72	0.41	0.33	0.38	0.43	0.40	1.23	0.47	0.60	0.43	0.71	0.53	0.65	0.45	1.04	0.58	0.59	0.37	0.36	0.36	0.37	0.45	0.69	0.45	0.60	0.39	0.53	0.46	0.60	0.53	0.72	0.51	0.72															
124								0.34	0.39	0.83	0.55	0.49	0.39	0.61	0.61	0.39	0.39	0.35	0.40	0.36	0.72	0.91	1.03	0.63	0.59	0.73	0.72	0.52	0.66	0.69	0.74	0.59	0.37	0.36	0.37	0.36	0.45	0.69	0.60	0.45	0.53	0.72	0.72	0.51	0.39	0.53	0.60	0.46	0.41	0.33	0.43	0.38	0.40	1.23	0.60	0.47	0.45	1.04	0.59	0.58	0.43	0.71	0.65	0.53															
131									0.02	0.52	0.28	0.12	0.02	0.52	0.14	0.27	0.12	0.08	0.11	0.10	0.55	0.62	0.86	0.84	0.52	0.44	0.50	0.60	0.52	0.44	0.63	0.47	0.07	0.11	0.05	0.05	0.40	0.86	0.44	0.47	0.29	0.50	0.45	0.32	0.14	0.63	0.11	0.32	0.07	0.10	0.05	0.05	0.39	0.84	0.47	0.44	0.12	0.60	0.32	0.08	0.27	0.47	0.32	0.40															
132										0.45	0.56	0.92	0.52	0.55	0.53	0.87	0.51	0.48	0.48	0.57	0.60	0.68	0.76	0.91	0.58	0.51	0.54	0.96	0.49	0.50	0.64	0.68	0.55	0.49	0.50	0.60	0.67	0.87	0.49	0.91	0.65	0.51	0.56	0.96	0.64	0.64	0.68	0.85	0.47	0.47	0.48	0.55	0.60	0.72	0.68	0.55	0.49	0.50	0.50	0.75	0.51	0.50	0.55	0.64															
133											0.30	0.40	0.28	0.86	0.34	0.37	0.31	0.40	0.35	0.29	0.68	0.90	0.62	0.97	0.65	0.64	0.57	0.69	0.50	0.77	0.49	0.59	0.28	0.31	0.28	0.29	0.44	1.23	0.48	0.69	0.28	0.65	0.41	0.40	0.26	1.11	0.33	0.44	0.32	0.40	0.34	0.28	0.54	0.67	0.52	0.52	0.35	0.33	0.39	0.76	0.32	0.52																	
134												0.12	0.14	0.53	0.13	0.33	0.16	0.27	0.16	0.16	0.61	0.93	0.88	0.64	0.50	0.84	0.53	0.48	0.64	0.63	0.70	0.56	0.18	0.23	0.14	0.15	0.40	0.72	0.54	0.57	0.34	0.80	0.49	0.33	0.27	0.57	0.25	0.41	0.15	0.32	0.14	0.15	0.46	0.13	1.10	0.46	0.13	0.26	0.56	0.25	0.40																		
141													0.02	0.52	0.12	0.28	0.12	0.08	0.10	0.11	0.55	0.62	0.84	0.86	0.52	0.44	0.47	0.63	0.52	0.44	0.60	0.50	0.07	0.10	0.05	0.05	0.39	0.84	0.44	0.47	0.27	0.47	0.40	0.32	0.12	0.60	0.08	0.32	0.07	0.11	0.05	0.05	0.40	0.86	0.47	0.44	0.14	0.63	0.32	0.11	0.28	0.50	0.32	0.45															
142														0.45	0.92	0.56	0.51	0.48	0.57	0.48	0.60	0.68	0.91	0.76	0.49	0.50	0.68	0.64	0.58	0.51	0.96	0.54	0.47	0.47	0.55	0.48	0.60	0.72	0.55	0.68	0.51	0.50	0.64	0.55	0.49	0.50	0.75	0.50	0.55	0.49	0.60	0.50	0.67	0.87	0.91	0.49	0.64	0.85	0.68	0.65	0.51	0.96	0.56																
143																	0.12	0.39	0.16	0.27	0.16	0.61	0.93	0.64	0.88	0.64	0.63	0.56	0.70	0.50	0.84	0.48	0.53	0.15	0.32	0.15	0.14	0.46	1.20	0.55	0.75	0.26	0.56	0.40	0.25	0.13	1.10	0.13	0.46	0.18	0.23	0.15	0.14	0.40	0.22	0.57	0.54	0.27	0.57	0.41	0.25	0.34	0.80	0.33	0.49														
144																	0.30	0.31	0.40	0.29	0.35	0.68	0.90	0.97	0.62	0.50	0.77	0.59	0.49	0.65	0.64	0.69	0.57	0.32	0.40	0.28	0.34	0.54	0.67	0.52	0.52	0.39	0.76	0.52	0.32	0.35	0.50	0.33	0.35	0.28	0.31	0.29	0.28	0.44	1.23	0.69	0.48	0.26	1.11	0.44	0.33	0.28	0.65	0.40	0.41														
211																		0.12	0.12	0.13	0.13	0.55	0.62	0.79	0.79	0.48	0.47	0.47	0.53	0.48	0.47	0.53	0.47	0.15	0.14	0.12	0.15	0.31	0.85	0.46	0.46	0.34	0.56	0.51	0.28	0.23	0.68	0.16	0.36	0.15	0.14	0.15	0.12	0.31	0.85	0.46	0.23	0.68	0.36	0.16	0.34	0.56	0.28	0.51															
212																		0.08	0.11	0.11	0.55	0.62	0.77	0.77	0.48	0.46	0.53	0.54	0.48	0.46	0.54	0.53	0.13	0.11	0.08	0.13	0.35	0.77	0.47	0.37	0.40	0.53	0.51	0.32	0.27	0.54	0.13	0.32	0.13	0.11	0.13	0.08	0.35	0.77	0.37	0.47	0.27	0.54	0.32	0.13	0.40	0.53	0.32	0.51															
213																		0.09	0.11	0.57	0.66	0.80	0.79	0.49	0.48	0.50	0.51	0.47	0.48	0.60	0.47	0.16	0.14	0.12	0.16	0.33	0.91	0.45	0.50	0.31	0.55	0.49	0.26	0.32	0.78	0.17	0.37	0.11	0.10	0.11	0.10	0.10	0.36	0.76	0.41	0.40	0.55	0.50	0.28	0.23	0.53	0.17	0.37	0.16	0.14	0.16	0.12	0.33	0.91	0.50	0.45	0.32	0.78	0.38	0.17	0.31	0.55	0.26	0.49
214																		0.09	0.57	0.66	0.79	0.80	0.47	0.48	0.47	0.60	0.49	0.48	0.51	0.50	0.11	0.10	0.10	0.11	0.36	0.76	0.45	0.41	0.40	0.55	0.50	0.28	0.23	0.53	0.17	0.37	0.16	0.14	0.16	0.12	0.33	0.91	0.50	0.45	0.32	0.78	0.38	0.17	0.31	0.55	0.26	0.49																	
221																			0.55	0.62	0.76	0.76	0.60	0.55	0.67	0.60	0.55	0.67	0.59	0.63	0.59	0.56	0.61	0.84	0.81	0.56	0.91	0.82	0.65	0.59	0.73	0.83	0.88	0.60	0.87	0.63	0.59	0.61	0.56	0.84	0.81	0.91	0.56	0.83	0.88	0.60	0.82	0.65	0.73	0.55																			
222																			0.62	0.82	0.82	0.68	0.62	0.74	0.87	0.68	0.62	0.87	0.74	0.70	0.66	0.62	0.88	0.91	0.83	0.63	1.00	0.91	0.74	0.69	0.99	0.94	0.97	0.72	0.99	0.70	0.66	0.68	0.69	0.91	0.83	0.94	0.97	0.89																									

Handout zum Tool: AutoHuth V1.1.0

Benutzerregeln:

- Pro Niet einen Knoten anwählen (Niet-/Schraubkopf) und in einem Set abspeichern.
- Der Setname muss nach folgendem Schlüssel aufgebaut werden:

B	M	Ti	4.17
			4.83
R	C	Al	6.35
			7.94

B: Bolt (Verschraubt)
 R: Riveted (Vernietet)
 M: Metallverbindung
 C: Ein Laminat ist an der Verbindung beteiligt (Composit)
 Ti: Titan-Niet
 Al: Aluminium-Niet

Beispiel: BCTi4.83 → Ein Titanschraube mit 4.83mm Nenndurchmesser, die unter anderem ein Laminat verbindet.

- Das Set/Die Sets wird mit Hilfe des HM-Makro's „Set exportieren“ in den gleichen Ordner der Perl-Datei gespeichert.
- Mehrere Sets sind gleichzeitig auswertbar
- Die zu untersuchende .bdf-Datei muss in den Ordner des Perl-Skriptes exportiert werden und den Namen „Set.bdf“ zugewiesen bekommen
- Es wird eine .txt-Datei erzeugt (BUSHDaten.txt) mit den neuen BUSH-Properties und den dazugehörigen BUSH-Elementen, die durch das Set angesprochen worden sind.
- Zusätzlich wird eine Text-Datei rausgeschrieben, in der die max. PID gespeichert wird. Bei einem 2. Durchlauf greift das Programm auf diese Datei zu und zählt ab dieser PID weiter
- aufeinanderfolgende Verbindungspartner dürfen nicht die selbe Property-Identifikationsnummer haben!

Nicht unterstützt wird/werden:

- ein Solid, das in den Bohrungen eine „Middlespider“ aufweist. (Unterstützt wird lediglich die Variante „Orthospider“)
- 2 zu verbindende Solid ohne einen Spalt.
- ineinander liegende 2D-Elemente
- TRIA-Elemente (Es reicht, wenn sich nur 1 QUAD-Element den Knoten mit dem BUSH-Element teilt)
- HEXAEDER-Elemente

Unterstützt werden:

- QUAD-Elemente
- TETRAEDER_Elemente
- Orthogonal-Spinnen (Orthospider)
- Spinnen an einer 2D-Komponente



Department Maschinenbau und Produktion

Formblatt **Erklärung zur selbständigen Bearbeitung einer ausgeführten Bachelorthesis**

Zur Erläuterung des Zwecks dieses Blattes:

§ 16 Abs. 5 der APSO-TI-BM lautet:

„Zusammen mit der Thesis ist eine schriftliche Erklärung abzugeben, aus der hervorgeht, dass die Arbeit – bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit (§18 Absatz 1) – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Dieses Blatt mit der folgenden Erklärung ist nach Fertigstellung der Arbeit durch jede/n Kandidat/en/in auszufüllen und jeweils mit **Originalunterschrift** (keine Ablichtungen !) **als letztes Blatt des als Prüfungsexemplar der Bachelorthesis gekennzeichneten Exemplars einzubinden.**

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann - auch nachträglich - zur Ungültigkeit der Bachelor-Abschlusses führen.

Erklärung

Hiermit versichere ich,

Name: Greschat

Vorname: André

daß ich die vorliegende Bachelorthesis

Automatisierter Aufbau von Finite-Element-Modellen zur Verbindung von Faserverbundbauteilen

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel

benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

im Original

Ort

Datum

Unterschrift