Diskrete Modellierung des Verformungs- und Versagensverhaltens von Gewebemembranen

Von der
Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Dirk Ballhause
geboren in Bad Oldesloe

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Kröplin
Mitberichter:	Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder
Tag der Einreichung:	4. April 2007
Tag der mündlichen Prüfung:	17. Juli 2007

Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen
Universität Stuttgart
2007

Kurzfassung

Gewebemembranen spielen als Leichtbaumaterialien eine wichtige Rolle in vielen Ingenieurskonstruktionen aus so verschiedenen Bereichen wie dem Bauwesen, der Luft- und Raumfahrt oder der Seefahrt. Ihr Einsatz ermöglicht eine effiziente Um- oder Überspannung von großen Volumen oder Flächen bei geringem Strukturgewicht. Aus diesem Grund werden sie unter anderem als Membrandächer, als Hüllenmaterial für Luftschiffe oder als Segelmaterialien für Rennyachten verwendet. Als Verbundwerkstoff aus Gewebe und Beschichtung vereinen sie die Tragwirkung von Gewebestrukturen mit den funktionellen Aufgaben der Beschichtungen, wie beispielsweise der Flüssigkeits- und Gasdichtigkeit. Der mikrostrukturelle Aufbau der Gewebe aus sich kreuzenden Fadengruppen hat einen großen Einfluss auf das Verformungs- und Versagensverhalten dieser Werkstoffe, die sich stark von homogenen Membranmaterialien unterscheiden. Durch die Interaktionen der Fadengruppen ergibt sich einerseits ein teilweise stark nichtlineares Verformungsverhalten, wie es sich in den typischen Effekten der Krümmungsinteraktion und der Schubblockade zeigt, andererseits bedingen sie die diskrete Natur des Versagensvorganges, der durch sukzessives oder kollektives Versagen der Einzelfäden geprägt ist.

Die bisherigen Modellierungsansätze für Gewebematerialien sind nur bedingt in der Lage, diesen Mikrostruktureinfluss in eine Strukturberechnung zu integrieren. Durch eine direkte Repräsentation der Fadenstruktur in abstrahierter Form und die Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) als effizientes Berechnungsverfahren eröffnen sich hier neue Möglichkeiten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher eine diskrete Modelldarstellung von Geweben und Gewebemembranen entwickelt. Die abstrahierte Repräsentation orientiert sich an der in der Literatur als Dreiecksmodell bekannten und bewährten Linearisierung des Fadenverlaufs zwischen den Fadenkreuzungspunkten. Die derartig abgebildete Gewebeeinheitszelle, die kleinste sich wiederholende Fadenstruktur des Gewebes, wird vielfach aneinandergereiht und ergibt so ein makroskopisches Gewebestück. Das Gesamtsystem kann dann mit der Methode der diskreten Elemente berechnet werden und es entsteht ein Modell zur Simulation des makroskopischen Verhaltens von Gewebematerialien mit einer direkten Repräsentation der Mikrostruktur. Die makroskopisch als Nichtlinearitäten auftretenden Fadeninteraktionen ergeben sich dabei ohne weitere Annahmen aus der gewählten Darstellung der Fadenstruktur.

Im ersten Teil der Arbeit wird diese diskrete Modelldarstellung entwickelt. Die zur Repräsentation der Verformungsmechanismen von Geweben notwendigen Interaktionen der Mikrostruktur werden erarbeitet und implementiert. Das Gewebemodell wird durch Hinzunahme von wei-

teren Interaktionen für die Beschichtung zum Gewebemembranmodell erweitert. Anhand von experimentellen Untersuchungen an verschiedenen Modellmaterialien, die den Bereich vom unbeschichteten Gewebe zur sehr steifen Gewebemembran abdecken, wird einerseits nachgewiesen, dass sich das beobachtete typische Gewebeverhalten mit dem Modell abbilden lässt, andererseits wird eine mögliche Vorgehensweise zur Modellanpassung an reale Materialien demonstriert.

Im zweiten Teil der Arbeit erfolgt die Erweiterung des Gewebemembranmodells auf die Beschreibung des Versagensverhaltens. Hierbei können die Möglichkeiten der direkten Mikrostrukturrepräsentation voll ausgeschöpft werden. Zum einen lassen sich durch diesen Ansatz die theoretischen Modelle zur statistischen Beschreibung des Versagens von Geweben in eine Strukturberechnung integrieren, zum anderen kann das Zerreißen des Verbunds aus Gewebe und Beschichtung realitätsnah abgebildet werden. Das entstehende Gewebemembranmodell ermöglicht anhand von praxisnahen Anwendungsfällen, wie dem ein- und zweiachsigen Weiterreißversuch oder dem Berstversuch, die Untersuchung der Interaktionen und gegenseitigen Beeinflussungen der Gewebestruktur und ihrer Beschichtung und kann so ein tiefgreifenderes Verständnis der Vorgänge bei Strukturversagen von Gewebemembranen schaffen.

Abstract

Fabric reinforced membranes are a class of lightweight materials which are important for many different engineering branches like civil, aeronautical or marine engineering. They can be used to efficiently cover big areas or enclose large volumes with a minimum of structural weight. Applications as membrane roofs, airship skins or sail materials demonstrate their capabilities. Constructed as a composite of a fabric embedded in or coated with matrix material, they combine the load carrying capabilities of fabrics with the functional tasks of the coating in order to obtain strong fluid- or gas-tight materials. Due to the microstructure of the fabrics, which consists of crossing groups of yarns, the macroscopic deformation and failure behaviour of fabric reinforced membranes differs strongly from the behaviour observed in common homogeneous membrane materials. The interactions of the yarn groups lead to a non-linear deformation behaviour like crimp interchange or shear locking and cause the discrete nature of the failure process, which is characterised by a successive or collective tearing of the single yarns.

The majority of the existing modelling approaches for fabric membranes cannot fully integrate this microstructural influence in a simulation on structural level. The representation of the fabric as a continuum, as applied in finite element simulations, can include the nonlinear material behaviour stemming from the yarn structure, but its the deformations and interactions are not considered. A direct abstract representation of the yarn structure and the application of the Discrete Element Method (DEM) as an efficient solution technique will open up new possibilities in this field.

In the present work a discrete model for fabrics and fabric membranes is developed. The abstract representation of the yarn structure applies the well-known and proven simplification of linearised yarn paths between the crossing points. A multitude of this generated unit cells - the smallest repeatable structure unit of the fabric - are assembled to build a macroscopic patch of fabric. The system can then be solved with the Discrete Element Method and a model for fabric membranes, allowing a direct microstructure representation in simulations on a structural level is obtained. The macroscopic non-linearities that stem from the interactions of the yarns implicitly arise from the representation of the yarn structure without the need for further assumptions. Experimental results for the deformation behaviour of different fabric membrane materials are obtained, which span the range from a pure, uncoated fabric to a stiff fabric reinforced membrane. Uniaxial, biaxial and bias extension tests are performed with these materials. Based on the obtained data, the applicability of the developed model is proven and a possible strategy for

the parameter identification is demonstrated.

In the second part of the work the model is extended to the description of the failure process. The obtained model makes use of the full capabilities of the approach with a direct microstructure representation. It enables an integration of the theoretical models for the statistical damage description into a simulation on a structural level. Furthermore it is capable to reproduce in a realistic manner the tearing and rupture process of the fabric membranes. The developed discrete model for fabric reinforced membrane allows the exploration of the interactions of the yarns and the influence of the coating materials in the simulation of experimental setups like the uniaxial or biaxial tearing or the bursting test, as demonstrated in the final part of this work. Its application can lead to a deeper understanding of the processes that characterise the failure of fabric membranes.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation . . . 1

1.2 Zielsetzung . . . 3

1.3 Aufbau der Arbeit . . . 4

2 Einführung in die Gewebemembranen **5**

2.1 Anwendungen . . . 5

2.2 Eigenschaften . . . 8

2.2.1 Gewebestruktur und Herstellung . . . 8

2.2.2 Verformungsverhalten der Gewebestrukturen . . . 10

2.3 Versuchsmethodiken zur Gewebemembranprüfung . . . 12

2.3.1 Versuche zum Zugverhalten . . . 12

2.3.2 Schubversuche . . . 15

2.3.3 Kombinierte Versuche . . . 16

2.3.4 Zusammenfassung der Versuchsmethodiken . . . 16

2.4 Modellierungsansätze . . . 17

2.4.1 Phänomenologische Modelle . . . 18

2.4.2 Physikalisch motivierte Ansätze der Mikrostruktur . . . 19

2.4.3 Kopplung der Skalenmodelle . . . 21

2.4.4 Modelle mit direkter Mikrostrukturdarstellung . . . 23

2.5 Das Dreiecksmodell der Gewebestruktur . . . 23

2.5.1 Geometrie der Gewebeeinheitszelle . . . 23

2.5.2 Gleichgewichtsbetrachtung . . . 24

2.5.3 Inkompressibler Faden . . . 25

2.5.4 Kompressibler Faden . . . 26

3 Modellentwicklung **27**

3.1 Die Diskrete-Elemente-Methode . . . 27

3.1.1 Grundlagen . . . 27

3.1.2 Einordnung . . . 28

3.1.3 Anwendungsgebiete und Eigenschaften . . . 28

3.2 Modellbildung . . . 30

3.2.1 Gewebegeometrie . . . 30
3.2.2 Interaktionen . . . 32
3.3 Implementierung des Gewebemodells . . . 36
3.3.1 Preprocessing . . . 36
3.3.2 Prediktor-Korrektor-Schleife . . . 38
3.3.3 Randbedingungen . . . 39
3.3.4 Zeitschrittsteuerung . . . 40
3.3.5 Auswertungen und Abbruchkriterien . . . 41
3.3.6 Normalenvektoren auf Gewebeebene . . . 41
3.3.7 3D-Formulierung der Interaktionen am Kreuzungspunkt . . . 42
3.3.8 Quasistatische Rechnungen im dynamischen System . . . 44
3.4 Verifizierung und Validierung . . . 44
3.4.1 Verifizierung . . . 44
3.4.2 Validierung . . . 46
3.5 Modellverhalten und Parametersensitivitäten . . . 49
3.5.1 Einfluss der Krümmung . . . 49
3.5.2 Fadenquerkompression . . . 50
3.5.3 Vorstreckung . . . 52
3.5.4 Unsymmetrische Gewebe . . . 53
3.5.5 Nichtlineares Fadenverhalten . . . 54
3.6 Erweiterung auf beschichtete Gewebe . . . 55
3.6.1 Matrixinteraktionen . . . 55
3.6.2 Einfluss der Beschichtung bei Zugbelastung . . . 57
3.6.3 Beschichtungseinfluss auf das Schubverhalten . . . 58
3.6.4 Grenzen des Anwendungsbereichs des Gewebemembranmodells . . . 60
3.7 Zusammenfassung des Gewebemembranmodells . . . 62

4 Modellanpassung an reale Materialien 65
4.1 Experimentelle Untersuchungen an Modellmaterialien . . . 65
4.1.1 Die Modellmaterialien . . . 66
4.1.2 Bestimmung der Geometrieparameter des Grundgewebes . . . 66
4.1.3 Fadenparalleler Streifenzugversuch . . . 68
4.1.4 Biaxialer Zugversuch . . . 73
4.1.5 Schrägzugversuch . . . 75
4.2 Anwendung des Gewebemembranmodells . . . 77
4.2.1 Auswertung des Streifenzugversuchs am Gewebe . . . 78
4.2.2 Steifigkeit der Beschichtungen beim Streifenzugversuch . . . 81
4.2.3 Querkompressionsverhalten bei biaxialem Zug . . . 82
4.2.4 Schubverhalten im Schrägzugversuch . . . 85
4.3 Zusammenfassung der Modellanpassung . . . 87

5 Versagen von Gewebematerialien **89**
5.1 Grundlagen zum Gewebeversagen 89
5.1.1 Versagensmechanismen 89
5.1.2 Versuchsmethodiken 91
5.1.3 Modellierungsansätze 92
5.2 Modellerweiterung zur Versagensbeschreibung 95
5.2.1 Fadenversagen 96
5.2.2 Matrixversagen 101
5.3 Modellanwendungen zur Schädigungssimulation 101
5.3.1 Verifikation der statistischen Grenzwertverteilung 101
5.3.2 Zerreißen bei einachsiger Belastung 102
5.3.3 Zerreißen bei biaxialer Belastung 108
5.3.4 Fadenversagen mit Reststeifigkeit bei einachsiger Belastung 110
5.3.5 Faden- und Matrixversagen bei einachsiger Belastung 111
5.3.6 Weiterreißen im einachsigen Zugversuch 113
5.3.7 Weiterreißen im biaxialen Zugversuch 117
5.3.8 Berstversuch 120

Zusammenfassung und Ausblick **125**

Literaturverzeichnis **129**

1 Einleitung

1.1 Motivation

Gewebe und Gewebemembranen stellen eine wichtige Materialgruppe für verschiedenste Bereiche der Technik dar. Ihre Entwicklung reicht weit zurück in die Menschheitsgeschichte. Das Zusammenfügen von Fäden zu flächigen Geweben, die dann als Kleidung oder auch als Zelte oder Segel verwendet werden konnten, wurde schon früh als Handwerk praktiziert und immer weiter verfeinert. Durch Aufbringen einer Beschichtung ergeben sich die Gewebemembranen, in denen die beiden Komponenten Gewebe und Beschichtung meist eine funktionelle Aufgabenteilung vorweisen. Während die Fäden des Gewebes die primäre Tragwirkung übernehmen, erfüllt die Beschichtung oder Einbettung der Fäden sekundäre Aufgaben, wie die Gas- oder Wasserdichtigkeit, den Schutz der Gewebefasern vor Atmosphäreneinflüssen und in gewissem Maß auch die Stabilisierung der Gewebestruktur. Neben vielfachen nichttechnischen Anwendungen spielen die Gewebemembranen heute eine feste Rolle in nahezu allen wesentlichen Bereichen des Ingenieurwesens. Als typische Leichtbaumaterialien sind sie dazu geeignet, mit geringem Massenaufwand große Flächen zu überspannen. Daraus ergeben sich einerseits die Anwendungen im Bauwesen als Membrandächer oder in Traglufthallen, andererseits jedoch auch die Verwendung in der Luftfahrt als Ballons, Luftschiffhüllen oder Fallschirme, um hier nur einige Beispiele zu nennen. Als flexible flächige Strukturen haben die Gewebemembranen die typische Eigenschaft, nahezu keine Druckkräfte und Biegemomente in der Membranebene übertragen zu können. In den technischen Anwendungen muss daher immer eine Stabilisierung durch Zugkräfte erfolgen. Dies kann in der Form von rein zuggespannten Konstruktionen oder aber auch bei geschlossenen Formen durch Aufbringen von Innendruck realisiert werden. Der strukturelle Aufbau aus verwobenen Fäden führt bei den Gewebemembranen zu einem charakteristischen Materialverhalten, welches sich stark von dem Verhalten homogener Membranen unterscheidet. Durch die Interaktion der Fäden bei Belastung ergeben sich Effekte wie die Krümmungsinteraktion und die Scherblockade, die zu einem stark nichtlinearen Materialverhalten führen.

Um dieses Materialverhalten in Modellen beschreiben zu können, gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Möglichkeiten. Die große Mehrheit der bisher vorgestellten Ansätze versucht mit unterschiedlich starkem Abstraktionsgrad die Gewebemechanismen in Materialgesetze für Strukturberechnungen zu fassen. Die heterogene Mikrostruktur aus Einzelfäden wird dabei durch die Annahme eines Kontinuums ersetzt. Die resultierende Materialbeschreibung kann

dann, zumeist im Rahmen der Finite-Elemente-Methode (FEM), sehr effizient für makroskopische Berechnungen, also auf Bauteil- oder Tragwerksebene, verwendet werden. Die verwendeten Konstitutivgesetze reichen im einfachsten Fall vom orthotropen Materialverhalten bis zu mathematisch aufwändigen, nichtlinearen und richtungsveränderlichen Formulierungen für das Gewebeverhalten. Im Gegensatz zu diesen makroskopischen Kontinuumsansätzen gab es schon früh auch Modellansätze auf Ebene der Fadenstruktur. Diese können zum Teil mit einer stark vereinfachten Repräsentation der Fäden z. B. durch lineare Federelemente das typische Gewebeverhalten in sehr guter Näherung abbilden. Sie bilden daher die Grundlagen für physikalisch motivierte Materialgesetze, die durch Homogenisierung aus den Mikrostrukturmodellen eine makroskopische Berechnung erlauben. Die auf diese Weise erhaltenen Kontinuumsansätze haben den Nachteil, dass sie den lokalen Verformungszustand der Mikrostruktur aus verkreuzten Fäden nicht mehr abbilden können. Ein Rückschluss aus den makroskopisch ermittelten Spannungs- und Dehnungsfeldern auf die Ebene der Fadenstruktur ist nur schwer möglich. In den allgemeinen Strukturberechnungen ist dies zumeist nicht notwendig, bzw. aufgrund der damit verbundenen Modellkomplexität auch nicht sinnvoll.
Für einige Anwendungsbereiche, insbesondere bei Auftreten von Schädigung im Material, ist die Vernachlässigung der diskreten Natur der Gewebematerialien jedoch nur noch schwer zu rechtfertigen. Hierzu werden dann bevorzugt Modelle mit direkter Repräsentation der Mikrostruktur verwendet, die durch Abbildung der einzelnen Fäden deren Interaktion und auch deren Versagen darstellen können. Die Schwierigkeit dieser Modelle liegt in der hohen Komplexität und dem damit verbundenen numerischen Aufwand. Je feiner und genauer die Fadenstruktur repräsentiert wird, umso kleiner ist das makroskopische Gebiet, dass mit der jeweils aktuellen Rechentechnologie noch sinnvoll simuliert werden kann. Andererseits ergeben sich die als Nichtlinearitäten auf der Strukturebene auftretenden Gewebeeffekte direkt aus den zum Teil durch einfache lineare Interaktionen darstellbaren Fadendeformationen und -bewegungen. Darüber hinaus bieten diese Modelle die Möglichkeit, das Versagensverhalten der Gewebestrukturen in natürlicher Weise abzubilden. Die Schädigungsentwicklung in einem Material besteht aus Vorgängen auf verschiedenen Skalenebenen, wobei stochastische Einflüsse in der Regel eine große Rolle spielen. An den schwächsten Stellen im Material bilden sich Mikroschädigungen aus, die bei weiterer Belastung zusammenwachsen und so auf makroskopischer Ebene einen sichtbaren Riss bilden. Dieser wächst stabil oder instabil weiter und führt letztlich zum Versagen der Struktur. Einen Ansatz, um dieses Verhalten in Modelle zu fassen, bieten die statistischen Schädigungsmodelle, die auch auf die Gewebe angewendet werden können. Durch ihre abstrakte Darstellung der Fäden und der Gewebestruktur eignen sie sich allerdings nicht dazu, reale Bauteilbereiche oder gar komplette Tragwerke zu berechnen.
In einigen Bereichen der Schädigungssimulation für verschiedene Materialien hat die Anwendung der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Diskrete-Elemente-Methode (DEM) hierzu eine interessante Erweiterung ermöglicht. Durch die Darstellung eines Materials aus Interaktionen zwischen diskreten Massepunkten können für die Versagensvorgänge einerseits stochastische Einflüsse auf die Versagenskriterien der Interaktionen (physikalische Unordnung) und

andererseits die stochastische Variation der Geometrie der Mikrostruktur (geometrische Unordnung) berücksichtigt werden. Durch die Anwendung der DEM ergibt sich eine Methode, die eine Strukturmodellierung mit integrierter statistischer Schadensmodellierung darstellt und so eine physikalisch realitätsnahe Abbildung der Versagensvorgänge ermöglicht. Vor diesem Hintergrund bietet die Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode auf die Modellierung von Geweben und Gewebemembranen zwei interessante Aspekte, die ein daraus entstehendes Gewebemodell von den bisherigen Modellansätzen unterscheidet. Zum einen kann die DEM als effiziente Lösungsmethodik für ein Modell mit direkter Mikrostrukturrepräsentation verwendet werden, das auf den bewährten abstrakten Darstellungen der Fadenverläufe basiert und somit das komplexe Verformungsverhalten auf Strukturebene direkt abbildet. Andererseits bietet dieser Ansatz die Möglichkeit, den Versagensvorgang in seiner diskreten und von inhärenter Unordnung geprägten Natur realitätsnah abzubilden.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll ein Modell für Gewebemembranen entwickelt werden, welches auf einer direkten Repräsentation der Fadenstruktur basiert. In Anlehnung an bewährte abstrahierte Mirkostrukturmodelle von Geweben soll eine diskrete Darstellung im Rahmen der Diskrete-Elemente-Methode erarbeitet werden. Das Ziel eines ersten Arbeitsschrittes ist es, das auf der Strukturebene beobachtete nichtlineare Verformungsverhalten, welches durch die typischen Gewebemechanismen hervorgerufen wird, durch einfachere Ansätze auf der Mikrostrukturebene abzubilden. Mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen an geeigneten Modellmaterialien soll hierzu der Nachweis der Anwendbarkeit des Modells und eine Demonstration des Vorgehens zur Bestimmung der relevanten Modellparameter erfolgen. Basierend auf der korrekten Wiedergabe des Materialverhaltens bei verschiedenen Belastungen soll in einem zweiten Teil der Arbeit die Erweiterung des Gewebemembranmodells auf das Versagensverhalten erfolgen. Durch die Identifikation und Implementierung von geeigneten Versagenskriterien entsteht dabei ein Modell, welches in physikalisch motivierter Weise die stochastischen Einflüsse von Unordnungen der Geometrie- und Materialkennwerte im Rahmen einer anwendungsnahen Berechnung auf Strukturebene ermöglicht. Die relevanten Einflüsse der Fadenstruktur auf das Versagen, beispielsweise durch lokale Lastumlagerungsmechanismen aus der Interaktion von Faden und Beschichtung, resultieren dabei ohne weitere Modellannahmen aus der gewählten Mikrostrukturdarstellung und ihrer Versagenskriterien. Als Ergebnis der Arbeit soll dann ein Modell für Gewebemembranen entstehen, mit dem sich das komplexe durch Mikrostruktureffekte dominierte Verformungs- und Versagensverhalten realitätsnah untersuchen lässt. Durch die Repräsentation der Fadenstruktur können damit im Rahmen der Berechnungen von Bauteilen und Strukturbereichen die Vorgänge und Interaktionen bei eintretendem Materialversagen berücksichtigt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil wird im Rahmen der Kapitel 2-4 das Verformungsverhalten von Gewebematerialien ohne Schädigung betrachtet, der zweite Teil behandelt dann in Kapitel 5 die Versagensvorgänge.

Im folgenden zweiten Kapitel erfolgt die Einführung in das Themengebiet der Gewebemembranen. Es umfasst neben den Anwendungsbereichen und Eigenschaften auch einen Überblick über die Versuchsmethodiken zur Membranprüfung und den Stand der Forschung zur Modellierung des Verformungsverhaltens der Gewebemembranen. Darüber hinaus wird anhand des Dreiecksmodells ein Beispiel für die abstrahierte mathematische Beschreibung eines Mikrostrukturmodells dargestellt.

Das dritte Kapitel befasst sich dann mit der Modellbildung im Rahmen der Diskrete-Elemente-Methode. Nach einer kurzen Vorstellung der DEM wird die diskrete Beschreibung der Gewebestruktur erarbeitet und die Implementierung des entstehenden Modells näher erläutert. Anschließend an eine Verifikation der Implementierung und eine kurze Validierung des Modells werden anhand einiger Anwendungsfälle das Modellverhalten und die Einflüsse der verwendeten Parameter des Gewebemodells untersucht. Den Abschluss der Modellbildung bilden die Erweiterung auf beschichtete Gewebe und einige Untersuchungen des resultierenden Gewebemembranmodells.

Die Untersuchung realer Gewebematerialien und die Demonstration einer Modellanpassung stellen den Kern des vierten Kapitels dar. Anhand von drei Modellmaterialien, die den Bereich vom reinen Gewebe über eine flexible Gewebemembran bis hin zu einer gewebeverstärkten Platte abdecken sollen, wird in einigen experimentellen Untersuchungen das grundlegende Materialverhalten ermittelt. Auf Basis dieser Versuchsergebnisse erfolgt dann die sukzessive Anpassung des Gewebemembranmodells. Die erfolgreiche Modellanpassung dient dabei zum einen als Validierung, andererseits soll damit eine mögliche experimentelle Vorgehensweise zur Parameterbestimmung demonstriert werden.

Nachdem in den Kapiteln 2-4 das Gewebemembranmodell zur Simulation des Verformungsverhaltens entwickelt und getestet wurde, erfolgt darauf aufbauend in Kapitel 5 die Untersuchung des Versagensverhaltens. Nach einer Darstellung der grundlegenden Versagensmechanismen und einiger spezieller Methodiken zu ihrer experimentellen Untersuchung wird ein Überblick über existierende Modellansätze zur Beschreibung der Schädigung und des Versagens von Gewebemembranen gegeben. Anschließend werden erste Versagenskriterien in das Modell implementiert. In den folgenden Modellanwendungen werden die stochastischen Einflüsse der gewählten Modellierung betrachtet und die Interaktionen der Mikrostruktur bei verschiedenen Belastungsarten und Materialkonfigurationen untersucht. Die Simulation eines Berstversuchs als realitätsnaher Anwendungsfall schließt die Arbeit ab.