

DIPLOMARBEIT

FEM-Auslegung einer Kohlefaser-Geflechtstruktur

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung
des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieur
unter der Leitung von

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinz Pettermann

Dipl.-Ing. Martin Schwab

Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik (E317)

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Andreas Salcher, BSc.

E 066 445/ 626287

Hollensteinerstr. 263

3335 Weyer

Wien, Mai 2015

Andreas Salcher

Danksagung

Ich möchte mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, die mich in meiner Ausbildung begleitet haben, für Ihr Engagement bedanken. Wie auch bei meinem Diplomarbeitgeber Assoc. Prof. Heinz Pettermann sowie Dipl.-Ing. Martin Schwab, die mir jederzeit mit gutem Rat zur Seite gestanden sind.

Außerdem möchte ich mich herzlich bei meiner Familie bedanken, im Besonderen bei meinen Eltern, die mich immer unterstützten und mir das Studium in dieser Form überhaupt ermöglicht haben.

Sowie bei Christoph Brandner und Julia Wegscheider für eine großartige Zeit in Wien und dass sie jeden Zweifel ins Gegenteil gewandt haben.

Ein besonderer Dank gilt auch meiner Freundin Patrizia Aspalter, für ihre Anteilnahme und ihr Einfühlvermögen in der Zeit, in der ich diese Arbeit verfasst habe, sowie für ihre Unterstützung.

Kurzfassung

In vielen industriellen Sparten erfreuen sich Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) immer größer werdender Beliebtheit. Ihre hervorragenden gewichtsspezifischen Eigenschaften, leistungsfähigere Computerhardware sowie Simulationsprogramme bis hin zu modernen Fertigungstechnologien beschleunigen den Einsatz dieser Materialtechnologie.

Um das gesamte Potential dieses Werkstoffes ausschöpfen zu können, stellt die Finite Elemente Methode (FEM) ein unverzichtbares, numerisches Instrument dar.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein FEM-Modell eines U-förmigen Balkens aus Kohlefaser-Geflecht zu erstellen. Dieser ist so zu dimensionieren, dass das angestrebte Versagen möglichst dominiert, sowie das Versagen an den Lasteinleitungs- und Lagerstellen unterbunden wird. An diesem Balken ist in weiterer Folge ein Experiment vorgesehen, das in einem 4-Punkt-Biegeversuch durchgeführt wird.

Es wird ein parametrisiertes FEM-Modell erstellt, das es ermöglicht, die geometrischen Dimensionen der Geometrie des Balkens automatisiert zu ändern. Das FEM-Modell bildet dabei die Lagerung und Lasteinleitung des Balkens vereinfacht ab. Die Lasteinleitung findet über eine Aluminium-Druckplatte statt mit der die Kräfte flächig in den Balken eingeleitet werden. Dabei wird eine Kontaktformulierung angewandt. Die Lagerung erfolgt über ein Aluminium-Insert im Balken.

Detaillierte Untersuchungen zeigen den Einfluss der Geometrieänderung auf das Schädigungsverhalten. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Lasteinleitungsstelle und den Schädigungsort gelegt. Die Variierung der Geometrie zielt darauf ab, die Lasteinleitungsstelle vor Schädigung zu bewahren. Um ein Versagen mit Sicherheit ausschließen zu können muss diese konstruktiv umgestaltet werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse liefern eine Empfehlung für die Abmessungen des Balkens, der für das Experiment verwendet werden soll. Durch eine zuletzt durchgeführte Simulation, die eine Steifigkeitsreduzierung der Struktur durch Schädigung berücksichtigt, soll der Schadensfortschritt dargestellt werden. Zusätzlich wird die Lasteinleitung und Lagerung überprüft, sodass bei einer Belastung, die zum totalen Versagen der Struktur führen soll, keine Schädigung auftritt.

Abstract

In many industrial branches, fiber-reinforced plastics (FRP) are becoming increasingly popular. Their excellent weight-specific properties, a more powerful computer hardware and simulation programs as well as modern production technologies accelerate the use of this material technology.

In order to exploit the full potential of this material, the finite element method (FEM) serves as an indispensable, numeric instrument.

The aim of this paper is to create an FEM-model of a U-shaped bar made of braided carbon fiber. This one has to be dimensioned, that the intended failure is as dominating as possible and that failure is suppressed at the load introduction and bearing positions. Further an experiment is carried out on this beam by a 4 point bending test.

A parameterized FEM-model is created, which is able to change the geometrical dimensions of the beam automatically.

The FEM-model shows the load introduction and bearing position in a simplified manner.

The load introduction takes place over an aluminium plate, which then leads the forces in a areal way into the beam.

Therefore a contact formulation is applied. The bearing is made by an aluminium insert within the beam.

The obtained findings provide recommendations for the dimensions of the beam, which is to be used for the experiment. A recently conducted simulation, which takes into account stiffness degradation of the structure through damage progress, should depict the damage process. In addition, the load introduction and bearing position are checked to prevent damages when being burdened, which should lead to the total failure of the structure.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	iv
1 Einleitung	1
2 Faser-Kunststoff-Verbunde	3
2.1 Klassifizierung von Verbundwerkstoffen	3
2.1.1 Matrixmaterialien	3
2.1.2 Materialien der Verstärkungsphase	5
2.1.3 Geometrie der Verstärkungsphase	6
2.2 Betrachtungsweisen- Längen Skalen	9
2.3 Koordinatensysteme	10
2.4 Elastisches Materialverhalten der UD- Lamineinzelschicht	12
2.5 Laminattheorie	14
2.6 Versagensmechanismen	16
2.6.1 Internes Materialversagen	19
2.6.1.1 Faserbruch	19
2.6.1.2 Zwischenfaserbruch	23
2.6.1.3 Delamination	27
3 Finite Elemente Modell	29
3.1 Lagerung und Lasteinleitung des Balkens im Experiment	29
3.2 Modellbildung	30
3.2.1 Balkenmodell	31
3.2.2 Belastungsaufbringung und Lagerung	31
3.2.3 Parametrisierung der Geometrie zur automatisierten Modell- Erstellung	32
3.2.4 Materialgesetz	33
3.2.5 Kontaktmodellierung	37
3.2.6 Auswertungen	38
4 Ergebnisse und Diskussion	39
4.1 Analyse Basisbalken	39
4.2 Variation der Balkenhöhe am Basisbalken	43
4.3 Variation des Faserwinkels am Basisbalken	47

INHALTSVERZEICHNIS

4.4	Verbesserung der Lasteinleitung	48
4.4.1	90° Zusatzlage	49
4.4.2	Aluminium Insert	52
4.5	Variation der Laminatdicke des Basisbalkens	53
4.6	Winkelabweichung durch Flechtprozess	54
4.7	Zielbalken	55
4.7.1	Schadensfortschritt Analyse	57
5	Zusammenfassung und Ausblick	62
	Anhang	63
	Literaturverzeichnis	64

1 Einleitung

Als Konstruktionsprinzip fand Leichtbau mit Beginn der Luft- und Raumfahrt hier ihren Anstoß. Damals wie heute wird das Ausschöpfen aller analytischen und technologischen Möglichkeiten mit äußerster Konsequenz gefordert, wo die Gewichtsminimierung bei einer geforderten Festigkeit eindeutig vor anderen Zielkriterien dominiert oder zur Projektrealisierung notwendig ist. So wurde auch die Technologie der Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) im Bereich der Luft- und Raumfahrt entwickelt. Ihnen liegt das Wirkprinzip der Verbundkonstruktion zugrunde: Verschiedene Werkstoffe werden derart kombiniert, dass sich Eigenschaften ergeben, die die Einzelkomponenten alleine nicht erzielen könnten [16]. Innerhalb des Verbundes tragen die Fasern die Lasten, während die Matrix die Aufgabe hat, die Fasern in vorgegebener Position zu fixieren und zu stützen. Die auf diesem Wege erzielbaren Eigenschaften wie spezifische Festigkeit, spezifische Steifigkeit, Dauerfestigkeit und Formbarkeit, um eine kleine Auswahl zu nennen, verleihen FKV ein enormes Potential, das in Abb.1.1 schematisch dargestellt wird.

Heute umfasst ihre Anwendung neben der Luft- und Raumfahrt eine große Anzahl kommerzieller Industriesparten wie z.B.: Straßen- und Schienenfahrzeug, Energietechnik, Architektur, Sportartikelindustrie, Robotik, Prothetik. Neue Materialien, Weiterentwicklungen bei den Herstellungsverfahren, neue Fertigungstechnologien und sinkende Preise beschleunigen diesen Trend.

Um das gesamte Potential dieser Technologie ausschöpfen zu können, bedarf es auch eines fundierten Wissens über FKV und Berechnungsmodelle, die eine verlässliche Aussage über die Materialauslastung ermöglichen. Die Entwicklung neuer Berechnungsmodelle und Weiterentwicklung bestehender Kriterien geht einher

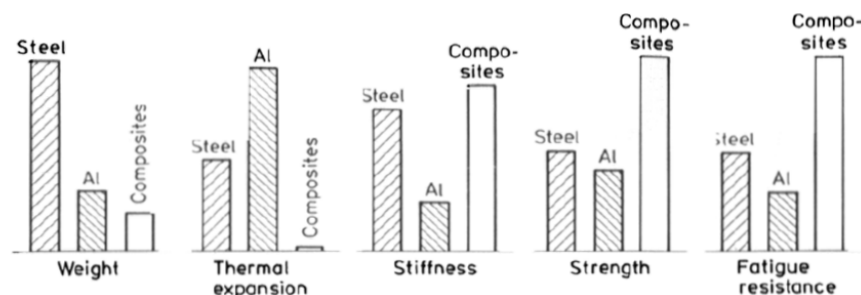


Abbildung 1.1: Schematischer Vergleich ausgewählter Materialeigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunde zu Stahl bzw. Aluminium [18]

mit dem Erforschen des Zusammenwirkens der FKV und dem Verständnis ablaufender Mechanismen. Das numerische Verfahren, die Finite-Elemente-Methode, stellt hier ein unverzichtbares Instrument dar. Desweiteren ist nicht nur die Genauigkeit sondern auch die Effizienz der Materialauslastungsmodelle von entscheidender Bedeutung. Es werden zwar die Rechenzeiten und die Rechenkapazitäten laufend verbessert, jedoch verschwindet dieser Fortschritt in der zunehmenden Komplexität/Detailliertheit und Größe der zu berechnenden Struktur.

Obwohl FKV aus Lagen mit kontinuierlichen, unidirektionalen (UD) Fasern exzellente spezifische Steifigkeits- und Festigkeitswerte in der Lagenebene besitzen, haben sie keine Verstärkung in Dickenrichtung und somit auch nur bescheidene mechanische Eigenschaften in dieser. Als Abhilfe können geflochtene oder gewobene FKV zum Einsatz kommen. Diese haben aufgrund ihrer gekrümmten Topologie der ineinander verflochtenen Fasern zwar geringere mechanische Eigenschaften in der Lagenebene, jedoch den großen Vorteil von besseren Eigenschaften in Dickenrichtung. Zusätzlich zeigt sich bei dieser Art des Faserarrangements auch, dass sie die Rissausbreitung hemmt. Neben diesen Verbesserungen bietet sie auch die Möglichkeit einer kosteneffizienten Herstellung durch einen hohen Grad der Automatisierung und auch Reproduzierbarkeit. Zur Bestimmung des mechanischen Verhaltens solcher FKV bedarf es eines hohen numerischen Aufwandes. Es wird unter Berücksichtigung von nichtlinearem Materialverhalten eine Homogenisierungsrechnung, basierend auf periodischen Einheitszellen, angewandt. Die dazu, in der Literatur, am häufigsten angewandte Modellierungsstrategie basiert auf Kontinuumselementen. Entsprechende Modelle haben jedoch den Nachteil, dass sie sehr ressourcenhungrig sind und daher ihr Einsatz im Zuge von nichtlinearen Simulationen, im ökologischen Sinne, eher zweifelhaft ist. [7] In der Praxis werden daher sehr oft mit sogenannten „Knock-Down“ Faktoren die mechanischen Eigenschaftswerte der UD-Schicht reduziert, um Gewebe oder Geflechte beschreiben zu können. Diese Vorgehensweise ist mit großen Unsicherheiten verbunden, was sich in den Sicherheitsfaktoren und somit der Materialauslastung widerspiegelt. Eine entwickelte Methodik für eine numerisch effiziente nichtlineare Simulation von Geflechtem kann in [7] und [17] nachgelesen werden.

2 Faser-Kunststoff-Verbunde

Das folgende Kapitel gibt eine kurze Übersicht von Verbundwerkstoffen und deren theoretische Grundlagen.

2.1 Klassifizierung von Verbundwerkstoffen

Aufgrund der breiten Anwendung von Verbundwerkstoffen würden detaillierte Ausführungen der Klassifizierungen jeglichen Rahmen sprengen und es werden nur jene Materialien genauer behandelt, die weiterführend für diese Arbeit relevant sind.

2.1.1 Matrixmaterialien

Wird eine Klassifizierung nach dem Matrixmaterial vorgenommen, unterscheidet man vier Hauptgruppen:

- Polymer Matrix Verbundwerkstoffe
- Metall Matrix Verbundwerkstoffe
- Keramik Matrix Verbundwerkstoffe
- Karbon Matrix Verbundwerkstoffe

Polymer Matrix Verbundwerkstoffe finden die breiteste Anwendung aller Arten. Neben dem Einsatzgebiet für Hochleistungs-Verbundwerkstoffe in der Luft- und Raumfahrt, werden sie auch für Massenfertigungsartikel mit geringer technologischer Bedeutung eingesetzt. Im Allgemeinen zeichnet diese Klasse, neben den hervorragenden mechanischen Eigenschaften, eine gute Widerstandsfähigkeit gegenüber Chemikalien und Korrosion und eine hohe Ermüdungsbeständigkeit aus. Eingeschränkt wird die Anwendung dieser Verbundwerkstoffe hauptsächlich durch die begrenzte thermische Belastbarkeit der Polymer Matrix. Die geringe Resistenz gegenüber Strahlung sowie die Aufnahme von Feuchtigkeit wirken sich negativ auf die Güte der mechanischen Eigenschaften aus.

Metall Matrix Verbundwerkstoffe gewinnen in der Luft- und Raumfahrt aber auch im konstruktiven Leichtbau und Maschinenbau, immer mehr an Bedeutung. Aufgrund der steifen Matrix haben sie hohe Faservolumenanteile bzw. werden hochsteife Fasern aber auch keramische Partikel eingesetzt. Als Matrixwerkstoff werden vorwiegend Leichtmetalle wie Aluminium, Aluminium-Lithium, Magnesium und Titan mit verschiedenen Legierungselementen verwendet. Metall Matrix Verbundwerkstoffe weisen ähnliche Vorteile wie verstärkte Kunststoffe auf. Darüber hinaus haben sie eine höhere Temperaturbeständigkeit, höhere Querfestigkeiten und höhere elektrische und thermische Leitfähigkeiten.

Keramik Matrix Verbundwerkstoffe: Die Zielsetzung bei der Entwicklung von faserverstärkten Keramiken unterscheidet sich deutlich von der für faserverstärkten Polymere und Metalle, wo die Verbesserung der Steifigkeit und Festigkeit sowie Temperaturbeständigkeit im Vordergrund steht. Keramiken hingegen weisen bereits in unverstärkter Form hohe Steifigkeiten und Temperaturbeständigkeit bei geringer Risszähigkeit – sprich Sprödigkeit auf. [4] Verantwortlich für die Sprödigkeit ist die fehlende Ausbildung einer plastischen Deformationszone. Ein auftretender Riss läuft ungehindert durch das gesamte Bauteil, was zu einem schlagartigen katastrophalen Versagen führt. Eingebettete Fasern übernehmen die Aufgabe durch verschiedene Versagensmechanismen, wie Grenzflächenversagen, Faserbruch sowie Faserauszug, Energie in hohem Maße zu absorbieren und vermindern so die Sprödigkeit und Thermoschockempfindlichkeit.

Karbon Matrix Verbundwerkstoffe besitzen eine Temperaturbeständigkeit, die weit über der anderer Matrixmaterialien liegt. Als Ausgangsmaterial werden Polymere mit einem hohen Kohlenstoffgehalt verwendet oder auch gasförmiger Kohlenstoff. Durch verschiedene Pyrolysetechniken kann in einem aufwendigen Prozess eine Matrix aus reinem Kohlenstoff hergestellt werden. Als Verstärkungsphase werden Carbonfasern auf Pech oder PAN- Basis verwendet. Die auf diesem Weg erzeugten Werkstoffe sind mechanisch und thermisch höchst belastbar, aber durch ihre aufwendige Herstellung auch sehr teuer. Der konventionelle Einsatz beschränkt sich auf wenige Anwendungen wie z.B.: Bremscheiben in der Luftfahrt und im Rennsport, Spezialanwendungen in der Energietechnik sowie im militärischen Bereich und der Raumfahrt.

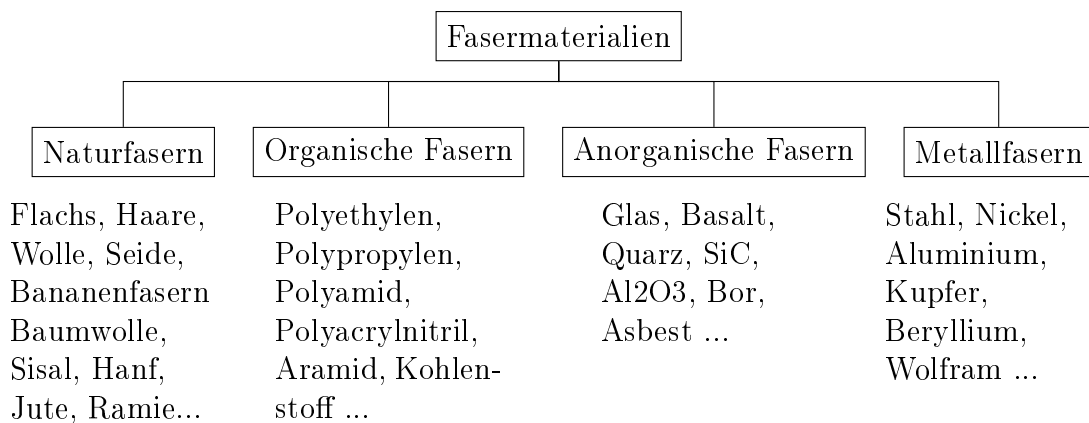
2.1.2 Materialien der Verstärkungsphase

Für die Verstärkungsphase steht im Leichtbau eine große Anzahl an Fasermaterialien zur Verfügung. Die Tab. 2.1 zeigt eine Gesamtübersicht der üblicherweise vorgenommenen Einteilung, wobei eine verbindliche Klassifizierung nicht existiert.

Naturfasern bestehen aus natürlichen Polymermolekülstrukturen und können aus pflanzlichen, tierischen sowie mineralischen Rohstoffen hergestellt werden[18]. Die Bemühungen, Naturfasern, insbesondere pflanzliche Fasern, für Verbundwerkstoffe als nachwachsenden Rohstoff nutzbar zu machen sind sehr zahlreich, da sie kostengünstig in einer großen Menge verfügbar sind.

Als vorteilhafte Eigenschaften können neben den geringen Herstellungskosten, resultierend durch einen geringen Energieaufwand, gute thermische und akustische Isolation, sowie eine geringe Dichte genannt werden. Weil die spezifischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte zu gering für Strukturelemente sind, kommen Naturfasern hauptsächlich für Verkleidungsteile zum Einsatz, z.B.: Innenverkleidungen von Pkw.

Tabelle 2.1: Klassifizierung nach Fasermaterialien [16]



Organische Fasern weisen einen hohen Orientierungsgrad der synthetisch hergestellten Molekülketten auf und besitzen ein stark anisotropes Materialverhalten in den Richtungen axial und transversal zur Faserorientierung. Die Temperaturbeständigkeit dieser Klasse ist sehr gering, wodurch ein Schmelzen oder Zersetzen der Faser erfolgen kann.

Synthetisch hergestellte **anorganische Fasern** haben vorwiegend eine amorphe Struktur. Sie zeichnet eine hohe Temperaturfestigkeit sowie sehr gute mechanische Eigenschaften im Allgemeinen aus. Zu ihnen zählen unter anderem die Basalt- und Borfaser sowie die Glasfaser.

Metallfasern sind wegen ihrer hohen Dichte im Leichtbau wenig verbreitet und kommen meistens nur für spezielle Anwendung zum Einsatz, z.B.: Kupfer- oder Aluminiumfasern zur elektrischen Abschirmung [16]. Zur Klassifizierung nach dem Fasermaterial sei abschließend erwähnt, dass einen nennenswerten Marktanteil bei hoch beanspruchten Faser-Kunststoff-Verbunden nur Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern erreicht haben.

2.1.3 Geometrie der Verstärkungsphase

Eine weitere Klassifizierung der Verstärkungsphase kann nach der Geometrie erfolgen:

- Partikelverstärkte Verbundwerkstoffe
- Kurzfaser- und Langfaserverstärkte Verbundwerkstoffe
- Endlosfaserverstärkte Verbundwerkstoffe

Partikelverstärkte Verbundwerkstoffe: Die Partikel, in unterschiedlicher Form und Größe, sind meist wahllos in der Matrix verteilt, wobei die Eigenschaften des Materials bei ausreichend großem Maßstab als quasihomogen und quasiisotrop angenommen werden können. Hauptsächlich wird die Partikelverstärkung in Kombination mit einer Metall Matrix zur Verbesserung der mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie des Verschleißwiderstandes angewandt. Dabei können die Partikel sowohl in die Matrix-Schmelze als auch pulvermetallurgisch

in Matrix-Pulver eingebracht werden. [6] Der Partikelanteil ist normalerweise zwischen 10 und 30 Vol.-%.

Kurzfaser- und Langfaserverstärkte Verbundwerkstoffe werden im Allgemeinen nach folgendem Längen/Durchmesser – Verhältnis der Faser definiert:

(0-10: Partikel)

10-100: Kurzfaser

100-10000: Langfaser

(10000- ∞ : Endlosfaser)

Bei kurzfaser- und langfaserverstärkten Verbundwerkstoffen ist die Lastübernahme der Verstärkungsphase durch die Länge der Faser begrenzt und außerdem von deren Orientierung zur aufgetragenen Last abhängig. [18] Wird zum Beispiel ein Bauteil durch Spritzgießen hergestellt, so richtet sich die Faserorientierung nach den Strömungsverhältnissen in der Form. Andererseits kann mittels Faserspritzverfahren, mit wahllos verteilten Fasern, ein quasiisotropes Materialverhalten in der Schichtebene erzeugt werden. Generell genügen dieser Klasse der Verbundwerkstoffe nur niedrige bis mittlere mechanische Anforderungen und werden daher für Verkleidungskomponenten oder dergleichen eingesetzt.

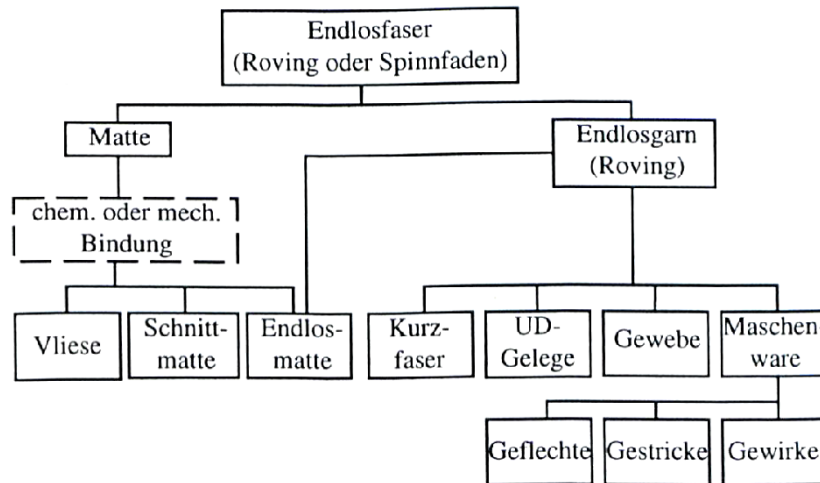
Endlosfaserverstärkte Verbundwerkstoffe werden durch kontinuierliche Fasern verstärkt. Üblicherweise werden Bauteile durch Stapel einzelner Lagen aufgebaut. Um die Handhabung der Fasern dabei zu erleichtern müssen die Fasern pro Lamineinzelschicht geometrisch geordnet in UD-Gelegen, Geweben und Maschenwaren oder regellos in Vliese oder Matten angeordnet sein. Die Abb. 2.1 zeigt eine Übersicht über trockene flächenförmige Fasergebilde als Verstärkungskomponente der Lamineinzelschicht.

Aufgrund der geometrischen Ordnung der Fasern erreichen Gewebe, Geflechte und vor allem UD- Gelege hohe Faservolumenanteile und kommen bei hohen mechanischen Anforderungen zum Einsatz.

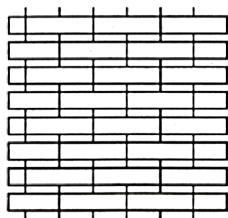
Abschließend zu der Klassifizierung der Matrixmaterialien und der Verstärkungsphase zeigt Tab. 2.2 typische Faser-Matrix Kombinationen im Leichtbau.

Tabelle 2.2: Typische Faser-Matrix-Kombinationen im Leichtbau [18]

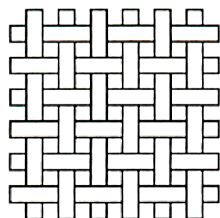
Composites	Fasern	Matrix
PMC Polymer-Matrix Composites	Glasfasern: E-Glas, S-Glas Carbonfasern: Carbon, Graphit Aramidfasern (Kevlar) Polyethylenfasern, Basaltfasern, Borfasern Naturfasern: Hanf, Jute, Flachs, Sisal...	Duromere: Epoxidharz, Phenolharz, Polyimidharz Polyesterharz, Vinylesterharz, ... Thermoplaste: PEEK, Polypropylen, ...
MMC Metall-Matrix Composites	Borfasern Carbonfasern: Carbon, Graphit Keramikfasern: Siliziumcarbidfasern Aluminiumoxidfasern	Aluminium Magnesium Titan Kupfer
CMC Ceramic-Matrix Composites	Keramikfasern Siliziumcarbidfasern Siliziumnitridfasern Aluminiumoxidfasern	Glaskeramik Siliziumcarbid Siliziumnitrid Aluminiumoxid
CCC Carbon-Carbon Composites	Carbon	Carbon



(a) Klassifizierung nach dem Fasergebilde



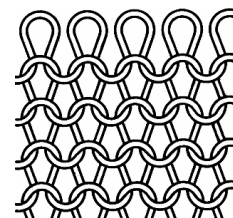
(b) Gelege



(c) Gewebe



(d) Geflecht



(e) Gestrick

Abbildung 2.1: (a): Übersicht über die Einteilung der Verstärkungsphase [5]. (b) bis (e): Detailansicht verschiedener flächenförmiger Fasergebilde [5], [16]

2.2 Betrachtungsweisen- Längen Skalen

Ein Strukturbauteil aus FKV besteht aus mehreren Lamineinzelschichten/Lagen die wiederum eine Kombination aus Faser und Matrix sind. Dementsprechend gilt diese Differenzierung in verschiedene Längenskalen auch für die Modellbildung. Man unterscheidet:

- Makroskala: Längenskala auf Bauteilebene Abb.2.2 (a)
- Mesoskala 1: Beschreibung des Laminates
- Mesoskala 2: Beschreibung der einzelnen Lagen Abb.2.2 (b)

-
- Mikroskale: Größenordnung von Faserdurchmesser, Faserabstand; Faserarrangement ist deutlich zu erkennen. Abb.2.2 (c)

Die Bauteileigenschaften des Verbundwerkstoffes hängen von dem Verhalten der Bestandteile auf Mikro-Ebene und deren Interfaces ab. Für die Untersuchung des Zusammenwirkens von Faser/Matrix, mikroskopische Spannungsfelder, Verzerrungsfelder und Versagensmechanismen werden mikromechanische Berechnungsverfahren eingesetzt. Aufgrund der Komplexität der Interaktionen können oft nur qualitative Aussagen über die globalen Struktureigenschaften gemacht werden. Desweiteren wäre eine Bauteilmodellierung auf mikromechanischer Basis für eine Strukturanalyse speziell im nichtlinearen Fall numerisch sehr aufwendig.

Bei der Modellbildung auf Meso-Ebene wird die Laminat einzelschicht als homogen und anisotrop betrachtet. Mit mikromechanischen Modellen wie „Rules of Mixture“ oder Methoden aus der Gruppe „Mean Field Approaches“ sowie „Periodic Microfield Approaches“ können näherungsweise die verschmierten Materialkennwerte der Einzelschicht berechnet werden. Die genauere Möglichkeit zum Erlagen der Materialkennwerte der Einzelschicht besteht aber in Materialtests. Mit den Materialkennwerten der Einzelschicht kann auf das globale Strukturverhalten auf Makro-Ebene geschlossen werden ohne auf mikroskopische Spannungsfelder und Verzerrungsfelder im Detail einzugehen.

Umgekehrt kann unter Bekanntheit der Beanspruchung und der Randbedingungen der Struktur der Verzerrungszustand und Spannungszustand in jeder Einzelschicht bestimmt werden. [15], [10]

2.3 Koordinatensysteme

Für die Beschreibung eines Laminates mit dessen Winkeln im Lagenaufbau sowie der Materialkennwerte in der Einzelschicht werden zwei Koordinatensysteme (KS) benötigt.

- Lokales Koordinatensystem: Im Falle einer UD-Schicht wird das lokale Koordinatensystem (1,2,3) oder (l,q,t) unter Ausnutzung des orthotropen Ma-



Abbildung 2.2: (a): Zeigt als Makro- Struktur das Chassis des BMW-i8 [1]. (b): Gewebehalbzeug. (c): Auf Mikro- Ebene sind die einzelnen Bestandteile des Verbundes deutlich zu erkennen [2].

terialverhaltens der Einzelschicht mit (1 oder l) in Faserrichtung und (2 oder q) in der Schichtebene quer zur Faserrichtung definiert, Abb. 2.3(a). Die Materialkennwerte der Einzelschicht werden in diesem lokalen KS angegeben.

- Globales Koordinatensystem: Dient zur Festlegung der Winkel der Einzelschichten, Abb.2.3(b). Dabei wird eine Verdrehung des lokalen KS im Bezug auf das globale KS durch die Drehrichtung um die z - Achse definiert. Siehe Abb. 2.4

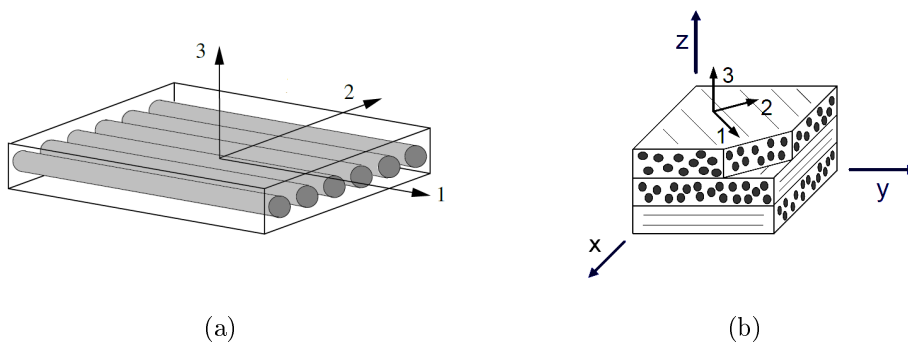


Abbildung 2.3: (a): Lokales KS der Laminateneinzelschicht- ausgerichtet in Faserrichtung [18]. (b): Globales KS [15]

2.4 Elastisches Materialverhalten der UD- Laminat einzelschicht

Im weiteren Verlauf, wenn nicht explizit anderes erwähnt wird, beziehen sich die folgenden Formulierungen auf Laminat, die aus einzelnen UD- Schichten aufgebaut sind, unter der Annahme des Ebenen Spannungszustandes (ESZ). Diese Annahme kann Aufgrund der dünnen Schichtdicke getroffen werden. Desweiteren wird eine perfekte Bindung zwischen Faser und Matrix sowie ein fehlerfreies Material und deren linear elastisches Materialverhalten zugrundegelegt. Somit kann das linear elastische Materialverhalten der Einzelschicht im isothermen Fall durch das Hook'sche Gesetz beschrieben werden. Es werden die verschmierten Schichtspannungen

$${}^i \underline{\sigma}_L = {}^i \underline{\underline{E}}_L {}^i \underline{\varepsilon}_L \quad \text{mit} \quad {}^i \underline{\varepsilon}_L^T = {}^i (\varepsilon_{ll}, \varepsilon_{qq}, \gamma_{lq}) \quad (2.1)$$

mit der Steifigkeitsmatrix und dem Verzerrungsvektor der Einzelschicht berechnet. Der Index i bezeichnet die Schichtnummer und L steht für die Formulierung im lokalen Koordinatensystem. ε_{ll} , ε_{qq} und γ_{lq} stellen die Komponenten des Verzerrungsvektors dar.

Die Abb. 2.4 zeigt das lokale Koordinatensystem der Einzelschicht sowie das globale Referenz-Koordinatensystem. Die „Out of Plane“ Achse der beiden Systeme ist übereinstimmend und die Schichtwinkellage wird durch α beschrieben.

Wird für den ebenen Spannungszustand als Bezugssystem das System der Orto-

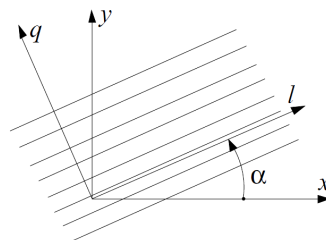


Abbildung 2.4: Definition des lokalen KS zum globalen KS über den Winkel α . [13]

tropieachsen gewählt, ist die Steifigkeitsmatrix der Einzelschicht

$${}^i \underline{\underline{\mathbf{E}}}_L = {}^i \left\{ \begin{array}{ccc} \frac{E_l}{1-\nu_{lq}\nu_{ql}} & \frac{\nu_{ql}E_l}{1-\nu_{lq}\nu_{ql}} & 0 \\ \frac{\nu_{lq}E_q}{1-\nu_{lq}\nu_{ql}} & \frac{\nu_{ql}E_l}{1-\nu_{lq}\nu_{ql}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{lq} \end{array} \right\} \quad \text{mit} \quad \nu_{lq} E_q = \nu_{ql} E_l \quad (2.2)$$

definiert. E_l beschreibt die verschmierte Schichtsteifigkeit der Einzellage in Faserrichtung und E_q quer dazu. G_{lq} stellt den Schubmodul in der lq -Ebene und ν_{lq} bzw. ν_{ql} die Querkontraktionszahlen dar.

Die orthotropen Materialkennwerte können entweder aus Versuchen an einem Laminate bestehend aus vier Einzelschichten ermittelt ($[0]_4$ bzw. $[90]_4$) oder, wie zuvor bereits erwähnt, über mikromechanische Methoden aus den Eigenschaften der einzelnen Komponenten berechnet werden.

Für die Angabe der lokalen Schichtspannungen bzw. -verzerrungen in dem einheitlichen globalen Koordinatensystem muss eine Transformation vorgenommen werden.

Das Werkstoffgesetz der Einzelschicht im globalen Koordinatensystem lautet somit:

$${}^i \underline{\underline{\boldsymbol{\sigma}}} = {}^i \underline{\underline{\mathbf{E}}}_L {}^i \underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}} \quad \text{mit} \quad {}^i \underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}^T = {}^i (\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}) \quad (2.3)$$

Die Steifigkeitsmatrix im globalen System errechnet sich zu:

$${}^i \underline{\underline{\mathbf{E}}} = ({}^i \underline{\underline{\mathbf{T}}}^{-1}) {}^i \underline{\underline{\mathbf{E}}}_L ({}^i \underline{\underline{\mathbf{T}}}^{-1})^T \quad (2.4)$$

mit der Transformationsmatrix:

$${}^i \underline{\underline{\mathbf{T}}} = {}^i \left\{ \begin{array}{ccc} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -sc & sc & (c^2 - s^2) \end{array} \right\} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} s := \sin {}^i \alpha \\ c := \cos {}^i \alpha \end{array} \quad (2.5)$$

2.5 Laminattheorie

In den meisten Fällen sind Faser-Kunststoff-Verbund Bauteile aus vielen dünnen Einzelschichten aufgebaut, die die Charakteristik einer Schale besitzen. Um das Verhalten solch eines Mehrschicht-Verbunds (MSV) zu beschreiben, kann die Klassische Laminattheorie verwendet werden [15]. Ziel ist es

- einen MSV mechanisch zu definieren und
- eine Verzerrungs- und Spannungsanalyse an der Einzelschichten durchführen zu können [15]

Aus den Materialgesetzen der einzelnen Schichten wird somit das elastische Verhalten des MSV gebildet. Auf Basis des MSV- Elastizitätsgesetzes lassen sich dann die Verzerrungen und Spannungen in den Einzelschichten bestimmen.

In weitere Folge werden diese einem Versagenskriterium gegenübergestellt. Ein Versagenskriterium ist eine Festigkeits- Hypothese die eine Beurteilung der Belastung der Einzelschicht erlaubt.

Annahmen

Zu den bereits zuvor für die Einzelschicht getroffenen Annahmen werden im Folgenden für die vereinfachte Berechnung von Mehrschicht-Verbund-Schalen zusätzliche Annahmen getroffen:

- Gültigkeit der Kirchhoff Hypothese (Querschnitte bleiben bei Verformung normal zur Schalenbezugsfläche)
- Konstanter Spannungszustand über die Einzelschichtdicke
- Ideal verbundene Schichten (Es treten keine Relativverschiebungen auf)
- Schichtdicken sind konstant und parallel zur Mittelebene
- Konstante Faserwinkel in den einzelnen Schichten

Die Gültigkeit der Theorie wird auf ungestörte Bauteilbereiche eingeschränkt. An den Rändern treten durch unterschiedliche Querkontraktionszahlen der einzelnen Schichten sogenannte Interlaminare Spannungen auf, die von der Laminattheorie

nicht erfasst werden können.

Globales Materialgesetz der Verbundschale

Das Schichtverbundmaterialgesetz ist die zentrale Gleichung der Laminattheorie, Gl. (2.7). Sie verknüpft die Schnittgrößen mit den globalen Verzerrungen und Krümmungsänderungen. In Abb. 2.5 ist ein Ausschnitt einer Schale dargestellt mit den relevanten geometrischen Bezeichnungen.

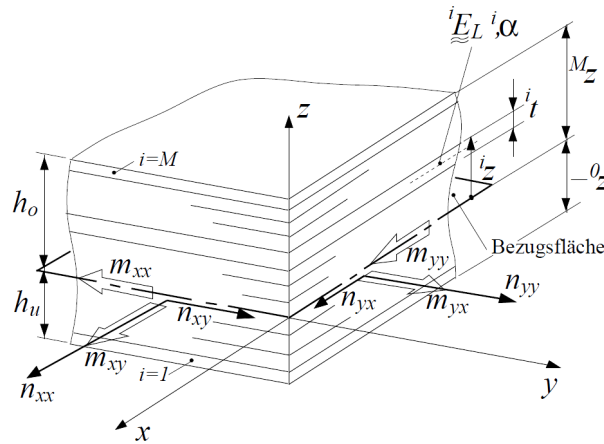


Abbildung 2.5: Schalenelement; Die Schnittkräfte pro Längeneinheit und Schnittmomente pro Längeneinheit wirken in der Schalenbezugsfläche [13]

Durch Addition der konstant angenommenen Schichtspannungen ${}^i\sigma$ in den einzelnen Lagen multipliziert mit deren Schichtdicken t und Abstand z zur Bezugsfläche können die Schnittkräfte \mathbf{n} bzw. Schnittmomente \mathbf{m} je Längeneinheit bestimmt werden.

$$\mathbf{n} = \sum_{i=1}^M {}^i\sigma ({}^iz - {}^{i-1}z) \quad , \quad \mathbf{m} = - \sum_{i=1}^M {}^i\sigma \frac{{}^iz^2 - {}^{i-1}z^2}{2} \quad (2.6)$$

$$\text{mit } \mathbf{n}^T = (n_{xx}, n_{yy}, n_{xy}) \quad , \quad \mathbf{m}^T = (m_{xx}, m_{yy}, m_{xy})$$

Zusammengefasst und unter Verwendung der Formel des globalen Materialgesetzes der Einzelschicht Gl. (2.4) für die Schichtspannungen heißt das Schichtver-

bundmaterialgesetz für den isothermen Fall:

$$\begin{pmatrix} \underline{n} \\ \underline{m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{\underline{A}} & \underline{\underline{B}} \\ \underline{\underline{B}} & \underline{\underline{D}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{\underline{\bar{\epsilon}}} \\ \underline{\underline{\bar{\varphi}'}} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Dabei werden die Matrizen $\underline{\underline{A}}$, $\underline{\underline{B}}$ und $\underline{\underline{D}}$ als Dehnsteifigkeits-, Koppelsteifigkeits- und Biegesteifigkeitsmatrix bezeichnet. In ihnen ist die Information des Lagenaufbaus, der Schichtdicke sowie der Schichtsteifigkeit. $\underline{\underline{\bar{\epsilon}}}$ und $\underline{\underline{\bar{\varphi}'}}$ stellen die globalen Membranverzerrungen sowie die Krümmungsänderungen der Bezugsfläche dar. Für eine ausführliche Herleitung und die Bildung der Steifigkeitsmatrix des Schichtverbundmaterialgesetzes verweise ich auf die Literatur [13], [15] oder [18].

Aus den globalen Verzerrungen und Krümmungsänderungen können die Schichtverzerrungen berechnet werden. Diese, transformiert ins lokale Koordinatensystem und unter Verwendung des lokalen Materialgesetzes, Gl. (2.1), ergeben die verschmierten Schichtspannungen. Mit Hilfe der kritischen Materialkennwerte kann für jede Einzelschicht eine Festigkeitsanalyse durchgeführt werden.

2.6 Versagensmechanismen

Die Basis einer Festigkeitsanalyse bilden die Festigkeitswerte [15]. Mit mikromechanischen Modellen können diese näherungsweise berechnet werden, sie sind aber in den meisten Fällen zu unverlässlich und dienen meistens der Abschätzung. Eine Vielzahl an Faktoren beeinflussen maßgeblich die Güte der Festigkeit in realen Verbunden, die in den seltensten Fällen bekannt sind, wie z.B.: Lufteinschlüsse, Fremdkörper, Unterschiede bei Faser Matrix Haftung bis hin zu mikroskopische Risse. Eine experimentelle Ermittlung der Festigkeitswerte ist daher unumgänglich.

Durch Tests an der UD-Einzelschicht können ihre Festigkeitsparameter, bestimmt werden.

Unterschied Spannungen und Beanspruchungen

Es wird zwischen Spannungen und Beanspruchungen unterschieden. Wegen der transversalen Isotropie der UD-Schicht stellen bestimmte Spannungskomponen-

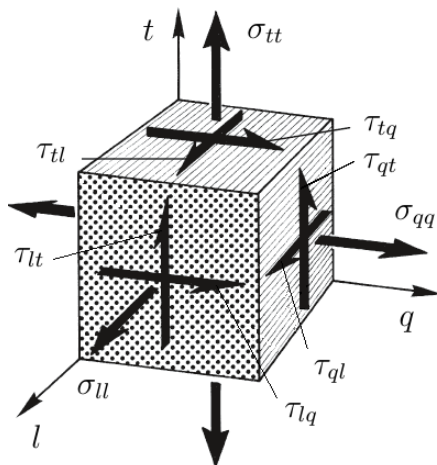


Abbildung 2.6: Räumlicher Spannungszustand eines UD-Elementes; angepasst von [16]

ten die gleiche Beanspruchung für das UD-Element dar, siehe Abb. 2.6. Beanspruchungen werden physikalisch indiziert. [15]

- i Die Schicht-Normalspannungen σ_{qq} und σ_{tt} entsprechen einer Beanspruchung quer zur Faserrichtung und sind in ihrer Wirkung gleichwertig.
- ii Die Schicht-Schubspannungen τ_{tl} und τ_{ql} stellen beide die gleiche Beanspruchungen dar auf des UD-Element dar.

Somit sind für die Bestimmung der Festigkeiten folgende Basis-Beanspruchungen hinreichend. Wobei es bei den Normal-Beanspruchungen zwischen Zug und Druck zu unterscheiden gilt, da sie andere Versagensformen hervorrufen.

- Beanspruchung längs zur Faserrichtung: σ_{ll}^+ , σ_{ll}^-
- Beanspruchung quer zur Faserrichtung: σ_{qq}^+ , σ_{qq}^-
- Schubbeanspruchung in der lq-Ebene: τ_{ql} bzw. τ_{lq}
- Schubbeanspruchung in der qt-Ebene: τ_{qt} bzw. τ_{tq}

Werden die Basis-Festigkeiten experimentell ermittelt so ergeben sich diese durch die jeweilige Basis-Beanspruchung dargestellt in Tab.2.3.

Tabelle 2.3: Zuordnung der Basis-Festigkeiten zu ihren Basis-Beanspruchungen der UD-Schicht; angelehnt an[15]

	Basis-Beanspruchung		Basis-Festigkeit
Normalbeanspruchung	σ_{ll}^+	→	X_T
"	σ_{ll}^-	→	X_C
"	σ_{qq}^+	→	Y_T
"	σ_{qq}^-	→	Y_C
Schubbeanspruchung	τ_{lq}	→	S_L
"	τ_{qt}	→	S_T

Versagensarten

Die Unterscheidung der Versagensart wird nicht nur in Bezug auf eine Materialtrennung verstanden, sondern fasst auch ein funktionales Versagen mit ein. Gerade Faser-Kunststoff-Verbunde sind typischerweise dünnwandige, schalenartige Strukturen, die zu Instabilitäten, wie z.B.: Beulen, oder zu großen Deformationen neigen, obwohl durch die Belastung noch keine Schädigung im Material auftritt. Dieses globale Versagen soll jedoch hier nicht weiter behandelt werden.

- **Globales Versagen**

- Deformationsüberschreitungen
- Instabilitäten

- **Internes Materialversagen**

- Faserbruch
 - Zwischenfaserbruch
 - Debonding
 - Delamination
- } **Ply Failure**

2.6.1 Internes Materialversagen

Die Gliederung des Materialversagen durch Brüche im Inneren des Materials ist an [15] angelehnt. Es erfolgt zuerst eine Unterteilung nach den Komponenten, die dominierend versagen und weiter wird nach der Beanspruchung unterschieden, Zug, Druck oder Schub.

Aufgrund der gänzlich unterschiedlichen Charaktere der beiden Verbundstoffpartner, muss zwischen zwei grundsätzlichen Versagensarten differenziert werden: Faserbruch und Zwischenfaserbruch.

Faserbruch wird praktisch ausschließlich durch faserparallele Beanspruchungen erzeugt. Der zugehörige Riss trennt die Fasern quer zu ihrer Längserstreckung.

Zwischenfaserbruch erstreckt sich zwischen den Fasern, entweder durch die Matrix und/oder in der Grenzfläche Faser-Matrix. Der Riss verläuft parallel zur Faserlängserstreckung und durchtrennt die betreffenden UD-Schichten meist vollständig [15].

2.6.1.1 Faserbruch

Das Zerreißen oder Brechen von Fasern wird als Faserbruch bezeichnet [16]. Da diese Versagensart bei sehr hohen Beanspruchungen auftritt, ist meistens keine Spannungsumlagerung im Laminat möglich und führt zu einem Steifigkeitsabfall. Faserbruch tritt bei Längs Zug- oder Druckbeanspruchung auf. (σ_u^+ oder σ_u^-)

Faserbruch infolge Zugbeanspruchung in Faserrichtung σ_u^+

Bei einer zügig bis zum Bruch gesteigerten Zugbelastung werden die Fasern zerrissen, d.h. ihre Kohäsivfestigkeit wird überschritten. Ab etwa 50% der Bruchlast reißen erste Filamente, später dann ganze Faserbündel. FKV versagen also nicht vollständig spröde, sondern – insbesondere wenn Spannungsgradienten vorliegen – quasi-„duktil“ [16].

Faserbruch durch Zugbelastung in Faserrichtung ist gut erkennbar. Einerseits durch eine Steifigkeitsabnahme auftretender erster Teilbrüche, und Andererseits

setzen die unter hoher Spannung zerreisenden Fasern eine Bruchenergie frei, die akustisch deutlich wahrnehmbar ist. Der Faser Matrix Verbund wird in diesen Bereichen merklich zerstört.

Unter der Voraussetzung, dass die Bruchdehnung der Faser wesentlich geringer ist als jene der Matrix, können zwei Modi unterschieden werden.

- i Der Faservolumengehalt ist hinreichend groß ($\xi > \xi_{min}$). Die Zugfestigkeit, unter Annahme des perfekten Verbundes, ist abhängig vom Volumenanteil der Komponenten und kann wie folgt berechnet werden. Tritt Versagen der Fasern auf, ist die Matrix nicht in der Lage die Belastung zu übernehmen.

$$X_T = \sigma_u^{(f)}\xi + (\sigma_l^{(m)})_{\varepsilon_u^{(f)}}(1 - \xi) \quad \text{für} \quad \xi > \xi_{min} \quad (2.8)$$

$\varepsilon_u^{(f)}$ und $\varepsilon_u^{(m)}$ kennzeichnen jene Dehnung, bei der Versagen der Faser bzw. der Matrix auftritt und die tief bzw. hoch gestellten Indizes bedeuten: u ...ultimate, (m) ...Matrix und (f) ...Faser; Somit ist $(\sigma_l^{(m)})_{\varepsilon_u^{(f)}}$ die Spannungskomponente der Matrix in Faserrichtung bei maximal, ertragbarer Dehnung der Faser.

- ii Der Faservolumenanteil ist sehr klein ($\xi < \xi_{min}$). Aufgrund der größeren Bruchdehnung der Matrix kann diese den Faserbruch, der bei einer sehr geringen Dehnung erfolgt, standhalten und die Belastung kann bis zum Erreichen der maximal ertragbaren Spannung der Matrix weiter gesteigert werden.

$$X_T = \sigma_u^{(m)}(1 - \xi) \quad \text{für} \quad \xi < \xi_{min} \quad (2.9)$$

In diesem Fall ist die Festigkeit des Verbundes rein von dem Matrixwerkstoff und dessen Volumenanteil abhängig.

Allgemein ist eine Steigerung der Zugfestigkeit bei Längsbelastung mit einer Erhöhung des Faservolumenanteils leicht erreichbar. Linear abhängig vom Faseranteil steigert sich die Festigkeit des Verbundes, die hauptsächlich von der Faserfestigkeit abhängig ist.

Wie in der Abb. 2.7 zu erkennen ist, findet bei ξ_{min} der Mode-Wechsel statt. Der minimale Faservolumengehalt, ab dem eine Steigerung der Festigkeit erreicht

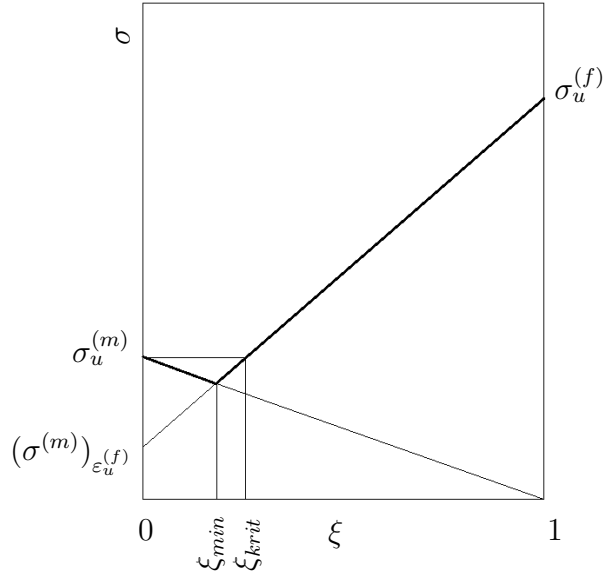


Abbildung 2.7: Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Faservolumenanteils in Faserrichtung

wird, hängt von den Bruchspannungen der Komponenten ab. Je fester die Matrix ist, ein desto höherer Volumenanteil der Faser ist notwendig. Dies ist jedoch nur bei hochfesten Matrices wie z.B.: Metallen und Keramiken von Bedeutung. Bei FKV ist ξ_{min} nur wenige Prozent und Mode i ist meistens vorherrschend. Setzt man Mode i und Mode ii gleich erhält man ξ_{min} zu:

$$\xi_{min} = \frac{\sigma_u^{(m)} - (\sigma_l^{(m)})_{\varepsilon_u^{(f)}}}{\sigma_u^{(f)} + \sigma_u^{(m)} - (\sigma_l^{(m)})_{\varepsilon_u^{(f)}}} \quad (2.10)$$

Der Faservolumengehalt, ab dem eine Steigerung über die Matrixfestigkeit hinaus erreicht wird, ist mit ξ_{krit} gekennzeichnet.

$$\xi_{krit} = \frac{\sigma_u^{(m)} - (\sigma_l^{(m)})_{\varepsilon_u^{(f)}}}{\sigma_u^{(f)} - (\sigma_l^{(m)})_{\varepsilon_u^{(f)}}} \quad (2.11)$$

Faserbruch infolge Druckbeanspruchung in Faserrichtung σ_{ll}^-

Werden FKV, aufgebaut aus UD-Lagen, auf Druck in Faserrichtung beansprucht, verhalten sie sich wie Säulen, die in einer elastischen Matrix eingebettet sind. Lo-

kale Imperfektionen in der Faserausrichtung oder Abweichungen zur Parallelität der Filamente sind Ausgangspunkt für auftretendes Faserknicken. [18], [16]

Man unterscheidet zwei Formen, wie benachbarte Fasern der UD-Schicht knicken können:

- i Extensional Mode : Dieser Mode tritt nur bei einem sehr geringen Faservolumenanteil auf. Durch den großen Abstand zwischen den Fasern beulen sie unabhängig voneinander. Die dazwischen liegende Matrix wird hauptsächlich gedehnt. Der geringe Faservolumenanteil macht jedoch diesen Fall für die praktische Anwendung irrelevant.
- ii Shear Mode : Benachbarte Fasern beeinflussen sich gegenseitig und beulen in Phase (parallel). Es tritt jedoch nicht das bekannte Biegeknicken (Eulerknicken) auf, sondern das von zu wenig Schubsteifigkeit herrührende Schubknicken. Es bilden sich Knickbänder aus, wie in Abb. 2.8 (b) abgebildet ist. Dieses Eintreten wird mit der Festigkeit X_C festgesetzt. [16]

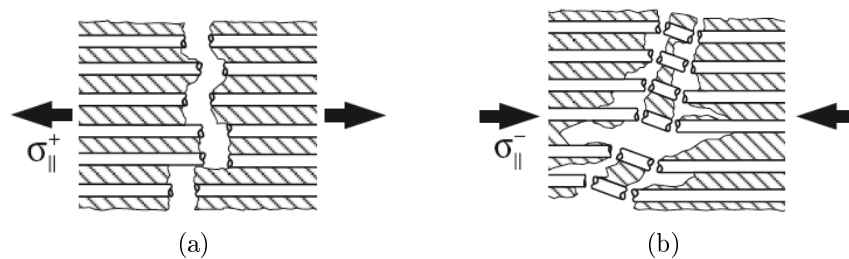


Abbildung 2.8: (a): Faserbruch infolge Zugbeanspruchung in Faserrichtung. (b): Faserbruch infolge Druckbeanspruchung mit Ausbildung des charakteristischen Knickbands des Shear Mode [16]

Allgemein sei angemerkt, dass das Überschreiten der Druckfestigkeit in Längsrichtung ein sehr seltener Versagensfall ist. FKV sind hauptsächlich Schalenstrukturen die bei Druckbelastung zu globalem Versagen tendieren. Relevant ist der Shear Mode für druckbelastete dickwandige Querschnitte, obwohl auch hier meistens zuvor Zwischenfaserbruch zu erwarten ist.

2.6.1.2 Zwischenfaserbruch

Zwischenfaserbrüche treten meist parallel zu den Fasern auf. Sie verlaufen teils als Adhäsivbrüche in der Faser-Matrix-Grenzfläche (Interface), teils als Kohäsivbrüche in der Matrix. Eine eindeutige Unterscheidung ist meist nicht möglich. Die Risse mäandern zwischen den beiden Ausprägungen. Daher werden sie zusammenfassend als Zwischenfaserbrüche (Zfb) bezeichnet. [16]

Zwischenfaserbrüche treten in der Regel weit früher auf als Faserbrüche. Mikro-mechanische Betrachtungen zeigen, dass in der Matrix Spannungskonzentrationen auftreten, die Ausgangspunkt von Zfb sind.

Das Auftreten von ersten Zfb führt nicht zum sofortigen katastrophalen Versagen eines Laminates. Dies tritt meist erst auf, wenn über große Bereiche Fasern brechen. Trotzdem bringen sie erhebliche Nachteile mit sich:

- Gefahr von Schichtentrennung bei Druckbeanspruchung
- Zfb haben eine Kerbwirkung auf benachbarte Fasern, was die Langzeitfestigkeit erheblich vermindert.
- In Zfb kann vermehrt Feuchtigkeit eindringen, die in Kontakt mit den hochbelasteten Fasern kommt und die Festigkeit reduziert.

Im Allgemeinen wird ein Laminat so dimensioniert, dass Zwischenfaserbruch noch nicht eintritt.[16]

Matrix-Interfacebruch durch Druckbeanspruchung in Faserrichtung

σ_u^-

Wie bereits erwähnt, kann eine Druckbelastung in Faserrichtung nicht nur Faserbruch hervorrufen sondern auch Zwischenfaserbruch als Folge haben.

Aufgrund unterschiedlicher Querkontraktionszahlen von Faser und Matrix kann die globale Druckspannung im Laminat eine transversale Zugspannung in der Matrix ergeben, die sich um die Fasern konzentriert. Ein transversaler Matrixbruch oder ein Aufbrechen des Faser Matrix Interfaces kann resultieren.[14] In der Literatur wird diese Versagensart als ‘transverse tensile mode’ bezeichnet und wird gegebenenfalls durch die Basisfestigkeit X_C erfasst.

Versagen durch Zugbeanspruchung quer zur Faserrichtung σ_{qq}^+

Erfolgt die Beanspruchung quer zu den Fasern als Zug, treten durch den E-Modul Unterschied der Fasern gegenüber der Matrix Beeinflussungen im Deformationsverhalten der Matrix auf. So entstehen Spannungskonzentrationen im Matrixmaterial die Ausgangspunkt der Schädigung sind.

Faser Kunststoff Verbunde eine weisen deutlich niedrigere maximale transversale Dehnung auf als das unverstärkte Matrixmaterial und auch eine geringere Festigkeit in Quer- Richtung, aufgrund der Fasern. Das Versagen wird durch die Basisfestigkeit Y_T beschrieben. Diese gibt jedoch keinen Aufschluss über die Art des Versagens. So kann beispielweise Versagen aufgrund eines Risses durch das Matrixmaterial auftreten, Interface –Versagen beinhalten und, oder auch Faserspaltung vorkommen, wie in Abb. 2.9 zu sehen ist.

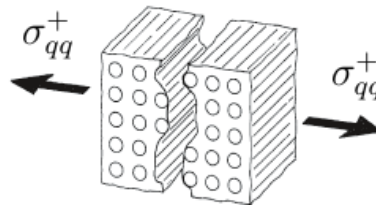


Abbildung 2.9: Zugbruch quer zur Faserrichtung; angepasst von [16]

Versagen durch Druckbeanspruchung quer zur Faserrichtung σ_{qq}^-

Quer- Druckbelastete UD- Strukturen versagen nicht in der Wirkebene der Belastung sondern unter einem bestimmten Winkel. Man muss somit die Wirkebene und die Bruchebene unterscheiden. Diese sind in Abb. 2.10 dargestellt.

Der Winkel, unter dem Versagen eintritt, ist nahe 45° . Die Druckbelastung erzeugt Schubspannungen, die unter 45° ihr Maximum erreichen und für die Ausbildung der Bruchebene ausschlaggebend sind. Es tritt somit ein Schubversagen und kein Druckversagen auf.

Kombinationen von Schubversagen der Matrix, Aufbrechen der Interface und Faserspaltung sind die auftretenden Versagensmodi in der Bruchebene.

Durch benachbarte Schichten im Laminat mit anderem Faserwinkel wird die Festigkeit durch ihre Stützwirkung zwar erhöht, jedoch ist das Quer-Druckversagen einer Schicht sehr kritisch. Die Ausbildung eines Keilbruches erzeugt Delamination in den beachbarten Schichten, was weiter die Druckfestigkeit reduziert und in einem katastrophalen Versagen enden kann. Allgemein gilt, dass die kritische Druckspannung in Querrichtung geringer ist als jene in Faserlängsrichtung.

Versagen durch Schubbeanspruchung in der lq -Ebene: τ_{ql} bzw. τ_{lq}

Ist eine Schubbeanspruchung in der lq -Ebene gegeben, so liegen, wie in Abb. 2.11 links ersichtlich ist, zwei gleichwertige Wirkebenen vor.

Tatsächlich bildet sich aber nur eine Bruchebene aus, jene, die parallel zur Faser orientiert ist. Diese Ebene hat die geringere Bruchfestigkeit der beiden. Würde die andere Wirkebene zur Bruchebene, so müssten dazu die hochfesten Fasern geschert werden.

Die Bruchebene kann durch verschiedene Versagensmodi charakterisiert werden. Ist ein starkes Interface vorhanden, in Kombination mit einer weichen Matrix, so tritt Schubversagen der Matrix auf. Wobei Schubversagen der Matrix typischerweise begleitet wird von Debonding. So wird ein Aufbrechen der Faser Matrix Verbindung bezeichnet. Ist ein weiches Interface vorhanden, so ist die 'In plane' Schubfestigkeit unabhängig von der Festigkeit der Matrix und der Faser. [16], [18]

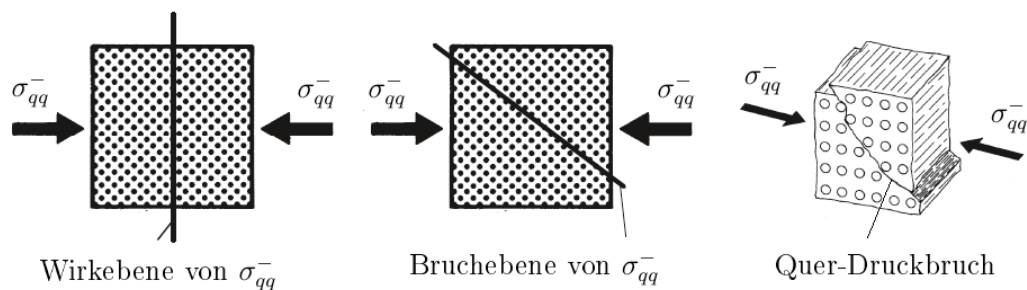


Abbildung 2.10: Links: Die Wirkebene ist normal zur Belastung ausgerichtet; Mitte: Die Bruchebene wird durch einen bestimmten Winkel zur Lastrichtung und der Faserrichtung aufgespannt; Rechts: Zeigt den Quer-Druckbruch oder auch aufgrund seiner Form auch Keilbruch genannt; angepasst von [16]

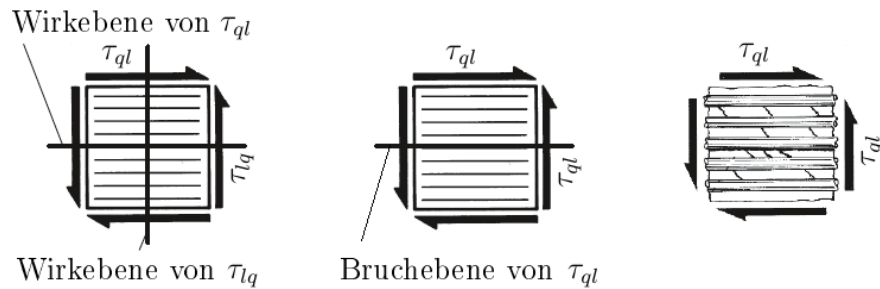


Abbildung 2.11: Links: Zeigt die Wirkebenen der Schubbeanspruchung; Mitte: Die Bruchebene ist parallel zur Schubspannung τ_{ql} ; Rechts: Es bilden sich kleine Risse in der Matrix unter ca. 45° , in der Wirkenbene der Hauptzugspannung, die an der Faseroberfläche gestoppt werden und weiter entlang der Faser verlaufen; angepasst von [16]

Versagen durch Schubbeanspruchung in der qt-Ebene: τ_{qt} bzw. τ_{tq}

Bei einer Schubbelastung in der qt-Ebene fallen die Wirkebenen nicht mit der einzig im Versuch auftretenden Bruchebene zusammen. Grund dafür ist, dass die Ausbildung des Bruches dort erfolgt, wo der geringste Bruchwiderstand auftritt. Dies ist unter 45° der Fall mit der zu der Schubspannung äquivalenten Zughauptspannung was in der nachfolgende Abb. 2.12 dargestellt ist. [16]

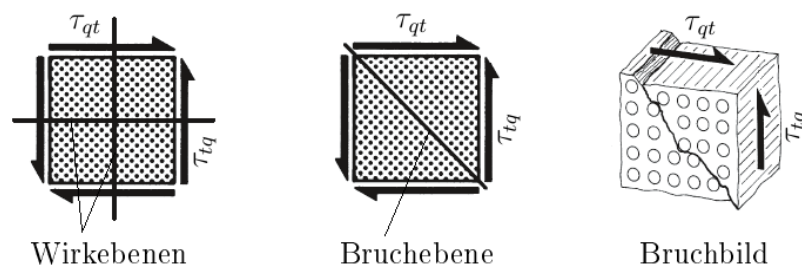


Abbildung 2.12: Links: Zeigt unmittelbar der Schubbeanspruchung zugeordnete Wirkebenen; Mitte: Im Versuch auftretende Bruchebene; Rechts: Reales Bruchbild infolge der unter 45° wirkenden Zug-Hauptspannung.; angepasst von [16]

2.6.1.3 Delamination

Bei schichtenweise aufgebauten Laminaten gibt es eine weitere Versagensart, den Trennungsbruch zwischen den Einzelschichten oder auch Delamination genannt. Sie wird durch interlaminare Spannungen hervorgerufen. Interlaminare Spannungen treten nicht direkt in einer Schicht auf sondern wirken zwischen ihnen, in der Grenzfläche. Diese können sowohl als Normalspannungen, die senkrecht zur Laminatenebene wirken, auch als Schubspannungen in der Schichtenebene auftreten.[16] Man kann Delamination auch unter Zwischenfaserbrüchen anführen, aber aufgrund ihrer anderen Versagensweise werden sie gesondert behandelt. Zwischenfaserbrüche verlaufen parallel zu den Fasern, während Delamination in einem Punkt startet und sich flächig zwischen den Schichten durch das Laminat ausbreitet. Es besteht meist kein Riss-stoppender Mechanismus, wodurch sich die Schichten-trennung abrupt ausdehnen kann. Delamination kann durch folgende Ursachen hervorgerufen werden: angelehnt an [16], [18]

- **Schlageinwirkung:** Es treten lokal begrenzt sehr hohe Belastungen auf. Während kleine Schlägeinwirkungen meist nur Zwischenfaserbrüche als Folge haben, die erst als Spätfolge zu Delamination führen, können größere Schlägeinwirkungen Zwischenfaserbrüche, Faserbrüche als auch Delamination als sofortige Auswirkung haben.
- **Strukturelle Unstetigkeiten:** Diskontinuitäten im Laminataufbau, wie es bei der Verringerung der Laminatdicke vorkommt, oder auch aufgeklebte Versteifungen sind durch ihre Steifigkeitssprünge gefährdete Bereiche. Bei Belastung können sie aufgrund des Querkraftschubes delaminieren. Aber auch Lufteinschlüsse oder Fremdkörper wie Schmutz haben ihre negativen Auswirkungen.
- **Feuchtigkeit und Temperatur:** Interlaminare Spannungen können durch das Abkühlen von der Aushärtetemperatur bei der Herstellung hervorgerufen werden, die Ausgangspunkt möglicher Delamination am freien Rand sein können. Ebenso wie die Aufnahme von Feuchtigkeit im Laminat.
- **Belastung, die zu Aufziehspannungen führt:** Als Aufziehspannungen bezeichnet man interlaminare Normalspannungen in Dickenrichtung σ_{tt} ,

die auf zwei benachbarte Einzelschichten entgegengesetzt wirken. Wird ein stark gekrümmtes Laminat entgegengesetzt ihrer Krümmung belastet, entstehen diese Aufziehspannungen, welche vermieden werden sollten.

- **Ermüdungsbeanspruchung:** Vorhandene Zwischenfaserbrüche wachsen bei mechanischem und oder thermischem Belastungsverlauf bis zur Grenzfläche der Schicht und erzeugen Mikrodelamination. Mit steigender Rissdichte entsteht so Delamination über weite Bereiche, die die Tragfähigkeit der Struktur stark beeinträchtigt.

Randdelamination

Freie Ränder von Laminaten sind spannungsfrei, wenn keine äußeren Kräfte od. Eigenspannungen wirken. Laminare sind typischerweise aus Einzelschichten aufgebaut, die in ihrer Winkellage variieren und unterschiedliches Kontraktionsverhalten in Längs- und Querrichtung aufweisen bzw. unterschiedliches Schubverhalten haben.

Wird ein Laminat belastet, beeinflussen sich die einzelnen Schichten gegenseitig in ihrem Verformungsverhalten und führen zu Schichtspannungen. Diese Schichtspannungen, die am freien Rand Null sein müssen, bauen sich über interlamina- ren Schub auf und wirken hauptsächlich in der Grenzschicht. Daraus resultieren desweiteren Spannungen, die normal auf die Schichtebene wirken und die Schichten zu trennen versuchen. Es herrscht somit an den Rändern ein dreiachsiger Spannungszustand, was auch die Gültigkeit der Laminattheorie im Randbereich einschränkt. Dieser Bereich ist jedoch relativ klein und kann ungefähr mit der Dicke des Laminates festgelegt werden.

Der Unterschied in der Querkontraktionszahl sowie im ebenen Schubverhalten benachbarter Schichten, Laminataufbau, Lagendicke, Belastung und Randbedingungen beeinflussen die Größe der interlamina- ren Spannungen im Randbereich maßgeblich.

3 Finite Elemente Modell

Die Aufgabenstellung ist, für einen 4 Punkt Biegeversuch einen geflochtenen Kohlefaser-Balken zu dimensionieren, der einen U-förmigen Querschnitt besitzt. In der Mitte ist zusätzlich ein kreisförmiger Ausschnitt an den Stegen. Es muss sichergestellt werden, dass der Balken bei der Testung bis zum Bruch, durch Schädigung im Bereich des Untersuchungspunktes versagt und keine Schädigung an den Lasteinleitungsstellen bzw. an den Lagerungen auftritt. Zusätzlich soll der Balken in seinen geometrischen Abmessungen so gestaltet werden, dass der kritische Versagensmode möglichst dominiert gegenüber den anderen.

Der Balken ist in seinen Grundabmessungen in Abb. 3.1 zu sehen, wo auch die Stelle (Untersuchungspunkt) gekennzeichnet ist, die für das Schädigungsverhalten von Interesse ist.

3.1 Lagerung und Lasteinleitung des Balkens im Experiment

Es wird versucht, die Belastungsaufbringung so schonend wie möglich zu gestalten, da dies im Vorfeld, in Bezug auf eine Schädigung im Einleitbereich, mögliche Probleme umgeht. So wird davon ausgegangen, dass eine Testung mit einer Presse erfolgt. Die Stempelkraft wird auf den linken und rechten Druckzylinder mit dem

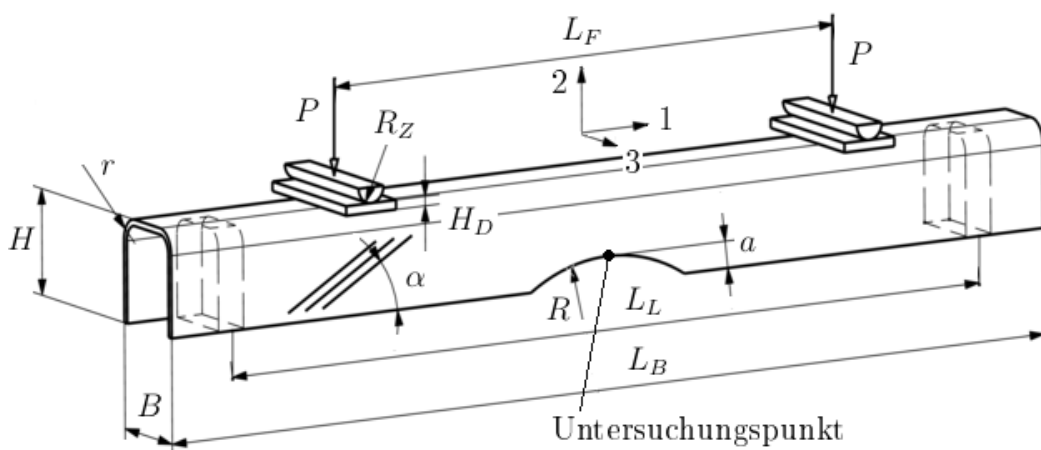


Abbildung 3.1: Abmessungen des Balkens

Tabelle 3.1: Modellparameter

Parameter	Basiswert	Parameter	Basiswert
L_B	700 mm	r	10 mm
L_L	600 mm	a	10 mm
L_F	400 mm	R_Z	10 mm
H	60 mm	H_D	5 mm
B	50 mm	z	8
R	150 mm	α	$\pm 30^\circ$

Radius R_z aufgeteilt. Der Druckzylinder besteht aus Stahl und ist zur leichteren Krafteinleitung der Presse auf einer Seite des Mantels abgeflacht. Die Mantelfläche des Zylinders drückt auf eine Zwischenplatte aus Aluminium und mit einer Breite $B=50\text{mm}$ sowie eine Dicke $H_D = 5\text{mm}$. Diese soll die Belastung auf einen größeren Bereich des Kohlefaserbalkens verteilen und somit eine harmonischere Einleitung gewährleisten.

Die Lagerung erfolgt mit einer Fest-Loslager Anordnung an den Aluminiuminsets, um ein vorzeitiges Beschädigen der Balkenstege zu vermeiden. Die Aluminiuminsets (strichliert dargestellt in Abb. 3.1) besitzen eine Dicke von 20mm und sind mit dem Balken verklebt.

3.2 Modellbildung

Die Geometrie, Lasteinleitung und Lagerung soll durch ein FEM-Modell, welches auch das angestrebte Verhalten aufweist, abgebildet werden. Damit passende Abmessungen des Balkens gefunden werden, müssen diese in einer Studie variiert und durch eine Simulation ausgewertet werden. Dazu ist es von Vorteil, wenn die Geometrieänderung in einer automatisierten Art und Weise vorgenommen werden kann. Das FEM-Modell gilt es so zu erstellen, dass eine Spannungsbewertung im Untersuchungspunkt vorgenommen werden kann, die durch die Lagerung und Lasteinleitung nicht verfälscht wird.

3.2.1 Balkenmodell

Aufgrund der dünnwandigen Struktur des Balkens werden voll integrierte, 4-Knotige-Schalenelemente mit geschichtetem Lagenaufbau angewandt. In der Dickenrichtung wird für die Verteilung der Spannungen, die in der Schalenebene wirken, die Simpson-Integration verwendet. Abb. 3.2 zeigt schematisch den geschichteten Lagenaufbau mit den Integrationspunkten je Lage. Mit Schalenelementen ist keine Auswertung von Spannungen, die in Dickenrichtung wirken, möglich und somit sind sie für Lasteinleitungsprobleme ungeeignet. Da jedoch die Lasteinleitungsstelle nicht im Detail von Interesse ist und der Spannungszustand des Untersuchungspunktes durch Schalenelemente ausreichend dargestellt werden kann, genügen sie. Der numerische kleine Aufwand für die Berechnung von Schalenelementen ist bei der Parameterstudie auch von Vorteil.

Die Abbildung einer Geflecht-Lage erfolgt durch zwei UD-Lagen mit je der halben Dicke, unter Berücksichtigung des Flechtwinkels. Somit ist stets ein antisymmetrischer Lagenaufbau vorhanden, der wie folgt aufgebaut ist:

$$[30,-30,30,-30,30,-30,30,-30]$$

Obwohl die modellierte Balkengeometrie zwei Symmetrieebenen besitzt, wird der Balken als Ganzes modelliert. Es wird erwartet, dass durch den antisymmetrischen Lagenaufbau kein symmetrisches Verformungsverhalten stattfindet. Eine Teilmodellierung des Balkens würde im Untersuchungspunkt Randbedingungen nach sich ziehen, die das Verformungsverhalten beeinflussen würden und somit den Spannungszustand in diesem Punkt verfälschen können.

3.2.2 Belastungsaufbringung und Lagerung

Im FEM-Modell wird der Druckzylinder als Analytical Rigide Surface modelliert und die Zwischenplatte aus Schalenelementen um den numerischen Aufwand der Simulation gering zu halten. Weiteres sind für das FEM-Modell zwei Kontaktformulierungen je Seite nötig.

Im FEM-Modell werden die Aluminium Inserts als starr modelliert. Von einem Knoten, der die Freiheitsgrade der Lagerung besitzt, wird der Kohlefaserbalken mit Hilfe einer Koppelspinne und starren Balkenelementen angebunden. In der

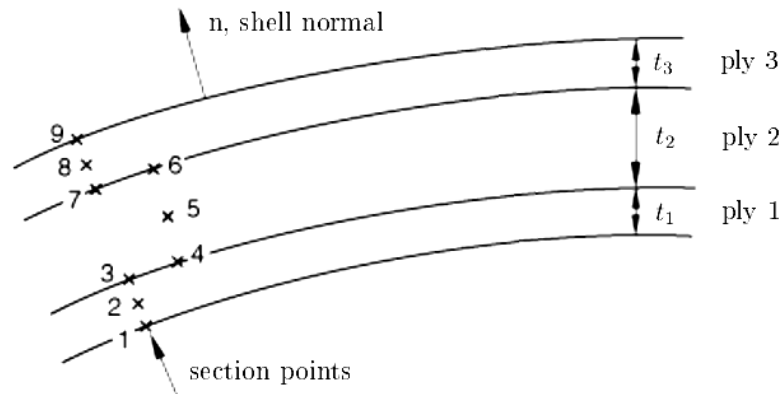


Abbildung 3.2: Der Vektor n stellt die Oberflächennormale eines Elementes dar und legt somit die Lagenummerierung fest. t_i bezeichnet die jeweilige Lagendicke die hier beispielsweise 3 Integrationspunkte je Lage besitzt. Angepasst von [3].

Abb. 3.3 ist der modellierte Balken mit den Druckplatten aus Schalenelementen dargestellt sowie der Druckzylinder modelliert mit einer "Analytical Rigid Surface".

3.2.3 Parametrisierung der Geometrie zur automatisierten Modell-Erstellung

Die Parameter, die in Tab.3.1 aufgelistet sind, verändern die Geometrie des Modells nicht grundlegend, sondern nur in ihren Proportionen. Es ist somit möglich, die Geometrieerstellung über die Parameter zu automatisieren. Dies bietet einen erheblichen Vorteil, wenn viele unterschiedliche Geometriemodelle untersucht werden sollen. Dazu wurde ein Modell mit dem Programm Hypermesh 11.0 (Altair Engineering GmbH, Deutschland) manuell erstellt. Abb. 3.1 zeigt eine Skizze mit den veränderlichen Parametern. z in Tab. 3.1 entspricht der Lagenanzahl. Die Lagendicke der einzelnen Schichten beträgt 0,5mm und wird nicht geändert.

Hypermesh schreibt in einem File alle angewandten Operationen der Modellerstellung im tcl-Format mit. In diesem File können zum Beispiel Koordinaten von Knotenpunkten, aber auch Netzfeinheit, Faserwinkel usw. durch Parameter ersetzt werden und somit kann ein neues Modell automatisiert erzeugt werden.

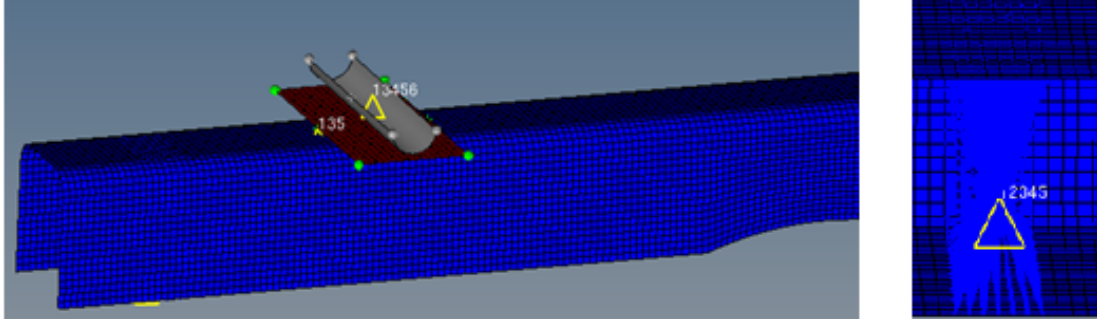


Abbildung 3.3: Links: FEM-Modell des Balkens und der Lastleitung. Rechts: Modellierter Aluminium-Druckplatte als Lagerungsinsert. (Ansicht von unten)

Tabelle 3.2: Für die Berechnung von geflochtenen Strukturen werden die Steifigkeits- und Festigkeitswerte der UD- Schicht mit einem Reduzierungsfaktor versehen. Die reduzierten Werte wurden aus [7] entnommen.

Steifigkeit	Wert [N/mm^2]	Festigkeit	Wert [N/mm^2]
E_1	159300	X_T	2330
E_2	9400	X_C	1098
ν_{12}	0,29	Y_T	33
G_{12}	4400	Y_C	175
G_{13}	4400	S_L	76,4
G_{23}	2800	S_T	76,4

3.2.4 Materialgesetz

Die FEM- Modellierung nimmt auf die Krümmung der Fasern keine Rücksicht und bildet das Laminat lagenweise als UD- Schicht ab. Eine Lage Gewebe wird somit durch zwei UD-Schichten beschrieben. Die gekrümmte Topologie der Fasern fließt nun über die Reduzierung der Steifigkeits- und Festigkeitswerte der UD- Schicht ein, siehe Tab.3.2 und Tab.3.3.

Schadensinitiierung

Die Initiierung von Schädigung wird in Abaqus v6.14 (Dassault Systèmes, Frankreich) durch das Versagenskriterium nach Hashin und Rotem [9] oder nach Hashin [8] beschrieben und ist Beginn der Degradation der Steifigkeit. Beide Kriterien

Tabelle 3.3: Für die Schadensfortschrittberechnung notwendige Materialparameter der Energie Dissipationsrate je Versagensmodus sowie ein empfohlener viskoser Regularisierungskoeffizient.

Energie Dissipationsrate	Wert [N/mm]	Viskoser Regularisierungskoeffizient	Wert [s]
G_{FT}	89,8	$ETAFT$	0,002
G_{FC}	78,3	$ETAFC$	0,002
G_{MT}	0,20	$ETAMT$	0,004
G_{MC}	0,76	$ETAMC$	0,004

basieren auf einem linear elastischen Materialmodell und unterscheiden vier verschiedene Versagensmodi:

Faserbruch infolge Zugbeanspruchung ($\hat{\sigma}_{ll} \geq 0$):

$$F_f^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{ll}}{X_T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\tau}_{lq}}{S_L}\right)^2 \quad (3.1)$$

Faserbruch infolge Druckbeanspruchung ($\hat{\sigma}_{ll} < 0$):

$$F_f^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{ll}}{X_C}\right)^2 \quad (3.2)$$

Matrixversagen infolge Zugbeanspruchung ($\hat{\sigma}_{qq} \geq 0$):

$$F_m^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{qq}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\hat{\tau}_{lq}}{S_L}\right)^2 \quad (3.3)$$

Matrixversagen infolge Druckbeanspruchung ($\hat{\sigma}_{qq} < 0$):

$$F_m^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{qq}}{2S_T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_T}\right)^2 - 1\right] \frac{\hat{\sigma}_{qq}}{Y_C} + \left(\frac{\hat{\tau}_{lq}}{S_L}\right)^2 \quad (3.4)$$

Dabei sind $\hat{\sigma}_{ll}$, $\hat{\sigma}_{qq}$ und $\hat{\tau}_{lq}$ Komponenten des Spannungsvektors.

Schadensfortschritt

Wird die Beanspruchung des Materials über den Schadensinitiiierungspunkt weiter gesteigert, kann die fortlaufende Schädigung des Materials mit Hilfe des Damage Evolution Analysis beschrieben werden.

Ab dem Zeitpunkt der Schadensinitiation stellt die Gleichung

$$\boldsymbol{\sigma} = \underset{\approx}{\mathbf{C}}_d \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.5)$$

die Verknüpfung des Verzerrungsvektors mit dem Spannungsvektor dar. $\underset{\approx}{\mathbf{C}}_d$ beschreibt die Steifigkeitsmatrix eines orthotropen Material für den ebenen Spannungszustand, in der die Schädigung mit einfließt und wie nachfolgend definiert ist

$$\underset{\approx}{\mathbf{C}}_d = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)\nu_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)\nu_{12}E_2 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_s)GD \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

mit

$$D = 1 - (1-d_f)(1-d_m)\nu_{12}\nu_{21} \quad (3.7)$$

Die Degradation der Steifigkeit wird somit über die Schädigungsvariablen d_f , d_m und d_s gesteuert.

Die Variablen d_f , d_m und d_s sind interne Schädigungsvariablen und beschreiben den aktuellen Grad der Faser-, Matrix- und Schubschädigung. Sie resultieren aus den vier verschiedenen Schädigungsmodi

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{if } \hat{\sigma}_{ll} \geq 0, \\ d_f^c & \text{if } \hat{\sigma}_{ll} < 0, \end{cases}$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \text{if } \hat{\sigma}_{qq} \geq 0, \\ d_m^c & \text{if } \hat{\sigma}_{qq} < 0, \end{cases}$$

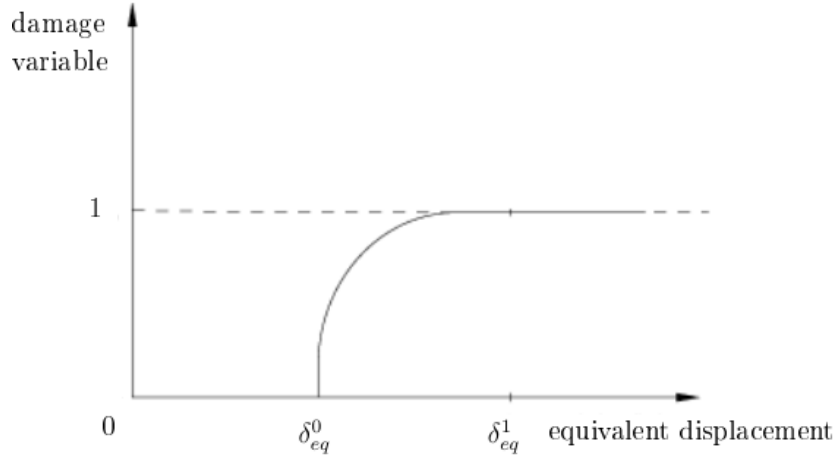


Abbildung 3.4: Verhalten der Schädigungsvariablen, angepasst von [3].

sowie d_s , die folgendermaßen definiert ist:

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c) \quad (3.8)$$

Übersteigt die aktuelle äquivalente Verschiebung die Verschiebung bei Schadensinitiiierung ($\delta_{i,eq} > \delta_{i,eq}^0$), so werden die Schädigungsvariablen mit der Gleichung

$$d_i = \frac{\delta_{i,eq}^f (\delta_{i,eq} - \delta_{i,eq}^0)}{\delta_{i,eq} (\delta_{i,eq}^f - \delta_{i,eq}^0)} \quad (3.9)$$

für jeden Mode berechnet. $\delta_{i,eq}^f$ stellt die Verschiebung dar, bei der das Material im jeweiligen Versagensmode völlig zerstört ist. Das Verhalten der Schädigungsvariablen bezogen auf die äquivalente Verschiebung, ist graphisch in Abb. 3.4 dargestellt.

Der Wert $\delta_{i,eq}^0$ der verschiedenen Modi hängt von den Materialkennwerten ab. Für jeden Fehlermode muss eine kritische Energiefreisetzungsrates G_c angegeben werden, die der Fläche des Dreiecks (0AC) entspricht, die für die Größe von $\delta_{i,eq}^1$ entscheidend ist, wie es in Abb. 3.5 zu sehen ist. Entlastet man von einem teilweise geschädigten Zustand, wie es Punkt B repräsentiert, so verläuft die Entlastung

linear in den Ursprung. Derselbe Pfad wird bei einer Wiederbelastung zurückgelegt. Um eine gute Konvergenz des Algorithmus sicherzustellen, gibt es die Möglichkeit der viskosen Regularisierung. Der Anteil sollte jedoch sehr klein sein, um eine möglichst kleine Verfälschung der Ergebnisse zu gewährleisten.

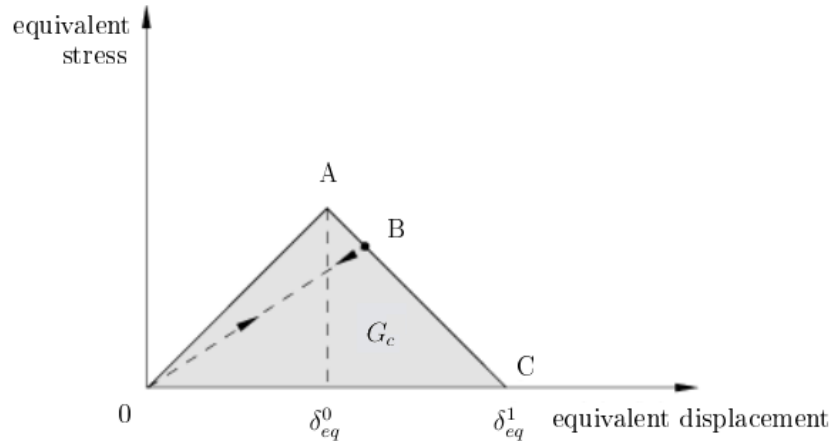


Abbildung 3.5: Grafische Darstellung des Materialmodells der Schädigung, angepasst von [3].

3.2.5 Kontaktmodellierung

- Kontaktdiskretisierung (Flächenbasiertes Master Slave Konzept)
- Kontaktformulierung (Penalty Methode)

Bei der Kontaktformulierung mittels der Penalty-Methode werden an jedem Knoten "Federn" eingeführt, die der Durchdringung entgegenwirken. Die Abb. 3.6 zeigt die grafische Darstellung der Methode.

Der allgemeine Ansatz des Kontaktpotentials lautet:

$$\Pi_k^P = \int_{A_k} \frac{1}{2} (k_n d_N^2 + k_T g_T g_T) dA \quad (3.10)$$

Dabei stellt A_k die Kontaktfläche, k_n den Penalty Parameter für Normalkontakt, d_N die Kontaktbedingung für Normalkontakt, k_T den Penalty Parameter für Tangentialkontakt und g_T die Kontaktbedingung für Tangentialkontakt dar.

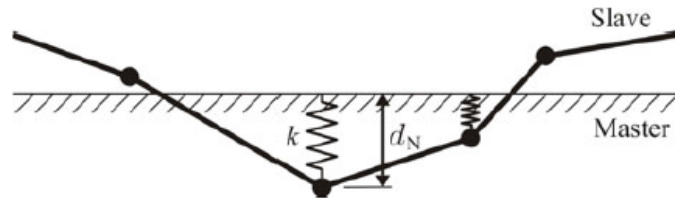


Abbildung 3.6: Einführung von "Federn" bei der Penalty-Methode. [12].

Nach dem Prinzip vom Minimum der potentiellen Energie kann durch Variation des allgemeinen Ansatzes die Kontaktkraft über die Durchdringung d_N ermittelt werden.

Da erst nachträglich überprüft werden kann, ob der Kontakt offen oder geschlossen ist, bzw. ob die sogenannte Kuhn-Tucker-Bedingung erfüllt ist, muss gegebenenfalls der zuvor angenommene Kontaktstatus korrigiert und neu gerechnet werden. [12]

Während bei der Kontaktformulierung die Frage im Vordergrund steht, wie die Kontaktnebenbedingung $d \geq 0$ mathematisch und numerisch umgesetzt wird, geht es bei der Kontaktdiskretisierung um die Frage, wo Kontakt abgefragt werden soll. Die Kontaktdiskretisierung wurde im FEM-Modell mit dem flächenbasierten Master-Slave Konzept durchgeführt. Für Details zu der Kontaktmodellierung verweise ich auf einschlägige Literatur, wie zum Beispiel [12]

3.2.6 Auswertungen

Ausgewertet wird zu Beginn die Flächenpressung an den modellierten Kontaktstellen um ein Konvergenzverhalten dieser mit veränderter „Penalty Stiffness Parameter“ sicherzustellen.

Die Festigkeitsbeurteilung erfolgt mithilfe der Schichtspannungen und dem angewandten Versagenskriterium nach Hashin und Rotem oder Rotem. Zusätzlich findet eine Deformationsbewertung des Balkens statt. In einer abschließenden Simulation wird Schadensfortschritt aktiviert und der Balken bis zum totalen Versagen belastet um den Schadensfortschritt zu untersuchen. Dabei werden Versagensvariablen, Verzerrungsenergien und die Kraft-Verschiebungs-Kurve ausgewertet.

4 Ergebnisse und Diskussion

Ausgangspunkt für die Parameterstudie ist der Basisbalken mit den Abmessungen aus Tab. 3.1. Dieser wird im Detail analysiert um ein genaues Bild der Ausgangssituation zu bekommen. Variiert wird immer nur ein Parameter des Basisbalkens, um sicherzustellen, dass keine Überlagerungseffekte mehrerer veränderter Parameter auftreten.

4.1 Analyse Basisbalken

Durch die Konfiguration als 4-Punkt-Biegebalken und die Belastung bis zum Auftreten von "First Ply Failure" im Untersuchungspunkt, können geometrische Nichtlinearitäten von Bedeutung werden. Dazu bietet Abaqus die Möglichkeit einer „large-displacement analysis“, die diese Effekte berücksichtigt. In Tab.4.1 ist ersichtlich, dass die Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearität einen kleinen Unterschied in der maximalen Durchbiegung des Basisbalkens macht.

Es zeigt sich, dass der kritische Versagensmode im Untersuchungspunkt Matrix Druckversagen darstellt und in der Lage 1 am größten ist. Es werden daher die Werte für die maximale Durchbiegung bei einem Versagensindex von $F_m^c = 1$ im Untersuchungspunkt entnommen. Um möglichst genaue Ergebnisse zu erhalten, erfolgt die weitere Berechnung immer unter Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearität.

Die anderen Werte der Versagensmodi sind beim Basisbalken mit den zuvor aufgelisteten Abmessungen im Untersuchungspunkt nicht von Relevanz. So sind hier $F_f^t = 0,06$ und $F_m^t \sim 0$ sowie $F_f^c \sim 0$. Bei Beginn von Schädigung im Untersuchungspunkt zeigt sich jedoch an der Lasteinleitungsstelle ein maximaler Versagensindex $F_m^t = 9,20$. Um die stattfindende Schädigung besser zu verstehen und in weiterer Folge an der Lasteinleitungsstelle zu unterbinden, wird der kritische

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der berechneten maximalen Durchbiegung mit und ohne Berücksichtigung von geometrischer Nichtlinearität.

Berechnungsart	max. Durchbiegung
ohne NLGEOM	-7,32 mm
mit NLGEOM	-7,5 mm

Tabelle 4.2: Links: Der Versagensindex F_m^c am Untersuchungspunkt zeigt, dass die einzelnen Lagen sehr ausgeglichen beansprucht werden, mit einer leichten Tendenz zur höheren Auslastung der inneren Lagen. Rechts: Zeigt sich eine deutliche Zunahme des Versagensindex F_m^t für die inneren Lagen an der Lasteinleitungsstelle. Der Maximalwert tritt in Lage 1 am innersten Integrationspunkt des Lagenquerschnittes auf.

Lage	Wert [1]	Lage	Wert [1]
Ply 1	1,0	Ply 1	9,20
Ply 2	0,90	Ply 2	4,50
Ply 3	0,96	Ply 3	2,7
Ply 4	0,92	Ply 4	0,91
Ply 5	0,92	Ply 5	0,23
Ply 6	0,94	Ply 6	0,71
Ply 7	0,89	Ply 7	1,05
Ply 8	0,96	Ply 8	2,42

Versagensindex der beiden Stellen für jede Lage des Laminates ausgewertet und ist in Tab. 4.2 zusammengefasst. Dabei wurde jeweils der maximale Wert des Lagenquerschnittes genommen.

Der Versagensindex der beiden Stellen ist in den folgenden Abbildungen 4.1 - 4.3 grafisch dargestellt. Am Untersuchungspunkt ist durch die nahezu gleiche Beanspruchung über die Laminatdicke in Abb. 4.1 der Maximalwert über alle Lagen abgebildet. Dadurch ist eine Zuordnung des Versagensindex zu einer Lage nicht möglich, aber in diesem Fall auch nicht von großer Bedeutung. Der gewünschte Schadensort stellt durch den Kreisausschnitt in der Balkenmitte die kritische Stelle dar. Mit zunehmendem Abstand vom Untersuchungspunkt nimmt der Versagensindex rasch ab. Dadurch wird die Schadensinitiierung an der gewünschten Stelle in einem kleinen Bereich eingeschränkt, was für die experimentellen Untersuchungen von Vorteil ist.

In Abb. 4.2 und Abb. 4.3 ist die innerste und äußerste Lage mit dem Versagensindex F_m^t dargestellt. Diese sind zugleich auch die beiden am meisten beanspruchten Stellen, jedoch an unterschiedlichen Orten.

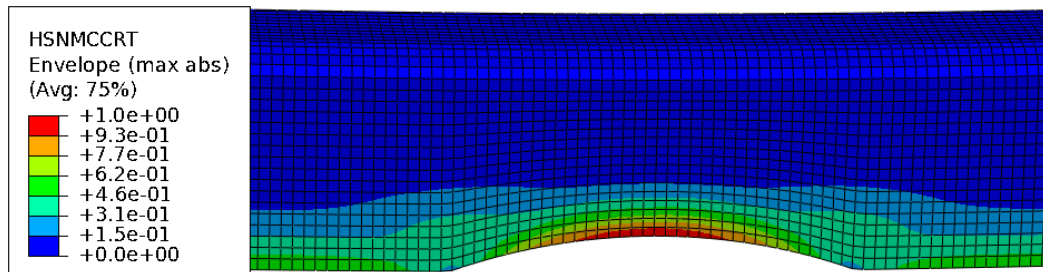


Abbildung 4.1: Darstellung des Versagensindex der Matrix durch Druckbeanspruchung F_m^c , bei einer Belastung $P = 16780N$ und einer Balken-Durchbiegung $U_2 = -7,5mm$

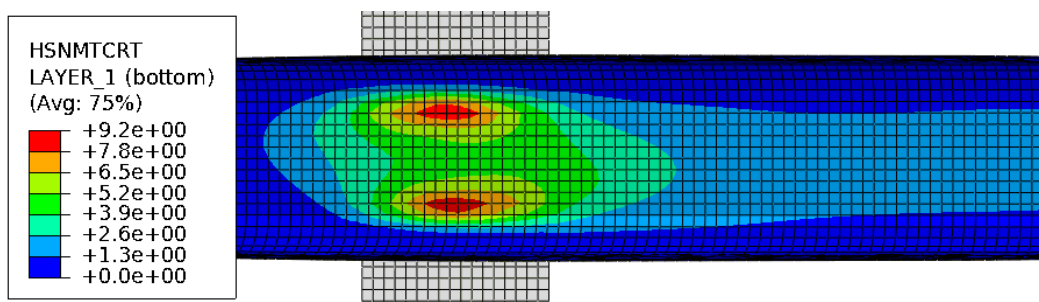


Abbildung 4.2: Darstellung des Versagensindex der Matrix durch Zugbeanspruchung F_m^t , bei einer Belastung $P = 16780N$ und einer Balken-Durchbiegung $U_2 = -7,5mm$

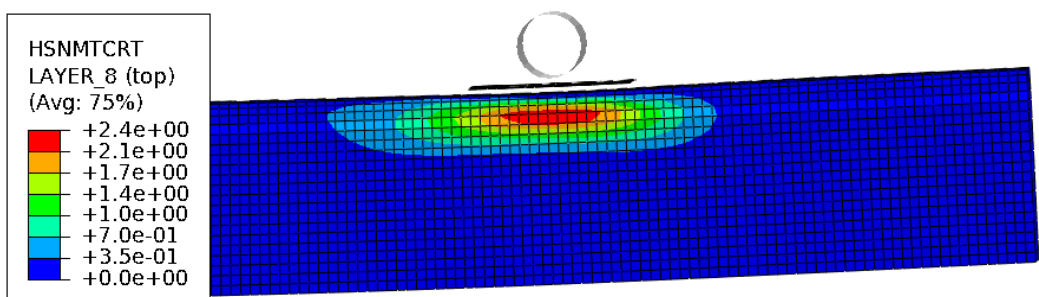


Abbildung 4.3: Darstellung des Versagensindex der Matrix durch Zugbeanspruchung F_m^t , bei einer Belastung $P = 16780N$ und einer Balken-Durchbiegung $U_2 = -7,5mm$

Der Balken wird nicht nur durch die Belastung zwischen den Auflagern um die Achse 3 gebogen, sondern auch der Balkenrücken wird direkt unter der Lasteinleitungsstelle nach unten gekrümmt, um die Achse 1. Dadurch wird das Laminat quer zur Balkenlängsachse (1) auf Biegung beansprucht. Die an der Unterseite des Balkenrückens auftretenden Zugspannungen, die in der innersten Lage am größten werden, verursachen das Zugversagen der Matrix quer zur Faserrichtung. Das Krümmen des Balkenrückens bewirkt ein Aufweiten des U-Profiles an den Stegen. Der unbelastete Bereich des Balkens möchte jedoch seine ursprüngliche Form (parallele Balkenstege) beibehalten und wirkt der Aufweitung des Balkens unter der Lasteinleitungsstelle entgegen. Die somit entstehende Biegebeanspruchung an der Balkenrundung verursacht das Matrixversagen durch Zug in der obersten Lage in diesem Bereich.

Abb. 4.4 und Abb. 4.5 verdeutlichen die zuvor beschriebene Krümmung des Balkenrückens, sowie die seitliche Ausbauchung der Balkenstege durch die Lasteinleitung.

Zusätzlich zu der Auswertung des Versagensindex ist der Spannungszustand im höchst belasteten Punkt an der Untersuchungs- und Krafteinleitungsstelle von Interesse. Die angegebenen Spannungen beziehen sich auf das lokale KS der Faser. Somit entspricht die Komponente σ_{ll} des Spannungsvektors der Normalspannung in Faserrichtung, σ_{qq} quer zur Faserrichtung und τ_{lg} der Schubspannung in der Schichtebene. In Tab.4.3 sind die Spannungszustände der beiden Stellen ersichtlich.

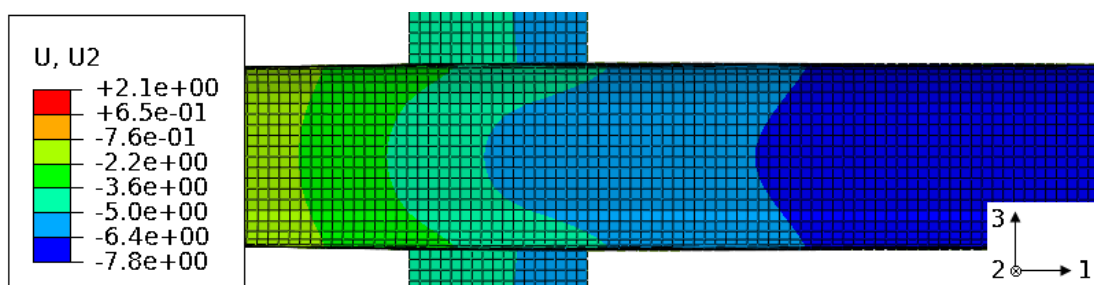


Abbildung 4.4: Veranschaulichung der Krümmung des Balkenrückens unter der Krafteinleitungsstelle. Einheit in mm.

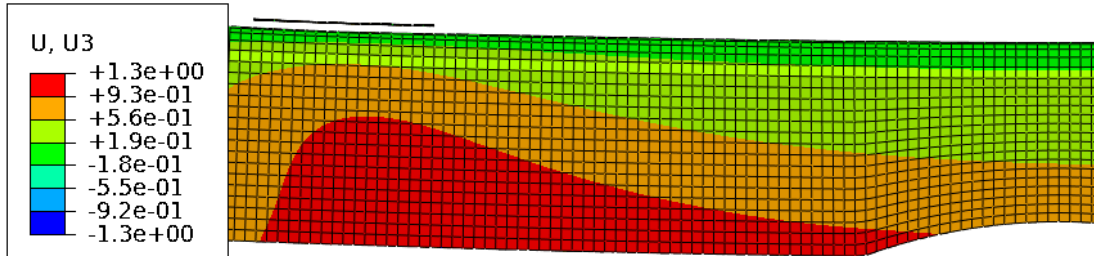


Abbildung 4.5: Die seitliche Ausbauchung des Balkens, die unter der Krafterleitungsstelle am größten ist zieht sich bis zur Balkenmitte. Außerhalb der Lasteinleitungsstellen ist, eine Ausbauchung des Balkens aufgrund der Aluminium Inserts im Balken für die Lagerung nicht möglich. Einheit in mm.

Die Aluminium Inserts an den Lagerungsstellen wirken so effektiv, dass im Bereich der Auflager keine Schädigung zu erwarten ist.

4.2 Variation der Balkenhöhe am Basisbalken

Die erste Parametervariation, die mit dem Basisbalken durchgeführt wird, bezieht sich auf die Balkenhöhe. Diese beeinflusst das axiale Flächenträgheitsmoment des Balkens maßgeblich. Wird die Balkenhöhe vergrößert, reduzieren sich bei gleicher Belastung die Biegespannungen im Querschnitt und die maximale Durchbiegung. Damit im Untersuchungspunkt Versagen auftritt, ist somit eine Erhöhung der Belastung notwendig. Eine Erhöhung der Belastung beansprucht vermehrt die Lasteinleitungsstelle. Da diese jedoch beim Basisbalken bereits der Ort ist, an dem Schädigung als erstes stattfindet, wird in der Parametervariation die Balkenhöhe sukzessive reduziert. Die einhergehende größer werdende max. Durchbiegung und abnehmende Schadeninitiationskraft ist in Tab. 4.4 gut zu erkennen.

Die max. Durchbiegung $U_{P_{init}}$ wird bei der Kraft P_{init} ermittelt, bei welcher im Untersuchungspunkt einer der vier Versagensmodi 1 wird. Wie beim Basisbalken ist der kritische Versagensmode F_m^c und es findet auch bei Veränderung der Balkenhöhe kein Modewechsel statt.

Eine Verringerung der Balkenhöhe erweist sich positiv hinsichtlich der Vorgabe, dass ein Schaden an Lasteinleitungsstelle und Lagerung unterbunden werden soll.

Tabelle 4.3: Links oben: Im Untersuchungspunkt der innersten Lage zeigt sich, dass der Versagensmode F_m^c hauptsächlich durch den Schubanteil verursacht wird. Links unten: An der Lasteinleitungsstelle ist der Anteil der Zugspannung quer zur Faserrichtung für das Versagen ausschlaggebend. Rechts: Zum besseren Vergleich sind hier die Festigkeitswerte nochmals angeführt.

Spannung	Wert [N/mm^2]	Festigkeit	Wert [N/mm^2]
σ_{ll}	530	X_T	2330
σ_{qq}	-61,6	X_C	1098
τ_{lq}	-77,2	Y_T	33
Spannung	Wert [N/mm^2]	Y_C	175
σ_{ll}	510	S_L	76,4
σ_{qq}	91,7	S_T	76,4
τ_{lq}	47,2		

Bei einer Höhe von 30mm wäre der Versagensindex an der Lasteinleitungsstelle bereits deutlich kleiner als 1. Es besteht jedoch die Gefahr, dass durch den Kreis-ausschnitt in der Balkenmitte und den geringen Abstand zur Balkenrundung der Spannungszustand im Untersuchungspunkt verfälscht wird, weshalb eine Balken-höhe von 40mm als sinnvoll erachtet wird.

Abb. 4.6 und Abb.4.7 zeigen den Versagensindex F_m^t des Basisbalkens im Ver-gleich zu dem Balken mit der Höhe von 40mm bei gleichem F_m^c -Wert im Unter-suchungspunkt. Dabei sind die Konturen bis zu einem Wert von $F_m^t = 1$ in Farbe dargestellt und alles darüber in grau. Somit sind die beiden Balken bei gleicher Legende optisch sehr gut zu analysieren. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die reduzierte Balkenhöhe die Oberseite einen geringeren Versagenindex aufweist und auch der Maximalwert im Kraftereinleitungsbereich deutlich verringert wurde. Jedoch reicht die Reduzierung der Balkenhöhe alleine nicht aus um Versagen an der Lasteinleitungsstelle vollständig zu unterbinden.

Tabelle 4.4: Die Verringerung der Balkenhöhe reduziert die Schadensinitiationskraft und somit auch die Beanspruchung des Balkens an der Lasteinleitungsstelle, was sich im Versagensindex F_m^t widerspiegelt.

Auswertegröße	P_{init}	$U_{P_{init}}$	F_m^t	F_m^c	F_f^t	F_f^c
Einheit	[N]	[mm]	[1]	[1]	[1]	[1]
$H = 60 \text{ mm}$						
Untersuchungspunkt	16780	-7,50	~ 0	1	0,06	~ 0
Lasteinleitungsstelle			9,20	~ 0	0,03	0,42
$H = 50 \text{ mm}$						
Untersuchungspunkt	11136	-8,49	~ 0	1	0,06	~ 0
Lasteinleitungsstelle			4,6	~ 0	~ 0	0,26
$H = 40 \text{ mm}$						
Untersuchungspunkt	6361	-9,59	~ 0	1	0,06	~ 0
Lasteinleitungsstelle			1,91	~ 0	~ 0	0,11
$H = 30 \text{ mm}$						
Untersuchungspunkt	2862,5	-11,01	~ 0	1	0,05	~ 0
Lasteinleitungsstelle			0,64	~ 0	~ 0	0,02

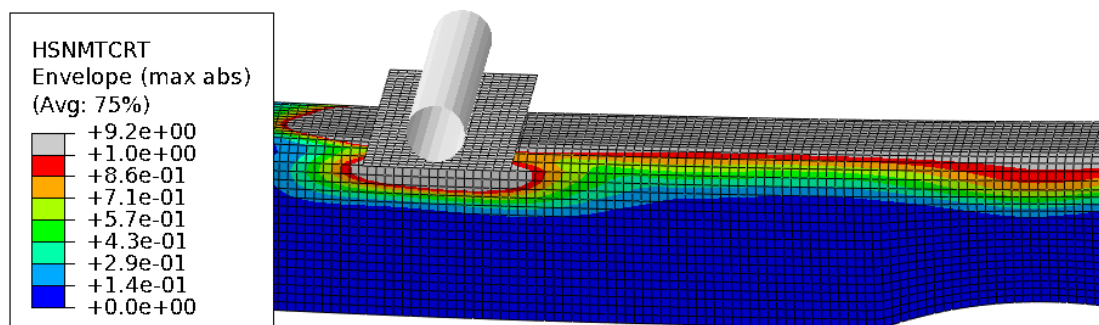


Abbildung 4.6: Die Darstellung des maximalen Versagensindex F_m^t , der im Laminat auftritt, zeigt, dass die gesamte Balkenoberseite zwischen den Lasteinleitungsstellen des Basisbalkens geschädigt wird bei $F_m^c = 1$ im Untersuchungspunkt.

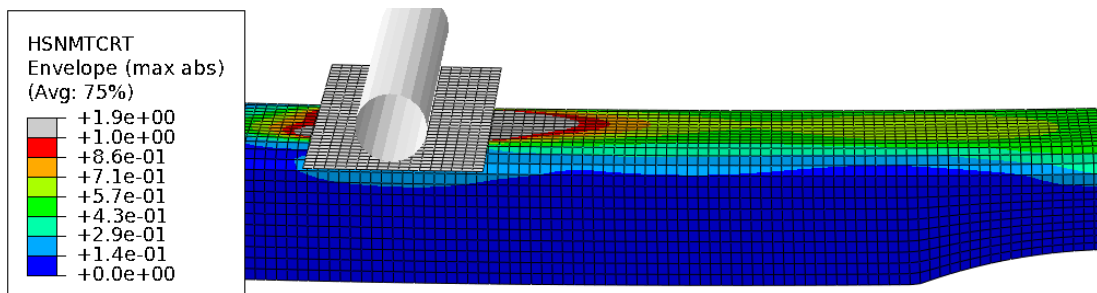


Abbildung 4.7: Kleine Zonen der Schädigung treten nur noch in Bereichen der Lasteinleitung auf mit einem Maximalwert von $F_m^t = 1,91$ bei $F_m^c = 1$ im Untersuchungspunkt

4.3 Variation des Faserwinkels am Basisbalken

Die Variation des Faserwinkels wurde von $\alpha = 27^\circ$ bis $\alpha = 39^\circ$ durchgeführt, in einer Abstufung von 3 Grad. Durch die stark anisotropen Materialeigenschaften von FKV ist bereits bei dieser kleinen Winkelabstufung ein enormer Effekt zu erkennen. So kann sich beispielsweise der Zugmodul eines UD- Laminates bei einer Winkelabweichung von 5° von der Beanspruchungsrichtung auf die Hälfte reduzieren und die Zugfestigkeit um eine Drittel.

Wie die Tab.4.5 zeigt, verliert der Balken mit einem Faserwinkel von $\alpha = 39^\circ$ deutlich an Biegesteifigkeit um die Achse 3, und auch der Schadensbeginn findet bei einer wesentlich geringeren Belastung statt. Mit steigendem Faserwinkel ist auch zu beobachten, dass der Versagensindex an der Lasteinleitungsstelle weiter sinkt, gemessen bei Beginn von Schädigung im Untersuchungspunkt, $F_m^c = 1$. Dies ist darauf rückzuführen, dass der Balkenrücken durch den größeren Faserwinkel eine höhere Biegesteifigkeit um die Längsachse (Achse 2) hat und es zu keiner so großen Krümmung des Balkenrückens kommt. Zusätzlich ist auch eine Festigkeitserhöhung bei Beanspruchungen des Laminates transversal zur Balkenachse von Bedeutung.

Bei der Analyse des Balkens mit $\alpha = 27^\circ$ erfolgte ein Rechenabbruch durch Abaqus, aufgrund einer zu stark geschädigten Struktur im Krafteinleitungsbereich mit der Steigerung des Lastinkrements. Der Balken konnte nicht bis zum Eintreten von Schädigung im Untersuchungspunkt belastet werden. Die Dominanz des auftretenden Versagensmodes an den ausgewerteten Stellen verändert sich bei der Winkelvariation gegenüber dem Basisbalken nur unwesentlich und somit spielen Faserbruch auf Zug oder Druck keine Rolle. Zusätzlich wurde die Versagensindex Verteilung über die Laminatdicke im Untersuchungspunkt ausgewertet, die jedoch kaum eine Änderung gegenüber der des Basisbalkens aufweist.

Abschließend zur Winkelvariation sei erwähnt, dass für die experimentelle Untersuchung auf eine sehr exakte Fertigung des Balkens hinsichtlich des Faserwinkels geachtet werden sollte, da eine Winkelabweichung der Fasern zu einer erheblichen Veränderung der Schadeninitiationskraft führt.

Tabelle 4.5: Variation des Faserwinkels

Auswertegröße	P_{init}	$U_{P_{init}}$	F_m^t	F_m^c	F_f^t	F_f^c
Einheit	[N]	[mm]	[1]	[1]	[1]	[1]
$\alpha = 39^\circ$						
Untersuchungspunkt	9712	-8,78	0,11	1	0,06	~ 0
Lasteinleitungsstelle			1,51	~ 0	0,01	0,15
$\alpha = 36^\circ$						
Untersuchungspunkt	11454	-8,17	~ 0	1	0,04	~ 0
Lasteinleitungsstelle			2,56	~ 0	~ 0	0,21
$\alpha = 33^\circ$						
Untersuchungspunkt	13810	-7,82	~ 0	1	0,05	~ 0
Lasteinleitungsstelle			4,45	~ 0	0,03	0,34
$\alpha = 30^\circ$						
Untersuchungspunkt	16780	-7,50	~ 0	1	0,06	~ 0
Lasteinleitungsstelle			9,20	~ 0	0,03	0,42
$\alpha = 27^\circ$						
Untersuchungspunkt	20000	-7,36	~ 0	0,72	0,07	~ 0
Lasteinleitungsstelle			10,5	~ 0	~ 0	0,49

4.4 Verbesserung der Lasteinleitung

Obwohl die Verringerung der Balkenhöhe und eine Vergrößerung des Faserwinkels eine Reduzierung des Versagensindex an der Lasteinleitungsstelle bewirken, sind diese Maßnahmen nicht ausreichend, um dort eine Schädigung mit Sicherheit ausschließen zu können. Da auch die Analyse des Schadensfortschrittes im Untersuchungspunkt von Interesse ist, muss die Lasteinleitungsstelle eine mögliche Belastungssteigerung ohne auftretende Schädigung standhalten. Nachfolgend werden zwei unterschiedliche Konzepte untersucht, welche in erster Linie Schädigung im Lasteinleitungsbereich unterbinden und zusätzlich keine Beeinflussung der Verhältnisse im Untersuchungspunkt mit sich bringen sollten. Das eine Konzept besteht darin, dass eine zusätzliche 90° Lage im Lasteinleitungsbereich eingebracht wird. Beim anderen wird, so wie bei der Lagerungsstelle, ein 20mm dickes Aluminium Insert, das den Querschnitt der Balkeninnenkontur besitzt, mit dem

Balken verklebt und verschraubt.

4.4.1 90° Zusatzlage

Die zusätzliche Lage wird an der Innenseite des Balkens beigefügt und hat somit die Lagennummer 1. Mit einem Faserwinkel $\alpha = 90^\circ$ und 1mm Lagendicke wird die Biegesteifigkeit des Laminates im Lasteinleitungsbereich quer zur Balkenlängsachse erhöht und wirkt so dem Krümmen des Balkenrückens entgegen. Eine Breite von 60mm reicht aus, den gesamten Bereich unter der Druckplatte zu verstärken. In Tab.4.6 sind die Ergebnisse der Analyse zusammengefasst ersichtlich. Der kritische Fehlermode F_m^t konnte somit auf einen Wert von 0,37 direkt unter der Druckplatte reduziert werden. Aufgrund der Biegebeanspruchung des Balkens um die Achse 3 nehmen die globalen Normalspannungen in Balkenlängsrichtung mit größer werdendem Abstand zur neutralen Faser zu. Es zeigt sich somit in der Zugzone des Balkensteges ein deutlich ansteigender Versagensindex F_m^t in der 90° Zusatzlage wie in Abb. 4.8 ersichtlich ist. Durch den deutlich höheren Materialkennwert, auf Druck beanspruchte UD- Lage transversal zur Faserrichtung gegenüber den Zugwert, ist für den Fehlermode F_m^c für die Druckzone des Balkens in der Zusatzlage keine Erhöhung des Versagensindex zu erkennen, Abb. 4.9 . Als Abhilfe zur Reduzierung des F_m^t Wertes im Balkensteg kann die Zusatzlage nur vom Balkenrücken, aus der Druckzone, bis in die neutrale Faser verkürzt werden. Somit ist eine Verstärkung des Krafteinleitungsbereiches unter der Druckplatte gegeben und die Lage wird im unteren Bereich des Balkensteges nicht den Zugspannungen ausgesetzt.

Die Belastung, bei der im Untersuchungspunkt Schädigung erreicht wird, ändert sich zum Basisbalken um weniger als 0,5%, bei einer Reduzierung der maximalen Durchbiegung um ca. 4,5%. Was darauf deutet, dass der Balken durch die Zusatzlage im Bereich der Lasteinleitung ein wenig versteift wird und eine kleine Änderung der Biegelinie zur Folge hat. Die jedoch kaum veränderte Schädigungsinitiierungskraft lässt darauf schließen, dass es zu keiner Spannungsbeeinflussung im Untersuchungspunkt kommt.

Abschließend ist in Abb. 4.10 die in den Lagen maximal auftretende Dehnung

Tabelle 4.6: Verstärkung der Lasteinleitungsstelle durch Zusatzlage und Aluminium Insert

Auswertegröße	P_{init}	$U_{P_{init}}$	F_m^t	F_m^c	F_f^t	F_f^c
Einheit	[N]	[mm]	[1]	[1]	[1]	[1]
90° Lage						
Untersuchungspunkt	16862	-7,17	~ 0	1	0,06	0,05
Lasteinleitungsstelle			0,37	~ 0	0,08	0,3
Aluminium Insert						
Untersuchungspunkt	16960	-7,12	~ 0	1	0,05	0,04
Lasteinleitungsstelle			~ 0	~ 0	~ 0	0,15

dargestellt. Die ausgebildete Neutrale Faser des Balkens, bei ca. 1/3 der Balkenhöhe von oben, ist deutlich zu erkennen. Es zeigt sich auch, dass die Zusatzlage innerhalb der Belastungen den Balken kaum beeinflusst.

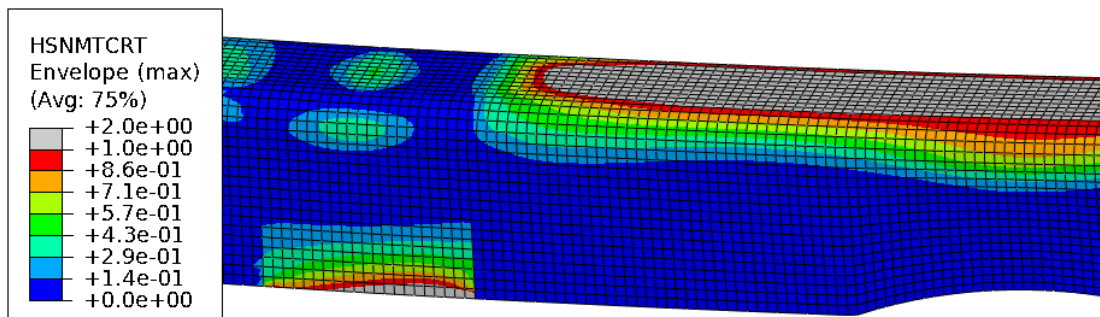


Abbildung 4.8: Die Zusatzlage mit dem Faserwinkel $\alpha = 90^\circ$ reduziert den Index des Versagensmodes F_m^t im Lasteinleitungsberich deutlich. Lediglich zwei elliptische Zonen mit einem Versagensindex von ca. 0,4 bleiben erkennbar, bei $P=16862\text{N}$ und einer Durchbiegung $U_2=-7,17\text{mm}$.

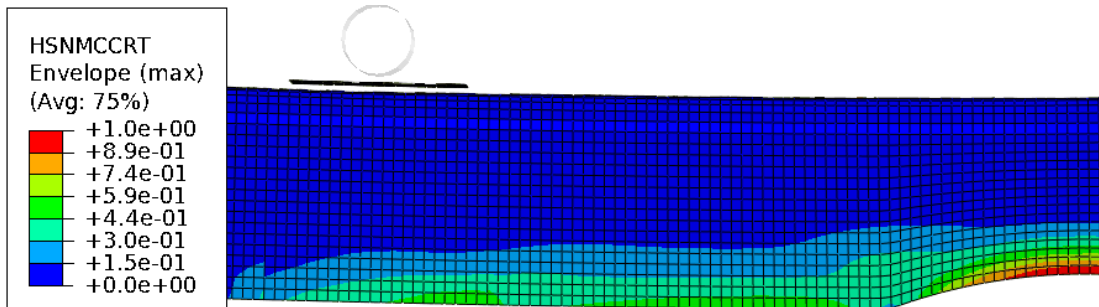


Abbildung 4.9: Der Plot des Versagensindex F_m^c zeigt keine wesentliche Veränderung zu jenem des Basisbalkens, bei $P=16862\text{N}$ und einer Durchbiegung $U_2=-7,17\text{mm}$.

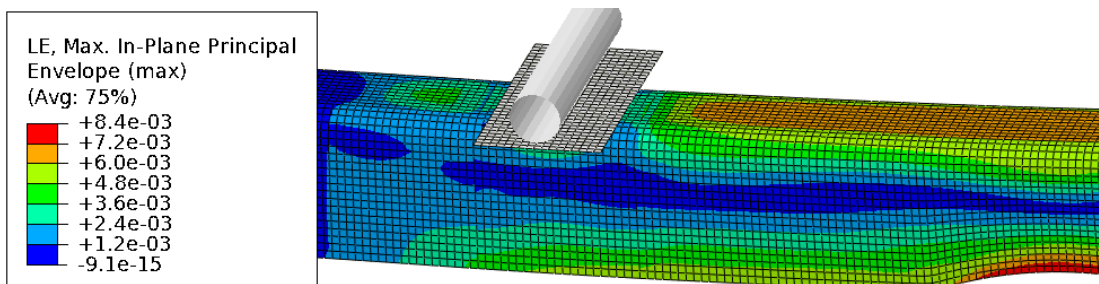


Abbildung 4.10: Darstellung der maximalen, in den Lagen des Laminates, auftretenden Dehnung des Balkens mit Zusatzlage im Kräfteinleitungsbereich, bei $P=16862\text{N}$ und einer Durchbiegung $U_2=-7,17\text{mm}$.

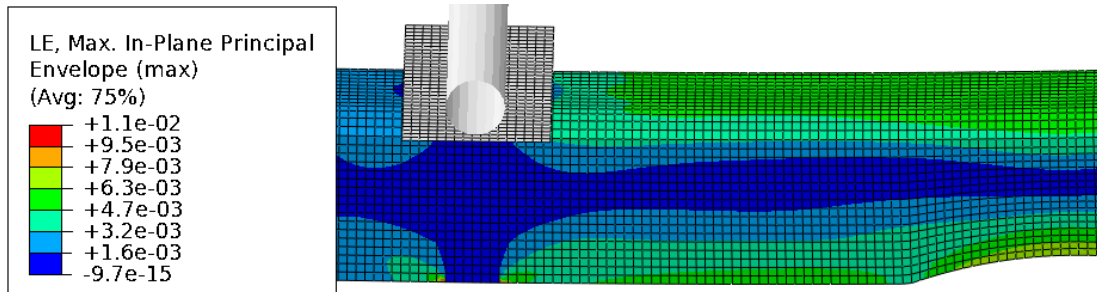


Abbildung 4.11: Durch das eingebrachte Aluminium Insert ist eine Verformung des Balkens in seinem Querschnitt nicht möglich, sowie die Dehnungen in der Lagenebene (In-Plane) auch sehr klein sind. $P=16960\text{N}$ und $U_2=-7,12\text{mm}$;

4.4.2 Aluminium Insert

Bei diesem Konzept wird, wie zuvor schon erwähnt, ein Aluminium Insert in der Stärke von 20 mm mit der Innenseite des Balkens im Lasteinleitungsbereich verklebt und zusätzlich zweimal je Seite mit dem Balkensteg verschraubt. Mit diesem Vorgehen kann ein Krümmen des Balkenrückens völlig unterbunden werden, wie sich in den Werten für F_m^t und F_m^c in Tab.4.6 zeigt. Der eingebrachte Aluminiumblock beeinflusst das Verhalten des Balkens nur gering mehr als die 90° Zusatzlage hinsichtlich maximaler Durchbiegung, die ca. 5% gegenüber dem Basisbalken kleiner ist. Auch die Schadensinitiationskraft ist weiter erhöht und liegt bei ca. 1%, was jedoch in einem Bereich liegt, der akzeptiert werden kann.

Abb. 4.11 stellt die maximale im Laminat auftretende Dehnung dar. Es zeigt sich, dass im Bereich des Inserts keine Dehnung des Laminates möglich ist. Das Insert verursacht einen großen Steifigkeitssprung in der Struktur, was am Übergang zum Balken einen möglichen Ort für lokale Effekte darstellt. Abb. 4.12 weist an der Balkenoberseite einen wesentlich geringeren Versagensindex F_m^t auf als derselbe Plot im ersten Konzept. Der Versagensmode F_m^c , wie er in Abb. 4.13 dargestellt ist, zeigt sich kaum verändert.

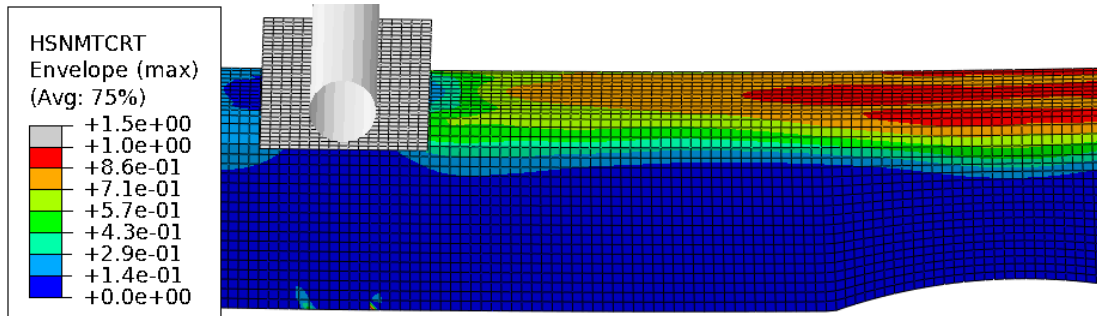


Abbildung 4.12: Deutlich reduzierter Versagensindex F_m^t im Bereich des Balkenrückens. Es zeiten sich aber auch zwei kleine Bereiche am Stegende (links und rechts des Inserts), wo Matrixzugbruch auftritt. Durch den Steifigkeitssprung des Aluminium Insters kann dies jedoch auch numerischer Natur sein. $P=16960\text{N}$ und $U_2=-7,12\text{mm}$;

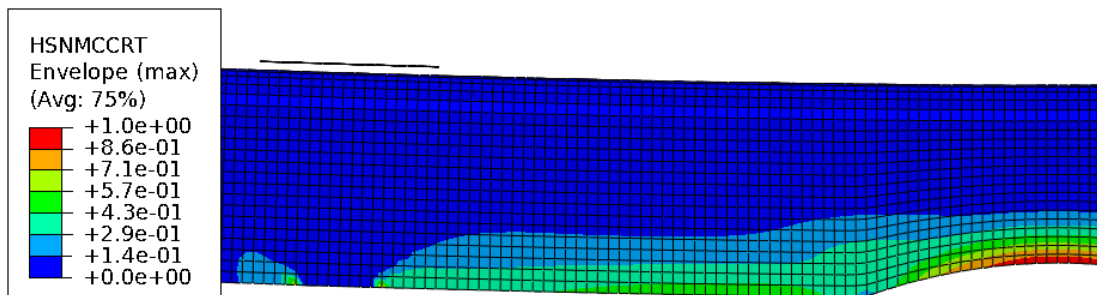


Abbildung 4.13: Das Versagensindexbild F_m^c zeigt sich im Bereich des Untersuchungspunktes unverändert zum Basisbalken. $P=16960\text{N}$ und $U_2=-7,12\text{mm}$;

4.5 Variation der Laminatdicke des Basisbalkens

Eine Variation der Laminatdicke wurde durch eine Änderung der Lagenanzahl durchgeführt, wobei aber die Dicke der Einzellage gleich gelassen wurde. Die Laminatdicke der modellierten Balken reichte von 2mm (4 Lagen) bis 6mm (12 Lagen) in 1mm Abständen. Der Versagensindex F_m^t an der Lasteinleitungsstelle bei Schädigungsbeginn im Untersuchungspunkt ($F_m^c = 1$) veränderte sich nur geringfügig und in einer nicht erkennbaren Tendenz. Es konnte mit einer Variation der Lagendicke keine konkrete Schlussfolgerung gezogen werden.

Tabelle 4.7: Durchgeführte Simulation mit den Winkelabweichungen über den Umfang.

Auswertegröße	P_{init}	$U_{P_{init}}$	F_m^t	F_m^c	F_f^t	F_f^c
Einheit	[N]	[mm]	[1]	[1]	[1]	[1]
Winkelverteilung nach geflochtenen Balken						
Untersuchungspunkt	13046	-7,28	~ 0	1	0,02	~ 0
Lasteinleitungsstelle			5,75	~ 0	0,01	0,26

4.6 Winkelabweichung durch Flechtprozess

Der in den Experimenten untersuchte Balken wird nicht durch UD- Lagen aufgebaut, sondern durch einen Flechtprozess hergestellt. Es kann somit vorkommen, dass durch den Rechteckquerschnitt des Balkens Faserwinkelabweichungen über den Umfang und auch über die Balkenlänge auftreten. Ein geflochtenes und vermessenes Exemplar zeigt diese deutlich auf [11]. So zeigt sich eine Veränderung des Flechtwinkels über die Mantelfläche von der Mitte des Balkenrücken von $\alpha = 27^\circ$ bis zum Stegende des Balken mit $\alpha = 36^\circ$ die einem Cosinus von π bis 2π gleicht. Eine Abbildung der Variation befindet sich im Anhang.

Die Veränderung des Flechtwinkels über den Umfang wurde in der Modellierung, anhand des Basisbalkens, berücksichtigt, indem über die ganze Balkenlänge entsprechende „Sections“ definiert wurden, dieser der entsprechende Faserwinkel zugewiesen werden konnte. Eine Winkelabstufung wurde nur im ganzzahligen Bereich vorgenommen und eine zusätzliche Winkelvariation über die Balkenlänge wurde nicht berücksichtigt.

Tab.4.7 zeigt zusammengefasst die Ergebnisse der Simulation mit Berücksichtigung der Winkelabweichung, bedingt durch den Herstellungsprozess. Die deutlich niedrigere Schadensinitiationskraft, ca. 25% bei nur ca. 3% geringerer maximaler Durchbiegung, deutet nicht nur auf eine niedrigere Steifigkeit sondern auf eine geringere Festigkeit im Untersuchungspunkt. Beides ist durch den höheren Faserwinkel im Stegbereich des Balkes zu erklären.

4.7 Zielbalken

Die vorhergegangenen Simulationen mit diversen Parametern bringen klaren Aufschluss, wie sich eine Veränderung eines Parameters auswirken kann und so die Eigenschaften des Balkens verändert. Hinsichtlich der experimentellen Testung des Balkens ist es von Bedeutung, dass im Untersuchungspunkt Schädigung auftritt, während in den anderen Bereichen des Balkens noch eine gewisse Sicherheit vorhanden sein soll. Dazu werden die Parameter, die den Versagensindex am Balkenrücken bzw. im Lasteinleitungsbereich senkten, zusammen am Zielbalken angewandt und eine Simulation durchgeführt. Es wird die Balkenhöhe laut Höhenvariation auf $H = 40\text{mm}$ reduziert und eine Winkelverteilung angenommen, wie sie beim Fertigen des Testbalkens aufgetreten ist. Obwohl die 90° Zusatzlage eine sehr gute Wirkung gezeigt hat, wird als Verbesserung der Lasteinleitungsstelle das Aluminium Insert gewählt, da dieses noch effektiver wirkte. Die Laminatdicke bleibt mit 8 Lagen zu je 0,5 mm Lagedicke zum Basisbalken unverändert. Die Tab.4.8 zeigt die Zusammenfassung der Simulation des Zielbalkens mit den, soeben beschriebenen, veränderten Parametern. Sowie schon zuvor, zeigt auch jetzt die Abb. 4.14 des Versagensindex F_m^c , dass Beginn der Schädigung in diesem Mode im Untersuchungspunkt einsetzen wird, wenn es durch die Parametervariation gelungen ist den Versagensmode F_m^t über den ganzen Balkenrücken und an der Lasteinleitungsstelle zu reduzieren. Durch das Aluminium Insert ist dies schon beim Basisbalken gelungen und die Abb. 4.15 zeigt, dass ein maximaler Versagensindex $F_m^t = 0,79$ im Laminat auftritt. Dabei tritt dieses in einem sehr kleinen Bereich am Stegende des Balkens links und rechts neben dem Aluminium Insert auf.

Tabelle 4.8: Schadeninitiierung tritt bei $F_{init} = 5460$ N ein, mit einem deutlich dominierenden Fehlermode im Untersuchungspunkt F_m^c . Die Lasteinleitungsstelle wird durch das Zusammenspiel der gleichzeitig veränderten Parameter wirkungsvoll vor Schaden geschützt.

Auswertegröße	P_{init}	$U_{P_{init}}$	F_m^t	F_m^c	F_f^t	F_f^c
Einheit	[N]	[mm]	[1]	[1]	[1]	[1]
Zielbalken						
Untersuchungspunkt	5460	-8,85	~ 0	1	0,05	~ 0
Lasteinleitungsstelle			~ 0	~ 0	0,11	0,04

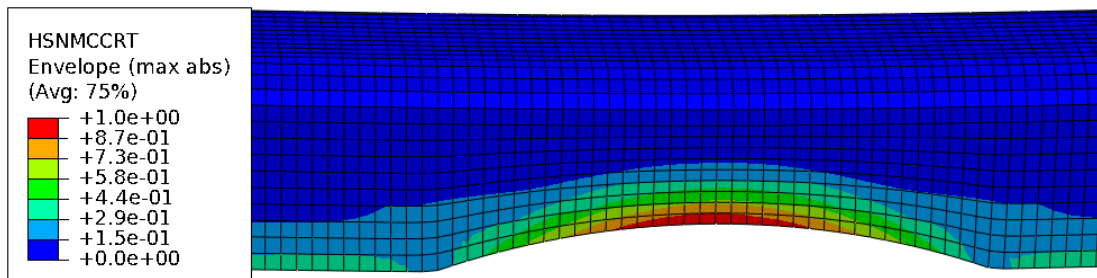


Abbildung 4.14: Die für diesen Schadensmode uninteressanten Randbereiche des Balkens werden für eine Detailansicht der Balkenmitte nicht gezeigt. $F=5460$ N und $U_2=-8,85$ mm

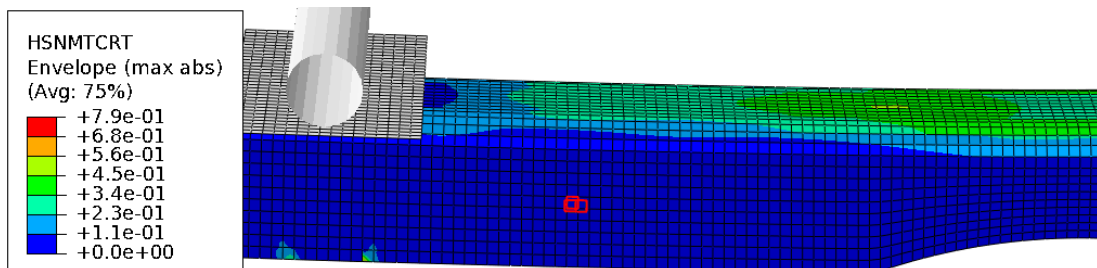


Abbildung 4.15: Der Balkenrücken besitzt hier einen deutlich reduzierten Versagensindex F_m^t und es zeigt sich in einem elliptischen ringförmigen Bereich um die Symmetrieachsen des Balkens ein Wert von ca. 0,3. $F=5460$ N und $U_2=-8,85$ mm

4.7.1 Schadensfortschritt Analyse

Bei der experimentellen Untersuchung wird nicht nur der Beginn der Schädigung untersucht, sondern auch deren Fortschritt, indem die Belastung bis zum totalen Versagen der Struktur gesteigert wird. Es wird daher für die numerische Simulation dieses Vorganges die in Abaqus vorhandene Damage Evolution Anaysis angewandt. Die "Kontur-Werte", in Abb. 4.16 links oben, ist für die nachfolgende Schadensfortschritt Analyse für alle Modi gleich.

Ein Wert größer 0 bedeutet, dass das Schadeninitiierungskriterium erfüllt wurde und das Material eine lineare Degration an Steifigkeit erfährt. Wird der Maximalwert von 1 erreicht, so ist ein totales Materialversagen für den jeweiligen Mode eingetreten. Erreichen alle Schadensvariablen aller Fehlermodi in allen Materialpunkten den Maximalwert, so wird dieses Element gelöscht.

Die Abb. 4.16 zeigt eine Bildserie des Verlaufes des Schadensfortschrittes. Für diesen Balken wird bei einer Kraft $P = 5460$ N das Schadensinitiationskriterium für den Mode Matrix Versagen auf Druck erfüllt. Bei einer weiteren Steigerung auf $P = 5800$ N lässt sich im mittleren (Matrix-Druckversagen) und rechten Bild (Matrix-Schubversagen) bereits ein kleiner Bereich erkennen, der geschädigt wird. Die Erhöhung der Belastung auf $P = 6200$ lässt die Schädigungszonen weiter ausbreiten, während der Versagensmode Matrix-Zugversagen noch nicht in Erscheinung tritt. Bei $P = 6300$ N sind erstmals kleine Stellen des Fehlermodus F_m^t zu erkennen, während im mittleren und rechten Bild die Ausbreitung der Schädigungszone durch das Annähern an die neutrale Faser abflacht. Kleine Kraftsteigerungen von 100 N pro Bild zeigen ein rasantes Ausbreiten der Schädigungszonen.

Es zeigt sich, dass das Versagen der Matrix auf Druck sowie auf Zug durch den Schubanteil verursacht wird. Die auftretenden Schubspannungen sind in das Versagenskriterium für Matrix-Zugbruch und Matrix-Druckbruch jeweils mit eingebunden und führen zur Schädigung. (Vlg. Gl. (3.4) sowie (3.5))

Die Darstellung des Kraftverlaufes über der Balkendurchbiegung ist in Abb. 4.18 dargestellt. Durch das linear elastische Materialverhalten bis zum Eintritt von Schädigung, stellt der Verlauf eine Gerade dar. Mit Beginn von Schädigung wird

die Steifigkeit degradiert, was eine erhöhte Verformung mit sich bringt. Das erste Auftreten von Schädigung im Laminat bei $F = 5460\text{N}$ lässt die Struktur nicht schlagartig versagen, sondern es ist noch eine kleine Laststeigerung möglich. Der Schadensfortschritt schreitet jedoch sehr schnell voran, sodass die faserstützende Matrix in weiten Bereichen ihre Funktion nicht mehr erfüllen kann. Ab ca. $F=5800\text{N}$ zeigt sich mit einer Belastungssteigerung eine sehr rasch zunehmende Durchbiegung aufgrund der Steifigkeitsreduzierung des Balkens. Bevor noch ein Versagensmode auf Faserbruch (Zug oder Druck) kritisch wird, versagt die Struktur total.

Tritt Schädigung ein so ist das nicht nur durch das Abflachen der Kraft-Durchbiegungskurve zu erkennen sondern auch an der dissipierten Schädigungsenergie. Diese erreicht einen erkennbaren Anteil ab einer Durchbiegung des Zielbalkens von ca. 9 mm. Ab diesem Zeitpunkt stimmt somit der Verlauf der gesamten Verzerrungsenergie auch nicht mehr mit der elastischen Verzerrungsenergie überein. Die Abb. 4.18 zeigt die gesamte Verzerrungsenergie, elastische Verzerrungsenergie und den dissipierten Anteil an Schädigungsenergie.

Die dissipierte Schädigungsenergie mit der elastischen Verzerrungsenergie addiert ergibt die gepunktete Kurve und sollte mit der gesamten Verzerrungsenergie übereinstimmen. Der Energieüberschuss der gesamten Verzerrungsenergie ALLIE geht in die numerische Stabilisierung des FEM-Modells aufgrund der kraftgesteuerten Berechnung.

Dieser Energie ist ein Indiz, dass sich die Kraft ab einer gewissen Schädigung wieder reduzieren würde. Mit einer weggesteuerten Berechnung würde sich dieser Kraftverlauf bedingt durch die Schädigung abbilden lassen.

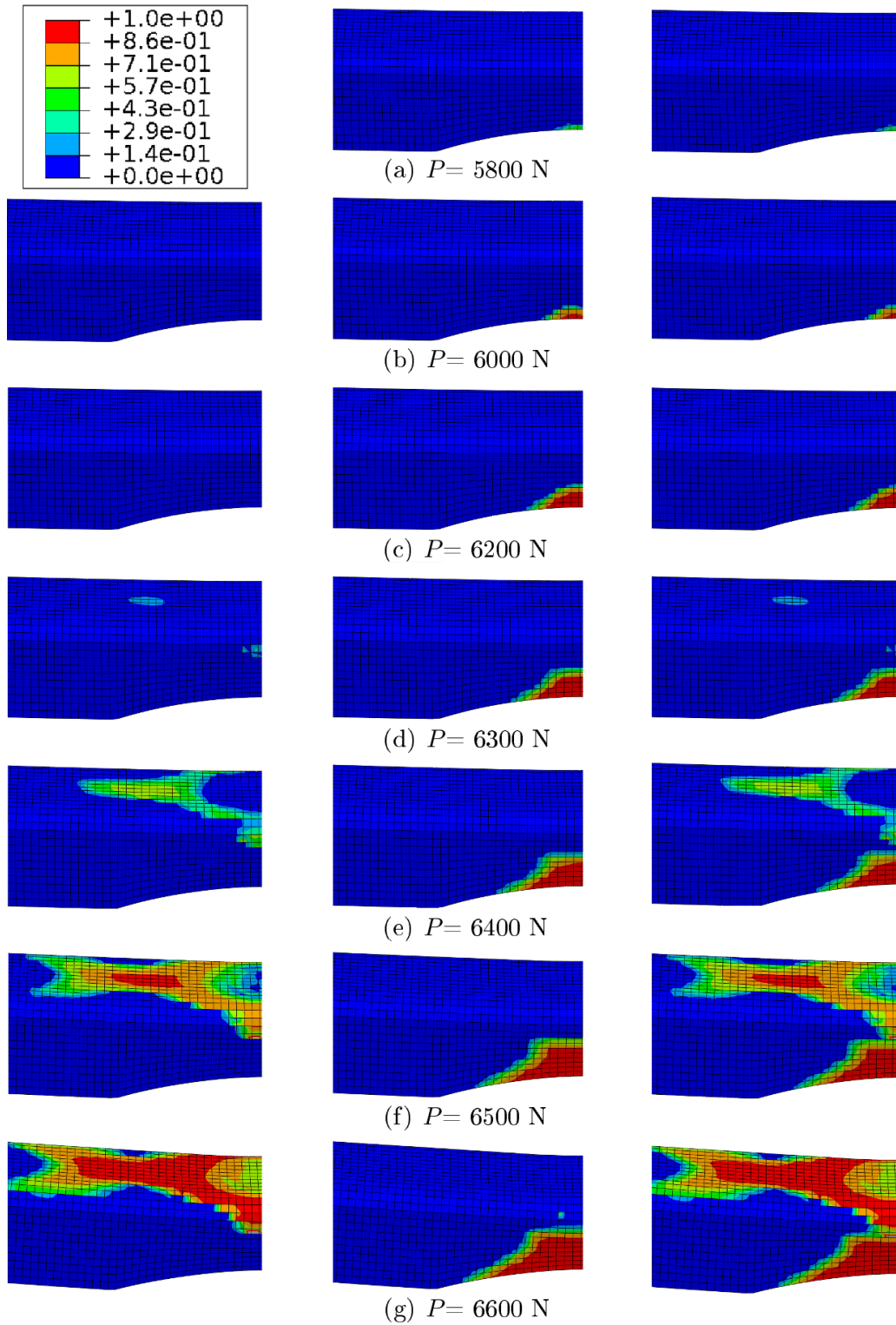


Abbildung 4.16: Im Laminat maximale auftretende Schadensvariablen (Envelope max.). Links: Matrix-Zugversagen (DAMAGEMT); Mitte: Matrix-Druckversagen (DAMAGEMC); Rechts: Matrix-Schubversagen (DAMAGESHR);

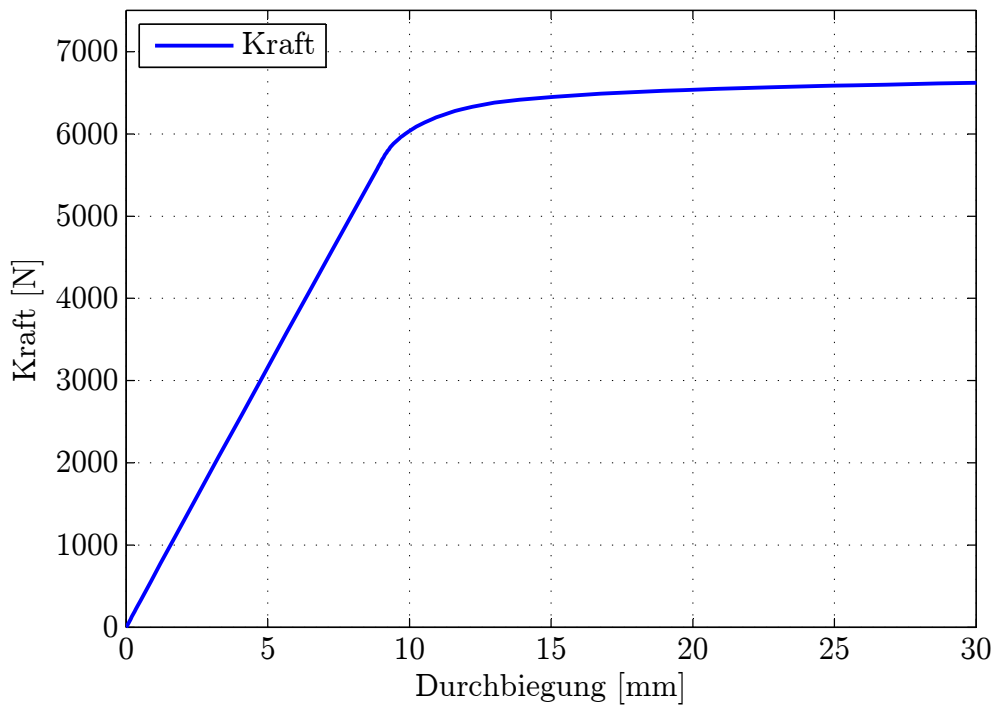


Abbildung 4.17: Kraft-Durchbiegungsverlauf des Zielbalkens (Kraft je Lastteilungsstelle und Durchbiegung gemessen im Untersuchungspunkt)

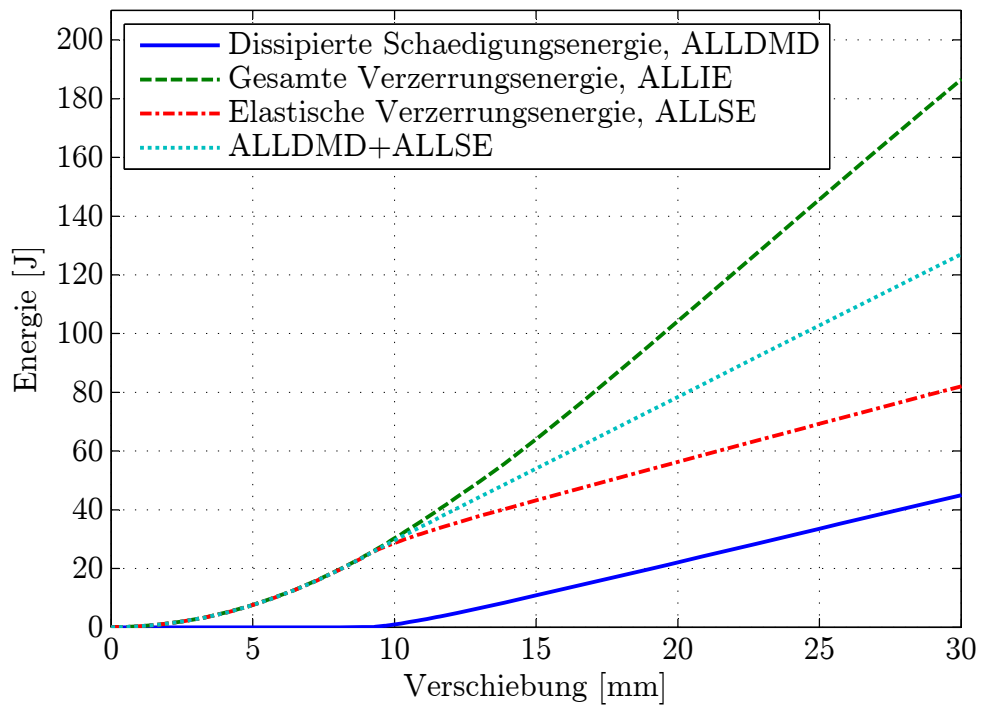


Abbildung 4.18: Ab dem Zeitpunkt der Schädigung beginnt der Anteil an dissipierter Schädigungsenergie zu steigen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit beschäftigte sich mit der Auslegung eines Probekörpers aus CFK-Geflecht für ein mechanisches Strukturexperiment. Die Dimensionierung des U-förmigen Balkens erfolgt durch ein parametrisiertes FEM-Modell unter der Vorgabe, dass an der Lagerung und Lasteinleitung keine Schädigung während der Testung auftreten soll. Zusätzlich sollte der auftretende Schadensmode möglichst dominant im Vergleich zu anderen Modi im festgelegten Untersuchungspunkt sein.

Es wurde, ausgehend von den Anfangsdimensionen, ein FEM-Modell des Balkens inkl. Lagerung und Lasteinleitung erstellt. Der dadurch generierte tcl-Code wurde für die automatisierte Geometrieerstellung aufbereitet, um für die Parameterstudie das FEM-Modell, ohne großen Aufwand, in den Dimensionen ändern zu können. Nach einer detaillierten Analyse des Basisbalkens, an dem der Schadensmode im Untersuchungspunkt bestimmt wurde, stellte sich heraus, dass die Lasteinleitungsstelle der kritische Bereich des Balkens ist. Damit nicht im Lasteinleitungsbereich der Balken zu schädigen beginnt, wurde nun der Balken in seiner Höhe und anschließend der Faserwinkel variiert um die Lasteinleitungsstelle zu verbessern. Beide Maßnahmen zeigten positive Wirkungen, jedoch konnte dadurch nicht mit Sicherheit Schädigung ausgeschlossen werden. Eine Untersuchung folgte die eine konstruktive Änderung der Lasteinleitungsstelle vorsah. Mittels eines Aluminium-Inserts in der Lasteinleitungsstelle konnte der für das Experiment geforderte Balken erstellt werden.

Eine abschließende Simulation des Balkens mit den Abmessungen, die für den 4 Punkt Biegeversuch aus der Parameterstudie empfohlen wurde, zeigt den Schadensverlauf und – fortschritt.

Anhang

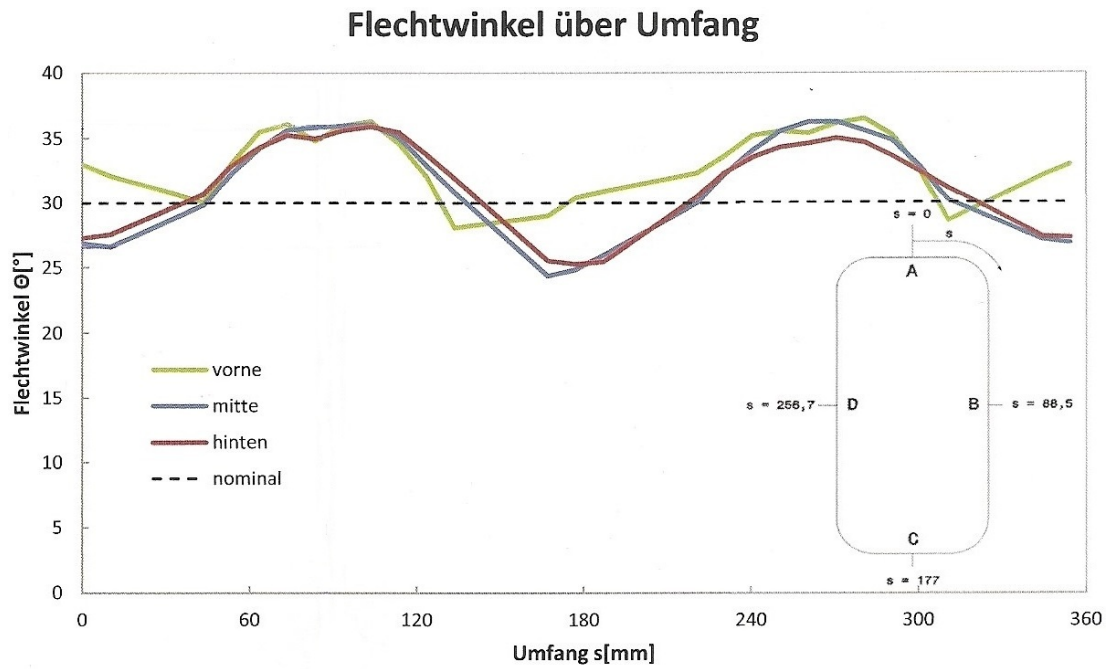


Abbildung 1: Flechtwinkelvariation die bei der Herstellung des Balkens gemessen wurde. [11]

Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.bmw.at/de/neufahrzeuge/bmw-i/i8/2013/effizienz-dynamik.html>. 2.10.2014.
- [2] Helmut J. Böhm. *Continuum Micromechanics of Materials. Lecture Notes*. Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, Technische Universität Wien, 2012.
- [3] Dassault Systems Simulia Corp. *Abaqus/ Standard User's Manual, Version 6.14*. Providence, RI, USA.
- [4] Manfred Flemming, Gerhard Ziegmann, and Siegfried Roth. *Fasern und Matrices; Faserverbundbauweisen*. Springer, Berlin [u.a.], 1995.
- [5] Manfred Flemming, Gerhard Ziegmann, and Siegfried Roth. *Halbzeuge und Bauweisen; Faserverbundbauweisen*. Springer, Berlin [u.a.], 1996.
- [6] Rainer Gadow. *Hochleistungsverbundwerkstoffe für neue Systeme*. Vulkan-Verl., Essen, 1993.
- [7] Jakob Gager. *Modeling and simulation concepts for advanced braided composites. Dissertation*. Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, Technische Universität Wien, 2013.
- [8] Z. Hashin. *Failure criteria for unidirectional fiber composites*. Journal of Applied Mechanics, 47(2):239-334, 1980.
- [9] Z. Hashin and A. Rotem. *A fatigue criterion for fiber-reinforced materials*. Journal of Composite Materials, 7:488-464, 1973.
- [10] Martin Meindlhumer. *Schädigungs- und Versagensvorhersage von Gewebelaminaten durch mechanismenbasierte Hüllflächen. Diplomarbeit*. Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, Technische Universität Wien, 2013.
- [11] Persönliche Korrespondenz mit Markus Wohlfahrt. PCCL, Leoben, Osterreich.
- [12] Lutz Nasdala. *FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik; Hintergrundinformationen, Tipps und Tricks*. Vieweg+Teubner: Wiesbaden, Wiesbaden, 2010.

- [13] Franz G. Rammerstorfer. *Leichtbau. Vorlesungsskriptum*. Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, Technische Universität Wien, 2010.
- [14] Franz G. Rammerstorfer. *Composite Engineering. Lecture Notes*. Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, Technische Universität Wien, 2011.
- [15] Clara Schuecker. *Mechanism based modeling of damage and failure in fiber reinforced polymer laminates. Dissertation*. Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, Technische Universität Wien, 2005.
- [16] Helmut Schürmann. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2., bearbeitete und erweiterte auflage edition, 2007.
- [17] Martin Schwab. *Prediction of energy dissipation due to material nonlinearities and its application to textile composites. Diplomarbeit*. Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, Technische Universität Wien, 2013.
- [18] Isabella C. Skrna-Jakl. *Leichtbau mit faserverstärkten Werkstoffen. Vorlesungsskriptum*. Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, Technische Universität Wien, 2012.