

Masterarbeit Nr. 16

**Korrelation und Bewertung eines FE-Modells zum
virtuellen Testen des Crashverhaltens von Aluminium-
Honigwaben-Sandwichstrukturen innerhalb des
Marslander-Projekts**

von

Frank Meyer B. Eng.

Matrikelnummer 4241270

betreut von:

Dipl.-Ing. Martin Pietrek

Dipl.-Ing. Silvio Schröder

Die Arbeit umfasst:

123 Seiten mit
7 Tabellen und
102 Abbildungen

Institut für Flugzeugbau und Leichtbau
Technische Universität Braunschweig

Oktober 2014

Schriftliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig, ohne unerlaubte fremde Hilfe oder Beratung und nur unter Verwendung der angegebenen wissenschaftlichen Hilfsmittel und Literatur angefertigt habe.

.....
Braunschweig, den

Abstrakt

Die Finite-Elemente-Methode ist ein essentieller Bestandteil zur Vorhersage des Materialverhaltens unter diversen Beanspruchungen. Zur Verifizierung des virtuellen Materialverhaltens müssen deshalb die Modelle auf ihre Genauigkeit untersucht werden. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem virtuellen Verhalten einer Sandwichstruktur, welche auf der Grundlage experimenteller Daten modelliert wird. Sie besteht aus einem Aluminium-Honigwabenkern und aus Deckschichten mit einem Verbundmaterial aus Kevlarfasern. Die Simulationen finden auf Komponentenebene statt, sodass den einzelnen Bestandteilen der Sandwichstruktur diverse Belastungen wie Zug- Druck- und Schubbeanspruchungen auferlegt werden. Darüber hinaus werden bezüglich des Kernmaterials mehrere lokale Impact-szenarien in die Simulationen einbezogen. Zur Verbesserung des Simulationsverhaltens der Strukturkomponenten werden verschiedene Einstellungen am Modell vorgenommen. Dies umfasst unter anderem das Kontaktverhalten, die Elementeigenschaften und die Überwachung von Nullenergiemoden. Im Ergebnis ist ein stabiles Elementverhalten der Honigwabenstruktur zu erkennen, welches erfolgreich an das reelle Materialverhalten angenähert ist. Anschließend wird eine weitere Annäherung an das reelle Materialverhalten anhand des Deckschichtmaterials mit dem Materialmodell #58 erreicht. Zum Schluss wird die Klebschicht, die die beiden Strukturkomponenten miteinander verbindet, in dieser Arbeit ansatzweise untersucht.

Abstract

The finite element method is necessary to predict material behaviour according to different kind of stresses. For verification, accuracy of the virtual material must be analysed. This thesis deals with the virtual behaviour of a sandwich structure, which is modelled by experimental data. It consists of an aluminium honeycomb core and face sheets made of a Kevlar fiber composite material. The simulations take place at the component level so that several stresses of tensile, pressure and shear can be imposed on the individual parts of the sandwich structure. In addition, a number of impact scenarios are included so that the behaviour of the honeycomb elements can be investigated. To improve the structure, different settings are applied to the model like the contact behaviour, the element properties as well as the control of hourglassing. In result, there is stable element behaviour of the honeycomb structure with regard to several kinds of loading. Furthermore this component could be successfully approached to the real material behaviour. Afterwards, another approach is reached with the face sheet with using the material model #58 in comparison to the real material behaviour. Finally, an adhesive layer which connects the both structure components is briefly tested.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Honigwaben-Sandwichstrukturen	3
2.1. Allgemeiner Aufbau.....	3
2.2. Reelles Materialverhalten der Sandwichkomponenten.....	4
2.2.1. Druck- und Schubversuche an der Honigwabenstruktur	4
2.2.2. Impactszenarien an der Honigwabenstruktur	10
2.2.3. Zugversuch am Deckschichtmaterial	12
2.2.4. Zugversuch am Klebschichtmaterial.....	13
3. Grundlagen zur Simulation von Aluminium-Honigwaben-Sandwichstrukturen	14
3.1. Allgemeines	14
3.2. Materialmodell #126 (*MODIFIED HONEYCOMB)	16
3.2.1. Materialmodell #126 Version 1	16
3.2.2. Materialmodell #126 Version 2	20
3.2.3. Materialmodell #126 Version 3	21
3.3. Materialmodell #54/55 (*MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE).....	21
3.4. Materialmodell #58 (*MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC)	23
3.5. Elementtypen	25
3.5.1. Volumenelemente	25
3.5.2. Schalenelemente	26
3.6. Nullenergiemoden.....	26
3.7. Kontaktalgorithmen	28
3.7.1. SOFT-Parameter.....	28
3.7.2. Reibungsparameter	29
3.8. Vorarbeiten zur virtuellen Darstellung eines Honigwaben-Sandwichstruktur	30
4. Generierung und Analyse der virtuellen Sandwichkomponenten	33
4.1. Vorgehensweise der Komponentenanalysierung eines Sandwichmaterials	33
4.2. Möglichkeiten zur Darstellung einer Kernstruktur.....	35
4.3. Analyse des virtuellen Materialverhaltens in die Hauptachsenrichtungen	36
4.3.1. Druckbelastung in T-Richtung.....	36
4.3.2. Druckbelastung in L-Richtung.....	41
4.3.3. Druckbelastung in W-Richtung	43
4.3.4. Drehung um die W-Achse	43
4.3.5. Drehung um die L-Achse.....	47

4.3.6. Schubbelastung in LT-Richtung.....	48
4.3.7. Schubbelastung in WL-Richtung.....	51
4.3.8. Schubbelastung in WT-Richtung.....	52
4.4. Impactszenarien auf die virtuelle Honigwabenstruktur.....	54
4.5. Erstellung und Analyse der virtuellen Deckschichtkomponente	67
4.6. Implementierung der virtuellen Klebschichtkomponente	72
5. Bewertung der Berechnungsmodelle.....	76
6. Zusammenfassung und Ausblick.....	81
6.1. Zusammenfassung.....	81
6.2. Ausblick	82
Quellenverzeichnis	83
Abbildungsverzeichnis	85
Tabellenverzeichnis	89
Anhang A	90
Anhang B.....	98

Symbolverzeichnis

Lateinische Formelzeichen

<i>Formelzeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
A	m^2	Fläche
a	-	Skalierungsfaktor
C	-	Volumenviskositätsfaktor
c	m/s	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
c	Ns/m	Dämpfungskonstante
D	-	Wert
$\underline{\underline{D}}$	Ns/m	Dämpfungsmatrix
E	N/m^2	Elastizitätsmodul
E	J	Energie
e	-	Wert
\underline{F}	N	Kraftvektor
$FBRT$	-	Skalierungsfaktor
f	-	Faktor
\underline{f}	N	viskose Dämpfungsvektor
G	N/m^2	Schubmodul
\underline{h}	m/s	Vektor der Knotengeschwindigkeiten
K	Pa	Kompressionsmodul
k	N/m^2	Steifigkeit
L	m	Länge
$\underline{\underline{M}}$	kg	Massenmatrix
m	kg	Masse
m	-	Wert
m^*	kg	Massenfunktion
p	Pa	Druck
S	-	Stauchung
S_C	N/m^2	Schubfestigkeit
SFM	-	Steifigkeitsfaktor des Master-Elements
SFS	-	Steifigkeitsfaktor des Slave-Elements
$SOFSCL$	-	Skalierungsfaktor
$SLSFAC$	-	Skalierungsfaktor
s	N/m^2	Spannung
$TSSFAC$	-	Skalierungsfaktor
t	s	Zeit
Δt	s	Zeitschritt
\underline{u}	m	Verschiebungsvektor
$\underline{\dot{u}}$	m/s	Geschwindigkeitsvektor
$\underline{\ddot{u}}$	m/s^2	Beschleunigungsvektor
V	m^3	Volumen
v	m/s	Geschwindigkeit
X	N/m^2	Festigkeit in x-Richtung
Y	N/m^2	Festigkeit in y-Richtung
$YCFAC$	-	Skalierungsfaktor
z	m	Eindringtiefe

Griechische Formelzeichen

<i>Formelzeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
β	-	Dehnungsvariable
β	-	Schubinteraktionsparameter
ε	-	Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	s^{-1}	Dehnrates
ϑ	$^{\circ}$	Winkel
λ	-	Skalierungsfaktor
μ_C	-	Reibungskoeffizient
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ	kg/m^3	Dichte
σ	N/m^2	Spannung
$\hat{\sigma}$	N/m^2	effektive Spannung
τ	N/m^2	Schubspannung
ϕ	$^{\circ}$	Winkel
ω	-	Schadensparameter

Indizes

<i>Indizes</i>	<i>Beschreibung</i>
a	Richtungsangabe
b	Richtungsangabe
c	Druckfaser
c	Richtungsangabe
c	Kontakt
$char$	charakteristisch
C	Druckbeanspruchung
d	Schub
d	Matrix auf Druckbeanspruchung
d	dynamisch
e	Elementebene
eff	effektiv
ext	extern
f	fundamental
f	vollständig verdichtet
f	Zugfaser
f	spezifisch
HG	Hourglass
i	Richtungsangabe
int	intern
j	Richtungsangabe
k	Richtungsangabe
k	Term der diagonalisierten Massenmatrix
kon	konvektiv
m	Matrix auf Zugbeanspruchung
max	maximal
N	Normal

<i>N</i>	Elementanzahl
<i>n</i>	Zählvariable
<i>p</i>	hydrostatisch
<i>R</i>	Reibung
<i>red</i>	reduziert
<i>rel</i>	relativ
<i>s</i>	Skalierung
<i>s</i>	Stabilität
<i>s</i>	statisch
<i>s</i>	starke Materialachse
<i>T</i>	Zugbeanspruchung
<i>t</i>	Zeitpunkt
<i>trial</i>	Versuch
<i>u</i>	unkomprimiert
<i>vol</i>	volumetrisch
<i>w</i>	schwache Materialachse
<i>x</i>	Richtungsangabe
<i>Y</i>	Fließ-
<i>y</i>	Richtungsangabe
<i>1</i>	Richtungsangabe
<i>2</i>	Richtungsangabe
<i>3</i>	Richtungsangabe

1. Einleitung

Ein großes Ziel der heutigen Raumfahrt ist die Erforschung extraterrestrischer Planeten. Um dieses zu erreichen, werden gegenwärtig unbemannte Raumsonden, welche sensible Nutzlasten mit sich tragen, zu fremden Planeten geschickt. Die Landung auf diesen fremden Planeten spielt dabei eine entscheidende Rolle, da innerhalb dieser die Nutzlasten der Sonden durch den Landestoß nicht beschädigt werden dürfen. Um dies zu vermeiden, muss eine ausreichend hohe Dämpfung bei der Abbremsung der Geschwindigkeit sichergestellt sein.

Diverse Landesysteme kamen bereits in der Vergangenheit erfolgreich zum Einsatz und haben sich in der Raumfahrt etabliert. Um zukünftige Landungen jedoch noch zuverlässiger und kostengünstiger zu gestalten, wird stets nach Alternativen geforscht. Dabei sind in der Entwicklung neuartiger Landesysteme unter anderem die Aspekte der Masse, der Robustheit sowie die Sicherheit einer weichen und präzisen Landung maßgebend.

Eine Option ergibt sich durch die Implementierung von Sandwichstrukturen unterhalb einer Landeplattform, wodurch sich ein gewichtsoptimiertes innovatives Landekonzept erreichen lässt. Solche Strukturen besitzen ein hohes Leichtbaupotenzial und sind in der Lage, quasistatische sowie kurzzeitdynamische Belastungen effizient aufzunehmen. [1] Dabei können sie sowohl für unbemannte, als auch für bemannte Missionen zum Einsatz kommen. In der Raumfahrttechnik besitzt dieses Material eine lange Tradition. So kamen bereits innerhalb der Mission von Apollo 11 solche Leichtbaustrukturen innerhalb der Landebeine als Dämpfungsstrukturen zum Einsatz. [2]

Dieses Landekonzept könnte zum Beispiel bei der ExoMars-Mission oder bei MASCOT-Folgemissionen eingesetzt werden. Innerhalb der ExoMars-Mission könnte der Landeprozess auf der Marsoberfläche in 3 Phasen so vollzogen werden (siehe Abbildung 1.1), dass zunächst ein großer Teil der kinetischen Energie aufgrund des aerodynamischen Widerstandes des Flugkörpers abgebaut wird. Dabei besitzt die Plattform ein Hitzeschild, welches die Instrumente vor der einfallenden Wärme schützt. Ein weiterer Teil dieser Energie wird danach durch einen mehrstufigen Fallschirm gemindert, bevor es zum Schluss durch die Anwendung von Triebwerken und der Deformation einer Sandwichstruktur unterhalb der Instrumentenplattform zum endgültigen Stillstand gelangt. Die auftretenden Maximalgeschwindigkeiten beim Auftreffen auf die Oberfläche sollen innerhalb der ExoMars-Mission in vertikaler Richtung nicht mehr als 3 m/s und in horizontaler Richtung weniger als 1 m/s betragen. Außerdem sollte die Bodenneigung unter 10° betragen. [3]



Abbildung 1.1: Verschiedene Phasen des Landevorganges innerhalb der ExoMars-Mission [4]

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem virtuellen Test von Komponenten einer Sandwichstruktur mit einem Aluminiumhonigwabenkern unter Einbezug verschiedener Lastfälle, die das Auftreffen auf der Oberfläche unter diversen Randbedingungen repräsentieren. Das Ziel ist, ein validiertes und verifiziertes Simulationsmodell zu erhalten, welches eine Vergleichbarkeit mit dem realen Materialverhalten erlaubt. Es gibt bereits ein erstes Modell zur Simulation einer solchen Sandwichstruktur. Allerdings gibt das Materialverhalten dieser virtuellen Struktur das reelle nur ansatzweise wieder.

In dieser Arbeit werden zunächst der Aufbau und das reale Materialverhalten einer Sandwichstruktur anhand von Versuchsdaten näher erläutert. Anschließend werden Hintergrundinformationen zu dem Programmablauf und der Berechnungsweise des benutzten Simulationstools LS-DYNA gegeben. Dabei werden auf die Aspekte der eingesetzten Materialmodelle, Kontaktalgorithmen und Elementtypen genauer eingegangen. Danach werden Vorarbeiten vorgestellt, mit denen diese Arbeit korreliert. Anschließend finden Validierungen der Sandwichkomponenten statt, die hinterher auf vielfältiger Art und Weise belastet werden. Dabei wird unter anderem auf die Genauigkeit des Simulationsmodells sowie der Rechenzeit Bezug genommen. Mithilfe von Ergebnissen der Vorarbeiten werden die einzelnen Sandwichkomponenten verifiziert. Zum Schluss dieser Arbeit werden die Ergebnisse der Simulationen bewertet und zusammengefasst.

Innerhalb dieser Arbeit wird das Simulationsprogramm LS-DYNA, welches auf der Grundlage der FE-Methode basiert, verwendet. FEM-Programme stellen dabei gegenüber aufwendigen praktischen Versuchen eine kosteneffiziente Methode dar. Mit ihnen lassen sich „effiziente Ermittlungen von Deformationsvorgängen oder Spannungszuständen komplexer Strukturen unter beliebigen nichtlinearen Randbedingungen“ darstellen. [S.16, [1]] In einer modellbasierten Annäherung können geometrische und materielle Parameter leicht variiert werden, sodass infolgedessen Designkosten eingespart und dennoch gute Ergebnisse beispielsweise in Bezug auf die Vorhersage von Impactschäden erzielt werden können.

2. Honigwaben-Sandwichstrukturen

Honigwaben-Sandwichstrukturen werden durch eine hohe gewichtsspezifische Steifigkeit und Festigkeit, einer fast konstanten Druckkraft, einem günstigen Dämpfungsverhalten und einer relativen Unempfindlichkeit gegenüber lokalem Stabilitätsverlust charakterisiert. Nachteile besitzen solche Strukturen dann, wenn lokale Unregelmäßigkeiten in Regionen auftreten, in denen spezielle Randbedingungen wie Anschlüsse, Verbindungsstellen, Lasteinleitungsstellen, lokale Impacts oder geometrische sowie materielle Unregelmäßigkeiten vorliegen. [1]

2.1. Allgemeiner Aufbau

Eine Sandwichstruktur besteht aus einer Schichtung unterschiedlicher Werkstoffe (siehe Abbildung 2.1). Sie setzt sich aus 2 dünnen, steifen Deckschichten und einem dickeren Kern, idealerweise mit einer geringen Dichte, zusammen. Dabei kann das Kernmaterial unter anderem aus einer sogenannten Honigwabenstruktur aufgebaut sein, welche aus einer Aluminiumlegierung bestehen und orthotrope Materialeigenschaften aufweisen kann. Die Honigwabenstruktur wird dabei über das Material, die Zellengröße, die Zellwanddicke und die Dichte in Bezug zu einem abgegrenzten Raum definiert. [5]

Zur Vereinfachung der Beschreibung einer Honigwaben-Struktur werden 3 Richtungen festgelegt, welche in die Hauptachsenrichtungen zeigen (siehe Abbildung 2.1). Dabei beschreibt die T-Richtung die Dickenrichtung des Materials, die L-Richtung die der parallelen Zellwände und die W-Richtung die Expansionsrichtung der Honigwabenstruktur. [1]

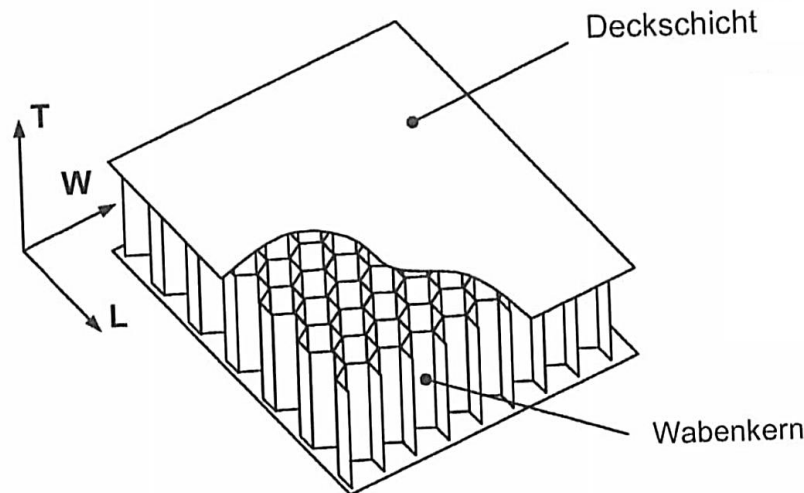


Abbildung 2.1: Aufbau und Hauptachsenrichtungen eines Sandwichmodells [1]

Unter einer allgemeinen Beanspruchung der Sandwichstruktur nimmt das Kernmaterial Schub- sowie lokale Druckbelastungen in T-Richtung auf. Neben dieser Funktion dient sie außerdem zur Aufrechterhaltung der Distanz zwischen den Deckschichten sowie zur Erhöhung der Struktursteifigkeit.

Die Deckschicht übernimmt die Aufgabe zur Fixierung des Kernmaterials und infolge eines Impacts die der flächigen Krafteinleitung auf die Honigwabenstruktur. [6] Unter Biegebelastung einer Sandwichstruktur sind die Deckschichten Zug- und Druckbelastungen ausgesetzt (siehe Abbildung 2.2).

Eine Klebschicht zwischen dem Kern und den Deckschichten hat die Aufgabe, der Lasttransfer zwischen diesen Strukturkomponenten sicherzustellen. Um die Gefahr einer Delamination zwischen der Kern- und der Deckschicht zu vermeiden, muss eine ausreichend hohe Festigkeit der Klebschicht sichergestellt sein.

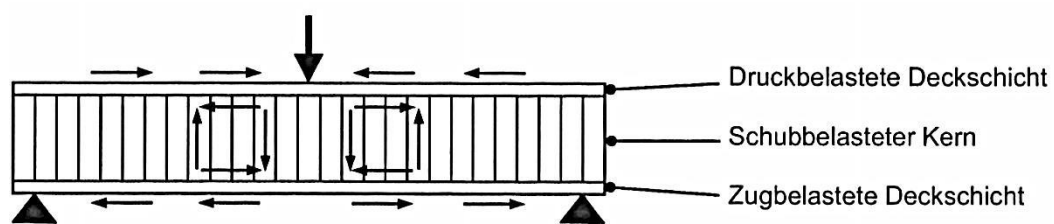


Abbildung 2.2: Auftretende Kräfte in einer Sandwichmodell unter Biegebelastung [1]

2.2. Reelles Materialverhalten der Sandwichkomponenten

2.2.1. Druck- und Schubversuche an der Honigwabenstruktur

Mehrere Druck- und Schubtests (siehe Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4) wurden an einem Honigwabenmaterial des Herstellers Plascore mit der Bezeichnung PAMG-XR1-2.0-3/16-0.0007-P-5056 durchgeführt. [7] Dieses Material besitzt eine Dichte von 32 kg/m^3 und eine Zellgröße von $4,8 \text{ mm}$. Die Folie ist perforiert und hat eine Stärke von $0,018 \text{ mm}$. Bei diesem Material handelt es sich um eine für die Luftfahrt geeignete Aluminiumlegierung (5056). [8]

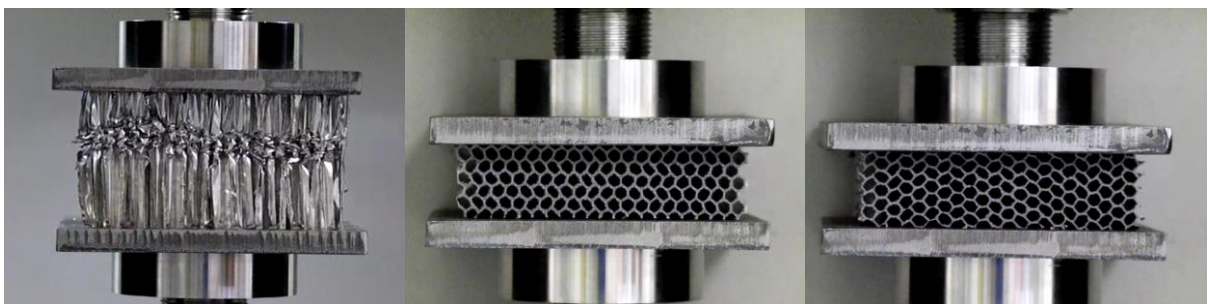


Abbildung 2.3: Druckbelastung einer Honigwabenstruktur aus Aluminium in T-Richtung (links), L-Richtung (zentral) und W-Richtung (rechts) [7]

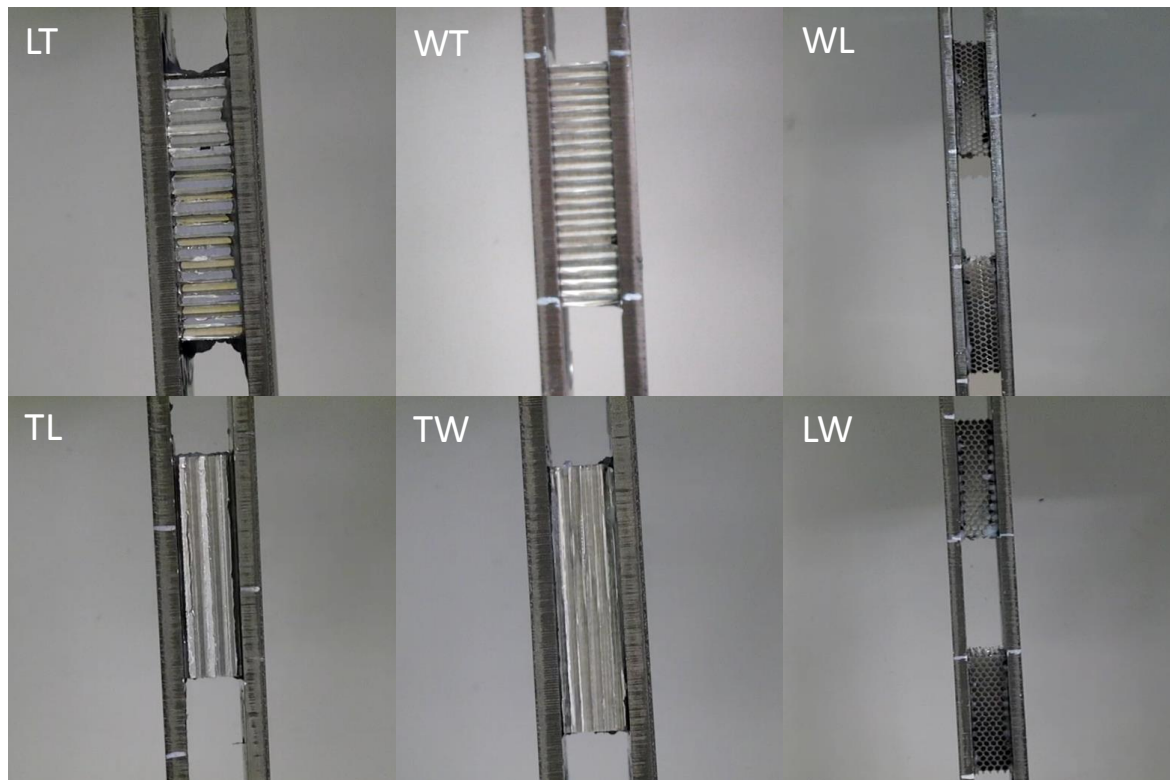


Abbildung 2.4: Schubbelastungen einer Honigwabenstruktur aus Aluminium in verschiedenen Hauptspannungsrichtungen [7]

Die Materialproben unter Schubbeanspruchung werden durch zwei Buchstaben beschrieben. Der erste Buchstabe beschreibt dabei die Richtung, in der die Kraft anliegt und der zweite die Dickenrichtung des Materials (siehe Abbildung 2.5).

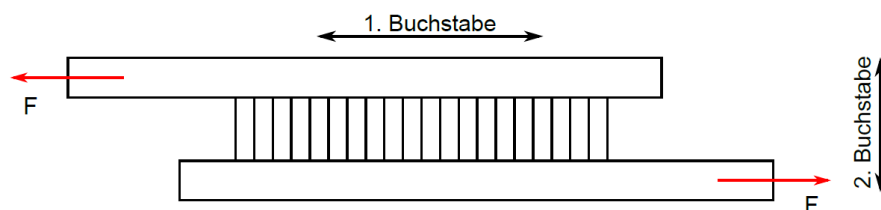


Abbildung 2.5: Richtungsbeschreibung des Honigwabenmaterials zur Kennzeichnung der Schubbelastung

Die typische Spannungs-kurve einer Honigwabenstruktur unter Druckbelastung in T-Richtung kann in 3 Bereiche unterteilt werden (siehe Abbildung 2.6). In dieser Belastungsrichtung besitzt das Material seine größte Festigkeit. Am Anfang werden bei der Belastung der Materialstruktur zunächst Setzeffekte beobachtet und es kommt zum Ausgleichen von Unparallelitäten. Danach findet eine Stauchung beziehungsweise eine Biegung des Zellwandmaterials im linear elastischen Bereich (1) des Materials statt. Es bilden sich in den Zellwänden des Materials kurzwellige Beulmuster aus. Diese senken die Steifigkeit der Struktur, sodass die Kurve solange degressiv verläuft, bis die elastische Druckfestigkeit erreicht ist.

Sobald die elastische Druckfestigkeit des Materials überschritten wird, entsteht eine erste Faltung des Zellwandmaterials. Dies entspricht der ausgeprägten Spannungsspitze des Graphen. Der Graph fällt anschließend ab, da die Zellwände nacheinander ihre Tragfähigkeit verlieren. Bei weiterer Stauchung des Materials treten in diesem Bereich periodische Stabilitätsprobleme unter einer konstanten Last an den Zellwänden auf, sodass sich diese kontinuierlich weiter zusammenfallen. Dies zeigt sich an einem ausgedehnten Plateaubereich (2) mit einem nahezu konstanten Spannungsverlauf, der solange andauert, bis sich die Honigwabenstruktur vollständig verdichtet hat.

Eine weitere Erhöhung der Drucklasten trägt dazu bei, dass sich das verdichtete Zellwandmaterial selbst komprimiert. Der Graph befindet sich nun in einem Verdichtungsbereich (3) und zeigt einen steilen Anstieg an.

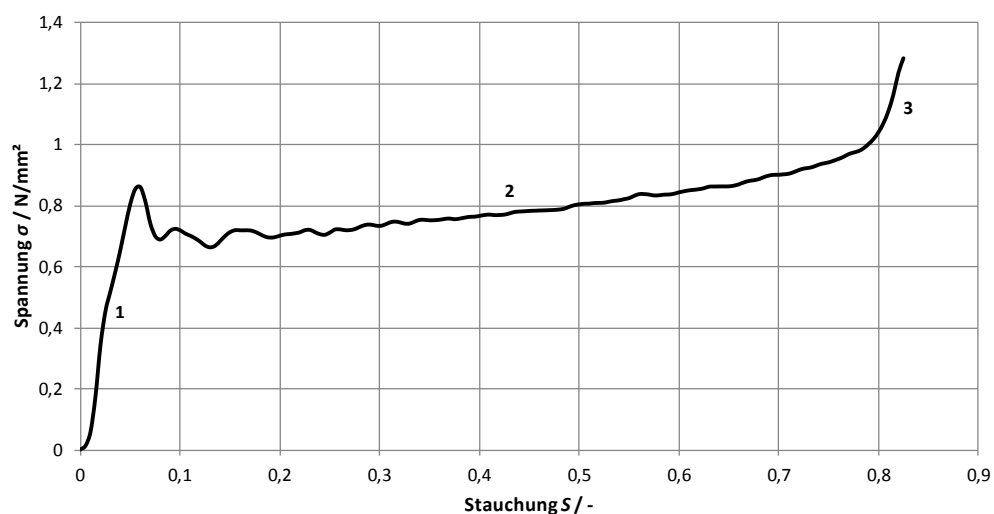


Abbildung 2.6: Gemittelte Spannungskurve einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Druckbelastung in T-Richtung [7]

Bei der Beanspruchung in L- und W-Richtung gibt es im Allgemeinen ebenfalls 3 prinzipielle Bereiche der Spannungskurven (siehe Abbildung 2.7). Diese aus einem linear elastischen Bereich (1), einem Plateaubereich mit einer fast konstanten Spannung (2) und einem Verdichtungsbereich (3). Unter Betrachtung der Spannungskurven in L- und W-Richtung ist zu erkennen, dass die E-Modul und die Plateauspannungen im Vergleich zur Dickenrichtung T geringer sind.

Unter einer Belastung in L- und W-Richtung tauchen keine Spannungsmaxima auf, da in diesen Fällen kein Scheibenbelastungszustand existiert. Vielmehr dominieren Zellwandbiegeverformungen, die zu einem linear-elastischen Anfangsbereich führen. Im Plateaubereich kommt es entweder zu einem homogenen Zusammenfallen (L-Richtung) oder einem inhomogenen Kollabieren (W-Richtung) der Zellen. Im Vergleich der beiden Spannungskurven ist zu erkennen, dass die Spannungen unter einer Belastung in L-Richtung höhere Werte aufweisen. Dies resultiert aus einer parallelen Ausrichtung einiger Zellwände gegenüber der Belastungsrichtung, sodass die Honigwabenstruktur dadurch eine höhere Stabilität aufweist. Durch ein Anstoßen von sich verformenden benachbarten Zellen verlieren sie bei zunehmender Stauchung der Honigwabenstruktur ihre Ausrichtung und kollabieren ebenfalls. Diese Kettenreaktion durchzieht das ganze Material bis zur vollständigen Verdichtung der Honigwabenstruktur. [1]

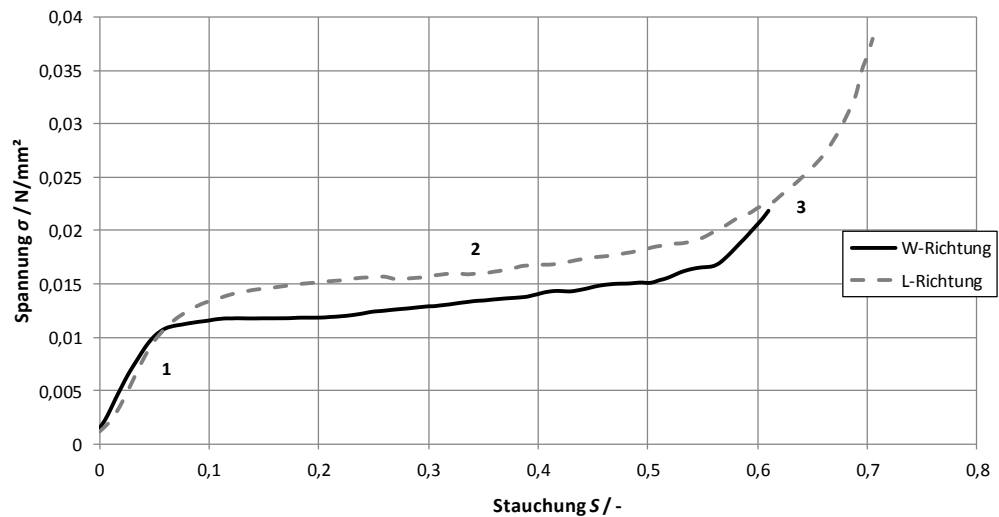


Abbildung 2.7: Gemittelte Spannungskurven einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Druckbelastung in L- und W-Richtung [7]

Die Spannungskurven der Honigwabenstruktur unter einer Neigung des Materials in einem Winkel von 40° beziehungsweise 60° in L- und W-Richtung gegenüber der Hauptachsenrichtung T (siehe Abbildung 2.8, Abbildung 2.9) zeigen, dass der Elastizitätsmodul und das Spannungsmaximum des linear elastischen Bereiches von dem Winkel der Materialneigung zur Belastungsrichtung abhängt. Bei einem größeren Winkel ist zu sehen, dass die Spannungswerte geringer ausfallen. Weiterhin ist zu erkennen, dass eine Materialdrehung in W-Richtung geringere Festigkeiten verursachen.

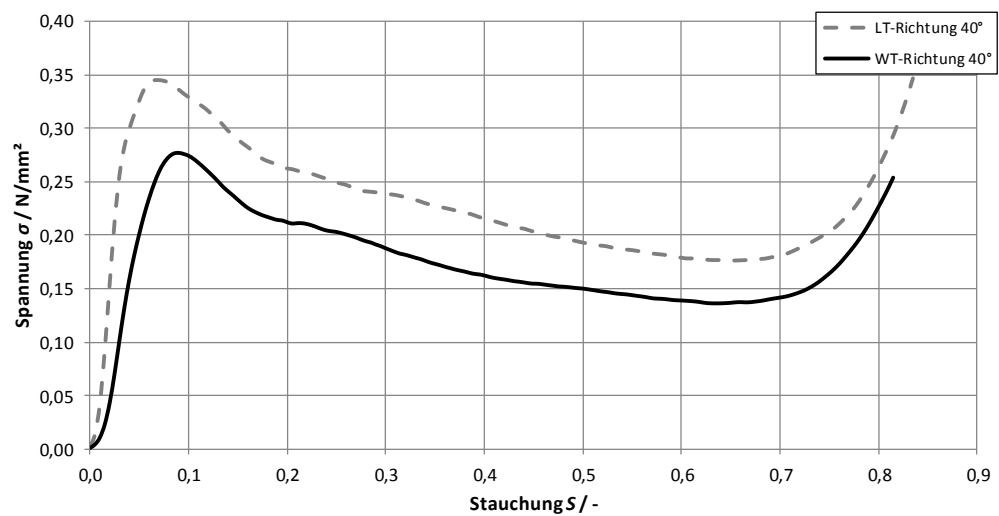


Abbildung 2.8: Gemittelte Spannungskurven einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Druckbelastung mit einer Neigung des Materials von 40° in die L- beziehungsweise W-Richtung [7]

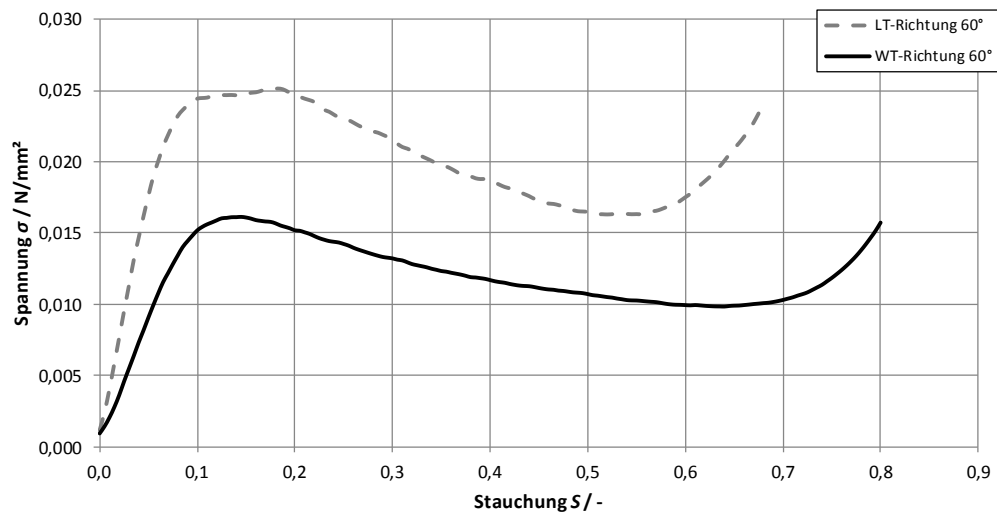


Abbildung 2.9: Gemittelte Spannungskurven einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Druckbelastung mit einer Neigung des Materials von 60° in die L- beziehungsweise W-Richtung [7]

In den Schubspannungskurven sind bis auf die LW-/WL-Richtung ebenfalls 3 Bereiche des Spannungsgraphen ersichtlich. Das Spannungsniveau richtet sich dabei nach der Ausrichtung der Zellwände gegenüber der Lastrichtung und ist in der LT-Richtung am größten.

Wird in Bezug auf die Schubspannungskurven in LT-/WT- beziehungsweise TL-/TW-Richtung (siehe Abbildung 2.10, Abbildung 2.11) die Honigwabenstruktur auf Schub beansprucht, befindet sich das Material zunächst in einem linear elastischen Bereich, der bis zum Erreichen der Schubfestigkeit anhält. Als Stabilitätsversagen tritt ein Schubbeulmuster in den Zellwänden auf, wodurch die Kurvensteigung abnimmt. Im Kurvenmaximum geschieht das eigentliche Schubversagen durch einen irreversiblen Zellwandbruch. [1]

Die Spannung fällt danach ab und verbleibt im weiteren Verformungsbereich auf einem nahezu konstanten Niveau. Der Nachversagensbereich ist durch ein Risswachstum in der Struktur unter annähernd 45° geprägt. Es ist möglich, dass die Werte der Schubspannungen in diesem Bereich durch eine Zugstreckung der restlichen intakten Waben geringfügig ansteigen. Danach tritt ein kompletter Spannungsabfall aufgrund eines Risses durch die gesamte Honigwabenstruktur auf, sodass dies das vollständige Materialversagen darstellt. [1]

Bei einer Schubbelastung in LW-/WL-Richtung ist keine linear-elastische Zone ersichtlich (siehe Abbildung 2.12), da sich die Zellwände zunächst einheitlich ausrichten und anschließend gestreckt werden. Die Spannung steigt solange an, bis die Zugfestigkeit der ersten Zellwand erreicht ist und ein Riss in der Zellwand entsteht. Nach dem Erreichen des ersten Spannungsmaximums werden weitere Zellwandreihen bis zum Bruch gestreckt, wodurch sich weitere Spannungsmaxima ausbilden. Dieser Vorgang wiederholt sich kontinuierlich bis zu einem Versagen der kompletten Honigwabenstruktur. [1]

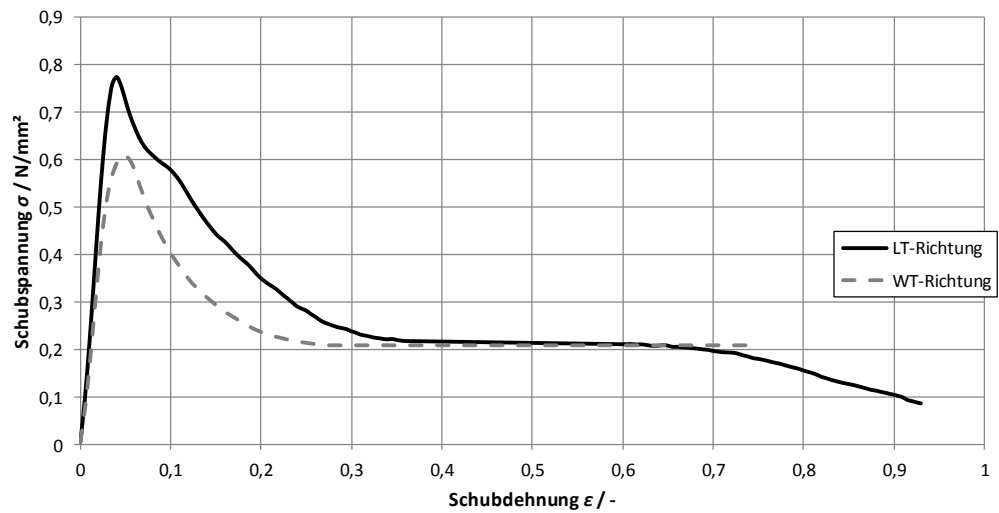


Abbildung 2.10: Gemittelte Schubspannungskurven einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Schubbelastung in LT-/WT-Richtung [7]

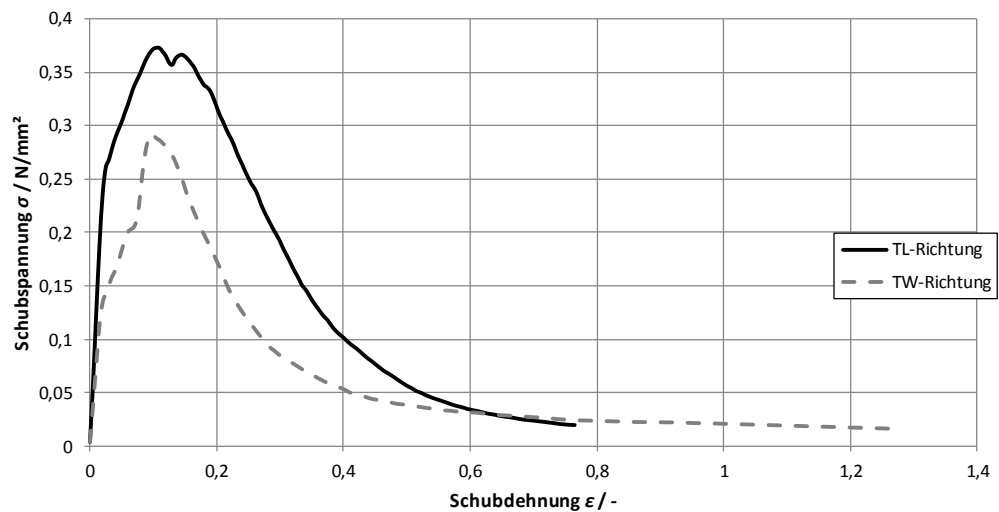


Abbildung 2.11: Gemittelte Schubspannungskurven einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Schubbelastung in TL-/TW-Richtung [7]

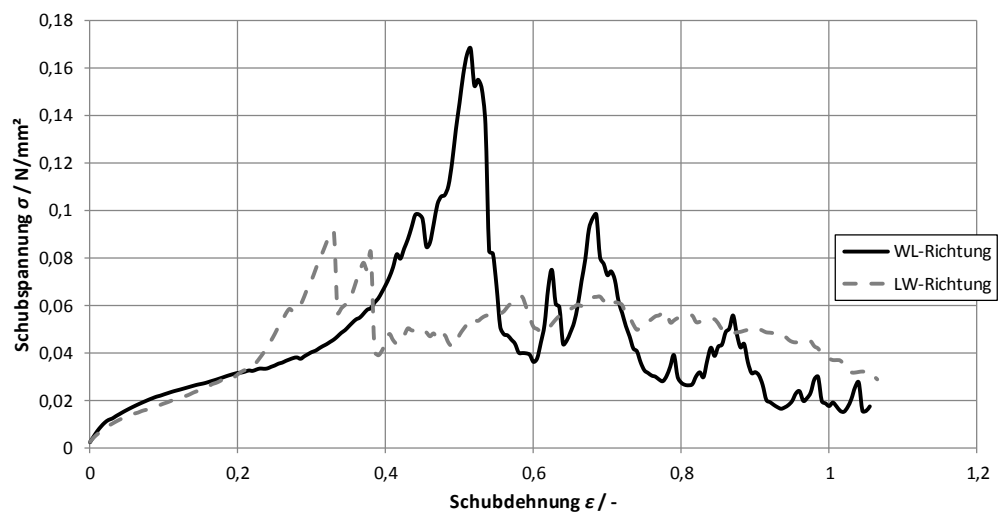


Abbildung 2.12: Gemittelte Schubspannungskurven einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Schubbelastung in WL-/LW-Richtung [7]

Im Vergleich zu quasistatischen Druck- und Schubbeanspruchungen kommt es bei dynamischen Beanspruchungen zu höheren Festigkeiten, Steifigkeiten und größeren Energieabsorptionen der Aluminium-Honigwabenstruktur. Diese werden durch Trägheitseffekte in den Zellwänden erklärt. [1]

2.2.2. Impactszenarien an der Honigwabenstruktur

Neben den Druck- und Schubtests wurde der Honigwabenstruktur experimentell über ein Pendel mit einem frontal angebrachten Einschlagkörper Impactbelastungen ausgesetzt. [9] Der Testaufbau dieser Experimente ist in der Abbildung 2.13 dargestellt. Die Honigwabenstruktur wird in diesen Versuchen so eingespannt, dass sie sich während des Impacts nicht bewegen kann. Diese Einspannung kann dabei auf einen Winkel von 15° angestellt werden, sodass der Impaktor auf eine geneigte Honigwabenstruktur auftrifft. Hinter der Honigwabenstruktur ist eine Betonwand angebracht, um Federwirkungen zu vermeiden. Der halbkugelförmige Impaktor besitzt dabei eine Länge von 145 mm, einen Durchmesser von 90 mm und eine effektive Masse von 57 kg, die auf die Honigwabenstruktur auftrifft. [9] Der Impaktor tritt an der Stelle mit der größten Geschwindigkeit horizontal in die Honigwabenstruktur ein. Dort besitzt die kinetische Energie ihren Maximalwert.

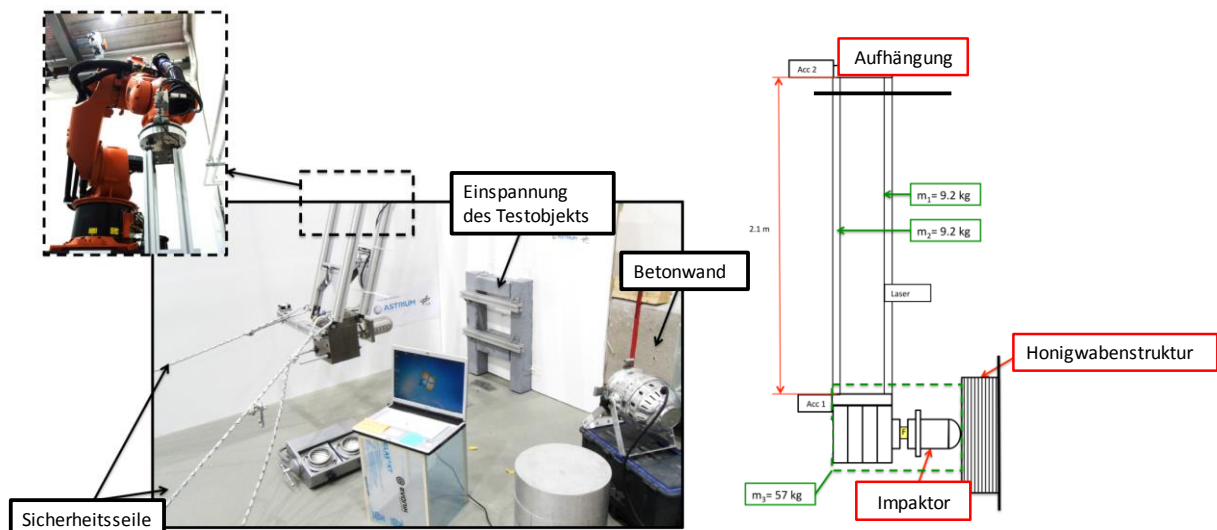


Abbildung 2.13: Testaufbau des Pendelversuchs [9]

Aus diesen Crashversuchen stehen die Kraft-, Beschleunigungs- und Verschiebungskurven mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s auf eine senkrechte und mit 2 m/s auf eine geneigte Honigwabenstruktur zur Verfügung (siehe Anhang A). Repräsentativ sind hierbei der Kraftverlauf eines senkrechten Impacts mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s (siehe Abbildung 2.14) und der Beschleunigungsverlauf eines geneigten Impacts mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s dargestellt (siehe Abbildung 2.15). Die Graphen beschreiben dabei einen Plateaubereich, in dem sich die Werte einige Zeit annähernd konstant verhalten an. Dieser Bereich ist jeweils durch das Zusammenfallen der Zellwände gekennzeichnet, sodass in Anbetracht der Graphen eine Vielzahl lokaler Maxima entsteht. Anzumerken sei, dass die Versuchskurven mit einer Honigwabenstruktur erstellt wurden, welche eine höhere Dichte von $49,7 \text{ kg/m}^3$ und eine größere Folienstärke von 0,001 mm gegenüber dem Honigwabenmaterial der Druck- und Schubtests aufweist. Der Werkstoff wird mit 3.1-3/16-0.001-P-5056 bezeichnet. Aufgrund des stärkeren Materials ist die Honigwabenstruktur in der Lage, dem Impaktor einen größeren Widerstand entgegen zu setzen. Dies beeinträchtigt die Testgraphen insofern, dass sie einen veränderten Verlauf annehmen.

Mit dem Honigwabenmaterial aus den Druck- und Schubtests wäre zu erwarten, dass die Graphen in Abbildung 2.14 und Abbildung 2.15 einen flacheren Anstieg im elastischen Bereich, einen niedrigeren Wert im Plateaubereich und ein späteres Einsetzen des Abfalls beschreiben. Die Eindringtiefe des Impactors wäre bei diesem Material höher. Zur quantitativen Erfassung der Abweichungen sind weitere Untersuchungen notwendig. Als Referenz gegenüber den Simulationsergebnissen werden dennoch diese Versuchsgraphen herangezogen.

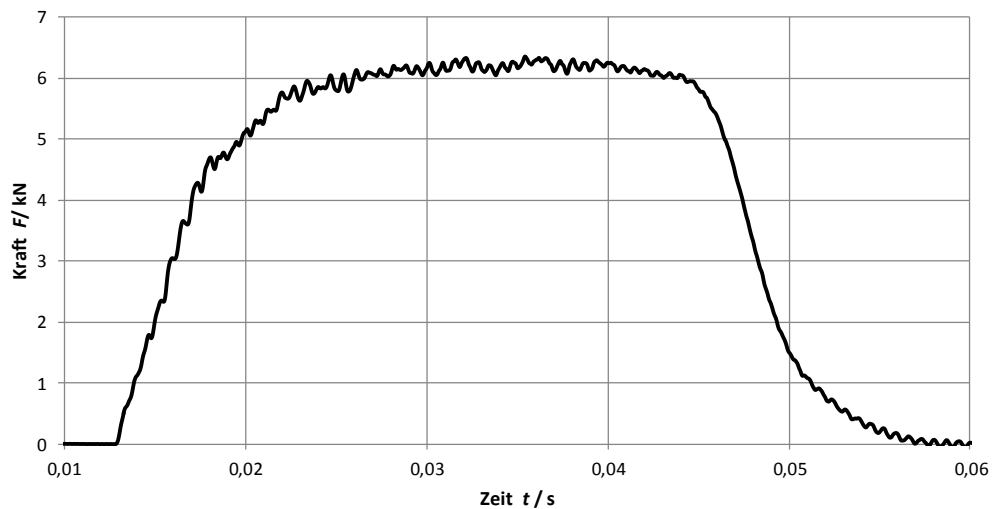


Abbildung 2.14: Auftretende Kräfte innerhalb eines senkrechten Impacts mit einer Anfangsgeschwindigkeit des Impactors von 3 m/s auf eine Aluminium-Honigwabenstruktur [9]

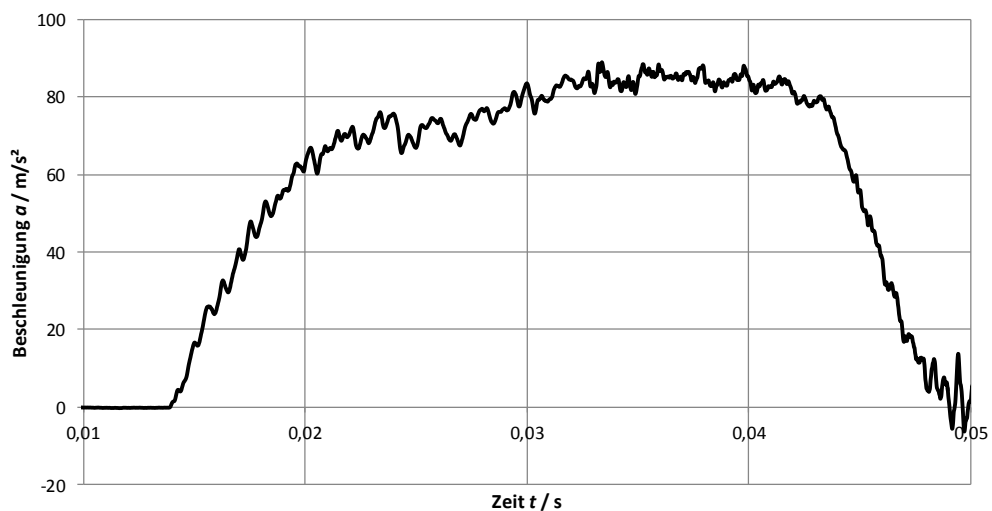


Abbildung 2.15: Beschleunigungsverlauf des Impactors mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 2 m/s auf eine geneigte Aluminium-Honigwabenstruktur (15°) [9]

Die Abbildung 2.16 zeigt ein Schnittbild eines senkrechten Impacts auf eine Honigwabenstruktur. Darin wird der Faltungsprozess unterhalb des eindringenden Körpers bestätigt, der diesen Plateaubereich mit der Vielzahl an lokalen Maxima hervorruft. Solch eine Faltungsprozess tritt ausschließlich unter einer Druckbelastung in T-Richtung auf.



Abbildung 2.16: Schnittbild einer Honigwabenstruktur nach einem senkrechten Impact

2.2.3. Zugversuch am Deckschichtmaterial

Im Vergleich mehrerer Materialien, die für die Deckschichten der Sandwichstruktur verwendet werden können, zeichnete sich unter Einbezug verschiedener Kriterien und Auswertung mehrerer experimenteller Impacttests ein Faserverbundmaterial mit Kevlar als vorteilhaft aus. [9] Diesem Verbundmaterial wird einem einachsigen Zugversuch unterzogen. [7] Die Materialprobe weist darin quasi-isotrope Materialeigenschaften in einer Ebene auf und besteht aus 2 Gewebelagen. Des Weiteren besitzt sie dabei eine Dicke von 2 mm, eine Länge von 250 mm und eine Breite von 25 mm. Im Ergebnis wird ein Elastizitätsmodul für die Längs- und Querrichtung von 13200 N/mm^2 und eine Zugfestigkeit von 208 N/mm^2 festgestellt. Die daraus entstandene Spannungscurve ist in der Abbildung 2.17 zu sehen und zeigt einen leicht degressiven Verlauf an.

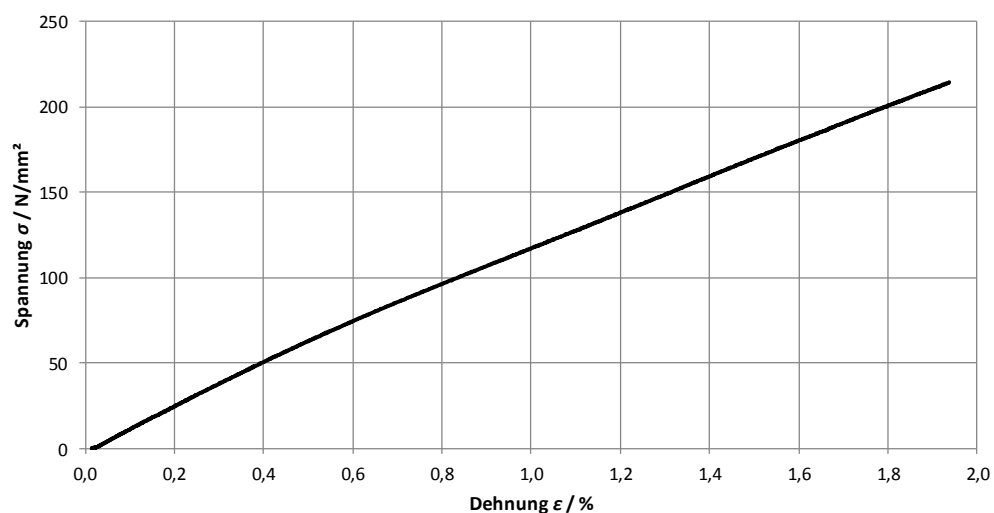


Abbildung 2.17: Spannungsverlauf innerhalb eines einachsigen Zugversuchs mit einem Faserverbundmaterial aus Kevlar [7]

2.2.4. Zugversuch am Klebschichtmaterial

Ein weiterer Zugversuch wurde zur Ermittlung der Zugfestigkeit einer Klebschicht in einer Sandwichstruktur durchgeführt. [7] Darin wird eine Zugfestigkeit der Klebschicht von $1,97 \text{ N/mm}^2$ festgestellt. Somit erfüllt diese Sandwichkomponente nicht die Konstruktionsrichtlinien, da sie vor dem Kernmaterial versagt. Anhand der Abbildung 2.18 ist ein linearer Spannungsverlauf der Klebschicht bis zum Versagen aufgezeigt.

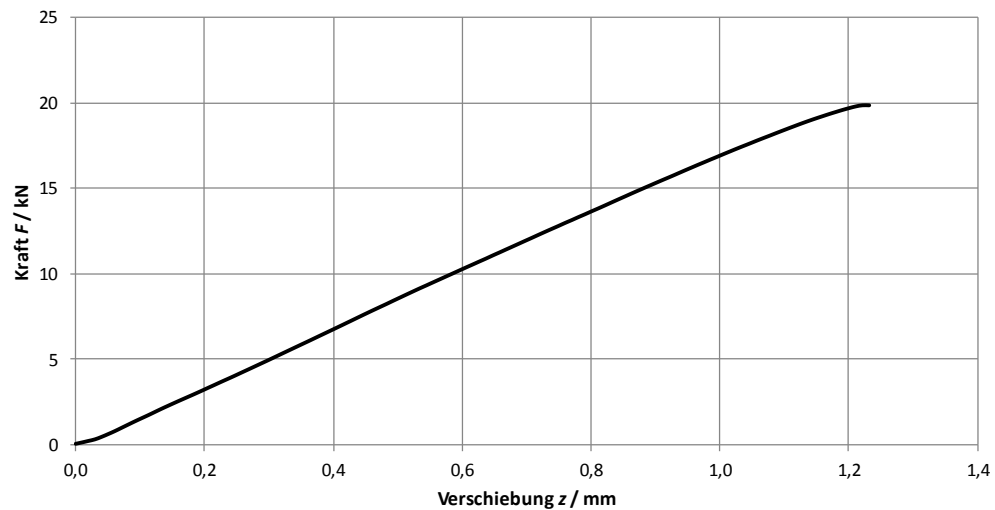


Abbildung 2.18: Auftretende Kräfte an einer Klebschicht unter Zugbeanspruchung [7]

3. Grundlagen zur Simulation von Aluminium-Honigwaben-Sandwichstrukturen

3.1. Allgemeines

FEM-Programme sind numerische Näherungsverfahren und werden heutzutage aus Effizienzgründen immer häufiger in der Praxis eingesetzt. Die Vorteile dieser Programme liegen unter anderem in einem geringeren Zeit- und Kostenaufwand, in der Vorhersage des dynamischen Antwortverhaltens sowie in der Darstellung des Versagensverhaltens einer Struktur. [10] Darüber hinaus liefern sie auch bei komplexen Strukturen unter beliebigen nichtlinearen Randbedingungen Informationen bezüglich den Spannungs- und Dehnungswerten, Werte zur Wellenverbreitung und Informationen zur Verteilung der absorbierten Energie. Bei der Anwendung solcher Programme muss dabei immer zwischen dem rechnerischen Aufwand und dem Grad der Ungenauigkeit eines Modells abgewogen werden. [1] [10]

In der Finiten-Elemente-Methode wird eine übergeordnete Struktur diskretisiert und mit einer Vielzahl kleinerer Elemente ausgedrückt. Die Ecken der Elemente besitzen Knoten, die die Elemente miteinander verbinden. Dadurch entsteht ein Netz. Zur Berechnung werden einzelne Ansatzfunktionen auf Elementebene erstellt, die das Gesamtverhalten einer globalen Struktur ausdrücken. Aufgrund einer hohen Komplexität der Strukturen kann dabei in vielen Fällen eine Lösung nicht exakt ausgerechnet, sondern lediglich angenähert werden. Somit ist der Einsatz numerischer Lösungsverfahren gerechtfertigt. Bei der Simulation von dynamischen Vorgängen wird neben der örtlichen Diskretisierung auch eine zeitliche vorgenommen. Die Bewegungsgleichung dafür lautet [1]:

$$\underline{\underline{M}} \cdot \underline{\underline{\ddot{u}}}(t) + \underline{\underline{D}} \cdot \underline{\underline{\dot{u}}}(t) + \underline{F}_{int}(t) = \underline{F}_{ext}(t) \quad (1)$$

Diese wird dabei zu gewissen Zeitpunkten innerhalb eines vorgegebenen Zeitraumes ausgewertet. Zur Lösung dieser Gleichung kann entweder ein implizites oder ein explizites Zeitintegrationsverfahren herangezogen werden. Die impliziten Zeitschrittverfahren benutzen relativ große Zeitschrittweiten, sodass sie eher für statische und langsam ablaufende Vorgänge benutzt werden sollten. [1] Für diese Art der Gleichungslösung können Programme wie ANSYS oder NASTRAN benutzt werden.

Werden stark nichtlineare, hochdynamische Vorgänge untersucht, sind Programme mit einer expliziten Zeitintegration und einer diagonalisierten Massenmatrix vorteilhaft. Dafür können Programme wie LS-DYNA oder PAM-Crash angewendet werden. [1] Dabei werden die oben genannte Bewegungsgleichung (1) zum Zeitpunkt t umgestellt und mithilfe der zentralen Differenzenmethode (siehe Abbildung 3.1) die Geschwindigkeiten und Verschiebungen zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ errechnet [1]:

$$\underline{\underline{\ddot{u}}}_t = \underline{\underline{M}}^{-1} \left(\underline{F}_{ext,t} - \underline{F}_{int,t} - \underline{\underline{D}} \cdot \underline{\underline{\dot{u}}}_t \right) \quad (2)$$

$$\underline{\underline{\dot{u}}}_{t+1/2\Delta t} = \underline{\underline{\dot{u}}}_{t-1/2\Delta t} + \underline{\underline{\ddot{u}}}_t \Delta t \quad (3)$$

$$\underline{u}_{t+\Delta t} = \underline{u}_t + \underline{\underline{\dot{u}}}_{t+1/2\Delta t} \Delta t \quad (4)$$

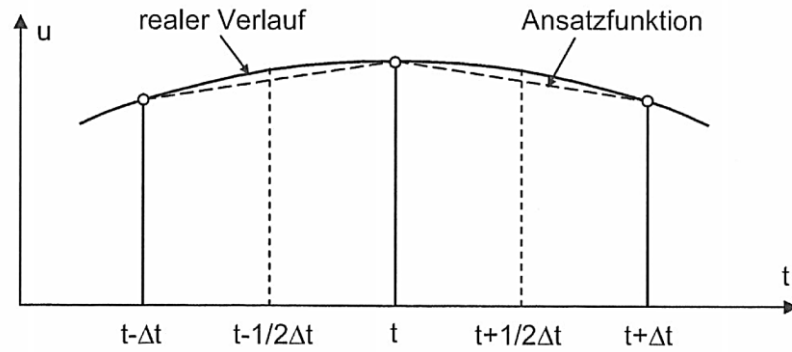


Abbildung 3.1: Prinzip des zentralen Differenzenverfahrens [1]

Über die neu berechneten Knotenverschiebungen werden nach jedem Zeitschritt die Geometrie aktualisiert und die Dehnungen sowie Dehnraten eines jeden Elementes berechnet. Daraus werden unter Zuhilfenahme des Werkstoffgesetzes die Spannungen ermittelt, aus denen sich wiederum die konzentrierten Knotenkräfte ergeben. Aus den Knotenkräften ergeben sich nun unter Berücksichtigung der Randbedingungen sowie der Masse die Beschleunigungen, die die Ausgangspunkte für die Geschwindigkeiten und Verschiebungen des nächsten Zeitpunktes darstellen. Werden dabei die lokalen geometrischen Beschreibungen in globale Daten transformiert, ergibt sich aus den Knotenverschiebungen der Dehnungs- und Verzerrungszustand der gesamten Struktur. Während des Simulationsprozesses findet dabei eine Anpassung des Zeitschrittes statt. [1] [11]

Der Vorteil expliziter Berechnungsverfahren liegt in der Einsparung von Rechenzeit, da nicht rechenintensiv für jeden Zeitschritt ein Gleichungssystem gelöst werden muss. Der Nachteil besteht darin, dass der Zeitschritt Δt immer kleiner als der kritische Zeitschritt sein muss, sodass das Verfahren gegen die richtige Lösung konvergiert. Allgemein bedeutet dies, dass die Informationsausbreitungsgeschwindigkeit des Systems kleiner als die vorhandene physikalische Ausbreitungsgeschwindigkeit der Belastung sein muss. [11] [12]

Der globale Zeitschritt wird in LS-DYNA über das Courand/Friedrich/Levy-Stabilitätskriterium ermittelt und entsteht aus dem minimalen Zeitschritt aller Elemente [13]:

$$\Delta t^{n+1} = a \cdot \min\{\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_N\} \quad (5)$$

Darin stehen N für die Anzahl der Elemente und a für einen Skalierungsfaktor, der in LS-DYNA mit TSSFAC ausgedrückt wird.

Für Volumenelemente berechnet sich der kritische Zeitschritt Δt_e eines Elementes aus [13]:

$$\Delta t_e = \frac{L_e}{\left(Q + (Q^2 + c^2)^{\frac{1}{2}}\right)} \quad (6)$$

Dabei stehen Q als eine Funktion der Volumenviskositätskoeffizienten C_0 und C_1 :

$$Q = \begin{cases} C_1 c + C_0 L_e |\dot{\epsilon}_{kk}| & \text{für } \dot{\epsilon}_{kk} < 0 \\ 0 & \text{für } \dot{\epsilon}_{kk} \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

L_e für die charakteristische Länge eines Elementes:

$$L_e = \frac{V_e}{A_{e_{max}}} \quad (8)$$

V_e für das Elementvolumen, $A_{e_{max}}$ für die Fläche mit der größten Seite und c für die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, die für ein elastisches Material mit einer konstanten Querkontraktionszahl mit folgender Formel berechnet wird:

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (9)$$

Bei Schalenelemente berechnet sich die Zeitschrittweite aus [13]:

$$\Delta t_e = \frac{L_{char}}{c} \quad (10)$$

mit der charakteristischen Länge L_{char} eines Elements, für deren Berechnung in diesem Fall in LS-DYNA 3 Optionen zur Auswahl stehen [13] und der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c :

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (11)$$

Um Rechenzeit zu sparen, gibt es somit die Möglichkeiten, die Kantenlänge der Elemente zu vergrößern oder Materialien mit hoher Dichte beziehungsweise geringer Steifigkeit zu benutzen.

LS-DYNA arbeitet mit Kontrollkarten unter anderem zur Erstellung von Elementeigenschaften, zur Bildung von Materialmodellen und der Zuweisung dieser beiden zu den jeweiligen Elementen. Die für diese Arbeit relevanten Materialmodelle werden in den nachfolgenden Kapiteln näher vorgestellt.

3.2. Materialmodell #126 (*MODIFIED HONEYCOMB)

Das Materialmodell #126 ist eine Erweiterung des Materialmodells #26 und kann für eine Honigwabenstruktur mit orthotropen Materialverhalten benutzt werden. In diesem Materialmodell gibt es 3 Versionen, die auf 3 unterschiedlichen Gleichungen für die jeweiligen Fließflächen basieren.

3.2.1. Materialmodell #126 Version 1

Für die Generierung eines Materials mit der ersten Version des Materialmodells #126 werden für die 6 Spannungskomponenten in die Hauptachsenrichtungen je eine Kurve für die Fließspannung benötigt. Diese Kurven bestehen aus 3 Spannungs-Stauchungs-Kurven für Druckbeanspruchungen und 3 Schubspannungs-Schubdehnungs-Kurven für Schubbeanspruchungen. Um ein Material zu erstellen, müssen neben den Spannungskurven auch die effektiven Materialkennwerte bekannt sein beziehungsweise über Versuche ermittelt werden. Dieses Materialmodell berücksichtigt ein nichtlineares elastisch-plastisches Materialverhalten für die jeweiligen Spannungskomponenten des nicht verdichteten Materials getrennt, sodass die Spannungskomponenten in a-, b- und c-Richtung des virtuellen Materials, welche die drei Hauptachsenrichtungen eines Elementes beschreiben, komplett unabhängig voneinander sind. [13] Der AOPT-Parameter erlaubt dabei dem Benutzer, Richtungen für das loka-

le Materialachsensystem festzulegen. Eine Dehnungsvariable β erzeugt während der Verformung einen Widerstand in die Hauptachsenrichtungen eines Elementes und ist von der momentanen Komprimierung des Materials V und dem relativen Volumen des vollständig verdichteten Materials V_f abhängig. Das relative Volumen V besitzt dazu Beginn den Wert 1. Dadurch verändern sich die Module linear mit ihrem relativen Volumen von ihren Anfangswerten bis zur vollständigen Komprimierung. [13]

$$E_{aa} = E_{aa0} + \beta(E - E_{aa0}) \quad (12)$$

$$G_{ab} = G_{ab0} + \beta(G - G_{ab0}) \quad (13)$$

mit:

$$\beta = \max\left[\min\left(\frac{1-V}{1-V_f}, 1\right), 0\right] \quad (14)$$

Für E_{bb} , E_{cc} , G_{bc} und G_{ac} werden dieselben Gleichungen wie (12) und (13) verwendet. Dabei ist G der Schubmodul für das vollständig verdichtete Honigwabenmaterial und berechnet sich mit:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (15)$$

Die Spannungskurven definieren den Spannungswert, wenn das Material deformiert wird. Zu Beginn der Spannungsberechnung werden jede Elementspannung und Dehnungsgeschwindigkeit in ein lokales Elementkoordinatensystem transformiert. Zur Spannungsberechnung des nicht verdichteten Materials wird die Spannung des vorherigen Zeitschrittes zugrunde gelegt und mit dem Produkt des Dehnungssinkrements und dem E-Modul in die jeweilige Richtung summiert. [1]

$$\sigma_{aa}^{n+1^{trial}} = \sigma_{aa}^n + E_{aa}\Delta\epsilon_{aa} \quad (16)$$

$$\sigma_{ab}^{n+1^{trial}} = \sigma_{ab}^n + 2G_{ab}\Delta\epsilon_{ab} \quad (17)$$

Die Spannungen $\sigma_{bb}^{n+1^{trial}}$, $\sigma_{cc}^{n+1^{trial}}$, $\sigma_{bc}^{n+1^{trial}}$ und $\sigma_{ca}^{n+1^{trial}}$ berechnen sich analog zu den Gleichungen (16) und (17).

Danach wird überprüft, ob jede Komponente der neu berechneten Spannung den maximal erlaubten Wert, der durch die vorgegebene Spannungskurve definiert ist, nicht überschreitet. Ist dies der Fall (siehe Gleichung (18)), wird der neu berechnete Wert des Spannungstensors durch den jeweiligen Spannungswert der Kurve ersetzt. [S. 22, [1]] Der Parameter λ beschreibt in diesen Gleichungen eine Dehnungsgeschwindigkeit, die als fester Wert oder als eine Funktion in das Materialmodell eingelesen wird. Der Parameter $\sigma_{ij}(\epsilon_{ij})$ wird durch die Spannungskurven definiert. [13]

Wenn:

$$|\sigma_{ij}^{n+1^{trial}}| > \lambda\sigma_{ij}(\epsilon_{ij}) \quad (18)$$

ist, dann:

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}(\varepsilon_{ij}) \frac{\lambda \sigma_{ij}^{n+1, trial}}{\sigma_{ij}^{n+1, trial}} \quad (19)$$

In Bezug auf das Materialmodell #126 verbleiben die Komponenten der Spannungstensoren unter Verwendung der Volumenelementtypen 0 und 9 im ungekoppelten Zustand und die Elastizitätsmodule für den nicht verdichteten Zustand werden angewendet. Der E-Modul für das vollständig verdichtete Material wird dabei ignoriert. Mit Nutzung der Elementtypen 1 und 2 wird bei einem vollständig verdichteten Material ein elastisch-perfekt-plastisches Materialverhalten angenommen. Der Elastizitätsmodul für das vollständig verdichtete Material E ist in diesem Materialmodell für alle Richtungen des Materials gleichermaßen gültig. [13] Die Spannungstensoren des vollständig verdichteten Materials ergeben sich aus:

$$s_{ij}^{trial} = s_{ij}^n + 2G\Delta\varepsilon_{ij}^{red, n+\frac{1}{2}} \quad (20)$$

mit dem reduzierten Dehnungssinkrement:

$$\Delta\varepsilon_{ij}^{red} = \Delta\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \Delta\varepsilon_{kk} \delta_{ij} \quad (21)$$

Es wird als nächstes verglichen, ob die definierte Fließspannung σ_Y des vollständig verdichteten Materials durch die effektive Spannung überschritten wird. Trifft dies zu, wird die Spannungskomponente auf den Wert der Fließfläche zurückgesetzt. [13]

$$s_{ij}^{n+1} = \frac{\sigma_Y}{s_{eff}^{trial}} s_{ij}^{trial} \quad (22)$$

mit:

$$s_{eff}^{trial} = \left(\frac{3}{2} s_{ij}^{trial} s_{ij}^{trial} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

Danach wird der Druck über den Kompressionsmodul K berechnet:

$$p^{n+1} = p^n - K\Delta\varepsilon_{kk}^{n+\frac{1}{2}} \quad (24)$$

mit:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (25)$$

Anschließend wird der endgültige Wert der Cauchy-Spannung ermittelt. [13]

$$\sigma_{ij}^{n+1} = s_{ij}^{n+1} - p^{n+1} \delta_{ij} \quad (26)$$

Nachdem die Spannungsberechnung vollzogen ist, werden die Spannungen in die globale Konfiguration zurücktransformiert. [13]

In der Abbildung 3.2 ist beispielhaft eine Spannungskurve des Materialmodells #126 dargestellt. Diese Kurve sollte modifiziert werden, sodass die Fließspannung bei einer Dehnung von 0 nicht den Spannungswert 0 besitzt. Weiterhin sollte die Kurve bis in negative Dehnungen verlaufen, um Fehler in der Berechnung zu vermeiden (1). Dies ist signifikant, da sonst die Extrapolation der Spannung in negative Regionen verläuft. Des Weiteren ist ein Weg für die Entlastung bzw. erneute Belastung des Materials aufgezeigt (2). Die Steigung der Entlastungstangente übersteigt dabei die der Belastungstangente und basiert auf einem interpolierten Elastizitätsmodul (3). [13]

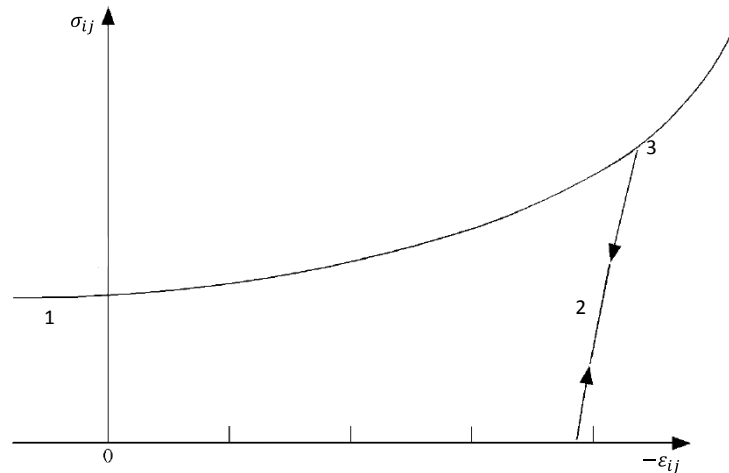


Abbildung 3.2: Beispiel einer Spannungskurve im Materialmodell #126 [13]

Ein Nachteil, weshalb noch weitere Versionen des Materialmodells geschaffen wurden, besteht darin, dass diese Version zu hohe Fließspannungen der Honigwabenstruktur bei Belastungen, die nicht in den Hauptbelastungsrichtungen liegen, prognostiziert. Die Fließfläche kann als ein Quader dargestellt werden, dessen Zentrum dem Koordinatenursprung der drei Hauptachsenrichtungen entspricht. Für die XY-Ebene wird dieser Quader beispielhaft in der Abbildung 3.3 auf der rechten Seite gezeigt. [14] Es ist zu sehen, dass bei einer Drehung des Koordinatensystems größere Fließspannungen erzeugt werden.

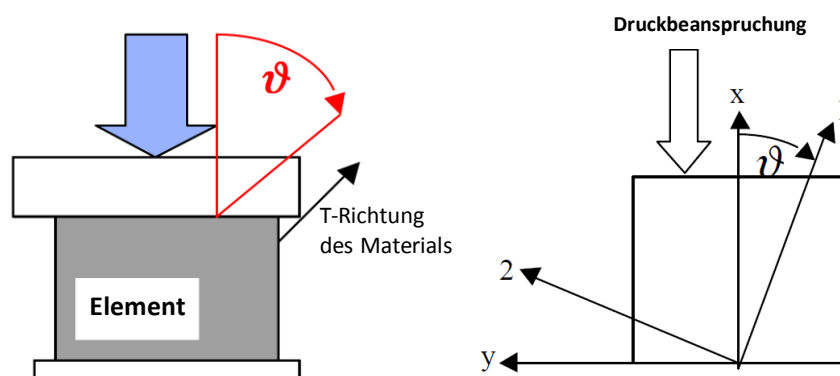


Abbildung 3.3: schematische Darstellung einer Druckbelastung auf eine Materialprobe mit einer geneigten Materialrichtung (links) / Abbildung der Fließfläche innerhalb des Materialmodells #126 Version 1 (rechts) [14]

Auf analytischem Weg [14] kann dabei für jede Komponente der Hauptachsenrichtung zunächst ein gewisser Wert für die Fließspannung angenommen werden. Befindet sich die Spannung eines Elementes unter dieser Fließspannung, verbleibt das Element im linear elastischen Bereich.

$$|\sigma_{ij}| \leq \sigma_{ij}^y(\varepsilon_v) \quad (27)$$

Unter Vernachlässigung der dritten Dimension lautet die allgemeine Formel zur Spannungstransformation:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\sigma_{11}^y & -\sigma_{12}^y \\ -\sigma_{12}^y & -\sigma_{22}^y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \quad (28)$$

Wird wie bei der Abbildung 3.3 eine Druckkraft in x-Richtung auf das Element ausgeführt und das Material um den Winkel ϑ gedreht, berechnet sich die Spannung aus der Koordinatentransformation zu:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\sigma_{11}^y & -\sigma_{12}^y \\ -\sigma_{12}^y & -\sigma_{22}^y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \quad (29)$$

Werden nun die Spannungen so groß, dass sie die Fließgrenze überschreiten, tritt eine plastische Deformation auf. Dann lautet die Gleichung (29) im Fall einer Druckbelastung in x-Richtung:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11}^y & \sigma_{12}^y \\ \sigma_{12}^y & \sigma_{22}^y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \quad (30)$$

Da dadurch alle Spannungskomponenten negativ werden und die Fließspannung durch einen positiven Wert gekennzeichnet ist, ergibt die Gleichung (30) folgende Lösung [14]:

$$|\sigma_{xx}| = (\cos \vartheta)^2 \cdot \sigma_{11}^y + (\sin \vartheta)^2 \cdot \sigma_{22}^y + 2 \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \vartheta \cdot \sigma_{12}^y \quad (31)$$

In dieser Gleichung ist ersichtlich, dass die von der Hauptachsenrichtung abweichende Spannung auch von dem Wert der Schubspannung abhängt. Dies ruft ein unerwünschtes Materialverhalten hervor, da die Schubfestigkeit in diesem Materialmodell nicht null beträgt. Somit kommt es bei schrägen Belastungen zu überhöhten Fließspannungswerten des Materials.

3.2.2. Materialmodell #126 Version 2

Die zweite Materialversion bezieht sich auf eine schräge isotrope Fließfläche, um die Vorhersage der Druckfestigkeit des Materials zu verbessern. Die Materialeigenschaften im elastischen Bereich werden wie in der ersten Materialversion berechnet. Sie sind jedoch in allen Richtungen innerhalb einer gewissen Ebene gleich ($E_{22U} = E_{33U}, G_{12U} = G_{13U}$), sodass dieses Materialmodell für ein transversal isotropes Material geeignet ist. [13]

Die Spannungsberechnung in der zweiten Version beruht auf eine Formel für eine einachsige Grenzspannung σ^Y (32), welche von dem Winkel φ zwischen der starken Materialachse und der jeweiligen Hauptachsenrichtung sowie von der volumetrischen Dehnung ε^{vol} abhängig ist. Darin steht die Spannungsfunktion σ^f für die Fließspannung über den Winkel zwischen der Hauptachsenrichtung T und der Belastungsrichtung. Diese Fließspannungsfunktion nimmt mit Erhöhung des Winkels φ ab. Die Variablen σ^s und σ^w werden durch Spannungsfunktionen unter Druckbelastung der starken und schwachen Materialachse beschrieben. [7] [13]

$$\sigma^y(\varphi, \varepsilon^{vol}) = \sigma^f(\varphi) + (\cos \varphi)^2 \sigma^s(\varepsilon^{vol}) + (\sin \varphi)^2 \sigma^w(\varepsilon^{vol}) \quad (32)$$

Diese Version des Materialmodells hat den Nachteil, dass sie oftmals unter Schubmoden mit geringem Schubwiderstand versagt. Es besteht keine Option, den Schubwiderstand zu erhöhen, ohne dabei das Materialverhalten in die einachsige Materialrichtung zu ändern. Um dies zu verbessern, wurde eine dritte Materialversion entwickelt. [13]

3.2.3. Materialmodell #126 Version 3

Die dritte Version des Materialmodells bietet die Möglichkeit der Spannungsberechnung über zusätzliche Eingaben, ohne das Materialverhalten in die Hauptachsenrichtung zu beeinflussen. Die Spannungen werden über folgende Funktionen berechnet:

$$\sigma_p^Y(\varepsilon^{vol}) = \sigma_p^Y + \sigma^S(\varepsilon^{vol}) \quad (33)$$

$$\sigma_d^Y(\varepsilon^{vol}) = \sigma_d^Y + \sigma^S(\varepsilon^{vol}) \quad (34)$$

Dabei sind die hydrostatische Grenzspannung $\sigma_p^Y(\varepsilon^{vol})$ und die Schubgrenzspannung $\sigma_d^Y(\varepsilon^{vol})$ abhängig von der Funktion der Materialverdichtung $\sigma^S(\varepsilon^{vol})$ in Richtung der starken Materialachse und der volumetrischen Dehnung ε^{vol} . Weiterhin geben hierbei die Variablen σ_p^Y und σ_d^Y Anfangswerte unter Druck- und einfacher Schubbeanspruchung an.

Diese Materialversion ist fehleranfällig, wenn die Spannungsfunktion $\sigma_p^Y(\varepsilon^{vol})$ stark abfällt, die Steigungen der Funktionen $\sigma^S(\varepsilon^{vol})$ und $\sigma^W(\varepsilon^{vol})$ sehr groß werden oder sich die Differenzen der Spannungswerte zwischen $\sigma^Y(\varphi, \varepsilon^{vol})$, $\sigma_p^Y(\varepsilon^{vol})$ und $\sigma_d^Y(\varepsilon^{vol})$ stark erhöhen. [13]

3.3. Materialmodell #54/55 (*MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE)

Das Materialmodell #54 enthält ein linear-elastisches Materialverhalten und einen implementierten Crashfront-Algorithmus. Es gilt sowohl für orthotrope Materialien als auch für Faserverbundwerkstoffe. Ursprünglich ist es für unidirektionale Faserverbundschichten vorgesehen, sodass das Materialmodell von einem spröden Verhalten in Faserrichtung und einem duktilen Verhalten in Matrixrichtung ausgeht. Durch spezielle Eingaben können allerdings quasi-isotrope Eigenschaften abgebildet werden. Über das Setzen des Schubinteraktionsparameters β auf den Wert 1, wird in beiden Materialrichtungen ein einheitliches Zugversagenskriterium angesetzt. Eine Einschränkung bildet jedoch das Druckversagenskriterium, welches sich dennoch in beiden Richtungen unterscheidet. [1]

Dieses Modell basiert auf einem Fehlermodell nach Chang-Chang (Materialmodell #54) oder Tsai-Wu (Materialmodell #55). Darin werden unterschiedliche Versagensarten, die bei Faserverbundwerkstoffen auftreten können, beschrieben (siehe Abbildung 3.4). Die 4 Kriterien nach Chang-Chang unterscheiden zwischen Faser- und Matrixfehler, welche auf Festigkeitswerte infolge von Zug-, Druck- und Schubbeanspruchung einer einzelnen Faserverbundschicht basieren. [15] Nach Erreichen einer Festigkeitsgrenze oder eines anderen Fehlerparameters werden die Steifigkeitseigenschaften eines Elementes herabgesetzt. [16]

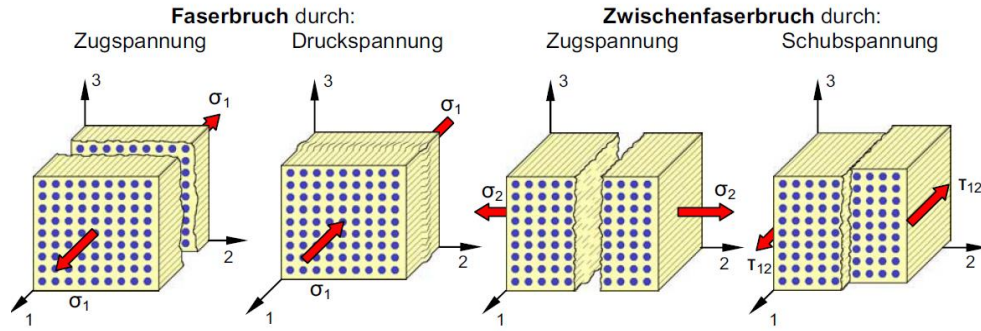


Abbildung 3.4: Mögliche Versagensarten eines Faserverbundwerkstoffes unter Zug-, Druck- und Schubspannung [16]

Im elastischen Bereich finden folgende Formeln Anwendung [12]:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1}(\sigma_1 - \nu_{12} \cdot \sigma_2) \quad (35)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2}(\sigma_2 - \nu_{21} \cdot \sigma_1) \quad (36)$$

$$2 \cdot \varepsilon_{12} = \frac{1}{G_{12}} \cdot \tau_{12} + \sigma \cdot \tau_{12}^3 \quad (37)$$

Nach Erreichen eines Versagenskriteriums wird nach Chang-Chang das individuelle Versagensverhalten der Lagen in Faserrichtung unter Zugbelastung mit folgender Formel [13] beschrieben:

$$\sigma_{aa} > 0: e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_T}\right)^2 + \beta \cdot \left(\frac{\tau_{ab}}{S_C}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{Fehler} \\ < 0 & \text{elastisch} \end{cases} \quad (38)$$

Der Parameter β beschreibt dabei den Einfluss der Schubspannung auf das Versagenskriterium der Faser unter Zugbeanspruchung. Im Fall eines Elementversagens gilt:

$$E_a = E_b = G_{ab} = \nu_{ab} = \nu_{ba} = 0 \quad (39)$$

In Faserrichtung unter Druckbelastung gilt für das Versagenskriterium die Formel:

$$\text{bei } \sigma_{aa} < 0: e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_C}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{Fehler} \\ < 0 & \text{elastisch} \end{cases} \quad (40)$$

bei Versagen gilt hierbei:

$$E_a = \nu_{ab} = \nu_{ba} = 0 \quad (41)$$

Weiterhin gilt für das Versagenskriterium in Matrixrichtung unter Zugbelastung:

$$\text{bei } \sigma_{bb} > 0: e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{ab}}{S_C}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{Fehler} \\ < 0 & \text{elastisch} \end{cases} \quad (42)$$

bei Versagen gilt hierbei:

$$E_b = \nu_{ba} = G_{ba} = 0 \quad (43)$$

In Matrixrichtung unter Druckbelastung gilt für das Versagenskriterium die Formel:

$$\sigma_{bb} < 0: e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_C}\right)^2 + \left(\left(\frac{Y_C}{2S_C}\right)^2 - 1\right) \cdot \frac{\sigma_{bb}}{Y_C} + \left(\frac{\tau_{ab}}{S_C}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{Fehler} \\ < 0 & \text{elastisch} \end{cases} \quad (44)$$

bei Versagen gilt hierbei:

$$E_b = \nu_{ba} = \nu_{ab} = G_{ab} = 0 \quad (45)$$

$$X_C = 2Y_C \quad \text{für 50\% Faservolumen} \quad (46)$$

Nach dem Eintreffen eines Matrixversagens unter Druckbeanspruchung quer zur Faserrichtung werden die elastischen Eigenschaften auf 0 gesetzt und die verbleibenden Zug- und Druckfestigkeiten der restlichen Lagen in Faserrichtung um den Faktor FBRT (Zug) bzw. YCFAC (Druck) nach folgender Formel herabgesetzt [12]:

$$X_{T_{neu}} = X_{T_{alt}} \cdot FBRT \quad (47)$$

$$Y_{C_{neu}} = Y_{C_{alt}} \cdot YCFAC \quad (48)$$

Wird das Fehlerkriterien nach Tsai-Wu gewählt, werden für die Faser unter Druck- und Zugbeanspruchung die gleichen Formeln wie beim Fehlerkriterium nach Chang-Chang verwendet. Die Fehlerkriterien für die Matrix unter Druck- und Zugbeanspruchung berechnen sich allerdings zu [13]:

$$e_{md}^2 = \frac{\sigma_{bb}^2}{Y_C Y_T} + \left(\frac{\tau_{ab}}{S_C}\right)^2 + \frac{(Y_C - Y_T) \cdot \sigma_{bb}}{Y_C Y_T} - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{Fehler} \\ < 0 & \text{elastisch} \end{cases} \quad (49)$$

Neben den Fehlerkriterien nach Chang-Chang ist es in diesem Materialmodell weiterhin möglich, ein Fehlerkriterium nach der minimalen Zeitschrittweite (TFAIL) eines Elementes zu definieren. Diese geringen Zeitschrittweiten werden dann erreicht, wenn ein Element hohe Verformungen erfährt. Im Nachversagensbereich kann zusätzlich ein perfekt-plastisches Materialverhalten bis zu einer definierten Bruchdehnung eingestellt werden. [1] Dabei beschreiben in LS-DYNA die Parameter DFAILT eine Bruchdehnung der Faser unter Zug-, DFAILC eine Bruchdehnung der Faser unter Druck- und DFAILM eine Bruchdehnung der Matrix unter Zug- beziehungsweise Druckbelastungen. Des Weiteren beschreibt der Parameter EFS eine effektive Bruchdehnung. Beläuft sich der Wert dieser Parameter auf null, werden ausschließlich die Versagenskriterien nach Chang-Chang verwendet. [12]

3.4. Materialmodell #58 (*MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC)

Das Materialmodell #58 ist für die Darstellung eines Faserverbundmaterials gültig und kann in der Simulation unter der Nutzung von Schalenelementen neben unidirektionale Faserschichten auch gewebte Fabrikate darstellen. In diesem Modell ist eine Theorie der Kontinuums-Schadensmechanik implementiert. [1] Dabei wird von einer kontinuierlichen Reduktion der Steifigkeit infolge zunehmender Mikromaterialschädigung durch Deformation des Materials ausgegangen, sodass ab einer gewissen Elementverformung mit einem nichtlinearen Materialverhalten gerechnet wird. Der nichtlineare Term gilt, solange sich das Material unterhalb einer maximalen Last befindet und nicht in die Nähe des Versagens kommt. Die reduzierte Steifigkeit wird durch interne Schadensparameter dargestellt, die die Entwicklung des Schadens innerhalb der Struktur beschreiben. [16]

Die Berechnungen der Festigkeiten in diesem Materialmodell basieren auf denselben Gleichungen (38-41) wie im Materialmodell #54/55 nach Chang/Chang. Ein Parameter für den Nachversagensbe-

reich SLIMx gibt in diesem Materialmodell eine Restfestigkeit nach dem Versagen einer Schicht an. Diese Restfestigkeiten unterscheiden dabei zwischen Zug-, Druck- und Schubbelastungen für die Faser und der Matrix.

In diesem Materialmodell gibt es mehrere Fehlerflächen, welche mit dem Parameter FS definiert werden. Die erste Fehlerfläche kann für UD-Schichten und die zweite sowie die dritte für Gewebelagen oder komplette Lamine eingesetzt werden. Folgende Fehlerflächen sind in diesem Materialmodell möglich [16]:

- FS=0.0: mit einem quadratischen Kriterium in Querrichtung und einem Grenzwert für die Längsrichtung
- FS=1.0: mit einem quadratischen Kriterium für die Quer- und die Längsrichtung
- FS=-1.0: mit drei voneinander unabhängigen Fehlerkriterien für die drei Spannungskomponenten

Die zweite Fehlerfläche wird mit den Gleichungen (45) – (50) genauer betrachtet. Darin findet eine Interaktion zwischen der Normal- und der Schubspannung statt, welche für eine Schadensentwicklung in Längs- und Querrichtung angenommen werden. Diese Fehlerfläche beinhaltet ein Festigkeitskriterium nach Hashin, in dem die enthaltenen Spannungen den Effektivwerten entsprechen. Sie basieren auf den konstitutiven Beziehungen eines Schädigungsmodells [16]:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{11} \\ \hat{\sigma}_{22} \\ \hat{\sigma}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-\omega_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-\omega_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1-\omega_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (50)$$

und

$$[k(\omega)] = 1/D \begin{bmatrix} (1-\omega_{11})E_{11} & (1-\omega_{11})(1-\omega_{22})\nu_{21}E_{22} & 0 \\ (1-\omega_{11})(1-\omega_{22})\nu_{12}E_{22} & (1-\omega_{22})E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D(1-\omega_{12})G \end{bmatrix} \quad (51)$$

mit

$$D = 1 - (1-\omega_{11})(1-\omega_{22})\nu_{12}\nu_{21} > 0 \quad (52)$$

Der Ansatz für die Entwicklung des Schadensparameters lautet:

$$\omega_i = 1 - \exp\left(-\frac{1}{m_i}\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_f}\right)^{m_i}\right) \quad (53)$$

mit der spezifischen Dehnung ε_f :

$$\varepsilon_{fx} = \frac{X_{T,c}}{E_x} \quad (54)$$

$$\varepsilon_{fy} = \frac{Y_{T,c}}{E_y} \quad (55)$$

In der Abbildung 3.5 ist schematisch eine Spannungskurve unter Zugbeanspruchung in Längsrichtung dargestellt. Der erste Teil des Graphen ist linear elastisch und wird mit dem Parameter EA festgelegt. Danach setzt der nichtlineare Spannungsterm ein, bis die maximale Festigkeit X_T erreicht wird. Nach der maximalen Festigkeit verringert sich die Spannung um den Spannungs-Reduzierungsfaktor $SLIMT1$ und bleibt anschließend konstant, bis das Element eine Dehnung erreicht, die durch $ERODS$ definiert ist. An diesem Punkt wird das Element gelöscht und aus den weiteren Berechnungen entfernt wird. Ähnliche Diagramme sind für Quer- und Druckbelastungen vorhanden.

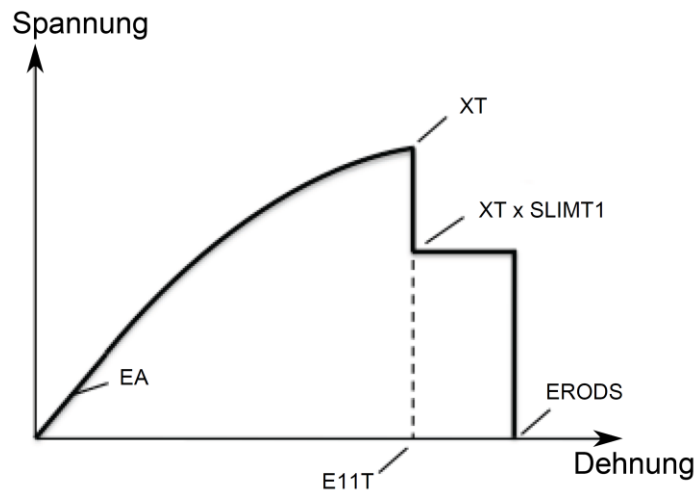


Abbildung 3.5: Prinzipieller Spannungsverlauf im Materialmodell #58 unter einer Zugbelastung in Längsrichtung [17]

3.5. Elementtypen

3.5.1. Volumenelemente

Volumenelemente bestehen üblicherweise aus Körpern mit 8 Knoten. Die Koordinaten ξ_j, η_j, ζ_j nehmen dabei den Wert von -1 bis +1 an (siehe Abbildung 3.6).

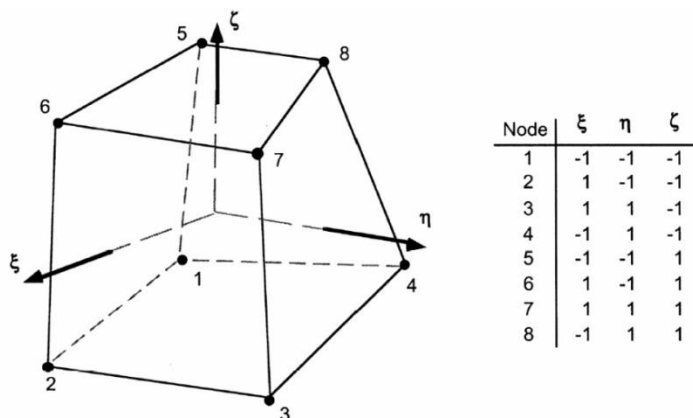


Abbildung 3.6: Abbildung eines Volumenelementes mit 8 Knoten [13]

Obwohl Volumenelemente auf einfache Weise zu berechnen sind, benötigen sie viel Speicherplatz und einen hohen rechnerischen Aufwand. Um diesen Aufwand zu reduzieren, wird mit einer diagonalen Massenmatrix gerechnet, in der die Diagonaleinträge den Summen aus den jeweiligen Zeilen der Massenmatrix entsprechen. [13]

Die Volumenintegration wird mithilfe der Gauß-Quadratur durchgeführt. [13] Dabei wird das Volumenelement durch einen Punkt im Zentrum des Koordinatensystems unter den Koordinaten $\xi = \eta = \zeta = 0$ angenähert. Ein Vorteil dieser 1-Punkt-Integration liegt in der Einsparung der Rechenzeit gegenüber einer 8-Punkt-Integration. An diesem Integrationspunkt findet die Berechnung der Spannungen statt. [13] In LS-DYNA wird eine solche 1-Punkt-Integration mit dem Elementtyp 1 durchgeführt. Dieser unterintegrierte Elementtyp wird standardmäßig in LS-DYNA angewendet. Der Elementtyp 2 hingegen ist ein vollintegrierter Elementtyp, der demzufolge eine höhere Rechenzeit in Anspruch nimmt.

Weitere unterintegrierte Elementtypen sind die Formulierungen 0 und 9. Sie repräsentieren Volumenelemente als nichtlineare Federelemente [18] und gelten speziell für die Darstellung einer Honigwabenstruktur unter dem Materialmodell #126. [13] Der Elementtyp 0 ist dabei für Elemente geeignet, die im Raum fixiert sind, wohingegen der Elementtyp 9 dann eingesetzt werden kann, wenn sich die Elemente im Raum bewegen können. Bei diesen Elementtypen rotiert das lokale Koordinatensystem mit der Verformung eines Elementes. Ein Nachteil dieser unterintegrierten Elementtypen wird mit einem Verlust der Elementsteifigkeit unter hohen Deformationen angegeben. [12]

3.5.2. Schalenelemente

Der Elementtyp 2 nach Belytschko-Tsay ist die voreingestellte Elementformulierung in LS-DYNA und kann problemlos für explizite Berechnungen verwendet werden. Durch kinematische Annahmen werden innerhalb dieses Elementtyps mathematische Vereinfachungen vorgenommen, um die Effizienz dieses Elementtyps steigern. Dabei wird ein mit dem Element rotierendes Koordinatensystem eingeführt, welches sich nach den 4 Knoten des Elementes richtet und mit dem Element verformt. Eine Achse zeigt darin stets in die Normalenrichtung des Elementes. Die translatorischen und kinetischen Bewegungen wie Geschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit und Verschiebung der 4 Knoten des Schalenelements werden äquivalent zu den unterintegrierten Volumenelementen auf den Mittelpunkt bezogen, an dem die Berechnung der Kräfte und Momente stattfindet. Anschließend können daraus die Spannungen ermittelt werden.

Durch diese Konzentration auf den Elementmittelpunkt wird erhebliche Rechenzeit gegenüber dem vollintegrierten Schalenelementtyp 16, bei denen an jedem Eckknoten die Spannungsberechnung stattfindet, eingespart. [13]

3.6. Nullenergiemoden

Nullenergiemoden, auch Hourglass-Moden genannt, sind nichtphysikalische energiefreie Deformationszustände. Dabei wird trotz Verformung des Elementes keine weitere Spannung im Integrationspunkt des Elementes berechnet. [12] Es gibt unterschiedliche Arten von Nullenergiemoden. Dabei sind die Moden unerwünscht, dessen Perioden typischerweise kürzer als die des Strukturverhaltens sind und zumeist oszillatorisch auftreten. Diejenigen Nullenergiemoden, die mit der Periode der Strukturantwort vergleichbar sind, können stabile kinematische Komponenten der globalen Deformationsmoden sein. Sie sind daher häufig annehmbar. [13]

Nullenergiemoden entstehen mit der Nutzung von unterintegrierten Elementtypen. Den Anlass zur Bildung dieser Nullenergiemoden geben Einzellasten beziehungsweise Kontaktkräfte auf einzelne Knoten. Die unterintegrierten Elementtypen erzeugen während der Berechnung einen Rangabfall der Elementsteifigkeitsmatrix und infolgedessen energiefreie Eigenformen (siehe Abbildung 3.7). [11]

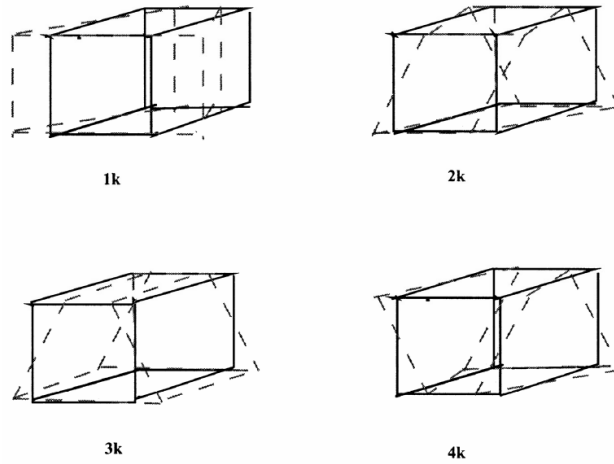


Abbildung 3.7: Darstellung von 4 der insgesamt 12 möglichen Nullenergie-Eigenmoden [13]

Es wird empfohlen, dass die Hourglass-Energie nicht mehr als 10% gegenüber der Inneren Energie während der Simulationsberechnung einnimmt. [19] Wird dies überschritten, können die Elemente unphysikalische Verformungen annehmen, wodurch das Modell zunehmend fehlerhaft wird. Die Bewertung der Ergebnisse liegt dabei im Rahmen des Betrachters.

Zur Vermeidung unerwünschter Nullenergiemoden können Algorithmen auf Basis der viskosen Dämpfung oder einer elastischen Steifigkeit eingeführt werden, die die stabilen globalen Modi nicht beeinflussen. [11] Eine Erhöhung des Hourglass-Koeffizienten führt allerdings zu einer künstlichen Versteifung des Materials, wodurch die Simulationsergebnisse verfälscht werden. [12] Für Elementverformungen mit großer Geschwindigkeit werden die viskosen Hourglass-Kontrolltypen 1-3 empfohlen. [19] Der Typ 3 kann dabei für stark verformbare Elemente von Vorteil sein. [19] Dabei setzt die Viskosität an den Elementknoten der Bewegungsgleichung an und kann durch Subtraktion eines viskosen Dämpfungsvektors auf der linken Seite der Bewegungsgleichung (51) ausgedrückt werden:

$$\underline{\underline{M}} \frac{\partial \underline{h}}{\partial t} + \underline{\underline{M}}_{kon} \underline{h} + \underline{F}_{int} - \underline{f} = \underline{F}_{ext} \quad (56)$$

Dabei ist $\underline{\underline{M}}$ die Massenmatrix, $\underline{\underline{M}}_{kon}$ die konvektive Massenmatrix, \underline{h} der Vektor der Knotengeschwindigkeiten, \underline{F}_{int} der Vektor der inneren Kräfte, \underline{f} der viskose Dämpfungsvektor und \underline{F}_{ext} der Vektor für die äußeren Kräfte. [13]

Die steifigkeitsbasierten Hourglass-Kontrolltypen 4 und 5 werden für langsam ablaufende Elementverformungen empfohlen, wenn beispielsweise die Anzahl der Zeitschritte sehr groß ist. Sie üben jedoch bei großen auftretenden Deformationen einen starken Einfluss auf das Modell aus, was sich nachteilig auf die Elementeneigenschaften auswirken kann. [19]

Zur Vermeidung von Hourglass-Energien können vollintegrierte Elementtypen verwendet werden. Bei diesen Elementtypen kann es jedoch zu Versteifungseffekten kommen. Sie nehmen auch mehr Rechenzeit in Anspruch. [1] Darüber hinaus kann zur Reduzierung der Hourglass-Energien die Vernetzung verfeinert oder die Art der Randbedingungen auf die virtuelle Struktur verändert werden. [19]

3.7. Kontakalgorithmen

In LS-DYNA wird eine Interaktion zweier Körper über 3 verschiedene Methoden beschrieben, wobei die dritte Methode, die Distributes-Parameter-Methode ausschließlich ein Gleiten der Kontaktpartner beinhaltet. Dieser Fall wird in dieser Arbeit nicht verwendet und daher nicht näher erläutert.

Die Kinematic-Constraint-Methode wird beispielsweise bei den Kontaktdefinitionen *CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE oder *CONTACT_TIEBREAK_SURFACE_TO_SURFACE angewendet. [12] Darin sind Aufprall- und Auflösungsbedingungen nach Hughes implementiert. Innerhalb dieser Methode werden globale Randbedingungen durch Transformation der Komponenten bezüglich der Verschiebungen der Slave-Knoten entlang der Kontaktschnittstelle eingeführt. Über diese Transformation werden die Freiheitsgrade der Knoten in die Normalenrichtung gesperrt. Um die Effizienz der Kontaktberechnung zu wahren, wird die Masse an die globalen Freiheitsgrade der Masterknoten gekoppelt. Die Bedingungen nach Hughes stellen dabei eine Impulserhaltung sicher. Ein Problem dieser Kontaktmethode besteht im Fall einer feineren Vernetzung der Master-Kontaktfläche gegenüber der Slave-Kontaktfläche. Dadurch können freie Masterknoten ungehindert das Slave-Knotenetz passieren, sodass ein Knittern der Oberfläche entstehen kann. [13]

In der Penalty-Methode werden lineare Federelemente zwischen den durchdringenden Knoten und der dazugehörigen Kontaktfläche gelegt, um die Überschneidungen der Elemente auszugleichen. Danach werden die Federsteifigkeitsmatrizen in den Gesamtsteifigkeitsmatrizen eingebaut. Die Kontaktkräfte werden anhand der Durchdringungen der Slave- beziehungsweise Masterknoten zum zugehörigen Kontaktsegment berechnet und den in Kontakt stehenden Knoten zugeordnet. Diese Methode beinhaltet die Gefahr von Nullenergiemoden, welche über die Einstellung eines SOFT-Parameters beeinflusst werden können. Eine höhere numerische Stabilität dieser Kontaktmethode kann zusätzlich durch eine Erhöhung der Kontaktsteifigkeit oder einer Reduzierung der Zeitschrittweite erreicht werden. [12]

3.7.1. SOFT-Parameter

Der SOFT-Parameter ist einer der meist genutzten Parameter bei der Modellierung einer Kontaktdefinition. [13] Damit wird die Steifigkeit k der Federelemente beeinflusst, über die die jeweilige Kraft in der Kontaktverbindung zwischen den Slave- und Master-Knoten errechnet wird.

Wird der voreingestellte Wert (SOFT=0) verwendet, wird bei der Durchdringung der Slave-Knoten durch das Mastersegment zur Bestimmung der Federsteifigkeit bezüglich des Kontaktes die Formel

$$k = \frac{f_s \cdot K \cdot A^2}{V} \quad (57)$$

für Volumenelemente verwendet. Darin sind f_s ein Skalierungsfaktor für die Steifigkeit, A die Fläche des in Kontakt stehenden Segmentes und V das Elementvolumen. Der Kompressionsmodul K berechnet sich aus den Elastizitätsmodulen E der in Kontakt stehenden Elemente und der Querkontraktionszahl ν . [12]

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \quad (58)$$

Für Schalenelemente gilt die Formel:

$$k = \frac{f_s \cdot K \cdot A^2}{\max(\text{Schalendiagonale})} \quad (59)$$

Dieser Ansatz läuft insbesondere dann stabil, wenn die Parameter der Materialsteifigkeiten beider Kontaktpartner annähernd gleich sind. Für eine zuverlässigere Kontaktberechnung ist eine Erhöhung der Kontaktsteifigkeit zu empfehlen. Dies kann jedoch zu Instabilitäten führen, wenn beispielsweise eines der in Kontakt stehenden Materialien eine geringe Dichte aufweist. In diesem Fall kann eine Verbesserung der Kontaktberechnung mit einer Reduzierung des Skalierungsfaktors für die Zeitschrittweite erreicht werden. [13]

Der Wert $\text{SOFT}=1$ kann für weiche Materialien, die überhöhte Durchdringungen zeigen, verwendet werden. Dieser Fall tritt dann ein, wenn 2 Materialien mit stark abweichenden Kennwerten aufeinandertreffen. Diese Formulierung besitzt eine Alternative zur Berechnung der Kontaktsteifigkeit. Darin wird die Steifigkeit der linearen Feder Elemente auf Grundlage der in Zusammenhang stehenden Knotenmassen und des globalen Zeitschrittes ermittelt, um eine numerische Stabilität zu gewährleisten. Sie beinhaltet 2 Knotenmassen, die mit einer Feder verbunden sind. Bei dieser Kontaktformulierung wird die Formel

$$k_{cs}(t) = 0.5 \cdot \text{SOFSCl} \cdot m^* \cdot \left(\frac{1}{\Delta t_{cs}(t)} \right) \quad (60)$$

angewendet, in der k_{cs} die Stabilitätskontaktsteifigkeit, SOFSCl ein Skalierungsfaktor, m^* eine Funktion der Massen der Slave- und Master-Knoten und Δt_{cs} den Zeitschritt bei der Kontaktberechnung beschreibt. [13]

$\text{SOFT}=2$ verhält sich ähnlich wie $\text{SOFT}=1$ und aktiviert einen segmentbasierten Kontaktalgorithmus, in dem Segmentmassen statt Knotenmassen verwendet werden. Bei Schalenelementen entsprechen die Segmentmassen den Elementmassen und bei Volumenelementen werden die Segmentmassen aus der Hälfte der Elementmassen der Volumenelementsegmente berechnet. Diese Kontaktformulierung kann nur für 2 aufeinander treffende Oberflächen oder für eine einzelne benutzt werden, jedoch nicht für einzelne Knoten, die auf eine Oberfläche treffen. [19] Die Formel zur Berechnung der Kontaktsteifigkeit lautet [13]:

$$k_{cs}(t) = 0.5 \cdot \text{SLSFAC} \cdot \left\{ \begin{matrix} \text{SFS} \\ \text{oder} \\ \text{SFM} \end{matrix} \right\} \cdot \left(\frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \right) \left(\frac{1}{\Delta t_{cs}(t)} \right)^2 \quad (61)$$

Der Wert der Zeitschrittweite in der Kontaktberechnung $\Delta t_{cs}(t)$ aktualisiert sich, wenn der globale Zeitschritt sich um mehr als 5% vergrößert. Dadurch wird eine numerische Stabilität in der Berechnung gewährleistet. Diese Kontaktformulierung verteilt die Kräfte realistischer und hat sich für schwierige Kontaktverhältnisse bewährt. [19] [13]

3.7.2. Reibungsparameter

Die Berechnung der Reibungskraft basiert auf den Grundlagen nach Coulomb. Sobald in der Kontaktberechnung eine Durchdringung zwischen einem Slave- und einem Masterknoten festgestellt wird, wirkt eine Normalkraft F_N auf das Knotenpaar, um die Durchdringungen auszugleichen. Die Reibungskraft F_R berechnet sich unter dieser Bedingung aus [12]:

$$F_R = \mu_C \cdot F_N \quad (62)$$

mit dem Reibungskoeffizienten μ_C :

$$\mu_C = \mu_D + (\mu_S - \mu_D)e^{-c \cdot |v_{rel}|} \quad (63)$$

Der Reibungskoeffizient μ_C ist darin abhängig von der relativen Geschwindigkeit v_{rel} der Körper zueinander, dem statischen Reibungsbeiwert μ_S und dem dynamischen Reibungsbeiwert μ_D . Die Dämpfungskonstante c stellt einen Übergang von statischer zu dynamischer Reibung dar. [12] [13]

3.8. Vorarbeiten zur virtuellen Darstellung eines Honigwaben-Sandwichstruktur

Eine Untersuchungen zur Erstellung der Fließspannungsfunktionen wurden anhand der 3 Versionen des Materialmodells #126 ausgeführt. [7] Die Werte der Fließspannungsfunktionen über den Winkel der Belastungsrichtung zur Hauptachsenrichtungen T (Abbildung 3.8) geben jeweils die Spannungswerte bei einer Stauchung von 20%, welcher der Fließspannung im Plateaubereich gleichkommt, unter dem entsprechenden Winkel an. Das Honigwabenelement wurde dabei von der T-Richtung in die L-Richtung gedreht.

Die Werte der Eingabekurve basieren auf den Ergebnissen experimenteller Druckbelastungsdaten auf das Honigwabenmaterial. [7] Im Vergleich zur Eingabekurve zeigt dabei die zweite Version die geringsten Abweichungen an. Allerdings ist die Materialversion fehleranfällig, da die Werte der Schubfestigkeit außer Acht gelassen werden. Deshalb sollte die dritte Version der zweiten vorgezogen werden (siehe Kapitel 3.2.2). Im Vergleich der Materialversionen 1 und 3 stellt die erste Version für das Materialmodell die bessere Lösung dar, da sich die dritte Version numerisch instabil zeigt und ein zum Teil unrealistisches Materialverhalten verursacht. [7] Die erste Materialversion besitzt gegenüber der dritten Version außerdem geringere Abweichungen in Bezug auf die Werte der Eingabekurve.

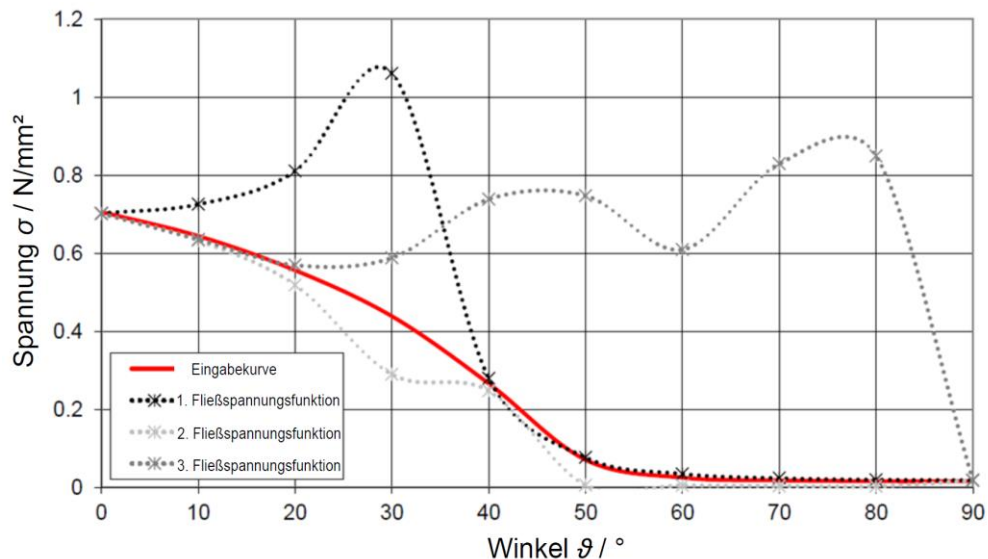


Abbildung 3.8: Darstellung der Fließspannungsfunktionen der verschiedenen Version im Materialmodell #126 gegenüber dem Winkel der Belastungsrichtung zur Hauptachsenrichtung T unter einer einachsigen Druckbeanspruchung [7]

Anhand eines einzelnen Honigwabenelementes wurde eine reine Druckbeanspruchung in T-Richtung unter Nutzung verschiedener Elementtypen untersucht. [7] Dabei wird festgestellt, dass die Spannung des Elementtyps 1 frühzeitig in den Verdichtungsbereich übergeht, wohingegen sich der Spannungsverlauf des Elementtyps 0 fortwährend nach der Eingabekurve richtet (siehe Abbildung 3.9).

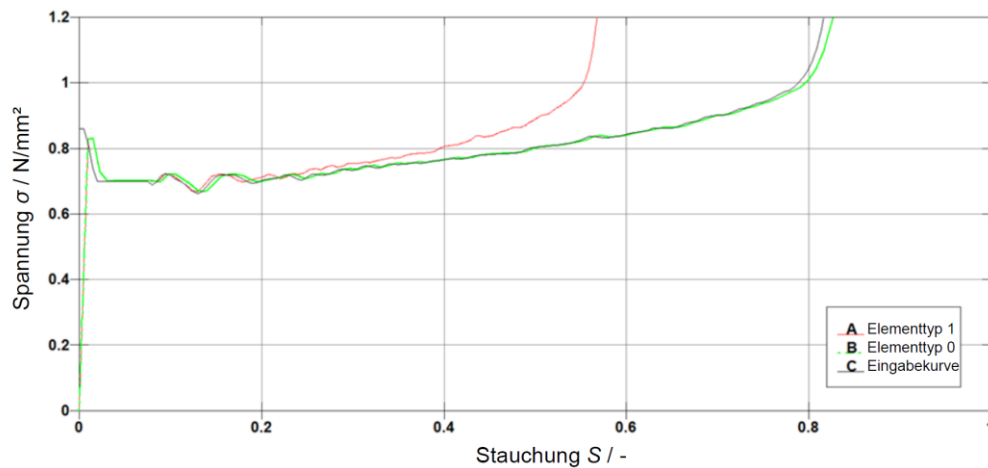


Abbildung 3.9: Spannungsverläufe eines Honigwaben-Volumenelementes in der ersten Version des Materialmodells #126 unter Variation der Elementtypen [7]

Außerdem wurden erste Untersuchungen mit der Deckschicht unter Einbezug eines Schubinteraktionsparameters BETA im Materialmodell #54/55 ausgeführt. [7] Beide Varianten der Simulationen geben allerdings nicht ansatzweise das Verhalten des Testgraphen wieder, da der simulierte Spannungsverlauf einen linearen Anstieg darstellt (siehe Abbildung 3.10).

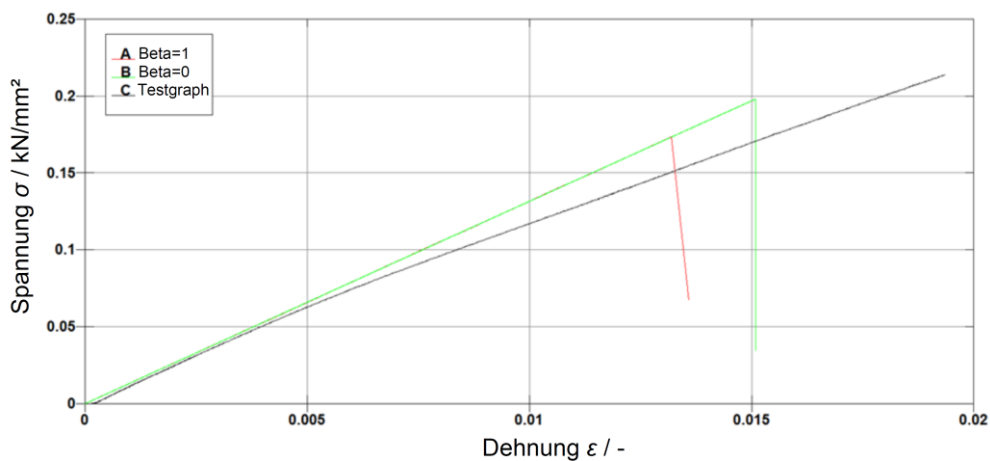


Abbildung 3.10: Spannungsverläufe eines Deckschichtelementes unter Einbezug eines Schubinteraktionsparameters (BETA) [7]

Der Kraftverlauf der virtuellen Klebschicht zeigt einen Versatz gegenüber dem Testgraphen an, so dass dieses Materialverhalten nicht dem Testfall entspricht (siehe Abbildung 3.11). [7] Es ist zu erkennen, dass die Kraft an Anfang der Simulation bereits mit einem negativen Wert gekennzeichnet ist und den Nullpunkt erst nach einer gewissen Verschiebung passiert.

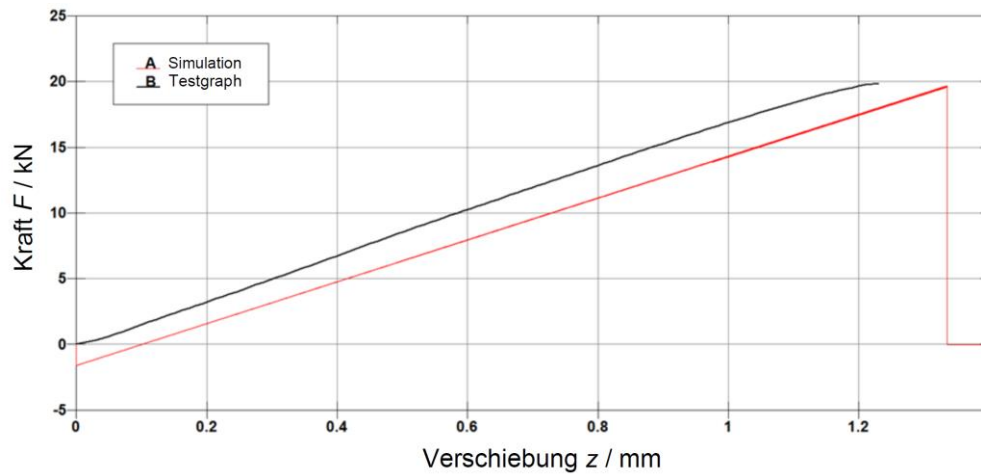


Abbildung 3.11: Spannungsverläufe innerhalb einer Klebschichtverbindung unter Zugbelastung [7]

4. Generierung und Analyse der virtuellen Sandwichkomponenten

Diese Arbeit knüpft an die Entwürfe der Vorarbeiten (siehe Kapitel 3.8) an und versucht mithilfe geeigneter FE-Modelle, das Materialverhalten der Sandwichkomponenten unter Einbeziehung verschiedener Lastfälle realitätsnah darzustellen, um es für zukünftige Untersuchungen als Referenzmodell nutzbar machen zu können. Das Pre- sowie Postprocessing findet in LS-PREPOST statt. Zur Berechnung wird der explizite Solver LS-DYNA herangezogen.

4.1. Vorgehensweise der Komponentenanalyse eines Sandwichmaterials

Das Lösungskonzept sieht eine schrittweise Validierung der einzelnen Sandwichkomponenten vor (siehe Abbildung 4.2). Darin wird zunächst die Kernkomponente näher betrachtet und als erstes durch ein einzelnes Element abgebildet. Dem Element werden die entsprechenden Material- und Elementeigenschaften sowie die Art der Kontrolle von Nullenergiemoden zugewiesen. Des Weiteren werden die Kontaktdefinitionen zu den angrenzenden Elementen festgelegt. Anschließend wird das Elementverhalten über entsprechende Simulationen unter Einbezug spezifischer Belastungen verifiziert. Schlägt diese Verifizierung des einzelnen Elementes fehl, wird die Simulation mit geänderten Parametern durchgeführt, um eine Approximation gegenüber der Spannungskurve zu erreichen. Wird das im Ergebnis simulierte, an die Versuchskurve angenäherte Materialverhalten des Elementes als ausreichend gut beurteilt, wird die Elementzahl der Kernkomponente erhöht und erneut den Belastungen ausgesetzt, um unter diesen Bedingungen das Materialverhalten zu evaluieren. Auf die Kernkomponente werden in diesen Untersuchungen mehrere Druck-, Schub- und Impactbelastungen unter diversen Randbedingungen ausgesetzt.

Diese Belastungen beschreiben diverse Landefälle, die eine Landeplattform ertragen sollte, ohne dass es zu einer Schädigung der Nutzlast kommt. Einige dieser möglichen Landefälle zeigt die Abbildung 4.1.

Der Aufprall auf eine ebene Fläche stellt dabei den günstigsten Landefall dar. Die Struktur wird dabei gleichermaßen in die Dickenrichtung der Struktur belastet. Dieser Vorgang ist einer einachsigen Druckbelastung der Honigwabenstruktur in T-Richtung gleich. Die Aufprallebene kann allerdings auch geneigt sein. Dadurch werden Kräfte in seitlicher Richtung sowie Schubbelastungen auf die Sandwichstruktur indiziert.

Bei einem senkrechten Aufprall auf ein Objekt mit einer kugelförmigen Oberfläche wird die Landestruktur lokal eingedrückt. Die auftreffende kinetische Energie konzentriert sich ausschließlich auf dieses Objekt und wird durch dieses aufgefangen. Der Geschwindigkeitsvektor beim Auftreffen der Landeplattform kann dabei auch eine horizontale Komponente besitzen.

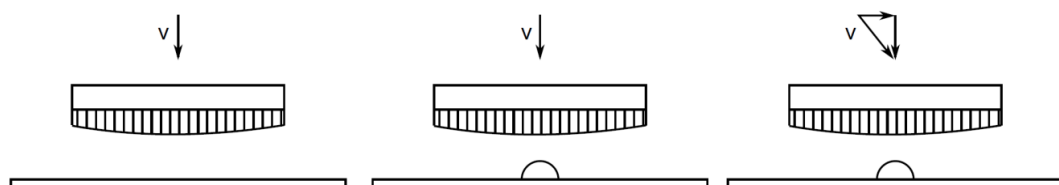


Abbildung 4.1: Darstellung einiger möglicher Landeszenarien

Ist die Validierung und Verifizierung des Kernmaterials abgeschlossen, findet eine ähnliche Vorgehensweise unter Anbetracht der Deckschichtkomponente statt. In dem Materialmodell für die Deckschicht werden jedoch keine Spannungskurven integriert, sodass der Verifizierungsprozess gegenüber den Versuchsdaten nur über die festen Materialwerte vollzogen wird. Bezüglich dieser Sandwichkomponente liegen ausschließlich Daten einer Zugbelastung vor, sodass lediglich eine Verifizierung gegenüber der experimentell erstellten Spannungskurve unter Zugbelastung durchgeführt wird.

Ist diese Komponente ebenfalls verifiziert, werden das Kernmaterial und die Deckschicht innerhalb des Untersuchungsprozesses der Klebschicht in das entsprechende Simulationsmodell eingefügt. Unter dieser Voraussetzung wird das Strukturverhalten der Klebschicht unter Zugbelastung betrachtet und analysiert. Ist auch diese Analyse abgeschlossen, liegen die gesamten Sandwichkomponenten im Fall der erfolgreichen Annäherung an die Versuchskurven im verifizierten Zustand vor.

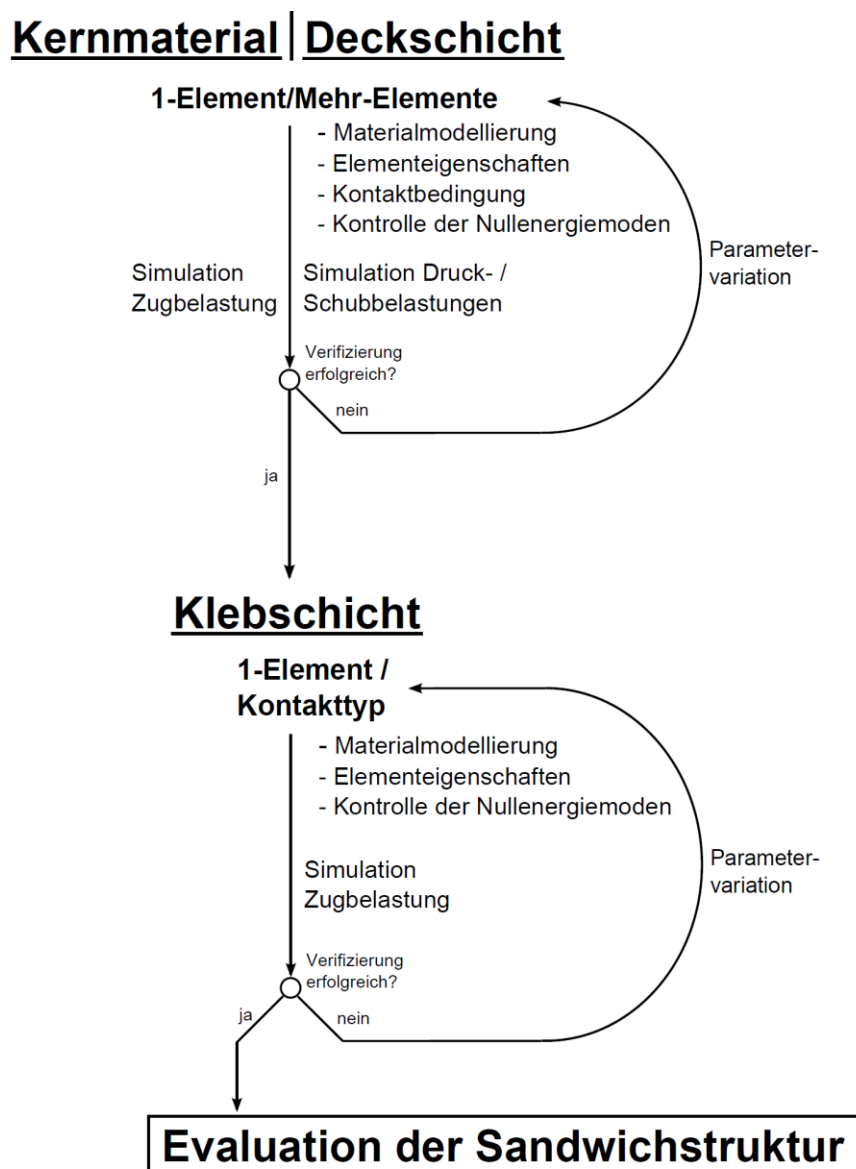


Abbildung 4.2: Lösungskonzept der Sandwichkomponentenuntersuchung

4.2. Möglichkeiten zur Darstellung einer Kernstruktur

Für die virtuelle Darstellung einer Aluminium-Honigwabenstruktur gibt es zahlreiche Möglichkeiten. (siehe Abbildung 4.3). Die Unterschiede in den jeweiligen Ansätzen liegen insbesondere in der Modellierung, dem Berechnungsaufwand, den abbildbaren Versagensarten und dem Detaillierungsgrad der Ergebnisse. [1] Dies erfordert Kenntnisse über das Materialverhalten, die Versagensarten sowie über das Nachversagensverhalten der abzubildenden Kernstruktur.

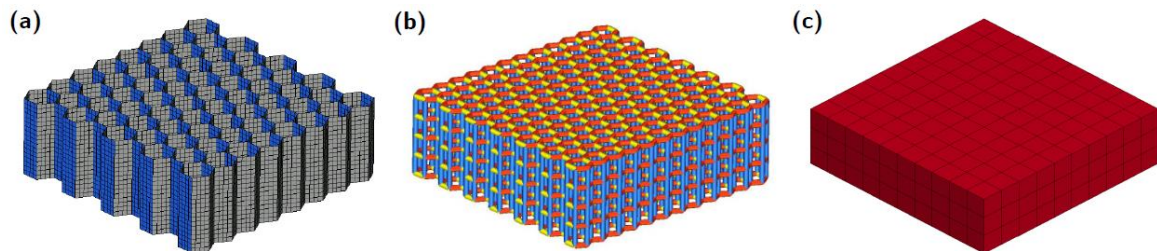


Abbildung 4.3: Verschiedene Darstellungsmöglichkeiten eines virtuellen Aluminium-Honigwabenkerns [7]

Das Mesomodell (a) stellt den Kern unter Einbeziehung von Schalenelementen detailgetreu dar. Es besteht dabei der Vorteil, dass die Deformationen der Wabenstruktur genau abgebildet werden können, sodass dadurch strukturelle Informationen nicht verloren gehen. Für eine realistische Abbildung des Beulverhaltens wird eine hohe Exaktheit des Modells verlangt, sodass die Diskretisierung der Zellen entsprechend hoch sein muss. Da die Zeitschrittweite dazu entsprechend klein wird, erhöht sich die Rechenzeit besonders bei größeren Modellen. [20] [21]

Eine Simulation mit Stabelementen (b) kann zur Vorhersage von charakteristischen Deformationsmoden in allen Richtungen eines Materials eingesetzt werden. Die Stabelemente besitzen insgesamt 6 Freiheitsgrade, die zueinander ungekoppelt sind. Dabei besteht das Stabelement aus drei Knoten, wobei der zentrale dritte Knoten zur Erstellung eines Koordinatensystems dient. Die Vorteile dieser Methode liegen in der Einsparung der Rechenzeit gegenüber Mesomodellen und in einer stabilen Berechnungsweise unter hohen Deformationen der Stabelemente. Die Wahl des Zeitschrittes kann bei dieser Methode unabhängig von der charakteristischen Länge der Elemente erfolgen und bleibt in der Berechnung konstant. [22]

Homogene Volumenelemente (c) stellen eine Vereinfachung der realen Struktur dar. Mit ihnen können die Rechenzeiten gegenüber Mesomodellen und Stabelementen gesenkt werden. Den Volumenelementen werden die effektiven mechanischen Eigenschaften zugeordnet, sodass äquivalente Eigenschaften wie beispielsweise die der Steifigkeit gegenüber dem realen Zellmaterial erreicht werden. Jedoch lässt sich mit dieser Methode ein lokales Stabilitätsversagen wie Beulen innerhalb einer Zellstruktur nicht eindeutig darstellen. Eine Abbildung globaler Versagensarten ist jedoch mit diesen Elementen möglich. [1]

Mit einem Schalenmodell (siehe Abbildung 4.4) wird das gesamte Sandwichmaterial mit Schalenelementen abgebildet. Den einzelnen Integrationspunkten in Dickenrichtung dieser Elemente werden hierbei die jeweiligen Materialeigenschaften der Kernstruktur beziehungsweise der Deckschichten zugewiesen. Bei dieser Methode ist der Rechenaufwand gegenüber den Methoden aus der Abbildung 4.3 noch geringer. Jedoch sind mit den Schalenelementen nur wenige Versagensarten darstellbar. Diese Methode sollte ausschließlich unter den Bedingungen eingesetzt werden, dass sich der Ver-

schiebungsverlauf der Struktur über die Dicke linear verhält und der Querschnitt eben bleibt. Diese Bedingungen werden jedoch bei einer Sandwichstruktur schnell verletzt. [1]

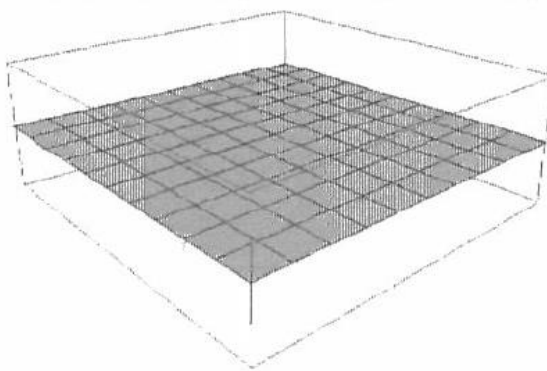


Abbildung 4.4: Möglicher Aufbau eines virtuellen Honigwabenkerns unter Nutzung von Schalenelementen [1]

4.3. Analyse des virtuellen Materialverhaltens in die Hauptachsenrichtungen

Zunächst wird das virtuelle Modell der Kernstruktur in die prinzipiellen Hauptachsenrichtungen untersucht. Das FE-Modell wird dabei auf einfache Art aufgebaut.

4.3.1. Druckbelastung in T-Richtung

Zur Untersuchung des Materialverhaltens der Kernstruktur unter Druckbelastung in T-Richtung werden 3 Körper erstellt (siehe Abbildung 4.5). Darin wird die Honigwabenstruktur durch ein einzelnes hexagonales Volumenelement mit den Abmessungen 0,4m x 0,4m x 0,1m dargestellt. Die Druckplatten, die jeweils auf den gegenüberliegenden Seiten des Volumenelementes angebracht sind, werden jeweils durch 1 Schalenelement abgebildet. Sie können jedoch auch mit Volumenelementen dargestellt werden.



Abbildung 4.5: Aufbau der Drucktestsimulation

Um eine Druckbeanspruchung auf das Honigwabenelement auszuüben, bewegt sich das obere Schalenelement in die negative Z-Richtung. Zwischen den Plattenelementen und dem Volumenelement existiert dabei die Kontaktdefinition *AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, welche als Standardkontakt in LS-DYNA genutzt wird. [12] Über die „automatischen“ Kontaktdefinitionen werden darin die Kontaktflächen der in Kontakt stehenden Elemente automatisch bestimmt und erleichtern dem Benutzer besonders bei komplizierten Geometrien den Aufwand der Kontaktdefinition. Für die Platten gilt das Materialmodell #20 (*MAT_RIGID), welches Körper mit starren Materialeigenschaften reprä-

sentiert. Die Werte der Materialparameter für die Platten sind an den Eigenschaften von legiertem Stahl angelehnt. Dabei wird eine Dichte von 7900 kg/m^3 , ein E-Modul von $2 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ und eine Querkontraktionszahl von 0,3 angenommen. In dem Materialmodell #20 werden auch die Randbedingungen für starre Körper festgelegt. Der unteren Platte werden darin keine Bewegungen ermöglicht. Rotationsbewegungen sind für beide Platten nicht vorgesehen. Die Elemente der Platten werden mit den Schalenelementtyp 2 dargestellt.

Die Materialeigenschaften des Honigwabenelementes richten sich nach den Versuchsdaten. [7] Dabei wird das Materialmodell #126 in der ersten Version verwendet, da es eine stabile Berechnung und geringe Abweichungen gegenüber der dritten Materialversion besitzt (siehe Kapitel 3.8). Für das Honigwabenelement wird der Volumenelementtyp 0, welcher für das Materialmodell #126 und für die Abbildung einer Honigwabenstruktur geeignet ist, verwendet.

Innerhalb dieses Materialmodells beschreiben unter anderem E den Elastizitätsmodul sowie PR die Querkontraktionszahl für das vollständig verdichtete Material und RO die Dichte. Für die Fließspannung des vollständig verdichteten Materials SIGY wird der gleiche Wert wie für eine Aluminium-Legierung (AA 5056) angenommen. [7] Das relative Volumen VF gibt das Verhältnis des Materialvolumens bei Erreichen der vollständigen Verdichtung des Materials gegenüber des Anfangsvolumens an und beträgt 0,18. [7] Das Materialmodell geht nun davon aus, dass bei einer Materialkomprimierung von 82% das Material vollständig verdichtet ist.

Als nächstes werden die Spannungskurven eingefügt. Für LCA, LCB und LCC werden dabei die Spannungskurven in T-, L- und W-Richtung und für LCAB, LCBC, LCCA die drei Schubspannungskurven in die LT-/TL-, LW-/WL- und WT-/TW-Richtung benötigt. Diese Spannungskurven ähneln denen im Kapitel 2.2.1. Sie beinhalten jedoch für eine stabile Berechnung sowie eine kürzere Rechenzeit eine konstante Spannung am Anfang und äquidistante Dehnungsmessungen.

Zusätzlich kann eine Kurve zur Beschreibung des Dehnrateneffekts (LCSR), die mit einem Skalierungsfaktor λ über die Dehnungsrate $\dot{\epsilon}$ ausgedrückt wird, in diesem Model eingegeben werden. Im Fall einer Implementierung wird dabei von einem linearen Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Geschwindigkeit der Druckbelastung in der Kernstruktur ausgegangen (siehe Abbildung 4.6).

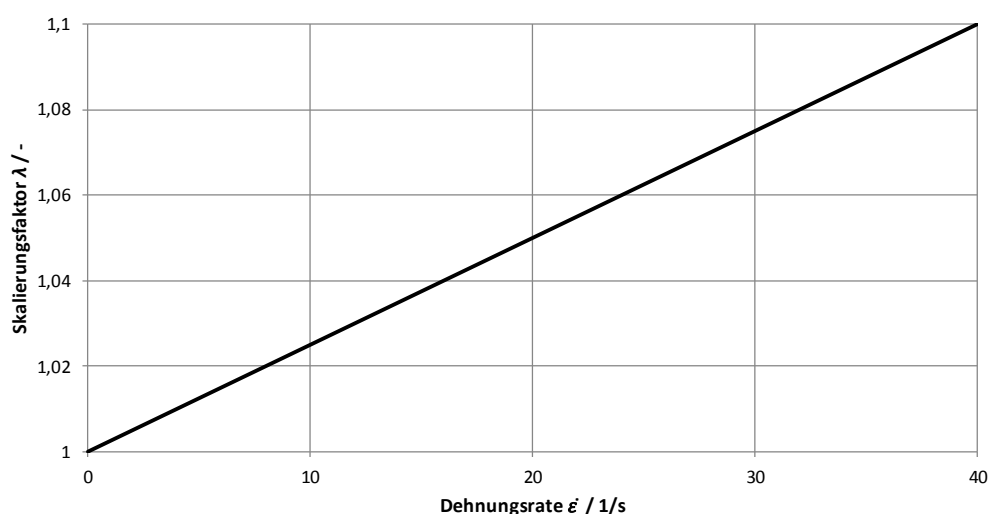


Abbildung 4.6: Kurve zur Beschreibung von Dehnrateneffekten [7]

Des Weiteren werden für die Materialmodellierung 6 Elastizitätsmodule für den linear elastischen Bereich des nicht verdichteten Kernmaterials benötigt. Die Parameter EAAU geben hierbei den E-Modul in T-Richtung, EBBU den E-Modul in L-Richtung und ECCU den E-Modul in W-Richtung an. Die Schubmodule werden über die Parameter GABU für die LT-Richtung, GCAU für die WT- Richtung und GBCU für die WL- Richtung eingegeben.

Die Abbildung 4.7 zeigt eine solche Materialkarte, wie sie im Programm LS-DYNA für den Benutzer zur Materialmodellierung zugänglich ist. Darin sind alle Werte für die Materialmodellierung zusammengefasst.

1	<u>MID</u>	<u>RO</u>	<u>E</u>	<u>PR</u>	<u>SIGY</u>	<u>VF</u>	<u>MU</u>	<u>BULK</u>
	1	32.000000	4.170e+007	0.0500000	4.050e+008	0.1800000	0.0500000	0.0
2	<u>LCA</u>	<u>LCB</u>	<u>LCC</u>	<u>LCS</u>	<u>LCAB</u>	<u>LCBC</u>	<u>LCCA</u>	<u>LCSR</u>
	11	12	13	0	14	15	16	0
3	<u>EAAU</u>	<u>EBBU</u>	<u>ECCU</u>	<u>GABU</u>	<u>GBCU</u>	<u>GCAU</u>	<u>AOPT</u>	<u>MACF</u>
	3.100e+008	2.100e+005	2.000e+005	1.900e+008	2.300e+006	9.000e+007	2.0000000	1
4	<u>XP</u>	<u>YP</u>	<u>ZP</u>	<u>A1</u>	<u>A2</u>	<u>A3</u>		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000		
5	<u>D1</u>	<u>D2</u>	<u>D3</u>	<u>TSEF</u>	<u>SSEF</u>	<u>VREF</u>	<u>TREF</u>	<u>SHDFLG</u>
	0.0	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Abbildung 4.7: Materialkarte des Materialmodells #126 (*MODIFIED_HONEYCOMB)

Im Ergebnis ist ein Durchdringen des beweglichen Schalenelements durch das Volumenelement ohne Interaktion dieser beiden zu erkennen (siehe Abbildung 4.8), was auf eine fehlerhafte Kontaktberechnung zurückzuführen ist. Dies konnte mit einer Änderung der Kontaktdefinition zu *AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE und dem Kontaktparameter SOFT = 2 (siehe Kapitel 3.7.1) korrigiert werden. Diese Kontaktdefinition wird für die Untersuchung von Crashesimulationen empfohlen und ist in dieser Kategorie die am häufigsten verwendete Kontaktdefinition. [13] Darin werden die Kontakte der Bauteile zueinander sowie der Eigenkontakt der einzelnen Elemente untereinander berücksichtigt. Diese Kontaktdefinition gilt als sehr zuverlässig und akkurat. [13]



Abbildung 4.8: Durchdringung zwischen dem Volumen- und dem Schalenelement während der Drucktestsimulation in Z-Richtung der Simulation

Zur Verifizierung des Elementverhaltens wird die zugehörige Spannungskurve der Eingabe bezüglich Drucktests in T-Richtung herangezogen (siehe Abbildung 2.6). Ein erster Spannungsgraph ist in der Abbildung 4.9 dargestellt und zeigt einen fast identischen Verlauf des Honigwabenelementes an. Ein leichter Versatz der Spannungswerte zu höheren Stauchungen wird mit einer Erhöhung des Kontaktparameters SFS auf den Wert 10 verbessert. Durch diese Korrektur erhöht sich die Kontaktsteifigkeit der Federelemente in der hier vorherrschenden Penalty-Kontaktmethode zwischen den sich durchdringenden Knoten, sodass die Höhe der Durchdringungen reduziert wird (siehe Kapitel 3.7). Bei weiterer Erhöhung der Kontaktsteifigkeit sind nur marginale Verbesserungen zu erkennen und es kommt zum Auftreten von Nullenergiemoden. Aufgrund des verbesserten Materialverhaltens wird die Kontaktsteifigkeit mit dem Wert 10 für die weiteren Auswertungen beibehalten.

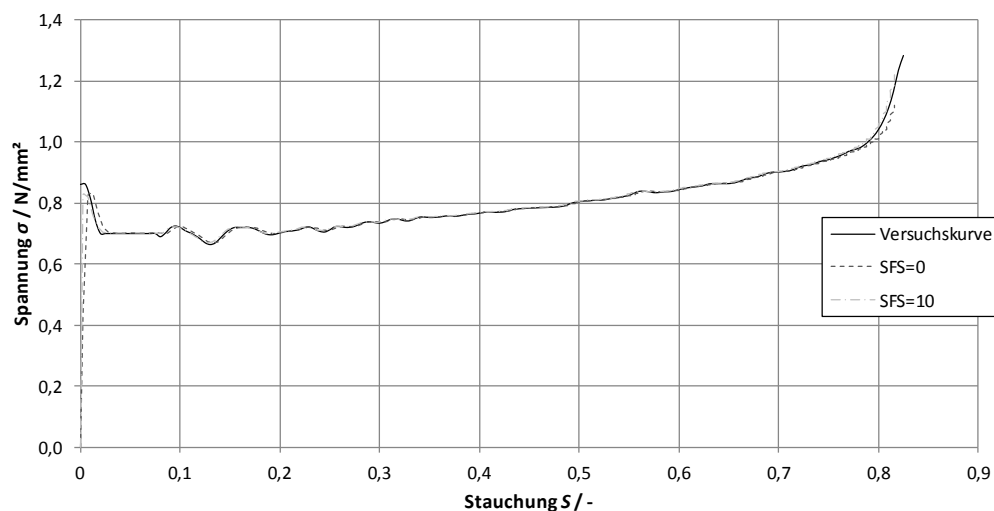


Abbildung 4.9: Spannungsverläufe des 1- Honigwaben-Volumenelementes unter einer Änderung des Parameters für die Kontaktsteifigkeit in der Verbindung zwischen dem Honigwaben- und dem Plattenelement innerhalb der Drucktestsimulationen in T-Richtung

Eine Reduzierung der Materialparameter um 10% ihrer Werte rufen überwiegend sehr geringe Abweichungen des Spannungsverlaufs hervor. Einzig Parameter EAAU unter einer Beanspruchung in T-Richtung lässt eine merkliche Änderung im linear elastischen Bereich des Spannungsverlaufs unter einer größeren Änderung des Wertes zu (siehe (12)). Äquivalent beeinflussen die Materialparameter EBBU und ECCU das Materialverhalten unter Druckbelastung in L- und W-Richtung.

Unter Einbezug einer Kurve für die Dehnungsrate (siehe Abbildung 4.6) wird ein Einfluss auf den Spannungsverlauf des Honigwabenelementes ausgeübt. Der Skalierungsfaktor λ erhöht während der Spannungsberechnung die Fließspannung (siehe Gleichungen (18) (19)), wodurch sich das Spannungsniveau über den gesamten Verlauf erhöht (siehe Abbildung 4.10). Dies tritt ebenso in den anderen Richtungen der virtuellen Honigwabenstruktur auf. Da sich mit diesem Skalierungsfaktor die Abweichungen gegenüber der Versuchskurve erhöhen, wird dieser Parameter in den weitergehenden Untersuchungen nicht berücksichtigt.

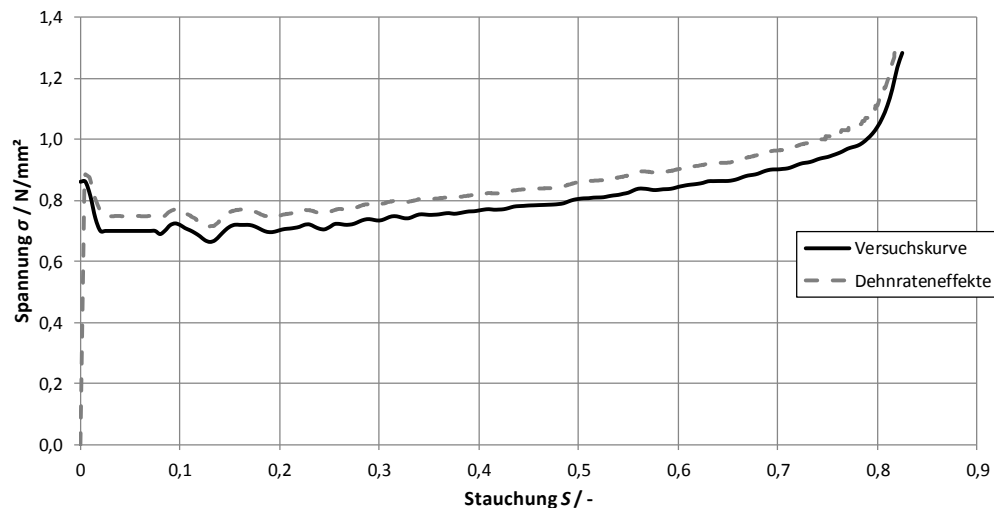


Abbildung 4.10: Spannungsverläufe des 1- Honigwaben-Volumenelementes unter Einbezug einer Kurve für die Dehnrateneffekte innerhalb der Drucktestsimulationen in T-Richtung

In LS-DYNA sind verschiedene Elementtypen zur Darstellung von Honigwabenelementen anwählbar. Speziell der Elementtyp 0 wird in Kombination mit dem Materialmodell #126 zur Abbildung eines Honigwabenmaterials empfohlen. [13] Eine durchgeführte Untersuchung mit den verschiedenen Volumenelementtypen bestätigen den Verlauf in Abbildung 3.9, in welcher der Elementtyp 1 früher als der Elementtyp 0 in einen Verdichtungsbereich übergeht. Der Elementtyp 0 orientiert sich auch im Verdichtungsbereich nach den Spannungscurven. Unter Nutzung des vollintegrierten Elementtyps 2 zeigt sich ebenfalls ein zu früh eintretender Verdichtungsbereich. Diese Spannungscurve hat einen identischen Verlauf zum Elementtyp 1.

Die Ursache dieses Materialverhaltens liegt in der Definition der ersten Materialversion begründet. Darin verbleiben die Spannungstensoren mit Nutzung des Elementtyps 0 im ungekoppelten Zustand, sodass sich der Spannungsverlauf bis in den Verdichtungsbereich hinein nach der Eingabekurve richtet. Unter dem Elementtyp 1 wird ab dem Übergang in den Verdichtungsbereich ein elastisch-perfekt-plastisches Materialverhalten unter Einbezug des Elastizitätsmoduls für das vollständig verdichtete Material angenommen (siehe Kapitel 3.2.1). Für die nachfolgenden Untersuchungen der Kernstruktur wird der Elementtyp 0 in dem Materialmodell #126 beibehalten. Während dieser Untersuchungen benötigt der Elementtyp 1 die doppelte und der Elementtyp 2 die dreifache Rechenzeit gegenüber dem Typ 0. Da der Elementtyp 0 Vorteile in Bezug auf das Materialverhalten und der Rechenzeit besitzt, wird er für kommende Simulationen beibehalten.

Eine Erhöhung der Elementanzahl auf 40x40x10 Einheiten sorgt für eine einheitliche Kantenlänge der Honigwabenelemente. Das Ergebnis zeigt einen Spannungsverlauf, der durch mehrere lokale Maxima gekennzeichnet ist (Abbildung 4.11). In den Abschnitten zwischen den lokalen Maxima wird der charakteristische Spannungsverlauf eines Honigwabenelementes in skaliert Form wiedergegeben. Sobald ein lokales Maxima im Komprimierungsbereich erreicht wird, springt die Beanspruchung auf die nächste Elementreihe über. Das Spannungsniveau aller Spannungsintervalle ist dabei gleich. Dieser charakteristische Spannungsverlauf einer Elementreihe wird solange in Intervallen wiedergegeben, bis der globale Komprimierungsbereich erreicht wird. Da in diesem Modell immer 2 Elementreihen gleichzeitig beansprucht werden (siehe Abbildung 4.12), beträgt die Anzahl der Spannungsintervalle die Hälfte der Elementreihen in Z-Richtung.

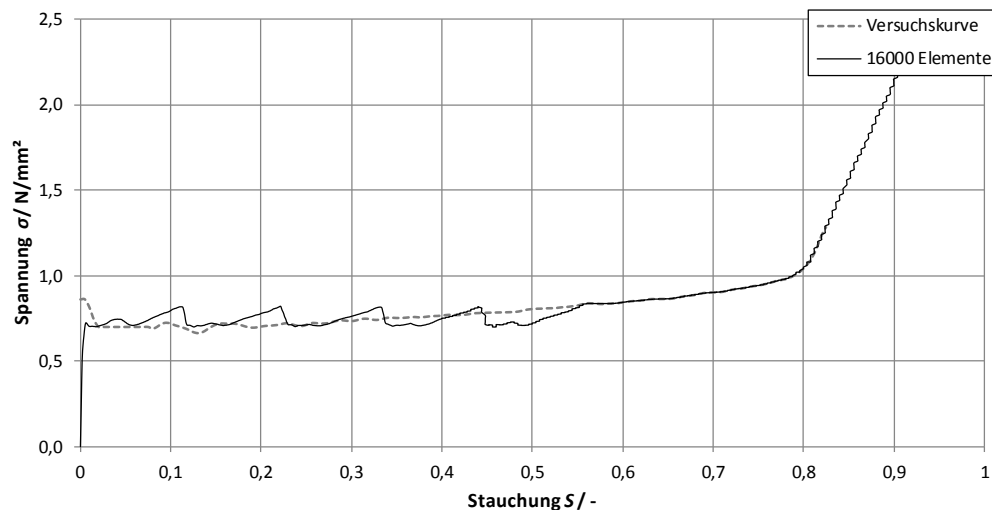


Abbildung 4.11: Spannungsverlauf der virtuellen Honigwabenstruktur mit einer erhöhten Anzahl an Honigwabenelementen unter einer Druckbelastung in T-Richtung

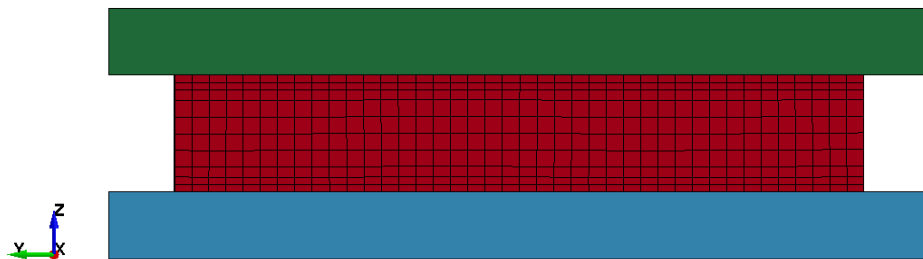


Abbildung 4.12: Verformung der Honigwabenelemente unter einer Druckbelastung in T-Richtung

Für weitere Untersuchungen haben sich folgende Erkenntnisse ergeben:

- Kontaktsteifigkeit: SFS = 10
- Kontaktdefinition: *AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE
- keine Dehnrateneffekte
- Elementtypen 0, 1, 2 möglich

Der Quellcode mit den Erkenntnissen dieser Untersuchungen für die Druckbelastung in T-Richtung unter einem einzelnen Volumenelement ist im Anhang B enthalten.

4.3.2. Druckbelastung in L-Richtung

Für die Untersuchungen des virtuellen Materialverhaltens in die L-Richtung wird lediglich das virtuelle Honigwabenmaterial um 90° gedreht, indem im Materialmodell #126 die Parameter A1, D3 auf den Wert 1 und A3, D2 auf 0 gesetzt werden. Die L-Richtung ist nun in die Z-Richtung und die T-Richtung in die X-Richtung des Modells gerichtet. Die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Simulationen in T-Richtung werden dabei in diesen Simulationen berücksichtigt.

In dieser Materialrichtung wird ein Graph abgebildet, der ein zu hohes Spannungsniveau aufweist (siehe Abbildung 4.13). Die Ursache für diesen Verlauf kann nicht erklärt werden. In der Definition des Materialmodells werden in dieser Richtung zur Berechnung der Fließspannung die äquivalenten Gleichungen verwendet wie in die T-Richtung. Unter Einbezug verschiedener Elementtypen ist zu erkennen, dass die Elementtypen 1 und 2 wie bei den Untersuchungen in T-Richtung (siehe Kapitel 3.8) früher in einen Komprimierungsbereich übergehen (siehe Abbildung 4.13). Das erhöhte

Spannungsniveau wird allerdings mit der Variation der Elementtypen nicht behoben. Eine Implementierung der Dehnratenkurve hat dieses erhöhte Spannungsniveau verstärkt.

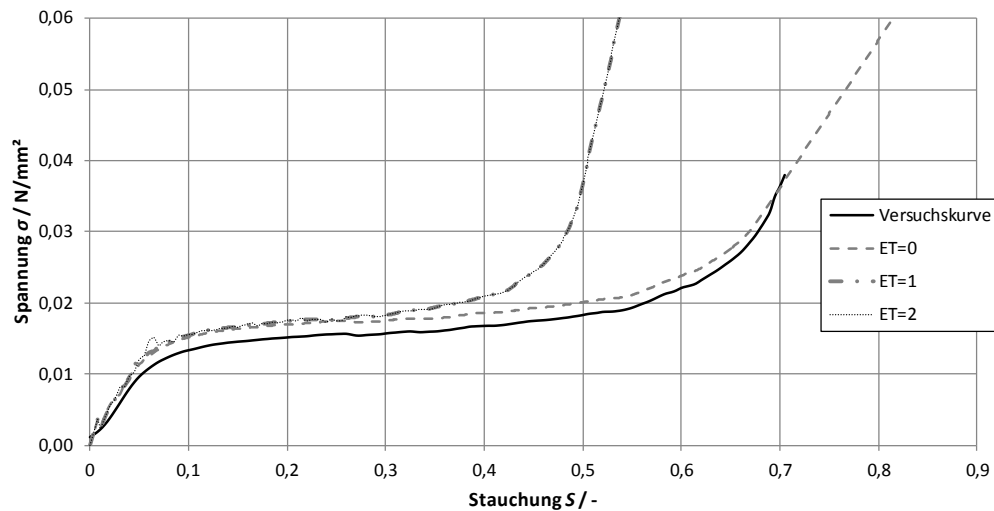


Abbildung 4.13: Spannungsverläufe verschiedener Elementtypen der virtuellen Honigwabenstruktur mit 1-Volumenelement unter einer Druckbelastung in L-Richtung

Unter einer erhöhten Anzahl an Honigwabenelementen (40x40x10) tritt dieses erhöhte Spannungsniveau nicht auf (siehe Abbildung 4.14). Während der Simulation ist zu erkennen, dass sich die Elemente der Kernstruktur unter Druckbelastung in allen Elementreihen gleichmäßig verformen (siehe Abbildung 4.15).

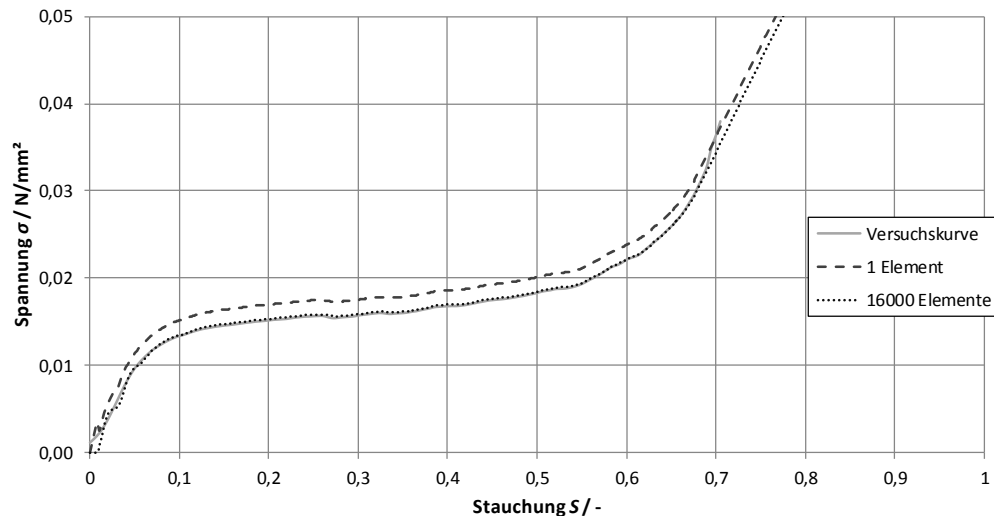


Abbildung 4.14: Spannungsverläufe der virtuellen Honigwabenstruktur mit einer unterschiedlichen Elementanzahl unter einer Druckbelastung in L-Richtung

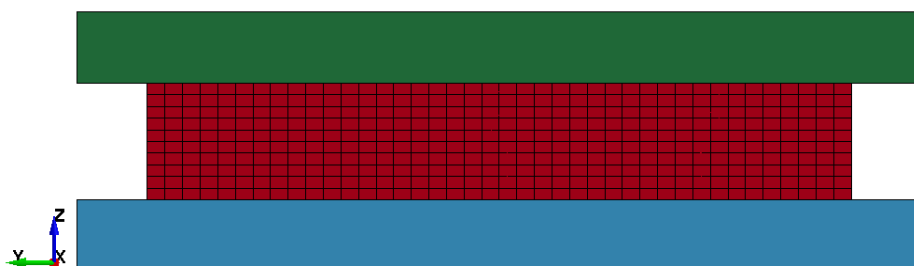


Abbildung 4.15: Verformung der Honigwabenelemente unter einer Druckbelastung in L-Richtung

4.3.3. Druckbelastung in W-Richtung

Die Materialachsen unter dieser Belastungsart sind in dem Materialmodell #126 so gedreht, dass die W-Richtung in die Z-Richtung des Simulationsmodells zeigt. Dies wird mit dem Wert 1 für die Parameter A2 und D1 und dem Wert 0 für die Parameter A1, A3, D2 sowie D3 erreicht. In dieser Richtung ist ebenfalls diese Spannungsüberhöhung zu erkennen, die unter einer erhöhten Elementanzahl nicht auftritt (siehe Abbildung 4.16). Wie bei der Belastung in L-Richtung verformen sich unter einer Druckbelastung in W-Richtung alle Elementreihen zur gleichen Zeit (siehe Abbildung 4.15).

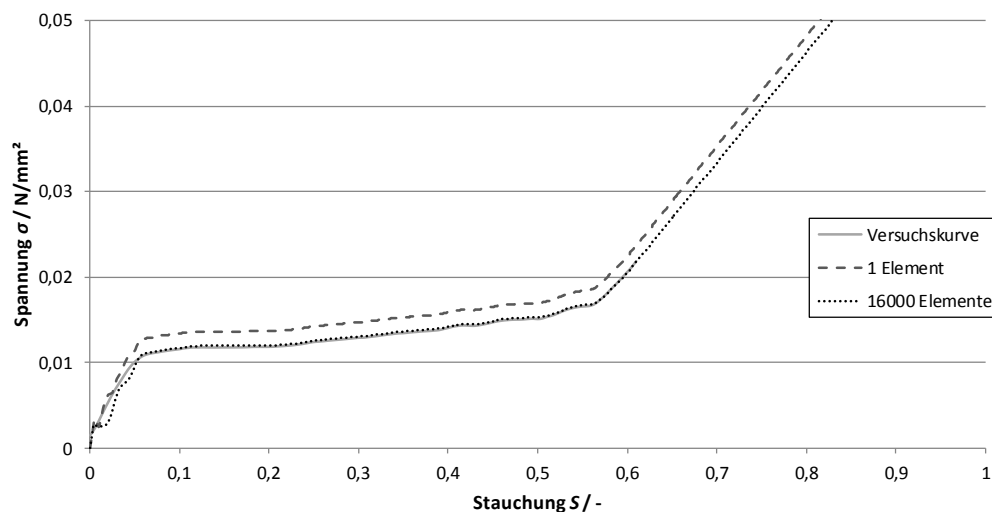


Abbildung 4.16: Spannungsverläufe der virtuellen Honigwabenstruktur unter einer Druckbelastung in W-Richtung

4.3.4. Drehung um die W-Achse

In diesem Abschnitt wird das Material des Honigwabenelementes in 10°-Abständen um die W-Achse gedreht und auf jeweils Druck beansprucht. Für das einzelne Honigwabenelement werden dabei die Elementtypen 0 und 1 verwendet. Während der Simulation wird festgestellt, dass das Honigwabenelement aufgrund seiner schrägen Materialausrichtung seitlich abgleitet und dabei sein Volumen stetig verringert (siehe Abbildung 4.17).



Abbildung 4.17: Verformung eines einzelnen Honigwabenelementes unter Druckbelastung in Z-Richtung bei einer Drehung der Materialrichtung um die W-Achse

Um das Volumen beizubehalten, muss das seitliche Abgleiten verhindert werden. Dies kann mit einer Einführung von Randbedingungen an den Knoten des Honigwabenelementes oder einer Kontaktdefinition, die eine Verklebung simuliert, erfolgen. In diesen Untersuchungen werden die Knoten der Honigwabenelemente auf der Weise fixiert, dass nur für die oberen Knoten des Honigwabenelementes eine Bewegung in die Z-Richtung möglich ist. Dies entspricht jedoch nicht den Versuchsbedingungen [7], sodass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur eingeschränkt stattfinden kann.

Unter einer höheren Elementzahl mit der Nutzung des Elementtyps 0 werden keine Kräfte in der Kontaktschnittstelle ausgegeben. Des Weiteren werden im Schnittbild im Gegensatz zu einer Ver-

wendung mit dem Elementtyp 1 Durchdringungen zwischen den Honigwaben- und den Plattenelementen beobachtet (siehe Abbildung 4.18), sodass sich diese Verbindung als fehlerhaft erweist. Die Verformung der Honigwabenelemente unter Druckbelastung mit dem Elementtyp 1 verläuft dagegen sauberer und erzeugt Kräfte in der Kontaktverbindung.

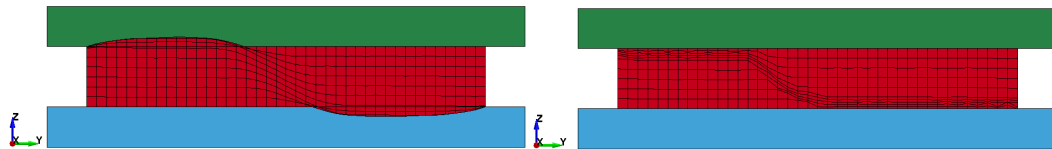


Abbildung 4.18: Verformung der Honigwabenelemente unter einer Druckbelastung in Z-Richtung bei einer Neigung des Materials (40°) um die W-Achse mit Verwendung des Elementtyps 0 (links) und des Typs 2 (rechts)

Im Ergebnis ist ersichtlich, dass bei einer geneigten Materialrichtung erhöhte Spannungen über dem gesamten Stauchungsbereich gegenüber der Versuchskurve auftreten (siehe Abbildung 4.19). Der Spannungsgraph eines einzelnen Volumenelementes unter dem Elementtyp 1 zeigt einen elastischen Bereich, einen Abschnitt mit einer nahezu konstanten Spannung und einen Komprimierungsbereich auf. Der Komprimierungsbereich ist bei dem Spannungsverlauf unter dem Elementtyp 0 nicht zu erkennen.

Bei einer höheren Elementzahl ist wie bei der Druckbeanspruchung in T-Richtung der charakteristische Spannungsverlauf eines einzelnen Elementes in skaliert Form zu sehen, der hierbei wiederum in mehreren Intervallen, abhängig von den Elementreihen in Z-Richtung, dargestellt wird. Die Platteauspannung bleibt gegenüber der eines einzelnen Elementes nahezu identisch. Nachdem alle Elementreihen ihren Komprimierungsbereich erreicht haben, beginnt die globale Komprimierung der Honigwabenstruktur.

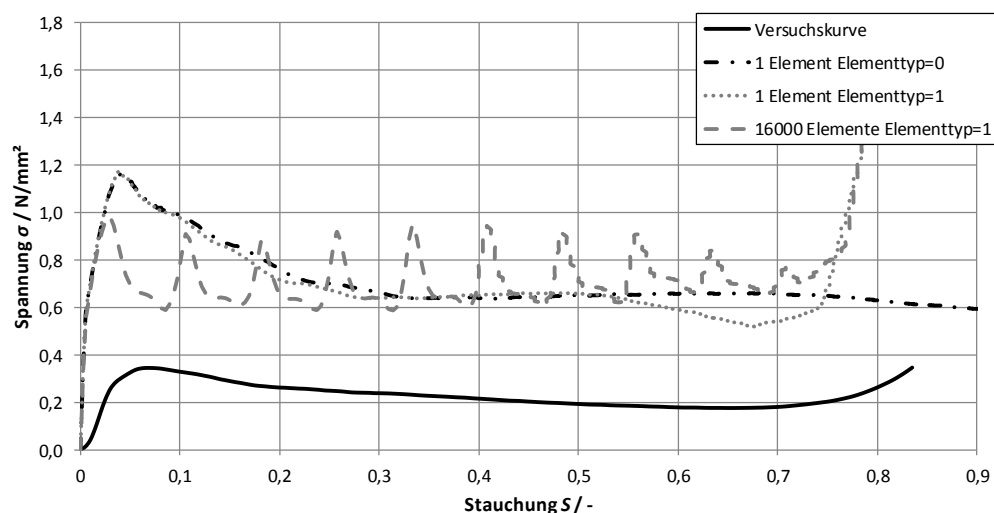


Abbildung 4.19: Spannungsverläufe der virtuellen Honigwabenstruktur unter einer Druckbelastung in Z-Richtung unter einer Drehung des Materials (40°) um die W-Achse

Die Ergebnisse der Simulation bezüglich einer Materialdrehung um 60° um die W-Achse zeigen ähnliche Merkmale auf (siehe Abbildung 4.20). Dabei ist jedoch das Spannungsniveau geringer, da das Material stärker in Richtung der schwächeren Materialachse geneigt ist.

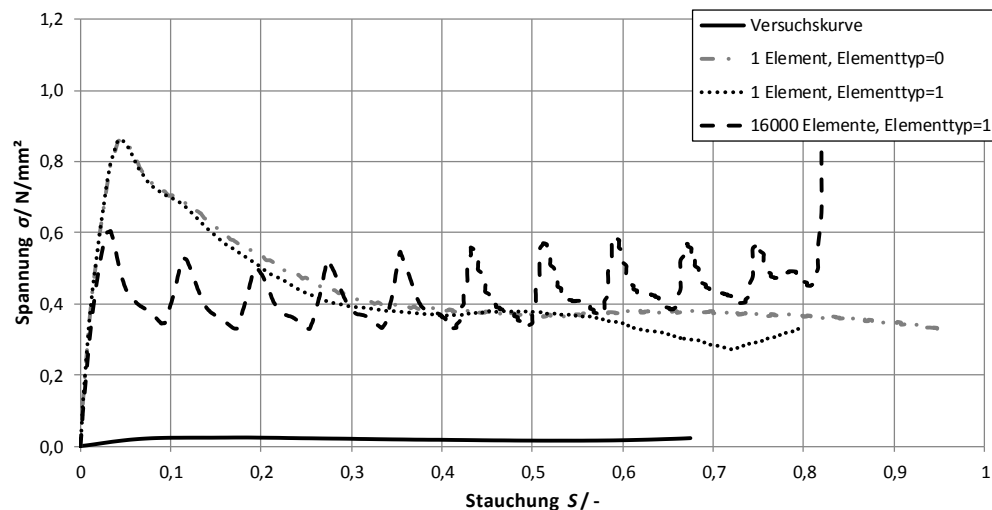


Abbildung 4.20: Spannungsverläufe der virtuellen Honigwabenstruktur unter einer Druckbelastung in Z-Richtung unter einer Drehung des Materials (60°) um die W-Achse

Die Untersuchungen mit einem schräg ausgerichteten Material zeigen, dass die Spannungsüberhöhungen abhängig von der Materialneigung und vom Elementtyp sind (siehe Abbildung 4.21, Abbildung 4.22). Darüber hinaus werden die auftretenden Fließspannungen von den Kontaktbedingungen, der Hourglass-Kontrolle und den geometrischen Randbedingungen beeinflusst. Exemplarisch ist dies mit der Kontaktdefinition *AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE unter einer Kontaktsteifigkeit SFS von 10, und dem SOFT-Parameter 2 aufgezeigt. Die Spannungsüberhöhungen werden durch die in der ersten Version des Materialmodells #126 dreidimensional quaderförmige Fließfläche verursacht (siehe Kapitel 3.2.1). Dabei errechnet sich die Fließspannung eines schräg ausgerichteten Materials aus den Werten der Fließspannungen in die Hauptachsenrichtungen unter Druckbelastung sowie unter Schubbelastung. Diese Werte werden mit einem Winkel multipliziert.

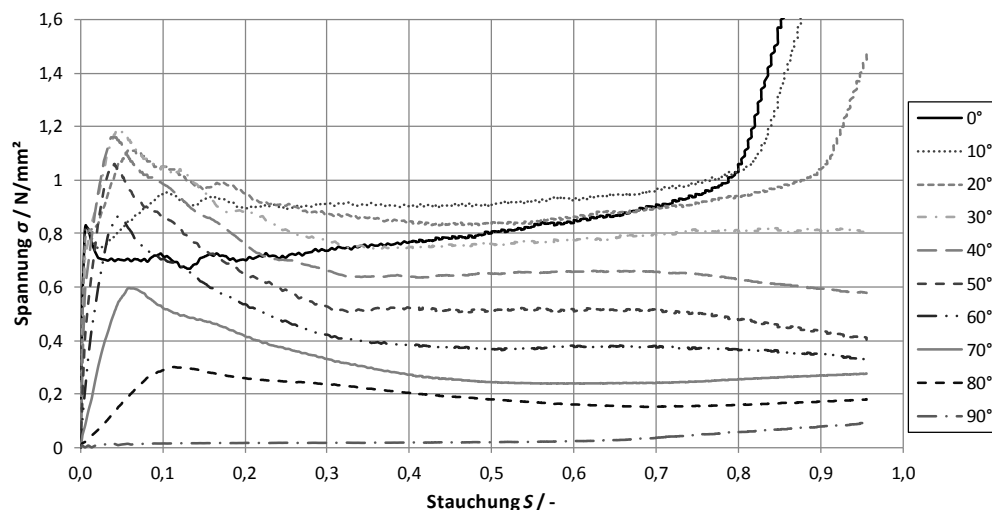


Abbildung 4.21: Spannungsverläufe eines einzelnen virtuellen Honigwabenelementes unter einer Druckbelastung in Z-Richtung mit einer Drehung des Materials in L-Richtung unter Verwendung des Elementtyps 0

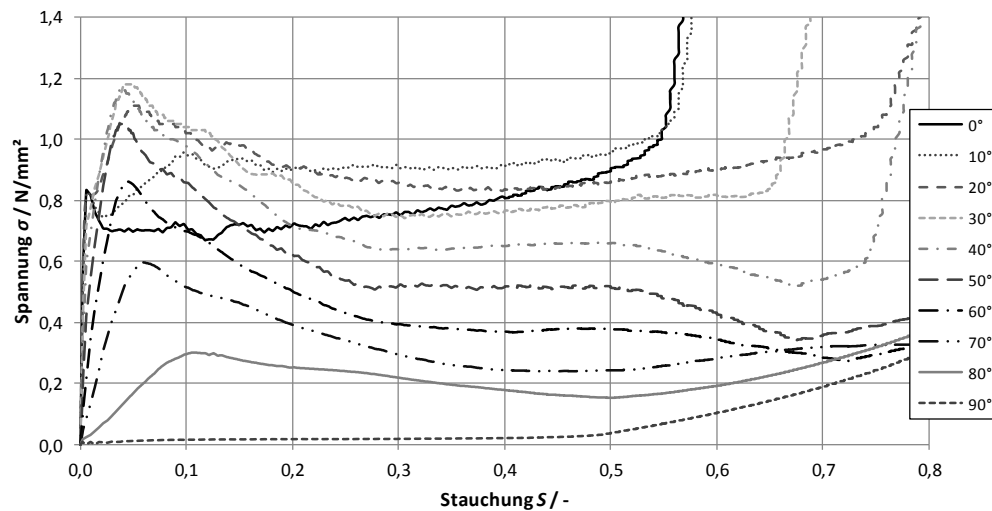


Abbildung 4.22: Spannungsverläufe eines einzelnen virtuellen Honigwabenelementes unter einer Druckbelastung in Z-Richtung mit einer Drehung des Materials in L-Richtung unter Verwendung des Elementtyps 1

Das nachfolgende Diagramme fasst jeweils die Spannungswerte der Materialdrehung um die W-Achse bei einer Stauchung von 0,2 zu einer Spannungskurve zusammen (siehe Abbildung 4.23). Darin wird deutlich, dass die Spannungen mit den experimentellen Werten [7] nur in den Hauptachsenrichtungen übereinstimmen. Unter einem schräg ausgerichteten Material zeigen die Spannungen über den ganzen Bereich der Materialdrehung an.

Diese Spannungsgraphen geben andere Verläufe im Vergleich zu den Vorarbeiten wieder (siehe Abbildung 3.8). Ein direkter Vergleich der Resultate kann allerdings nur über die zusätzliche Betrachtung der Randbedingungen erfolgen.

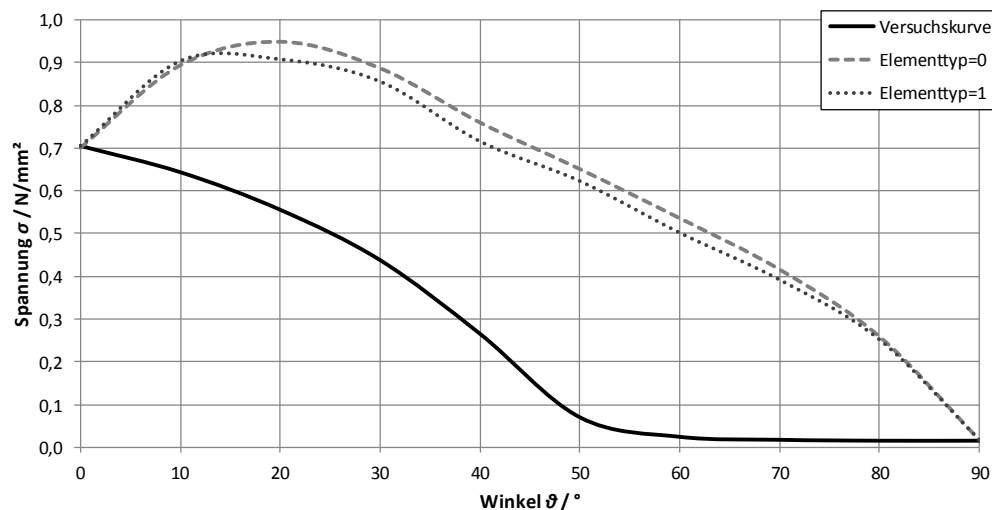


Abbildung 4.23: Plateauspannungsverläufe eines einzelnen Honigwabenelementes über den Winkel der Materialausrichtung zur Belastungsrichtung in die L-Richtung

4.3.5. Drehung um die L-Achse

Bei einer Materialdrehung um die L-Achse werden unter erhöhter Elementzahl bei dem Elementtyp 0 ebenfalls Durchdringungen zwischen den Platten- und den Honigwabenelementen beobachtet, so dass keine Kontaktkräfte ausgewertet werden (siehe Abbildung 4.18).

Die Spannungsverläufe eines schräg ausgerichteten Materials, welches um die L-Achse gedreht ist, zeigen ähnliche Ergebnisse wie bei einer Drehung des Honigwabenmaterials um die W-Achse an (siehe Abbildung 4.24 und Abbildung 4.25). Darin sind Spannungsüberhöhungen gegenüber der Versuchskurve zu erkennen, die sich über den gesamten Stauchungsbereich erstrecken. Bei erhöhter Elementzahl sind ebenfalls die charakteristischen Spannungsverläufe eines einzelnen Honigwaben-elementes in skaliert Form zu erkennen.

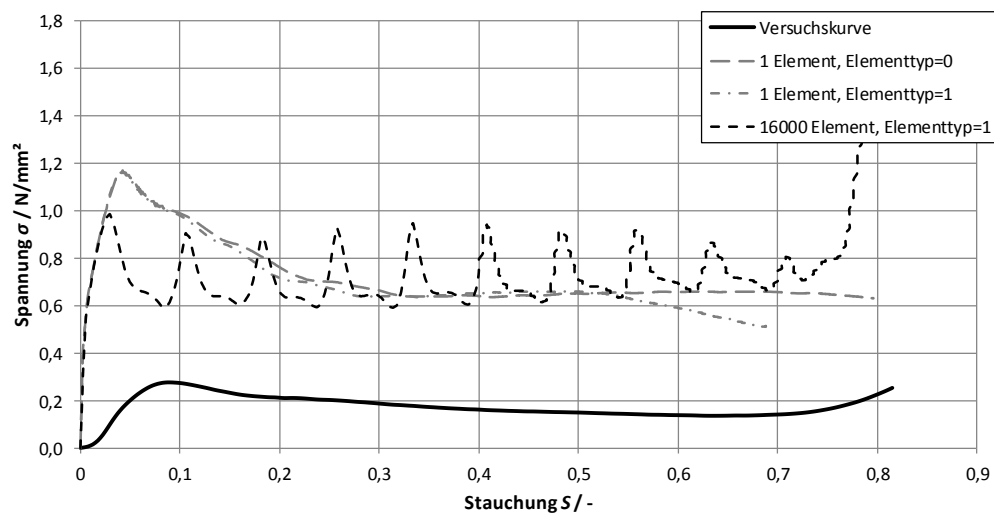


Abbildung 4.24: Spannungsverläufe der virtuellen Honigwabenstruktur unter einer Druckbelastung in Z-Richtung unter einer Drehung des Materials (40°) um die L-Achse

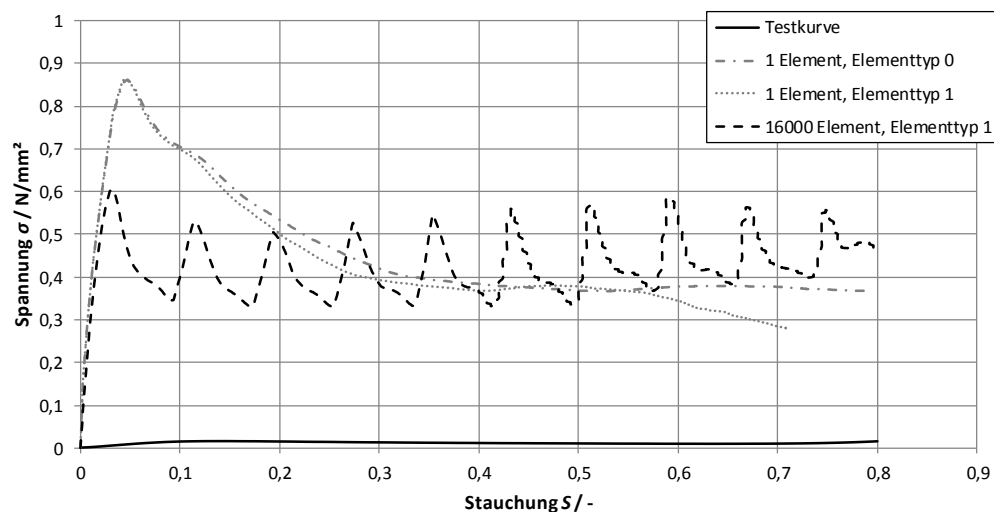


Abbildung 4.25: Spannungsverläufe der virtuellen Honigwabenstruktur unter einer Druckbelastung in Z-Richtung unter einer Drehung des Materials (60°) um die L-Achse

Im Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass das Materialmodell #126 in der ersten Version unter einer schräger Materialausrichtung generell erhöhte Fließspannung prognostiziert. Dies wird im Kapitel 3.2.1 in der Theorie bestätigt und hängt mit der implementierten Fließfläche im Materialmodell zusammen. Der Elementtyp 1 erweist sich im Vergleich zu dem Typ 0 in Bezug auf die Durchdringungen zwischen den Volumen- und Schalenelementen bei einer schrägen Materialausrichtung als vorteilhaft.

4.3.6. Schubbelastung in LT-Richtung

Der Modellaufbau zur Untersuchung des Verhaltens eines Honigwabenelementes unter Schubbeanspruchung ist dem der Druckbeanspruchung ähnlich (siehe Kapitel 4.3.1). Die T-Richtung des Honigwabenelements zeigt zunächst in die Z-Richtung des Simulationsmodells. Die Bewegungsrichtung der Platte ist allerdings in die Y-Richtung des Simulationsmodells gerichtet. Um ein seitliches Abgleiten der Platten ohne Deformation des Honigwabenelements zu verhindern, wird die Kontaktdefinition *TIED_SURFACE_TO_SURFACE genutzt. Die Knoten des Honigwabenelements besitzen keinerlei Fixierungen der Bewegungsrichtungen. Im Materialmodell #126 können insgesamt nur 3 Schubkurven integriert werden. Dadurch treffen jeweils 2 Schubspannungskurven aus den experimentellen Tests (siehe Kapitel 2.2.1) für einen Schubspannungskurve des Materialmodells zu. Beispielsweise können für die Schubkurve LCAB in der Simulation die Schubspannungskurven in die LT-Richtung oder TL-Richtung verwendet werden.

Die Art der Elementverformung unter Schubbelastung ist in der Abbildung 4.26 zu sehen. Im Ergebnis wird deutlich, dass der Spannungsverlauf anhand eines einzelnen Elementes gut wiedergegeben wird (siehe Abbildung 4.27, 1 Element). Jedoch ist bei höherer Schubdehnung ein Abfallen der Schubspannung und der inneren Energie (siehe Abbildung 4.28), die sich aus der elastischen und plastischen Verformung des Elementes zusammensetzt, zu beobachten. Die Innere Energie nimmt ab einer gewissen Schubdehnung negative Werte an. Dieser Energieeinbruch beginnt ab dem Zeitpunkt, in dem LS-DYNA weitere Spannungswerte nach der definierten Schubkurve extrapoliert. LS-DYNA geht von einem weiteren Fallen des Spannungsverlaufs aus, bis die Spannung einen negativen Wert annimmt. Da dies einen unphysikalischen Zustand dargestellt, springt diese Spannung in einen positiven Wert über und nimmt danach erneut ab. Dadurch entsteht ein Wechsel zwischen positiven und negativen Werten. Korrigiert wird dies durch eine Definition der Eingabekurve mit Spannungswerten für höhere Schubdehnungen. Somit wird für die Dehnung 2 ein Spannungswert von 1000 N/m^2 eingefügt. Die korrigierten Graphen bestätigen eine Verbesserung des Elementverhaltens durch diese Vorgehensweise (siehe Abbildung 4.27 und Abbildung 4.28, korrigiert).



Abbildung 4.26: Verformung eines einzelnen Honigwabenelementes unter Schubbelastung

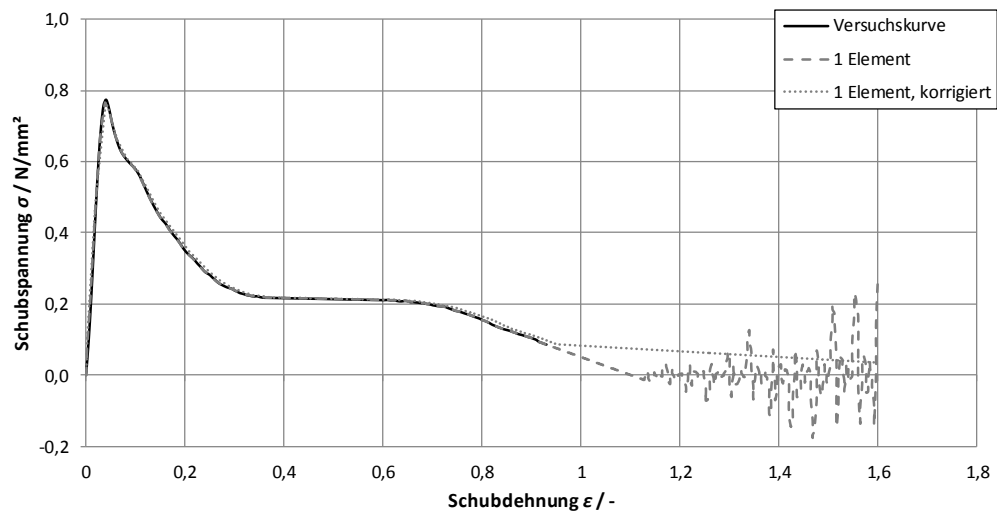


Abbildung 4.27: Schubspannungsverläufe eines einzelnen Honigwabenelementes in LT-Richtung

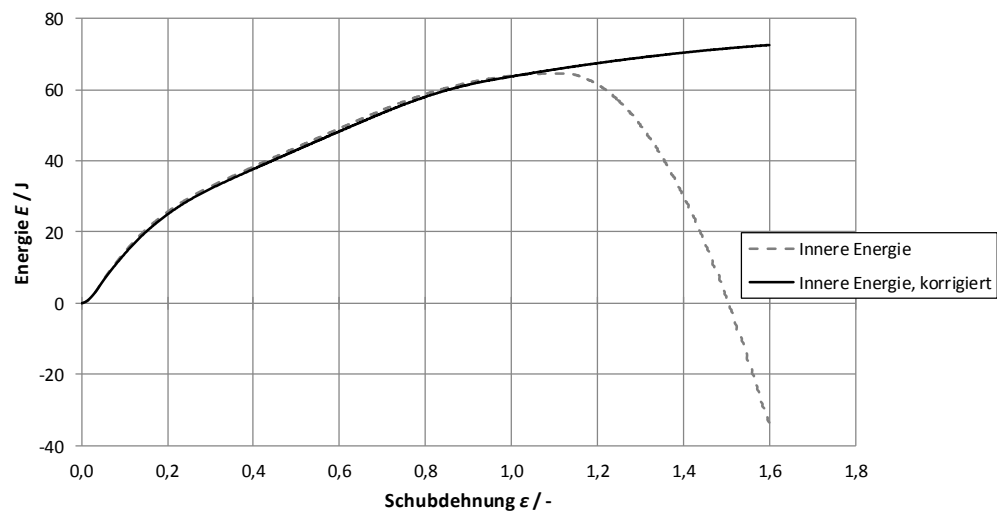


Abbildung 4.28: Verläufe der Inneren Energie des einzelnen Honigwabenelementes in LT-Richtung

Die Implementierung einer Dehnratenkurve führt unter der Schubbelastung eines einzelnen Volumenelementes zu einer Erhöhung des Spannungsniveaus (siehe Abbildung 4.29). Dieses Verhalten ist in der Definition des Materialmodells #126 begründet (siehe Kapitel 3.2.1) und tritt bei sämtlichen Varianten der Schubkurven auf. Da dieser Skalierungsfaktor die Fließspannung des Materials erhöht, steigt dadurch die Abweichung gegenüber der Versuchskurve.

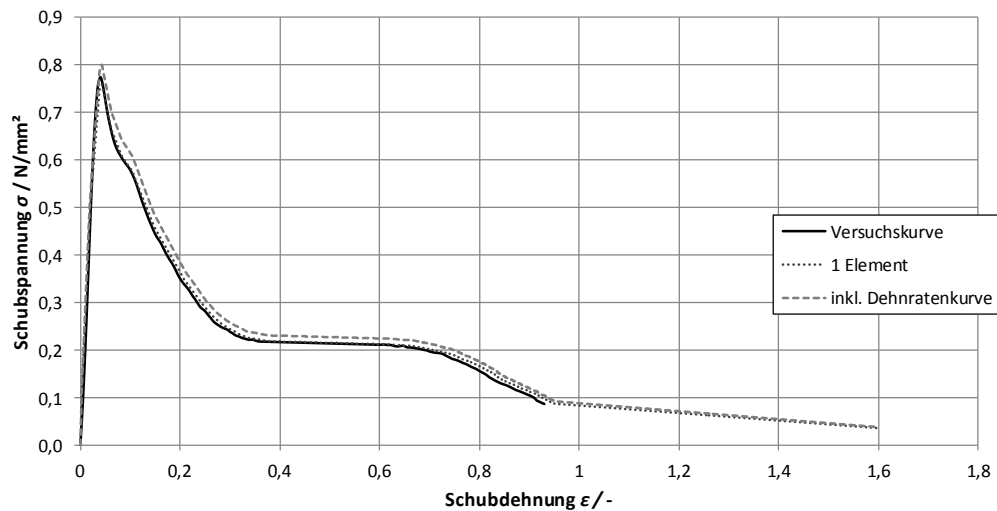


Abbildung 4.29: Schubspannungsverläufe eines einzelnen Honigwabelementes in LT-Richtung unter Einbezug einer Dehnratenkurve

Der Spannungsverlauf der im Materialmodell äquivalenten Schubkurve in TL-Richtung ist ebenfalls fast identisch wie der Verlauf der Versuchskurve (Abbildung 4.30). Diese Ausführung beinhaltet ebenfalls eine Erweiterung der Eingabekurve im Materialmodell #126, sodass sich die Berechnung stabil verhält.

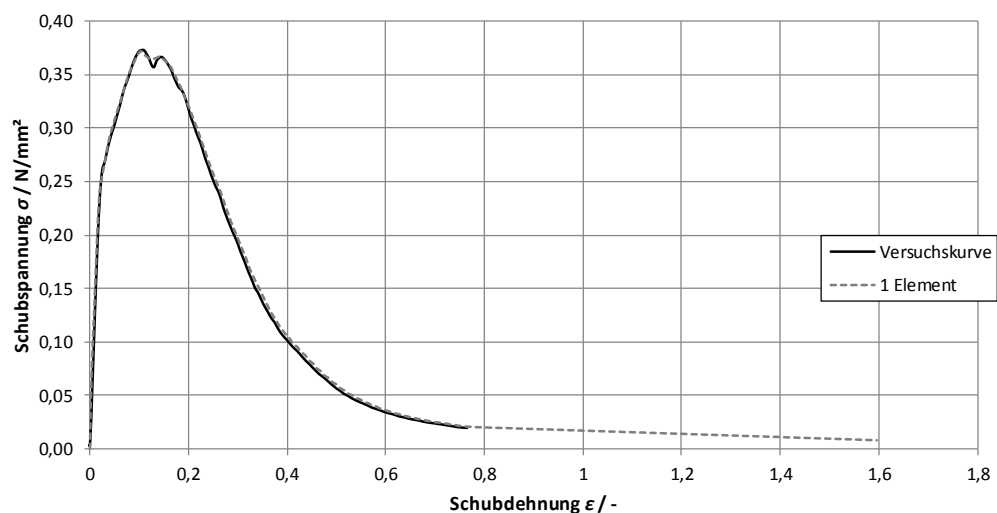


Abbildung 4.30: Schubspannungsverläufe des 1-Honigwabelementes in TL-Richtung

Eine Erhöhung der Elementzahl zeigt eine fehlerhafte Simulation an, in der unerwünschte Nullenergiemoden auftreten. Ein Wechsel zum Elementtyp 1 kann dieses Verhalten nicht ändern. Es ist möglich, mithilfe des Parameters SSEF die Honigwabelemente ab einer gewissen Schubdehnung zu löschen, wodurch jedoch frühzeitig im Verlauf der Simulation ein Riss durch das gesamte Honigwabenmaterial entstehen würde. Eine Verbesserung ist mit der Einführung einer Überwachung von Hourglass-Energien eingetreten. Dabei zeigt der Kontrolltyp 4 mit dem Koeffizienten 0,7 ein günstiges Materialverhalten an. Dieser Kontrolltyp ist für statische und langsam ablaufende Simulationen geeignet. Mit ihm ist zu sehen, dass sich nun die Verformungen auf einzelne Elementreihen fokussieren und sich diese im Verlauf der Simulationen zunehmend dehnen, da dort Elementsteifigkeit gegenüber den nicht verformten Elementen geringer ist (Abbildung 4.31). Der Elementtyp 1 zeigt ein ähnlich verbessertes Simulationsverhalten unter der Überwachung der Hourglass-Energien an.

Ein Schubversagen könnte in das Materialmodell mit dem Parameter SSEF integriert werden. Mit diesem Parameter können jene Elemente, die eine gewisse Schubdehnung erreichen, gelöscht werden. In Bezug auf die Kantenlänge eines Elementes muss dieser Parameter empirisch angepasst werden.

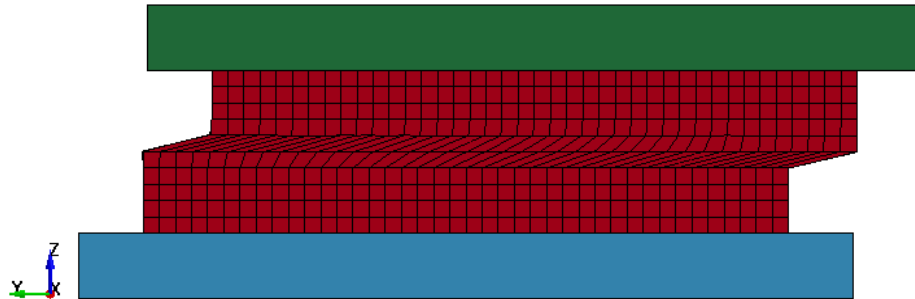


Abbildung 4.31: Verformung der Honigwabenelemente unter einer Schubbelastung in LT-Richtung

Unter erhöhter Elementzahl ist zu erkennen, dass der charakteristische Schubspannungsverlauf in skaliertem Maßstab wieder gegeben wird (siehe Abbildung 4.32). Dies zeigt sich durch ein geringeres Spannungsmaximum und einem kürzeren Plateaubereich. Eine höhere Elementzahl verkleinert den Plateaubereich in höherem Maße.

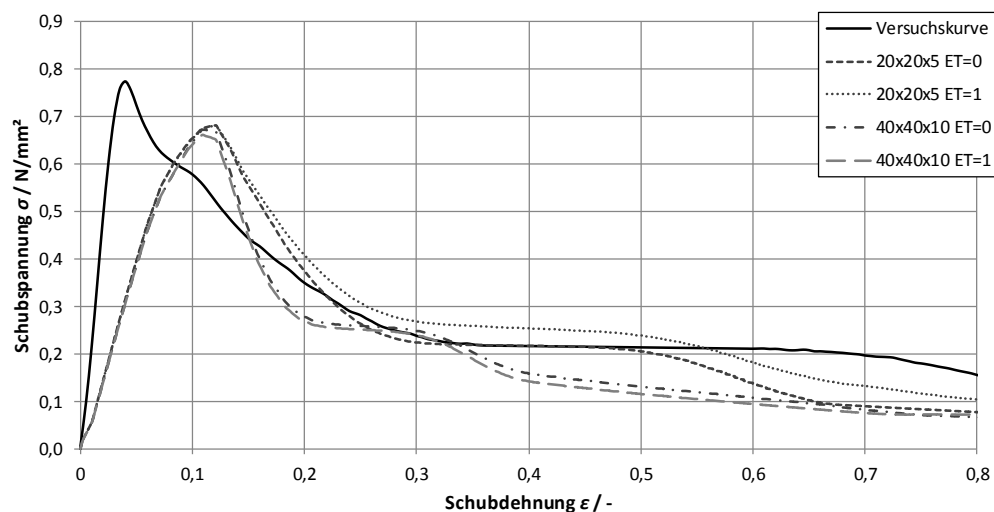


Abbildung 4.32: Schubspannungsverlauf der virtuellen Honigwabenstruktur mit erhöhter Elementzahl unter einer Schubbeanspruchung in LT-Richtung

4.3.7. Schubbelastung in WL-Richtung

Bei dieser Belastungsart werden die Materialachsen gedreht, sodass die L-Richtung des Materials in die Z-Richtung des Simulationsmodells und die W-Richtung in die Bewegungsrichtung der Platte zeigt. Die Spannungskurven in die LW- beziehungsweise WL-Richtung werden anhand eines einzelnen Elementes gut abgebildet (siehe Abbildung 4.33).

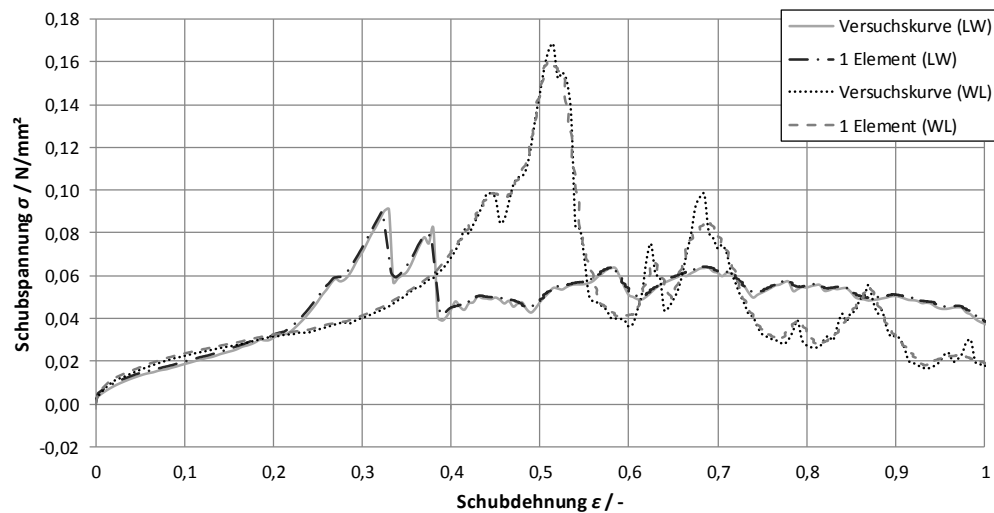


Abbildung 4.33: Schubspannungsverläufe eines einzelnen Honigwabelementes in LW- und WL-Richtung

Bei einer Erhöhung der Elementzahl ist wie im Vergleich zur LT-Richtung ein Verschieben einzelner Elementreihen erkennbar (siehe Abbildung 4.31). Die Spannungsverläufe unter erhöhten Elementzahlen nehmen einen Verlauf an, in dem die Spannungsspitzen nicht so stark hervortreten (siehe Abbildung 4.34). Die Skalierung ist auch hier mit erhöhter Elementzahl größer.

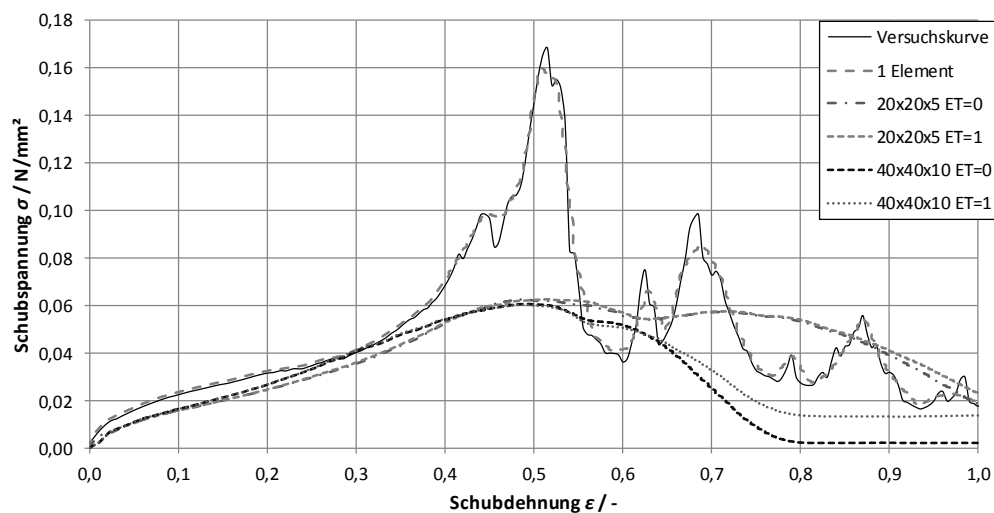


Abbildung 4.34: Schubspannungsverlauf der virtuellen Honigwabenstruktur mit erhöhter Elementzahl unter einer Schubbeanspruchung in WL-Richtung

4.3.8. Schubbelastung in WT-Richtung

Bei dieser Untersuchung zeigt die W-Richtung des Honigwabenmaterials in die Bewegungsrichtung der Platte und die T-Richtung in die Z-Richtung des Simulationsmodells. Der Spannungsverlauf der Eingabekurve wird in beiden Belastungsrichtungen anhand eines einzelnen Volumenelementes ohne größere Abweichungen dargestellt (siehe Abbildung 4.35).

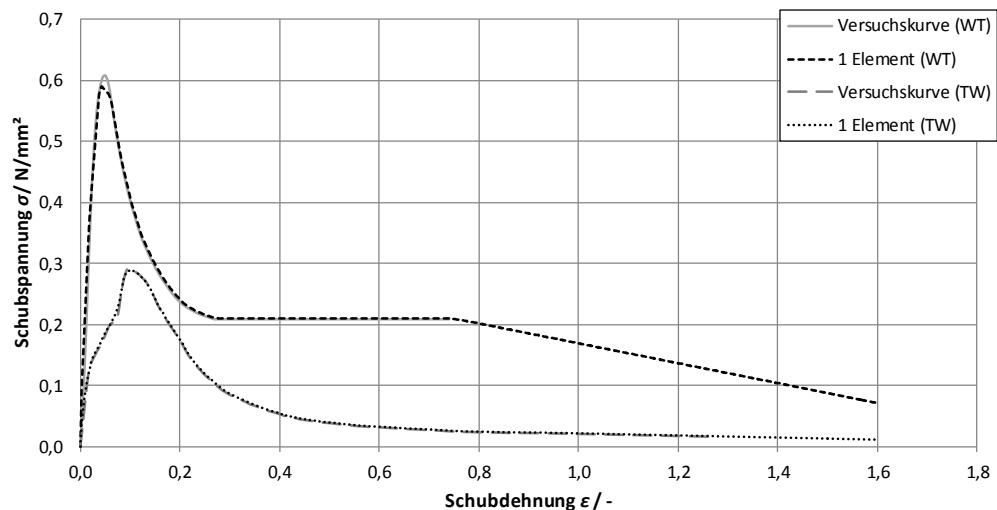


Abbildung 4.35: Schubspannungsverläufe eines einzelnen Honigwabelementes in WT- und TW-Richtung

Bei erhöhter Elementzahl wird der charakteristische Spannungsverlauf in skaliert Form mit einem geringerem Spannungsmaximum und einem kleineren Plateaubereich wiedergegeben (siehe Abbildung 4.36).

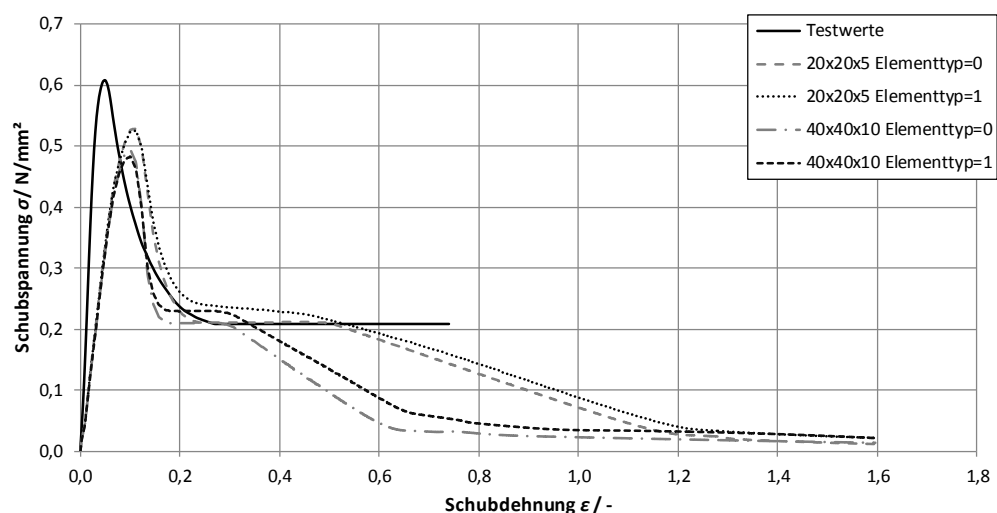


Abbildung 4.36: Schubspannungsverlauf der virtuellen Honigwabenstruktur mit erhöhter Elementzahl unter einer Schubbeanspruchung in WT-Richtung

Zusammenfassend wird festgestellt, dass ein einzelnes Element die Spannungen aus der Eingabe ohne erhöhte Abweichungen wiedergibt. Bei Erhöhung der Elementzahl werden diese charakteristischen Spannungsverläufe in skaliert Form wiedergegeben. Die Spannungsunterschiede zwischen den Elementtypen 0 und 1 sind gering, sodass beide für ein Honigwabenmaterial unter diesen Schubbelastungen eingesetzt werden können. Für eine Schubbelastung mit einem schräg ausgerichteten Material liegen allerdings keine Versuchsdaten vor, sodass dieser Fall nicht untersucht wird. Analog zu den Spannungsberechnungen unter Druckbelastung sind auch unter diesen Bedingungen Graphen mit überhöhten Spannungen denkbar. Der Quellcode der Untersuchungen unter einer Schubbelastung in TL-Richtung mit einem einzelnen Volumenelement ist im Anhang B enthalten.

4.4. Impactszenarien auf die virtuelle Honigwabenstruktur

In den Impactszenarien besitzen die Volumenelemente der virtuellen Honigwabenstruktur ein Gesamtmaß von 0,4m x 0,4m x 0,1m und eine Elementzahl von 40x40x10, sodass jedes Element einen Würfel mit einer Kantenlänge von 10 mm darstellt. Für das Honigwabenmaterial wird das Materialmodell #126 in der ersten Version mit den abgeleiteten Materialeigenschaften aus [7] verwendet.

Die benachbarte Wand auf der Rückseite der virtuellen Honigwabenstruktur ist mit einem einzigen Volumenelement ausgestattet und besitzt die Maße 0,5m x 0,5m x 0,01m. Sie wird als ein starrer Körper ausgeführt. Um eine Ablösung zwischen dem Volumenelement der Wand und den Honigwabenelementen zu vermeiden, wird zwischen ihnen Kontaktdefinition *TIED_SURFACE_TO_SURFACE eingesetzt.

In dieser Simulation ist der Impactor mit Volumenelementen ausgestattet. Für ihn ist nur eine Bewegung in die Z-Richtung des Simulationsmodells vorgesehen, sodass er in diesem Szenario mit 3 m/s senkrecht auf die Probe auftrifft. Weiterhin wird er in den Simulationen als starrer Körper unter dem Materialmodell #20 (*MAT_RIGID) ausgeführt. Für die beiden starren Körper wird jeweils der voreingestellte Volumenelementtyp 1 eingesetzt. Um den gleichen Impuls auf das Honigwabenmaterial auszuüben, wird die Dichte des Impactors über die effektive Masse [9] und den Dimensionen des Impactors ermittelt. Der Impactor besitzt einen Radius von 45 mm und eine Gesamtlänge von 145 mm, sodass seine Dichte 65290 kg/m³ beträgt. [7] Mit Bezug auf die Druck- und Schubsimulationen wird zunächst die Kontaktdefinition *AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE mit der Kontaktsteifigkeit SFS = 10 und dem Parameter SOFT = 2 zwischen dem Impactor und den Honigwabenelementen ausgewählt. Der Aufbau des Simulationsmodells ist in der Abbildung 4.37 dargestellt.

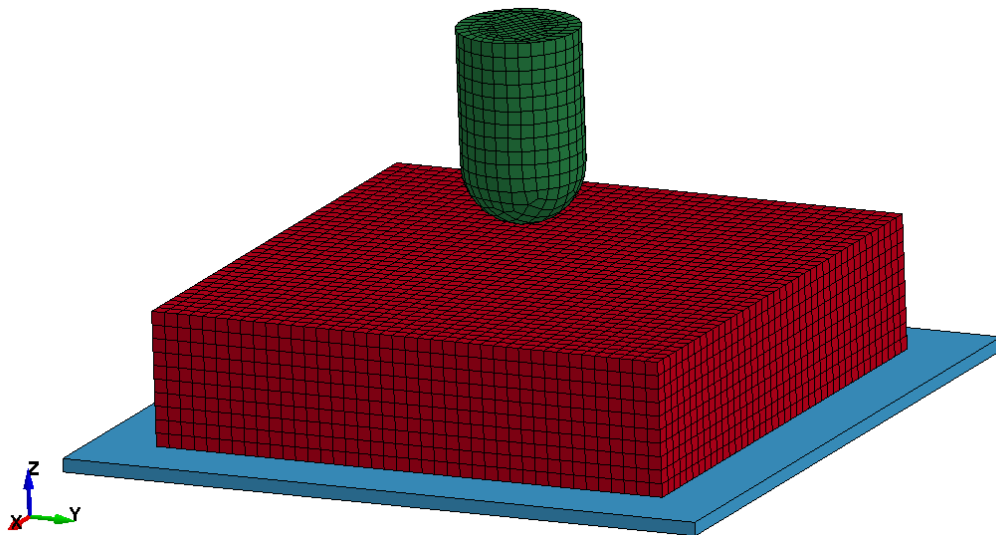


Abbildung 4.37: Modellaufbau eines senkrechten Impactszenarios auf die virtuelle Honigwabenstruktur

Die Simulation eines senkrechten Impacts mit einem halbkugelförmigen Impactor bietet am Modell verschiedene Optionen zur Verbesserung des Simulationsverhaltens an. Diese umfassen:

- eine Variation des Elementtyps
- einen Wechsel der Kontaktdefinitionen
- eine Änderung der Kontaktparameter
- einen Wechsel des Materialmodells
- eine Änderung der Randbedingungen
- eine Variation der Zeitschrittweite
- eine Veränderung der Elementzahl
- veränderte Auftreffbedingungen auf die Honigwabenstruktur
- eine Änderung der Materialparameter
- eine Einführung der Kontrolle von Nullenergiemoden

Während der Simulation kommt es zum Auftreten unerwünschter Nullenergiemoden der Honigwabenlemente ab einer stärkeren Deformation. Mit einer erhöhten Elementzahl wird dieser Effekt verstärkt. Zur Verbesserung der Stabilität der Berechnung besteht die Möglichkeit, die Elemente, die sich stark verformen, beim Erreichen einer gewissen Dehnung unter Verwendung der Parameter TSEF, SSEF rechtzeitig zu erodieren, bevor sie Nullenergiemoden entwickeln. Die Parameter TSEF und SSEF geben Zug- und Schubdehnungen an, bei denen das Element gelöscht wird. Dadurch entsteht jedoch das Risiko, dass der Impactor tiefer in die Honigwabenstruktur eindringt, da die mit dem Impactor in Kontakt stehenden Elemente des Honigwabenmaterials nach und nach gelöscht werden und nicht mit dem Impactor interagieren können. Der Ansatz unter Verwendung von Parametern mit maximalen Dehnungen wird deshalb nicht weiter nachgegangen.

Eine Verbesserung des Materialverhaltens der Honigwabenlemente wird wie im Kapitel 4.3.6 über eine erweiterte Definition der Schubkurven zu höheren Schubdehnungen erreicht. Dadurch wird einem Abfallen der inneren Energie eines einzelnen Volumenelementes entgegengewirkt (siehe Kapitel 4.3.6). Es sei angemerkt, dass sich bei einer höheren Elementzahl die Dimensionen eines Elementes verringern. Unter einer Belastung verformen sich dann diese Elemente stärker, sodass die Schubkurven an die größer werdenden Deformationen angepasst werden müssen. In diesem Impactszenario besitzen die drei Schubspannungskurven einen Spannungswert von 1000 N/m^2 unter einer Schubdehnung von 2, 5 und 10. Dieser Wert verhindert, dass die von LS-DYNA interpolierten Spannungswerte zwischen den Punkten der erweiterten Definition der Schubspannungskurve keine negativen Spannungswerte erreichen.

Mit den erweiterten Schubspannungskurven ist in der Simulation keine Abbremsung des Impactors zu erkennen, sodass er vollständig durch das Honigwabenmaterial dringt. Mit der Implementierung eines Reibungskoeffizienten FS tritt eine Abbremsung des Impactors und somit ein verbessertes Materialverhalten in Bezug auf die Impactsimulation ein. Über diese Einstellung wirken zusätzlich auf die sich durchdringenden Elemente Reibungskräfte, die zu den Normalkräften addiert werden (siehe Kapitel 3.7.2). Dadurch werden besonders die Elemente im Zentralgebiet des Einschlages stärker beansprucht. Die weiteren Elemente, die am Rand mit der restlichen Impactoroberfläche interagieren, nehmen nur einen geringen Anteil der Kräfte in Einschlagsrichtung auf. Unter Einbezug dieses Reibungsparameters werden die Kräfte in der Kontaktschnittstelle erhöht, sodass eine Abbremsung des Impactors entsteht.

Als nächster Schnitt werden Untersuchungen über die Stärke des Reibungskoeffizienten FS und der Kontaktsteifigkeit SFS durchgeführt. Eine erhöhte Kontaktsteifigkeit SFS verändert das Materialverhalten in der Impactsimulation nicht entscheidend und ruft in Anbetracht der Drucktestsimulationen (siehe Kapitel 4.3.1) bei erhöhten Werten unerwünschte Nullenergiemoden hervor. Deshalb wird weiterhin der Wert 10 für den Kontaktsteifigkeitsparameter SFS beibehalten. Der Reibungsparameter FS wird mit dem Wert 0,5 für weiterführende Untersuchungen beaufschlagt, da dieser Kraftverlauf im Vergleich mit den weiteren Graphen der Versuchskurve am nächsten ist (siehe Abbildung 4.38). Bei diesem Verlauf wird ein schmaler Plateaubereich mit einer überhöhten Kraft festgestellt, welche zu früh abfällt.

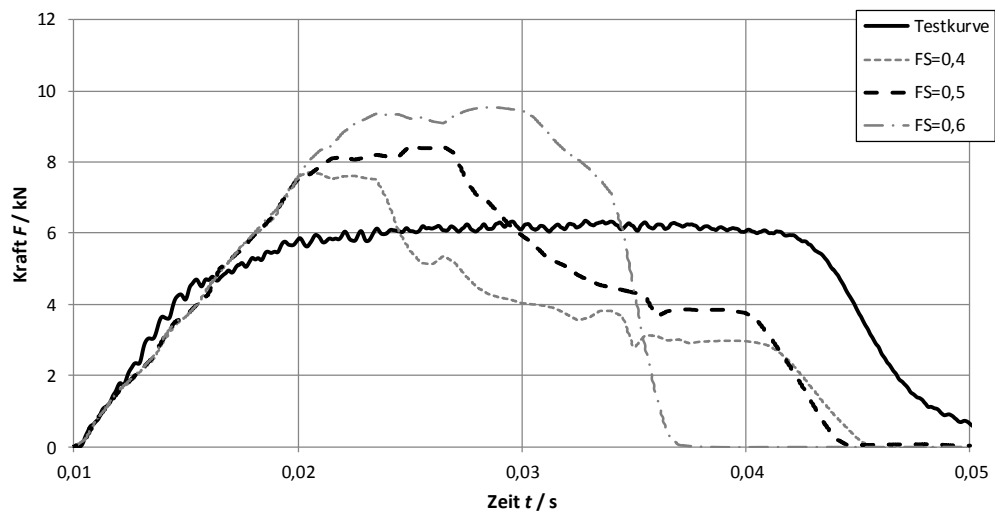


Abbildung 4.38: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter Einbezug eines Reibungsparameters FS

Eine veränderte Aufprallbedingung wird mit der Verringerung der Elementzahl in x- und y-Richtung um ein Element erreicht. Dadurch trifft der erste Knoten des Impactors nicht auf einen Knoten, sondern auf das Zentrum eines Honigwabenelementes auf (siehe Abbildung 4.39). Die daraus entstehende Spannungskurve zeigt allerdings eine höhere Maximalkraft und einen früher eintretenden Krafteinbruch an (siehe Abbildung 4.40), sodass mit dieser Änderung nicht fortgefahren wird.

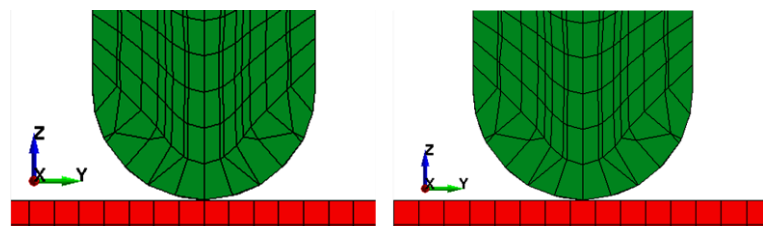


Abbildung 4.39: Möglichkeiten des Auftreffens eines Impactors auf die virtuelle Honigwabenstruktur

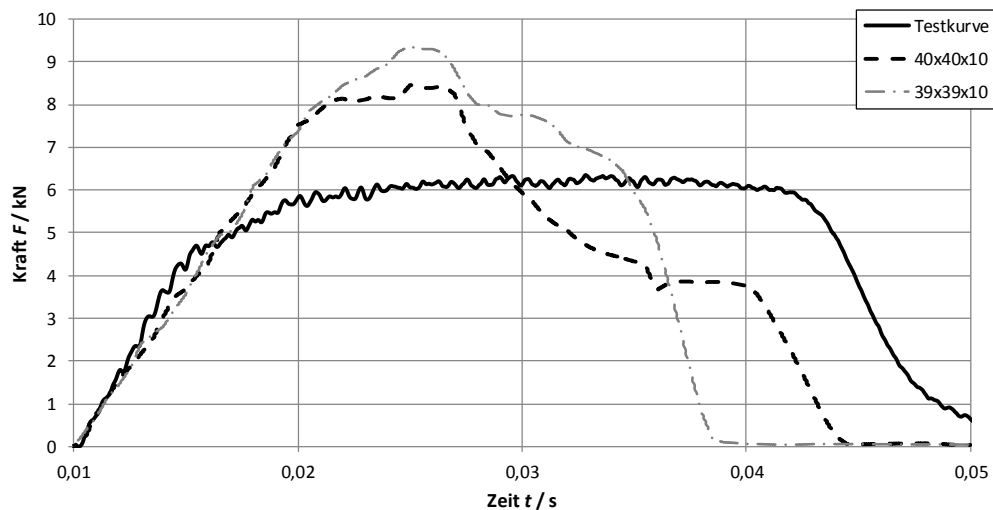


Abbildung 4.40: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter Änderung der Aufschlagbedingung auf die virtuelle Honigwabenstruktur

Ein Test unter Verwendung der dritten Materialversion mit den modifizierten Eingabedaten [7] bezüglich einer Fließspannungsfunktion über den Winkel φ in LT-Richtung sowie 2 Kurven für die Versteifungsspannungen in T- und L-Richtung, welche von der volumetrischen Dehnung abhängen, und einer Fließspannung für die Scherbeanspruchung σ_d^Y mit einem Wert von 784986 Pa zeigt eine völlig andere Art der Materialverformung an (siehe Abbildung 4.41). Darin deformiert sich das Material nicht in lokaler Form, sondern über der gesamten Struktur. Dieses Verhalten spiegelt folglich nicht das reale Materialverhalten wieder, sodass diese Materialversion in den nachfolgenden Untersuchungen nicht weiter verwendet wird.

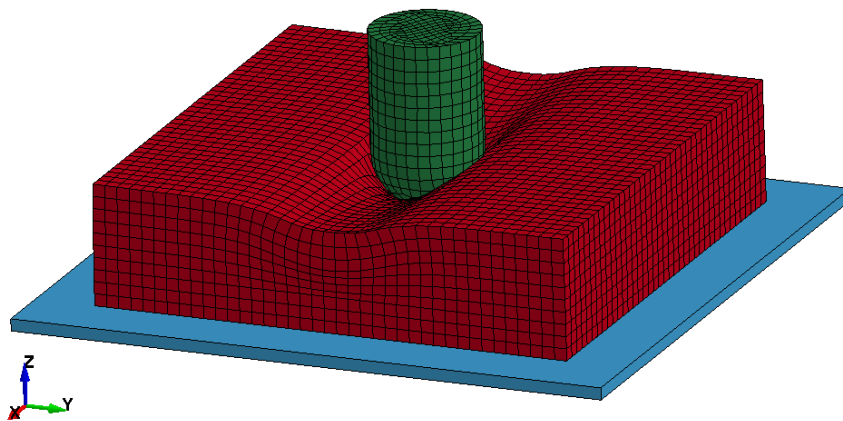


Abbildung 4.41: Verformung der virtuellen Honigwabenstruktur eines senkrechten Impactszenarios unter Verwendung der dritten Version des Materialmodells #126

Ein Vergleich zwischen den Kontaktdefinitionen *AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, *AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE und *AUTOMATIC_GENERAL unter den Elementtypen 0 und 1 zeigt, dass die Kontaktdefinition *AUTOMATIC_GENERAL im Allgemeinen den höchsten Rechenaufwand aufgrund ihrem aufwendigen Kontaktalgorithmus bezüglich einer häufigeren und gründlicheren Kontaktsuche von Knotenpaaren benötigt. [19] Unter Anwendung des Elementtyps 1 sind die Durchdringungen zwischen den Impactor- und den Honigwabenelementen geringer. Daher wird in folgenden Untersuchungen dieser Elementtyp bevorzugt. Auffällig ist jedoch dabei, dass dieser Elementtyp ei-

nen größeren Rechenaufwand benötigt. Dieser höhere Aufwand ist allerdings begrenzt und daher für weitergehende Untersuchungen akzeptabel.

Im Vergleich der Kraftverläufe (Abbildung 4.42), der auftretenden Hourglass-Energien (Abbildung 4.43) sowie den auftretenden Elementdurchdringungen in der Kontaktschnittstelle wird die Kontaktdefinition *AUTOMATIC_GENERAL mit dem Elementtyp 1 für weitere Impactsimulationen benutzt. Zur weiteren Verbesserung der Kontaktberechnung sowie zur Vermeidung numerischer Instabilitäten wird empfohlen, die globale Zeitschrittweite zu verringern beziehungsweise den Skalierungsfaktor SOFSCL zu reduzieren. [12] [19] Der empfohlene Wert des Anfangszeitsschrittes für Impactsimulationen beträgt 0,1. [23] Dieser Zeitschritt wird während der Kontaktberechnung durch die ausgewählte Kontaktdefinition angepasst. Das Verhältnis der Inneren Energie gegenüber der Hourglass-Energie beträgt 14,6%. Es kommt dabei zu keinem Auftreten unerwünschter Nullenergiemoden. Der Kraftverlauf ist allerdings weiterhin durch eine zu hohe Plateaukraft und einem zu frühen Krafteinbruch gekennzeichnet.

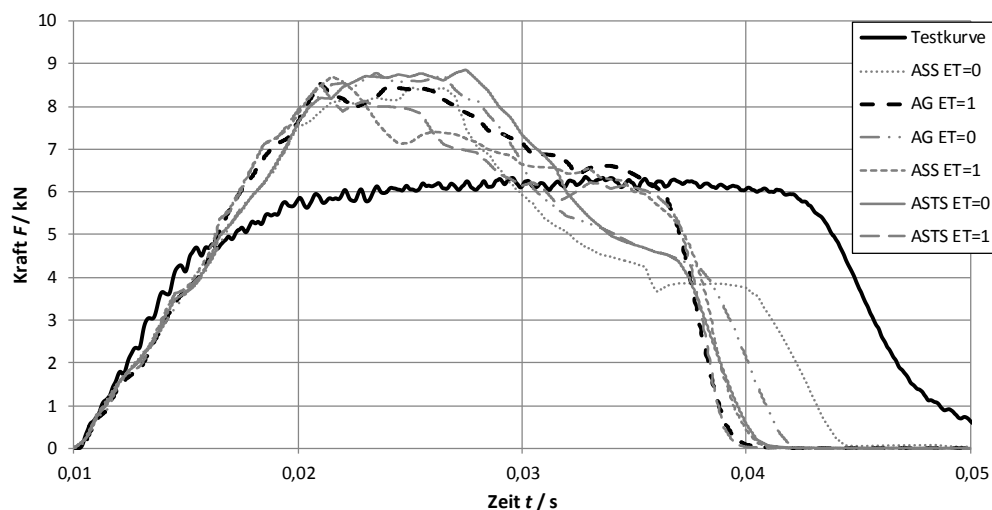


Abbildung 4.42: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter Verwendung diverser Kontaktdefinitionen und Elementtypen

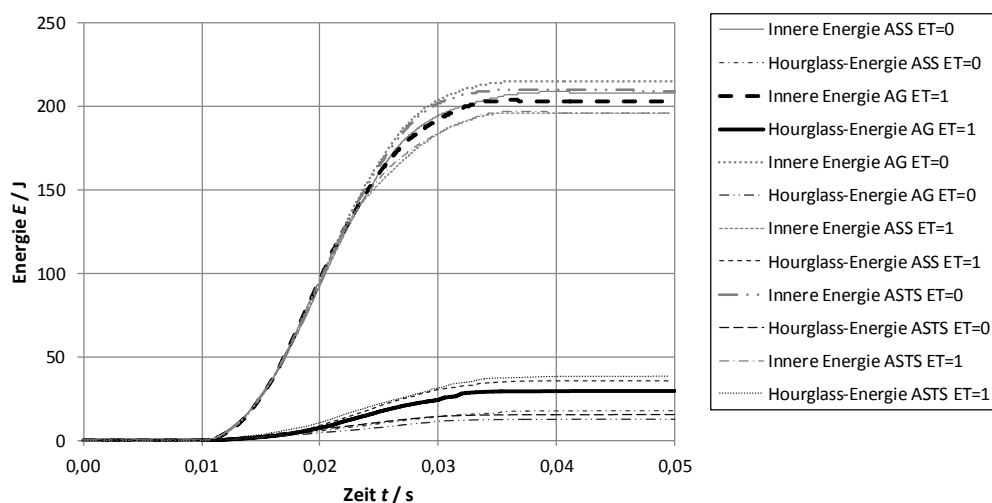
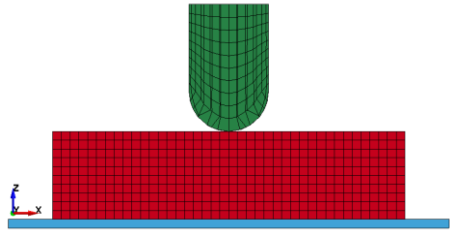
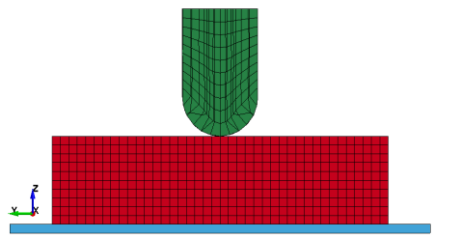
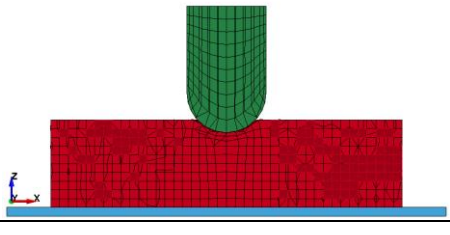
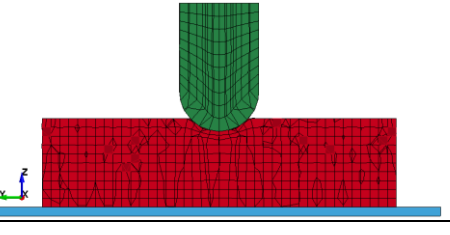
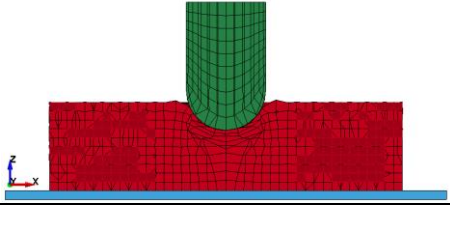
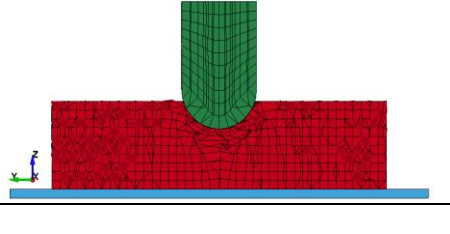
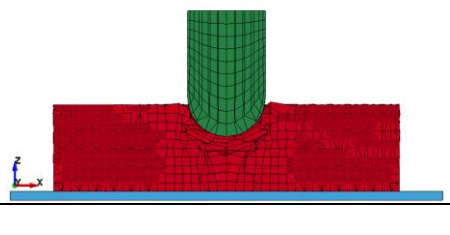
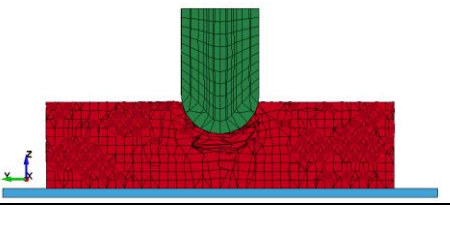
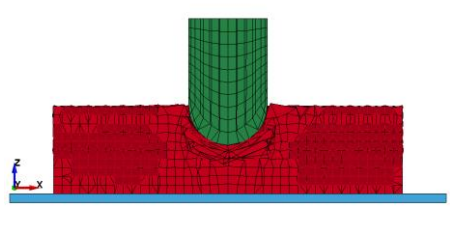
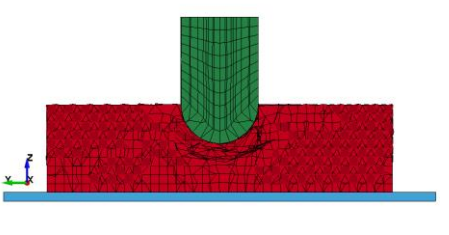


Abbildung 4.43: Auftretende Energien während eines senkrechten Impactszenarios unter Verwendung diverser Kontaktdefinitionen und Elementtypen

Die Tabelle 4.1 zeigt Schnittbilder der Impactsimulationen zu verschiedenen Zeitpunkten unter Einbezug der Kontaktdefinition *AUTOMATIC_GENERAL und dem Elementtyp 1 für die Honigwabenelemente. Generell ist dabei zu erkennen, dass sich nicht vorwiegend die Honigwabenelemente mit den Impactorelementen durchdringen, sondern die Honigwabenelemente untereinander. Dies geschieht zunächst in vereinzelter Form, steigt jedoch mit zunehmender Beanspruchung der Honigwabenelemente durch die stärker werdende Penetration des Impactors. Beispielhaft ist dies in den Schnittbildern der XZ-Ebene zu erkennen, in denen die ersten Durchdringungen zum Zeitpunkt $t=0,022$ s mit den Elementen in der fünften Elementreihe unterhalb des Impactors auftauchen. Dies ist der Zeitpunkt, an dem der erste Kraftabnahme zu beobachten ist (siehe Abbildung 4.42). Mit steigender Anzahl der Durchdringungen geht ein stetiger Krafteinbruch einher. Die Ursache dieser unphysikalischen Elementdurchdringungen sind energiefreie Nullenergiemoden der Elemente (siehe Kapitel 3.6). Da sich diese Energien mit der Periode der Strukturantwort verformen, sind diese annehmbar.

Tabelle 4.1: Schnittbilder eines Impactszenarios zu verschiedenen Zeitpunkten in der XZ-/YZ-Ebene

Zeit	Schnitt XZ-Ebene	Schnitt YZ-Ebene
t=0,01		
t=0,015		
t=0,022		
t=0,025		
t=0,035		

In der Abbildung 4.44 sind die Spannungen eines Elementes grafisch aufgezeigt, welches in der zentralen Impactregion positioniert ist. In diesem Element erzeugen die Druckbelastungen in Z-Richtung die vorherrschende Spannung, da diese Richtung der Einschlagsrichtung des Impactkörpers entspricht. Im Vergleich der Schubspannungen treten die größten Werte in YZ- und ZX-Richtung auf. Dies sind jene Schubspannungsrichtungen, die mit der Dickenrichtung T beziehungsweise der Einschlagrichtung Z zusammenhängen.

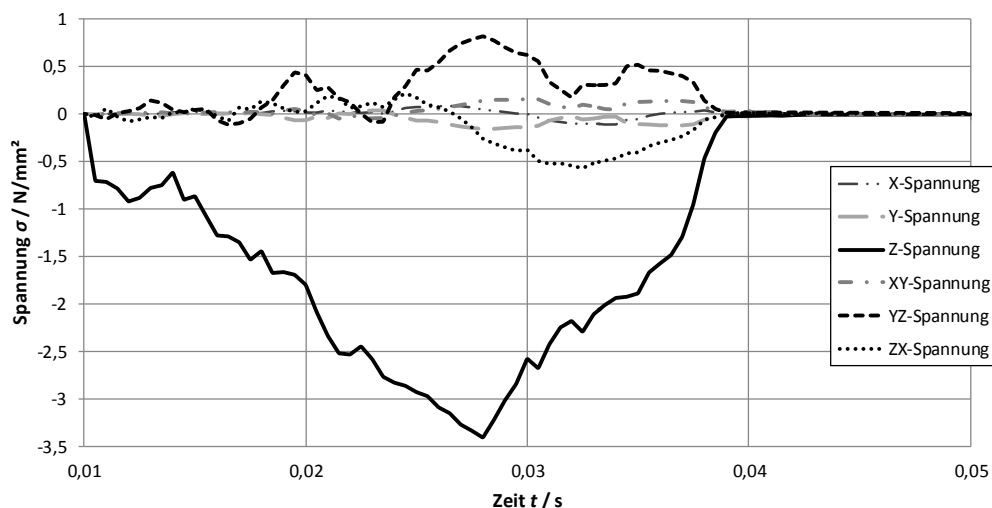


Abbildung 4.44: Höhe der Spannungen eines direkt unter dem Impactor zentral gelegenes Honigwabelement innerhalb eines senkrechten Impactszenario auf die virtuelle Honigwabenstruktur

Mit der Implementierung einer Dehnratenkurve (Abbildung 4.6), die die Fließspannungen der Honigwabelemente erhöht, vergrößert sich die Maximalkraft, die während einer Impactsimulation auftritt. Aufgrund dieser Kraftüberhöhung tritt der Kraftsturz eher ein. Im Vergleich mit dem Graphen ohne Dehnratenkurve bringt dieser Kraftverlauf größere Abweichungen gegenüber der Versuchskurve hervor (siehe Abbildung 4.45).

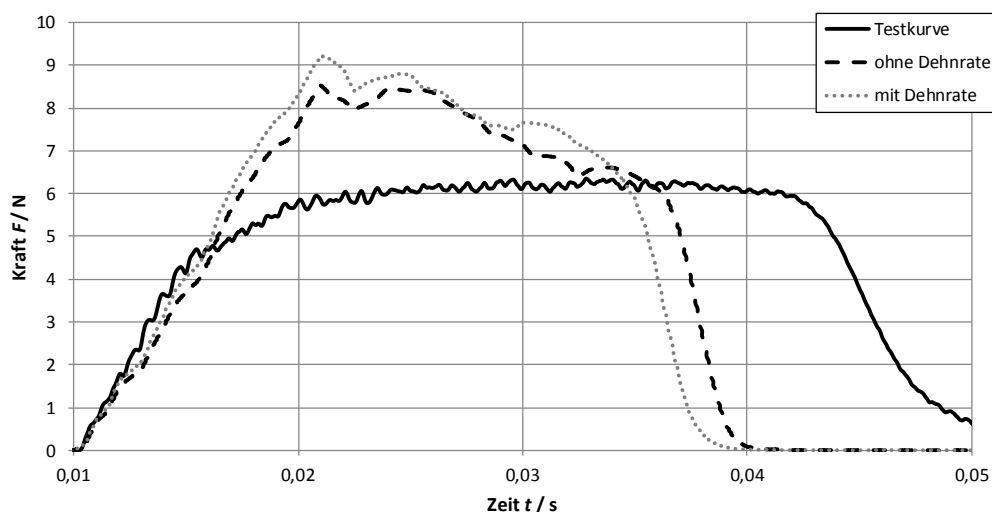


Abbildung 4.45: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter Verwendung einer Dehnratenkurve

Unter Einbeziehung der äquivalenten Schubspannungskurve kann über das Materialmodell #126 Einfluss auf das virtuelle Materialverhalten ausgeübt werden. Es ist zu sehen, dass der Tausch der Schubspannungskurven, welche sich auf die starke Materialachse beziehen, die Abweichungen des Kraftverlaufs zwischen der Versuchskurve und den Kraftverlauf der virtuellen Honigwabenstruktur

verbessert (siehe Abbildung 4.46). In diesen Richtungen existieren die größten Schubspannungen innerhalb der sich durch den Impactor verformenden Elemente. Dies wurde bereits in der Abbildung 4.44 beispielhaft gezeigt. Die Belastungen des Impacts fokussieren sich somit mit dem Tausch dieser beiden Schubspannungskurven stärker auf die Druckbeanspruchungen der Honigwabelemente in T-Richtung des Materials, sodass die Maximalkraft reduziert und der Plateaubereich ausgedehnt wird. Aufgrund dieser Verbesserungen wird mit dem Tausch dieser beiden Schubspannungskurven in den nachfolgenden Versuchen fortgefahren. Allerdings vergrößert sich mit dem Tausch das Verhältnis der Inneren Energie zur Hourglass-Energie (siehe Abbildung 4.47). Aufgrund dessen findet im Weiteren eine Untersuchung mit einer Einführung zur Überwachung von Nullenergiemoden statt.

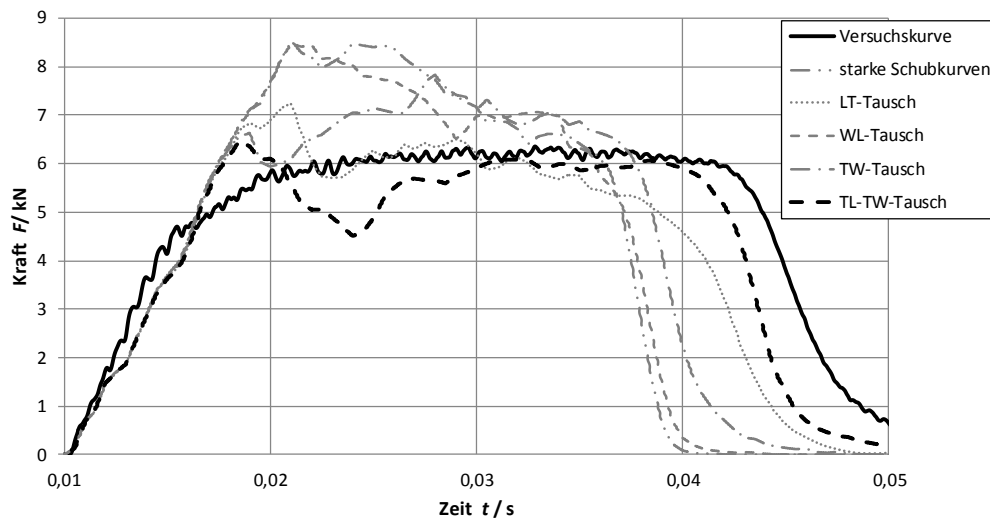


Abbildung 4.46 Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios mit Variation der äquivalenten Schubkurven im Materialmodell #126

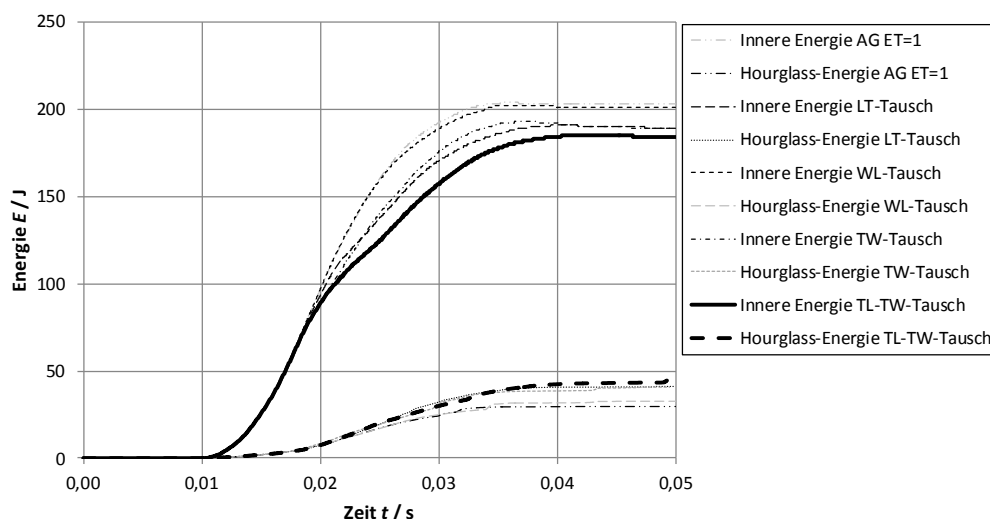


Abbildung 4.47: Auftretende Energien während eines senkrechten Impactszenarios unter einem Tausch der Schubkurven im Materialmodell #126

Um Nullenergiemoden eines Elementes zu vermeiden, kann der vollintegrierte Elementtyp 2 für die Honigwabelemente eingesetzt werden. Mit diesem Elementtyp muss allerdings eine höhere Rechenzeit in Kauf genommen werden. Um während der Berechnung negative Volumina, die einen Abbruch nach sich ziehen, zu verhindern, werden die Einstellungen in der Simulation auf der Art vorgenommen, dass stark deformierte Elemente, die unter einer Zeitschrittweite von 0,0001 fallen, erodiert werden.

Im Ergebnis ist ein Kraftverlauf (siehe Abbildung 4.48) zu erkennen, dessen Maximalkraft mit zirka 9 kN deutlich überhöht ist. Der Kraftverlauf unter dem Elementtyps 2 zeigt einen langgezogenen Anstieg des Graphen bis zum Plateaubereich an, der sich über einen kleinen Zeitraum erstreckt. Im Vergleich zur Versuchskurve ist danach ein früherer Abfall des Graphen zu erkennen.

Das Verformungsbild der Honigwabelemente zeigt eine symmetrische Deformation ohne Durchdringungen der Elemente an (siehe Abbildung 4.49). Die Ursache dafür liegt an einem Nichtvorhandensein von Nullenergiemoden, die unter einer Anwendung des Elementtyps 2 keine unphysikalischen Verformungen hervorrufen. Die Innere Energie beläuft sich auf einen Wert von 261 J (siehe Abbildung 4.50). Während der Deformation des Materials treten keine Dissipationen auf. Die erodierte Energie aufgrund der zu hohen Elementverformung beläuft sich auf 0,0001 J und verfälscht somit das Ergebnis in einem sehr geringen Umfang. Aufgrund größerer Abweichungen und hoher Rechenzeiten sollte der vollintegrierte Elementtyp nicht bevorzugt eingesetzt werden. Es wird daher mit dem Elementtyp 1 fortgefahren.

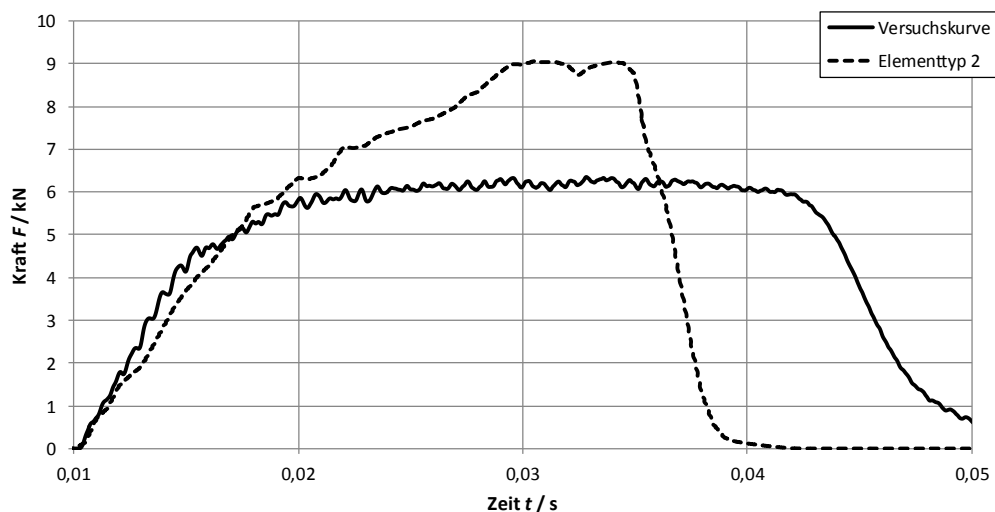


Abbildung 4.48: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter der Verwendung des Elementtyps 2 für die Honigwabelemente

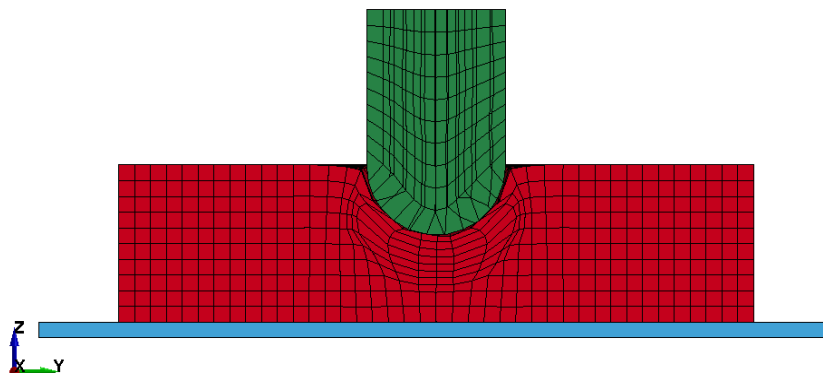


Abbildung 4.49: Verformung der virtuellen Honigwabelemente unter Nutzung des Elementtyps 2

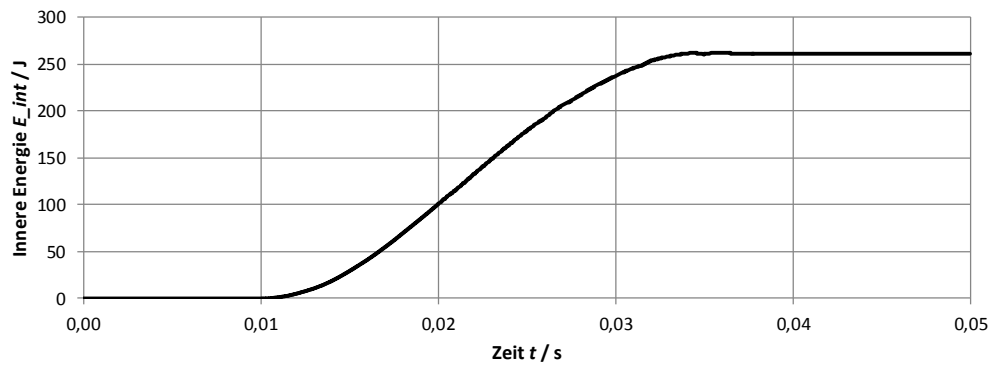


Abbildung 4.50: Auftretende innere Energie während eines senkrechten Impacts auf die virtuelle Honigwabenstruktur unter dem Elementtyp 2

Eine weitere Option, die auftretenden Nullenergiemoden zu senken, besteht in der Nutzung verschiedener Arten von Überwachungen der auftretenden Nullenergiemoden. Dazu können mehrere Kontrolltypen (IHQ) und –koeffizienten (QM) eingesetzt werden. Die Kontrolltypen 4 und 5 sind hierbei steifigkeitsbasierte Hourglass-Kontrolltypen, die ein ähnliches Elementverhalten wie unter dem Elementtyp 2 hervorrufen (siehe Abbildung 4.51). Dabei wird ebenfalls eine sehr starke Kraftüberhöhung, gefolgt von einem frühen Abfall der Kraft erzeugt. Die Deformation der Honigwabenelemente erfolgt ohne Auftreten starker Nullenergiemoden und Durchdringungen. Allerdings sind hierbei die Unterschiede zur Versuchskurve wiederum sehr groß. Deshalb sind für eine Impactsimulation die viskositätsbasierten Kontrolltypen (siehe Kapitel 3.6) eher zu verwenden. Mit einer Variation des Koeffizienten (QM) wird der Einfluss der jeweiligen Kontrolltypen auf die Honigwabenelemente geändert. Im Vergleich der verschiedenen Kraftverläufe unter diversen Kontrolltypen (siehe Abbildung 4.51) und –koeffizienten (siehe Abbildung 4.52) stellen sich die Einstellungen mit dem Kontrolltyp 1 und dem -koeffizienten von 0,05 als günstigste Lösung heraus. Die auftretenden Hourglass-Energien sind im Gegensatz zu einer Simulation ohne einer Überwachung von Nullenergiemoden geringer (siehe Abbildung 4.53). Das Verhältnis der Inneren Energie zur Hourglass-Energie beträgt in diesem Fall 19,2%. In Anbetracht des Kraftverlaufs unter dieser Kombination ist ein ausgeprägter Plateaubereich zu erkennen, der allerdings in diesem Gebiet eine niedrigere Kraft gegenüber der Versuchskurve anzeigt.

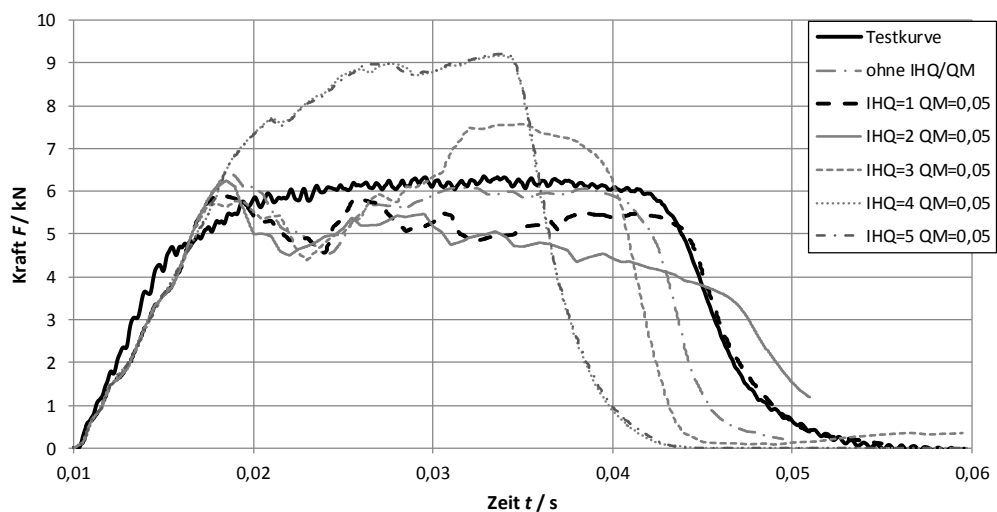


Abbildung 4.51: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter Verwendung verschiedener Kontrolltypen von Hourglass-Energien

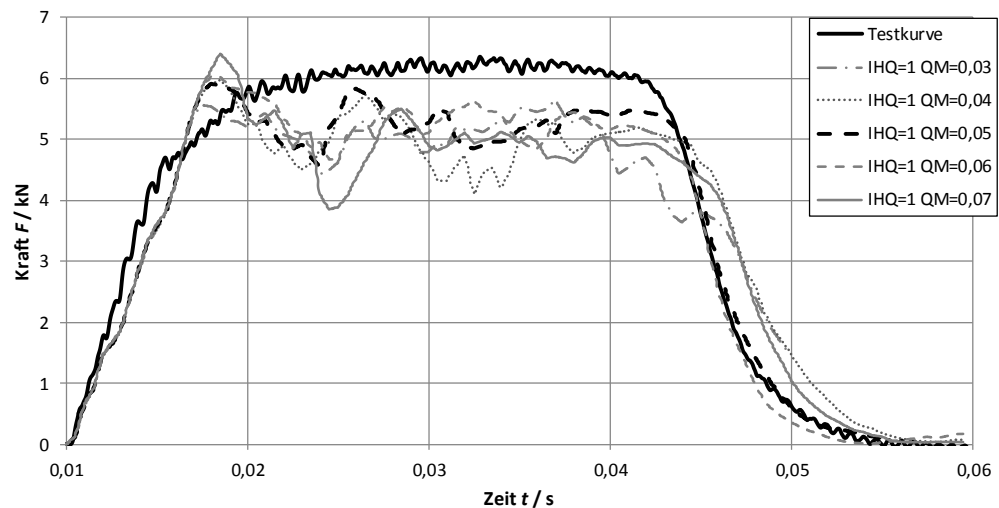


Abbildung 4.52: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter Einbezug verschiedener Koeffizienten des Kontrolltyps 1 von Hourglass-Energien

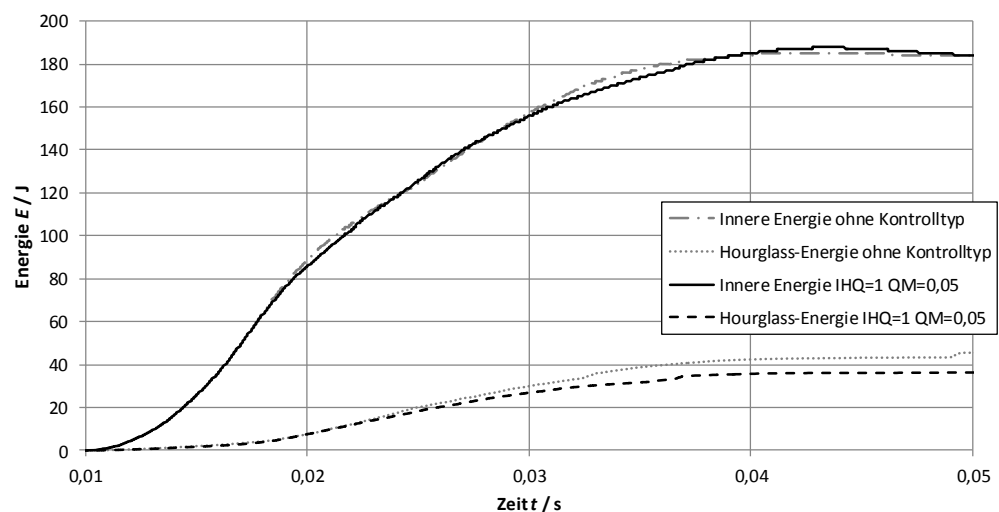


Abbildung 4.53: Auftretende Energien während eines senkrechten Impactszenarios auf die virtuelle Honigwabenstruktur unter Verwendung verschiedener Kontrollbedingungen von Hourglass-Energien

Werden die Eindringtiefen des Impactors miteinander verglichen (siehe Abbildung 4.54), so dringt der Impactor unter einer Verwendung des Kontrolltyps von Nullenergiemoden tiefer in die Honigwabenstruktur ein, sodass dies dem Versuchsfall näher kommt. Der Punkt 0 der Verschiebung stellt dabei den Punkt des Auftreffens auf das Honigwabenmaterial dar.

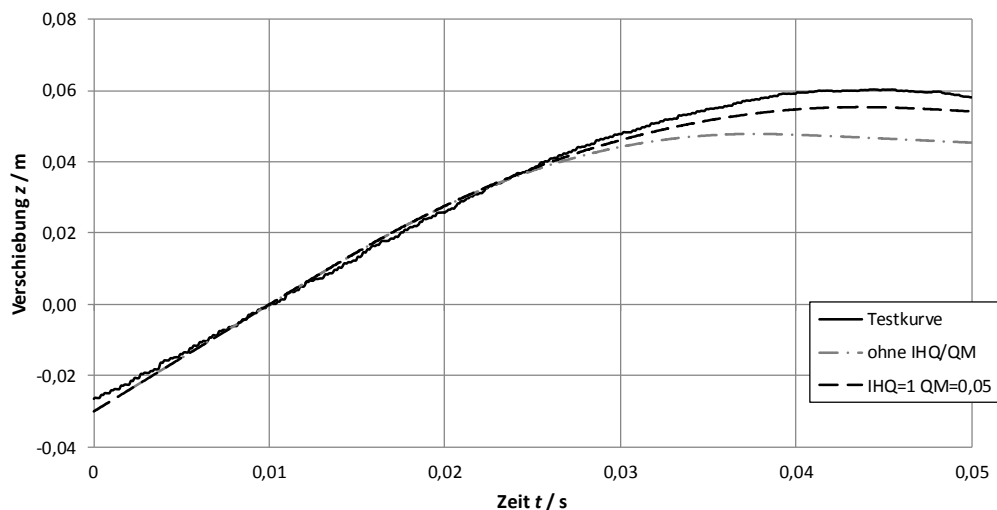


Abbildung 4.54: Verschiebungsverläufe des Impactors unter Verwendung diverser Koeffizienten zur Überwachung von Hourglass-Energien

In Abbildung 4.55 ist ein Kraft-Verschiebungs-Verlauf des Impactors zu erkennen. Darin ist der selbe Kraftverlauf wie in der Abbildung 4.52 über die Verschiebung des Impactors mit den bevorzugten Einstellungen am Modell aufgetragen. Aufgrund einer Abbremsung und einem anschließendem Zurückstoßen des Impactors nach dem Erreichen der maximalen Eindringtiefe nimmt der Kraftverlauf die Form einer Hysterese an. Der Rückstoß resultiert aus der elastischen Deformation der Honigwaben-elemente während eines Impacts. Durch diese elastische Verformung enthalten die Honigwaben-elemente potentielle Energie, die bei einem Nachlassen der Druckkraft auf den Impactor freigesetzt wird, indem sich die Honigwaben-elemente entspannen und den Impactor zurück drücken. Die Höhe der Rückstoßkraft wird über einen interpolierten Elastizitätsmodul berechnet (siehe Abbildung 3.2). Durch diese Entspannung der Honigwaben-elemente verringert sich die Innere Energie nach etwa 0,04 Sekunden (siehe Abbildung 4.53) und die Kraft in der Kontaktschnittstelle nimmt stetig ab. Sobald keine Kraft in der Verbindung vorhanden ist, geht der Kontakt des Impactors zu den Honigwaben-elementen verloren. Der Rückgang der Verschiebung des Impactors ist zudem im Verschiebungsdiagramm in der Abbildung 4.54 zu erkennen.

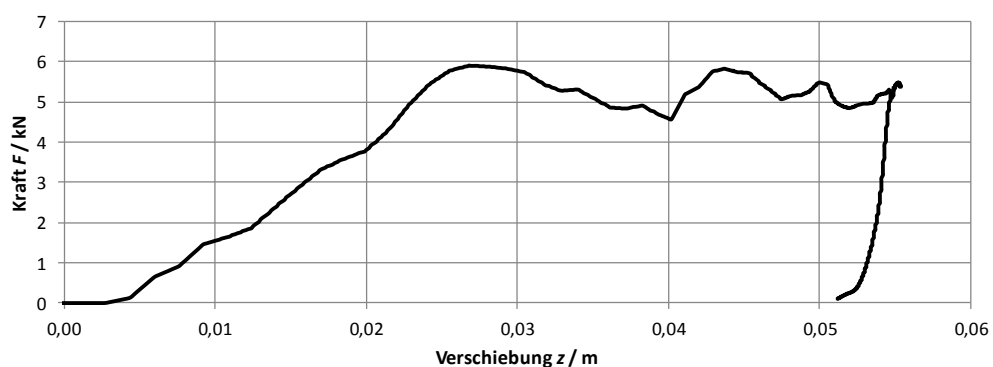


Abbildung 4.55: Kraft-Verschiebungs-Verlauf des Impactors unter dem Kontrolltyp 1 und einem -koeffizienten von 0,05

Mehrere Untersuchungen des Simulationsmodells unter veränderten Randbedingungen zeigen ein stabiles Materialverhalten der Honigwaben-elemente an. Diese Änderungen umfassen Variationen in der Impactoranfangsgeschwindigkeit auf 2 m/s sowie 4 m/s und der Elementzahl auf 20x20x5 bezie-

hungsweise 60x60x15 Elementen. Darüber hinaus wird das Honigwabenmaterial um 15°, 20° und 50° um die W-Achse gedreht.

Zur Einsparung von Rechenzeit enthalten die Punkte der implementierten Spannungskurven lediglich 100 Werte. Darüber hinaus sind in den Simulationsmodellen dieser Untersuchungen die Bewegungen der Randknoten der Honigwabenstruktur bis auf die Seite in Richtung des Impactors nach allen Richtungen gesperrt, sodass eine Modellierung der Platte nicht notwendig ist. Die Graphen der Kraft-, Verschiebungs- und Energieverläufe unter den geänderten Randbedingungen sind im Anhang A zusammengefasst. Der Nullpunkt der Verschiebung gibt im Fall des schrägen Materials den Mittelpunkt der Honigwabenstruktur an. Der Modellaufbau eines Impactszenarios mit einem schräg ausgerichteten Material ist in der Abbildung 4.56 dargestellt.

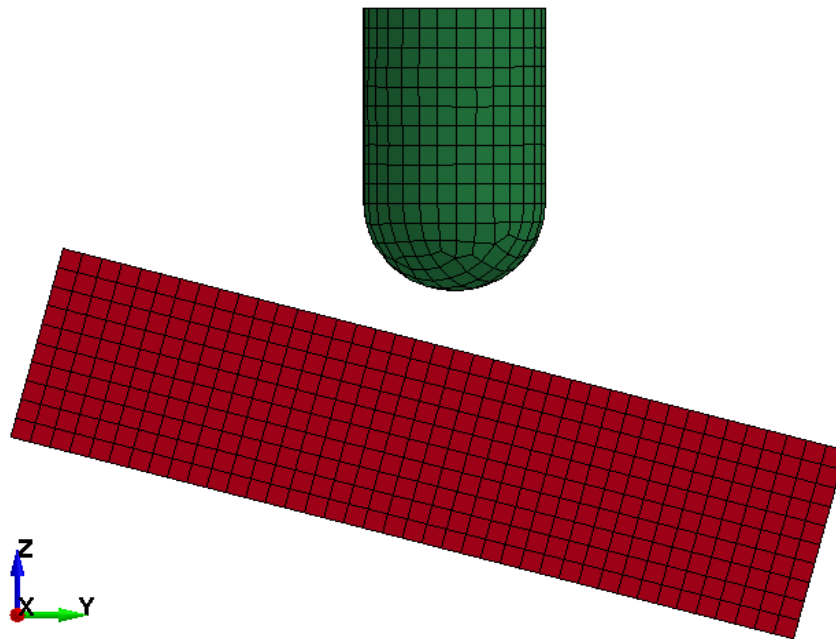


Abbildung 4.56: Aufbau des Simulationsmodells eines geneigten Impacts

Zusätzlich wird bei den Untersuchungen eines geneigten Impacts (15°) auf eine weitere Versuchskurve [9] zugegriffen. Darin wird das Honigwabenmaterial einem Impact mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s ausgesetzt. Unter Betrachtung der beiden Beschleunigungskurven ist in diesem Fall die Abbremsung des Impactors und somit die Kraft in der Simulation größer (siehe Abbildung 4.57). Wie bei den Drucktests ist die Überhöhung im Plateaubereich auf eine zu große Fließspannung unter schräger Ausrichtung des Materials zurückzuführen. Die erhöhte Fließspannung ergibt sich aus der Definition des Materialmodells #126, in der von einer quaderförmigen Fließfläche bezüglich der drei Hauptspannungsrichtungen des Materials ausgegangen wird (siehe Abbildung 3.3).

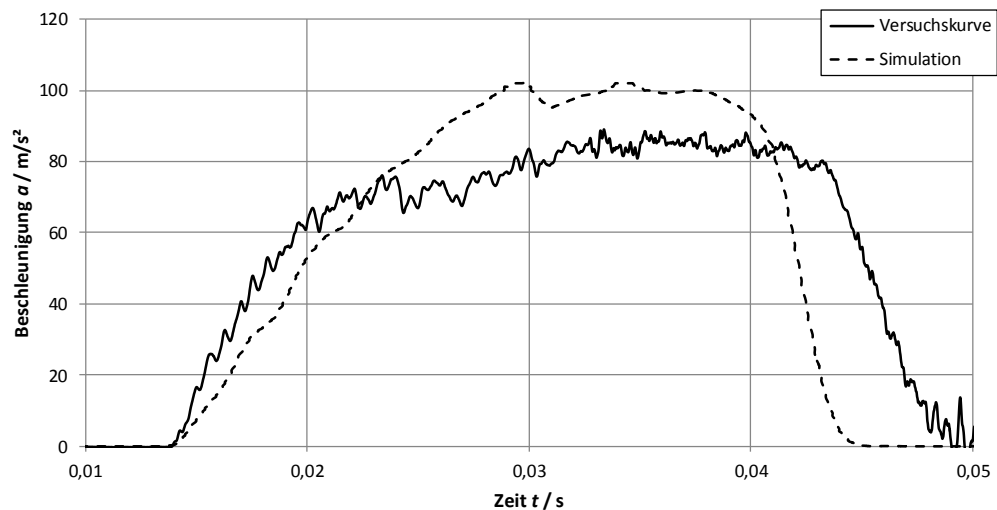


Abbildung 4.57: Beschleunigungsverlauf eines geneigten Impacts mit einer Impactoranfangsgeschwindigkeit von 2 m/s unter einer Elementanzahl von 40x40x10 Elementen

Zusammenfassend erweisen sich bei den Impactsimulationen folgende Modelleinstellungen als vorteilhaft:

- Erweiterte Definition der Schubspannungskurven für höhere Schubdehnungen
- Kontaktparameter
 - Statischer Reibungswert FS = 0,5
 - Kontaktsteifigkeit SFS = 10
- direktes Auftreffen eines Impactorknotens auf einen Knoten der Honigwabenstruktur
- Materialmodell #126 Version 1
- Kontaktdefinition: *AUTOMATIC_GENERAL
- Elementtyp 1
- keine Dehnrateneffekte
- Anfangszeitrittweite TSSFAC = 0,1
- Implementierung der schwächeren Schubspannungskurven in Bezug auf die Dickenrichtung T
- Überwachung von Nullenergiemoden
 - Kontrolltyp IHQ = 1
 - Kontrollkoeffizient QM = 0,05

Ein Quellcode mit den Erkenntnissen dieser Untersuchungen ist im Anhang B enthalten. Er entspricht einem senkrechten Impact mit einer Impactoranfangsgeschwindigkeit von 3 m/s.

4.5. Erstellung und Analyse der virtuellen Deckschichtkomponente

Die Untersuchungen des Deckschichtmaterials werden anhand eines einzelnen Schalenelementes mit den Maßen 250 mm x 25 mm und einer Dicke von 0,2mm dargestellt. Eine der kurzen Seiten des Schalenelementes ist dabei vollständig fixiert. Für die gegenüberliegende Seite ist eine Bewegung in die Richtung, in der der Kraftvektor zeigt, möglich. Das Schalenelement wird mit dem Elementtyp 2 ausgestattet, da die Annahmen eines ebenen Spannungszustandes vertretbar sind. Darin werden von einer geringen Deckschichtdicke und einer Vernachlässigung ausgeprägter Belastungen in Dickenrichtung ausgegangen. [1] Des Weiteren wird für das Schalenelement das Materialmodell #54/55 verwendet, welches für Schalenelemente gültig ist. Die aus den Versuchen abgeleiteten Materialwerte

[7] werden in das Materialmodell übertragen und sind in der Abbildung 4.58 dargestellt. Durch die gleichen Werte in X- und Y-Richtung im Materialmodell wie beispielsweise ein angenommener Elastizitätsmodul von 13200 N/mm^2 besitzt das einzelne Element quasi-isotrope Materialeigenschaften, sodass dadurch die Materialeigenschaften in Längs- und Querrichtung gleichgesetzt sind. Darüber hinaus können Bruchdehnungen über die Parameter DFAILM, DFAILT und DFAILC implementiert werden. Die Festigkeiten werden über die Parameter XC, XT, YC, YT und SC eingegeben. Darin wird vereinfacht angenommen, dass die Druckwerte (XC, YC) den Zugwerten (XT, YT) gleich sind.

1	MID	RO	EA	EB	(EC)	PRBA	(PRCA)	(PRCB)
	1	0.2614000	1.320e+010	1.320e+010	0.0	0.3000000	0.0	0.0
2	GAB	GBC	GCA	(KF)	AOPT			
	5.080e+009	0.0	0.0	0.0	2.0000000			
3	XP	YP	ZP	A1	A2	A3	MANGLE	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000	0.0	
4	V1	V2	V3	D1	D2	D3	DFAILM	DFAILS
	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000	0.0	0.0157600	1.0000000
5	TFAIL	ALPH	SOFT	FBRT	YCFAC	DFAILT	DFAILC	EFS
	0.0	0.0	1.0000000	0.0	1.0000000	0.0157600	-0.0157600	0.0
6	XC	XT	YC	YT	SC	CRIT	BETA	
	2.080e+008	2.080e+008	2.080e+008	2.080e+008	4.000e+007	54.0	0.0	
7	PEL	EPSE	EPSR	TSMD	SOFT2			
	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000			
8	SLIMT1	SLIMC1	SLIMT2	SLIMC2	SLIMS	NCYRED	SOFTG	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000	
9	LCXC	LCXT	LCYC	LCYT	LCSC	DT		
	0	0	0	0	0	0.0		

Abbildung 4.58: Materialkarte des Materialmodells #54/55 mit den Eingabeparametern der Simulation

Im Ergebnis der Simulation des Schalenelementes unter Zugbeanspruchung ist ein linear ansteigender Graph (siehe Abbildung 4.59) zu erkennen, der bis zu einer maximalen Spannung, die dem Festigkeitswert entspricht, ansteigt und dort konstant bis zur definierten Bruchdehnung verläuft. An dem Punkt der Bruchdehnung wird das Element erodiert. Maßgeblich für den Spannungsverlauf unter Zugbelastung in Längsrichtung sind die Parameter XT für die Zugfestigkeit, der E-Modul E für die Steigung des Graphen und DFAILT für die Bruchdehnung des Schalenelementes.

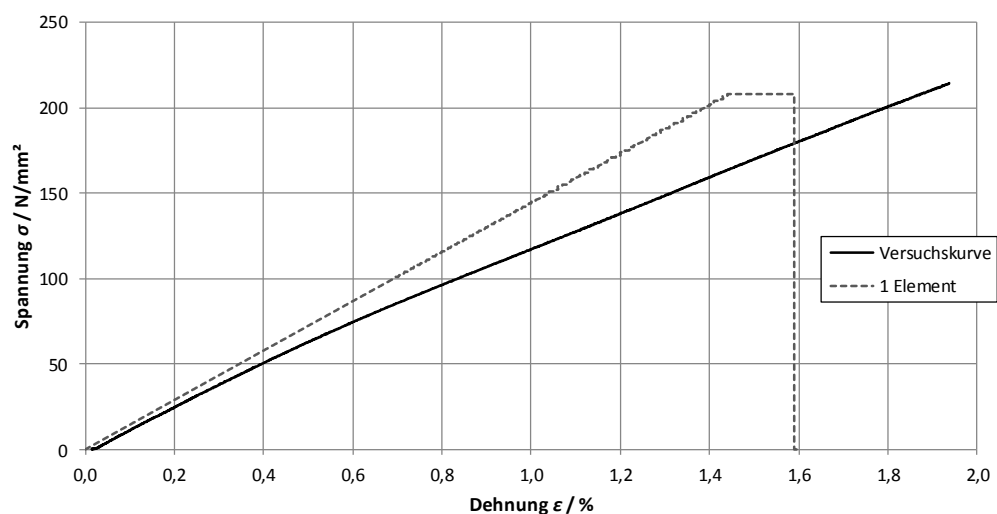


Abbildung 4.59: Spannungsverlauf der virtuellen Deckschicht unter Zugbelastung mit einem einzelnen Element und dem Materialmodell #54/55

Ein Setzen des Parameters BETA auf den Wert 1 sorgt für ein einheitliches Zugfaser- mit dem Zugmatrrixkriterium. [7] Dieser Parameter verändert jedoch nicht das Simulationsverhalten eines einzelnen Elementes. Für eine Untersuchung unter einer erhöhten Elementzahl (50x5) wird an der gegenüberliegenden Seite, an der die Kraft angreift, ein starrer fixierter Körper eingesetzt, um die Kräfte in der Kontaktschnittstelle auswerten zu können. Der Aufbau des Modells ist in Abbildung 4.60 zu erkennen. Diese beiden Körper sind mit der Kontaktdefinition *TIED_SURFACE_TO_SURFACE, einer unlösbaren Kontaktdefinition, miteinander verbunden.

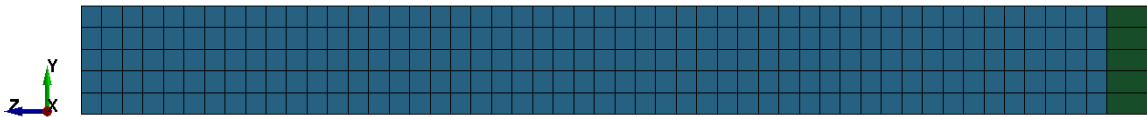


Abbildung 4.60: Aufbau des virtuellen Deckschichtmaterials mit einer Elementzahl von 50x5

Unter der Verwendung einer höheren Elementzahl mit BETA=1 die Elementlöschung eher ein. Der charakteristische Verlauf des Graphen bleibt allerdings unter Variation dieses Parameters in der Materialmodellierung linear. Da mit diesem Parameter keine Verbesserung des Materialverhaltens erfolgt, wird dieser nicht weitergehend behandelt.

Ein Wechsel zu dem vollintegrierten Schalenelementtyp 16 ruft ein unphysikalisches Elementverhalten hervor, sodass der Elementtyp 2 dem vollintegrierten Volumenelementtyp vorzuziehen ist. Unter Variation diverser Materialparameter zeigt sich, dass sich mit dem Parameter EFS die maximale effektive Bruchdehnung konfigurieren lässt. Weitere Parameter wie CRIT, PEL und SOFT2 üben keinen Einfluss auf das Simulationsverhalten aus.

Die Theorie zeigt, dass der Spannungsverlauf über den Elastizitätsmodul EA und der maximalen Festigkeit XT in Längsrichtung unter Zugbelastung beeinflussbar ist. Eine Annäherung an die Versuchskurve ist daher durch eine Reduzierung des E-Moduls zu erreichen (siehe Abbildung 4.61). Die Veränderung des E-Moduls berechnet sich für den einachsigen Spannungsfall mit $\beta=0$ wie folgt:

$$e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_T} \right)^2 - 1 \quad (64)$$

$$\sigma_{aa} = E_a \cdot \varepsilon_a \quad (65)$$

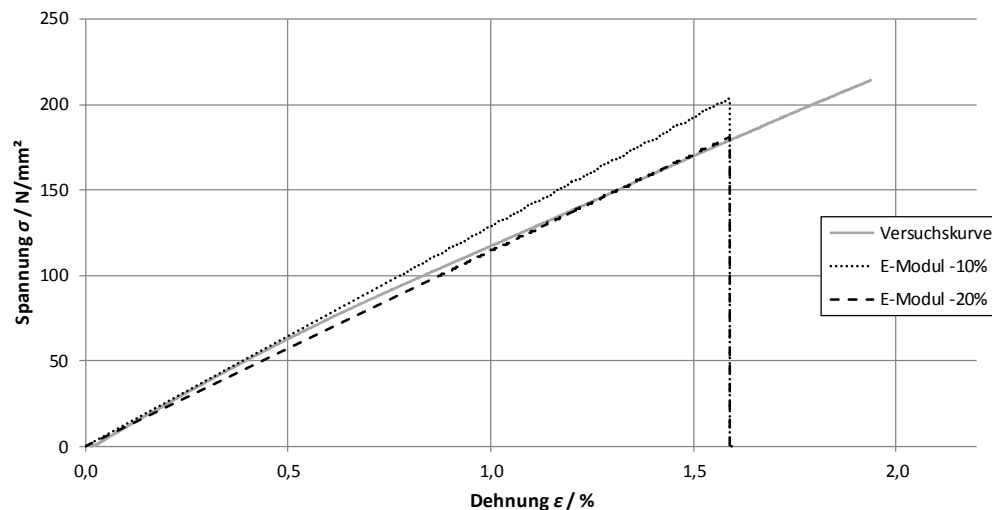


Abbildung 4.61: Spannungsverlauf der virtuellen Deckschicht unter Zugbelastung mit dem Materialmodell #54/55 unter Änderung der Materialparameter

Dieses Materialmodell bietet keine weitere Option zur Beeinflussung des Spannungsgraphen unter einer einachsigen Zugbelastung. Ein alternatives Materialmodell sollte in der Lage sein, einen veränderlichen E-Modul des Graphen zu realisieren, sodass die Versuchskurve angenähert werden kann. Außerdem sollte es mit diesem Modell möglich sein, Bruchdehnungen und maximale Festigkeiten definieren zu können. Zur Darstellung von Faserverbundwerkstoffen können 6 Materialmodelle mit den Nummern 22, 54/55, 58, 59, 161 und 162 eingesetzt werden. [15] Das Materialmodell #22 ist dabei ein direkter Vorgänger vom Materialmodell #54/55 und wird daher nicht behandelt. [15] Mit dem Materialmodell #58 kann ein größerer Einfluss auf den Spannungsverlauf über ein darin implementiertes schadensmechanisches Modell (siehe Kapitel 3.4) genommen werden. Dieses wird im Nachhinein näher betrachtet, da es für Schalenelemente verwendet werden kann. Im Materialmodell #59 ist es nicht möglich, Bruchdehnungen zu definieren. Dadurch wird es für weitere Untersuchungen nicht in Betracht gezogen. Die Materialmodelle #161/#162 benötigen eine weitere Lizenz, die für die Untersuchungen in dieser Arbeit nicht vorlag.

Im Materialmodell #58 lässt sich der Spannungsgraph in Längsrichtung unter Zugbelastung über die Parameter EA, E11T, SLIMT1, XT und ERODS steuern (siehe Abbildung 3.5). Mit den Parametern XT und E11T kann dabei ein Punkt für die Festigkeit definiert werden, den der Spannungsverlauf während der Simulation ansteuert. Der Elastizitätsmodul in Längsrichtung (EA) von 13200 N/mm² wird hierbei als ein fester Wert betrachtet, sodass sich der Fokus auf die anderen Parameter verteilt. Der Parameter SLIMT1 ist ein Multiplikationsfaktor, der sich auf den Nachversagensbereich, dem Bereich nach der Festigkeit, konzentriert. Dieser übt bis zum Erreichen der maximalen Zugfestigkeit (XT), die in diesem Modell als ein veränderlicher Parameter zur Annäherung an die Versuchskurve angesehen wird, keinen Einfluss aus. Eine empirische Studie unter Variation dieser signifikanten Parameter zeigt, dass unter der Erhöhung der Elementzahl sich hierbei ein früheres Erodieren der Elemente zeigt. Weitere Parameter wie RO, EB, PRBA oder GAB üben keinen Einfluss unter Veränderung ihrer Werte auf den Spannungsverlauf aus. Weiterhin zeigt sich, dass XT, YT und SC Parameter sind, die zusätzlich definiert werden müssen, damit kein Abbruch der Berechnung erfolgt.

In der Abbildung 4.62 wurde ein fester Punkt für das Materialversagen unter einer Spannung von 100 N/mm² ausgewählt, wodurch sich der virtuelle Spannungsverlauf über den gesamten Dehnungsbereich in der Nähe der Versuchskurve aufhält. Beide Kurven schneiden sich während des Verlaufs

mehrmals, sodass die Abweichungen zwischen den Graphen über den gesamten Dehnungsbereich in Grenzen gehalten werden können.

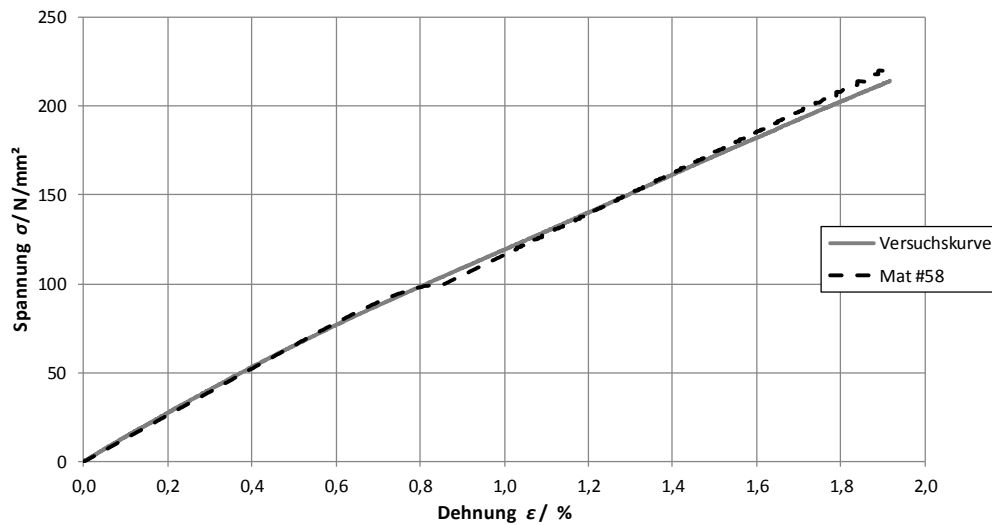


Abbildung 4.62: Spannungsverlauf der virtuellen Deckschicht unter Zugbelastung mit dem Materialmodell #58

Eine weitere Verbesserung des Elementverhaltens wird mit einer Vergrößerung des nichtlinearen Spannungsbereiches erreicht (siehe Abbildung 4.63). Dies wird mit den Eingabewerten aus der Abbildung 4.64 erreicht. Der SLIMIT-Parameter für den Nachversagensbereich ist in diesem Fall vernachlässigbar, da der Punkt des Materialversagens, bei dem der Spannungsgraph nahezu horizontal verläuft, nicht erreicht wird. Dieser Punkt befindet sich hinter dem Wert der definierten Bruchdehnung. Mit dieser Modifikation wird eine ausreichend hohe Annäherung an den Spannungsverlauf der Versuchskurve erreicht. Unter Veränderung der Elementkantenlänge muss lediglich der Parameter ERODS neu bestimmt werden. In diesem Fall wird exemplarisch eine Bruchdehnung von etwa 1,9% angenommen, da die Versuchskurve bis zu dieser Dehnung definiert ist. Unter einer Elementzahl von 50x5 (Elementkantenlänge 5mm) beläuft sich der Wert für die effektive Bruchdehnung ERODS auf 0,0215 und bei 100x10 Elementen auf 0,0237. Er muss demnach bei kleinerer Elementkantenlänge nach oben korrigiert werden. Der Quellcode der Deckschichtuntersuchung ist im Anhang B enthalten.

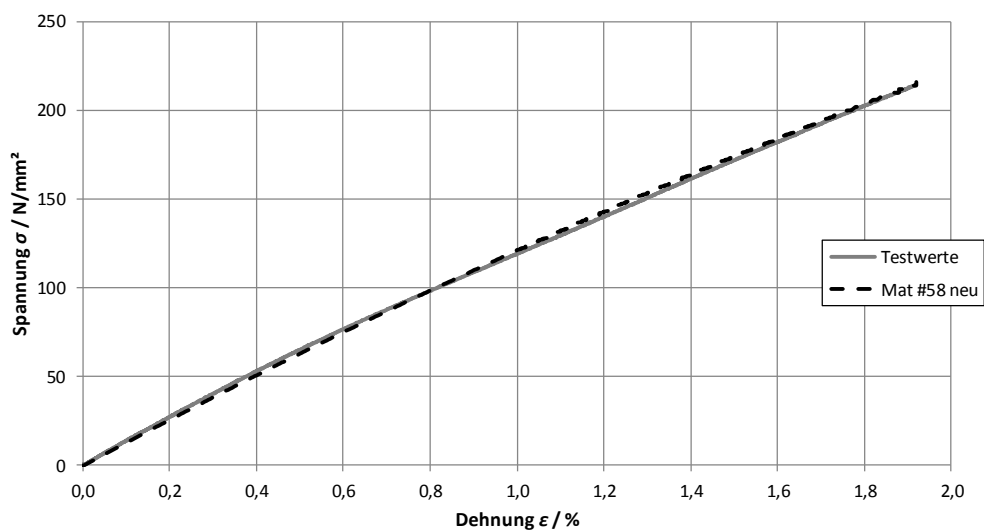


Abbildung 4.63: Angenäherter Spannungsverlauf der virtuellen Deckschicht unter Zugbelastung mit dem Materialmodell #58

1	MID	RO	EA	EB	(EC)	PRBA	TAU1	GAMMA1
	2	0.2614000	1.320e+010	1.320e+010	0.0	0.3000000	0.0	0.0
2	GAB	GBC	GCA	SLIMT1	SLIMC1	SLIMT2	SLIMC2	SLIMS
	5.080e+009	0.0	0.0	1.0000000	0.0	1.0000000	0.0	0.0
3	AOPT	TSIZE	ERODS	SOFT	FS			
	2.0000000	0.0	0.0215000	0.0	0.0			
4	XP	YP	ZP	A1	A2	A3		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000		
5	V1	V2	V3	D1	D2	D3	BETA	
	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000	0.0	0.0	
6	E11C	E11T	E22C	E22T	GMS			
	0.0	0.1120000	0.0	0.1120000	0.0			
7	XC	XT	YC	YT	SC			
	1.000e+008	5.700e+008	1.000e+008	5.700e+008	4.000e+007			

Abbildung 4.64: Materialkarte des Materialmodells #58 mit den Eingabeparametern der Materialmodellierung

4.6. Implementierung der virtuellen Klebschichtkomponente

Eine Delamination zwischen der Kern- und der Deckschicht kann unter 3 verschiedenen Belastungsmoden erfolgen (siehe Abbildung 4.65). Die Untersuchungen in dieser Arbeit beschränken sich hierbei auf die Moden 1 und 2.

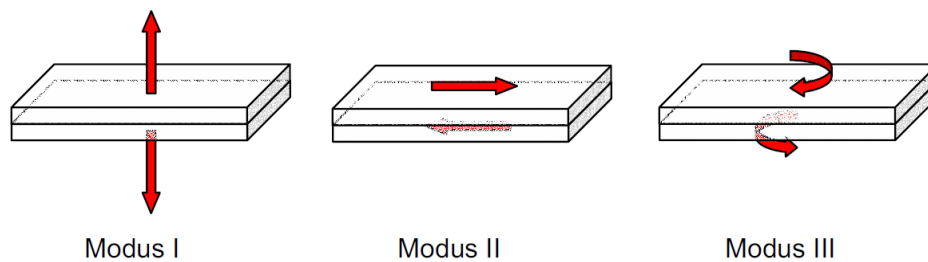


Abbildung 4.65: Darstellung der Möglichkeiten von Delaminationsmoden [16]

Zur Erstellung einer Klebschicht können in LS-DYNA Kontaktdefinitionen oder sogenannte Kohäsivelemente verwendet werden (siehe Abbildung 4.66). Dabei sind die Kontaktdefinitionen für anspruchsvolle Geometrien geeignet. [24] Neben der in der Abbildung 4.66 dargestellte Kontaktdefinition sind für die Modellierung einer Klebschicht weitere möglich. Diese sind unter anderem [15]:

- AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK
- TIEBREAK_SURFACE_TO_SURFACE
- TIEBREAK_NODES_TO_SURFACE
- TIEBREAK_NODES_ONLY

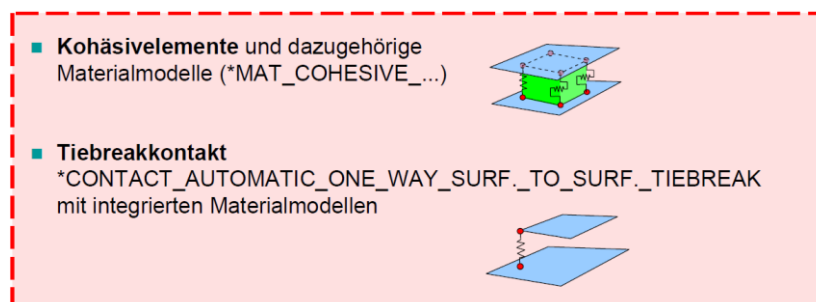


Abbildung 4.66: Möglichkeiten zur Modellierung einer Klebschicht [24]

Im Vergleich dieser fünf Kontaktdefinitionen für die Erstellung einer Klebschicht ist dabei nur die Kontaktdefinition `*AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK` geeignet. Die weiteren Kontaktdefinitionen führen zu vereinzelt oder totalen Fehler. [24] Mit einer Tiebreak-Bedingung werden die Knoten zweier Verbindungspartner zunächst fest miteinander verbunden und beim Erreichen einer kritischen Spannung die Knotenverbindung gelöst. Anschließend wird ein Antipenetrationskontakt aufgebaut, der das gegenseitige Eindringen der Kontaktpartner verhindert. [1] Weiterhin wird empfohlen, die Elementgrößen zur Verbesserung der Ergebnisse zu verfeinern. [24]

Die Abbildung 4.67 zeigt die Verformung einer Sandwichstruktur nach einem Impactlastfall. Darin ist kein Ablösungsverhalten der Deckschichten zu erkennen. Zur Erstellung der virtuellen Klebschicht ist somit die Eingabe eines Versagenskriteriums in der Kontaktdefinition nicht zwingend notwendig. Soll eine unlösbare Verbindung modelliert werden, so lässt sich die Kontaktdefinition `*TIED_SURFACE_TO_SURFACE` verwenden, welche sich bereits bei den Schubtests der Honigwaben-elemente (siehe Kapitel 4.3.6) für die Verbindung zwischen den Schalen- und den Honigwaben-elementen bewährt hat.

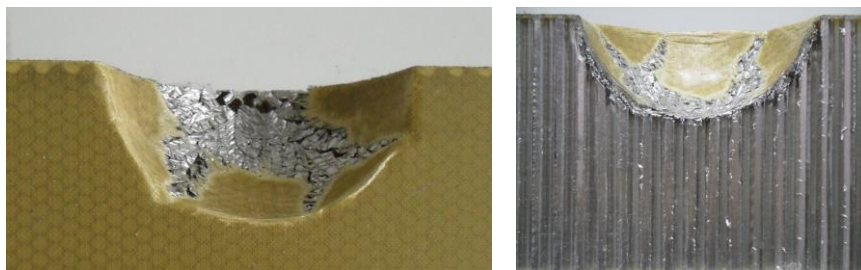


Abbildung 4.67: Foto einer Sandwichstruktur nach einem senkrechten Impact [9]

Eine weitere Möglichkeit zur Erstellung einer Klebschicht bietet eine Modellierung unter Anwendung von Kohäsivelementen. Diese sind Volumenelemente und beinhalten 8 Knoten mit 4 Integrationspunkten. Sobald während der Beanspruchung der Klebschicht ein Fehlerkriterium erreicht wird, tritt ein Versagen am jeweiligen Integrationspunkt auf. Durch den Benutzer wird festgelegt, wie viele der vier Integrationspunkte versagen müssen, damit das Kohäsivelement erodiert wird. [1]

Eine Modellierung mit Kohäsivelementen kann unter der Einbeziehung der Materialmodelle #184 (`*MAT_COHESIVE_ELASTIC`) oder #185 (`*MAT_COHESIVE_TH`) erfolgen. [1] Weitere Alternativen sind:

- `*MAT_COHESIVE_MIXED_MODE` (#138)
- `*MAT_COHESIVE_GENERAL` (#186)
- `*MAT_COHESIVE_MIXED_MODE_ELASTOPLASTIC_RATE` (#240)

Des Weiteren kann bei einer Verbindung zweier Volumenelemente der Elementtyp 19 beziehungsweise zweier Schalenelemente der Elementtyp 20 verwendet werden (siehe Abbildung 4.68).

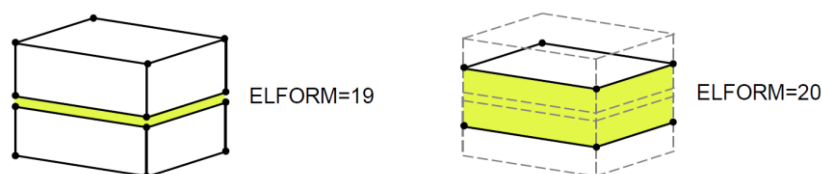


Abbildung 4.68: Mögliche Elementtypen zur Darstellung von Kohäsivelementen [24]

Zur Verifizierung des virtuellen Klebschichtverhaltens dient jeweils ein einzelnes Element für die Honigwabenstruktur mit den Abmessungen 0,1m x 0,1m x 0,025m und der Deckschicht mit einer Schalenelementdicke von 0,2mm (siehe Abbildung 4.69). Für das Honigwabenelement wird das Materialmodell #126 mit dem Elementtyp 1 und für die Deckschicht das Materialmodell #58 unter Einbezug der entsprechenden Materialeigenschaften aus den vorangegangenen Abschnitten mit dem Elementtyp 2 benutzt. Die Knoten des Honigwabenelementes auf der gegenüberliegenden Seite der Deckschicht werden vollständig fixiert. Weiterhin wird an den Knoten des Deckschichtelementes eine vorgeschriebene Bewegung in positive Z-Richtung integriert, um eine Zugbelastung in der Kontaktstelle aufzubringen.



Abbildung 4.69: Aufbau des Simulationsmodells zur Klebschichtuntersuchung

In einer Vorarbeit (siehe Kapitel 3.8) hat sich für die Simulation einer Klebschicht die Kombination der beiden Kontaktdefinitionen `*AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK` mit der `OPTION = 4` für ein Tiebreak-Fehler-Kriterium der Normalspannungskomponente und `*TIED_SURFACE_TO_SURFACE_FAILURE` als vorteilhaft in Bezug auf das virtuelle Klebschichtverhalten herausgestellt. Dabei wird ein abruptes Kontaktversagen unter einer Zugfestigkeit von $\sigma = 1,97 \text{ N/mm}^2$ durch einen Einbruch der Spannungskurve festgestellt. [7] Sollen außerdem Fehlerkriterien unter Schubbelastung eingefügt werden, so kann dies äquivalent zur Zugbeanspruchung mit einer Eingabe der Fehlerparameter SFLS und FD für die maximale Schubfestigkeit erfolgen.

Innerhalb der Berechnung wird das Schalenelement nach beiden Seiten gleichmäßig bis zum Erreichen der definierten Schalenelementdicke vergrößert. Dadurch kommt es zu einer Überschneidung zwischen dem Schalenelement und dem Volumenelement (siehe Abbildung 4.70), welche in den Auswertungen berücksichtigt werden muss. Diese Überschneidung kann durch eine Nutzung von Volumenelementen für die Deckschicht behoben werden. Jedoch ist dafür das Materialmodell #58 nicht geeignet.

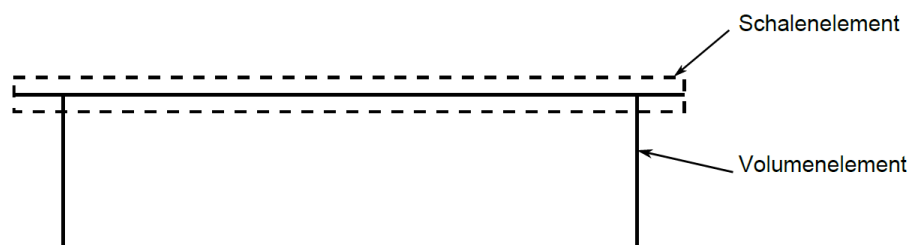


Abbildung 4.70: Überschneidung des Volumen- und Schalenelementes bei der Berechnung des Klebschichtverhaltens

Das Vorhandensein dieser Überschneidung belegt eine Untersuchung mit einer halbierten Schalenelementdicke von 0,1mm. Der Versatz zwischen den Spannungskurven (siehe Abbildung 4.71) bestätigt, dass der negative Spannungswert am Anfang und der Schnittpunkt mit der Kraft 0 jeweils von

der Höhe der Überschneidung zwischen den beiden Elementen abhängig sind. Der Schnittpunkt zum Zeitpunkt $t = 0,1\text{ms}$ bei einer Schalenelementdicke von $0,2\text{mm}$ bestätigt dies zusätzlich. Da sich das obere Schalenelement mit einer Geschwindigkeit von 1m/s bewegt, legt es nach einer Zeit von $0,1\text{ms}$ die halbe Schalenelementdicke zurück.

Der Quellcode dieser Untersuchung mit einer halbierten Schalenelementdicke ist im Anhang B dargestellt.

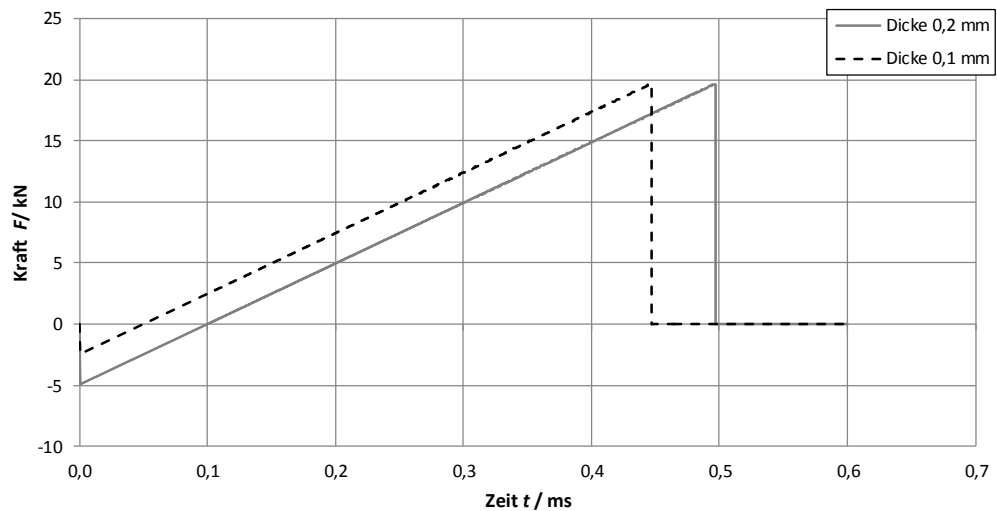


Abbildung 4.71: Spannungsverlauf in der virtuellen Klebschicht unter Halbierung der Deckschichtdicke

5. Bewertung der Berechnungsmodelle

Grundsätzlich sei erwähnt, dass die experimentellen Daten gewisse Fehler beinhalten. Diese entstehen durch Toleranzen in den Materialproben beispielsweise durch Imperfektionen in der Materialgeometrie aufgrund einer ungenauen Ausrichtung der Zellwände. Dadurch werden die Materialeigenschaften bezüglich der Festigkeit, der Steifigkeit etc. beeinträchtigt. Außerdem müssen diverse Fehler in der gesamten Messwerterfassung berücksichtigt werden.

Weiterhin gibt es Vereinfachungen im Materialmodell #126, sodass das reale Materialverhalten nicht vollständig abgebildet werden kann. Bei der Eingabe der Schubspannungskurven können nur 3 Lastfälle in dem Modell implementiert werden. Es ist folglich dem Benutzer überlassen, welche Schubspannungskurven eingesetzt werden. Die Ergebnisse der Impactuntersuchungen in dieser Arbeit belegen, dass die jeweils schwächeren Schubspannungskurven in Bezug auf die Dickenrichtung T gewählt werden sollten, um das Materialverhalten reeller darstellen zu lassen.

Des Weiteren besteht in Bezug auf die Impactsimulationen die Möglichkeit, zu verschiedenen Ergebnissen zu gelangen, indem ein Lösungsweg in einer anderen Reihenfolge der Auswahlkriterien beschritten wird. In dieser Arbeit wird beispielsweise als erstes von den Kontaktparametern ausgegangen, ehe es zur Untersuchung der Aufprallbedingung auf die Honigwabenstruktur kommt. Diese Lösungsreihenfolge wurde willkürlich ausgewählt und folgt keinem konkreten Schema.

Werden die Verschiebungskurven miteinander verglichen, so fällt auf, dass die Graphen zwischen der Anfangszeit und dem Auftreffen auf das Honigwabenmaterial bei 0 m unterschiedliche Steigungen besitzen (siehe Abbildung 5.1, Anhang A). Dadurch wirkt ein unterschiedlich großer Impuls auf das Honigwabenmaterial, sodass eine Vergleichbarkeit der Graphen erschwert wird und die Abweichungen der jeweiligen Eindringtiefen beeinflusst werden. Bei den Szenarien eines senkrechten Impacts mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 3m/s des Impactors sowie dem Szenario eines geneigten Impacts (15°) mit 2 m/s sind gegenüber den Versuchskurven [9] höhere Geschwindigkeiten in der Simulation zu erkennen. Die Ursache für den Geschwindigkeitsunterschied konnte bisher nicht geklärt werden. Es wäre jedoch möglich, dass LS-DYNA die vorgeschriebene Geschwindigkeit aus dem Pre-Processing ungenau in die Berechnung einliest.

Aufgrund des Verschiebungsverlaufs in Abbildung 5.1 wäre zu erwarten, dass der Impactor in der Simulation einer größeren Eindringtiefe erreicht, da ein größerer Impuls auf die Honigwabenelemente vorherrscht. Da das Gegenteil eintritt, besteht die Möglichkeit, dass die Materialeingabeparameter ungenau sind. Diese Ungenauigkeit könnte beispielsweise auch die Materialparameter des Impactors betreffen. Es ist aufgefallen, dass die Ermittlung der Dichte des Impactors mit einer effektiven Masse des Impactors von 54 kg berechnet wurde. [7] Zur Erstellung der Versuchskurve wurde jedoch die effektive Masse des Impactors mit 57 kg angegeben. [9] Die korrigierte Dichte des Impactors beträgt demnach 68921 kg/m³. Zu erwarten wäre dadurch eine höhere Eindringtiefe in die virtuelle Honigwabenstruktur und eine länger anhaltende Plateaukraft während der Abbremsung des Impactors.

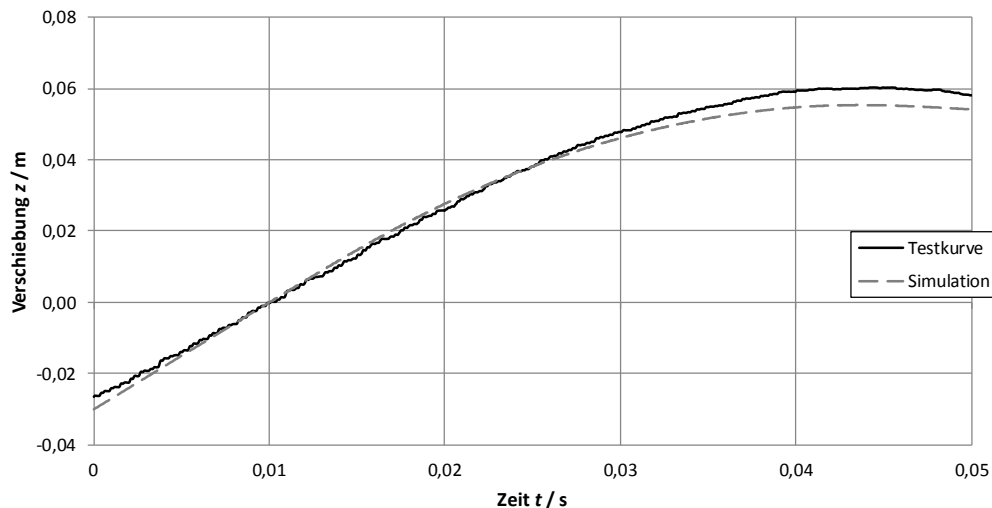


Abbildung 5.1: Verschiebungsverläufe des Impactors bei einem senkrechten Impact mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 3 m/s

Werden die Simulationsergebnisse mit den Versuchsdaten des senkrechten Impacts unter einer Impactorgeschwindigkeit von 3 m/s miteinander verglichen, so ist zu beobachten, dass die Eindringtiefe des Impactors in der Simulation geringer ausfällt (Tabelle 5.1). Des Weiteren ist die Plateaukraft des Honigwabenmaterials im Gegensatz zu den Versuchen kleiner. Die Ursache dieser Unterschiede liegt unter anderem darin, dass die Versuchskurve [9] nicht das virtuelle Honigwabenmaterial des Materialmodells #126 darstellt (siehe Kapitel 2.2.2). Mit dem schwächeren Honigwabenmaterial aus der Simulation würde die Versuchskurve demnach einen Verlauf mit einer geringeren Plateaukraft aufweisen, sodass diese Abweichung im Vergleich zur Simulationskurve geringer ausfallen würde. Der Kraftabfall bei einem Impactszenario mit dem virtuellen Honigwabenmaterial würde allerdings später erfolgen, da der Impactor tiefer in das Honigwabenmaterial eindringt. Die Abweichungen der Eindringtiefe würden sich daher im Gegensatz zu dem Kraftunterschied erhöhen. Es besteht daher die Wahrscheinlichkeit, dass in Bezug auf die Abbildung 4.52 ein Kraftverlauf mit einem anderen Kontrollkoeffizienten (QM), beispielsweise mit einem Wert von 4, den Verlauf der Versuchskurve annähert. Die auftretenden Hourglass-Energien in diesen Simulationen sind, obwohl sie zirka ein Fünftel der Inneren Energie einnehmen, durch ihr langperiodisches Verhalten annehmbar.

Tabelle 5.1: Vergleich zwischen dem Simulationsergebnis und den Versuchsdaten des senkrechten Impactszenarios mit einer Impactorgeschwindigkeit von 3 m/s

	maximale Kraft F / N	maximale Beschleunigung a / m/s^2	Innere Energie E_{inn} / J	Hourglass-Energie E_{HG} / J	Verhältnis Hourglass-Energie/ Innere Energie	Eindringtiefe z / m
Simulation	5910	111	188	37	19%	0,055
Versuchskurve	6352	120	-	-	-	0,060
Fehler	-7%	-8%				-8%

Das Gegenteil ist bei der Betrachtung der Daten des geneigten Impacts mit einer Impactorgeschwindigkeit von 2 m/s zu erkennen (Tabelle 5.2). Darin sind eine größere Maximalkraft und eine höhere maximale Beschleunigung in der Simulation zu erkennen, die jedoch auf die erhöhte angenommene Fließspannung im Materialmodell #126 unter einer schrägen Materialausrichtung zurückgeführt werden kann. Ebenso ist eine höhere Eindringtiefe des Impactors zu erkennen. Unter Betracht des Verschiebungsverlaufs (siehe Anhang A) ist auch bei diesem Impactszenario eine höhere Impactoranfangsgeschwindigkeit in der Simulation zu erkennen, dessen Ursache nicht begründet werden kann.

Das Auftreten der Hourglass-Energie ist in diesem Fall geringer, sodass davon ausgegangen werden kann, dass ein kleinerer Impuls auf die Honigwabenelemente, also eine schwächere Deformation der Honigwabenelemente, den Anteil der Hourglass-Energie reduziert.

Tabelle 5.2: Vergleich zwischen dem Simulationsergebnis und den Versuchsdaten des geneigten Impacts (15°) mit einer Impactorgeschwindigkeit von 2 m/s

	maximale Kraft F / N	maximale Beschleunigung a / m/s^2	Innere Energie E_{Inn} / J	Hourglass-Energie E_{HG} / J	Verhältnis Hourglass-Energie/ Innere Energie	Eindringtiefe z / m
Simulation	5508	102	96	9	10%	0,030
Versuchskurve	4808	89	-	-	-	0,025
Fehler	13%	15%				20%

Beim Betrachten der Simulationsdaten bezüglich verschiedener Impactoranfangsgeschwindigkeiten (siehe Tabelle 5.3) ist eine Erhöhung der Anfangsgeschwindigkeit mit einem größeren Auftreten von Hourglass-Energien verbunden, sodass das Materialverhalten fehlerhaft wird. Weiterhin sind verstärkte Elementdurchdringungen zwischen den Honigwabenelementen untereinander sowie mit den Impactorelementen bei einem Szenario mit einer erhöhten Impactoranfangsgeschwindigkeit zu beobachten. Dies könnte dadurch begründet werden, dass die Schubkurven unter dieser stärkeren Elementverformung nicht mehr definiert sind, sodass die Hourglass-Energien in einem größeren Umfang freigesetzt werden. Eine Änderung der Überwachung von Nullenergiemoden oder eine erweiterte Definition der Schubkurven könnte eine Verbesserung herbeiführen. Für eine Beurteilung sind dafür allerdings weitere Analysen notwendig.

Weiterhin ist auffällig, dass der Unterschied zwischen den Maximalkräften bzw. –beschleunigungen unter einer Erhöhung der Impactoranfangsgeschwindigkeit zunimmt. Es kann dabei angenommen werden, dass unter einer Impactoranfangsgeschwindigkeit von 4m/s der globale Komprimierungsbereich der Honigwabenelemente in T-Richtung erreicht wird, sodass dadurch diese hohe Maximalkraft hervorgerufen wird und der überwiegende Teil der Abbremsung des Impactors in diesem Abschnitt der Elementverformung stattfindet.

Tabelle 5.3: Vergleich der Simulationsergebnisse eines senkrechten Impacts mit einer Elementzahl von 40x40x10 unter Veränderung der Impactoranfangsgeschwindigkeit

	maximale Kraft F / N	maximale Beschleunigung a / m/s^2	Innere Energie E_{Inn} / J	Hourglass-Energie E_{HG} / J	Verhältnis Hourglass-Energie/ Innere Energie	Eindringtiefe z / m
Impactorgeschwindigkeit 2m/s	5670	106	93	9	10%	0,032
Impactorgeschwindigkeit 3m/s	5910	111	188	37	19%	0,055
Impactorgeschwindigkeit 4m/s	8700	163	331	78	24%	0,074

Unter einer Variation der Elementzahl der Honigwabenstruktur (siehe Tabelle 5.4) ist zu beobachten, dass eine geringe Elementanzahl überhöhte Kräfte und Beschleunigungen hervorruft, wodurch der Fehler gegenüber den Versuchskurven steigt. Ebenso vergrößert die geringere Eindringtiefe des Impactors die Abweichungen gegenüber den Versuchen. Die Energien sind bei allen Elementzahlen fast identisch. Die beiden höheren Elementzahlen zeigen dabei kaum Unterschiede in den Auswertungen auf, sodass davon ausgegangen werden kann, dass sich die Plateaukraft und die Beschleunigung mit weiter steigenden Elementzahlen nicht verändern. Eine geringere Elementzahl hat jedoch den Vor-

teil, dass sie einen geringeren Rechenaufwand erzeugt und deshalb bevorzugt werden sollte. Die Elementzahl 40x40x10 besitzt in allen 3 Richtungen eine Elementkantenlänge von 0,01m.

Tabelle 5.4: Vergleich der Simulationsergebnisse eines senkrechten Impacts mit einer Impactoranfangsgeschwindigkeit von 3 m/s unter Variation der Elementzahl der virtuellen Honigwabenstruktur

	maximale Kraft F / N	maximale Beschleunigung a / m/s^2	Innere Energie E_{Inn} / J	Hourglass-Energie E_{HG} / J	Verhältnis Hourglass-Energie/ Innere Energie	Eindringtiefe z / m
Elementzahl 20x20x5	8330	155	187	37	20%	0,047
Elementzahl 40x40x10	5910	111	188	37	19%	0,055
Elementzahl 80x80x20	5990	112	188	38	20%	0,057

Die Tabelle 5.5 zeigt die Auswertung eines Impacts mit einer Impactorgeschwindigkeit von 3 m/s und einer Elementzahl von 40x40x10 unter Änderung der Materialausrichtung. Gegenüber dem senkrechten Impactszenario treten bei einer Materialneigung von 20° höhere Plateaukräfte und Beschleunigungen auf, was wiederum mit einer erhöhten Fließspannung unter einer schrägen Materialausrichtung zu begründen ist. Unter einer Materialneigung von 50° ist das Spannungsniveau dieser Fließspannung geringer (siehe Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23), sodass kleinere Maximalkräfte und – beschleunigungen entstehen. Das Verhältnis der Hourglass-Energie zur Inneren Energie fällt aufgrund des gleichen Impulses beziehungsweise annähernd gleicher Deformationen der Honigwabenelemente bei allen 3 Impactszenarien in etwa gleich aus.

Tabelle 5.5: Vergleich der Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Einfallswinkeln des Impactors auf die virtuelle Honigwabenstruktur mit einer Impactoranfangsgeschwindigkeit von 3 m/s und einer Elementanzahl der virtuellen Honigwabenstruktur von 40x40x10

	maximale Kraft F / N	maximale Beschleunigung a / m/s^2	Innere Energie E_{Inn} / J	Hourglass-Energie E_{HG} / J	Verhältnis Hourglass-Energie/ Innere Energie	Eindringtiefe z / m
0°-Neigung	5910	111	188	37	19%	0,055
20°-Neigung	6318	117	202	30	15%	0,051
50°-Neigung	5400	100	196	35	18%	0,051

Im Vergleich der Elementtypen (siehe Tabelle 5.6) sind bei dem vollintegrierten Elementtyp 2 höhere Kräfte und Beschleunigungen zu erkennen. Darüber hinaus zeigen sich während den Berechnungen unter dem Elementtyp 2 erhöhte Rechenzeiten, da an jedem Knoten eines Volumenelementes die Spannungsberechnungen etc. stattfinden. Gegenüber der Versuchskurve dringt der Impactor unter Nutzung des Elementtyps 2 um 24% und gegenüber dem Elementtyp 1 um 40% tiefer in die Honigwabenstruktur ein. Aufgrund der größeren Abweichungen unter dem Elementtyp 2, sollte der Typ 1 für ein Impactszenario auf eine Honigwabenstruktur angewendet werden.

Tabelle 5.6: Vergleich der Simulationsergebnisse eines senkrechten Impacts mit einer Impactoranfangsgeschwindigkeit von 3 m/s und einer Elementanzahl der virtuellen Honigwabenstruktur von 40x40x10 unter Verwendung verschiedener Elementtypen

	maximale Kraft F / N	maximale Beschleunigung a / m/s^2	Innere Energie E_{Inn} / J	Hourglass-Energie E_{HG} / J	Verhältnis Hourglass-Energie/ Innere Energie	Eindringtiefe z / m
Elementtyp 1	5910	111	188	37	19%	0,055
Elementtyp 2	9060	170	262	-	-	0,077

In Bezug auf das Materialverhalten der Deckschichtkomponente sei erwähnt, dass die Annäherung über die numerischen Parameter in der Materialmodellierung weiterhin verfeinert werden kann. Der Einfluss in Bezug auf das Gesamtverhalten des Sandwichverbundes könnte jedoch nur marginale Auswirkungen besitzen, da der Fehler der Spannungskurve bereits sehr gering ist. Es muss jedoch stets der Parameter ERODS für die maximale effektive Bruchdehnung an die Kantenlänge eines Elementes angepasst werden.

Für die Modellierung einer Klebschicht wäre es vorteilhaft, eine Kontaktdefinition zu finden, die für einen Abstand zwischen den Deckschicht- und den Honigwabenelementen geeignet ist. Dadurch könnten die auftretenden Überschneidungen verhindert werden. Hierbei sei anzumerken, dass die Klebschicht die Komponente der Sandwichstruktur ist, die die größte Festigkeit aller 3 Komponenten besitzt, damit sie die Aufgabe des Kräftetransfers zwischen der Deck- und der Kernschicht sicherstellen kann. Daher könnte ein Fehlerkriterium in der Kontaktdefinition vernachlässigt werden, sodass eine Modellierung mit der Kontaktdefinition *TIED_SURFACE_TO_SURFACE in Betracht gezogen werden kann. Bei einer Nutzung von Kontaktdefinitionen können jedoch keine vollständigen Materialeigenschaften bezüglich des Klebschichtmaterials eingegeben werden. Dies ist unter der Verwendung von Kohäsivelementen für die Verbindung eines Volumenelementes mit einem Schalenelement anders. Weiterhin besteht für zukünftige Simulationen die Option, die Deckschichten aus Volumenelementen auszuführen. In diesem Fall kann der Elementtyp 19 für die Kohäsivelemente verwendet werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1. Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Generierung und Bewertung eines Finite-Elemente-Modells zur Simulation des Materialverhaltens einer Aluminium-Honigwaben-Sandwichstruktur auf Komponentenebene. Für diese Art von Untersuchungen wird das FE-Programm LS-DYNA, welches aufgrund expliziter Berechnungsalgorithmen für die Simulation dynamischer Vorgänge geeignet ist, verwendet.

Zunächst wird in dieser Arbeit ein Einblick in den Aufbau einer Sandwichstruktur gegeben und die Aufgaben der einzelnen Strukturkomponenten näher erläutert. Weiterhin wird das Materialverhalten der Aluminium-Honigwabenstruktur anhand von experimentellen Daten, die in vorherigen Arbeiten erstellt wurden, zusammengefasst und beschrieben. Danach werden theoretische Grundlagen zu den Berechnungsweisen in dem FE-Programm LS-DYNA gegeben. Dies umfasst die implementierten Materialmodelle, die für die Kern- und Deckschicht verwendet werden können sowie die für die Simulationen verwendbaren Elementtypen. Außerdem werden Hintergrundinformationen zu den Nullenergiemoden gegeben, die es in den Simulationen zu vermeiden gilt, aber unter Verwendung unterintelligenter Elementtypen akzeptiert werden müssen. Des Weiteren wird näheres zu den verwendeten Kontaktalgorithmen beschrieben und in kurzer Form auf die ersten Simulationsentwürfe der Vorarbeiten Bezug genommen.

Danach finden virtuelle Tests des Aluminium-Honigwabenkerns, welcher mit Volumenelementen dargestellt wird, statt. Diese Struktur wird zur Verifizierung des Materialverhaltens äquivalent zu den Versuchen auf mehreren Arten belastet. Dies umfasst diverse Druck- und Schubbeanspruchungen sowie verschiedene Impactszenarien. Unter einer schrägen Materialausrichtung entstehen dabei erhöhte Fließspannungen in der virtuellen Honigwabenstruktur, die aus der Definition des Materialmodells resultieren. In Bezug auf die Impactszenarien können die zu hohen Plateaukräfte durch Modifikationen am Simulationsmodell reduziert werden, sodass sich der Bereich, in dem sich die Zellwände zusammenfallen, vergrößert. Zur Verbesserung des Simulationsverhaltens tragen Veränderungen bezüglich der Elementeigenschaften, der Materialmodellierung, der Kontaktberechnung, der Randbedingungen des Modells und der Überwachung von Nullenergiemoden bezüglich der Honigwabenelemente bei. Im Ergebnis ist ein Simulationsmodell zu sehen, welches ein stabiles Elementverhalten unter verschiedenen Randbedingungen wie einer veränderten Impactoraufprallgeschwindigkeit oder einer Änderung der Einschlagswinkels aufzeigt.

Nach Abschluss der Untersuchungen an der Kernstruktur wird die Deckschicht, die aus einem Faserverbundwerkstoff mit Kevlar besteht, mit Schalenelementen aufgebaut. Das virtuelle Materialverhalten dieser Sandwichkomponente wird anschließend anhand von Zugbelastungen analysiert. Durch die Auswahl eines geeigneten Materialmodells konnte dabei der lineare Spannungsverlauf korrigiert werden, sodass eine Annäherung an das reale Materialverhalten erreicht wird. Das Materialmodell #58, welches für die Darstellung von Verbundwerkstoffen geeignet ist, gibt dem Spannungsgraphen einen degressiven Verlauf und ermöglicht ein Materialversagen bei einer definierten Spannung beziehungsweise Dehnung. Über diese Approximation konnte die Verifizierung des Materialverhaltens der Deckschichtkomponente unter Zugbelastung erfolgreich abgeschlossen werden.

Zum Schluss dieser Arbeit findet eine grobe Untersuchung der Klebschicht statt, welche zur Verbindung der Deckschicht und der Kernschicht eingesetzt wird. In der Simulation kann diese Klebschicht

mithilfe von Kontaktdefinitionen abgebildet werden. Sollen in dieser Kontaktbedingung keine Versagenskriterien implementiert werden, so hat sich in dieser Arbeit die Kontaktdefinition *TIED_SURFACE_TO_SURFACE bewährt. Unter Einbezug von Versagenskriterien der Klebschicht kann eine Kombination von 2 verschiedenen Kontaktdefinitionen benutzt werden. Allerdings tritt in der Kontaktberechnung ein Versatz der Spannungswerte auf, der durch Überschneidungen zwischen den Deckschicht- und den Honigwabenelementen verursacht wird. Dieser Versatz wird durch die Dicke der Schalenelemente beeinflusst.

6.2. Ausblick

Vereinzelte wurden in den Versuchen Delaminationen innerhalb des Deckschichtlaminats beobachtet. [9] Solche Versagenskriterien innerhalb des Materials lassen sich beispielsweise über die Nutzung mehrerer Integrationspunkte in den Elementeigenschaften von Schalenelementen und der Eingabe von Fehlerkriterien in der Materialkarte implementieren. Dabei können über *INTEGRATION_SHELL oder *PART_COMPOSITE für jeden Bereich zwischen den Integrationspunkten verschiedene Materialeigenschaften eingestellt werden. Alternativ können die einzelnen Lagen separat mit Schalenelementen modelliert und anschließend über ein Delaminationsmodell verbunden werden. [1] Zur Ermittlung der Versagensparameter können zusätzliche Biegeversuche dienen.

Eine Verbesserung des Materialverhaltens der Deckschichtelemente im Materialmodell #58 kann über die Einstellung von Crashfront-Elementen erreicht werden. Dabei sind jene Elemente betroffen, die an einem versagten Element angrenzen. Nah dem Erodieren eines Elementes wird dabei die Festigkeit dieser Crashfront-Elemente herabgesetzt. Die Eingabe zur Simulation einer Versagensfront kann über den SOFT-Parameter im Materialmodell #58 erfolgen.

In kommenden Untersuchungen kann die Behandlung der virtuellen Klebschicht weitergeführt werden, da diese in der vorliegenden Arbeit innerhalb des Zeitrahmens nicht zu Ende geführt werden konnte. Möglicherweise besteht die Möglichkeit, eine alternative Lösung zu der Kombination der erwähnten Kontaktdefinitionen zu finden. Mit der Implementierung von Kohäsivelementen besteht die Möglichkeit, ein verbessertes Materialverhalten im Gegensatz zu den Kontaktdefinitionen zu erreichen.

Nach abschließenden Untersuchungen der einzelnen Komponenten kann das zusammengebaute virtuelle Sandwichmodell in LS-DYNA mit Versuchskurven aus [9] in Bezug auf weitere Impacttests mit einer kompletten Sandwichstruktur zur Verifikation herangezogen werden. Die Sandwichstruktur der Impacttests besteht dabei wie das virtuelle Modell aus einem Aluminium-Honigwabenkern und Deckschichten aus einem Verbundmaterial mit Kevlarfasern. Ist dies erfolgt, kann das virtuelle Sandwichmodell als Dämpfungselement auf vielfältiger Art und Weise in ein Gesamtsystem eingebettet werden.

Quellenverzeichnis

- [1] Heimbs, S.: „Sandwichstrukturen mit Wabenkern: Experimentelle und numerische Analyse des Schädigungsverhaltens unter statischer und kurzzeitdynamischer Belastung“, Dissertation, Schriftenreihe Band 77, Verlag Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2008
- [2] Petrone, G.; Rao, S.; De Rosa, S.; Mace, B. R.; Bhattacharyya, D.: “Behaviour of Fiber Reinforced Honeycomb Core under Low Velocity Impact Loading”, Mechanics of Nano, Micro and Macro Composite Structures, Politecnico di Torino, 18.-20. Juni 2012
- [3] fibretech composites GmbH; Astrium GmbH, Deutsches Zentrum für Luft & Raumfahrt (DLR); Faserinstitut Bremen e.V. (FIBRE): „Meilensteinbericht zu Meilenstein 1“, Projekt: „Entwicklung, Fertigung und Test eines Marslandekonzeptes in Sandwichbauweise“, Förderkennzeichen FUE0545C
- [4] Bayle, O.; Lorenzoni, L.; Blancquaert, T.; Langlois, S.; Walloschek, T.; Portigliotti, S.; Capuano, M.: „ExoMars Entry Descent and Landing Demonstrator Mission and Design Overview“, European Space Agency, ESTEC, Noordwijk; Thales Alenia Space Italy, Turin, Italy
- [5] Aktay, L.; Johnson, A. F.; Kröplin, B.-H.: “Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour”, ScienceDirect, Engineering Fracture Mechanics 75, S. 2616–2630, März 2007
- [6] fibretech composites GmbH; Astrium GmbH, Deutsches Zentrum für Luft & Raumfahrt (DLR); Faserinstitut Bremen e.V. (FIBRE): „Entwicklung, Fertigung und Test eines Marslandekonzeptes in Sandwichbauweise“, Vorhabensbeschreibung Marslander
- [7] Knappe, V.: “Correlation and Evaluation of a Finite Element Model using Solid Elements for the Virtual Testing of the Touchdown Behaviour of a Robotic Landing Platform with a Crushable Shock Absorber”, Diplomarbeit, RWTH Aachen, August 2013
- [8] Plascore GmbH&Co. KG: “PAMG-XR1 5056 Aluminium Wabe”, Datenblatt
- [9] Reinhardt, B.: “Experimental Investigation and Evaluation of the Behaviour of a Planetary Landing Platform Using Crushable Layers of Aluminium Honeycombs”, Bachelorarbeit, Universität Bremen, 11.04.2012, Bremen
- [10] Chai, G. B.; Zhu, S.: „A review of low-velocity impact on sandwich structures“, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications 2011 225:207, August 2011
- [11] Höhne, S.: “Einfache Falltestberechnungen mit dem expliziten FE-Programm “LS-DYNA” und Kopplung zum impliziten Programm “ANSYS””, Studienarbeit, Oktober 2006
- [12] Meisner, C.: „Simulationen von Impact-Schädigungen mit expliziten Berechnungsmethoden“, Studienarbeit, Institut für Flugzeugbau und Leichtbau, TU Braunschweig, 31.03.2012
- [13] Hallquist, J.: „LS-DYNA Theory Manual“, März 2006
- [14] Hirth, A.; Du Bois, P.; Weimar, K.: „A Material Model for Transversely Anisotropic Crushable Foams in LS-DYNA“, 7th International LS-DYNA Users Conference Material, Session 16, S. 23-34, Dearborn, Michigan, 19.-21. Mai 2002

- [15] Feraboli, P.; Deleo, F.; Wade, B.; Rassaian, M.; Higgins, M.; Byar, A.; Reggiani, M.; Bonfatti, A.; DeOto, L.; Masini, A.: "Predictive modelling of an energy-absorbing sandwich structural concept using the building block approach", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 41, Issue 6, S. 774-786, Juni 2010
- [16] Middendorf, P.: "Composites – Materialmodellierung und Anwendungen im Flugzeugbau, 3. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2004
- [17] Jackson, K.; Fasanella, E.; Polanco, M.: "Simulating the Response of a Composite Honeycomb Energy Absorber: Part 1. Dynamic Crushing of Components and Multi-Terrain Impacts", Earth and Space 2012: S. 1305 – 1328, 2012
- [18] Jackson, K.: "Predicting the Dynamic Crushing Response of a Composite Honeycomb Energy Absorber Using Solid-Element-Based Models in LS-DYNA®", 11th International LS-DYNA® Users Conference, Juni 2010
- [19] <http://www.dynasupport.com>, aufgerufen am 02.09.2014
- [20] Amraei, M., Shahravi, M., Noori, Z., Lenjani, A.: "Application of aluminium honeycomb sandwich panel as an energy absorber of high-speed train nose", Journal of Composite Materials, 18. April 2013
- [21] Yang, M., Qiao, P.: "Quasi-static Crushing Behavior of Aluminum Honeycomb Materials", Journal of Sandwich Structures and Materials, Vol. 10, S. 133-160, März 2008
- [22] Jost, T.; Heubrandtner, T.; Ruff, C.; Fellner, B.: „A New Method Aluminium Honeycomb Based Crash Barriers in Lateral and Frontal Crash Load Cases", 7. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2008
- [23] Shah, Q.; Abid, M.: "LS-DYNA for Beginners", An insight into Ls-Prepost and Ls-Dyna, Taschenbuch, LAP LAMBERT Academic Publishing, April 2012
- [24] Erhart, T.; Haufe, A.: " Möglichkeiten zur Modellierung von Kohäsivelementen in LS-DYNA", LS-DYNA Update Forum, 12. November 2009

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Verschiedene Phasen des Landevorganges innerhalb der ExoMars-Mission [4]	1
Abbildung 2.1:	Aufbau und Hauptachsenrichtungen eines Sandwichmodells [1]	3
Abbildung 2.2:	Auftretende Kräfte in einer Sandwichmodell unter Biegebelastung [1]	4
Abbildung 2.3:	Druckbelastung einer Honigwabenstruktur aus Aluminium in T-Richtung (links), L-Richtung (zentral) und W-Richtung (rechts) [7]	4
Abbildung 2.4:	Schubbelastungen einer Honigwabenstruktur aus Aluminium in verschiedenen Hauptspannungsrichtungen [7]	5
Abbildung 2.5:	Richtungsbeschreibung des Honigwabenmaterials zur Kennzeichnung der Schubbelastung	5
Abbildung 2.6:	Gemittelte Spannungskurve einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Druckbelastung in T-Richtung [7]	6
Abbildung 2.7:	Gemittelte Spannungskurven einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Druckbelastung in L- und W-Richtung [7]	7
Abbildung 2.8:	Gemittelte Spannungskurven einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Druckbelastung mit einer Neigung des Materials von 40° in die L- beziehungsweise W-Richtung [7]	7
Abbildung 2.9:	Gemittelte Spannungskurven einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Druckbelastung mit einer Neigung des Materials von 60° in die L- beziehungsweise W-Richtung [7]	8
Abbildung 2.10:	Gemittelte Schubspannungskurven einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Schubbelastung in LT-/WT-Richtung [7]	9
Abbildung 2.11:	Gemittelte Schubspannungskurven einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Schubbelastung in TL-/TW-Richtung [7]	9
Abbildung 2.12:	Gemittelte Schubspannungskurven einer Aluminium-Honigwabenstruktur unter Schubbelastung in WL-/LW-Richtung [7]	9
Abbildung 2.13:	Testaufbau des Pendelversuchs [9]	10
Abbildung 2.14:	Auftretende Kräfte innerhalb eines senkrechten Impacts mit einer Anfangsgeschwindigkeit des Impactors von 3 m/s auf eine Aluminium- Honigwabenstruktur [9]	11
Abbildung 2.15:	Beschleunigungsverlauf des Impactors mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 2 m/s auf eine geneigte Aluminium-Honigwabenstruktur (15°) [9]	11
Abbildung 2.16:	Schnittbild einer Honigwabenstruktur nach einem senkrechten Impact	12
Abbildung 2.17:	Spannungsverlauf innerhalb eines einachsigen Zugversuchs mit einem Faserverbundmaterial aus Kevlar [7]	12
Abbildung 2.18:	Auftretende Kräfte an einer Klebschicht unter Zugbeanspruchung [7]	13
Abbildung 3.1:	Prinzip des zentralen Differenzenverfahrens [1]	15
Abbildung 3.2:	Beispiel einer Spannungskurve im Materialmodell #126 [13]	19
Abbildung 3.3:	schematische Darstellung einer Druckbelastung auf eine Materialprobe mit einer geneigten Materialrichtung (links) / Abbildung der Fließfläche innerhalb des Materialmodells #126 Version 1 (rechts) [14]	19
Abbildung 3.4:	Mögliche Versagensarten eines Faserverbundwerkstoffes unter Zug-, Druck- und Schubspannung [16]	22
Abbildung 3.5:	Prinzipieller Spannungsverlauf im Materialmodell #58 unter einer Zugbelastung in Längsrichtung [17]	25
Abbildung 3.6:	Abbildung eines Volumenelementes mit 8 Knoten [13]	25
Abbildung 3.7:	Darstellung von 4 der insgesamt 12 möglichen Nullenergie-Eigenmoden [13]	27
Abbildung 3.8:	Darstellung der Fließspannungsfunktionen der verschiedenen Version im Materialmodell #126 gegenüber dem Winkel der Belastungsrichtung zur Hauptachsenrichtung T unter einer einachsigen Druckbeanspruchung [7]	30

Abbildung 3.9: Spannungsverläufe eines Honigwaben-Volumenelementes in der ersten Version des Materialmodells #126 unter Variation der Elementtypen [7]	31
Abbildung 3.10: Spannungsverläufe eines Deckschichtelementes unter Einbezug eines Schubinteraktionsparameters (BETA) [7]	31
Abbildung 3.11: Spannungsverläufe innerhalb einer Klebschichtverbindung unter Zugbelastung [7]	32
Abbildung 4.1: Darstellung einiger möglicher Landeszenarien	33
Abbildung 4.2: Lösungskonzept der Sandwichkomponentenuntersuchung	34
Abbildung 4.3: Verschiedene Darstellungsmöglichkeiten eines virtuellen Aluminium-Honigwabenkerns [7]	35
Abbildung 4.4: Möglicher Aufbau eines virtuellen Honigwabenkerns unter Nutzung von Schalenelementen [1].....	36
Abbildung 4.5: Aufbau der Drucktestsimulation	36
Abbildung 4.6: Kurve zur Beschreibung von Dehnrateneffekten [7].....	37
Abbildung 4.7: Materialkarte des Materialmodells #126 (*MODIFIED_HONEYCOMB)	38
Abbildung 4.8: Durchdringung zwischen dem Volumen- und dem Schalenelement während der Drucktestsimulation in Z-Richtung der Simulation.....	38
Abbildung 4.9: Spannungsverläufe des 1- Honigwaben-Volumenelementes unter einer Änderung des Parameters für die Kontaktsteifigkeit in der Verbindung zwischen dem Honigwaben- und dem Plattenelement innerhalb der Drucktestsimulationen in T-Richtung.....	39
Abbildung 4.10: Spannungsverläufe des 1- Honigwaben-Volumenelementes unter Einbezug einer Kurve für die Dehnrateneffekte innerhalb der Drucktestsimulationen in T-Richtung.....	40
Abbildung 4.11: Spannungsverlauf der virtuellen Honigwabenstruktur mit einer erhöhten Anzahl an	41
Abbildung 4.12: Verformung der Honigwabenelemente unter einer Druckbelastung in T-Richtung ..	41
Abbildung 4.13: Spannungsverläufe verschiedener Elementtypen der virtuellen Honigwabenstruktur mit 1-Volumenelement unter einer Druckbelastung in L-Richtung.....	42
Abbildung 4.14: Spannungsverläufe der virtuellen Honigwabenstruktur mit einer unterschiedlichen Elementanzahl unter einer Druckbelastung in L-Richtung	42
Abbildung 4.15: Verformung der Honigwabenelemente unter einer Druckbelastung in L-Richtung ..	42
Abbildung 4.16: Spannungsverläufe der virtuellen Honigwabenstruktur unter einer Druckbelastung in W-Richtung.....	43
Abbildung 4.17: Verformung eines einzelnen Honigwabenelementes unter Druckbelastung in Z-Richtung bei einer Drehung der Materialrichtung um die W-Achse.....	43
Abbildung 4.18: Verformung der Honigwabenelemente unter einer Druckbelastung in Z-Richtung bei einer Neigung des Materials (40°) um die W-Achse mit Verwendung des Elementtyps 0 (links) und des Typs 2 (rechts)	44
Abbildung 4.19: Spannungsverläufe der virtuellen Honigwabenstruktur unter einer Druckbelastung in Z-Richtung unter einer Drehung des Materials (40°) um die W-Achse.....	44
Abbildung 4.20: Spannungsverläufe der virtuellen Honigwabenstruktur unter einer Druckbelastung in Z-Richtung unter einer Drehung des Materials (60°) um die W-Achse.....	45
Abbildung 4.21: Spannungsverläufe eines einzelnen virtuellen Honigwabenelementes unter einer Druckbelastung in Z-Richtung mit einer Drehung des Materials in L-Richtung unter Verwendung des Elementtyps 0.....	45
Abbildung 4.22: Spannungsverläufe eines einzelnen virtuellen Honigwabenelementes unter einer Druckbelastung in Z-Richtung mit einer Drehung des Materials in L-Richtung unter Verwendung des Elementtyps 1.....	46
Abbildung 4.23: Plateauspannungsverläufe eines einzelnen Honigwabenelementes über den Winkel der Materialausrichtung zur Belastungsrichtung in die L-Richtung	46

Abbildung 4.24: Spannungsverläufe der virtuellen Honigwabenstruktur unter einer Druckbelastung in Z-Richtung unter einer Drehung des Materials (40°) um die L-Achse	47
Abbildung 4.25: Spannungsverläufe der virtuellen Honigwabenstruktur unter einer Druckbelastung in Z-Richtung unter einer Drehung des Materials (60°) um die L-Achse	47
Abbildung 4.26: Verformung eines einzelnen Honigwabenelementes unter Schubbelastung	48
Abbildung 4.27: Schubspannungsverläufe eines einzelnen Honigwabenelementes in LT-Richtung....	49
Abbildung 4.28: Verläufe der Inneren Energie des einzelnen Honigwabenelements in LT-Richtung ..	49
Abbildung 4.29: Schubspannungsverläufe eines einzelnen Honigwabenelementes in LT-Richtung unter Einbezug einer Dehnratenkurve	50
Abbildung 4.30: Schubspannungsverläufe des 1-Honigwabenelementes in TL-Richtung.....	50
Abbildung 4.31: Verformung der Honigwabenelemente unter einer Schubbelastung in LT-Richtung	51
Abbildung 4.32: Schubspannungsverlauf der virtuellen Honigwabenstruktur mit erhöhter Elementzahl unter einer Schubbeanspruchung in LT-Richtung	51
Abbildung 4.33: Schubspannungsverläufe eines einzelnen Honigwabenelementes in LW- und WL-Richtung	52
Abbildung 4.34: Schubspannungsverlauf der virtuellen Honigwabenstruktur mit erhöhter Elementzahl unter einer Schubbeanspruchung in WL-Richtung.....	52
Abbildung 4.35: Schubspannungsverläufe eines einzelnen Honigwabenelementes in WT- und TW-Richtung.....	53
Abbildung 4.36: Schubspannungsverlauf der virtuellen Honigwabenstruktur mit erhöhter Elementzahl unter einer Schubbeanspruchung in WT-Richtung	53
Abbildung 4.37: Modellaufbau eines senkrechten Impactszenarios auf die virtuelle Honigwabenstruktur.....	54
Abbildung 4.38: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter Einbezug eines Reibungsparameters FS.....	56
Abbildung 4.39: Möglichkeiten des Auftreffens eines Impactors auf die virtuelle Honigwabenstruktur.....	56
Abbildung 4.40: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter Änderung der Aufschlagbedingung auf die virtuelle Honigwabenstruktur.....	57
Abbildung 4.41: Verformung der virtuellen Honigwabenstruktur eines senkrechten Impactszenarios unter Verwendung der dritten Version des Materialmodells #126	57
Abbildung 4.42: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter Verwendung diverser Kontaktdefinitionen und Elementtypen.....	58
Abbildung 4.43: Auftretende Energien während eines senkrechten Impactszenarios unter Verwendung diverser Kontaktdefinitionen und Elementtypen	58
Abbildung 4.44: Höhe der Spannungen eines direkt unter dem Impactor zentral gelegenes Honigwabenelement innerhalb eines senkrechten Impactszenario auf die virtuelle Honigwabenstruktur	60
Abbildung 4.45: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter Verwendung einer Dehnratenkurve.....	60
Abbildung 4.46 Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios mit Variation der äquivalenten Schubkurven im Materialmodell #126	61
Abbildung 4.47: Auftretende Energien während eines senkrechten Impactszenarios unter einem Tausch der Schubkurven im Materialmodell #126.....	61
Abbildung 4.48: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter der Verwendung des Elementtyps 2 für die Honigwabenelemente.....	62
Abbildung 4.49: Verformung der virtuellen Honigwabenelemente unter Nutzung des Elementtyps 2	62
Abbildung 4.50: Auftretende innere Energie während eines senkrechten Impacts auf die virtuelle Honigwabenstruktur unter dem Elementtyp 2	63

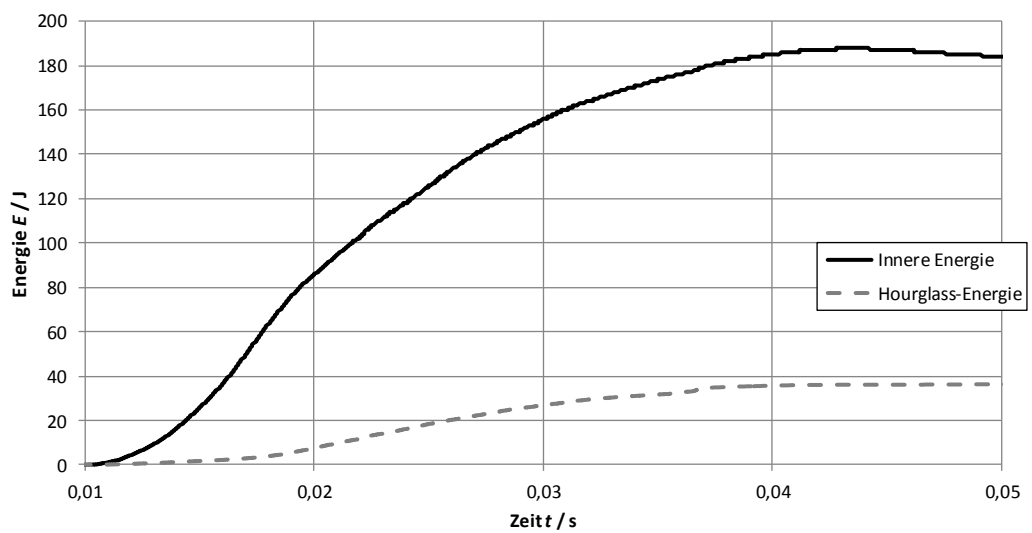
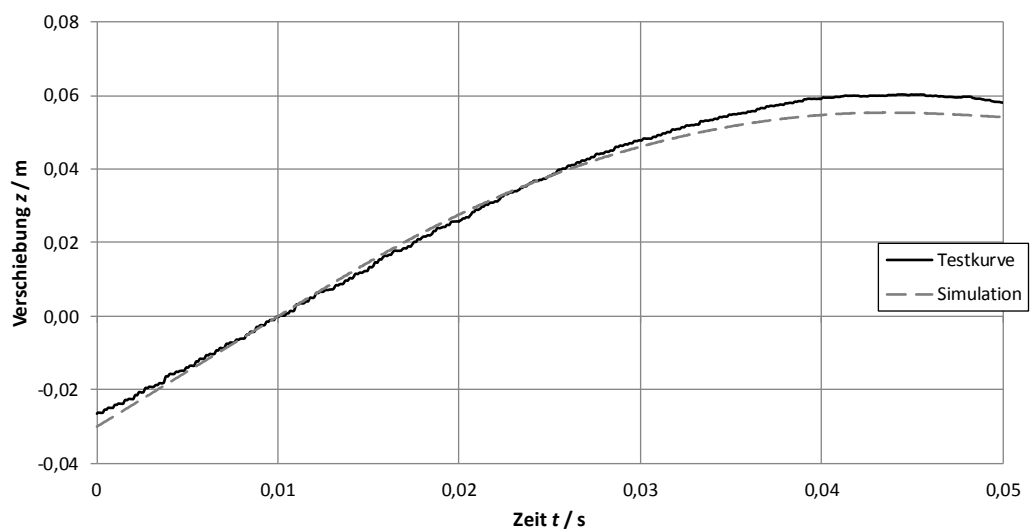
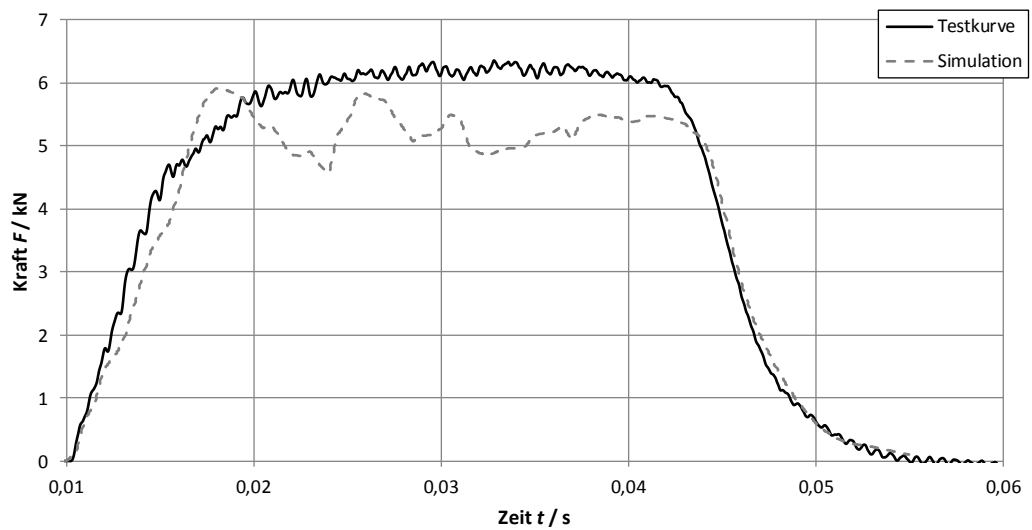
Abbildung 4.51: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter Verwendung verschiedener Kontrolltypen von Hourglass-Energien.....	63
Abbildung 4.52: Kraftverlauf eines senkrechten Impactszenarios unter Einbezug verschiedener Koeffizienten des Kontrolltyps 1 von Hourglass-Energien	64
Abbildung 4.53: Auftretende Energien während eines senkrechten Impactszenarios auf die virtuelle Honigwabenstruktur unter Verwendung verschiedener Kontrollbedingungen von Hourglass-Energien.....	64
Abbildung 4.54: Verschiebungsverläufe des Impactors unter Verwendung diverser Koeffizienten zur Überwachung von Hourglass-Energien	65
Abbildung 4.55: Kraft-Verschiebungs-Verlauf des Impactors unter dem Kontrolltyp 1 und einem -koeffizienten von 0,05.....	65
Abbildung 4.56: Aufbau des Simulationsmodells eines geneigten Impacts	66
Abbildung 4.57: Beschleunigungsverlauf eines geneigten Impacts mit einer Impactoranfangsgeschwindigkeit von 2 m/s unter einer Elementanzahl von 40x40x10 Elementen	67
Abbildung 4.58: Materialkarte des Materialmodells #54/55 mit den Eingabeparametern der Simulation.....	68
Abbildung 4.59: Spannungsverlauf der virtuellen Deckschicht unter Zugbelastung mit einem einzelnen Element und dem Materialmodell #54/55	68
Abbildung 4.60: Aufbau des virtuellen Deckschichtmaterials mit einer Elementzahl von 50x5	69
Abbildung 4.61: Spannungsverlauf der virtuellen Deckschicht unter Zugbelastung mit dem Materialmodell #54/55 unter Änderung der Materialparameter.....	70
Abbildung 4.62: Spannungsverlauf der virtuellen Deckschicht unter Zugbelastung mit dem Materialmodell #58	71
Abbildung 4.63: Angenäherter Spannungsverlauf der virtuellen Deckschicht unter Zugbelastung mit dem Materialmodell #58.....	71
Abbildung 4.64: Materialkarte des Materialmodells #58 mit den Eingabeparametern der Materialmodellierung.....	72
Abbildung 4.65: Darstellung der Möglichkeiten von Delaminationsmoden [16]	72
Abbildung 4.66: Möglichkeiten zur Modellierung einer Klebschicht [24].....	72
Abbildung 4.67: Foto einer Sandwichstruktur nach einem senkrechten Impact [9]	73
Abbildung 4.68: Mögliche Elementtypen zur Darstellung von Kohäsivelementen [24]	73
Abbildung 4.69: Aufbau des Simulationsmodells zur Klebschichtuntersuchung.....	74
Abbildung 4.70: Überschneidung des Volumen- und Schalenelementes bei der Berechnung des Klebschichtverhaltens.....	74
Abbildung 4.71: Spannungsverlauf in der virtuellen Klebschicht unter Halbierung der Deckschichtdicke	75
Abbildung 5.1: Verschiebungsverläufe des Impactors bei einem senkrechten Impact mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 3 m/s	77

Tabellenverzeichnis

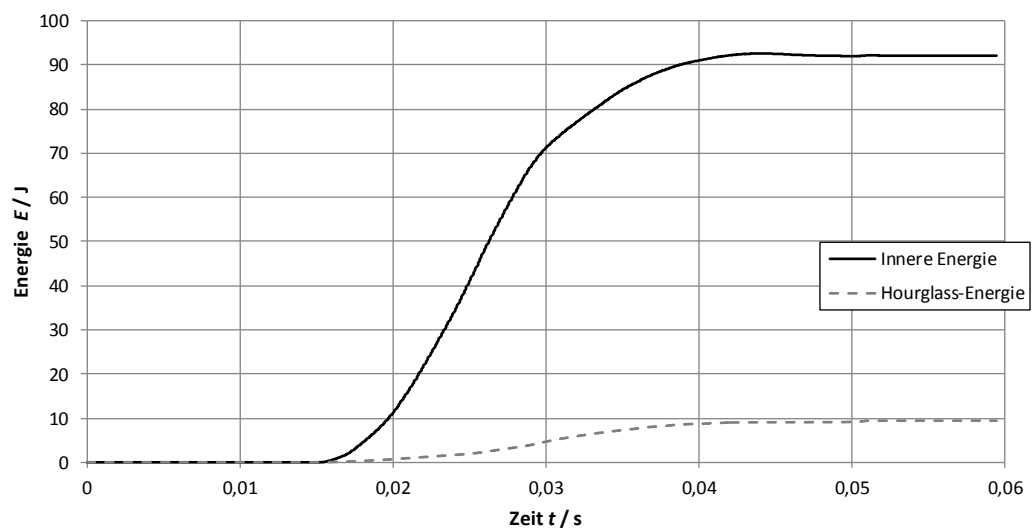
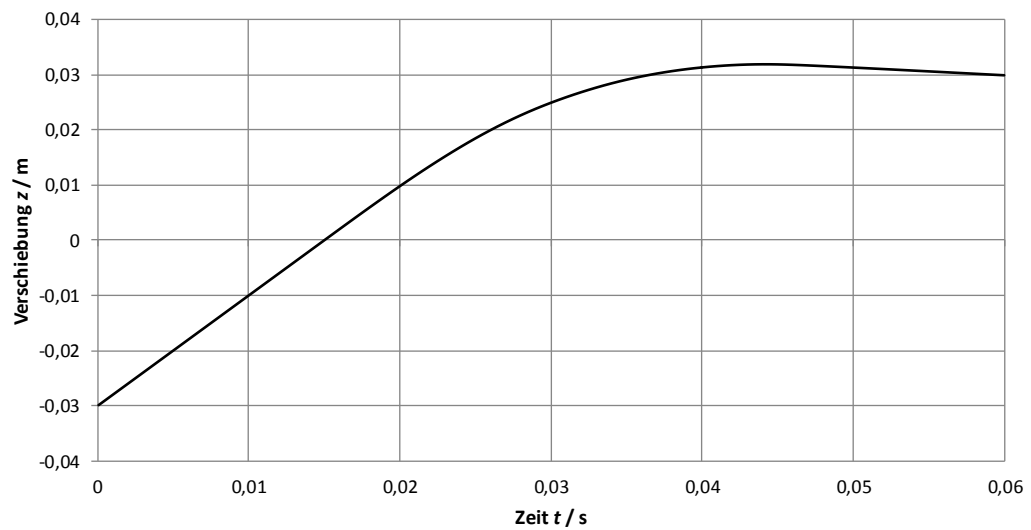
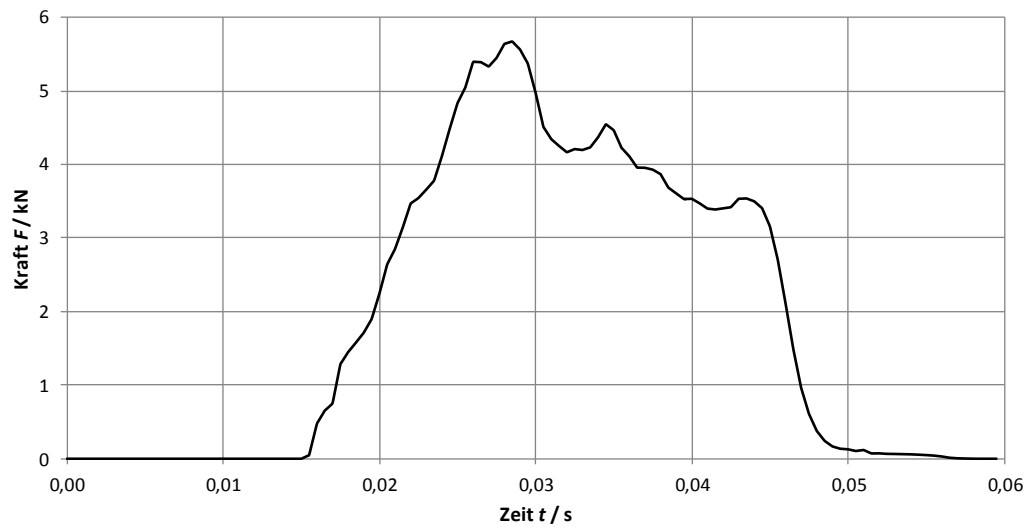
Tabelle 4.1:	Schnittbilder eines Impactszenarios zu verschiedenen Zeitpunkten in der XZ-/YZ-Ebene	59
Tabelle 5.1:	Vergleich zwischen dem Simulationsergebnis und den Versuchsdaten des senkrechten Impactszenarios mit einer Impactorgeschwindigkeit von 3 m/s.....	77
Tabelle 5.2:	Vergleich zwischen dem Simulationsergebnis und den Versuchsdaten des geneigten Impacts (15°) mit einer Impactorgeschwindigkeit von 2 m/s	78
Tabelle 5.3:	Vergleich der Simulationsergebnisse eines senkrechten Impacts mit einer Elementzahl von 40x40x10 unter Veränderung der Impactoranfangsgeschwindigkeit.....	78
Tabelle 5.4:	Vergleich der Simulationsergebnisse eines senkrechten Impacts mit einer Impactoranfangsgeschwindigkeit von 3 m/s unter Variation der Elementzahl der virtuellen Honigwabenstruktur	79
Tabelle 5.5:	Vergleich der Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Einfallswinkeln des Impactors auf die virtuelle Honigwabenstruktur mit einer Impactoranfangsgeschwindigkeit von 3 m/s und einer Elementanzahl der virtuellen Honigwabenstruktur von 40x40x10.....	79
Tabelle 5.6:	Vergleich der Simulationsergebnisse eines senkrechten Impacts mit einer Impactoranfangsgeschwindigkeit von 3 m/s und einer Elementanzahl der virtuellen Honigwabenstruktur von 40x40x10 unter Verwendung verschiedener Elementtypen	79

Anhang A

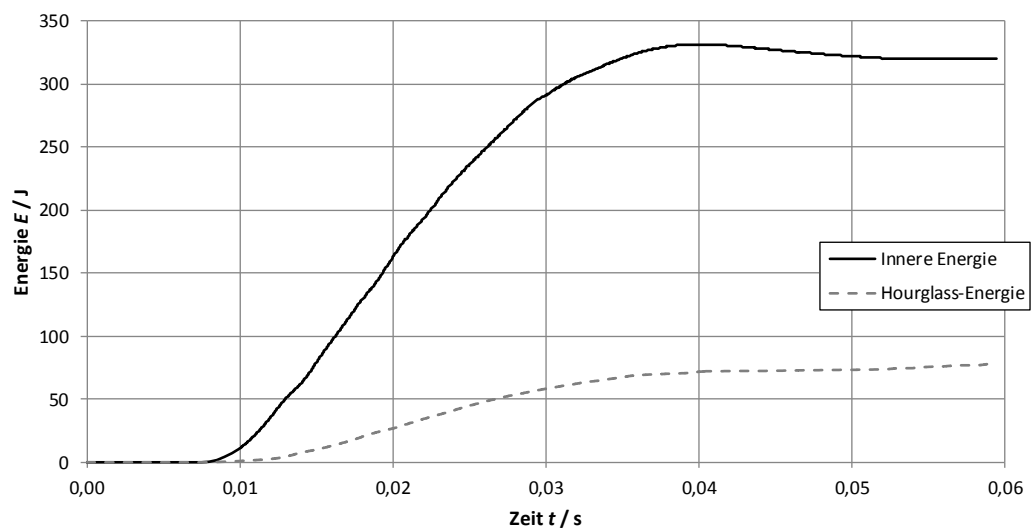
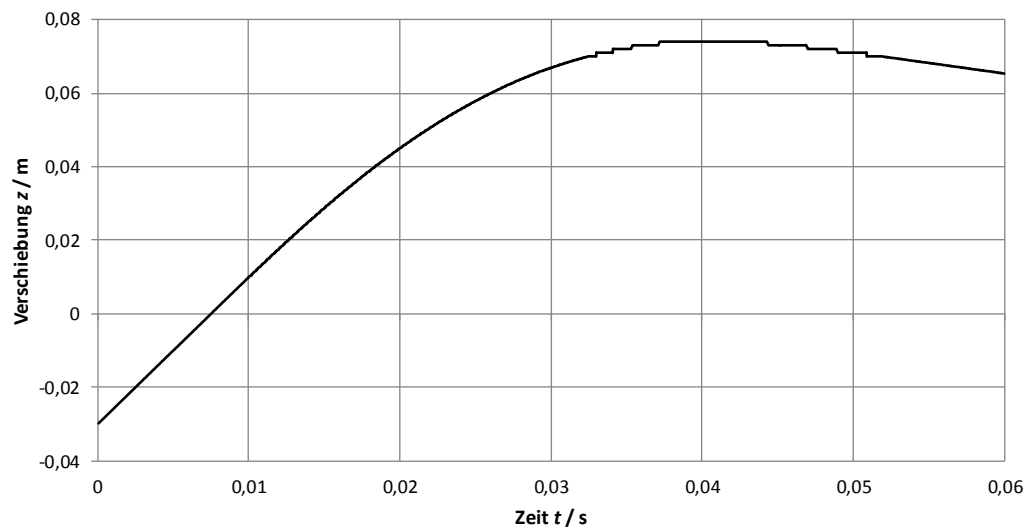
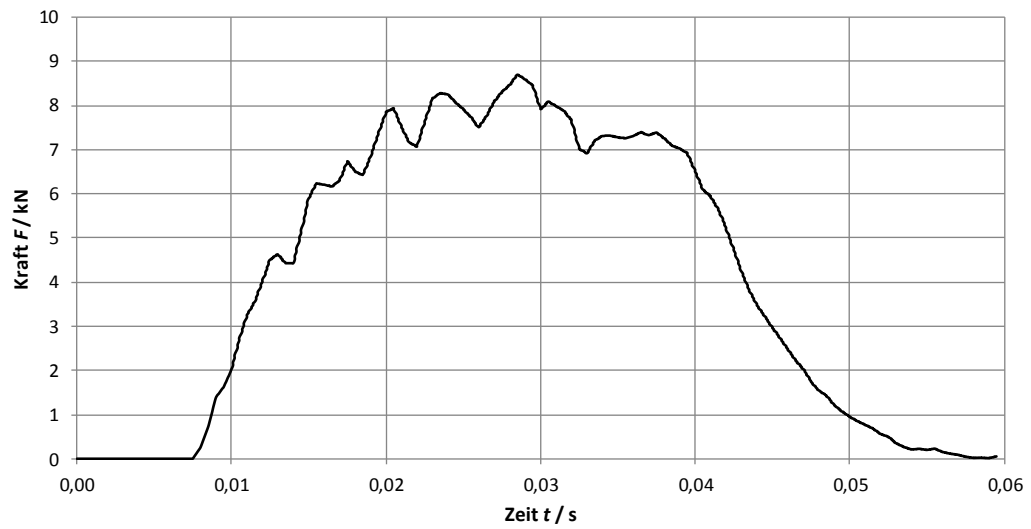
- Senkrechter Impact mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s, Elementzahl 40x40x10



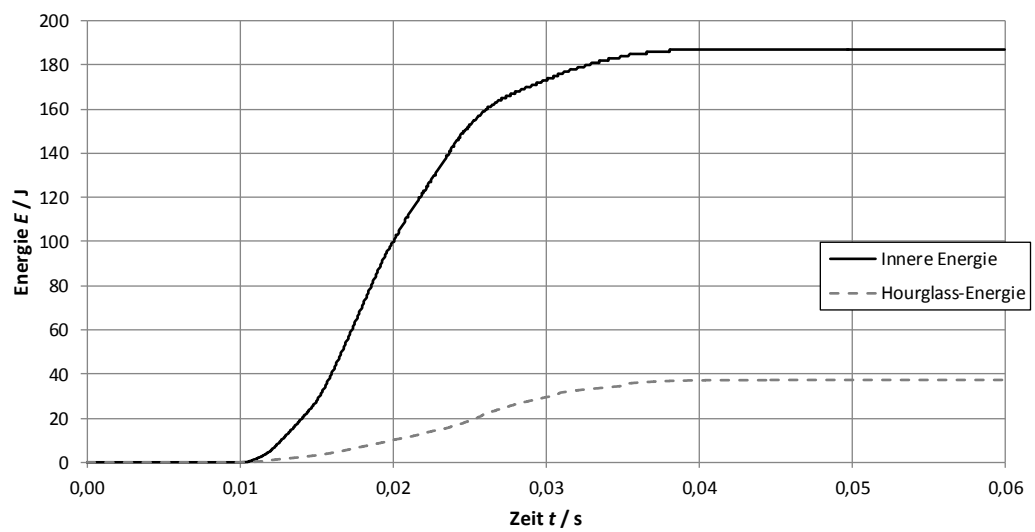
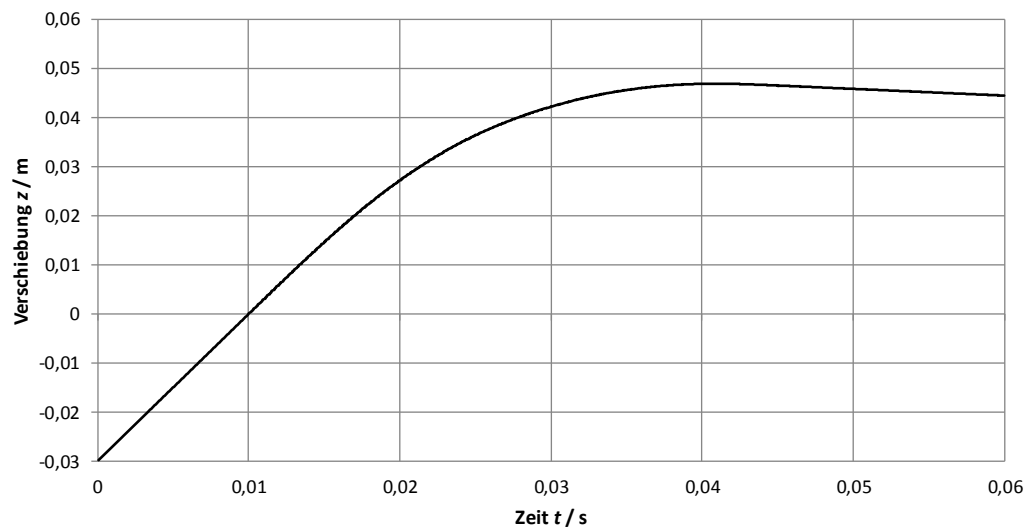
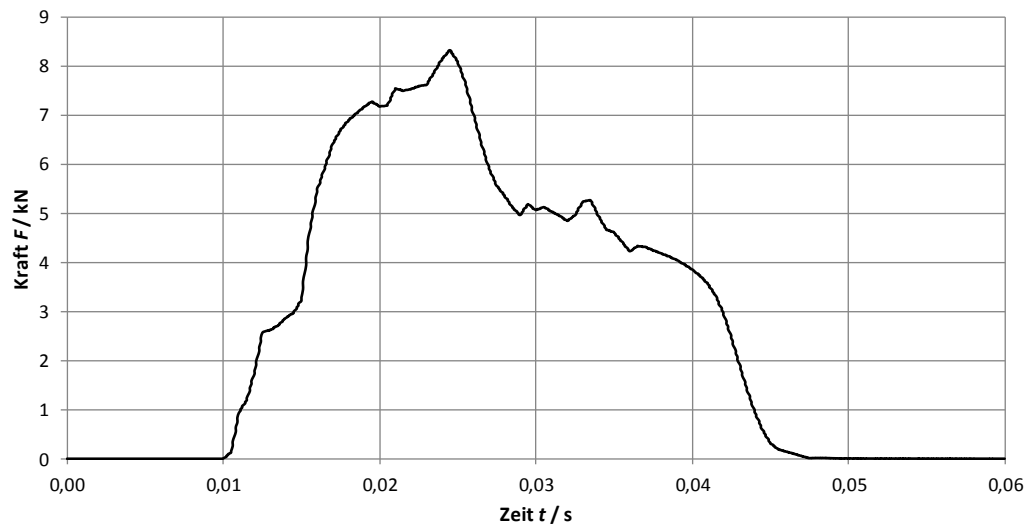
- **Senkrechter Impact** mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s, Elementzahl 40x40x10



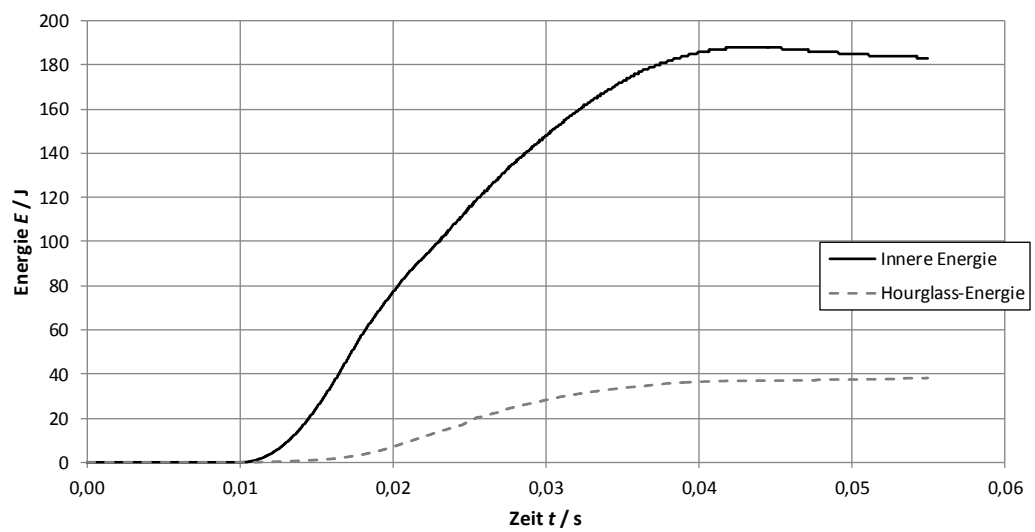
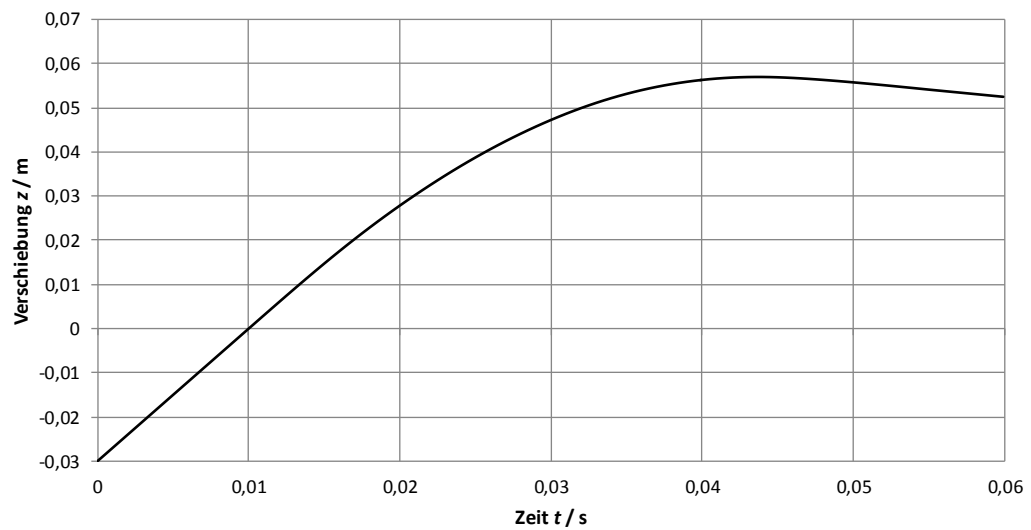
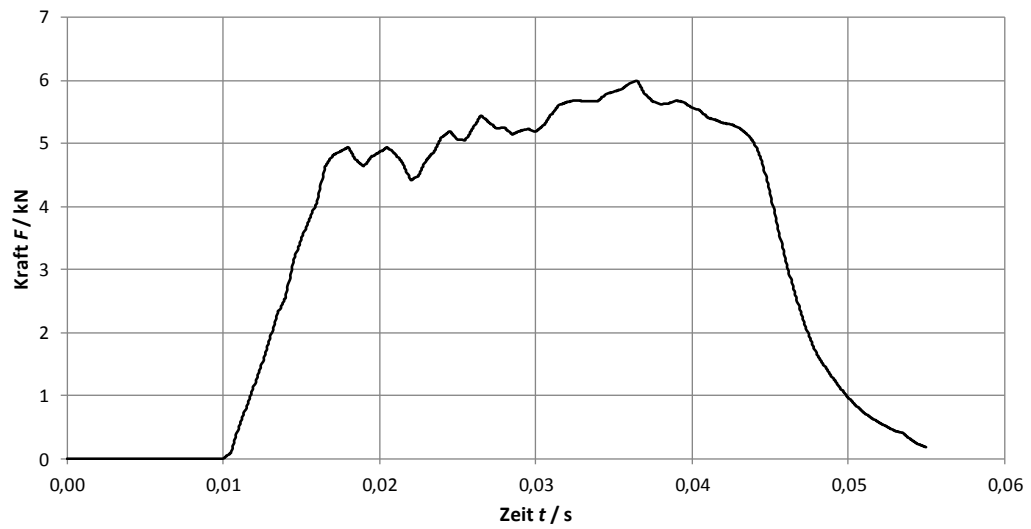
- Senkrechter Impact mit einer Geschwindigkeit von 4 m/s, Elementzahl 40x40x10



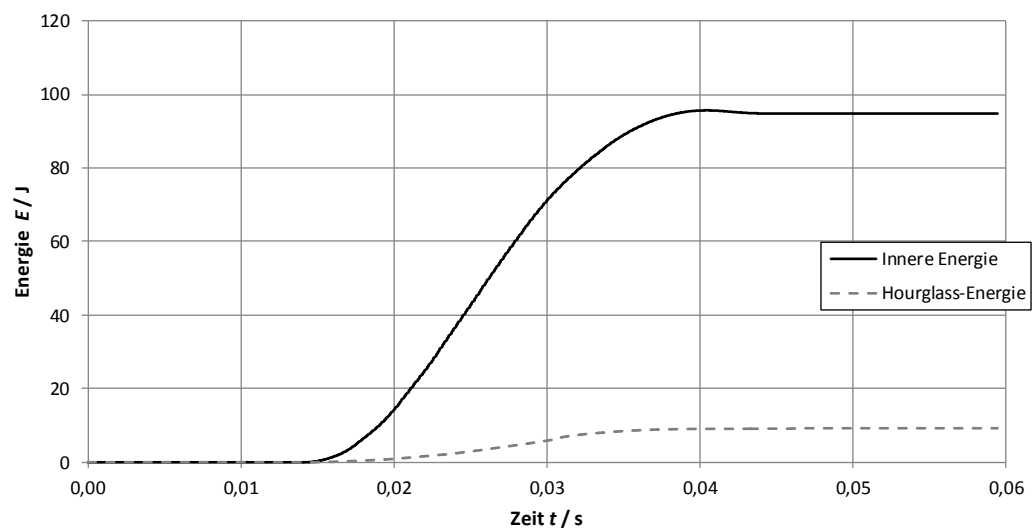
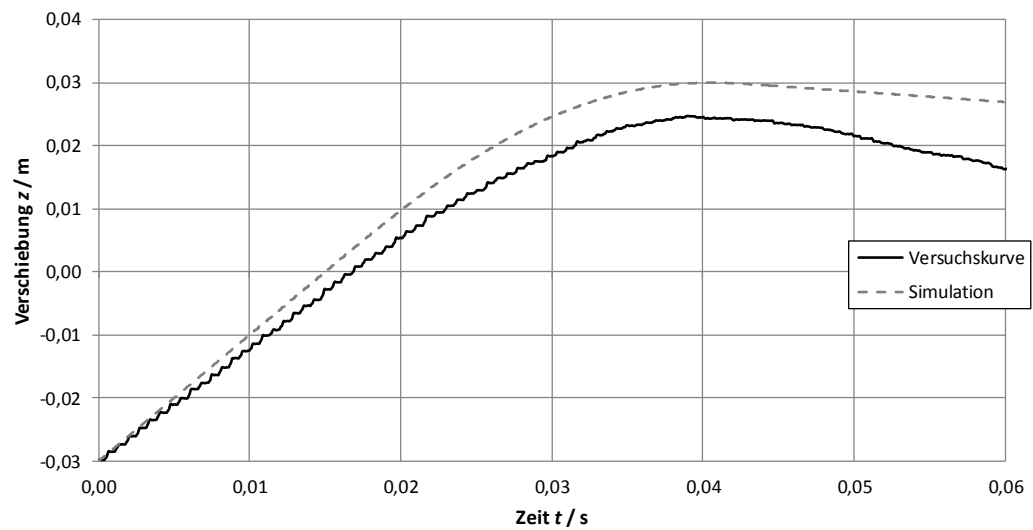
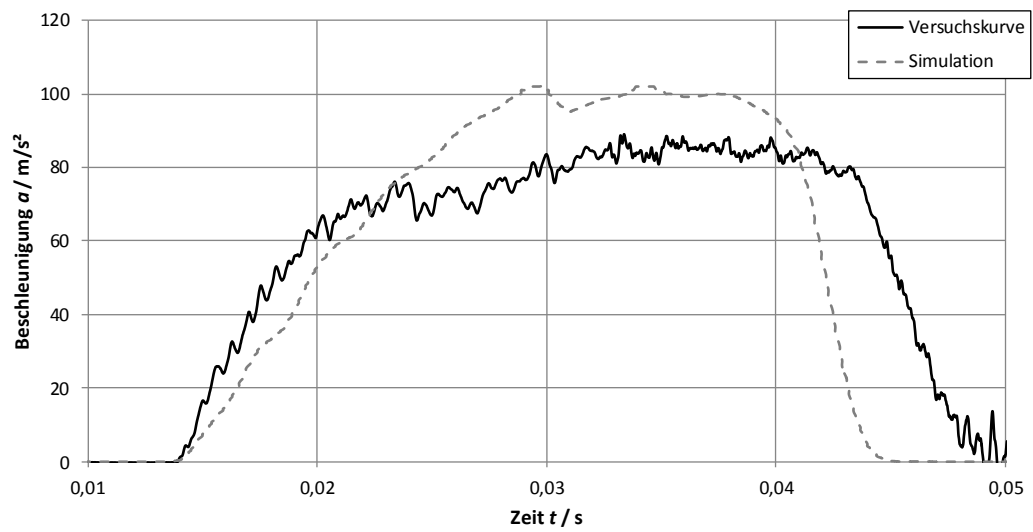
- Senkrechter Impact mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s, Elementzahl 20x20x5



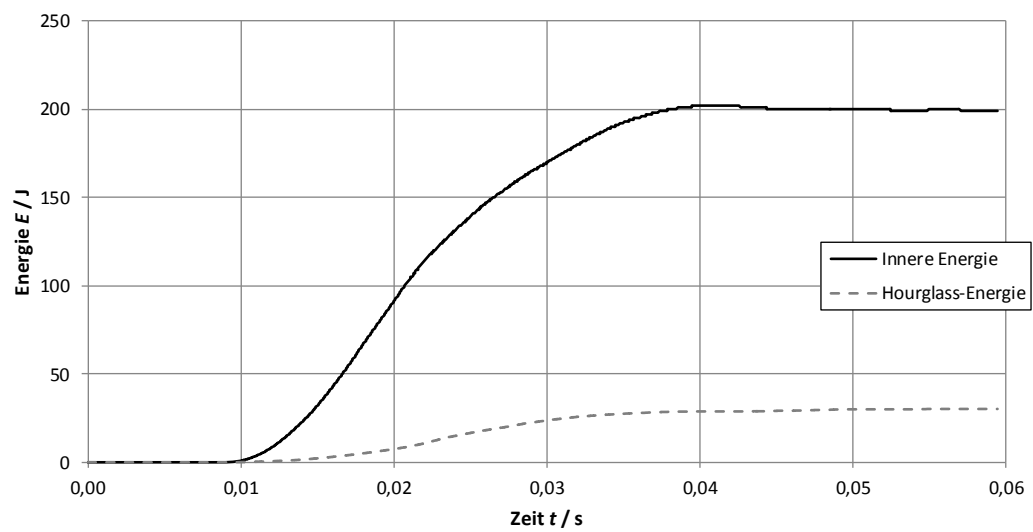
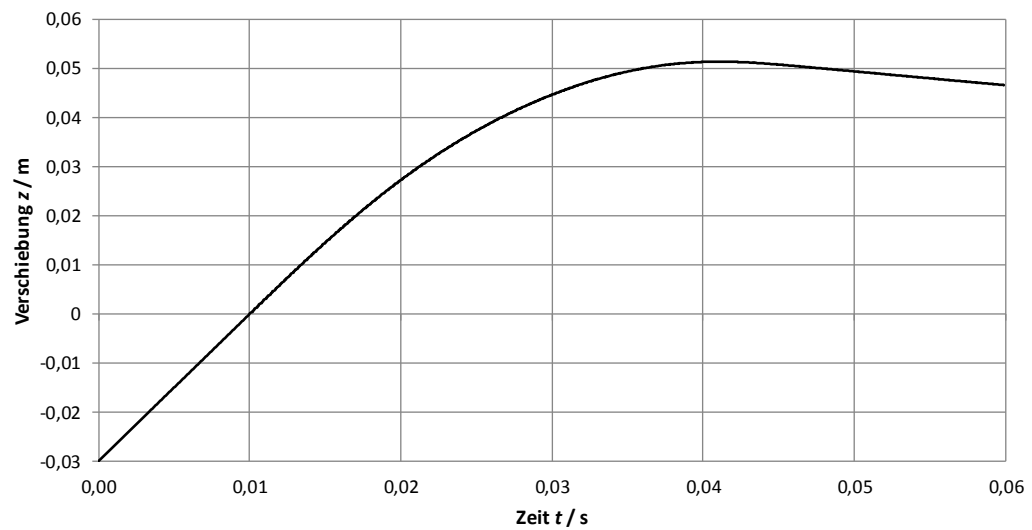
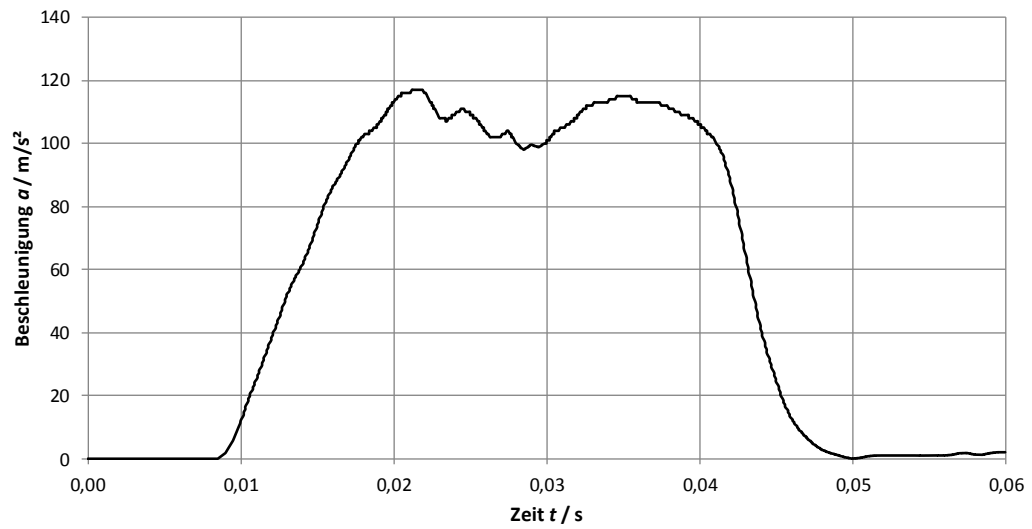
- Senkrechter Impact mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s, Elementzahl 80x80x20



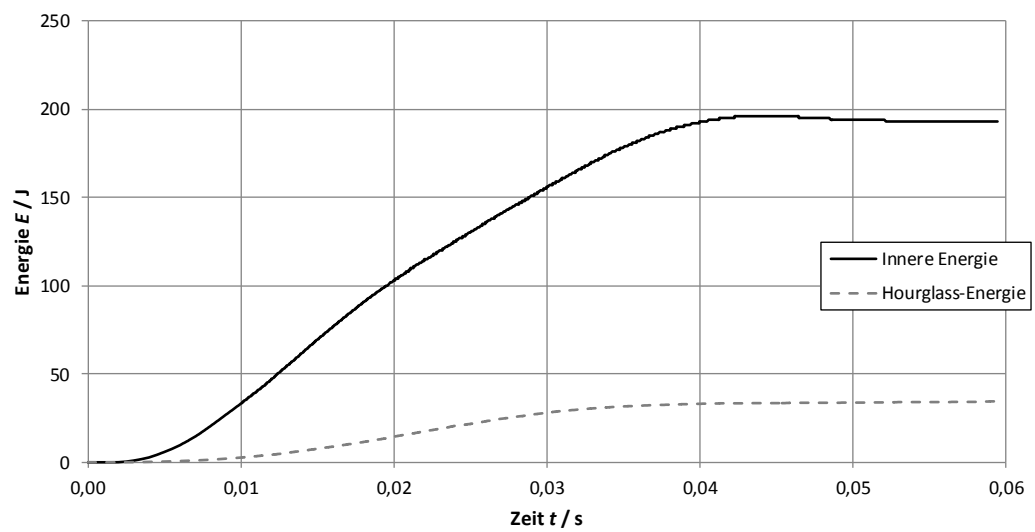
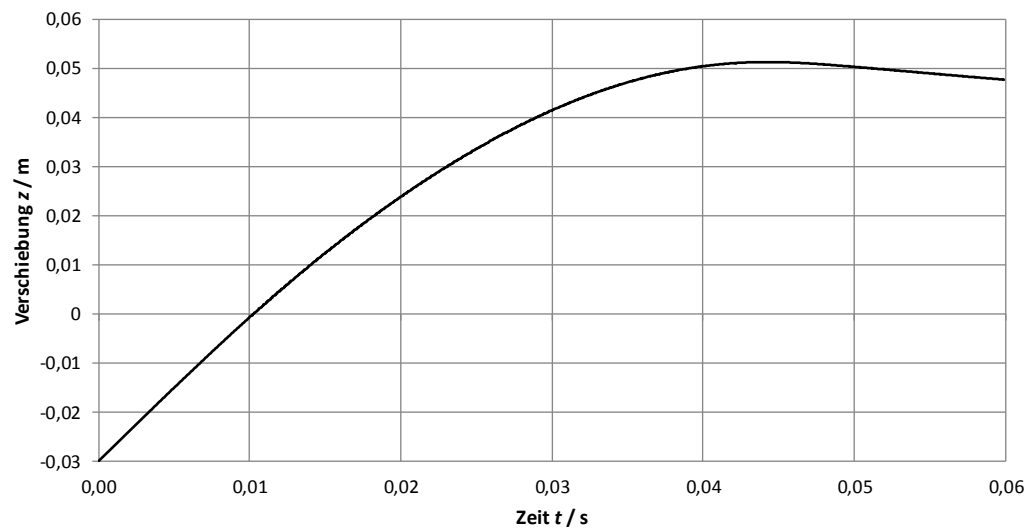
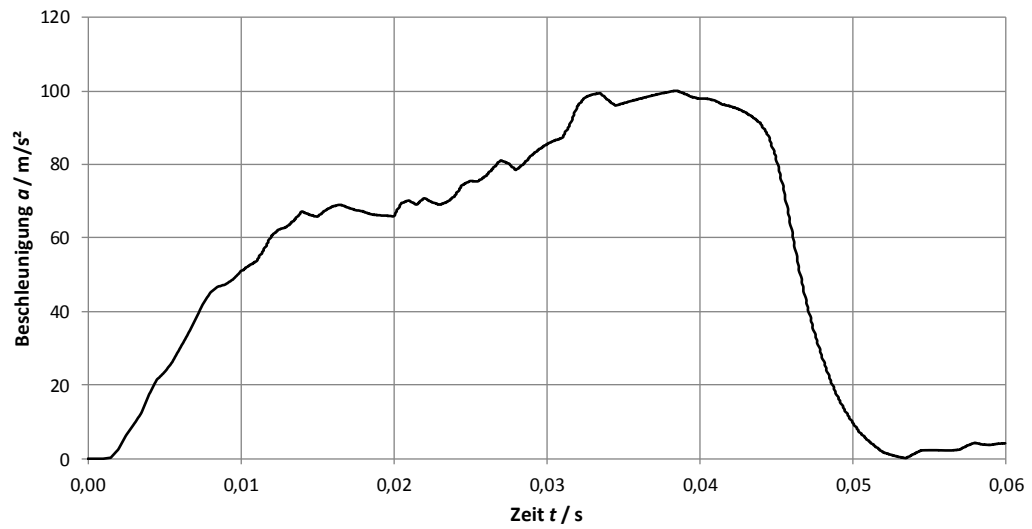
- **Geneigter Impact (15°) mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s, Elementzahl 40x40x10**



- **Geneigter Impact (20°) mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s, Elementzahl 40x40x10**



- **Geneigter Impact (50°) mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s, Elementzahl 40x40x10**



Anhang B

• Keyword-Datei des Drucktests in T-Richtung – 1 Element

```

*KEYWORD
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*CONTROL_ENERGY
$#   hgen      rwen      slnten      rylene
      2         2         1         1
*CONTROL_TERMINATION
$#   endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
      2.4000E-2      0         0.000      0.000      0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$#   dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm      erode      ms1st
      0.000      0.100000      0         0.000      0.000      0         0         0
$#   dt2msf      dt2mslc      imscl      unused      unused      rmscl
      0.000      0         0         0         0         0.000
*DATABASE_ELOUT
$#   dt      binary      lcur      ioopt      option1      option2      option3      option4
      1.0000E-4      1         0         1         0         0         0         0
*DATABASE_GLSTAT
$#   dt      binary      lcur      ioopt
      1.0000E-4      1         0         1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#   dt      lcdt      beam      npltc      psetid
      1.2500E-4      0         0         0         0
$#   ioopt
      0
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID
$#   pid      dof      vad      lcid      sf      vid      death      birth
      3         3         0         7      1.000000      01.0000E+28      0.000
*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_ID
$#   cid      title
      1
$#   ssid      msid      sstyp      mstyp      sbxid      mboxid      spr      mpr
      1         0         2         0         0         0         0         0
$#   fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0         0.0001.0000E+20
$#   sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
      10.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
$#   soft      sofscl      lcidab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
      2      0.100000      0      1.025000      2.000000      2         0         1
*SET_PART_LIST
$#   sid      da1      da2      da3      da4      solver
      1      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#   pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
      1         2         3         0         0         0         0         0
*PART
$# title
Honigwabe
$#   pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      1         1         1         0         0         0         0         0
*SECTION_SOLID_TITLE
Honigwabe
$#   secid      elform      aet
      1         0         0
*MAT_MODIFIED_HONEYCOMB_TITLE
Honigwabe
$#   mid      ro      e      pr      sigy      vf      mu      bulk
      1      32.000000      4.1700E+7      5.0000E-2      4.0500E+8      0.180000      5.0000E-2      0.000
$#   lca      lcb      lcc      lcs      lcab      lcbc      lcca      lcsr
      1.         2.         3.         0.         4.         5.         6.         0.
$#   eaau      ebbu      eccu      gabu      gbcu      gcay      aopt      macf
      3.1000E+8      2.1000E+5      2.0000E+5      1.9000E+8      2.3000E+6      9.0000E+7      2.000000      1
$#   xp      yp      zp      al      a2      a3
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      1.000000

```

```

$#      d1      d2      d3      tsef      ssef      vref      tref      shdflg
      0.000  1.000000      0.000  0.000      0.000  0.000  0.000  0.000
*PART
$# title
Platte-fest
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      2      2      2      0      0      0      0      0
*SECTION_SOLID_TITLE
Platte
$#      secid      elform      aet
      2      1      0
*MAT_RIGID_TITLE
Platte-fest
$#      mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
      2  7900.00002.0000E+11  0.300000  0.000  0.000  0.000
$#      cmo      con1      con2
      1.000000      7.      7.
$# lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
      0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
*PART
$# title
Platte-beweglich
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      3      2      3      0      0      0      0      0
*MAT_RIGID_TITLE
Platte-beweglich
$#      mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
      3  7900.00002.0000E+11  0.300000  0.000  0.000  0.000
$#      cmo      con1      con2
      1.000000      0.      7.
$# lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
      0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
*DEFINE_CURVE_TITLE
T-Kompression
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      1      0  1.000000  1.000000  0.000  0.000  0
$#      a1      o1
      0.000  8.610005e+005
      5.000000e-003  8.610005e+005
      1.000000e-002  8.140678e+005
.
.
.
      0.825000  1.283027e+006
*DEFINE_CURVE_TITLE
L-Kompression
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      2      0  1.000000  1.000000  0.000  0.000  0
$#      a1      o1
      -5.000000e-003  1164.687500
      0.000  1164.687500
      5.000000e-003  1632.469360
.
.
.
      0.705000  37976.066406
*DEFINE_CURVE_TITLE
W-Kompression
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      3      0  1.000000  1.000000  0.000  0.000  0
$#      a1      o1
      -5.000000e-003  1490.838013
      0.000  1490.838013
      5.000000e-003  2247.878662
.
.
.
      0.610000  21858.816406
*DEFINE_CURVE_TITLE
LT_Schub

```

```

$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      4          0  1.000000  1.000000      0.000      0.000          0
$#      al      ol
-5.000000e-003      5299.201172
      0.000      5299.201172
      5.000000e-003      97674.101563
.
.
.
      0.930000      86295.625000
*DEFINE_CURVE_TITLE
LW-Schub
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      5          0  1.000000  1.000000      0.000      0.000          0
$#      al      ol
-5.000000e-003      2324.499268
      0.000      2324.499268
      5.000000e-003      4753.770508
.
.
.
      1.055000      17452.132813
*DEFINE_CURVE_TITLE
WT-Schub
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      6          0  1.000000  1.000000      0.000      0.000          0
$#      al      ol
-5.000000e-003      5397.951660
      0.000      5397.951660
      5.000000e-003      73705.023438
.
.
.
      0.740000      2.086466e+005
*DEFINE_CURVE_TITLE
Geschwindigkeit
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      7          0  1.000000  1.000000      0.000      0.000          0
$#      al      ol
      0.000      -1.000000
      1.000000      -1.000000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Dehnrates
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      8          0  1.000000  1.000000      0.000      0.000          0
$#      al      ol
      0.000      1.000000
      40.000000      1.100000
*ELEMENT_SOLID
$#      eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
      1          1          1          2          4          3          5          6          8          7
      214          3      285      286      288      287      289      290      292      291
      215          2      293      294      296      295      297      298      300      299
*NODE
$#      nid      x      y      z      tc      rc
      1          0.000      0.000      0.000      0      0
      2          0.100000      0.000      0.000      0      0
      3          0.000      0.100000      0.000      0      0
      4          0.100000      0.100000      0.000      0      0
      5          0.000      0.000      2.500000e-002      0      0
      6          0.100000      0.000      2.500000e-002      0      0
      7          0.000      0.100000      2.500000e-002      0      0
      8          0.100000      0.100000      2.500000e-002      0      0
      285      -1.000000e-002      -1.000000e-002      2.500000e-002      0      0
      286          0.110000      -1.000000e-002      2.500000e-002      0      0
      287      -1.000000e-002          0.110000      2.500000e-002      0      0
      288          0.110000          0.110000      2.500000e-002      0      0
      289      -1.000000e-002      -1.000000e-002      3.500000e-002      0      0
      290          0.110000      -1.000000e-002      3.500000e-002      0      0
      291      -1.000000e-002          0.110000      3.500000e-002      0      0

```

292	0.110000	0.110000	3.500000e-002	0	0
293	-1.000000e-002	-1.000000e-002	-1.000000e-002	0	0
294	0.110000	-1.000000e-002	-1.000000e-002	0	0
295	-1.000000e-002	0.110000	-1.000000e-002	0	0
296	0.110000	0.110000	-1.000000e-002	0	0
297	-1.000000e-002	-1.000000e-002	0.000	0	0
298	0.110000	-1.000000e-002	0.000	0	0
299	-1.000000e-002	0.110000	0.000	0	0
300	0.110000	0.110000	0.000	0	0

*END

- **Keyword-Datei des Schubtests in TL-Richtung – 1 Element**

```

*KEYWORD
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*CONTROL_ENERGY
$#      hgen      rwen      slnten      rylene
          2          2          1          1
*CONTROL_TERMINATION
$#  endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
    4.0000E-2      0      0.000      0.000      0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$#  dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm      erode      ms1st
    0.000      0.100000      0      0.000      0.000      0      0      0
$#  dt2msf      dt2mslc      imscl      unused      unused      rmscl
    0.000      0      0      0.000
*DATABASE_ELOUT
$#      dt      binary      lcur      ioopt      option1      option2      option3      option4
    1.0000E-4      1      0      1      0      0      0      0
*DATABASE_GLSTAT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
    1.0000E-4      1      0      1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid
    1.2500E-4      0      0      0      0
$#  ioopt
    0
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID
$#      pid      dof      vad      lcid      sf      vid      death      birth
          3          2          0          7      1.000000      01.0000E+28      0.000
*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
          1
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
          1          2          3          3          0          0          0          0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
          0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0      0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
    1.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
          2
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
          1          3          3          3          0          0          0          0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
          0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0      0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
    1.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
*PART
$# title
Honigwabe
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
          1          1          1          0          0          0          0          0
*SECTION_SOLID_TITLE
Honigwabe
$#      secid      elform      aet
          1          0          0
*MAT_MODIFIED_HONEYCOMB_TITLE
Honigwabe
$#      mid      ro      e      pr      sigy      vf      mu      bulk
          1      32.000000      4.1700E+7      5.0000E-2      4.0500E+8      0.180000      5.0000E-2      0.000
$#      lca      lcb      lcc      lcs      lcab      lcbc      lcca      lcsr
          1.          2.          3.          0.          4.          5.          6.          0.
$#      eaau      ebbu      eccu      gabu      gbcu      gcaw      aopt      macf
    3.1000E+8      2.1000E+5      2.0000E+5      1.9000E+8      2.3000E+6      9.0000E+7      2.000000      1
$#      xp      yp      zp      al      a2      a3
          0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      1.000000
$#      d1      d2      d3      tsef      ssef      vref      tref      shdflg

```

```

0.000 1.000000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
Platte-fest
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
2 2 2 0 0 0 0 0
*SECTION_SOLID_TITLE
Platte
$# secid elform aet
2 1 0
*MAT_RIGID_TITLE
Platte-fest
$# mid ro e pr n couple m alias
2 7900.00002.0000E+11 0.300000 0.000 0.000 0.000
$# cmo con1 con2
1.000000 7. 7.
$# lco or a1 a2 a3 v1 v2 v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
Platte-beweglich
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
3 2 3 0 0 0 0 0
*MAT_RIGID_TITLE
Platte-beweglich
$# mid ro e pr n couple m alias
3 7900.00002.0000E+11 0.300000 0.000 0.000 0.000
$# cmo con1 con2
1.000000 0. 7.
$# lco or a1 a2 a3 v1 v2 v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*DEFINE_CURVE_TITLE
T-Kompression
$# lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp
1 0 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$# a1 o1
0.000 8.610005e+005
5.000000e-003 8.610005e+005
1.000000e-002 8.140678e+005
.
.
.
0.825000 1.283027e+006
*DEFINE_CURVE_TITLE
L-Kompression
$# lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp
2 0 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$# a1 o1
-5.000000e-003 1164.687500
0.000 1164.687500
5.000000e-003 1632.469360
.
.
.
0.705000 37976.066406
*DEFINE_CURVE_TITLE
W-Kompression
$# lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp
3 0 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$# a1 o1
-5.000000e-003 1490.838013
0.000 1490.838013
5.000000e-003 2247.878662
.
.
.
0.610000 21858.816406
*DEFINE_CURVE_TITLE
LT_Schub
$# lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp

```

```

      4      0  1.000000  1.000000      0.000      0.000      0
$#      a1      o1
      -5.000000e-003      5299.201172
      0.000      5299.201172
      5.000000e-003      97674.101563
.
.
.
      2.000000      10000.000000
*DEFINE_CURVE_TITLE
LW-Schub
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      5      0  1.000000  1.000000      0.000      0.000      0
$#      a1      o1
      -5.000000e-003      2324.499268
      0.000      2324.499268
      5.000000e-003      4753.770508
.
.
.
      1.055000      17452.132813
*DEFINE_CURVE_TITLE
WT-Schub
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      6      0  1.000000  1.000000      0.000      0.000      0
$#      a1      o1
      -5.000000e-003      5397.951660
      0.000      5397.951660
      5.000000e-003      73705.023438
.
.
.
      0.740000      2.086466e+005
*DEFINE_CURVE_TITLE
Geschwindigkeit
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      7      0  1.000000  1.000000      0.000      0.000      0
$#      a1      o1
      0.000      -1.000000
      1.000000      -1.000000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Dehnrate
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      8      0  1.000000  1.000000      0.000      0.000      0
$#      a1      o1
      0.000      1.000000
      40.000000      1.100000
*ELEMENT_SOLID
$#      eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
      1      1      1      2      4      3      5      6      8      7
      214      3      285      286      288      287      289      290      292      291
      215      2      293      294      296      295      297      298      300      299
*NODE
$#      nid      x      y      z      tc      rc
      1      0.000      0.000      0.000      0      0
      2      0.100000      0.000      0.000      0      0
      3      0.000      0.100000      0.000      0      0
      4      0.100000      0.100000      0.000      0      0
      5      0.000      0.000      2.500000e-002      0      0
      6      0.100000      0.000      2.500000e-002      0      0
      7      0.000      0.100000      2.500000e-002      0      0
      8      0.100000      0.100000      2.500000e-002      0      0
      285      -1.000000e-002      -1.000000e-002      2.500000e-002      0      0
      286      0.110000      -1.000000e-002      2.500000e-002      0      0
      287      -1.000000e-002      0.110000      2.500000e-002      0      0
      288      0.110000      0.110000      2.500000e-002      0      0
      289      -1.000000e-002      -1.000000e-002      3.500000e-002      0      0
      290      0.110000      -1.000000e-002      3.500000e-002      0      0
      291      -1.000000e-002      0.110000      3.500000e-002      0      0
      292      0.110000      0.110000      3.500000e-002      0      0

```


293	-1.000000e-002	-1.000000e-002	-1.000000e-002	0	0
294	0.110000	-1.000000e-002	-1.000000e-002	0	0
295	-1.000000e-002	0.110000	-1.000000e-002	0	0
296	0.110000	0.110000	-1.000000e-002	0	0
297	-1.000000e-002	-1.000000e-002	0.000	0	0
298	0.110000	-1.000000e-002	0.000	0	0
299	-1.000000e-002	0.110000	0.000	0	0
300	0.110000	0.110000	0.000	0	0

*END

- **Keyword-Datei der senkrechten Impactsimulation mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s, Elementzahl 40x40x10**

```

*KEYWORD
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*CONTROL_ENERGY
$#   hgen      rwen      slnten      rylen
      2         2         1         1
*CONTROL_TERMINATION
$#   endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
      6.0000E-2      0      0.000      0.000      0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$#   dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm      erode      ms1st
      0.000      0.100000      0      0.000      0.000      0      0      0
$#   dt2msf      dt2mslc      imsc1      unused      unused      rmsc1
      0.000      0      0      0.000
*DATABASE_MATSUM
$#   dt      binary      lcur      ioopt
      5.0000E-4      1      0      1
*DATABASE_RCFORC
$#   dt      binary      lcur      ioopt
      5.0000E-4      1      0      1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#   dt      lcdt      beam      npltc      psetid
      5.0000E-4      0      0      0      0
$#   ioopt
      0
*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#   cid      title
      2Honigwabe-Platte
$#   ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      1         2         3         3         0         0         0         0
$#   fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0      0.0001.0000E+20
$#   sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
      1.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_GENERAL_ID
$#   cid      title
      2
$#   ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      1         0         2         0         0         0         0         0
$#   fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
      0.500000      0.000      0.000      0.000      0.000      0      0.0001.0000E+20
$#   sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
      10.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
$#   soft      sofsc1      lcidab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
      2      0.100000      0      1.025000      2.000000      2      0      1
*SET_PART_LIST
$#   sid      da1      da2      da3      da4      solver
      1      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#   pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
      1         3         0         0         0         0         0         0
*PART
$# title
Honigwabe
$#   pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      1         1         1         0         1         0         0         0
*SECTION_SOLID_TITLE
Honigwabe
$#   secid      elform      aet
      1         1         0
*MAT_MODIFIED_HONEYCOMB_TITLE
Honigwabe
$#   mid      ro      e      pr      sigy      vf      mu      bulk
      1      32.000000      4.1700E+7      5.0000E-2      4.0500E+8      0.180000      5.0000E-2      0.000
$#   lca      lcb      lcc      lcs      lcab      lcbc      lcca      lcsr

```

```

1.      2.      3.      0.      8.      5.      10.      0.
$#  eaau  ebbu  eccu  gabu  gbcu  gcau  aopt  macf
3.1000E+8 2.1000E+5 2.0000E+5 1.9000E+8 2.3000E+6 9.0000E+7 2.000000 1
$#      xp      yp      zp      a1      a2      a3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 1.000000
$#      d1      d2      d3      tsef      ssef      vref      tref      shdflg
0.000 1.000000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*HOURLASS
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2      qb/vdc      qw
1      1 5.0000E-2 0 1.500000 6.0000E-2 0.100000 0.100000
*PART
$# title
Platte
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
2      2      3      0      0      0      0      0
*SECTION_SOLID_TITLE
Starrer Körper
$#      secid      elform      aet
2      1      0
*MAT_RIGID_TITLE
Platte
$#      mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
3 7900.00002.0000E+11 0.300000 0.000 0.000 0.000
$#      cmo      con1      con2
1.000000 7. 7.
$# lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
Impactor
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
3      2      2      0      0      0      0      0
*MAT_RIGID_TITLE
Kugeliger Impactor
$#      mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
2 65290.0002.0000E+11 0.300000 0.000 0.000 0.000
$#      cmo      con1      con2
1.000000 4. 7.
$# lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
Zylinder
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
4      2      2      0      0      0      0      0
*PART
$# title
Halbkugel
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
5      2      2      0      0      0      0      0
*INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY
$#      pid      vx      vy      vz      vxr      vyr      vzr      icid
3      0.000 0.000 -3.000000 0.000 0.000 0.000 0
*DEFINE_CURVE_TITLE
T-Lastkurve
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
1      0 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$#      a1      o1
0.000 8.610010e+005
5.000000e-003 8.610010e+005
1.000000e-002 8.140680e+005
.
.
.
0.825000 1.283030e+006
*DEFINE_CURVE_TITLE
L-Lastkurve
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
2      0 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$#      a1      o1

```

```

-5.000000e-003      1164.689941
      0.000          1164.689941
      5.000000e-003      1632.469971
.
.
.
      0.705000      37976.101563
*DEFINE_CURVE_TITLE
W-Lastkurve
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      3          0      1.000000      1.000000      0.000      0.000          0
$#          a1          o1
      -5.000000e-003      1490.839966
      0.000          1490.839966
      5.000000e-003      2247.879883
.
.
.
      0.610000      21858.800781
*DEFINE_CURVE_TITLE
LT-Lastkurve
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      4          0      1.000000      1.000000      0.000      0.000          0
$#          a1          o1
      -5.000000e-003      5299.201172
      0.000          5299.201172
      5.000000e-003      97674.101563
.
.
.
      10.000000      1000.000000
*DEFINE_CURVE_TITLE
WL-Lastkurve
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      5          0      1.000000      1.000000      0.000      0.000          0
$#          a1          o1
      -5.000000e-003      2324.499268
      0.000          2324.499268
      5.000000e-003      4753.770508
.
.
.
      10.000000      1000.000000
*DEFINE_CURVE_TITLE
WT-Lastkurve
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      6          0      1.000000      1.000000      0.000      0.000          0
$#          a1          o1
      -5.000000e-003      5397.951660
      0.000          5397.951660
      5.000000e-003      73705.023438
.
.
.
      10.000000      1000.000000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Dehnrate
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      7          0      1.000000      1.000000      0.000      0.000          0
$#          a1          o1
      0.000          1.000000
      40.000000      1.100000
*DEFINE_CURVE_TITLE
TL-Lastkurve
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      8          0      1.000000      1.000000      0.000      0.000          0
$#          a1          o1
      -5.000000e-003      3727.106934
      0.000          3727.106934
      5.000000e-003      60744.472656

```

```

.
.
.
10.000000      1000.000000
*DEFINE_CURVE_TITLE
LW-Lastkurve
$#   lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      9         0  1.000000  1.000000      0.000      0.000          0
$#           a1          o1
      -5.000000e-003      2498.409180
              0.000      2498.409180
      5.000000e-003      4282.828613
.
.
.
10.000000      1000.000000
*DEFINE_CURVE_TITLE
TW-Lastkurve
$#   lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      10         0  1.000000  1.000000      0.000      0.000          0
$#           a1          o1
      -5.000000e-003      3792.916260
              0.000      3792.916260
      5.000000e-003      39091.468750
.
.
.
10.000000      1000.000000
*ELEMENT_SOLID
$#   eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
169877      2  185745  185746  185748  185747  185749  185750  185752  185751
.
.
.

```

- **Keyword-Datei der Deckschichtuntersuchung mit Mat #58**

```

*KEYWORD
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*CONTROL_ENERGY
$#      hgen      rwen      slnten      rylene
          2          2          1          1
*CONTROL_TERMINATION
$#  endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
    5.0000E-3          0      0.000      0.000      0.000
*DATABASE_GLSTAT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
    1.0000E-5          1          0          1
*DATABASE_RCFORC
$#      dt      binary      lcur      ioopt
    1.0000E-5          1          0          1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid
    1.0000E-5          0          0          0          0
$#  ioopt
    0
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
$#      nsid      dof      vad      lcid      sf      vid      death      birth
          3          3          0          1  1.000000      01.0000E+28      0.000
*BOUNDARY_SPC_SET
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry      dofrz
          3          0          1          1          0          1          1          1
*SET_NODE_LIST_TITLE
NODESET(SPC) 3
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
          3      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
          5          56          107          158          209          260          0          0
*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid      title
          1
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
          2          3          3          3          0          0          0          0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
    0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0          0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
    1.000000  1.000000      0.000      0.000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
*PART
$# title
Deckschichtelement
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
          2          1          2          0          0          0          0          0
*SECTION_SHELL_TITLE
Schalenelement
$#      secid      elform      shrif      nip      propt      qr/irid      icomp      setyp
          1          2  1.000000          2          1          0          0          1
$#      t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof      edgset
    2.0000E-4  2.0000E-4  2.0000E-4  2.0000E-4      0.000      0.000      0.000      0
*MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC_TITLE
Mat58
$#      mid      ro      ea      eb      (ec)      prba      tau1      gamma1
          2  0.2614001.3200E+101.3200E+10      0.000  0.300000      0.000      0.000
$#      gab      gbc      gca      slimt1      slimc1      slimt2      slimc2      slims
    5.0800E+9      0.000      0.000  5.000000      0.000  5.000000      0.000      0.000
$#      aopt      tsize      erods      soft      fs
    2.000000      0.000  2.1500E-2      0.000      0.000
$#      xp      yp      zp      a1      a2      a3
    0.000      0.000      0.000      0.000      0.000  1.000000
$#      v1      v2      v3      d1      d2      d3      beta
    0.000      0.000      0.000      0.000  1.000000      0.000      0.000
$#      ellc      ellt      e22c      e22t      gms
    0.000  0.112000      0.000  0.112000      0.000

```

```

$#      xc      xt      yc      yt      sc
1.0000E+8 5.7000E+8 1.0000E+8 5.7000E+8 4.0000E+7
*PART
$# title
Starrer Koerper
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      3      1      3      0      0      0      0      0
*MAT_RIGID
$#      mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
      3 65290.0002.0000E+11 0.300000 0.000 0.000 0.000
$#      cmo      con1      con2
      0.000      7.      7.
$# lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*DEFINE_CURVE_TITLE
Belastungskurve
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      1      0 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$#      al      ol
      0.000      1.000000
      1.000000      1.000000
*ELEMENT_SHELL
$#      eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
      2      2      56      57      6      5      0      0      0      0
.
.
.

```

- **Keyword-Datei der Klebschichtuntersuchung unter Halbierung der Schalendicke**

```

*KEYWORD MEMORY='7_ NCPU=1
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*CONTROL_TERMINATION
$# endtim endcyc dtmin endeng endmas
6.0000E-4 0 0.000 0.000 0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$# dtinit tssfac isdo tslimt dt2ms lctm erode ms1st
1.0000E-15 5.0000E-2 0 0.000 0.000 0 0 0
$# dt2msf dt2mslc imslc unused unused rmscl
0.000 0 0 0.000
*DATABASE_ABSTAT
$# dt binary lcur ioopt
1.0000E-5 1 0 1
*DATABASE_BNDOUT
$# dt binary lcur ioopt
1.0000E-5 1 0 1
*DATABASE_GCEOUT
$# dt binary lcur ioopt
1.0000E-5 1 0 1
*DATABASE_NCFORC
$# dt binary lcur ioopt
1.0000E-5 1 0 1
*DATABASE_NODOUT
$# dt binary lcur ioopt option1 option2
1.0000E-5 1 0 1 0.000 0
*DATABASE_RBDOUT
$# dt binary lcur ioopt
1.0000E-5 1 0 1
*DATABASE_RCFORC
$# dt binary lcur ioopt
1.0000E-8 1 0 1
*DATABASE_SPCFORC
$# dt binary lcur ioopt
1.0000E-5 1 0 1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$# dt lcdt beam npltc psetid
1.0000E-5 0 0 0 0
$# ioopt
0
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
$# nsid dof vad lcid sf vid death birth
1 3 0 10 1.000000 01.0000E+28 0.000
*BOUNDARY_SPC_SET
$# nsid cid dofx dofy dofz dofrx dofry dofrz
2 0 1 1 1 1 1 1
*SET_NODE_LIST
$# sid da1 da2 da3 da4 solver
2 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# nid1 nid2 nid3 nid4 nid5 nid6 nid7 nid8
13 14 15 16 0 0 0 0
*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_FAILURE_ID
$# cid title
1Face-to-Core-Bonding
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
2 1 3 3 0 0 0 1
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
1.9700E+6 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0.0001.0000E+20
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
$# soft sofscl lcidab maxpar sbopt depth bsort frcfrq
0 0.100000 0 1.025000 2.000000 2 0 1
$# penmax thkopt shlthk snlog isym i2d3d sldthk sldstf
0.000 0 0 0 0 0 0 0.000 0.000
$# igap ignodprfac/mpadtstif/mpar2 unused unused flangl cid_rcf
1 0 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0

```



```

*CONTACT_AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
$#      cid                                     title
      2Face-to-core-bonding
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      2          1          3          3          0          0          0          0
$#      fs        fd        dc        vc        vdc        penchk        bt        dt
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000          0      0.0001.0000E+20
$#      sfs        sfm        sst        mst        sfst        sfmt        fsf        vsf
      1.000000    1.000000      0.000      0.000      1.000000    1.000000    1.000000    1.000000
$#      option      nfls      sfls      param      eraten      erates      ct2cn      cn
      4      1.9700E+6      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      soft      sofsc1      lc1dab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
      0      0.100000          0      1.025000      2.000000          2          0          1
$#      penmax      thkopt      shlthk      snlog      isym      i2d3d      sldthk      sldstf
      0.000          0          0          0          0          0      0.000      0.000
$#      igap      ignodprfac/mpadtstif/mpar2      unused      unused      flangl      cid_rcf
      1          0      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      q2tri      dtpchk      sfnbr      fnlsc1      dnlsc1      tcso      tiedid      shledg
      0      0.000      0.000      0.000      0.000          0          0          0

*PART
$# title
boxsolid
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      1          1          3          0          0          0          0          0

*SECTION_SOLID_TITLE
Honeycomb_Sec
$#      secid      elform      aet
      1          1          0

*MAT_MODIFIED_HONEYCOMB_TITLE
Unmodified_AlH_20-3/16-00007-P-5056_v1
$#      mid      ro      e      pr      sigy      vf      mu      bulk
      3      32.000000    4.1700E+7    5.0000E-2    4.0500E+8    0.180000    5.0000E-2    0.000
$#      lca      lcb      lcc      lcs      lcab      lcbc      lcca      lcsr
      1.          2.          3.          0.          4.          6.          5.          0.
$#      eaau      ebbu      eccu      gabu      gbcu      gcau      aopt      macf
      3.1000E+8    2.1000E+5    2.0000E+5    1.9000E+8    2.3000E+6    9.0000E+7    2.000000      1
$#      xp      yp      zp      a1      a2      a3
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      1.000000
$#      d1      d2      d3      tsef      ssef      vref      tref      shdflg
      0.000      1.000000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000

*PART
$# title
shell_4p
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      2          4          6          0          0          0          0          0

*SECTION_SHELL_TITLE
Plate_Sec
$#      secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid      icomp      setyp
      4          2      1.000000          2          1          0          0          1
$#      t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof      edgset
      1.0000E-4    1.0000E-4    1.0000E-4    1.0000E-4      0.000      0.000      0.000      0
$#      aopt      tsize      erods      soft      fs
      2.000000      0.000      5.0000E-2      0.000      0.000
$#      xp      yp      zp      a1      a2      a3
      0.000      0.000      0.000      1.000000      0.000      0.000
$#      v1      v2      v3      d1      d2      d3      beta
      0.000      0.000      0.000      0.000      1.000000      0.000      0.000
$#      ellc      ellt      e22c      e22t      gms
      0.000      0.112000      0.000      0.112000      0.000
$#      xc      xt      yc      yt      sc
      1.0000E+8    5.7000E+8    1.0000E+8    5.7000E+8    4.0000E+7
$#      xc      xt      yc      yt      sc
      1.0000E+8    5.7000E+8    1.0000E+8    5.7000E+8    4.0000E+7

*DEFINE_CURVE_TITLE
T_Compression
$#      lc1d      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      1          0      1.000000      1.000000      0.000      0.000      0

```

```

$#          a1          o1
          0.000      8.610010e+005
      5.000000e-003      8.610010e+005
      1.000000e-002      8.140680e+005
.
.
.
      0.825000      1.283030e+006
*DEFINE_CURVE_TITLE
L_Compression
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
          2          0      1.000000      1.000000      0.000      0.000          0
$#          a1          o1
      -5.000000e-003      1164.689941
          0.000      1164.689941
      5.000000e-003      1632.469971
.
.
.
      0.705000      37976.101563
*DEFINE_CURVE_TITLE
W_Compression
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
          3          0      1.000000      1.000000      0.000      0.000          0
$#          a1          o1
      -5.000000e-003      1490.839966
          0.000      1490.839966
      5.000000e-003      2247.879883
.
.
.
      0.610000      21858.800781
*DEFINE_CURVE_TITLE
LT_Shear
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
          4          0      1.000000      1.000000      0.000      0.000          0
$#          a1          o1
      -5.000000e-003      5299.200195
          0.000      5299.200195
      5.000000e-003      97674.101563
.
.
.
      0.930000      86295.601563
*DEFINE_CURVE_TITLE
WT_Shear
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
          5          0      1.000000      1.000000      0.000      0.000          0
$#          a1          o1
      -5.000000e-003      5397.950195
          0.000      5397.950195
      5.000000e-003      73705.000000
.
.
.
      0.740000      2.086470e+005
*DEFINE_CURVE_TITLE
WL_Shear
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
          6          0      1.000000      1.000000      0.000      0.000          0
$#          a1          o1
      -5.000000e-003      2324.500000
          0.000      2324.500000
      5.000000e-003      4753.770020
.
.
.
      1.055000      17452.099609
*DEFINE_CURVE_TITLE
Test_Velocity

```

```

$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      10          0  1.000000  1.000000      0.000      0.000          0
$#
      al          o1
      0.000      1.000000
      1.000000      1.000000
*SET_NODE_LIST
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      1      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
      21          22          23          24          0          0          0          0
*ELEMENT_SOLID
$#      eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
      3          1      13      14      16      15      17      18      20      19
*ELEMENT_SHELL
$#      eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
      4          2      23      24      22      21          0          0          0          0
*NODE
$#      nid      x      y      z      tc      rc
      13          0.000          0.000          0.000          0          0
      14      0.100000          0.000          0.000          0          0
      15          0.000      0.100000          0.000          0          0
      16      0.100000      0.100000          0.000          0          0
      17          0.000          0.000      2.500000e-002          0          0
      18      0.100000          0.000      2.500000e-002          0          0
      19          0.000      0.100000      2.500000e-002          0          0
      20      0.100000      0.100000      2.500000e-002          0          0
      21      0.100000          0.000      2.500000e-002          0          0
      22      0.100000      0.100000      2.500000e-002          0          0
      23          0.000          0.000      2.500000e-002          0          0
      24          0.000      0.100000      2.500000e-002          0          0
*END

```