

Experimentelle Analyse und Simulation der Verformung luftgefüllter textiler Hüllen

Von der Fakultät

Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Achim Vohrer

geboren in Reutlingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Heinrich Planck

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger

Tag der mündlichen Prüfung: 18.10.2013

Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf

der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf
Wissenschaftliche Institute in Verbindung mit der Universität Stuttgart

Dezember 2012

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf. In besonderem Maße danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinrich Planck, der mich durch seine fachlichen und methodischen Hinweise sowie das von ihm geschaffene Umfeld am Institut unterstützt und geleitet hat. Herrn Dr.-Ing. Thomas Stegmaier, dem Leiter des Arbeitsbereichs Technische Textilien, danke ich für die besondere Arbeitsatmosphäre und für seine überaus hilfreichen fachlichen und methodischen Hinweise.

Die Arbeit ist Teil des DFG Projekts „Experimentelle Analyse und numerische Modellierung der Deformation dehnfähiger Textilien und deren Wechselwirkung auf Tragkörper“, an dem die Forschungsstellen Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der Technische Universität Dresden und der Lehrstuhl für Statik der Technischen Universität München beteiligt waren.

Den Projektpartnern, allen voran Frau Prof. Dr.-Ing. Krzywinski und Herrn Prof. Dr.-Ing. Bletzinger, möchte ich für die ertragreiche und fachlich höchst interessante Zusammenarbeit in der Auseinandersetzung mit den Aufgaben danken.

Allen Mitarbeitenden des Instituts, die mich wissenschaftlich und technisch unterstützten, möchte ich meinen Dank und meine Anerkennung aussprechen. Ohne ihre Motivation und Mitarbeit hätte diese Arbeit nicht stattfinden können.

Besonders danken möchte ich meinen Eltern, die sowohl moralisch als auch ganz praktisch diese Arbeit zuverlässig unterstützt haben.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau Svenja. Sie hat mir über zahllose Stunden hinweg das Arbeiten erleichtert, mir Motivation und Ansporn gegeben und war jederzeit bereit, sich liebevoll um unsere Kinder zu kümmern.

Für Paul, Emil und Johann

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Verformung pneumatisch beanspruchter technischer Textilien. Deren experimentelle Analyse und die anschließende Simulation sind Voraussetzung für die Ermittlung von Zuschnitten aus dreidimensionalen Geometrien. Sie bilden einen Teil deren virtuellen Produktentwicklung für Konstruktionen mit technischen Textilien.

Dieser Aufgabe widmeten sich im Rahmen eines von der deutschen Forschungsgesellschaft geförderten Forschungsprojekts „Experimentelle Analyse und numerische Modellierung der Deformation dehnfähiger Textilien und deren Wechselwirkung auf Tragkörper“, die Forschungsstellen Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) in Denkendorf, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der Technischen Universität Dresden und der Lehrstuhl für Statik der Technischen Universität München.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung mit Innendruck beaufschlagter textiler Hüllen in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften, die Auswertung der ermittelten experimentellen Daten, die Ausarbeitung der Kennwerte für mechanische Materialmodelle und deren Umsetzung und Optimierung in der numerischen Simulation.

Der erste Teil befasst sich mit experimentellen Versuchsaufbauten zum Spannungs-Dehnungsverhalten – sowohl uni- als auch biaxial – und deren mechanischen Grundlagen. Es folgt die Beschreibung und Durchführung von Analysen an mit Innendruck belasteten, zylindrischen Hüllen anhand von drei ausgewählten technischen Textilien. Die Ergebnisse sind in Form von Spannungs-Dehnungsanalysen dargestellt und quantifizieren deren Abhängigkeit von Richtung und Lastfall.

Der zweite Teil beinhaltet die Bestimmung von Kennwerten für das orthotrope Materialmodell. Die Validierung der Analyse mit der Methode der Finiten Elemente erfolgt durch den Vergleich der Berechnungsergebnisse mit dem physikalischen Versuch. Als Beispiele dienen der Wölbversuch und der Schlauchversuch.

Im dritten Teil wird die Konstruktion einer Biaxial-Zugprüfmaschine vorgestellt, die hauptsächlich für die Baubranche wichtige Prüfaufgaben erfüllen wird und über eine außerordentlich hohe Flexibilität verfügt.

Die Arbeit endet mit den Schlussfolgerungen zu Versuchen und Berechnungen sowie einem Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten.

Abstract

This work deals with the deformation behaviour of technical textiles under pneumatic pressure. The experimental analysis and following numerical modelling are basic requirements for developing textile cuts out of the three-dimensional geometries. This is a part of the virtual product development for designing with technical textiles.

To perform this task the DFG research project "Experimental analysis and numerical modeling of the deformation of elastic textiles and their interaction as the supporting body" was founded, to which the research bodies of the Institute of Textile Technology and Process Engineering (ITV) in Denkersdorf, Institute for Textile Machinery and High Performance Materials Technology (ITM) at the Technical University of Dresden and the Chair of Structural Analysis at the Technical University of Munich were involved.

The aim of this work is the study of inflated textile closures in terms of their mechanical properties, the analysis of the obtained data, elaboration of a mechanical material model and its implementation and optimization in numeric simulations.

The first part of this paper includes experimental setups – uniaxial as well as biaxial – and their mechanical basics. Then the description and realisation of the tests on an inflated, cylindrical textile closure follows. The evaluation of test results is shown with three different textile materials. The results are displayed in stress-strain analysis and they quantify the pendency of direction and load case of the textiles.

The second part includes the identification of the specific values for the orthotropic material model. The validation of the Finite-Element-Method analysis is given by relating calculation and the physical tests results. As example several tests, the bulging test and the tubular tensile test are listed.

The third part shows the technical design of a biaxial tensile testing machine, which is primarily developed for testing methods for textiles in the building industry with an extremely high flexibility.

The work is summarized with the conclusions of test results and calculations, and the outlook for future research activities.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	3
Kurzfassung.....	5
Abstract.....	6
Abkürzungsverzeichnis.....	9
1. Einleitung.....	12
2. Ziel und Lösungsweg.....	15
3. Stand der Technik.....	17
3.1 Definition „Technische Textilien“.....	17
3.2 Geometrieabwicklung und Formfindung.....	17
3.3 Schnittmustererzeugung.....	19
3.4 FEM-Berechnung für Ingenieuraufgaben.....	21
3.5 Mechanische Materialmodelle für Textilien.....	22
3.6 Prüftechnik für technische Textilien.....	25
3.7 Zusammenfassung.....	26
4. Modellbildung für textile Flächen.....	27
4.1 Mechanische Grundlagen.....	27
4.2 Strukturbezogenes Materialmodell textiler Flächen.....	32
5. Übersicht der Zugversuche.....	36
5.1 Der uniaxiale Zugversuch.....	36
5.1.1 Die kontinuierliche Zugbelastung.....	36
5.1.2 Die Vorreckung.....	37
5.1.3 Die Zeitabhängigkeit der Deformation.....	37
5.1.4 Der diskontinuierliche Zugversuch.....	38
5.2 Der biaxiale Zugversuch.....	39
5.2.1 Biaxialer Zugversuch an der ebenen Probe.....	39
5.2.2 Biaxialer Zugversuch am Schlauch.....	41
6. Biaxialer Zugversuch am Schlauch.....	43
6.1 Versuchsbeschreibung Schlauchversuch.....	43
6.1.1 Auswahl des Prüfmateri als.....	43
6.1.2 Aufbau des Schlauchversuchs.....	44
6.1.3 Probenpräparation.....	47
6.1.4 Versuchsablauf.....	48
6.1.5 Methodendiskussion Schlauchversuch.....	49
6.2 Versuchsauswertung Schlauchversuch.....	50
6.2.1 Mechanische Grundlagen.....	50
6.2.2 Analyse der Messwerte.....	54
6.2.3 Statistik.....	55
6.2.4 Unidirektionale Auswertung.....	56
6.2.5 Bidirektionale Auswertung.....	58
6.2.6 Vergleich der Versuchsverfahren.....	60
6.2.7 Scherung.....	61
6.2.8 Vorreckung.....	64
6.2.9 Zusammenfassung der Modulermittlung.....	65
6.3 Nahtschlauchversuch.....	67
6.3.1 Versuchsablauf.....	67
6.3.2 Auswertung des Nahtschlauchversuchs.....	68
6.4 Versuch „gekrümmter Schlauch“.....	70
6.4.1 Versuchsaufbau.....	70
6.4.2 Herstellung der Proben.....	71

6.4.3	Versuchsdurchführung.....	73
6.4.4	Versuchsauswertung.....	74
7.	Berechnungsbeispiele.....	76
7.1	Der Wölbversuch.....	76
7.1.1	Versuchsbeschreibung Wölbversuch.....	76
7.1.2	Vergleichende Berechnung.....	76
7.1.3	Versuchs- und Berechnungsergebnisse.....	78
7.2	Der Schlauchversuch.....	80
7.2.1	Implizite Berechnung	80
7.2.2	Explizite Berechnung.....	82
7.2.3	Berechnung der Verformung 45° zur Faserrichtung.....	84
7.2.4	Diskussion der Berechnungsergebnisse.....	86
8.	Die Biaxial-Zugprüfmaschine.....	88
8.1	Konzipierung der Biaxial-Zugprüfmaschine.....	88
8.2	Beschreibung der Konstruktion.....	89
8.3	Versuchsplanung.....	90
9.	Zusammenfassung und Ausblick.....	91
	Literaturverzeichnis.....	94
	Anhang.....	102
	Lebenslauf.....	112

Abkürzungsverzeichnis

Nomenklatur

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
ABAQUS	SIMULIA ABAQUS®: FEM-Software der Fa. Dassault Systems, Vélizy-Villacoublay, Frankreich, www.simulia.com
ANSYS	ANSYS®: FEM-Software der Fa. ANSYS, INC., Canonsburg, USA, www.ansys.com
Biax	Zugversuch, bei dem in zwei Richtungen gleichzeitig gezogen wird
BSS	Bezugsstoff Polstersitz (kaschierte Maschenware), vom ITM gestellt
CAD	Computer Aided Design
CATIA	CATIA®: CAD-Software der Fa. Dassault Systems, Vélizy-Villacoublay, Frankreich, www.3ds.com
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN EN ISO	Deutsche / Europäische / Internationale Norm
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
EDO	Explizit dynamische FEM-Berechnung, orthotropes Materialmodell
FEM	Finite-Elemente-Methode
Fixogum	Fixogum®: ein Klebstoff der Marabu GmbH & Co. KG, Tamm, Deutschland
HF	Hochfrequenz
ITM	Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der technischen Universität Dresden
ITV	Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf
LS-DYNA	LS-DYNA®: FEM-Software der Fa. LSTC, Livermore, USA, www.lstc.com

MARC	MARC®: FEM-Software der Fa. MSC-Software Santa Ana, USA, www.mscsoftware.com
Monoax	monoaxialer Zugversuch mit biaxialer Vorspannung
PADMAKER	PADMAKER®: FEM- Software der Fa. CES-Eckard, Stuttgart, Deutschland, www.ces-eckard.de
PES	Polyethersulfon
PVC	Polyvinylchlorid
TU	Technische Universität
Uniax	Uniaxialer Zugversuch (Streifenzugversuch)
VS	beschichtetes Gewebe DURASKIN® Typ I der Fa. VERSELDAG INDUTEX GmbH, Krefeld, Deutschland
WTN	unbeschichtetes Gewebe (Fallschirmseide) der Fa. SR Webatex GmbH, Bayreuth, Deutschland

Formelzeichen

α	Konstante; Winkel; Rayleigh-Massendämpfung
β	Konstante; Rayleigh-Steifigkeitsdämpfung
δ	Ableitungsoperator
γ	Winkel, Winkeländerung oder Verzerrung
ε	Dehnung, Indizes geben Richtungsabhängigkeit an
ν	Querkontraktionszahl, Indizes geben Richtungsabhängigkeit an
Φ	Winkel
σ	Spannung, Indizes geben Richtungsabhängigkeit an
a	Konstante der Nachgiebigkeitsmatrix, Indizes geben Richtungsabhängigkeit an
d	Durchmesser, Indizes geben den Lastzustand an; Breite
E	E- oder Elastizitätsmodul, Indizes geben Richtungsabhängigkeit an
F	Kraft, Indizes geben den Lastzustand an

G	G- oder Schubmodul, Indizes geben Richtungsabhängigkeit an
h	Wölbhöhe
l, dL	Länge, Längenänderung, Indizes geben den Lastzustand an; Kreisabschnitt
p	(Luft)druck
r	Radius, Indizes geben Winkellage oder Druck an
S	Nachgiebigkeitsmatrix, Spannung
U	Umfang
x,y,z; 1,2,3; X,Y,Z	Richtungen im Koordinatensystem

1. Einleitung

In der textilen Konfektion sind Belegen und Bespannen geometrisch komplexer Tragkörper sowie die Entwicklung pneumatisch gestützter Strukturen häufig vorkommende Aufgaben, z.B. bei der Produktion von Automobilinterieur und textilen Gebäudehüllen. Die Verformung von Textil und Tragkörper bedingen sich durch mechanische Wechselwirkung gegenseitig. Der Zuschnitt der textilen Hülle wird vorwiegend empirisch ermittelt, da keine ausreichend genauen Berechnungsverfahren bekannt sind. Ein wichtiger Schritt hin zur virtuellen Produktentwicklung konfektionierter technischer Textilien ist somit die Weiterentwicklung geeigneter Prüfverfahren zur Erfassung der erforderlichen mechanischen Kenngrößen. Typische Anwendungen und die relevanten mechanischen Kennwerte technischer Textilien für die oben genannten Aufgaben sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Erforderliche Kenngrößen für die Berechnung und typische Anwendungen zum Belegen und Bespannen von Tragkörper mit technischen Textilien

Aufgabe	Belegen	Bespannen		
		quasi inkompressibel (starr)	kompressibel	pneumatischer Druck
Tragkörper	quasi inkompressibel (starr)	quasi inkompressibel (starr)	kompressibel	pneumatischer Druck
Erforderliche mechanische Kenngrößen des Textils	Biegesteifigkeit, reine Schersteifigkeit	Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl, Schersteifigkeit	Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl, Schersteifigkeit	Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl, Schersteifigkeit
Erforderliche mechanische Kenngrößen des Tragkörpers	-	-	Kompressionsmodul	pneumatischer Druck
Typische Anwendung	Faserverbundwerkstoffe, Drapiervorgang	Fahrzeug Interieur	Polsterbezüge	Luftgefüllte Gebäudehüllen und Bauten, gasgefüllte Geometrien in der Luft- und Raumfahrt

Dabei bedeuten:

- reine Schersteifigkeit: relative Winkeländerung von Kett- und Schussfäden eines Gewebes ohne Belastung in Faserrichtung, meist im sogenannten Scherrahmen ermittelt [PAB 08, BAL 07].
- Schersteifigkeit: relative Winkeländerung von Kett- und Schussfäden eines Textils mit Belastung in Faserrichtung, meist im Zugversuch unter 45°-Winkel oder in ähnlichen Zugversuchen ermittelt [BÖG 04].

Für die Ermittlung der in Tabelle 1 genannten mechanischen Kenngrößen steht mittlerweile ein umfangreiches Instrumentarium empirischer und rechnerischer Methoden zur Verfügung. Sie sind dazu geeignet, die Konfektionierung technischer Textilien zu erleichtern.

Besondere Bedeutung hat die Berechnung für die Entwicklung pneumatisch beaufschlagter textiler Hüllen (rechte, grau hinterlegte Spalte in Tabelle 1), da der pneumatische Druck die Hülle ausformt. Wenn die virtuelle Entwicklung einer konfektionierten Konstruktion gefordert ist, dann sollte eine Vorgehensweise in folgenden Schritten vorgenommen werden:

1. Konstruktion der gewünschten Hülle als Flächengeometrie im 3D-CAD.
2. Überprüfung der Ausformung der Geometrie anhand einer FEM-Berechnung mit geeignetem Materialmodell und geringem Druck, sodass eine Formänderung lediglich infolge des Drucks zustande kommt.
3. Festlegung des Nahtverlaufs und entsprechende Unterteilung der Flächengeometrie.
4. Erzeugung einer Abwicklung der einzelnen Flächenteile und Festlegung der Faserrichtungen des beschichteten Textils in den Schnittteilen.
5. Iterative Optimierung der Schnittteile anhand erneuter FEM-Berechnung mit den speziellen mechanischen Eigenschaften des zu verwendenden Textils, die durch das geeignete Materialmodell zugeordnet sind. Die Abwicklung wird für diesen Vorgang virtuell auf die Hüllgeometrie aufgezogen und die Geometrie der Abwicklung soweit angepasst, dass die entstehenden Kräfte in Normalenrichtung zur Fläche den Kräften eines zuvor festgelegten pneumatischen Drucks entsprechen.
6. Die auf diese Weise optimierte Abwicklung dient als Schnittmuster, mit der die einzelnen Schnittteile unter Berücksichtigung der Orientierung hergestellt und anschließend gefügt werden.
7. Die so gefertigte komplette Hülle wird zuletzt mit pneumatischem Druck beaufschlagt und die sich bildende Geometrie mit der konstruierten verglichen.

Der unter Punkt 5. beschriebene Vorgang setzt Optimierungsalgorithmen voraus, die aus ähnlichen Aufgaben aus dem Maschinenbau bekannt sind. Da es sich um ein iteratives Verfahren handelt, wird es nicht gelingen, die Spannungen in jedem Punkt exakt zu abbilden. Demzufolge wird die tatsächliche Geometrie von der ursprünglich gedachten in gewissen Grenzen abweichen. Die Grundlage zur Optimierung eines Schnittmusters ist ein hinreichend genaues Materialmodell, welches die Spannungs-Dehnungsbeziehung des Textils beschreibt. Diese Mechanik der Verformung des textilen Werkstoffs ist komplex, weshalb die Schnittmuster bisher noch empirisch ermittelt werden.

Das Ergebnis hängt dabei stark vom Geschick des Handwerkers ab und in der Regel wird die gewünschte Geometrie nicht exakt erreicht. Die ist für viele Anwendungen (z.B. temporäre Bauten, Fassadenelemente, Luftschiffe) auch nicht erforderlich. Eine faltenfrei ausgeformte textile Hülle ist daher recht selten zu finden.

2. Ziel und Lösungsweg

Das Ziel dieser Arbeit, die im Rahmen des DFG-Vorhabens DFG-PL-120/19-2 durchgeführt wurde, ist es, die mechanischen Kennwerte für die Materialmodellierung technischer Textilien für rechnergestützte Konstruktion und Berechnung in pneumatisch gestützten Strukturen (siehe grau hinterlegte Spalte in Tabelle 1, Kapitel 1.1) und ihrer Wechselwirkung für Abwicklung und Zuschnitt gesamtheitlich zu erfassen und durch experimentelle Untersuchungen abzusichern. Dazu ist es einerseits notwendig, in dem zu prüfenden Textil im Versuch anwendungsgerecht biaxiale Spannung durch pneumatischen Druck und Zugkräfte derart zu erzeugen, dass eine Auswertung der Verformung richtungs- und lastfallabhängig möglich ist. Andererseits ist eine Auswahl unterschiedlicher, in diesem Anwendungsbereich typischer Materialien zu treffen, um dem Spektrum der Vielfalt technischer Textilien und deren spezifischen Verformungsverhalten gerecht zu werden. Auch sollte es dadurch möglich sein, die Ergebnisse auf artverwandte Aufgaben zu übertragen.

Die zu ermittelnden Kennwerte sollen linearisiert und zusammengefasst die Grundlage für ein orthotropes Materialmodell für numerische Berechnungen mit Hilfe handelsüblicher FEM-Software bilden. Unterschiedliche Berechnungsbeispiele im Kontext mit den physikalischen Versuchen sollen die Genauigkeit der eingesetzten Materialmodelle überprüfen und darüber hinaus eine Aussage zu den Vereinfachungen in der Materialmodellierung ermöglichen. In Summe entsteht dadurch ein Eindruck von den Möglichkeiten der Berechnung von Spannung und Verformung technischer Textilien auf Grundlage eines orthotropen Materialmodells.

Zur Untermauerung der Ergebnisse sollen parallele Forschungsaufgaben der Partnerinstitute dienen:

- Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der Technische Universität Dresden: Untersuchungen zur Bespannung kompressibler Tragkörper,
- Lehrstuhl für Statik der Technischen Universität München: Untersuchung ergänzender numerischer Verfahren für materialgerechte, virtuelle Zuschnittsermittlung von textilen Hüllen und ihre Wechselwirkung mit kompressiblen Tragkörpern.

Das Gesamtziel aller Untersuchungen ist die Entstehung einer geschlossenen Prozesskette zur Entwicklung konfektionierter textiler Produkte mittels Verknüpfung der 3D-Konstruktion mit 2D-Zuschnitten.

Die Ergebnisse der Projektpartner sind in dieser Arbeit nicht enthalten. Die Ausnahme bilden die biaxialen Zugprüfungen des ITM, die zur Validierung des Schlauchversuchs dienen. Der Projektpartner ITM hat zugestimmt, dass die Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit mitverwendet werden dürfen.

Wird eine textile, luftdichte Hülle mit pneumatischem Innendruck beaufschlagt, entsteht deren Ausformung durch stets in Normalenrichtung zur Fläche wirkende Kräfte. Diese Belastung senkrecht auf die Fläche wird durch reine Zugkräfte im Textil abgetragen. Sie führen zu Spannung und Scherung in der Fläche, und damit zu deren Verformung. Der Tragkörper „Luft“ führt zunächst zur vollständigen Ausformung der Hülle. Zu diesem Zeitpunkt ist die Wechselwirkung der genannten Kräfte im Gleichgewicht. Soll die Hülle eine zuvor konstruierte Geometrie annehmen, so impliziert dies die Bestimmung des Zuschnitts unter der Berücksichtigung der Verformungseigenschaften des Textils, die in einem mechanischen Materialmodell zu definieren sind.

Da der Zuschnitt des Textils in der Ebene stattfindet, ist die Abwicklung entscheidend für die Konfektion der Hülle. Für die Entwicklung des Zuschnitts müssen in der Abwicklung die unter der Druckbelastung entstehenden Spannungen und Verformungen berücksichtigt werden. Es ist somit notwendig, dem Belastungsvorgang ein Materialmodell zugrunde zu legen, durch das die Hülle bei festgelegter Nahtlage unter bestimmtem Luftdruck die konstruierte Geometrie erreicht. Wenn sich dieses Materialmodell genau genug bestimmen lässt, dann sollte dies als ein wesentlicher Baustein für die numerische Berechnung der textilen Körper und deren Abwicklung herangezogen werden.

Für die Berechnung einer pneumatisch ausgeformten textilen Hülle ist somit der Genauigkeitsgrad des Materialmodells wesentlich entscheidender als für die Berechnung der Bespannung starrer oder kompressibler Tragkörper, da mit der Wahl des Zuschnitts die resultierende Geometrie erheblich variiert (siehe Kapitel 6.4). Dennoch bilden bei beiden Anwendungen die mechanischen Ereignisse die Grundlage für numerische Berechnungen. Deshalb ist es aus Sicht anwendungsgerechter Szenarien berechtigt, die technische Mechanik von textilen Materialien für beide Fälle gemeinsam zu betrachten, so wie in dem erwähnten Forschungsprojekt geschehen.

Die Vorgehensweise ist dabei prinzipiell einheitlich: In einem physikalischen Versuch werden Spannung und Dehnung einer textilen Membran erfasst. Diese werden richtungs- und lastfallabhängig in Spannungs-Dehnungsdiagrammen aufgetragen und so Kennwerte für die Definition des Materialmodells ermittelt. Die Validierung der Materialmodellierung erfolgt durch die Berechnung von Beispielen, in denen unterschiedliche Geometrien mit pneumatischem Druck beaufschlagt werden. Der direkte Vergleich von Versuch und Berechnung gibt Einblick in die Genauigkeit der Definition der Materialmodelle und liefert dadurch Ansatzpunkte für weitere Optimierungen.

3. Stand der Technik

3.1 Definition „Technische Textilien“

Technische Textilien werden im Allgemeinen unter dem Gesichtspunkt der Funktionalität konstruiert, denn in erster Linie müssen sie definierte anwendungsbezogene Spezifikationen erfüllen [PLA 04]. Technische Textilien werden daher oft auch als „funktionale Textilien“ bezeichnet. So ist beispielsweise bei textilen Gebäudehüllen die Funktion in Dach- und Wandfunktion unterteilt und bietet Schutz vor Sonne, Wind, Regen etc.. Die notwendige mechanische Eigenschaft dafür ist, dass das Textil eine solche Form annimmt, die dem geringsten Spannungszustand entspricht und somit die Spannungen aufnimmt, die sich beispielsweise aus einer pneumatischen Druckbelastung ergeben. Als erste Aufgabe stellt sich dabei die Formfindung, die aufgrund der Belastungsart besonderen Gesetzen unterliegt. Ferner ist die geometrische Abwicklung der gewonnenen Form in eine Ebene notwendig, welche die Grundlage zur Erzeugung eines Schnittmusters bildet. Zur Darstellung der Wechselwirkung von Druckbelastung, Zugkräften und -spannungen, sowie der Verformung der Hülle eignet sich die Methode der finiten Elemente. Im Hinblick auf das Materialmodell müssen die passenden Materialkennwerte über geeignete Versuchstechniken ermittelt werden.

3.2 Geometrieabwicklung und Formfindung

Die Abwicklung einer geometrischen Fläche im Raum erfolgt durch die Projektion oder Transformation eines die Fläche überspannenden Netzes in eine Abwicklungsebene. Die Verfahren sind in der Kartennetzentwurfslehre [KUN 90] beschrieben. Wenn es sich um einfach gekrümmte Flächen handelt, bleiben die Längen der Netzkurven und der Flächeninhalt gleich. Das ist beispielsweise bei Kegel- oder Zylinderflächen der Fall: man nennt die Fläche abwickelbar. Nicht abwickelbare Flächen sind hingegen doppelt gekrümmt. Das Abwickeln solcher Flächen ist in mathematisch exakten Algorithmen beschrieben. Das Problem ist dabei, dass nicht alle Flächeneigenschaften erhalten bleiben können. Da solche Flächen in der Regel dennoch mit konfektionierten technischen Textilien belegt oder bespannt werden können, liegt es nahe, diese Abwicklungsalgorithmen näher zu betrachten. Dafür stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Das Projektionsverfahren: Die Fläche wird auf eine ebene oder einfach gekrümmte Fläche (Zylinder- oder Kegelfläche) projiziert und bildet dadurch die Abwicklung. Dafür müssen Projektionsursprung und die Bildfläche im Vorfeld gewählt werden, was den Erhalt der Flächeneigenschaften erheblich beeinflusst.

- Das Transformationsverfahren: Durch Dehnen oder Stauchen in den Koordinatenrichtung wird die ursprünglich gekrümmte in eine ebene Fläche (Abwicklung) transformiert, was auch als „Umbeziffern“ bezeichnet wird [KUN 90]. Die Bedingungen für diese Möglichkeit der Abwicklung beeinflussen ebenfalls den Erhalt der Flächeneigenschaften.

Die wesentlichen Flächeneigenschaften in Bezug auf die Abwicklung sind:

- Die längentreue Abwicklung: In keinem Punkt und in keiner Richtung der Fläche erfährt ein inkrementelles Kurvenelement in der Abwicklung eine Verzerrung. Das ist nur dann möglich, wenn die Fläche abwickelbar ist.
- Die linientreue Abwicklung: Ist die Fläche nicht abwickelbar, so kann in einer Koordinatenrichtung die Länge der Netzlinien erhalten bleiben. In der anderen Koordinatenrichtung ändert sich diese dann zwangsläufig.
- Die flächentreue Abwicklung: Der Flächeninhalt stimmt mit der Abwicklung überein. Diese Option ist exakt dann gegeben, wenn die längentreue Abwicklung vorliegt. Ansonsten ist die flächentreue Abwicklung nur durch Verzerrungen zu erzwingen.
- Die konforme oder winkeltreue Abwicklung: Es tritt keine Winkelverzerrung in der Abbildung der Netzlinien auf. Die Linientreue ist somit bei nicht abwickelbaren Flächen nicht mehr gegeben, wodurch sich der Flächeninhalt ändert.
- Vermittelnde Abwicklung: sie ist weder winkel- noch generell linientreu, bietet aber die Möglichkeit, möglichst geringe Abweichung des Flächeninhalts vom Original hin zur Abwicklung zu erzeugen.

Allgemein nennt man die Abweichungen „Verzerrungen“, sie lassen sich auf Reduktionen zurückführen, die in der Kartographie allgemein für Kurven als Längen- und Richtungsreduktion und für Flächen als Flächenreduktion definiert sind. Dies gilt für beliebige Netze, die die Fläche überspannen.

Daraus ergibt sich ein vorteilhafter Ansatz im Hinblick auf die Methode der finiten Elemente: die Fläche wird zunächst mit einem Netz aus finiten Elementen approximiert. Die Randkurve der Fläche besteht dann aus einer Schar von aneinandergereihten Geradenstücken. Die Abwicklung entsteht durch Projektion oder Transformation der Elemente in eine Ebene. Jedes Element erfährt die o.g. Verzerrungen. Wenn die vermittelnde Abwicklung berechnet wird, dann wird in der Regel das Prinzip der minimalen Gesamtverzerrung verwendet. Dadurch wird zwar eine minimale Abweichung des Flächeninhalts erreicht, es entstehen aber in der Konfektion unerwünschte Differenzen in der Nahtlänge zweier benachbarter Abwicklungsteile.

Die Abwicklungsverfahren müssen somit im Kontext der Anwendung betrachtet werden. Maßgebliche Faktoren sind dabei die geometrische Konstruktion, das Spannungsspektrum sowie die Festigkeitseigenschaften des textilen Materials. Deshalb werden noch weitere Methoden zur Entwicklung einer Abwicklung betrachtet.

So führt im Bereich „textiles Bauen“ die sogenannte „Papierstreifenmethode“ zu guten Ergebnissen. Dabei betrachtet man große Geometrien mit wenig Krümmung. Bei freitragenden Konstruktionen („weitgespannte Flächentragwerke“ [SFB64 84]) wird zunächst die geodätische Form ermittelt. Bei dieser Formfindung spielen die Kontur des Randes, die Verteilung von Hochpunkten und die Membranspannungen eine entscheidende Rolle. Die Geometrie resultiert aus dem Gleichgewicht der Membranspannung mit den Randkräften. Die Fläche wird dann mit Papierstreifen angenähert und man erhält somit die Abwicklung.

Seit längerem werden neben experimentellen Methoden numerische Verfahren zur Formfindung genutzt [BRE 03]. Ebenso sind numerische Verfahren für die Festlegung der Lage der Zuschnittstreifen auf der Membranfläche, deren Abwicklung und die damit verbundene Verformungskompensation verfügbar [MEM11]. Aber auch hier bestehen methodische Defizite, die durch erfahrungsbasierte Annahmen bei der Kompensation der Dehnung des Textils ausgeglichen werden.

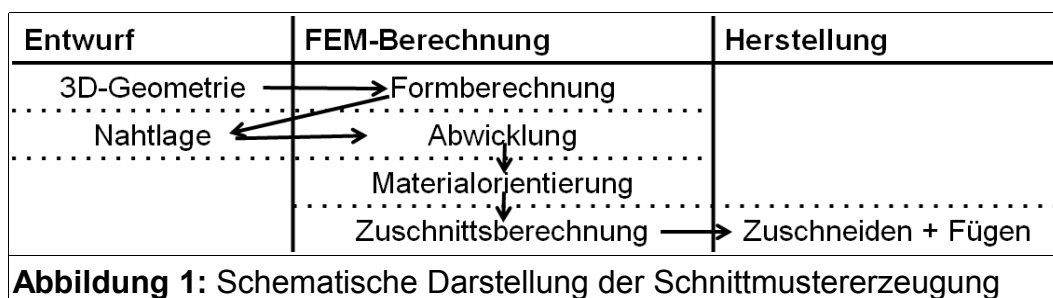
Ein weiteres Beispiel zur Streifenmethode ist die Abwicklung der Zigarrenform eines Luftschiffes [BÖG 04], bei der reine Scherung der textilen Fläche die Verformung erzeugt. Ähnliche Vorgehensweisen findet man bei temporären und nichttemporären, luftgefüllten Bauten [REE 01] oder gasgefüllten Geometrien in der Luft- und Raumfahrt.

3.3 Schnittmustererzeugung

Zur Entwicklung eines Schnittmusters muss die Kompensation der Materialeigenschaften des Textils in die Berechnung mit einfließen. Es wird deshalb derzeit grundsätzlich folgendermaßen vorgegangen:

1. Formfindung der räumlichen Fläche aus der Gleichgewichtsform von Flächenspannung und Randkräften und Festlegung der Nahtlage.
2. Rein geometrische Abwicklung der Fläche in die Ebene, evtl. auch in Streifen.
3. Übertrag der Flächenspannungen aus der 3D-Fläche in die Abwicklungsebene.
4. „Wegnehmen“ der Spannungen über die Kompensation anhand der Materialeigenschaften mit der Option gleicher Nahtlängen zweier benachbarter Schnittteile. Dadurch schrumpft die Fläche, ausgehend von der Orientierung der Kett- und Schussrichtung des Textils im Schnittmuster.

Die rein geometrischen Verzerrungen, die bei der Abwicklung entstehen, sind dabei nicht berücksichtigt. Die allgemeine Vorgehensweise ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Die Reihenfolge von Abwicklung und Materialorientierung kann durchaus auch vertauscht werden.



Die praktischen Ergebnisse ähnlicher Berechnungen zeigen jedoch oftmals noch Qualitätsdefizite (Falten, lokal zu große oder zu geringe Spannung in der Hülle), wie sie im Fall einer Zuschnittsberechnung für Pilgerzelte [MON 99] beschrieben sind. Ursachen sind unter anderem die zu geringen Abmessungen der Schnittteile sowie Störstellen in Form von Nähten, Anknüpf- oder Abhängpunkten und Ausschnitte in der Fläche.

Im Bereich Bekleidungstechnik, vor allem in der Maschen- und Konfektionstechnik, sowie in der Medizintechnik erzeugen meist geringe Spannungen große Dehnungen des Materials. Die Geometrie weist oft sehr starke Krümmungen auf. Die Krümmungsdifferenzen können lokal hohe Werte erreichen. Die Formfindung der ebenen Zuschnitte ist hier in besonders hohem Maß von der Nahtlage abhängig. Die Streifentheorie macht hier, mit Ausnahme von Sonderfällen, aufgrund der starken Krümmungsänderung keinen Sinn. Auch die Anwendung der erwähnten Projektionsverfahren führt im Allgemeinen zu keinen brauchbaren Ergebnissen. Deshalb wird meist nach dem bereits beschriebenen Transformationsverfahren über die Vernetzung gearbeitet [KRZ 04]. Da jedoch bei Bekleidung der Tragekomfort eine bedeutende Rolle spielt, sollte zumindest für körpernahe Bekleidung die Spannung in der textilen Fläche möglichst gleichbleibend sein. Dies führt oft zu Schwierigkeiten, da die eingesetzten Materialien, hauptsächlich Maschenwaren, in ihrem Deformationsverhalten sehr stark anisotrop sind.

Ein Sonderfall bildet die bereits in den Herstellungsprozess einer textilen Ware integrierte Formgebung. Man spricht dabei von 3D-Gestricken oder 3D-Geweben [HU 96]. Die Abwicklung wird dabei über Linien erzeugt, da diese dem Herstellungsprozess am nächsten kommen. Teilweise werden die Linien als „Höhenlinien“, also parallele Schnitte durch die 3D-Geometrie, erzeugt. Eine mathematische Beschreibung liegt dafür vor [NG 97].

Die derzeit noch unbefriedigende Situation der virtuellen Ermittlung von Schnittmuster erklärt sich unter anderem daraus, dass es sich um eine inverse Aufgabe handelt mit den dafür typischen mathematischen und numerischen Problemen bei ihrer Formulierung und Lösung. Zur Berücksichtigung der Materialeigenschaften textiler Werkstoffe werden oft lineare Berechnungsmethoden nach dem Hook'schen Gesetz verwendet, mit denen von der vorgegebenen Geometrie des Endprodukts auf den Zuschnitt geschlossen wird. Die Ergebnisse sind zweifelhaft, da Anfangs- und Endzustände betrachtet werden, aber die tatsächlich herrschenden Spannungen im Endzustand aufgrund fehlender Informationen über die Randkräfte nur abgeschätzt werden können.

Außerdem ist die lineare, isotrope Approximation der Materialeigenschaften für viele Anwendungen zu ungenau.

3.4 FEM-Berechnung für Ingenieuraufgaben

Im Maschinenbau, im Fahrzeugbau und in der Luft- und Raumfahrttechnik sowie im Bauingenieurwesen werden seit Jahren FEM-Systeme für sehr unterschiedliche numerische Analysen angewandt. Die Materialien Metalle, Kunststoffe, Mineralien, poröse Medien, Fluide etc. und deren Eigenschaften sind intensiv erforscht. Dennoch werden für diese Anwendungsgebiete ständig neue Modelle entwickelt sowie Datenbanken zur Erfassung von Materialkennwerten für die Modelldefinition in FEM-Systemen angelegt und erweitert. Diese Daten werden bei der Lösung statischer und dynamischer Probleme angewendet. Auftretende große Verformungen und Dehnungen erfordern eine komplett nicht-lineare Beschreibung der Geometrie und der zugehörigen Verformungen [HOL 00] und werden anwendungsgerecht implizit oder explizit auch so behandelt.

Die geometrische Nichtlinearität ist darüber hinaus auch für die Beschreibung von Folgelasten, wie z. B. Druck, von entscheidender Bedeutung. Da eine Druckbelastung stets senkrecht auf die verformte Oberfläche wirkt, muss in jedem Berechnungsschritt die Richtung der Druckbelastung angepasst werden, d. h. die Belastung „folgt“ der belasteten Struktur. Bei infinitesimalen Deformationen kann diese Richtungsänderung vereinfachend vernachlässigt werden, jedoch führt die Nichtbeachtung bei auftretenden großen Verformungen zu erheblichen Simulationsfehlern.

Neben der geometrischen Nichtlinearität der Struktur spielt auch das nichtlineare Verhalten des Materials eine große Rolle. So hat der Benutzer in kommerziellen FEM-Programmen (z. B. ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA) die Auswahl aus einer Vielzahl unterschiedlicher Materialmodelle. Jedoch sollten die implementierten Materialmodelle, die meist für einen konkreten Sonderfall entwickelt werden (z. B. Materialmodell für Stahlfaserbeton [THO 06], Ogden-Modell für isotrope gummiartige Werkstoffe [OGD 92]), stets auf ihre Anwendbarkeit auf das konkrete Projekt hin überprüft werden.

3.5 Mechanische Materialmodelle für Textilien

Die Modellierung textiler Eigenschaften wird in makro- und mikromechanische Materialmodelle unterteilt:

- makromechanische Materialmodelle: Es handelt sich um strukturbezogene Materialmodelle (siehe Kapitel 4) und werden i.d.R. durch mehrere Parameter definiert, deren Kennwerte idealerweise aus geeigneten physikalischen Versuchen hervorgehen. Die tatsächliche Struktur eines Gewebes wird im Modell durch ein homogenes Material ersetzt. Im einfachsten Fall ist dieses Materialmodell isotrop. Es wird mit den Parametern „Elastizitätsmodul“ und „Querkontraktionszahl“, sowie der Dichte des Materials beschrieben. Dadurch sind im Modell die materialspezifischen Eigenschaften für jeden Punkt in einer Struktur festgelegt. Textilien sind jedoch inhomogene Werkstoffe, weshalb die mikromechanische Materialmodellierung entwickelt wird.
- Mikromechanische Materialmodelle: In der „Elementarzelle“, der kleinsten, sich beliebig oft wiederholenden Einheit eines Gewebes, werden mechanische Vorgänge abstrahiert und somit der Mikrostruktureinfluss in eine Strukturberechnung integriert. Durch vielfaches Aneinanderreihen der Elementarzelle, also dem Skalieren der Elementarzelle, ergibt sich ein makroskopisches Gewebestück. Die makroskopische Dehnung unter Zugkraftbeanspruchung lässt sich somit berechnen.

Die mikromechanischen Materialmodelle beschreiben in Veröffentlichungen, die sich mit Textilien Bauweisen beschäftigen [BAL 07, REE 01, DUR 03, BOI 01, SFB64 85], das Verhalten von Geweben für die fadenparallele Zugkrafttrichtung [PEI 36, KAW 64]. Die Berechnungen anhand der mikromechanischen Materialbeschreibung bilden die Dehnung des Gewebes sehr gut ab. Es ist aber schwierig, die Kennwerte für die einzelnen Parameter aus Versuchen zu ermitteln, da die Dehnung textiler Flächen von einer Vielzahl von Eigenschaften geprägt sind, die aus der Textiltechnik hervorgehen und von denen die wichtigsten im Folgenden gelistet sind:

- Faserwerkstoff (Natur- und synthetische Faser),
- Art des Garns (z.B. Mono- oder Multifilamentgarn, Stapelfasergarn mit oder ohne Zwirnung oder Texturierung),
- Herstellungsart des Flächengebildes (z.B. Gewebe oder Maschenware),
- Dichte des Garns in der textilen Fläche,
- thermische bzw. chemische Behandlungen in der Veredlung, sowie dem
- Verbund mit weiteren Materialien, wie z. B. Beschichtungen.

Diese Faktoren und deren Wechselwirkung untereinander lassen sich nur bedingt und im mikromechanischen Materialmodell integrieren. Der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des textilen Endprodukts ist jedoch erheblich. Außerdem bewirkt jede kleine Variation eines Kennwertes im mikromechanischen Materialmodell aufgrund der Hebelwirkung der Skalierung im Ergebnis eine große Änderung.

Es sind grundsätzlich folgende mechanische Eigenschaften für Textilien zu beobachten:

- orthotrope, nichtlineare Materialeigenschaften,
- viskoelastisches, elastoplastisches oder unvollkommen elastisches Verhalten,
- teilweise sehr geringe Dehnsteifigkeit, die große Dehnung bei geringen Kräften hervorruft,
- oftmals geringe Biegesteifigkeit im Verhältnis zur Dehnsteifigkeit,
- hohe Scherneigung (Schersteifigkeit in der Fläche, im Textilbau auch als „Verrautung“ bezeichnet),
- Verfestigung bei geringen Dehnungen.

Geht es um die Bespannung oder Belegung von Freiformgeometrien mit textilen Werkstoffen und die Bestimmung ihrer mechanischen Eigenschaften, liegt immer das Prinzip der Gleichheit der Energie zugrunde [JON 77/1, JON 77/2, JON 77/3, JON 78]. Wenn beispielsweise durch Zugbelastung Energie in die textile Fläche eingebracht wird, ist davon auszugehen, dass sie zum Gleichgewicht gelangt durch:

- Dehnung in Kett- und Schussrichtung bei Geweben bzw. Stäbchen- und Reihenrichtung bei Maschenware,
- Scherung in 45° zu diesen Hauptrichtungen,
- Krümmung im Raum, die als Biegung des Textils bezeichnet wird, sowie
- Kompression des Garns, die als Änderung der Dicke der textilen Fläche bezeichnet wird.

Außerdem ist zu beobachten, dass ein Teil der Energie durch innere Reibung im Textil absorbiert wird. Dies führt, betrachtet man den Streifenzugversuch, zu Hysteresekurven, wie sie im Kapitel 5.1.4 in Abbildung 14 dargestellt sind.

Während Dehnung und Scherung infolge Zugkraft relativ einfach zu bestimmen sind, ist die Änderung der Dicke des Materials oft deshalb vernachlässigt, weil die Dehnung in diese Richtung um Größenordnungen kleiner ist als in die anderen beiden Richtungen. Sie ist im Versuch schwer zu erfassen. Wird die Energiebilanz über ein Volumenelement gezogen, ist diese Betrachtung jedoch von Relevanz [GRO 04].

Die Krümmung im Raum, die als Biegung einer textilen Fläche bezeichnet wird, ist normalerweise nur dann von Interesse, wenn keine oder kaum Dehnung in den Faserrichtungen auftritt (siehe Tabelle 1, Kapitel 1). Sie tritt hauptsächlich bei der Erfassung der Drapierbarkeit von technischen Textilien auf [CHR 12].

Alle diese Eigenschaften sind über die Bandbreite unterschiedlicher Textilien mehr oder weniger stark ausgeprägt. Es bleibt daher offen, inwiefern sich die mikromechanische Materialmodellierung aus dem textilen Bauwesen auf andere Bereiche der Textiltechnik übertragen lässt.

Es liegt deshalb nahe, ein makromechanisches Materialmodell zur Berechnung der Verformung textiler Hüllen und deren Wechselwirkung mit unterschiedlichen Tragkörpern sowie zur Berechnung von Schnittmustern zu verwenden oder weiterzuentwickeln. Vorteilhaft ist, dass sich ein solches Materialmodell einfacher auf das gesamte Spektrum technischer Textilien übertragen lässt und idealerweise bereits bekannte Materialmodelle, die in gängigen FEM-Systemen implementiert sind, benutzt werden können. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf eine „schnelle“ Vorberechnung, die oftmals einer exakten Berechnung vorausgehen muss. Es ist zudem wichtig, dass eine Verifizierung der verfügbaren Prüftechnik vorgenommen sowie neue experimentelle Voraussetzungen geschaffen werden, die eine eindeutige Ermittlung der Eingabewerte der einzelnen Parameter im Materialmodell aus den Versuchsergebnissen ermöglichen.

Für textile, konfektionierte Produkte ist diese Entwicklung noch am Anfang, so dass der Einsatz von Simulationswerkzeugen in der textilverarbeitenden Industrie bisher sehr begrenzt ist. Die Verformung der ebenen textilen Fläche hin zu doppelt gekrümmten dreidimensionalen Formen sind mit einem anisotropen Spannungs- Dehnungszustand verbunden. Die zu einer hinreichend genauen Simulation benötigten Kennwerte stehen in der Regel nicht zur Verfügung und konnten bisher aufgrund der unzureichenden Prüftechnik erst ansatzweise für eng begrenzte Anwendungsfelder ermittelt werden (Textile Bauweisen, Passformsimulation von Bekleidung [SEI 07]).

Um Spannung und Dehnung in der textilen Fläche berechnen zu können, wird zunächst die klassische Membrantheorie [GRE 70] herangezogen. Die Mittelfläche einer Membran bildet den Ausgangszustand und bestimmt die Betrachtungsweise in zwei Dimensionen. Zur Beschreibung des Materialverhaltens von textilen Materialien wird von MÜNSCH-REINHARDT [MUR 95] ein Modell entwickelt, das auf der Elastizität und Querkontraktion (richtungsabhängig) und Scherung basiert.

Die Verfeinerung dieser theoretischen Betrachtungen gelingt RAIBLE [RAI 03]. Er geht speziell auf die Anforderungen der Membranen ein und setzt den Materialtensor aus unterschiedlichen Anteilen zusammen. Diese sind, isotropisch, anisotropisch und gekoppelt, von den Invarianten abhängig. Zusätzlich werden Kriterien für die Vorhersage von Verwerfungen (Falten) aufgestellt sowie theoretisch untersucht und anhand von isotropem Material experimentell verifiziert.

Weitere Untersuchungen beschäftigen sich mit dem mechanischen Verhalten von Strukturen unter Druckbeanspruchung [SCH 84, REE 01, SIM 91, SAL 00]. Die Berechnungstheorien und Materialmodelle sind in die Codes kommerzieller Berechnungssysteme integriert [BRU 02, DIE 03].

Viele der oben genannten Phänomene bezüglich dem Verformungsverhalten technischer Textilien (z.B. Verfestigungsverhalten, Elastoplastizität, Anisotropie) sind bereits für andere Materialien, wie beispielsweise Stahl, genauer untersucht [WIE 01, BRI 04, MIN 06]. Sie werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt und sind deshalb nicht weiter ausgeführt.

Eigene Vorarbeiten

In einem Vorversuch wird eine Regelgeometrie (zylindrisches Rohr) mit einer Freiformfläche (gekrümmtes Rohr) gekoppelt (siehe Abbildung 2). Ziel ist, die konstruierte Geometrie aus einer textilen Hülle herzustellen. Um dies zu erreichen, wird dieses Modell als pneumatische Hüllstruktur konzipiert, jedoch ist festzustellen, dass die Biegesteifigkeit des verwendeten Textils (ein Kunstleder) bei diesem Modell weitestgehend zur Formerhaltung genügt.

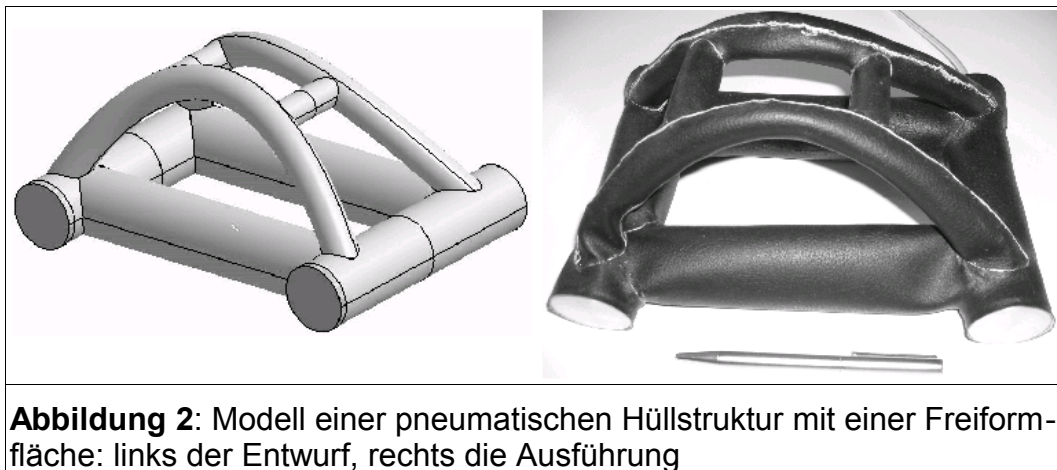


Abbildung 2: Modell einer pneumatischen Hüllstruktur mit einer Freiformfläche: links der Entwurf, rechts die Ausführung

Für die Erzeugung der Abwicklung und des Schnittmusters wird die Software „PADMAKER“ verwendet, die einzelnen Schnittteile mit Klebstoff gefügt und das offene Ende der Zylinder mit Metallscheiben verschlossen sowie ein Anschluss für Druckluft angebracht (Abbildung 2, rechts oben). Das Ergebnis ist, dass der Zuschnitt der abgewickelten Freiformflächen nicht zu den Zylinderflächen passt, was in der Abbildung durch die Falten am gekrümmten Rohr an dessen Enden und dem verringerten Durchmesser in der Mitte ersichtlich ist.

3.6 Prüftechnik für technische Textilien

Die erste biaxiale Zugprüfmaschine ist in der Dissertation von LOSCH [LOS 71] beschrieben. Als Konsequenz der physikalischen Ereignisse, die aus den Versuchen mit dem Versuchsaufbau ermittelt werden, ergeben sich 19 voneinander unabhängige Konstanten. Mit diesen gelingt die Darstellung der Dehnung und Scherung in Abhängigkeit der Spannungszustände für alle Winkel zwischen den Garnrichtungen.

Die Theorie gilt für anisotrope oder orthotrope, nichtlineare, elastische, zweidimensionale Gewebe. In der Zusammenfassung der Arbeit wird darauf hingewiesen, dass sich die Zugkraft-Dehnungsbeziehungen von uni- und biaxialen Zugversuchen deutlich unterscheiden.

Biaxiale Zugprüfmaschinen zur Ermittlung richtungsabhängiger Steifigkeit für Zug- und später für Scherkenntgrößen sind für die Auslegung von textilen Bauten konzipiert [BÖG 04, HAJ 02, ESS 99]. Zur Untersuchung von Geotextilien werden ähnliche Versuchsanlagen genutzt. Die damit ermittelten Kennwerte unterscheiden sich je nach Materialart teilweise deutlich von den mit einer einachsigen Prüfanordnung ermittelten Vergleichswerten [SOT 95]. Eine zusätzliche Aufnahme der Dickenänderung der textilen Fläche an biaxialen Zugversuchsanlagen wird in [HAJ 02] umgesetzt. Ähnliche Prüfeinrichtungen werden auch zur Prüfung von Blechen angewandt [ALB 00]. Mittlerweile werden biaxiale Zugprüfmaschinen als Sondermaschinen von bekannten Prüfmaschinenhersteller angeboten [ZWI 11].

Eine weitere Möglichkeit biaxiale Spannungszustände aufzubauen, sind Versuchsanordnungen mit zylindrischer oder schlauchförmiger Probengeometrie, die mit Innendruck belastet werden [BLU 87]. Bei diesem Versuchsaufbau wird die Probe mit dem hydrostatischen Druck einer Flüssigkeit und zusätzlichen Kräften in Umfangsrichtung belastet. Eine Erweiterung oder Ergänzung dieses oder ähnlicher Prüfverfahren, bei der eine zylindrische Probe mit Druck beaufschlagt wird, konnte in den letzten Jahren nicht beobachtet werden.

3.7 Zusammenfassung

Die Zusammenfassung der Fachliteratur führt zu dem Schluss, dass die Prüftechnik zur Ermittlung der Verformungseigenschaften technischer Textilien mit der mechanischen Theorie nicht Schritt hält. In der industriellen Praxis werden daher zur Ermittlung der orthotropen Steifigkeit textiler Materialien oft nur uniaxiale Zugversuche durchgeführt. Nur in seltenen Fällen, hauptsächlich im textilen Bauwesen, sind biaxiale Versuchsverfahren im Einsatz. Weitere Kennwerte, wie Querkontraktionszahlen oder Schubmodul, die zur vollständigen Bestimmung der orthotropen Steifigkeitsmatrix notwendig wären, sind oft reine Schätz- oder Annahmewerte.

Daraus ergibt sich zwingend die Notwendigkeit der Überprüfung und Validierung solcher Materialmodelle mittels physikalischer Versuche. Nur dadurch lässt sich die Genauigkeit von Berechnungen auf Basis der erstellten Materialmodelle schlüssig überprüfen. Daher steht die versuchstechnische Erfassung von Kennwerten zur Erstellung des Materialmodells und die Überprüfung mittels impliziter sowie expliziter FEM-Berechnungen im Zentrum der vorliegenden Arbeit.

4. Modellbildung für textile Flächen

4.1 Mechanische Grundlagen

In diesem Kapitel soll das Strukturmodell zur Beschreibung der Verformung technischer Textilien dargestellt werden. Das Strukturmodell ist unabhängig vom Material, aus dem die Struktur gefertigt wird. So kann beispielsweise ein Gewebe in Leinwandbindung aus einem Stahldraht oder einem thermoplastischen Kunststoffmonofil hergestellt werden. Das Materialmodell ist deshalb zunächst am Materialpunkt definiert und somit von der Struktur vollkommen unabhängig. So kann beispielsweise aus dem gleichen Monofil ein Gewebe oder ein Gestrick hergestellt werden. Erst in einem weiteren Modellierungsschritt können Aspekte der Struktur in das Materialmodell mit einbezogen werden. Das so entwickelte Materialmodell gilt dann ausschließlich für eine spezielle Struktur, bei der beispielsweise gilt:

- das Hook'sche Materialmodell am Materialpunkt:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

mit

σ = Spannung

E = Elastizitätsmodul

ϵ = Dehnung.

(1)

- das strukturbezogene Materialmodell, z.B. der Balken (Abbildung 3):

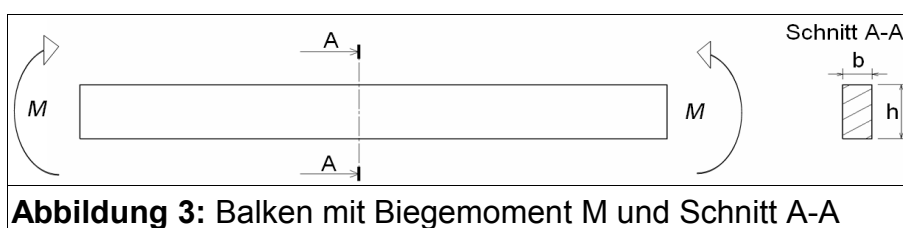


Abbildung 3: Balken mit Biegemoment M und Schnitt A-A

Die Abbildung 3 zeigt einen Balken mit der Querschnittsfläche $b \cdot h$, der mit einem Biegemoment M belastet ist. Das Biegemoment M berechnet sich aus:

$$M = E \cdot I \cdot \chi$$

mit

M = Biegemoment

I = Flächenträgheitsmoment 2-ten Grades

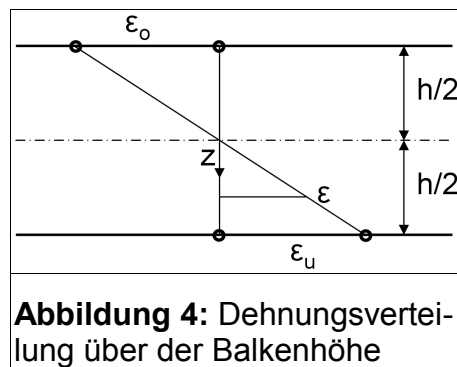
χ = Krümmung.

(2)

Das Flächenträgheitsmoment 2-ten Grades berechnet sich aus den Maßen des Rechteckquerschnitts

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3)$$

Mit der Modellannahme „Ebenbleiben des Querschnitts“ ergibt sich folgende Dehnungsverteilung über die Balkenhöhe (Abbildung 4):



Mit der Koordinate z , deren Nullpunkt sich in der Trägermitte befindet und der Bedingung, dass der Querschnitt symmetrisch ist ergibt sich für die Dehnungsverteilung:

$$\epsilon = \frac{1}{2}(\epsilon_u + \epsilon_o) + (\epsilon_u - \epsilon_o) \frac{z}{h} \quad (4)$$

Zur Überführung des Materialmodells für den Materialpunkt in das strukturbezogene Materialmodell muss die Integration über die Höhe des Balkens, also in Richtung der Koordinate z durchgeführt werden. Die Integration der Momente der Normalspannungen ergibt das Biegemoment:

$$M = b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_z \cdot z \cdot dz = b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E \cdot \epsilon \cdot z \cdot dz \quad (5)$$

Setzt man die Formel 4 in Formel 5 ein, ergibt sich:

$$M = E \cdot b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\frac{1}{2}(\epsilon_u + \epsilon_o) + (\epsilon_u - \epsilon_o) \frac{z}{h} \right] \cdot z \cdot dz \quad (6)$$

Durch Integration ergibt sich:

$$M = E \cdot b \frac{h^3}{12} \cdot \frac{(\epsilon_u - \epsilon_o)}{h} = E \cdot I \cdot \chi$$

mit

$$\chi = \frac{(\epsilon_u - \epsilon_o)}{h}$$
(7)

Somit ist die Beziehung des Materialmodells am Materialpunkt (Formel 1) und dem strukturbezogenen Materialmodell für den Balken hergestellt. Für die theoretische Betrachtung des realen Balken muss die Reduktion und Idealisierung vorgenommen werden. Diese Modellierung führt zum Tragwerksmodell, beim Balken durch

- Reduktion auf die Systemlinie und
- Idealisierung von Lager und Belastung (Randbedingungen), siehe Abbildung 5.

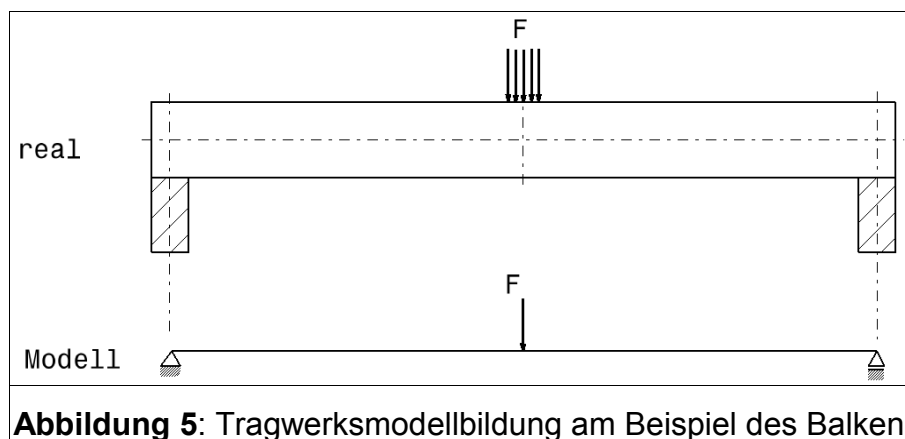


Abbildung 5: Tragwerksmodellbildung am Beispiel des Balken

Abbildung 5 zeigt oben den realen Balken mit seiner Lagerung und Belastung, unten die Tragwerksmodellbildung. Im Modell ist der Balken auf eine Systemlinie reduziert, die Kraft F ist durch eine punktuell ansetzende Kraft und die Lager durch ein Fest- und ein Loslager ersetzt.

Der nächste Schritt auf den Weg zur Berechnung ist die Diskretisierung durch die Definition spezieller Freiheitsgrade. Durch den Bezug auf diese Freiheitsgrade sind Steifigkeiten und Steifigkeitsmatrizen definiert. Die Steifigkeit K koppelt die diskreten Kraft- und Verschiebungsgrößen (F, U) in Form eines verallgemeinerten, nichtlinearen Federgesetzes.

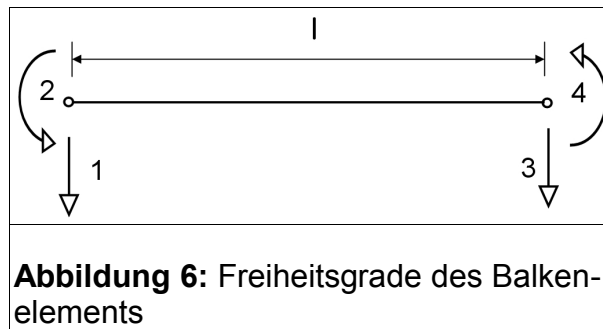
$$K \cdot U = F$$
(8)

Bei mehreren Verschiebungs- und Kraftgrößen wird die Steifigkeit K zur Steifigkeitsmatrix K_{ij} .

$$K_{ij} \cdot U_j = F_i$$
(9)

Steifigkeiten können zwischen verschiedenen Ausrichtungen von Freiheitsgraden transformiert werden, beispielsweise zwischen lokalen und globalen Richtungen. Hier stellt sich die Frage, wie diesen Richtungen die Koordinatensysteme zuzuordnen sind. Dabei sind natürlich auch die Abweichungen von Anisotropiewinkel von den Koordinatenrichtungen zu berücksichtigen. Es handelt sich folgerichtig um geometrische Transformationen.

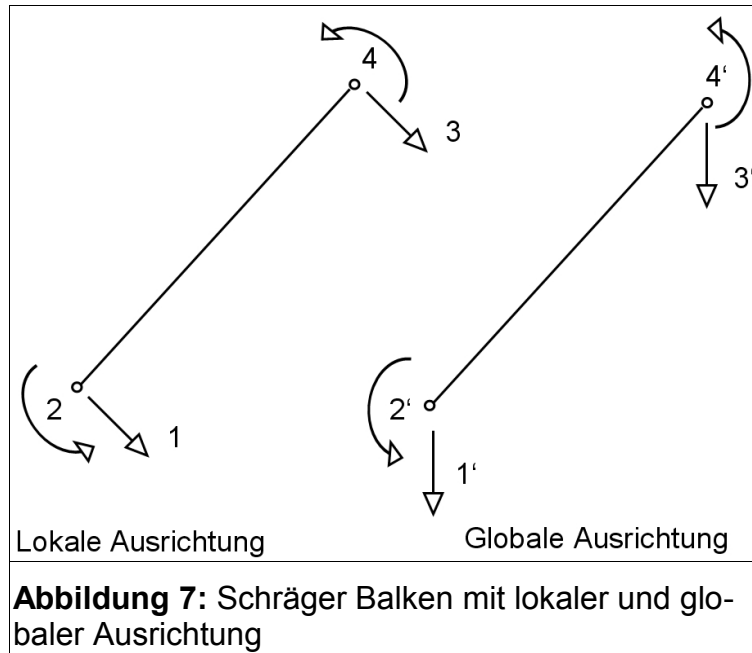
Zur Veranschaulichung wird noch einmal das Beispiel des Balkens herangezogen. Abbildung 6 zeigt die vier Freiheitsgrade des Balkens der Länge l in der Zeichnungsebene.



Die Freiheitsgrade führen zur lokalen- oder Elementsteifigkeitsmatrix, einer 4x4 Matrix:

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} 12 \frac{El}{l^3} & -6 \frac{El}{l^2} & -12 \frac{El}{l^3} & -6 \frac{El}{l^2} \\ -6 \frac{El}{l^2} & 4 \frac{El}{l} & 6 \frac{El}{l^2} & 2 \frac{El}{l} \\ -12 \frac{El}{l^3} & 6 \frac{El}{l^2} & 12 \frac{El}{l^3} & 6 \frac{El}{l^2} \\ -6 \frac{El}{l^2} & 2 \frac{El}{l} & 6 \frac{El}{l^2} & 4 \frac{El}{l} \end{bmatrix} \quad (10)$$

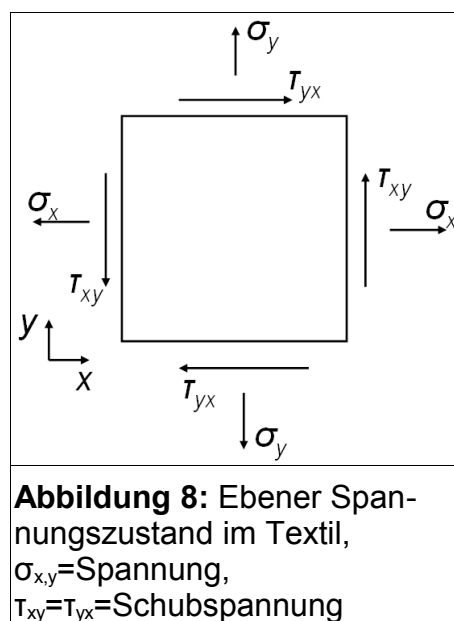
Es ist zu beachten, dass ein Balken eine lokale Ausrichtung der Steifigkeitsmatrix besitzt, die gegebenenfalls in die globale Ausrichtung transformiert werden muss. Abbildung 7 zeigt einen schrägen Balken, links mit den lokalen Freiheitsgraden und rechts den transformierten, globalen Freiheitsgraden.



Zur Transformation der lokalen Steifigkeitsmatrix K in die globale K' kommt die Transformationsmatrix T zum Einsatz.

$$K'_{ij} = T^T K_{ij} T \quad (11)$$

Im Spannungstensor $\underline{\sigma}$ sind, unabhängig von der Steifigkeitsmatrix, die Spannungskomponenten angeordnet. Die Größe des Spannungstensors richtet sich nach der Anzahl der Spannungskomponenten, die Größe der Steifigkeitsmatrix jedoch nach der Anzahl der Diskretisierungsparameter und ist bei gleicher Theorie von der Problemgröße abhängig. Abbildung 8 zeigt den ebenen Spannungszustand, so wie er bei den textilen Materialien auftritt.

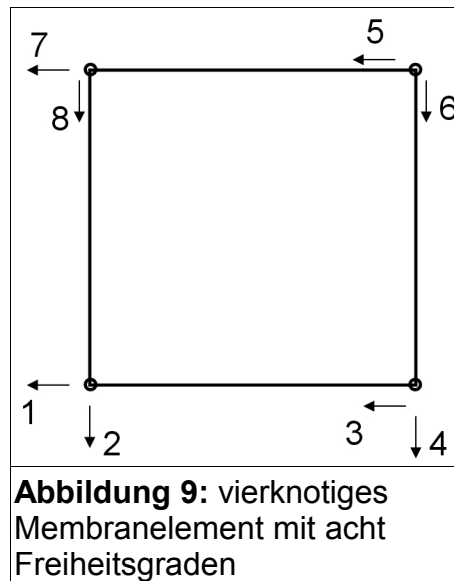


Daraus ergibt sich der Spannungstensor zu

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} \quad (12)$$

also einer 2x2 Matrix.

Die Diskretisierung eines solchen Spannungszustands erfolgt beispielsweise durch ein vierknotiges Membranelement, siehe Abbildung 9.



Das vierknotige Membranelement hat acht Freiheitsgrade und ergibt somit für die Steifigkeitsmatrix K eine 8x8 Matrix.

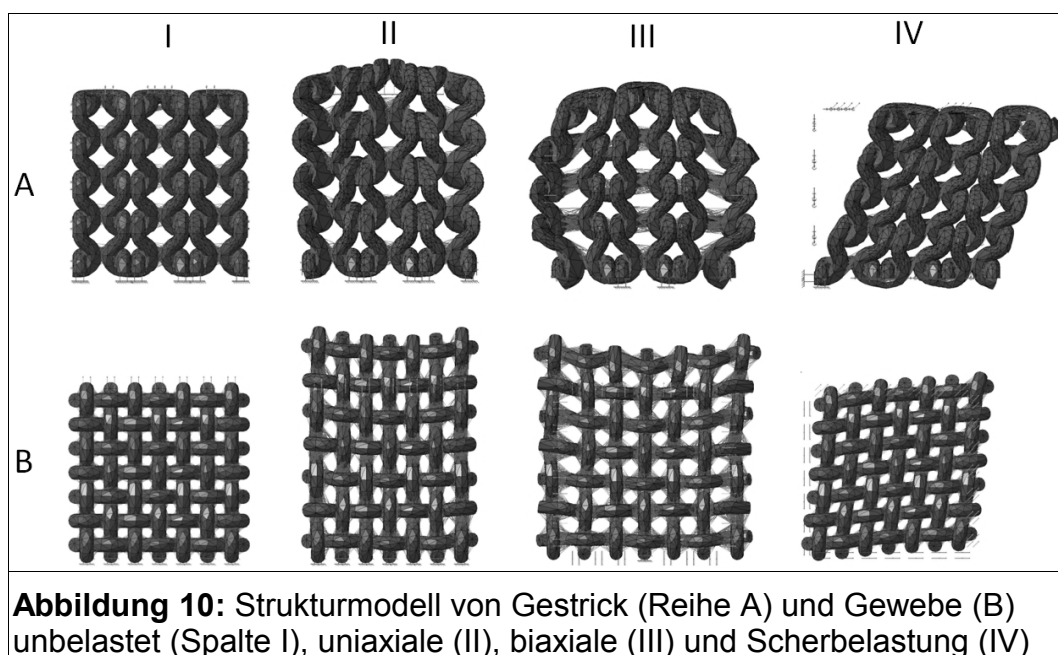
4.2 Strukturbezogenes Materialmodell textiler Flächen

Das vorangegangene Beispiel des Balkens macht deutlich, wie schwierig es ist, ein Tragwerksmodell für textile Flächengebilde zu erstellen. Grund dafür sind unter anderem die vielen verschiedenen Einflussfaktoren bei der Herstellung von Garnen und der textilen Fläche, die bereits in Kapitel 3 beschrieben sind. Für Einzelfälle gelingt dies [BAL 07, FIN 98], eine Allgemeingültigkeit lässt sich daraus allerdings nicht ableiten. Der Kern dieser Arbeit besteht also darin, die tatsächlichen Strukturen von Geweben oder Gestriicken durch Anpassung der Materialparameter in der strukturbezogenen Materialmodellierung als einfache Membran- oder Schalenelemente abzubilden.

Deshalb wird in der folgenden Arbeit die strukturbezogene Materialmodellierung vorgenommen, bei der die tatsächliche Tragwerksstruktur einer textilen Fläche anhand von Ergebnissen der Materialtest durch homogene Membran- oder Schalenelemente ersetzt wird.

Die Modellierung erfolgt aufgrund der Faserrichtungen der textilen Fläche im orthotropen Modell. Es wird im Folgenden dafür lediglich der Begriff „Materialmodell“ verwendet. Zur Verdeutlichung und ausgehend von der Annahme, dass sich die einzelnen Faserrichtungen gegenseitig in deren Verformung beeinflussen, wird dieser Einfluss zunächst durch ein Gewebe und einem Gestrick modellhaft abgebildet. Dafür wird zunächst das Gewebe und Gestrick als Geometrie konstruiert. Das Garn ist als kreisrundes Monofil mit dem Durchmesser von 1 mm ausgeführt.

Die Modellierung erfolgt im ersten Schritt durch die Zuordnung eines Hook'schen Materialmodells an Materialpunkt „Monofil“ und der Bestimmung der Kontakte der einzelnen Monofile zueinander ohne Reibung, sodass nur deren Durchdringung unterbunden ist. Die Zuordnung der Randbedingungen erfolgt direkt am Monofil, die Belastung wird zunächst uniaxial und dann biaxial aufgebracht. Die Abbildung 10 zeigt das geometrische Modell von Gewebe und Gestrick sowie deren uniaxiale und biaxiale, sowie die Scherbelastung und die daraus resultierende Verformung.



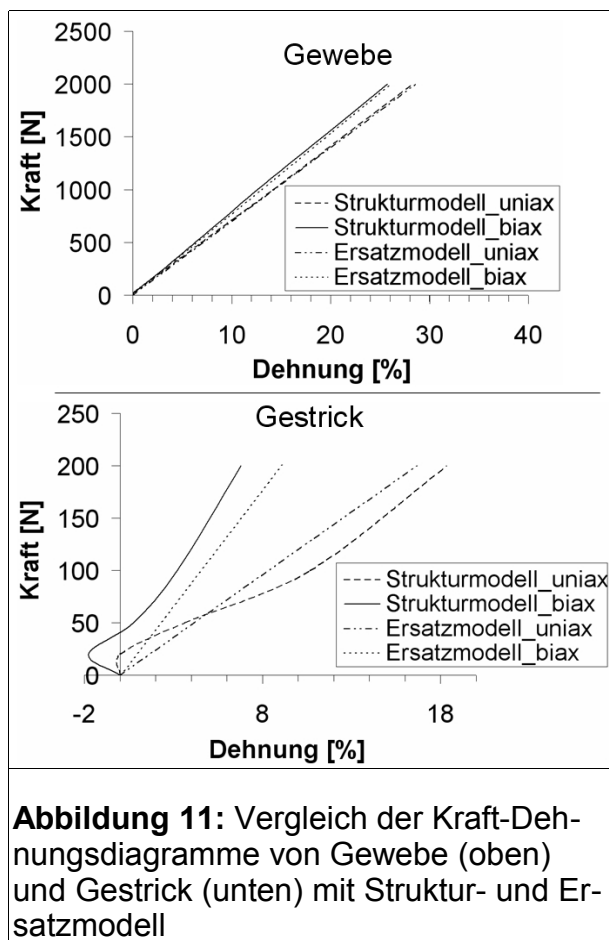
Bereits bei diesen kleinen Ausschnitten von Gewebe und Gestrick ist eine Abhängigkeit von Belastungsrichtung und der Verformung zu erkennen. So ist beispielsweise die Verformung in Längsrichtung beim Gewebe unter uniaxialer Belastung größer als bei biaxialer Belastung (B II und B III in Abbildung 10).

In einem zweiten Schritt wird dieses Modell durch Membran- oder Schalenelemente mit einem orthotropen Materialmodell ersetzt. Die Tabelle 2 zeigt die einzelnen Parameter des Materialmodells im Materialpunkt „Monofil“ und des strukturbezogenen Materialmodells der Membranelemente im Vergleich.

		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Querkontraktionszahl	Schubmodul [N/mm ²]
Gewebe	Materialmodell am Materialpunkt	3000	0,4	-
	Strukturbezogenes Materialmodell	650	0,1	90
Gestrick	Materialmodell am Materialpunkt	3000	0,4	-
	Strukturbezogenes Materialmodell	120	0,5	20

Tabelle 2: Kenngrößen der Modellbildung zur Berechnung der Verformung textiler Materialien

In Abbildung 11 ist der Verformung beider Modelle in der unidirektionalen Auswertung im Kraft-Dehnungsdiagramm dargestellt. Da das modellierte Gewebe und Gestrick unterschiedliche Dehnung über deren Breite haben, ist der Mittelwert für die Darstellung im Diagramm gewählt.



Das Diagramm in Abbildung 11 zeigt, dass die mittlere Längsdehnung, die am Gewebe (Abbildung 11 oben: Strukturmodell mit uni- und biaxialer Belastung) ermittelt werden konnte, durch die Diskretisierung mit Membran- oder Shellelementen (Abbildung 11 oben: Ersatzmodell mit identischer Belastung) praktisch deckend berechnet werden kann. Erheblich größere Abweichung zeigt dieselbe Modellierung mit Gestrück (Abbildung 11 unten). Hier tritt ein besonderer Effekt auf, der zeigt, wie schwierig es ist, eine solche Struktur zu modellieren: Bereits bei geringer Kraft erfährt das einzelne Monofil im Strukturmodell Torsionsspannungen, die auf die Verschlingung der einzelnen Monofile untereinander zurückzuführen sind (siehe Abbildung 11 unten). Das Monofil „dreht“ sich zunächst weg, die gesamte Fläche beult sich aus. Das führt zunächst zur negativen Dehnung im Gestrück. Erst wenn die Zugkraft ansteigt nimmt die Ausbeulung ab und die Fläche wird wieder eben. Dieser Effekt entsteht beim realen Gestrück nicht, da es aus Garnen besteht, die im Vergleich zum modellierten Monofil-Gestrück nur geringe Torsionssteifigkeit aufweisen. Es ist also zu erwarten, dass die im Kapitel 7 beschriebenen Berechnungen für die Gewebe zu besseren Ergebnissen führen werden als für das Gestrück.

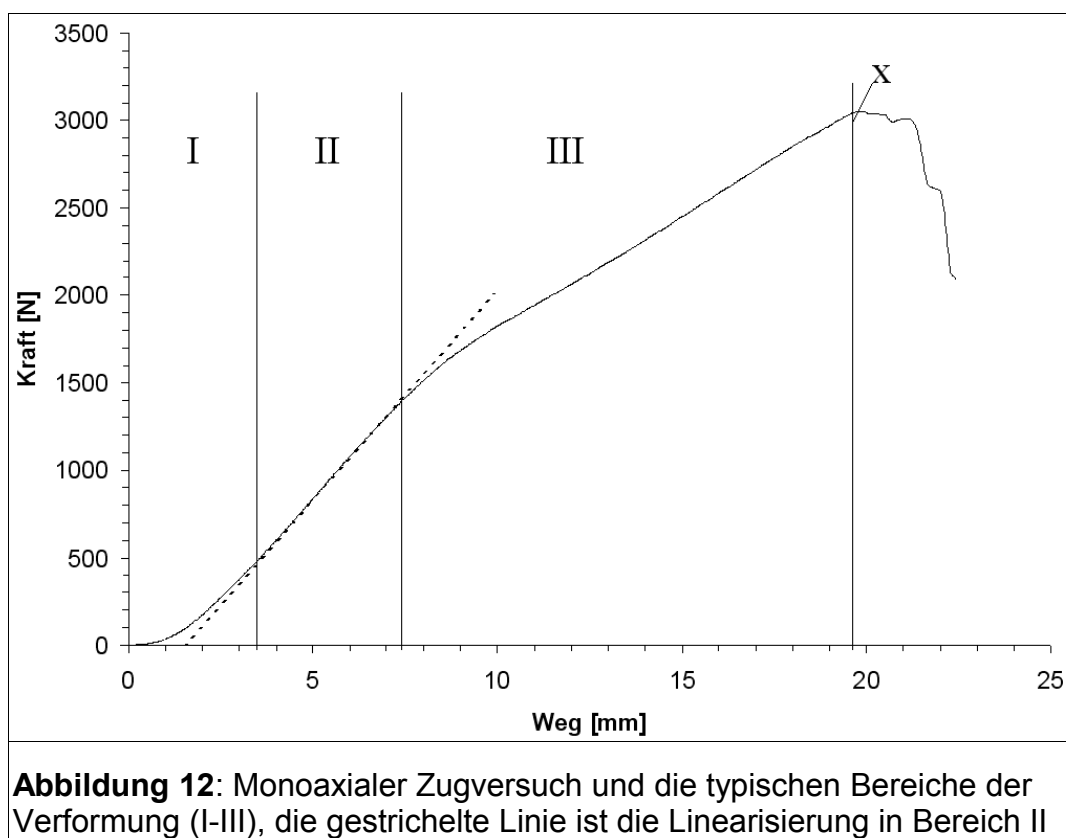
5. Übersicht der Zugversuche

5.1 Der uniaxiale Zugversuch

Der uniaxiale Zugversuch (Streifenzugversuch nach DIN EN ISO 13934-1) ist der Standardversuch zur Ermittlung der Festigkeitskennwerte von Textilien [REU 00]. Die Festigkeitskennwerte sind durch die Höchstzugkraft und die Höchstzugkraftdehnung charakterisiert. Um die Eigenschaften technischer Textilien bezüglich der Deformation zu beschreiben, ist es notwendig, zusätzlich den Verlauf der Kurven im Kraft-Weg-Diagramm zu betrachten.

5.1.1 Die kontinuierliche Zugbelastung

Wird ein technisches Textil, hier ein Gewebe, im Streifenzugversuch gezogen, so ergibt sich ein charakteristischer Verlauf der Kurve im Kraft-Weg-Diagramm (siehe Abbildung 12). Darin befinden sich typische Bereiche der Deformation, die im Folgenden beschrieben werden.



Bereich I: Der Bereich I ist durch eine Nichtlinearität geprägt, deren parabelförmiger Verlauf normalerweise auf plastische Anteile in der Deformation hinweist. Dabei ist eine Verfestigung des textilen Materials festzustellen. Diese beruht auf der Orientierung der Fasern im Garn und Anordnung der Garne im textilen Flächengebilde, die sich entsprechend der Kraftereinwirkung straffen und ausrichten, was als Ondulation von Kette und Schuss bezeichnet wird.

Bereich II: Der Bereich II ist nahezu linear und deshalb im Wesentlichen durch elastische Dehnung gekennzeichnet. Aus diesem Bereich wird der Elastizitätsmodul ermittelt (Steigung der gestrichelten Linie). Dieser deckt sich idealerweise vollständig mit dem sogenannten „Arbeitsbereich“, der die zulässigen Spannung-Dehnungszustände des Textils für die Anwendung definiert. Der Arbeitsbereich wird in der Praxis meist durch Kennwerte des Weiterreißverhalten (DIN EN ISO 13 937-2, -3 und -4) nach [REU 00] eines beschädigten oder verschlissenen Textils begrenzt.

Bereich III: Der Bereich III kennzeichnet eine Phase der elasto-plastischen Verformung des Textils. Der plastische Anteil der Deformation ist der Streckung der Fäden zuzuordnen und ist nicht zu verwechseln mit dem Kriechverhalten eines Kunststoffes. Das textile Flächengebilde fängt an der Stelle X (Abbildung 12) an zu reißen; der sich einstellende Kraftabfall geht einher mit der Zerstörung der Probe.

Die beschriebenen Bereiche sind je nach Basiswerkstoff, Bindungsart bzw. Bindungsrapporten, und zusätzlich auf dem Textil aufgebrachte Beschichtungen unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Aufnahme der dargestellten Kurve erfolgte an einer Probe eines mehrlagigen, gewebten und beschichteten Cabrio-Verdeckstoffs auf einer Universal-Zugprüfmaschine der Firma Zwick (Zwick Z100) nach der eingangs erwähnten DIN-Norm.

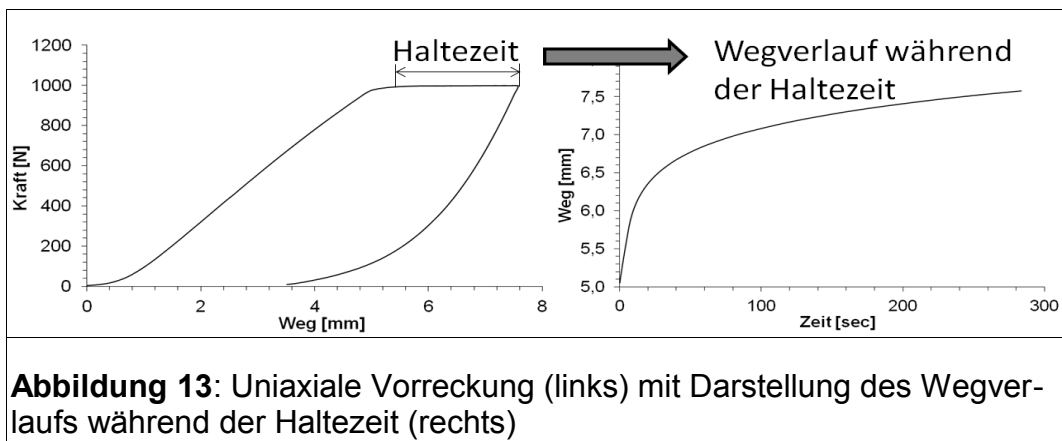
Zum besseren Verständnis nachfolgender Untersuchungen sind folgende Begriffsdefinitionen notwendig:

5.1.2 Die Vorreckung

Um den plastischen Anteil in der Deformation des Bereichs I zu minimieren, wird die Probe durch kontinuierliche Zugkraft beansprucht. Diese Spannung wird über die Zeitspanne von einer oder mehreren Minuten gehalten, bevor die Entlastung folgt. Der Vorgang wird als „Vorreckung“ bezeichnet. Der Kraftanstieg erfolgt kontinuierlich, die Maximalkraft deckt sich idealerweise mit der erwähnten oberen Grenze des Arbeitsbereichs.

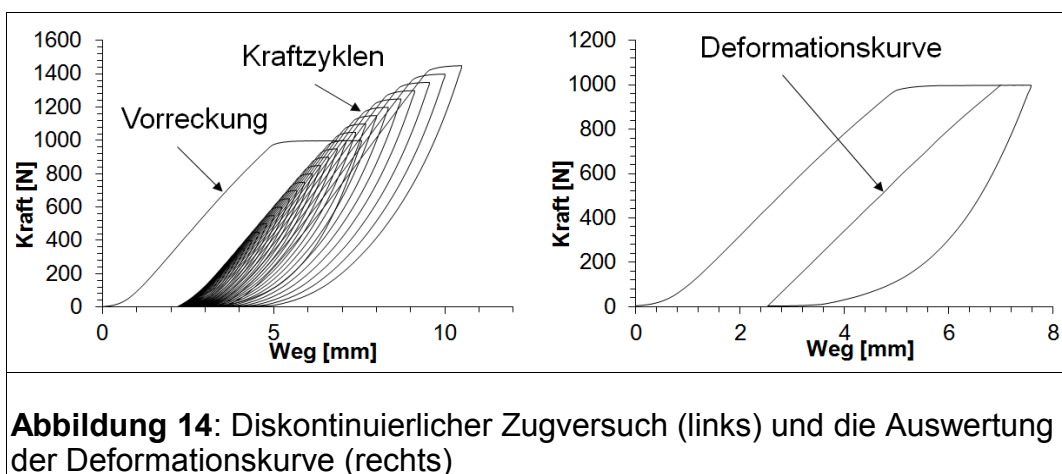
5.1.3 Die Zeitabhängigkeit der Deformation

Abbildung 13 zeigt den Versuchszyklus der Vorreckung (links) mit der zeitabhängigen Darstellung des Weges während der Haltezeit (rechts). Aus dem Wegverlauf während der Haltezeit erkennt man die sich regressiv fortsetzende Dehnung bei konstanter Zugkraft.



5.1.4 Der diskontinuierliche Zugversuch

Der diskontinuierliche Zugversuch ist dadurch charakterisiert, dass unmittelbar nach der Vorreckung ein Zugversuch mit schrittweise ansteigenden Kraftzyklen, Haltezeiten und Entlastungen folgt. Wenn die spätere praktische Anwendung die Berücksichtigung eines zeitabhängigen Spannung-Dehnungszustands erfordert, kann dieser durch das in Abbildung 14 dargestellte Versuchsverfahren, das eine Ermittlung des E-Moduls in Abhängigkeit der Zeit ermöglicht, erfasst werden. Abbildung 14 zeigt das Diagramm des diskontinuierlichen Zugversuchs (links) und der daraus resultierenden Auswertung der Deformationskurve im Arbeitsbereich (rechts) jeweils nach der Vorreckung. Zur Erstellung der Deformationskurve, rechtes Diagramm in Abbildung 14, werden die Punkte der Kraftzyklen am Anfang der Haltezeit eingesetzt.



Für die Berechnung in numerischen Systemen ließe sich nun, unter Akzeptanz einer gewissen Unschärfe, das für das Materialmodell notwendige Elastizitätsmodul richtungsabhängig ermitteln. Da die Deformation technischer Textilien nicht nur durch die Belastungshöhe, sondern auch durch deren Richtung beeinflusst wird, ist die Durchführung eines vergleichenden, biaxialen Zugversuchs notwendig [LOS 71].

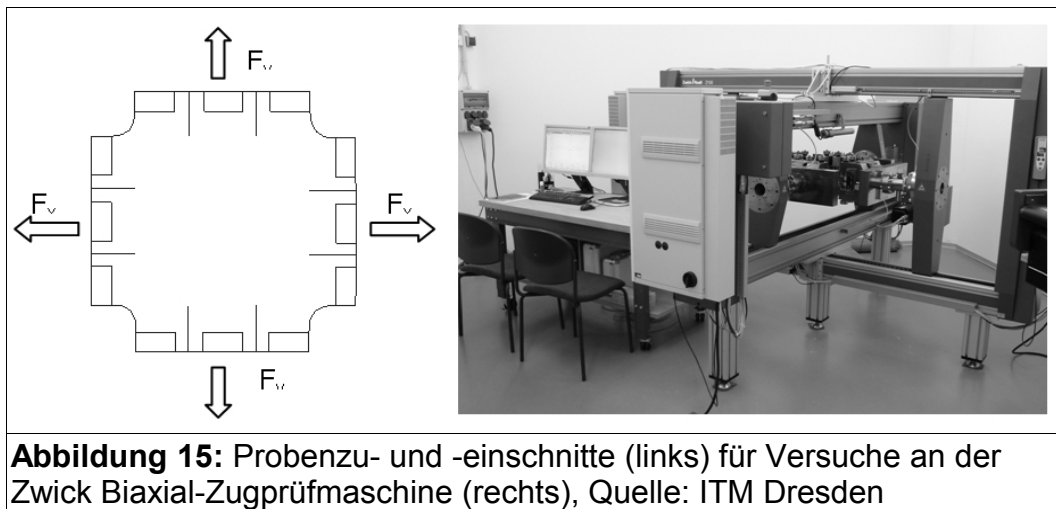
5.2 Der biaxiale Zugversuch

Es sind zwei Arten der biaxialen Zugbelastung auf textile Materialien bekannt, nämlich die Zugprüfung an der ebenen Probe [BÖG 04, HAJ 02, ESS 99] und der mit Innendruck beaufschlagte zylindrische Schlauch [BLU 87]. In beiden Fällen liegen die Belastungsrichtungen senkrecht zueinander. Zunächst sind folgende Begriffe zum besseren Verständnis der Arbeit erklärt:

- Der uniaxiale Zugversuch: der textile Prüfkörper wird entlang einer Achse, also in einer Richtung, eingespannt und mit Zugkraft beansprucht, so wie es im vorherigen Kapitel beschrieben ist und es beim Streifenzugversuch der Fall ist.
- Der biaxiale Zugversuch: die Einspannung des Prüfkörpers erfolgt in zwei senkrecht zueinander stehenden Richtungen. Somit wird ermöglicht, die Zugbelastung in diesen Richtungen im gewünschten Lastverhältnis aufzubringen.
- Der monoaxiale Zugversuch: er ist ein Sonderfall des biaxialen Zugversuch mit dem Lastverhältnis 1:0. Eine Richtung wird wahlweise mit einer Vorkraft beaufschlagt oder kraftunabhängig die Probe breit gehalten.
- Die unidirektionale Auswertung: unabhängig vom Versuchsverfahren wird das Ergebnis in nur einer Richtung ausgewertet.
- Die bidirektionale Auswertung: der biaxiale Zugversuch wird in Richtung der Zugachsen ausgewertet.

5.2.1 *Biaxialer Zugversuch an der ebenen Probe*

Zwei senkrecht zueinander stehende Achsen weisen jeweils zwei Antriebseinheiten auf, mit denen es möglich ist, die quadratische oder kreuzförmige Probe [BAL 07] biaxial mit Zugkraft zu belasten. Aufgrund großer Dehnung des textilen Prüflings sind die einzelnen Klemmen idealerweise auf einer senkrecht zur Zugachse verschiebbaren Achse angeordnet. Pro Antrieb wird die Zugkraft mittels Kraftsensor gemessen. Die Probe ist in der Regel zwischen den einzelnen Klemmen eingeschnitten, da sonst infolge von Spannungsspitzen zwischen den Klemmen ein Versagen selbst bei geringer Belastung droht. Zugleich bewirken die Einschnitte, dass sich das Spannungsfeld im Wesentlichen auf die quadratische Mitte der Probe begrenzt. Abbildung 15 zeigt den Zuschnitt der Probe für Zugprüfungen (links) an einer Biaxial-Zugprüfmaschine (rechts) der Fa. Zwick. Es handelt sich um eine Sondermaschine, die für Forschungsaufgaben an der TU Dresden hergestellt wurde. Die Maschine ist mit einer optischen Dehnungsaufnahme im Zentrum der Probe ausgestattet und besitzt an jedem Antrieb einen bis zu 100kN Zugkraft messenden Kraftsensor. Alle Versuche mit dieser Maschine sind im folgenden Text und in den Diagrammen mit „Biax“ oder „Biax-Zugprüfung“ benannt. Sie werden am Partnerinstitut ITM der Universität Dresden durch deren Mitarbeiter durchgeführt.



Die Biax-Zugprüfung am ebenen Textil hat folgende Vorteile:

- Die Probe wird ausgeschnitten und eingespannt. Eine weitere Konfektionierung ist nicht notwendig.
- Der Zugversuch ist weggesteuert, kann kontinuierlich gefahren und beliebig oft mit gleichen Einstellungen wiederholt werden.
- Die Frequenz zur Aufnahme von Messwerten ist sehr hoch.
- Das Reißen der Probe, und damit deren Versagen, beinhaltet keine gleichzeitige Freisetzung physikalischer Energie, so dass keine besondere Prävention zur Unfallverhütung notwendig ist.
- Die Versuchsanlagen sind kommerziell erhältlich, vollständig automatisiert und gut programmierbar.

Es sind aber auch Nachteile zu beobachten:

- Der Einfluss der Einspannung auf die Dehnung der textilen Probe kann sich störend auswirken. Grund dafür ist, dass die Probe, wie in Abbildung 15 dargestellt, nicht komplett eingespannt sondern an deren Ecken mit Radien versehen ist. Außerdem dehnen sich die Klemmbanken der Einspannung nicht im selben Maße wie die Probe unter biaxialer Belastung.
- Es treten Differenzen in der Kraftanzeige gegenüberliegender Kraftsensoren auf, die dadurch entstehen, dass die Antriebe der Achse synchronisiert sind.
- Bei nicht synchronisierten Antrieben muss das Driften der Probe unterbunden werden.

- Durch das Einschneiden der Proben kann sich die Zugprüfung ungewollt zur Weiterreißprüfung entwickeln; damit wird das Weiterreißen zum Versagenskriterium der Biax-Zugprüfung.
- Sehr dünne, empfindliche Materialien reagieren sensibel auf die mechanische Einspannung in der Klemmhalterung.
- Die Dehnung muss durch zusätzliche Geräte (Potentiometer oder optische Dehnungsmessung) in der Mitte der Probe, fernab der Randbereiche, ermittelt werden;

Die zuletzt genannte Einschränkung kann aufgrund der Differenzen zwischen den errechneten Dehnungswerten aus dem Weg der Antriebseinheiten und der optischen Dehnungsmessung nachgewiesen werden. Grund dafür ist, dass in den Streifen am Rand der Probe monoaxiale, im Zentrum jedoch biaxiale Zugspannungen vorherrschen. Das bedeutet, dass sich die Spannungsverteilung in der Probe aufgrund deren geometrischen Gegebenheiten inhomogen einstellt und dadurch mit einer Unschärfe in der Auswertung zu rechnen ist.

5.2.2 Biaxialer Zugversuch am Schlauch

Wenn ein Prüfverfahren prinzipielle, durch die Geometrie der Probe bedingte Fehler aufweisen kann, ist es sinnvoll, die Prüfergebnisse durch ein ergänzendes Verfahren zu überprüfen. Dazu wird die biaxiale Zugprüfung an einer schlauchförmigen Probe herangezogen. Da dieses Zugprüfverfahren kommerziell nicht im Einsatz ist und deshalb grundlegend neu entwickelt werden muss, ist dieser Aufgabe ein eigenes Kapitel gewidmet. Der biaxiale Zugversuch an der zylindrischen Probe wird in dieser Arbeit „Schlauch“ oder „Schlauchversuch“ genannt.

Prinzipiell bietet der Schlauchversuch folgende Vorteile:

- Mit Ausnahme der Rand- oder Einspannbereichen ist die Spannungsverteilung über den gesamten Probenkörper hinweg homogen.
- Die Einspannung erfolgt großflächig und ist schonend; die Prüfung empfindlicher Textilien ist somit möglich.
- Im Zugversuch unter 45° zur Garnrichtung ist die vollständige und gleichmäßige Einbindung von Kette und Schuss bzw. Maschenstäbchen und -reihen in der Einspannung oder in der Naht gewährleistet.

Allerdings sind folgende Nachteile zu beobachten:

- Aus dem monoaxialen Zugversuch ist die Höhe der maximal zulässigen Belastung zu ermitteln. Wird diese überschritten, kommt es zum explosionsartigen Versagen der Probe bei entsprechender Gefahr für den Maschinenbediener.

- Die Probe muss gefügt und luftundurchlässig gemacht werden. An der Nahtstelle muss dazu zusätzliches Material eingebracht werden, was die Messergebnisse beeinflusst.
- Die Vorspannung ist schwierig einzustellen, da selbst Präzisionsdruckregelventile bei geringen Druckdifferenzen große Toleranzen aufweisen.
- Der Versuchsablauf ist diskontinuierlich und wird durch die stationäre Einstellung von Druck und Kraft geprägt.

Die letztgenannte Einschränkung und die Erkenntnisse aus Kapitel 5.1 zeigen, dass die beiden biaxialen Prüfverfahren nur bedingt und nicht direkt untereinander vergleichbar sind. Um eine direkte Vergleichbarkeit zu erreichen, müsste der Schlauchversuch kontinuierlich oder die Biax-Zugprüfung diskontinuierlich ablaufen. Dafür besteht jedoch im Rahmen der Arbeit technisch keine Möglichkeit.

6. Biaxialer Zugversuch am Schlauch

6.1 Versuchsbeschreibung Schlauchversuch

6.1.1 Auswahl des Prüfmaterials

Technische Textilien gibt es in den unterschiedlichsten Ausführungen und Kombinationen. Das Flächenherstellungsverfahren richtet sich bei technischen Textilien nach den Anforderungen der jeweiligen Funktionen. Durch Zugkraft belastete textile Flächen bestehen meist aus Geweben oder Maschenware, welche die erforderlichen mechanischen Festigkeiten besitzen. Weitere Funktionen können durch Beschichtung, Kaschierung oder Laminierung erzeugt werden, die darüber hinaus zu Mehrlagen- und Schichtaufbauten der Fläche führen und dadurch multifunktionale bis hin zu adaptiven Eigenschaften aufweisen können.

Um eine möglichst große Bandbreite von Materialarten abzudecken, erfolgte die Auswahl des Materials:

- ein sehr dünnes, feines und unbeschichtetes Gewebe (Fallschirmseide, Kürzel WTN),
- ein PVC-beschichtetes PES-Gewebe (Baumembran Typ I, Kürzel VS),
- einer kaschierten Maschenware (Bezugsstoff Polstersitz, Kürzel BSS).

In Tabelle 3 sind die grundsätzlichen Materialeigenschaften aufgelistet. Die Auswahl der zu prüfenden Textilien wird aufgrund des hohen Prüfaufwandes auf drei beschränkt.

Kürzel	Textile Fläche	Bindung	Lagenaufbau	Hersteller	Einsatzbereich
WTN	Gewebe	Leinwand	-	Webatex	Fallschirmseide
VS	Gewebe	Leinwand	PVC-beschichtet	Verseidag-Indutex	Baumembran Typ I
BSS	Maschenware	Kettengewirk	Schaumstoff kaschiert	Vom ITM Dresden gestellt	Bezugsstoff Polstersitz

Zur Festlegung des Arbeitsbereichs wird der Streifenzugversuch nach DIN EN ISO 13934-1 mit jeweils drei Proben durchgeführt. In diesem Versuch wird die Höchstzugkraft und die Höchstzugkraftdehnung ermittelt. Der Arbeitsbereich (siehe Kapitel 5.1.1) ist in Tabelle 4 prozentual zur Höchstzugkraft angegeben.

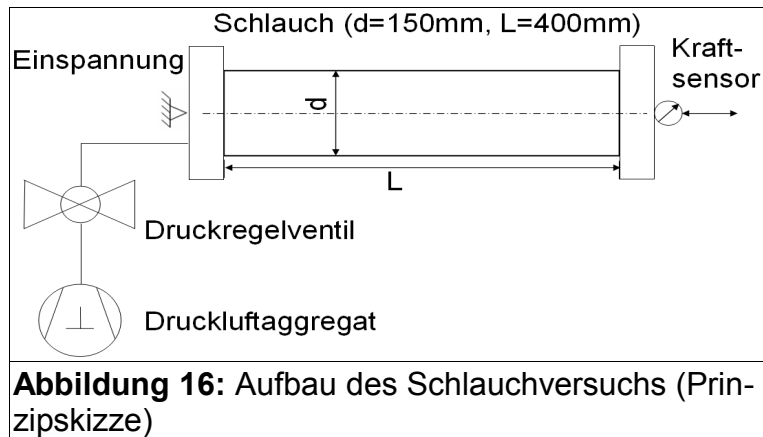
Tabelle 4: Höchstzugkraft, Höchstzugkraftdehnung nach EN ISO 13934-1 und Arbeitsbereich für den Schlauchversuch

Material	Richtung	Höchst- zugkraft	Höchst- zugkraft- dehnung	Höchst- span- nung	Arbeitsbereich: max. zulässige Spannung	
		[N/5cm]	[%]	[N/m]	[N/m]	prozentual [%]
WTN	Kett	560	24,6	11.200	3.800	34
	Schuss	550	25	11.000	3.800	35
	45°	210	38	4.200	700	17
VS	Kett	2.500	17,5	50.000	11.000	22
	Schuss	2.500	26,6	50.000	11.000	22
	45°	2.000	65	40.000	10.000	25
BSS	Maschen- stäbchen	270	20	5.400	1.600	30
	Maschen- reihen	575	163	11.500	1.600	14
	45°	675	100	13.500	1.600	12

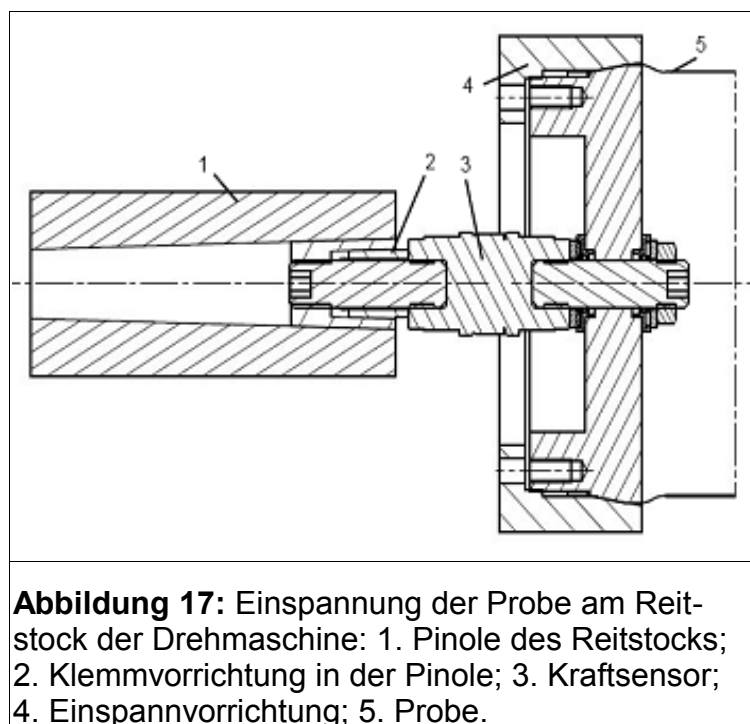
Die großen Differenzen in Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung der einzelnen Materialien verdeutlichen, wie unterschiedlich diese Textilien sind.

6.1.2 Aufbau des Schlauchversuchs

Zur Prüfung der Deformation der ausgewählten Textilien und deren Auswertung in Spannungs-Dehnungsdiagrammen wird die in Abbildung 16 skizzierte Vorrichtung vorgesehen. Sie zeigt eine zylindrische Probengeometrie der Länge L und des Durchmessers d . Über ein Druckluftanschluss wird die Probe mit einem Innendruck belastet, wodurch ein biaxialer Spannungszustand erreicht wird. Die Messung der Dehnung der Probe erfolgt über die Erfassung der Durchmesser- und Längenänderung.



Die Umsetzung des Versuchsaufbaus erfolgt auf einer konventionellen Drehmaschine, weil hier ideale Voraussetzungen zur Einrichtung des Prüfverfahrens vorliegen. Zunächst wird eine Einspannvorrichtung konstruiert und zwei Stück davon gefertigt. Eine Einspannung wird im Backenfutter der Drehmaschine angebracht, die andere Einspannung ist gegenüberliegend im Reitstock befestigt. Abbildung 17 zeigt die Schnittansicht durch die Konstruktion der Einspannung am Reitstock.



Im Versuch wird die Einspannung reitstockseitig per Handrad axial positioniert, womit eine wegkontrollierte Dehnung der Probe in diese Richtung implementiert ist. Die Zuleitung der Druckluft erfolgt durch eine Bohrung über die Einspannung am Backenfutter. Die Einspannung am Reitstock wird über eine zweiteilige Klemmvorrichtung in der Pinole des Reitstocks fixiert. Zwischen dieser Klemmvorrichtung und der Einspannung ist ein piezoelektrischer Kraftsensor angebracht.

Anhand eines Ladungsverstärkers werden die auftretenden Kräfte angezeigt. Sie werden mit dem Handrad durch axiale Positionierung auf den gewünschten Wert eingestellt.

Ein Axialrollenlager in der Anbindung des Kraftsensors an der Einspannung ermöglicht die Rotation der zylindrischen Probe um ihre Mittelachse. Somit kann die Änderung des Durchmessers d über den gesamten Umfang der Probe gemessen werden. Dazu ist stationär ein Laserdistanzsensor (siehe Tabelle 5) im Meiselfutter der Drehmaschine befestigt. Die Änderung der Länge L wird mit einer Messuhr aufgenommen, die Toleranz beider Messverfahren beträgt $\pm 0,1$ mm. Um einen konstanten Innendruck zu gewährleisten sind sowohl die Probe als auch die Einspannung mit geeigneten Maßnahmen abzudichten. Der Nenn Durchmesser der Probe ist 150 mm, die Gesamtlänge 420 mm. Die Einspannung am Backenfutter unterscheidet sich von der dargestellten Einspannung am Reitstock lediglich durch die zentrische Druckluftzuführung.

Die Einspannung besteht im Prinzip aus einfach herzustellenden Einzelteilen. Diese werden auf derselben Maschine gefertigt, die auch zur Versuchsdurchführung genutzt wird. Alle Messwerte werden manuell in eine Tabelle übertragen. In Tabelle 5 ist die gesamte, für den Schlauchversuch notwendige apparative Ausstattung aufgelistet.

Benennung	Funktion	Hersteller
Laserdistanzsensor optoNCDT 1302	Aufnahme der Radiusänderung	Micro-Epsilon
Messuhr 10 mm	Aufnahme der Längenänderung in Achsrichtung	Orion
Kraftsensor 10kN Type 9341B	Kraftaufnahme in Achsrichtung	Kistler
Ladungsverstärker Type 5015A	Kraftanzeige	Kistler
Präzisionsdruckregelventile LRP	Druckregelung, unterschiedliche Regelbereiche	Festo

Abbildung 18 zeigt den kompletten Versuchsaufbau des Schlauchversuchs auf einer Colchester-Drehmaschine. Bei der dargestellten Probe handelt es sich um das Material VS. Links der Probe ist das Backenfutter zu erkennen, rechts ist der Reitstock im Bild.

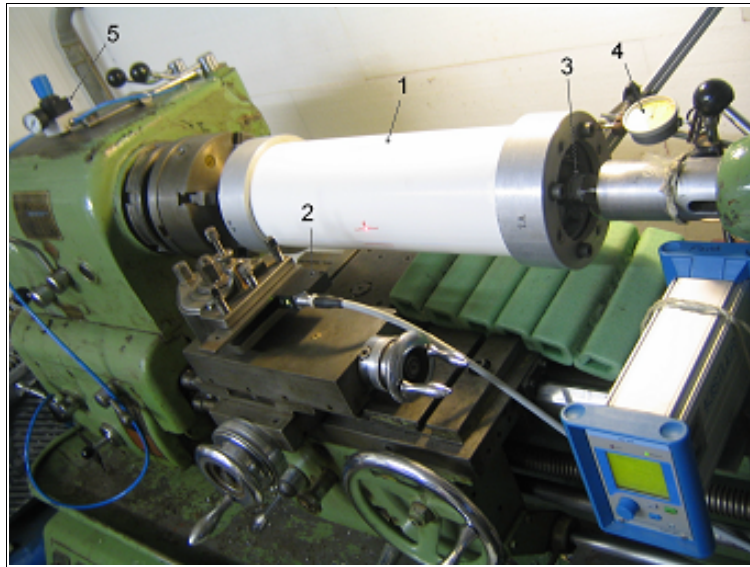


Abbildung 18: Versuchsaufbau des Schlauchversuchs: 1. Probe; 2. Laserdistanzsensord; 3. Kraftsensor; 4. Messuhr; 5. Präzisionsdruckregelventil

Mit der abgebildeten Vorrichtung können alle drei Materialien in allen Richtungen jeweils drei Einzelproben mit unveränderten Randbedingungen geprüft werden.




6.1.3 Probenpräparation

Für die Zugprüfung werden jeweils drei Proben in je drei Richtungen hergestellt. Grund dafür ist der Umstand, dass die gewünschten Lastfälle nur durch die Verschiebung der Einspannung in Achsrichtung eingestellt werden können. Deshalb werden in Umfangsrichtung Proben für

- Gewebe in Kett-, Schuss- und 45°-Richtung und für
- Maschenware in Maschenreihen, -stäbchen und 45°-Richtung

gefertigt, d.h. insgesamt 27 Proben. Alle Proben werden mit den Längen von 455 mm in Umfang- und 420 mm in Achsrichtung rechteckig ausgeschnitten. Die Maße ergeben sich aus dem Durchmesser der Einspannung und der Länge des Maschinenbetts der Drehmaschine. Die Nahtarten und die Nahtzugaben sind in Tabelle 6 aufgelistet und entsprechen den in den Anwendungen gebräuchlichen Konfektionsmerkmalen. Diese Nahtarten sind für die verwendeten Materialarten notwendig, um der Belastung durch den Innendruck stand zu halten.

Tabelle 6: Nahtarten und Nahtzugaben der zu prüfenden Textilien

Material	Nahtart	Nahtbild	Nahtzugabe [mm]
WTN	Kappnaht		15
BSS	Einfache Überlappnaht		15
VS	Überlappend HF-geschweißt		17,5

Das Prüfmaterial Fallschirmseide (WTN) und Bezugsstoff (BSS) sind luftdurchlässig. Um die für den Versuch notwendige Luftdichtheit zu erzeugen, wird der auf Links gedrehte Prüfling mit einer äußerst dünnen und dehnfähigen Folie belegt. Diese Folie stammt aus dem Verpackungsbedarf und wird als „Stretchfolie“ bezeichnet.

Der Zuschnitt der Folie erfolgt identisch zum Prüfling. Die Folie wird an ihrem Stoß mit einem ebenso dünnen und dehnfähigen Klebeband verschlossen. Um ein Abheben der Folie von der Probe zu vermeiden, wird sie punktuell mit dem dauerelastischen Klebstoff „Fixogum“ auf dem Textil fixiert. Die Folie wird gemeinsam mit der Probe in der Einspannung verklemmt. Der Einfluss der Folie auf die Dehnung der Probe im Versuch liegt nachweislich unterhalb der Toleranzgrenze, da die Folie eine äußerst geringe Steifigkeit aufweist.

6.1.4 Versuchsablauf

In einem ersten Schritt, nach dem Einspannen der Probe, erfolgt das Anlegen einer Vorspannung durch einen geringen Druck. Die Länge L (Meterstab) und der Umfang U (Schneidermaßband) werden gemessen und notiert.

Im zweiten Schritt wird die Probe etwa eine Minute mit maximal zulässiger Spannung (siehe „Arbeitsbereich“ in Tabelle 4, Kapitel 6.1.1) vorgereckt. Dazu werden Druck und Zugkraft in Achsrichtung entsprechend eingestellt. Nach deren Entlastung erfolgt unter Vorspannung erneut die Messung von Länge und Umfang. Die Differenz der Maße entspricht der Reckung des Materials. Aus dem nun gemessenen Umfang U wird der Ausgangsradius r_{p0} errechnet.

Im dritten Schritt erfolgt nun die eigentliche Messung der Dehnung der Probe. Die Messwertaufnahme bezüglich des Umfangs wird in 90°-Winkelabständen auf der Probe markiert. Dazu wird die Probe um ihre Längsachse gedreht, während der Sensor fest an der Maschine befestigt ist. An der Einspannung am Reitstock erfolgt die Messung der Längenänderung infolge der axialen Dehnung.

Mit dem Ziel der Messung der Dehnung der einzelnen Prüfmaterialien in Abhängigkeit der Richtung und des Lastfalls werden alle Versuche nach folgendem zeitlichen Ablauf vorgenommen:

1. Einstellung des gewünschten pneumatischen Drucks am Präzisionsdruckregelventil.
2. Einstellung des Kraftwerts Null durch Positionierung mithilfe des Handrades des Reitstocks.
3. Aufnahme der Radiusänderung an fünf Stellen, und zwar an zwei Stellen neben der Naht sowie an drei weiteren Stellen in jeweils 90°-Winkelabständen.
4. Stufenweises Aufbringen einer Zugkraft durch Positionierung mithilfe des Handrads bis sich der gewünschte Kraftwert konstant einstellt; erneute Messung der Radiusänderung gemäß Punkt 3.
5. Aufnahme der Längenänderung in Achsrichtung durch Ablesen der Messuhr.
6. Erhöhung der Zugkraft (entspricht Punkt 4) bis zum Erreichen des Lastverhältnisses von 1:1 von Umfangs- zu Achsrichtung.
7. Bestimmung der Radius- und Längenänderung (Punkt 3 und 5) und stufenweise Erhöhung der Zugkraft bis zum Erreichen des Lastverhältnisses 1:0,1 von Umfangs- zu Achsrichtung;

Die Spannungsverhältnisse in Umfang- zu Achsrichtung werden in fünf Stufen eingestellt. Von dem natürlich gegebenen Spannungsverhältnis von 1:0,5 wird es über 1:0,25 auf 1:0,1 verkleinert. Anschließend wird es über 1:0,75 auf 1:1 vergrößert. Die Druckstufen für die einzelnen Materialien sind in Tabelle 7 angegeben.

Material	Vorspannung [bar]	Druckstufen [bar]						
		0,025	0,05	0,1	0,2	0,35	0,5	
WTN	0,01	0,025	0,05	0,1	0,2	0,35	0,5	
WTN 45°	0,01	0,025	0,05	0,075	0,1			
VS	0,1	0,2	0,35	0,5	0,75	1	1,25	1,5
BSS	0,01	0,025	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	

Anschließend an diese Prüfung wird an jeder Probe ein monoaxialer Zugversuch in Achsrichtung bei Vorspannung in Umfangsrichtung vorgenommen.

6.1.5 Methodendiskussion Schlauchversuch

Im Schlauchversuch lässt sich die Verformung technischer Textilien richtungs- und lastfallabhängig ermitteln. Der Versuch ermöglicht somit die Erfassung der wesentlichen Kennwerte, die ausgewertet zur Beschreibung des orthotropen Materialmodells über die „Ingenieurskonstanten“ notwendig sind.

Die Versuche mit den beschriebenen Messeinrichtungen sind jedoch aufgrund fehlender Automatisierung aufwendig und zeitintensiv. Es besteht die Gefahr manueller Fehler beim Einstellen und Ablesen der Werte.

Im geschilderten Handbetrieb ist kein kontinuierlicher Zugversuch möglich, was den direkten Vergleich mit den Werten aus dem Biax-Zugversuch ausschließt. Dennoch bietet die Messmethode die Möglichkeit, sehr unterschiedliche Materialien auf einheitliche Weise zu prüfen, was bei Versuchen mit ebenen Klemm- vorrichtungen nicht uneingeschränkt der Fall ist. Der Versuchsaufbau bietet genügend Verfahrweg für eine sehr große Verformung der Proben sowie eine schonende Einspannung. Die Prüfung sehr empfindlicher Materialien wird somit ermöglicht. Außerdem ist der Versuchsaufbau ideal für die Prüfung unter 45°- Winkel zur Faserrichtung, da sich im Schlauch ein weitestgehend homogener Spannungszustand bildet und die gesamte Probe an ihren Rändern entweder in der Einspannung oder der Naht fixiert ist. Auf eine statistische Fehleranalyse wird verzichtet, da sie nur bei einer Automatisierung des Versuchs sinnvoll ist. Dennoch kann im einfachen Handbetrieb der Versuchsaufbau genutzt werden, um wichtige Daten zur Erstellung eines Materialmodells zu erfassen.

6.2 Versuchsauswertung Schlauchversuch

6.2.1 Mechanische Grundlagen

Bei Druckbelastung eines dünnwandigen Zylinders ergibt sich ein „natürliches“ Spannungsverhältnis von Umfangs- zu Achsrichtung von 2:1, wenn der Zylinder axial frei gelagert ist. Dieses Spannungsverhältnis erschließt sich aus der „Kesselformel“

$$\sigma_u = 2 \cdot \sigma_a = \frac{p \cdot d_0}{2}$$

mit

σ_u = Spannung in Umfangsrichtung

(13)

σ_a = Spannung in Achsrichtung

p = Druck

d_0 = Ausgangsdurchmesser der Probe.

wobei die Dicke des textilen Materials normiert ist. Aus Formel 13 ist ersichtlich, dass die Spannung für die Berechnung textiler Materialien nicht als Kraft pro Fläche in [N/m²], sondern als Kraft pro Länge in [N/m] definiert ist. Diese Vereinfachung ist insofern tragbar, als das Maß der Dicke der textilen Fläche gegenüber deren Breite und Länge bei den verwendeten Materialien sehr gering ist.

Wenn das textile Material geringe Biegesteifigkeit aufweist, ist seine Dicke für die numerische Berechnung unter der Bedingung der mechanischen Zugbeanspruchung unbedeutend.

Um die Spannung in Achsrichtung abhängig vom pneumatischen Druck p einstellen zu können, wird im Schlauchversuch ein Kraftsensor zwischen die Einklemmung des Prüflings und die Reitstockaufnahme angebracht. Die axiale Anpassung erfolgt mit dem Handrad des Reitstocks, wobei für die resultierende Kraft auf die Probe gilt:

$$F_W = p \cdot A - F_R$$

mit

A = Querschnittsfläche der zyl. Probe (14)

F_W = auf die Probe wirkende Kraft

F_R = am Reitstock eingestellte Kraft.

Aus den Messungen wird die Dehnung nach der für numerische Berechnungen üblichen Berechnungsformel für große Dehnungen wie folgt berechnet [HOL 00]:

$$\epsilon = 0,5 \cdot \frac{(l^2 - l_0^2)}{l_0^2}$$

mit

ϵ = Dehnung (15)

l_0 = Ausgangslänge

l = gemessene Länge.

Diese Formeln gelten generell für den Schlauchversuch mit textilen Materialien. Beim Versuch in 45°-Orientierung zur Achsrichtung kommt es zur Winkeländerung zwischen den Garnrichtungen. Diese wird als „Scherung“ bezeichnet und ist in der Abbildung 19 skizziert.

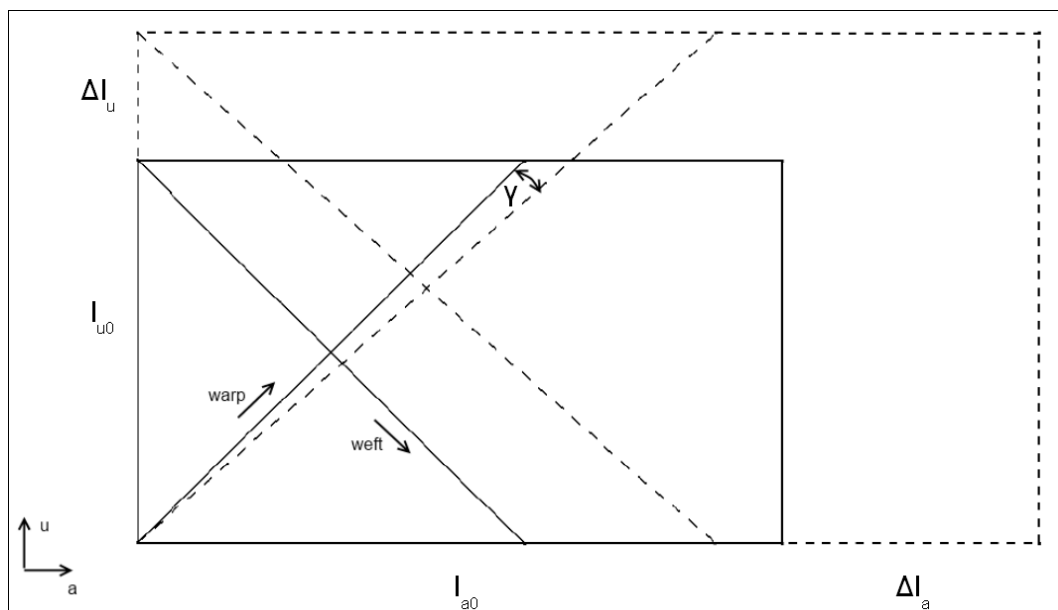


Abbildung 19: theoretische Verformung bei der Materialorientierung 45°; u: Umfangsrichtung; a: Achsrichtung; γ : Scherwinkel; warp/weft (Kette/Schuss): Garnrichtungen

Die Skizze in Abbildung 19 zeigt keine „reine Scherung“, bei der sich lediglich der Winkel γ ändert. Vielmehr ist im Versuch sowohl eine Scherung als auch eine Dehnung in Garnrichtung zu beobachten.

Dieser Verformungszustand wird durch mechanische Zugbeanspruchung erzeugt. Da den Faserrichtungen unterschiedliche Steifigkeiten zugrunde liegen, wird im Versuch zusätzlich zur Scherung γ ein Verdrehen der Probe um den Winkel α festgestellt. Abbildung 20 zeigt diese Verdrehungen bei maximaler Innendruckbelastung bei den Materialien VS und BSS. Es wird außerdem beobachtet, dass die Verdrehung um den Winkel α unabhängig vom Lastfall konstant bleibt.

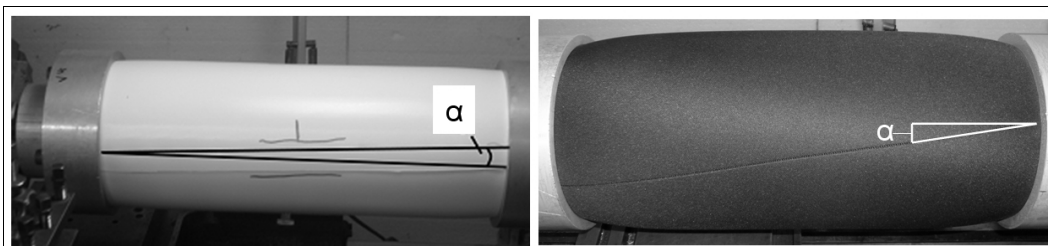


Abbildung 20: Verdrehung im 45°-Schlauchversuch: links das Material VS, rechts das Material BSS

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse im 45°-Schlauchversuch wird als Ansatz das orthotrope Materialmodell von MÜNSCH-REINHARDT [MUR 95] verwendet, da dies keine Kopplung der Materialhaupttrichtungen an die Scherung zulässt. Man erkennt dies am Wert Null in der Matrix:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ 2\epsilon_{xy} \end{pmatrix} \quad (16)$$

Die Auswertung der Scherung wird anhand dieser Nachgiebigkeitsmatrix durchgeführt und ist im Folgenden skizziert:

$$\hat{\epsilon} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta \epsilon_1}{\Delta \sigma_1} & \frac{-\nu_{12} \Delta \epsilon_2}{\Delta \sigma_2} & 0 \\ \frac{-\nu_{21} \Delta \epsilon_1}{\Delta \sigma_1} & \frac{\Delta \epsilon_2}{\Delta \sigma_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta \gamma}{\Delta \sigma_{12}} \end{bmatrix} \hat{\sigma} \quad (17)$$

wobei σ_{12} im Versuch die Spannungen in Umfangs- und Achsrichtung sind. Der G-Modul ergibt sich somit aus σ_{12} und γ zu

$$G = \frac{\sigma_{12}}{\gamma} = \frac{\sigma_{12}}{2\epsilon_{12}} \quad (18)$$

mit $\gamma = 2\epsilon_{12}$.

Somit ergeben sich zwei unterschiedliche Möglichkeiten der Versuchsdurchführung:

- Der monoaxiale Zugversuch, in dem Zugkraft lediglich in Achsrichtung aufgebracht wird. Die Auswertung erfolgt über die aufgebrachte Zugspannung und der gemessenen Dehnung in Achsrichtung (Formel 18).
- Der biaxiale Zugversuch mit unterschiedlichen Lastfällen. Die Spannung in Umfangsrichtung ist größer als die Spannung in Achsrichtung. Die mechanischen Grundlagen des Versuchs sind im Folgenden erklärt.

Im biaxialen Zugversuch in 45°-Winkelrichtung werden Spannungen in Umfangs- und Achsrichtung aufgebracht. Es gilt

$$\begin{aligned} \sigma_u &\geq \sigma_a \\ \text{mit} \\ \sigma_u &= \text{Spannung in Umfangsrichtung} \\ \sigma_a &= \text{Spannung in Achsrichtung.} \end{aligned} \quad (19)$$

Die resultierende Komponente der Spannung in Achsrichtung erzeugt Dehnung in Faserrichtung, die aus der gemittelten Elastizität der Kett- und Schussrichtung berechnet wird:

$$\begin{aligned} \epsilon_{uE} &= \frac{\sigma_a}{E_m} \\ \text{mit} \\ E_m &= \text{Mittelwert der Elastizitätsmoduln} \\ \epsilon_{uE} &= \text{Dehnung in Faserrichtung.} \end{aligned} \quad (20)$$

Die Spannung, welche die Scherung erzeugt, ist

$$\sigma_{12} = \sigma_u - \sigma_a \quad (21)$$

und die damit verbundene Dehnung

$$\begin{aligned} \epsilon_{12} &= \epsilon_u - \epsilon_{uE} \\ \text{mit } \epsilon_u &= \text{Dehnung in Umfangsrichtung} \end{aligned} \quad (22)$$

bei der der Winkel α (Abbildung 20), der durch die Anisotropie der Kett- und Schussrichtung entsteht, vernachlässigt wird. Der Vorteil der biaxialen gegenüber der monoaxialen Scherzugprüfung ist, dass der biaxiale Spannungszustand geringere Dehnung erzeugt und dadurch in der Versuchsdurchführung einfacher zu Handhaben ist. Die Spannungen werden als Nominalspannung gemäß Formel 13 berechnet. Im Hinblick auf eine künftige Automatisierung des Versuchs wird durch die Kennzeichnung der Faserrichtung auf der textilen Fläche und einer optischen Auswertung während des Versuchs die Winkeländerung direkt gemessen werden können, was der Genauigkeit der Messung zugute käme.

Im Hinblick auf die Nachgiebigkeitsmatrix (Formel 17) fehlt lediglich die Angabe der Querkontraktionszahlen, um die orthotrope Steifigkeitsmatrix über die sog. „Ingenieurskonstanten“ [RAI 03] als Materialmodell für numerische Berechnungen zu definieren. Das orthotrope Materialverhalten setzt die diagonale Symmetrie der Steifigkeitsmatrix voraus. Daraus und aufgrund der Energieerhaltung ergibt sich die Beziehung [MUR 95]:

$$\frac{E_1}{\nu_{21}} = \frac{E_2}{\nu_{12}} \quad (23)$$

Die direkte Ermittlung der Querkontraktionszahlen aus dem monoaxialen Zugversuch durch

$$\nu = - \frac{\Delta d / d}{\Delta l / l} \quad (24)$$

mit

d = Probenbreite

l = Probenlänge

ist nicht möglich, da das Lastverhältnis von 1:0,1 nicht unterschritten werden kann. Es treten sonst am textilen Material Falten auf. Somit kann die Querkontraktionszahlen aus den Auswertungen des Schlauchversuchs nur geschätzt werden.

6.2.2 Analyse der Messwerte

Zunächst werden nach den Formeln 13 und 14 die Druck- und Längenmaße in Dehnungen und Spannungen umgerechnet und über der Probenanzahl der Mittelwert gebildet. Diese Werte, in Tabellen notiert, führten zur Auswertung in Spannungs-Dehnungsdiagrammen unter Berücksichtigung der Lastfälle und der Orientierung der Proben.

Tabelle 8 zeigt beispielhaft die Analyse der im Schlauchversuch gewonnenen Messwerte für das Material VS beim Druck $p = 1,5$ bar, Kettrichtung = Umfangsrichtung. Aus dem Druck berechnet sich die Spannung in Umfangsrichtung nach Formel 13. Das Lastverhältnis bestimmt die Kraft und die Spannung in Achsrichtung. Die Dehnungen berechnen sich aus den Messwerten der Verformung in Umfangs- und Achsrichtung.

Tabelle 8: Beispiel einer Analyse der Messwerte beim Druck $p = 1,5$ bar, Material VS

Einzustellende axiale Kraft F [N]	Lastverhältnis Umfang zu Achsrichtung	Spannung in Umfangsrichtung σ_u [N/m]	Spannung in Achsrichtung σ_a [N/m]	Dehnung in Umfangsrichtung ϵ_u [%]	Dehnung in Achsrichtung ϵ_a [%]
-2.120,6	1 : 0,1	11.077	1.107	2,04	-0,49
-1.325,4	1 : 0,25	11.077	2.769	1,99	1,19
0	1 : 0,5	11.077	5.538	1,69	2,16
1.325,4	1 : 0,75	11.077	8.308	1,47	3,3
2650,7	1 : 1	11.077	11.077	1,43	4,16

6.2.3 Statistik

Die Auswertung der Einzelproben ergibt, dass hinsichtlich der Statistik der Mittelwert aus einer Probenanzahl von drei nicht ausreichend ist. Nach DIN EN ISO 13934-1 wäre eine Probenanzahl von fünf für die statistische Auswertung notwendig, was aber im Zeitrahmen dieser Arbeit aufgrund der breiteren Materialauswahl nicht verwirklicht werden kann. Die Probenentnahme geschieht nach Norm gleichmäßig über die Warenbreite. Differenzen in den Messungen der Einzelproben lassen sich einerseits auf Qualitätsschwankungen des Textils über der Warenbreite zurückführen. Andererseits nehmen auch die Handhabung der Einzelproben (beispielsweise beim Einspannen in der Versuchsvorrichtung) sowie die Versuchsdurchführung selbst Einfluss auf die Ergebnisse.

Für die Verifizierung des Schlauchversuchs mit dem Biax- oder anderen Zugversuchsverfahren wären vergleichbare Randbedingungen notwendig. Voraussetzung dafür sind:

- ein möglichst hoher Automatisierungsgrad an der Prüfvorrichtung zur Vermeidung manueller Fehler,
- exakt übereinstimmende Prüfbedingungen sowie
- die Verwendung derselben Proben in den unterschiedlichen Versuchsverfahren.

Alle diese Optionen sind durch die Randbedingungen der Versuche nicht gegeben. Der Vergleich von Biax- und Schlauchversuch (Abbildung 24, Kapitel 6.2.6) sowie anderer Versuche dient lediglich der Orientierung. Eine qualitative Aussage über die Ergebnisse oder gar die Beurteilung der Versuchsverfahren sind dieser Auswertung nicht zu entnehmen.

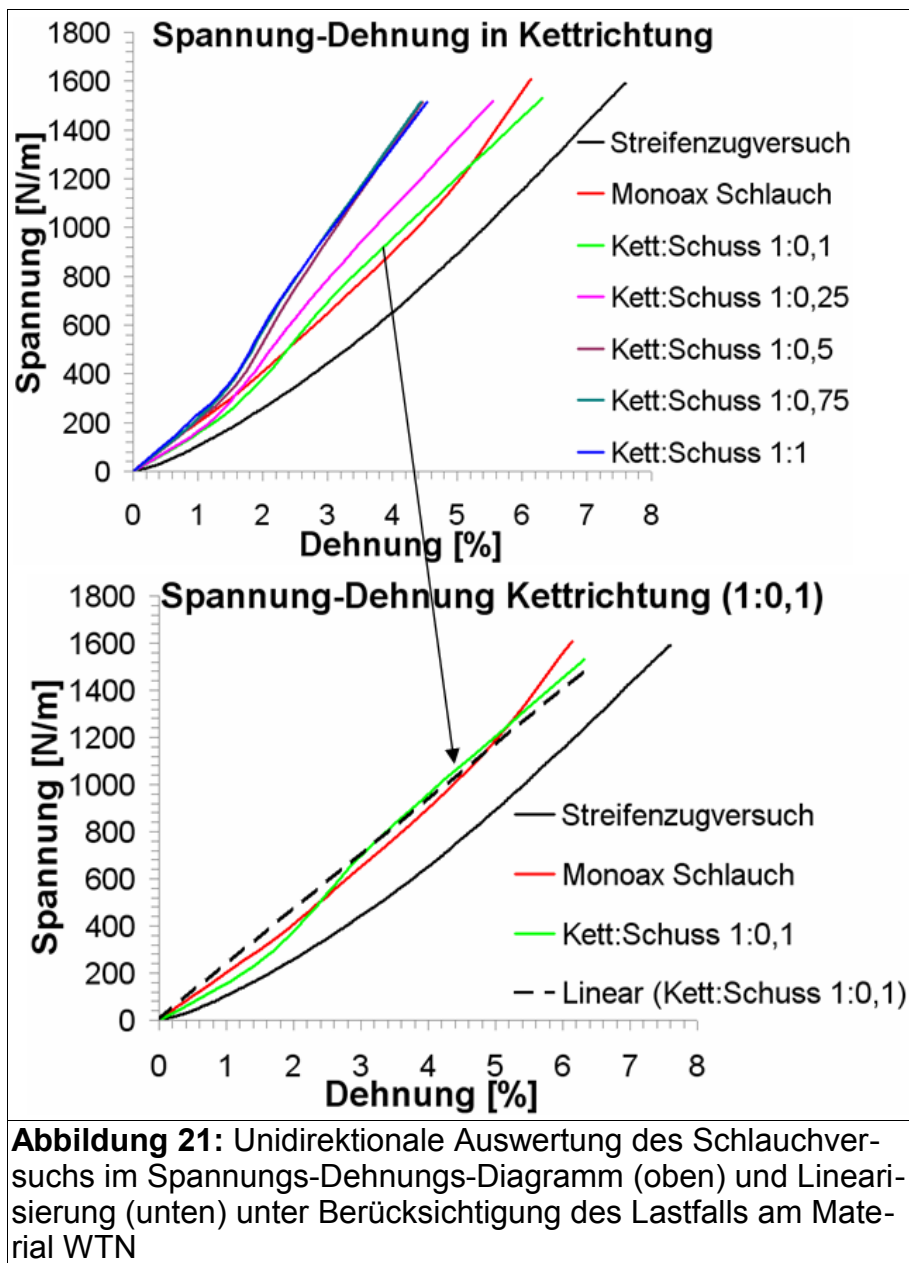
6.2.4 Unidirektionale Auswertung

Aufgrund des orthotropen Materialverhaltens erfolgt die Auswertung des Schlauchversuchs zunächst aus dem unidirektionalen Spannungs-Dehnungsdiagramm. Das Ziel ist die Ermittlung des Elastizitätsmodul durch Linearisierung mit der Steigung der Geraden nach der Formel

$$E_x = \frac{\Delta \sigma_x}{\Delta \epsilon_x} \quad (25)$$

wobei die Indizes die Richtungsabhängigkeit der Werte symbolisieren. Es ergeben sich somit für Kett- und Schussrichtung oder Maschenstäbchen- und Maschenreihenrichtung jeweils ein Elastizitätsmodul E_1 und E_2 sowie für die 45°-Richtung E_{45} .

Abbildung 21 zeigt die unidirektionale Auswertung des Schlauchversuchs am Material WTN, die beispielhafte Linearisierung des Lastfalls 1:0,1. In diesem Versuch ist die Umfangsrichtung die Kettrichtung.

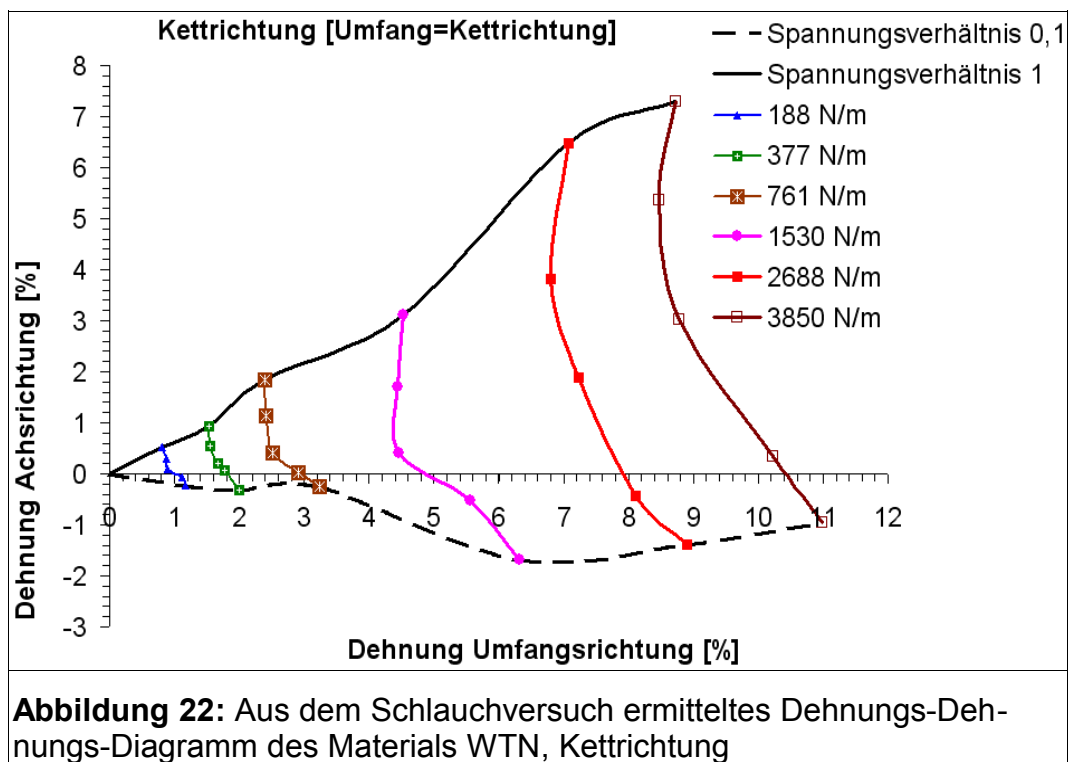


In den Diagrammen der Abbildung 21 sind oben die Kurven der einzelnen Lastfälle des Schlauchversuchs aufgetragen. Zum Vergleich sind zusätzlich die Kurven der Streifenzugversuchs und des monoaxialen Schlauchversuchs eingetragen. Aus dieser Kurvenschar wird nun beispielhaft die Kurve des Lastfalls „Kett:Schuss 1:0,1“ extrahiert und hinsichtlich der Bestimmung des E-Moduls linearisiert. Bei diesem Beispiel liegen die Kurven der unterschiedlichen Versuche nahe beieinander. Man erkennt, dass bei höherer Belastung der Unterschied zum Streifenzugversuch größer ist.

Auf dieselbe Art und Weise werden die Schussrichtung, die 45°-Richtung sowie alle Richtungen der Materialien BSS und VS ausgewertet. Diese Diagramme befinden sich im Anhang.

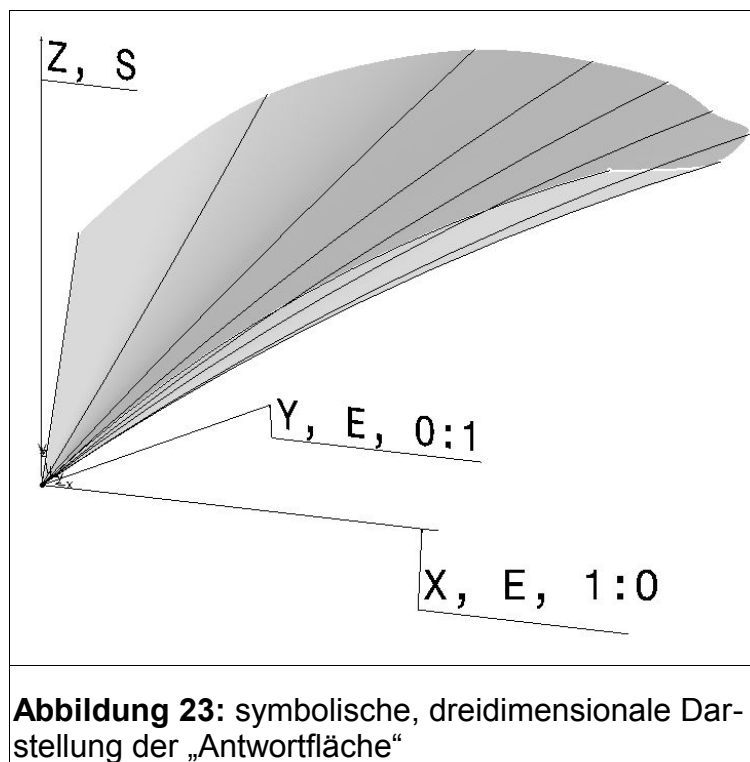
6.2.5 Bidirektionale Auswertung

Das Diagramm in Abbildung 21 zeigt unterschiedliche Kurven in den verschiedenen Lastfällen. Diese lastfallabhängigen Differenzen des E-Modul lassen sich in das kontinuumsmechanische, orthotrope Materialmodell nicht implementieren. Deshalb wird von den Projektpartnern die Entwicklung einer dreidimensionalen „Antwortfläche“ vorgeschlagen, mit deren Hilfe Spannungs-Dehnungszustände abzulesen und numerisch zu erfassen sind [WEN 11]. Im Hinblick darauf wird die zweidimensionale Darstellung im Dehnungs-Dehnungsdiagramm unter Angabe der zugehörigen Spannungen entwickelt. Abbildung 22 zeigt die Kurvenschar für das Material WTN mit der Orientierung der Kettrichtung in Umfangsrichtung.



Das Diagramm in Abbildung 22 beschreibt die Dehnung des Schlauchs in Achs- und in Umfangsrichtung. Die Dehnung stellt sich aufgrund der Spannung ein, deren Zahlenwerte in der Legende in [N/m] angegeben sind. Die Spannung herrscht gleichbleibend in Umfangsrichtung, sie wird allerdings in Achsrichtung stufenweise zum Spannungsverhältnis von 1:0,1; 1:0,25; 1:0,5; 1:0,75 und 1:1 erhöht. Beispielsweise herrscht im Versuch im rechten, untersten Punkt des Diagramms beim Spannungsverhältnis 1:0,1 eine Spannung von 3.850 N/m in Kettrichtung und 385 N/m in Schussrichtung.

Aus den einzelnen Kurven lässt sich unter der Option der Tangentenstetigkeit eine Fläche approximieren. Beispielhaft ist die in Abbildung 23 gezeigte Fläche aus den Ergebnissen des Schlauchversuchs in einem CAD-Programm erstellt. Diese Fläche beschreibt nun die im Arbeitsbereich möglichen Spannungs-Dehnungszustände in einer Faserrichtung in Abhängigkeit des Lastfalls. Der Lastfall ist dabei die Beziehung, mit der sich eine Korrelation zu einer zweiten Fläche für die andere Faserrichtung herstellen ließe. Somit sind theoretisch sämtliche Spannungs-Dehnungszustände im gesamten Arbeitsbereich in den Faserrichtungen exakt definiert. Hinzu kommt für die Scherung des Textils ein Diagramm, das die Scherspannung in Abhängigkeit des Scherwinkels abbildet. Mit diesen zwei Flächen und dem Diagramm lässt sich also das gesamte Spektrum möglicher Spannungs- und Verformungszustände unter Berücksichtigung der Winkeländerung der Faserrichtungen erfassen. Für die Simulation bedeutet dies einen enormen numerischen Aufwand, der eine Lösung für die Konvergenz der Aufgabenstellung beinhalten muss.



Die Fläche entsteht durch die Eingabe der einzelnen Messwerte als Punkte und deren Verbindung zu tangentenstetigen Kurven, die zur Erzeugung der Fläche dienen. Die Dehnungen werden gemäß den Spannungsverhältnissen auf der X- und Y-Achse aufgetragen (X, E ; Y, E in Abb. 23), die zugehörigen Spannungen auf der Z-Achse (Z, S in Abb. 23). Die Fläche gibt demzufolge die gesamte, faltenfrei mögliche Verformung des Textils in einer Faserrichtung innerhalb aller geprüften Lastfälle (0:1 und 1:0 auf der X- und Y-Achse in Abb. 23) an. Im Hinblick auf das Materialmodell müssen diese beiden Verformungsflächen unter Einfluss der entstehenden Hauptspannungsrichtungen über entsprechende Algorithmen gekoppelt werden.

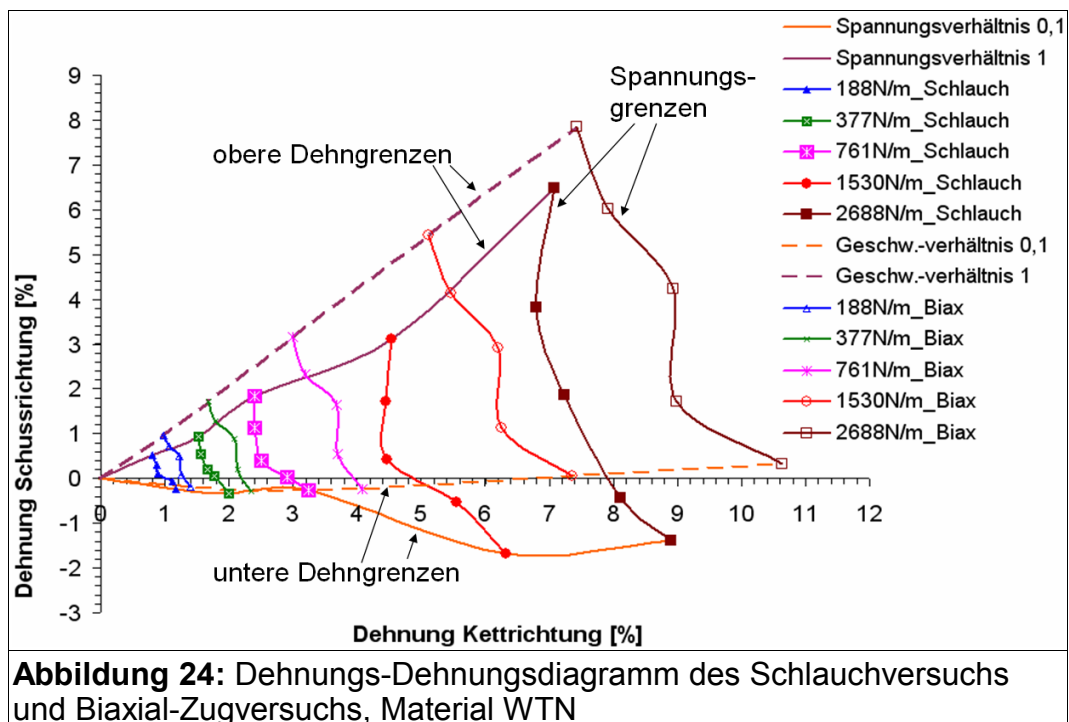
Dadurch ließe sich die Berechnung der Verformung anhand derartiger Flächen ablesen (daher auch der Begriff „Antwortfläche“) und daraus ein Materialmodell erstellen.

Die Dehnungs-Dehnungsdiagramme für alle geprüften Materialien und Richtungen finden sich im Anhang.

6.2.6 Vergleich der Versuchverfahren

Zur Verifizierung des Schlauchversuchs werden am ITM Dresden von den dortigen Mitarbeitern Biaxialzugversuche an einer von der Fa. Zwick (Kapitel 5.2.1, Abbildung 15) entwickelten Maschine durchgeführt. Diese Maschine verfügt über eine Wegsteuerung, d.h. zwei gegenüberliegende Klemmenpaare bewegen sich mit einer definierten Geschwindigkeit voneinander weg und erzeugen dadurch die Dehnung im Textil. Zuerst stellt sich die Frage, wie der Versuchsablauf zu gestalten sei, um einen Vergleich mit dem Schlauchversuch, der kraftgesteuert abläuft, herzustellen. Eine Möglichkeit besteht darin, die Wegsteuerung der Biaxial-Zugprüfmaschine entsprechend der Lastfälle zu programmieren. Realisiert wird dies durch die Verfahrensgeschwindigkeit der einzelnen Achsen. So wird etwa beim Lastfall 1:0,1 Kett- zu Schussrichtung in Kett- richtung eine Verfahrensgeschwindigkeit von 100 mm/min und in Schussrichtung von 10 mm/min eingestellt [WEN 11]. Dieses Verfahren gelingt dann, wenn die Anisotropie in den Hauptrichtungen nur schwach ausgeprägt ist. Für Materialien mit starker Anisotropie, wie es bei dem Material BSS auftritt, ist die Auswertung hinsichtlich eines Vergleichs mit dem Schlauchversuch nicht möglich.

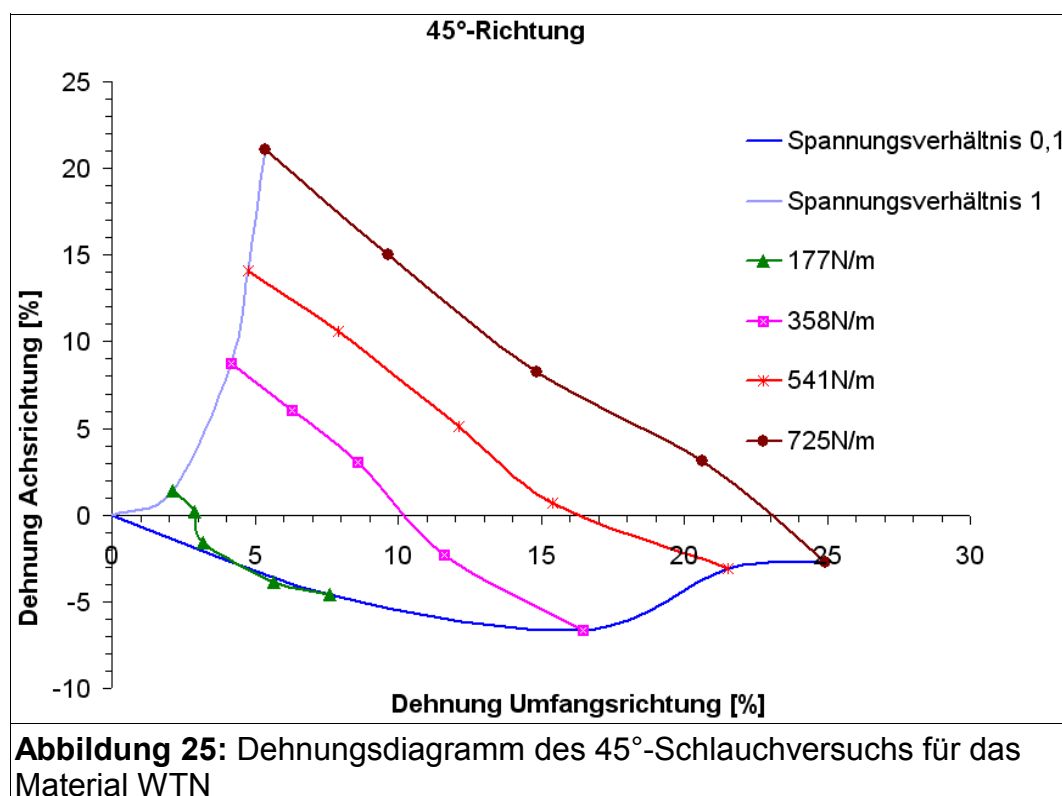
Abbildung 24 zeigt den Vergleich der Auswertung des Biaxial-Zugversuchs und des Schlauchversuchs für das Material WTN.



Im Diagramm geben die Zahlenwerte in der Legende die vorliegenden Spannungen in [N/m] an. Die Differenzen der oberen und unteren Dehngrenzen ergeben sich daraus, dass der Biax-Zugversuch kontinuierlich, der Schlauchversuch jedoch diskontinuierlich ausgeführt wird. Die Unterschiede in den Spannungsgrenzen lassen sich durch die Höhe der Vorspannung begründen. Nach Aufbringen der Vorspannung werden Spannung und Dehnung in beiden Versuchen auf Null gesetzt. Beim Schlauchversuch wird die Vorspannung über ein Präzisionsdruckregelventil eingestellt, welches bei geringer Druckdifferenz ungenau ist. Die aus Abbildung 24 ablesbaren Unterschiede liegen bei max. ca. 2% Dehnung, was angesichts der völlig unterschiedlichen Versuchsverfahren als akzeptabel bezeichnet werden kann. Die obere Dehngrenze liegt beim Biax-Zugversuch exakt auf der 45°-Linie zwischen Kett- und Schussrichtung, was zu erwarten ist, da in beide Richtungen mit derselben Geschwindigkeit gezogen werden. Beim Schlauchversuch liegt diese Grenze jedoch unterhalb der 45°-Linie.

6.2.7 Scherung

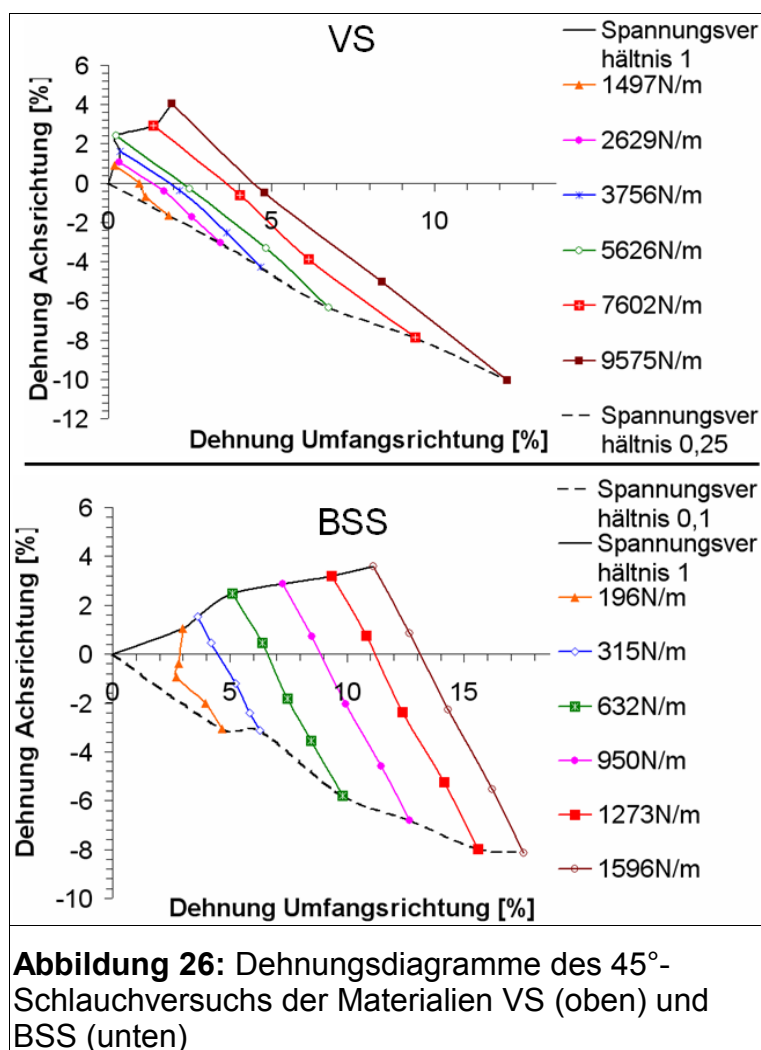
Im Schlauchversuch können die Dehnungs-Dehnungsdiagramme für die 45°-Richtung auf dieselbe Weise wie für die anderen Belastungsfälle ermittelt werden. Abbildung 25 zeigt die Darstellung der Kurven für das Material WTN.



Zunächst fällt bei diesem Versuch auf, dass die Dehnungen bei vergleichbarer Spannung um etwa das Fünffache höher liegen als bei den Zugversuchen in den Haupttrichtung.

Außerdem zeigt das Diagramm in Abbildung 25, dass die maximalen Dehnungswerte nahezu dieselbe Größe in Umfangs- und Achsrichtung erreichen. Da die Hauptrichtungen symmetrisch unter dem Winkel von 45° im Probenkörper liegen, ist anzunehmen, dass die Kurve des Spannungsverhältnisses von 1:1 in Achs- und Umfangsrichtung ungefähr eine gedachte 45° -Linie zwischen den Achsen des Diagramms bildet.

Bei der Versuchsdurchführung wird festgestellt, dass, ähnlich wie bei einer Ziehharmonika, die Proben sich unter geringer Kraft in Achsrichtung bei konstantem Druck stark dehnen lassen. Möglicherweise ist dieser Effekt eng mit den Randbedingungen des Schlauchversuchs verbunden. Die Versuchsergebnisse beweisen bei allen Materialien, dass der G-Modul sehr gering ist im Vergleich zum E-Modul. Somit ist insbesondere der Lastfall 1:1, bei dem die resultierende Spannung gerade in Faserrichtung liegt, besonders anfällig auf die Randbedingungen des Versuchsaufbaus. Deshalb werden die Materialien VS und BSS für einen Vergleich herangezogen, wie in Abbildung 26 dargestellt. Sie zeigt die Schlauchversuche unter 45° -Winkelrichtung für das Material VS (oben) und BSS (unten).



In den Diagrammen fällt besonders die unterschiedlich ausgeprägten Dehnungen in Umfangs- und Achsrichtung beim Lastfall 1:1 auf. Dieser Lastfall ist, wie bereits an anderer Stelle erwähnt, aufgrund gleich hoher Spannungen in beiden Richtungen besonders kritisch und kann deshalb bei der Ermittlung des G-Modul nicht berücksichtigt werden. Der Lastfall 1:0,1 liegt besonders nahe am monoaxialen Zugversuch. Bei reiner Scherung sollte die Dehnung in Umfangsrichtung gleich der negativen Dehnung in Achsrichtung sein. Die Differenzen bilden die Dehnungen in der Faserrichtung und die Anisotropie der Materialien. Besonders auffällig ist dies bei der Auswertung des Materials WTN (Abbildung 25). Hier liegt die Dehnung in Achsrichtung bei weniger als 5%, während die Dehnung in der Umfangsrichtung 25% erreicht.

Anhand der Formeln (18-22, Kapitel 6.2.1) werden die Werte für das G-Modul errechnet und in Abhängigkeit der Scherspannung dargestellt (Abbildung 27).

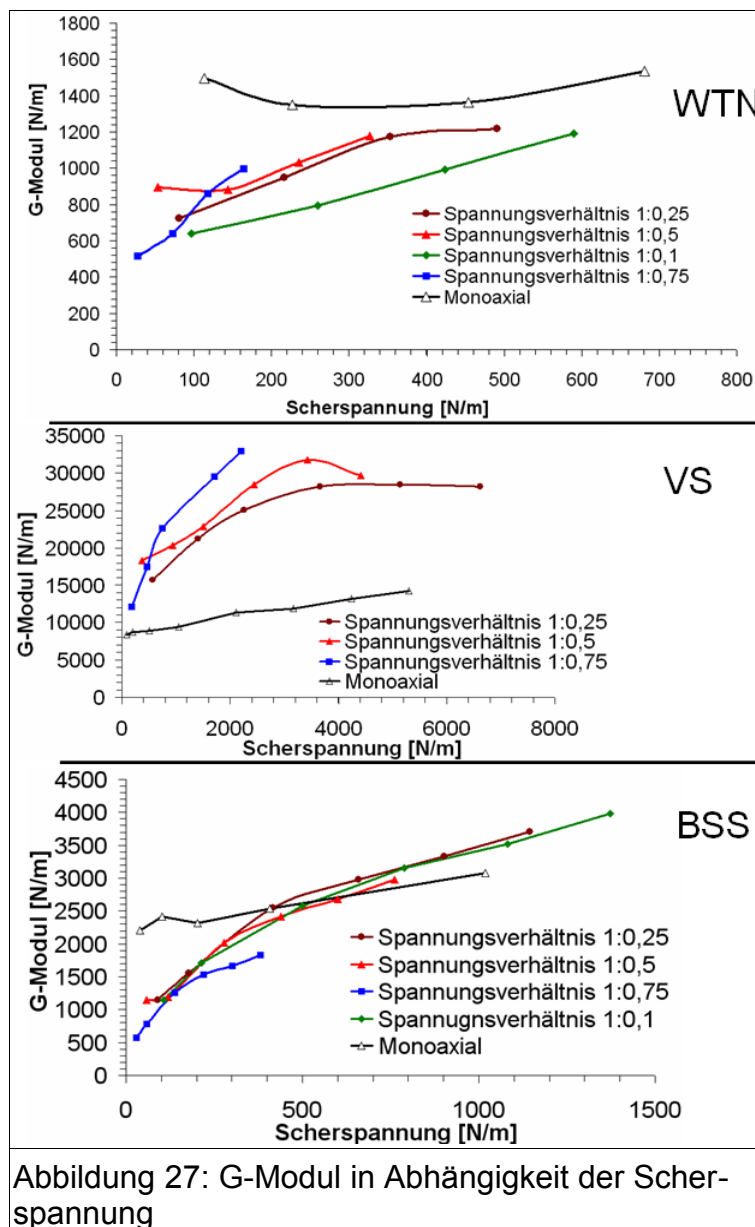


Abbildung 27: G-Modul in Abhängigkeit der Scherspannung

Die Diagramme (Abbildung 27) zeigen, dass der Betrag des G-Moduls mit steigender Scherspannung deutlich zunimmt. Diese Tendenz ist bei allen Materialien, allen Lastfällen und, wenngleich auch nicht so stark ausgeprägt, beim monoaxialen Scherzug festzustellen. Betrachtet man den Lastfall 1:0,25 der beiden Gewebe WTN und VS in Abbildung 28, so lässt sich erkennen, dass nach einem anfänglichen Anstieg die Werte des G-Modul nicht weiter nennenswert steigen.

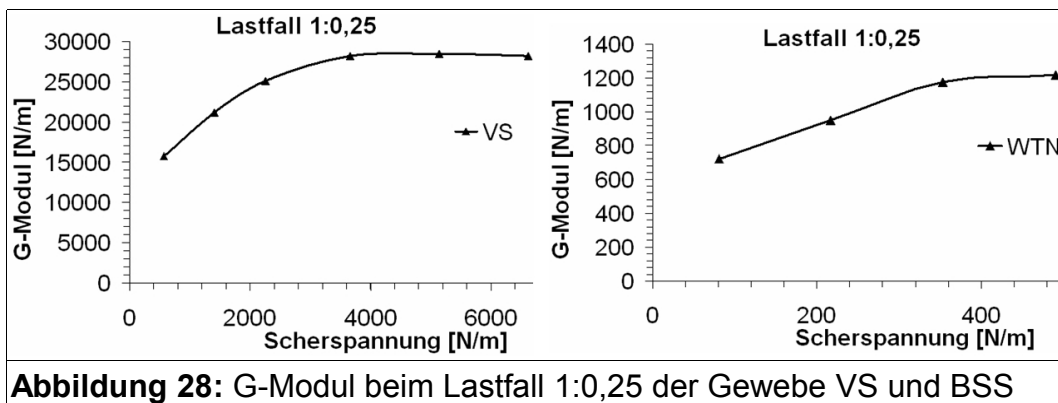


Abbildung 28: G-Modul beim Lastfall 1:0,25 der Gewebe VS und BSS

Die Auswertung der 45°-Schlauchversuche zeigen, dass dieser Versuch zur Ermittlung der Werte für das G-Modul geeignet ist. Die Ergebnisse belegen, dass bei Geweben sowie bei Maschenware die Werte nicht konstant sind, sondern mit der Scherspannung, und somit auch dem Scherwinkel, ansteigen.

6.2.8 Vorreckung

Die Vorreckung wird bei den Materialien WTN und VS vorgenommen und geschieht unter maximaler Belastung über etwa eine Minute (siehe Kapitel 5.1.2). Das Material BBS wird nicht vorgereckt, da dies für den Anwendungsfall, nämlich das Beziehen von Polstern, nicht erforderlich ist. Die Tabelle 9 zeigt die Dehnungswerte der Vorreckung der Materialien WTN und VS.

Material	Dehnungs Kettrichtung [%]	Dehnung Schussrichtung [%]
WTN	2,6	1,4
VS	0,3	0,6

Durch die Vorreckung wird, wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben, der plastische Anteil der Verformung aus dem Dehnungsverhalten vor dem eigentlichen Zugversuch genommen. Im Zugversuch werden anschließend rein elastische Dehnung gemessen. Je nach Anwendung kann die Vorreckung in eine FEM-Berechnung implementiert werden.

6.2.9 Zusammenfassung der Modulermittlung

Für die biaxiale Zugbelastung an der schlauchförmigen Probe kann gezeigt werden, wie die Kennwerte für Elastizitäts- und Schubmodul zu ermitteln sind. Die Lastfallabhängigkeit technischer Textilien bezüglich deren Verformung kann dabei dargestellt werden. Außerdem werden Dehnungswerte für die Vorreckung auf die Verformung eines Textils für bestimmte Belastungen ermittelt. Das Ergebnis der Versuche ist somit ein umfassendes Kennwertespektrum für das Elastizitätsmodul der ausgewählten Materialien WTN, VS und BSS (Tabelle 10). Für das Schubmodul wird gezeigt, dass die Werte bei unterschiedlicher Schubspannung variieren. Sie sind deshalb in Tabelle 10 nicht dargestellt.

In Übereinstimmung ist bei allen drei Materialien zu beobachten, dass die Steifigkeiten zum Lastfall 1:1 hin zunehmen, mit Ausnahme der Maschenreihenrichtung des Materials BSS, bei der dieser Kennwert ungefähr konstant bleibt. Da in der orthotropen Steifigkeitsformulierung die Lastfallabhängigkeit nicht vorgesehen ist, wird jeweils der mittlere Wert zwischen höchsten und geringsten gemessenen E-Modul als Eingabewert für weitere FEM-Berechnungen definiert.

Tabelle 10: E-Modul aus dem Schlauchversuch aller Materialien						
WTN (Gewebe)						
Spannungsverhältnis	Kettrichtung		Schussrichtung		45°-Richtung	
	E-Modul linearisiert	Betrag [N/mm]	E-Modul linearisiert	Betrag [N/mm]	E-Modul linearisiert	Betrag [N/mm]
1 : 0,1	E1	35	E1	25	E1	2,7
1 : 0,25	E2	40	E2	28	E2	3,5
1 : 0,5	E3	44	E3	34	E3	4,6
1 : 0,75	E4	44	E4	35	E4	6,8
1 : 1	E5	46	E5	34	E5	11,9
	Mittelwert	42	Mittelwert	31	Mittelwert	5,9
	Modul E₁	42 ± 4	Modul E₂	30 ± 5	Modul E₄₅	7 ± 4
VS (Gewebe)						
Spannungsverhältnis	Kettrichtung		Schussrichtung		45°-Richtung	
	E-Modul linearisiert	Betrag [N/mm]	E-Modul linearisiert	Betrag [N/mm]	E-Modul linearisiert	Betrag [N/mm]
1 : 0,1	E1	540	E1	304	E1	60
1 : 0,25	E2	560	E2	352	E2	80
1 : 0,5	E3	686	E3	396	E3	117
1 : 0,75	E4	682	E4	418	E4	205
1 : 1	E5	660	E5	398	E5	475
	Mittelwert	626	Mittelwert	374	Mittelwert	187
	Modul E₁	600 ± 60	Modul E₂	370 ± 50	Modul E₄₅	185 ± 100
BSS (Maschenware)						
Spannungsverhältnis	Maschenreihenrichtung		Maschenstäbchenrichtung		45°-Richtung	
	E-Modul linearisiert	Betrag [N/mm]	E-Modul linearisiert	Betrag [N/mm]	E-Modul linearisiert	Betrag [N/mm]
1 : 0,25	E2	3,7	E2	46	E2	10,8
1 : 0,5	E3	3,4	E3	62	E3	12,2
1 : 0,75	E4	3,5	E4	88	E4	13,8
1 : 1	E5	3,6	E5	200	E5	18,7
	Mittelwert	3,5	Mittelwert	86	Mittelwert	13,2
	Modul E₁	3,5 ± 0,1	Modul E₂	100 ± 60	Modul E₄₅	14 ± 4

6.3 Nahtschlauchversuch

Im Schlauchversuch besteht die Notwendigkeit, einen rechteckigen Zuschnitt mit einer (geraden) Naht zu fügen. Deshalb ist es sinnvoll der Frage nachzugehen, ob diese Fügestelle, künftig als Naht bezeichnet, zur Erhöhung der Steifigkeit der textilen Fläche beiträgt und diesen Effekt zu quantifizieren. Die Nahtarten, die zum Fügen der einzelnen Materialien verwendet werden, sind in Tabelle 6 des Kapitels 6.1.3 verzeichnet.

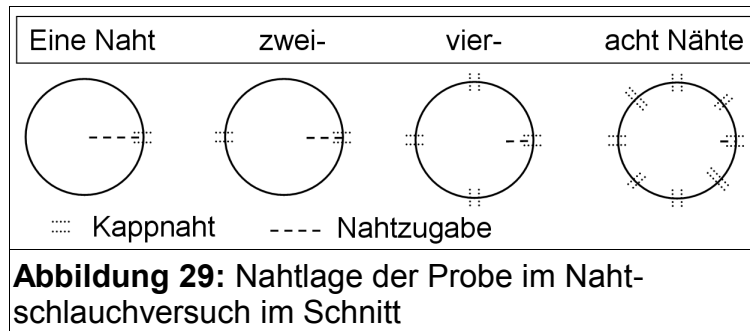
Die Naht kann generell als „Störstelle“ in einer textilen Fläche bezeichnet werden. Dies gilt insbesondere in Hinblick auf die Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung. Bei einer Zugkrafttrichtung quer zur Naht sollte das Versagen einer Probe zwar nicht in der Naht, aber in direkter Umgebung stattfinden [REU 00]. Bei der biaxialen Zugbelastung des Schlauchversuchs ist dieses Versagensverhalten auch so zu beobachten. Wenn die textile Probe bis zum Bersten belastet wird, so kann das Versagen im Umfeld der Naht festgestellt werden. Grund dafür ist, dass die Naht in der Regel die Deformation einschränkt. Die Spannungsspitzen entstehen somit immer im Übergangsbereich von der Naht zur Fläche.

In einigen wenigen Versuchen wird die Probe im Schlauchversuch aufgrund des Innendrucks zum Versagen gebracht. Die Spannung in Umfangsrichtung liegt dabei sehr nahe an der in Streifenzugversuch gemessenen Höchstzugspannung. Das kann als Indiz dafür gewertet werden, dass die Naht die Festigkeit der textilen Fläche in Umfangsrichtung nur unwesentlich beeinflusst. Um die Verformung an der Naht im Schlauchversuch festzustellen, wird in diesem Bereich der Radius gemessen. Wenn die Naht die Steifigkeit des Textils erhöht, dann hätte die gemessene Änderung des Radius an dieser Stelle geringer als am restlichen Umfang ausfallen müssen. Dies ist aber bei keinem der geprüften Materialien zu beobachten. Aufgrund dieser Erfahrungen ist keine wesentliche Beeinflussung der Deformation der Probe durch die Naht zu erwarten. Dennoch werden Anstrengungen unternommen, eine mögliche Erhöhung der Steifigkeit durch die Naht zu quantifizieren.

6.3.1 Versuchsablauf

Den Einfluss der Naht auf die Steifigkeit des Textils im Schlauchversuch eindeutig zu belegen, stellt sich als schwierige Aufgabe heraus. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Erhöhung der Anzahl der Nähte die Steifigkeit einer Probe messbar beeinflusst. Die Verwendung mehrerer Proben mit unterschiedlicher Anzahl von Nähten wäre aufgrund qualitativer Differenzen zwischen den Proben nicht zielführend gewesen. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, wird daher in einer Probe schrittweise die Anzahl der Nähte erhöht. Dazu wird eine Probe mit zunächst nur einer Naht, aber sehr großer Nahtzugabe, hergestellt und geprüft. Diese Nahtzugabe wird nicht in die Einspannung des Schlauchversuchs eingebracht, sondern nur lose ins Innere des Schlauchs eingelegt. So kann der Versuch durchgeführt werden, ohne das Ergebnis durch Spannung in der Nahtzugabe zu verfälschen.

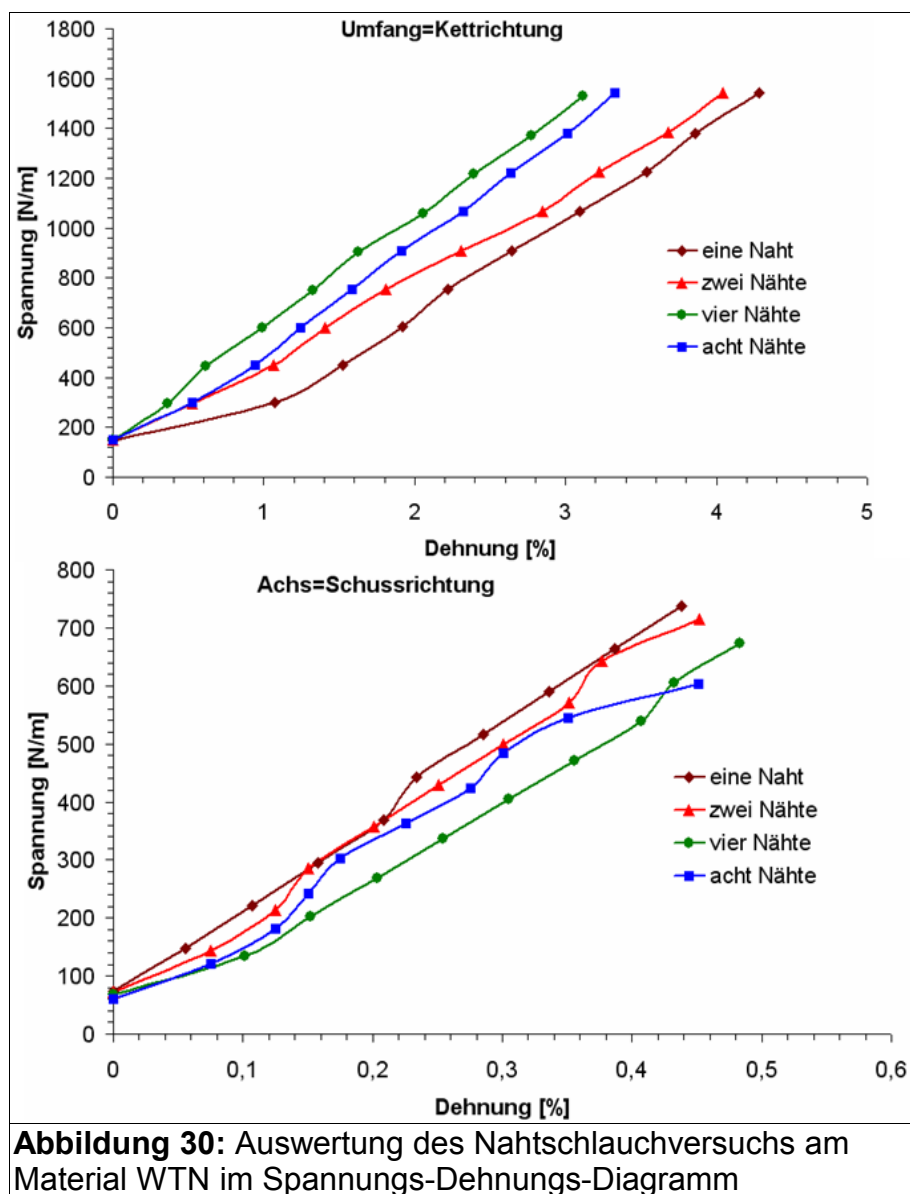
Nach dem Versuch wird die Probe aus der Einspannung genommen und die Naht aufgetrennt. Im gegebenen Zuschnitt wird eine zweite Naht mittig eingebracht ohne die Probe zu zerschneiden. Aufgrund der großen Nahtzugabe kann danach der Zuschnitt erneut maßhaltig genäht werden. Der Zugversuch wird wiederholt. Danach wird der Versuch mit vier Nähten und mit acht Nähten durchgeführt. Abbildung 29 zeigt in einer Skizze die Lage der Nähte im Schnitt durch die jeweilige Probe und die jeweils abnehmende Länge der Nahtzugabe.



Die Versuche erfolgen an einer Probe des Materials WTN mit Kettrichtung in Umfangsrichtung ohne zusätzliche axiale Kräfte, also im Spannungsverhältnis 1:0,5 von Umfangs- zu Achsrichtung.

6.3.2 Auswertung des Nahtschlauchversuchs

Die Darstellung der Ergebnisse des Nahtschlauchversuchs sind in den folgenden Spannungs-Dehnungs-Diagrammen dargestellt, wobei die einzelnen Versuche zusammen eine Schar von vier Kurven bilden (Abbildung 30). Die Spannung wird über die Länge des tatsächlich im Einsatz befindlichen Materials errechnet, also mit den Materialzugaben von jeder vorhandenen Naht. Abbildung 30 zeigt die Analyse des Nahtschlauchversuchs sowohl in Kett- oder Umfangsrichtung (Abbildung 30 oben) als auch in Schuss- oder Achsrichtung (Abbildung 30 unten). Die Dehnungszustände werden mit steigender Spannung quer und längs des Nahtverlaufs aufgezeichnet.



Die Diagramme belegen, dass beim Material WTN weder quer noch längs der Naht eine signifikante Änderung der Dehnung aufgrund der Anzahl der Nähte eintritt. Dies ist ersichtlich aus der Parallelität der einzelnen Kurven. Die Differenzen in der Höhe der Kurven sind mit Messungenauigkeiten zu begründen. Die Höhe der Vorspannung durch den geringen Innendruck lässt sich in den Diagrammen durch den Spannungswert bei 0% Dehnung ablesen.

Im Hinblick auf die geplante FEM-Simulation lässt sich aus den Ergebnissen schließen, dass für die unter Zugbelastung stehende Naht kein separates Materialmodell zur Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhalten erstellt werden muss.

6.4 Versuch „gekrümmter Schlauch“

Während es sich bei einem zylindrischen Schlauch um eine Regelgeometrie handelt, deren Oberfläche sich abwickeln lässt, liegt beim „gekrümmten Schlauch“ eine Geometrie vor, die dadurch gekennzeichnet ist, dass ihre Oberfläche mathematisch nicht abwickelbar ist (siehe Kapitel 3.2).

Das Ziel des Versuchs ist es, den Zuschnitt des Textils so zu gestalten, dass sich die gewünschte Geometrie infolge eines definierten Innendrucks p_0 möglichst genau einstellt.

6.4.1 Versuchsaufbau

Mit Hilfe einer speziell entwickelten Versuchsvorrichtung wird dieser Versuch praktisch ausgeführt. Die in Abbildung 31 dargestellte Skizze veranschaulicht das Funktionsprinzip des Versuchs. Es wird eine textile Hülle in Form eines Torusausschnitts (konstanter Radius der Mittellinie und des Querschnitts) konfektioniert und an den Enden in einer Einspannung links an einem Festlager und rechts an einem Loslager montiert.

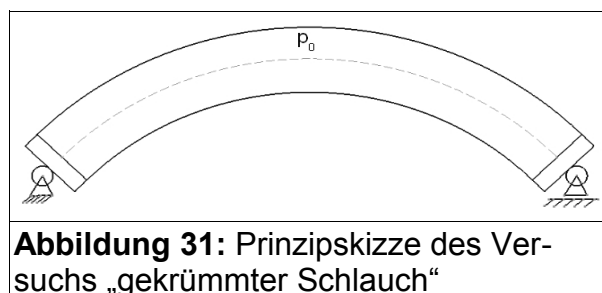


Abbildung 31: Prinzipskizze des Versuchs „gekrümmter Schlauch“

Das Loslager, sowie die Drehachsen an der Einspannung, ermöglichen der textilen Hülle unter Innendruck die formgebende Funktion.

Bei der Umsetzung dieses Prinzips in eine Versuchsvorrichtung wird analog zur Einspannung des Schlauchversuchs das textile Material an dessen Enden jeweils auf einem Konus fixiert. Der Durchmesser des Schlauchs wird auf 100 mm, der Durchmesser der Einspannung auf 105 mm festgelegt. Damit sich die textile Hülle frei ausformen kann ist es notwendig, die Einspannung mit rotatorischen Freiheitsgraden in allen Richtungen zu versehen. Die Drehachse ist nahe des Schwerpunkts der gesamten Einspannung angebracht, wodurch der Einfluss des Eigengewichts der Einspannung auf die Ausformung des Prüfkörpers minimiert wird. Abbildung 32 zeigt in der Zusammenbauzeichnung den konstruktiven Aufbau der Einspannvorrichtung.

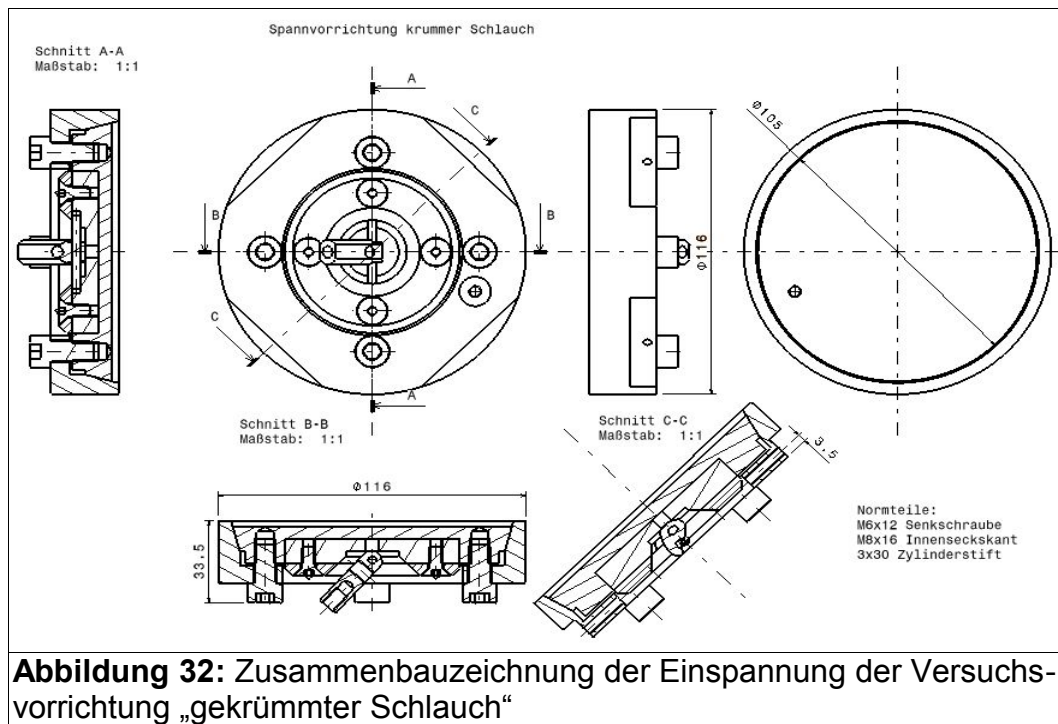


Abbildung 32: Zusammenbauzeichnung der Einspannung der Versuchsvorrichtung „gekrümmter Schlauch“

Abbildung 32 zeigt u.a. in der Draufsicht eine Drehachse um einen Zylinderstift. In Schnitt A-A ist dessen Fixierung zwischen zwei, mit Senkschrauben verbundenen Einzelteilen ersichtlich. Die Vorrichtung besteht aus vier Einzelteilen, die zwei äußeren dienen der Einspannung des Textils, die beiden inneren eines weiteren rotatorischen Freiheitsgrades. Dieser kann, wie im Schnitt C-C zu sehen ist, mittels Stiftschrauben vom äußeren Umfang her fixiert werden. Diese Schrauben verhindern zusätzlich, dass sich die beiden inneren Bauteile von den äußeren ablösen. Die Rückansicht zeigt die Gewindebohrung zur Druckluftzuführung, durch die sich die beiden sonst identischen Einspannungen unterscheiden.

6.4.2 Herstellung der Proben

Zur Vorbereitung des Versuchs muss zunächst die Nahtlage ermittelt werden, an der die Flächen des Prüfkörpers aufzuteilen sind. Zu diesem Zwecke werden mehrere Nahtlagen unter Variation der Winkel (wie in Schnitt A-A der Abbildung 32 dargestellt) mit der Software „PADMAKER“ abgewickelt. PADMAKER ist eine Software der Firma CES Eckard (Stuttgart-Möhringen) mit der textile Zuschnitte erzeugt werden können. Die Konstruktion der dazu notwendigen Flächen wird im CAD-Programm CATIA V5 R16 erstellt und mit PADMAKER direkt gekoppelt. Mithilfe der Spannungsanalyse von PADMAKER wird die Nahtlage unter den Winkeln 60° zu 120° festgelegt (siehe Abbildung 33). Maßgebend dafür ist eine möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung in den einzelnen Schnittteilen. Abbildung 33 zeigt die Flächenkonstruktion in der Seitenansicht und dem Schnitt A-A senkrecht zur Mittelachse.

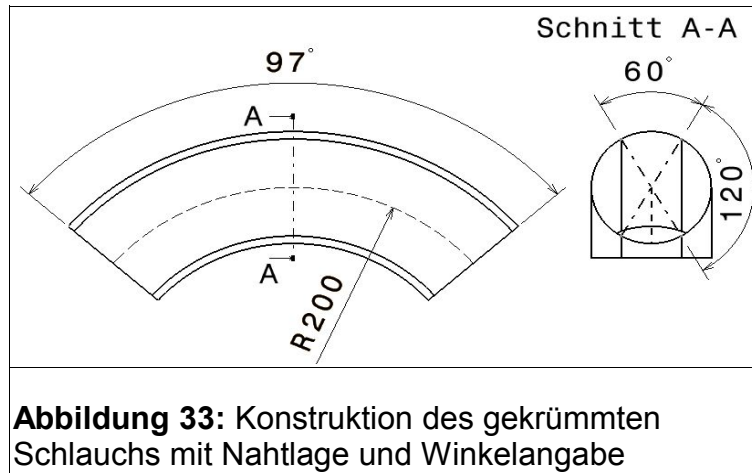


Abbildung 33: Konstruktion des gekrümmten Schlauchs mit Nahtlage und Winkelangabe

Die Abwicklung des Systems „PADMAKER“ dient zunächst als Schnittmuster für die Herstellung des gekrümmten Schlauchs und dann als Basis für die weiteren Optimierung des Zuschnitts. Es wird das Material WTN für die Herstellung gewählt. Nach dem Fügen wird der Schlauch mit Streckfolie belegt. Die Folie wird nach demselben Schnittmuster ausgeschnitten, die Einzelteile miteinander verklebt und anschließend an der textilen Hülle punktuell mit dauerelastischem Klebstoff fixiert. Gemeinsam werden sie in die Einspannung montiert und der luftdichte Schlauch mit dem Innendruck $p_0 = 0,2$ bar beaufschlagt. Die Maßhaltigkeit des entstehenden Körpers wird mit Hilfe von Papierschablonen, sowohl quer als auch längs der Mittelachse beurteilt. Abbildung 34 zeigt den für die Ausformung der Kontur maßgeblichen Zuschnitt des Mittelteils mit Nahtzugabe (links) und den textilen Körper im Versuch in der Seitenansicht (rechts).

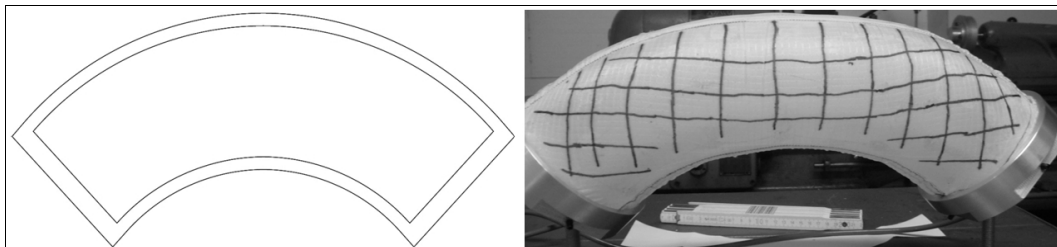


Abbildung 34: Gekrümmter Schlauch: Zuschnitt des Mittelteils mit Nahtzugabe (links) und Formkörper in der Versuchseinrichtung (rechts)

6.4.3 Versuchsdurchführung

Im Textil sind Kett- und Schussrichtung gut zu erkennen und können mit einem Filzstift nachgezeichnet werden. In Abbildung 34 wird deutlich, wie sich die ursprünglich rechteckigen Markierungen zur Raute verzerren und somit die unter Innendruck entstehende Scherung abbilden. Die Beurteilung anhand der Schablone ergibt (siehe Tabelle 11, Kapitel 6.4.4):

- In der Seitenansicht ist die Krümmung des Schlauchs deutlich zu gering, vor allem im mittleren Teil, dessen Kontur abgeflacht ist.
- Der Durchmesser des Schlauchs ist im mittleren Teil maßhaltig, links und rechts zur Einspannung hingehend wird eine deutliche Zunahme des Durchmessers festgestellt.

Außerdem wird beobachtet, dass sich die Form bei Zunahme des Innendrucks nicht weiter sichtbar verändert. Das lässt darauf schließen, dass sich in diesem Versuch die Verformung infolge Scherung im Textil bereits bei geringem Druck einstellt. Demzufolge kann sie unabhängig von der Dehnung in Faserrichtung betrachtet werden. Dies führt zur Vermutung, dass sich das Material in Faserrichtung nach den Hauptspannungsrichtungen eines isotropen Vergleichsmaterials ausrichtet.

Um diese Annahme zu prüfen, wird zunächst die Hauptspannungsrichtungen in einer Analyse mit dem FEM-Berechnungssystem „ABAQUS“ anhand einer dünnwandigen Schale mit hohem E-Modul unter geringem Druck ermittelt. Die dabei entstehende Verformung ist vernachlässigbar. Abbildung 35 zeigt das Ergebnis der Berechnung, in dem die Pfeile die Hauptspannungsrichtungen symbolisieren. Deren Winkel zur Achsrichtung ausgemessen ergeben einen Maximalwert von 15° .

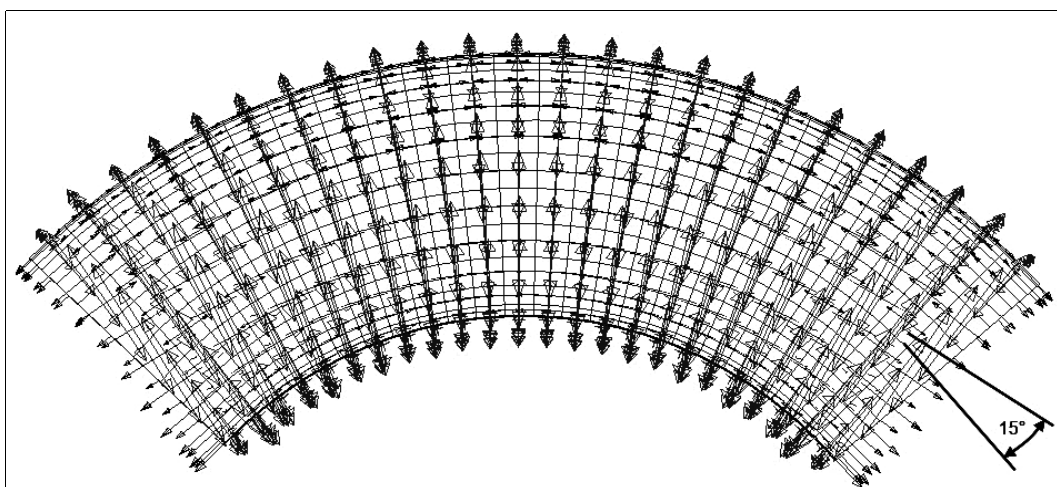
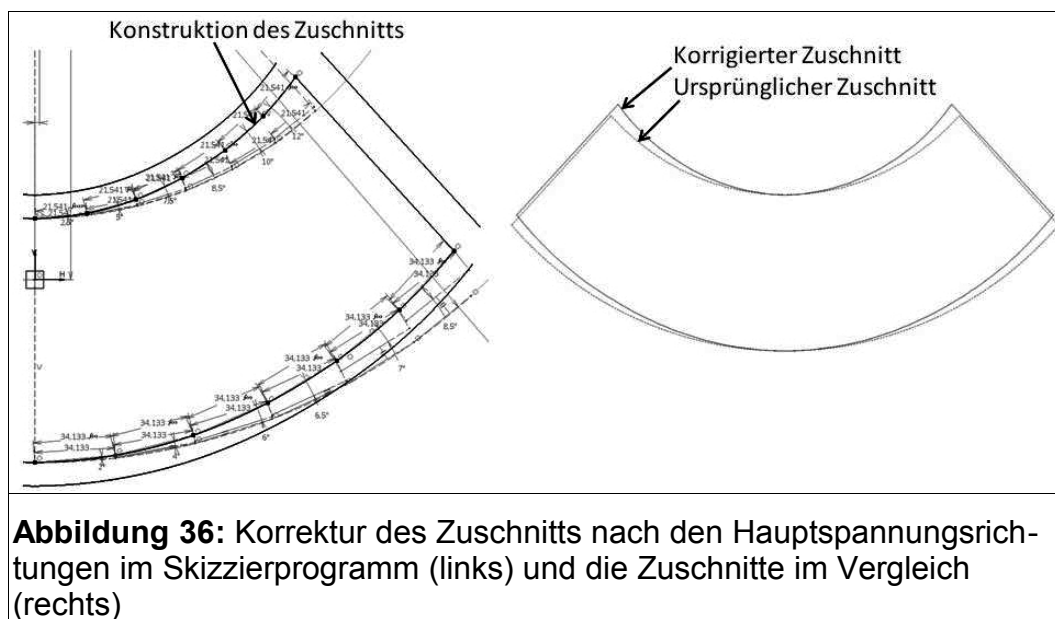


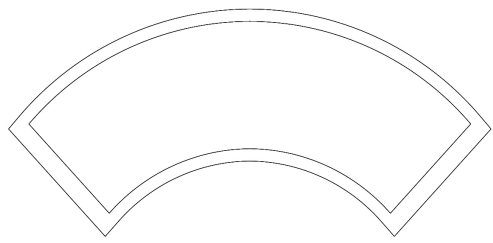
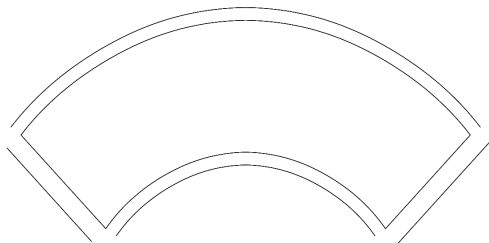
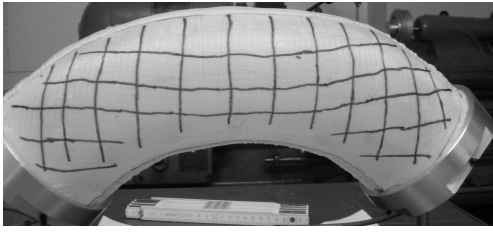
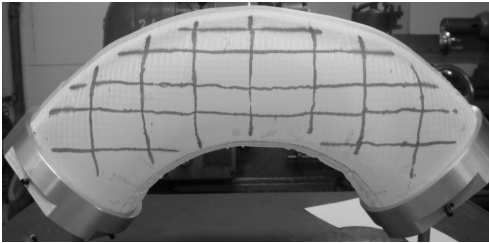
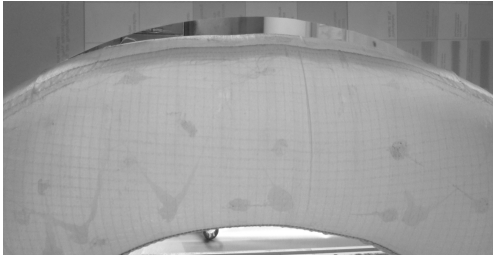
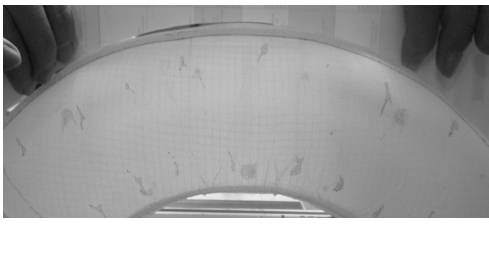
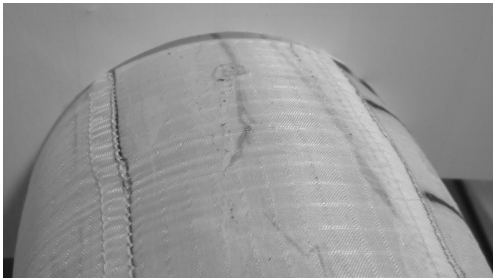
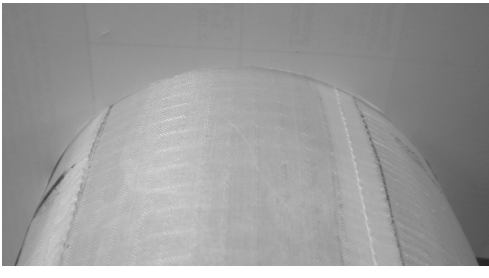
Abbildung 35: Hauptspannungsrichtungen der Vergleichsrechnung mit isotropem Material und der Winkel zur Achsrichtung am gekrümmten Schlauch (FEM-Berechnung mit ABAQUS)

Aus der Basis dieser Berechnung wird der bestehende Zuschnitt so geändert, dass sich der Winkel von der Spiegellinie nach außen kontinuierlich linear um insgesamt 15° erhöht. Abbildung 36 zeigt die Korrektur des Zuschnitts im Skizzierprogramm von CATIA (links) sowie den geänderten und ursprünglichen Schnitt im Vergleich (rechts).



6.4.4 Versuchsauswertung

Der geänderte Zuschnitt wird vernäht und mit Folie ausgestattet. Dann wird der Versuch wiederholt. Tabelle 11 zeigt die Auswertung des Versuchs mit und ohne Korrektur des Zuschnitts.

Tabelle 11: Probenzuschnitt und Ergebnisse des Versuchs „gekrümmter Schlauch“ mit Schablonen		
	Padmaker Zuschnitt	Korrigierter Zuschnitt
Kontur + Naht- zugabe		
Sche- rung		
Form- genau- igkeit des Ra- dius		
Form- genau- igkeit des Durch- mes- sers		

Der Versuch zeigt, dass beim korrigierten Zuschnitt deutlich bessere Ergebnisse hinsichtlich der Formgenauigkeit in Radius und Durchmesser vorliegen. Das Verfahren, mit dem der Zuschnitt korrigiert wird, lässt sich allerdings nicht einfach auf andere Anwendungen übertragen. Generell ist zu beobachten, dass die Faserrichtungen des Gewebes sich den Hauptspannungsrichtungen anpassen. Die Korrektur des Zuschnitts im Versuch ist lediglich eine Einzellösung, die für die vorliegende Geometrie in Kombination mit dem verwendeten Textil zu einem verbesserten Ergebnis führt. Eine allgemein gültige Regel kann im Rahmen der Arbeiten nicht ermittelt werden.

7. Berechnungsbeispiele

In diesem Kapitel erfolgt die Anwendung der aus den Versuchen ermittelten Kennwerte auf die FEM-Berechnung von druckbeaufschlagten Geometrien. Ziel ist durch den Vergleich von Messwerten aus physikalischen Versuchen mit den Ergebnissen der FEM-Berechnung die Materialmodellierung zu validieren und die durch Linearisierung ermittelten Kennwerte des Modells bedingte Toleranzbreite der Berechnung zu quantifizieren. Dies wird mit zwei Beispielen, dem Wölbversuch und dem Schlauchversuch, durchgeführt. Mit dem Wölbversuch steht ein genormter Versuch zur Verfügung, bei dem eine textile Fläche mit einem durch Luft erzeugten Druck verformt wird. Der Wölbversuch ist einfach durchzuführen und im FEM-System zu modellieren. Er wird deshalb als erstes Beispiel angeführt.

7.1 Der Wölbversuch

Ziel des Versuchs ist die Ermittlung der Wölbhöhe unter einem festgelegten Druck. Die Ergebnisse sollen anschließend mit den Bechnungen unterschiedlicher FEM-Software verglichen werden. Mit dem Versuchsapparat „TrueBurst Model 810“ des Herstellers James H. Heal & Co. Ltd., Halifax England wird mit allen Materialien der Wölbversuch nach DIN EN ISO 13938-2 durchgeführt.

7.1.1 *Versuchsbeschreibung Wölbversuch*

Beim Wölbversuch wird eine textile Probe auf einer kreisrunden Fläche von 50 cm² mit einem pneumatischen Druck belastet. Da viele Textilien luftdurchlässig sind, ist der Versuchsapparat mit einer luftdichten Membran ausgestattet, die ihrerseits das Textil wölbt. Deren Steifigkeit wird in der Angabe des pneumatischen Drucks automatisch mit einbezogen. Das Ergebnis des Wölbversuchs ist die Wölbhöhe. Sie wird im Zentrum der Probe durch einen im Apparat integrierten Laserdistanzsensor gemessen. Außerdem ist der Druck, mit dem das Textil belastet wird, angezeigt. Dieser Test wird an allen Materialien mit jeweils drei Proben durchgeführt.

7.1.2 *Vergleichende Berechnung*

Die Berechnung der Wölbhöhe wird mit den FEM-Systemen „Marc Mentat 2010“ und „Abaqus 6.11-1“ durchgeführt. Das Ziel ist die Bestätigung der Berechnung anhand der Versuchsergebnisse und dadurch die Validierung der aus dem Schlauchversuch gewonnenen Materialkennwerte für das orthotrope Materialmodell. Das Berechnungsbeispiel wird deshalb gewählt, weil Versuch und Berechnung sehr einfach zu handhaben sind.

Die Generierung einer ebenen, kreisrunden Fläche mit Radius $R=39,9$ mm, deren statische Lagerung am Rand sowie einer Druckbelastung als Lasteingabe führen zu einer stabilen und schnellen impliziten Berechnung. Da im Materialmodell die Biegesteifigkeit der Textilien mit praktisch Null angegeben wird, muss im System „Marc“ der implizit dynamische Berechnungsmodus gewählt werden, während „Abaqus“ im Berechnungsmodus „Implizit Standard“ zum Ergebnis kommt. Ausgehend von der Beschreibung der Materialtheorie von MÜNSCH-REINHARD [MUR 95] wird das orthotrope Materialmodell über die Eingabe sog. Ingenieurskonstanten [RAI 03] mit den Kennwerten aus Tabelle 12 erstellt.

Tabelle 12: Kennwerte für das orthotrope Materialmodell der FEM-Systeme für alle geprüften Materialien

Material	E_1 [N/mm ²]	E_2 [N/mm ²]	E_3 [N/mm ²]	ν_{12}	ν_{23} = ν_{13}	G_{12} [N/mm ²]	$G_{13}=G_{23}$ [N/mm ²]	Dämpfung (MARC)
WTN	42	30	0,1	0,1	0	0,3	0,1	0,125
BSS	100	3,5	0,1	0,1	0	1,2	0,1	0,125
VS	600	370	0,1	-0,2	0	11	0,1	0,125

E_n = Elastizitätsmodul; ν_n = Querkontraktionszahlen; G_n = Schermodul

Da der Wert für G_{12} nicht direkt aus dem Versuch ermittelt werden kann, wird der Schlauchversuch unter 45° berechnet und der Wert so angepasst, dass sich annähernd gleiche Dehnungswerte in Umfangsrichtung einstellen. Die Querkontraktionszahlen ν_n werden aus dem Biax-Zugversuch und dem Schlauchversuch mit den Lastverhältnissen 1:0,1 geschätzt. Ihre genaue Ermittlung ist aufgrund des Faltenwurfs unterhalb dieses Lastverhältnisses nur schwer möglich. Außerdem werden alle Berechnungen mit Schalenelementen der Dicke 1 durchgeführt, da die Ergebnisse der Versuche auf der Annahme der Normierung der Dicke beruhen.

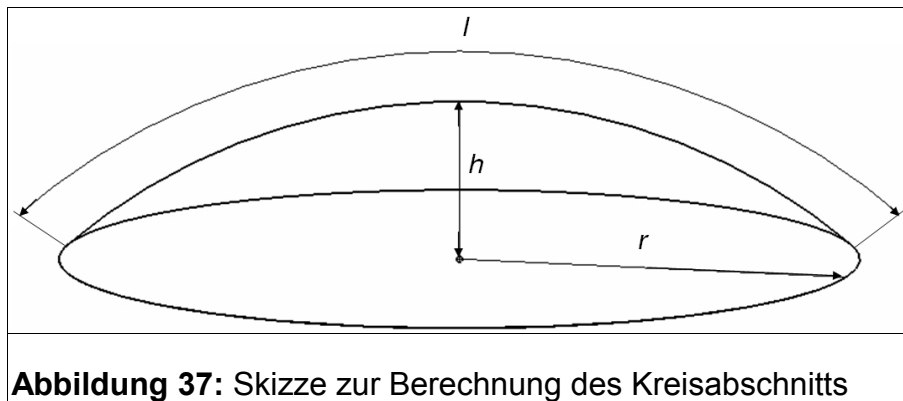
Für die Schalen werden höherwertige Rechteckelemente verwendet, deren Anzahl der Knoten (fünf oder sechs) keinen Einfluss auf die Ergebnisse nehmen. Die Lagerung der Schale erfolgt an deren Rand durch Fixierung der Translation in x-, y- und z-Richtung. Da die Definition des Materialmodells Biegeweichheit beinhaltet ($E_3 = 0,1$ N/mm²), bleibt die Berechnung durch die Fixierung der rotatorischen Freiheitsgrade in der Einspannung unbeeinflusst. Außerdem muss bei der Berechnung der Wölbhöhe aufgrund der kreisrunden Geometrie die Garnrichtung nicht beachtet werden. Unter der Annahme, dass es sich bei der Wölbung geometrisch um eine Kugelkappe handelt, wird anhand der Formel 26 für den Kreisabschnitt [PAP 09] über die Wölbhöhe auf die Dehnung in dieser Schnittebene geschlossen:

$$l = x \cdot \arcsin\left(\frac{2 \cdot r}{x}\right)$$

$$x = \left(\frac{r^2}{h} + h\right) \quad (26)$$

mit
 l = Kreisabschnitt
 r = Radius der Prüffläche
 h = Wölbhöhe

Abbildung 37 zeigt die Maße aus Formel 26 in einer Skizze.



Zusätzlich zur Berechnung mit Schalenelementen wird in ABAQUS mit Solid- und Membranelementen berechnet und die Ergebnisse verglichen. Es ergeben sich lediglich vernachlässigbar kleine Unterschiede in den Ergebnissen. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass die implizite Berechnung der Verformung von Textilien unabhängig vom Elementtyp vorgenommen werden kann.

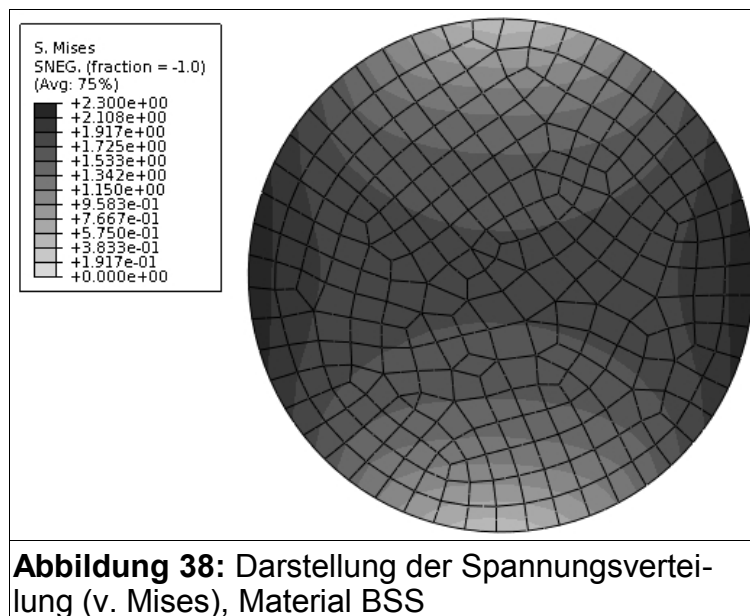
7.1.3 Versuchs- und Berechnungsergebnisse

Die Tabelle 13 zeigt die Ergebnisse des Wölbversuchs in der Gegenüberstellung von Versuch und Berechnung. Die Dehnung wird nach Formel 15 und Formel 26 aus der Wölbhöhe berechnet.

Tabelle 13: Versuchs- und Berechnungsergebnisse des Wölbversuchs					
	Versuch			Berechnung	
Material	Druck [bar]	Wölbhöhe [mm]	Dehnung [%]	Wölbhöhe [mm] Marc / Abaqus	Dehnung [%] Marc / Abaqus
WTN	0,5	15	9,6	11,3 / 11,4	5,4 / 5,5
VS	1,5	12,2	6,3	7,3 / 7,3	2,2 / 2,2
BSS	0,2	11,7	5,8	9,4 / 6,3	3,7 / 1,7

Die Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Wölbhöhen sind dadurch zu erklären, dass das Textil im Wölbversuch ohne Vorspannung verformt wird. Außerdem findet im Versuch keine Vorreckung statt. In den Kennwerten des Materialmodells sind sie jedoch mit einbezogen. Für die korrekte Berechnung müsste das Materialmodell so modifiziert werden, dass es anfänglich eine gewisse Dehnung spannungsfrei ermöglichen würde. Der Grund für die Differenzen zwischen gemessener und berechneter Wölbhöhe sind also die fehlende Vorreckung und Vorspannung im Wölbversuch.

Es war jedoch technisch nicht möglich, diese Werte zu quantifizieren, da die Verformung unterhalb der Vorspannung im Versuch nicht gemessen werden kann. Darüber hinaus ist dem Spannungsbilder der Abbildung 38 zu entnehmen, dass die Spannungen in Hauptrichtung durch den Mittelpunkt des Kreises sehr viel höher sind als in den umliegenden Bereichen.



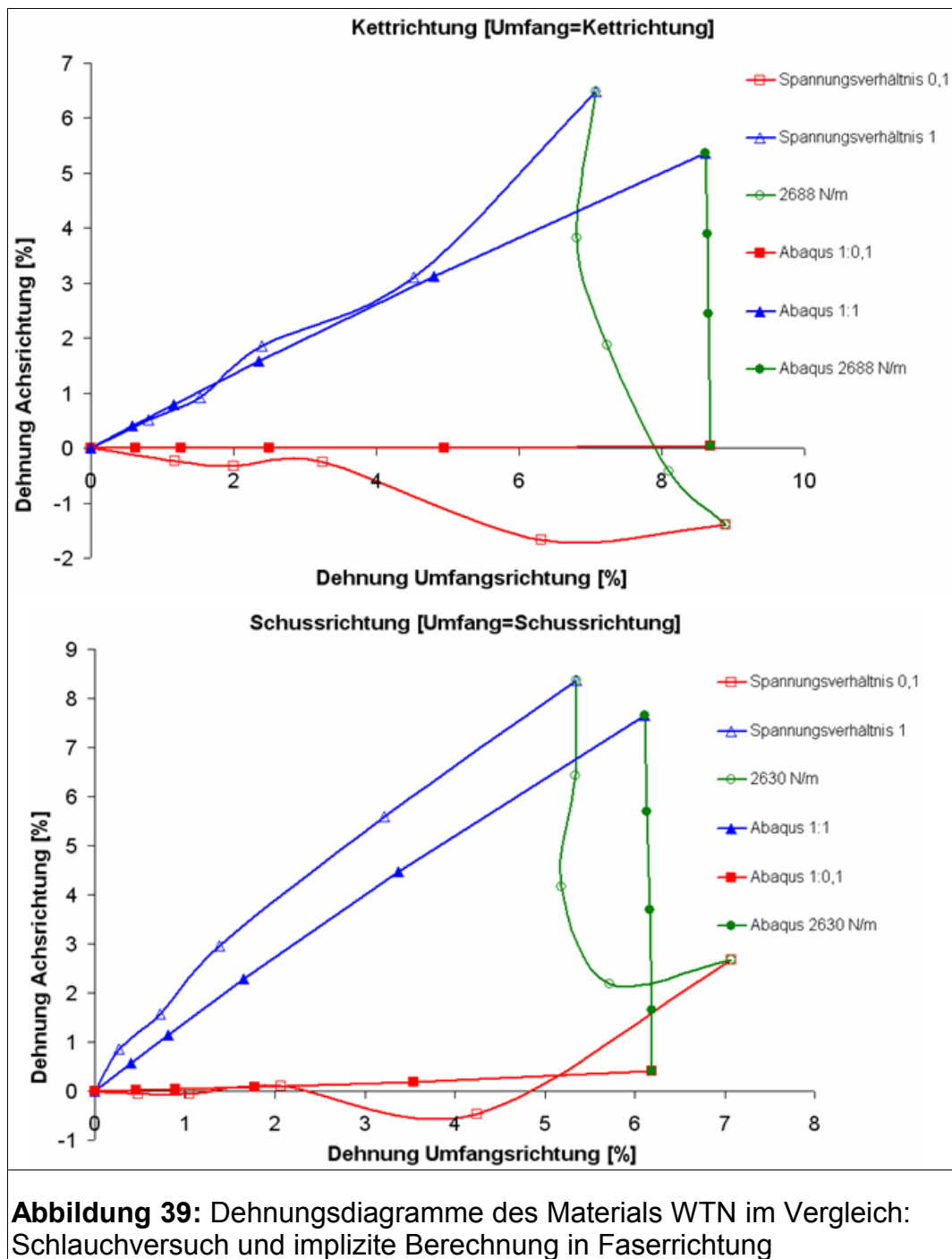
Da das Textil als inhomogenes Material bezeichnet werden kann, denn es besteht aus einzelnen Garnen, ist anzunehmen, dass die Garne um den Mittelpunkt tatsächlich erheblich mehr Dehnung erfahren als dies einer Berechnung mit einem kontinuumsmechanischen Materialmodell zu entnehmen ist. Das Ergebnis der Vergleichsuntersuchung war somit im Prinzip vielversprechend, lässt jedoch keine genaue Aussage zu. Um diese zu gewinnen, muss ein Beispiel berechnet werden, das überwiegend eine homogene Spannung in der Probe aufweist. Dazu wird als zweites Beispiel die Berechnung des Schlauchversuchs gewählt.

7.2 Der Schlauchversuch

Die FEM-Berechnung von technischen Textilien beinhaltet sowohl nichtlineare Statik (z.B. Cabriooverdeck) als auch nichtlineare Dynamik (z.B. Airbag). Für statische Berechnungen bietet sich die implizite Zeitintegration an. Die explizite Zeitintegration ist für die Simulation dynamischer Vorgänge oft vorteilhaft. Im Hinblick auf die Quantifizierung der Genauigkeit des verwendeten Materialmodells werden deshalb beide Berechnungsverfahren eingesetzt.

7.2.1 Implizite Berechnung

Die geometrische Modellierung des Schlauchversuchs wird mit einer zylindrischen Fläche mit $D=150$ mm und $L=400$ mm vorgenommen. An einem Rand wird die Translation fixiert. Am gegenüberliegenden Rand wird in Achsrichtung Translation und Rotation zugelassen. Zusätzlich muss für die Berechnung des 45°-Schlauchversuchs dieser Rand in dessen Ebene fixiert werden. Es werden an diesem Rand Zugkräfte entsprechend der Lastfälle im Versuch aufgebracht. Die Auswertung der Berechnungen bezüglich Spannung und Verformung wird in die Dehnungs-Dehnungs-Diagramme der Schlauchversuche (Abbildung 22, Kapitel 6.2.5) eingetragen. Sie ermöglichen den direkten Vergleich von Versuch und Berechnung. In Abbildung 39 sind berechnete und gemessene Werte des Materials WTN für beide Faserrichtungen dargestellt. Die Berechnung erfolgt im FEM-System „Abaqus“ mit den in Tabelle 12, Kapitel 7.1.2, angegebenen Kennwerten für das Materialmodell.



Die Diagramme der Abbildung 39 zeigen der Übersichtlichkeit halber lediglich die Grenzen der Verformung für die Lastfall- oder Spannungsverhältnisse 1:0,1 bis 1:1 (in der Legende: Spannungsverhältnis 0,1 und 1) sowie die gemessenen Verformungen der einzelnen Lastfälle bei Höchstspannung (in der Legende: 2688 N/m oben und 2630 N/m unten). Die Berechnungen, in der Legende mit „Abaqus“ bezeichnet, werden konform zum Versuch durchgeführt.

Aus den Diagrammen geht hervor, dass sich die Dehnungsbereiche von Versuch und Berechnung nicht exakt decken. Grund dafür ist die Linearisierung und Mittelwertbildung für den E-Modul und somit der Querkontraktionszahl.

Ob die Unschärfe des Materialmodells und die daraus resultierenden Berechnungsfehler toleriert werden können, hängt von der jeweiligen Anwendung ab.

Die Diagramme der impliziten Berechnung der Materialien VS und BSS in Faserrichtung befinden sich im Anhang.

7.2.2 Explizite Berechnung

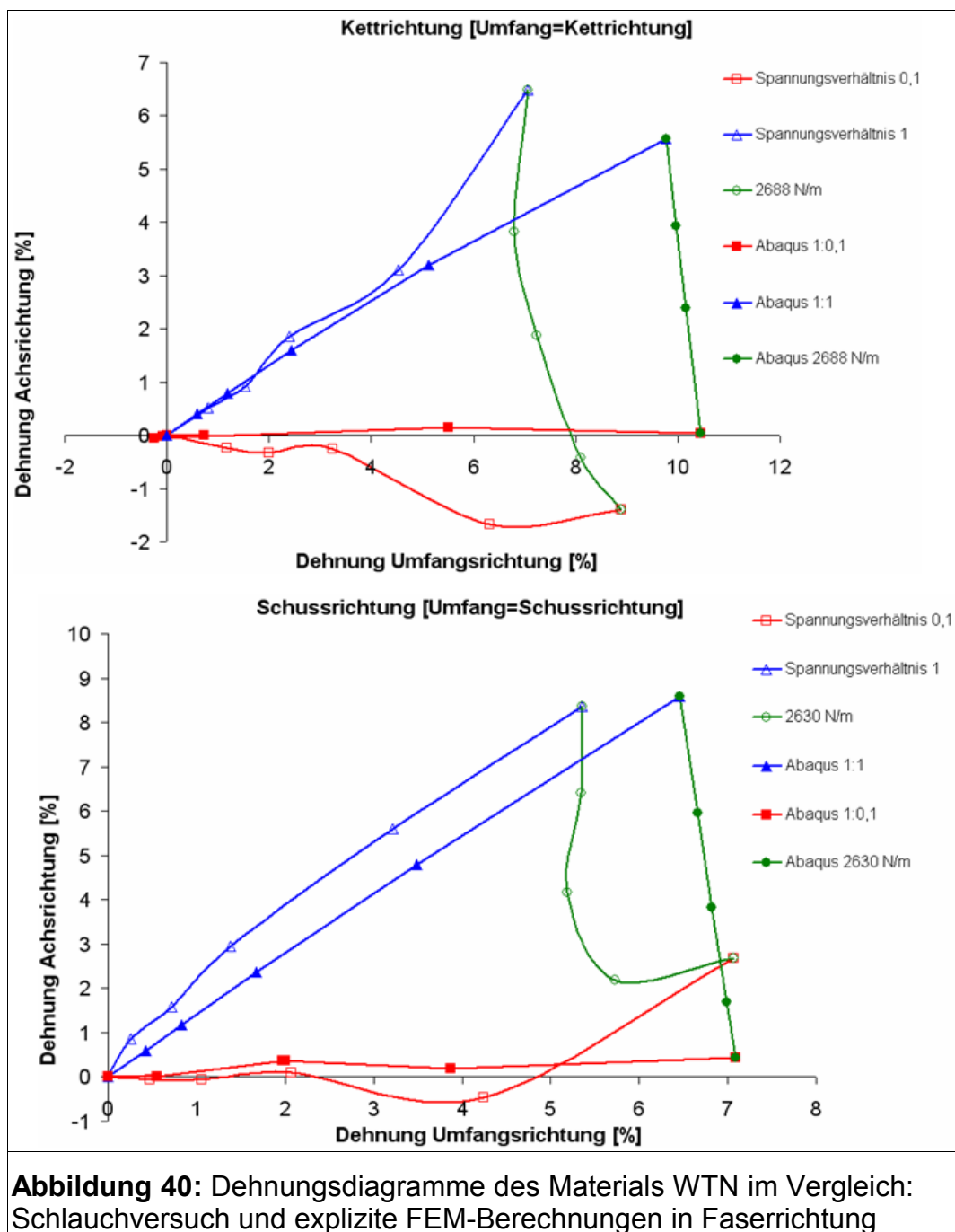
Für viele Anwendungen auf Basis dynamischer Vorgänge, beispielsweise bei der Berechnung von Airbags, ist die explizite FEM-Berechnung notwendig. Bezüglich des Materialmodells erfordert diese Berechnungsart zusätzliche Angaben zu Dichte und Dämpfung. Außerdem können die Berechnungen im System „Abaqus“ lediglich mit linearen Schalenelementen durchgeführt werden, was nachweislich die Genauigkeit der Ergebnisse einschränkt.

Die Kennwerte für Dichte und Dämpfung werden so gewählt, dass das Ergebnis der Berechnung eine homogene Spannungsverteilung im Schlauch anzeigt. Gerade bei der Dichte gibt es keine Übereinstimmung der Eingabewerte mit den physikalischen Größen des Textils. Die in Tabelle 14 notierten Kennwerte sind deshalb bezüglich der Dichte ohne Einheit.

Tabelle 14: Kennwerte für Dichte und Dämpfung für die explizite FEM-Berechnung

Material	Dichte	Dämpfung α [s ⁻¹]	Dämpfung β [s]
WTN	$1 \cdot 10^{-6}$	0,01	0,1
VS	$1 \cdot 10^{-6}$	0,001	0,01
BSS	$1 \cdot 10^{-7}$	0,001	0,015

Der Dämpfungsfaktor α wird im Abaqus Manual als „Rayleigh mass proportional damping“, der Dämpfungsfaktor β als „Rayleigh stiffness proportional damping“ angegeben. Die so erzielten expliziten Berechnungsergebnisse in Faserrichtung sind Abbildung 40 anhand der Dehnungsdiagramme für das Material WTN dargestellt.



Die implizite und die explizite Berechnung zeigen Unterschiede von bis zu 1,5% Dehnung in Umfangsrichtung (Vergleich: Abbildung 39 und 40). Die explizite Berechnung führt demnach zu etwas größeren Dehnungen und weist somit größere Differenzen zu den Versuchsergebnissen auf wie die implizite Berechnung. Grund dafür ist wahrscheinlich die Wahl der linearen Schalenelemente und die zusätzlichen Kennwerte für Dämpfung und Dichte.

Die Diagramme der expliziten Berechnung der Materialien VS und BSS in Faserrichtung befinden sich im Anhang.

7.2.3 Berechnung der Verformung 45° zur Faserrichtung

Der Kennwert des G-Modul ist die entscheidende Größe für die Verformung einer textilen Fläche unter 45°-Richtung zu den Faserrichtungen. Der G-Modul konnte im Schlauchversuch nicht als konstanter Wert ermittelt werden. Deshalb wird unter Variation der Eingabewerte der G-Modul mit der Dehnung in Umfangsrichtung im Spannungsverhältnis 1:0,25 bestimmt. Sie sind in Tabelle 12, Kapitel 7.1.2, für das Materialmodell der impliziten Berechnung zu finden und in Tabelle 15 für die expliziten Berechnungen ergänzt. Den Werten aus Tabelle 15 liegt ein Vergleich der monoaxialen Zugversuche mit den Berechnungen zugrunde.

Tabelle 15: G-Modulwerte für die implizite und explizite FEM-Berechnung mit Abaqus

	WTN	VS	BSS
G_{12} implizit [N/mm ²]	0,3	11	1,2
G_{12} explizit [N/mm ²]	0,82	18	3

Da der G-Modul aus der Scherspannung und der Dehnung in Umfangsrichtung berechnet wird (Formel 18), werden diese Größen für die Diagramme in Abbildung 41 herangezogen. Die Auswertung bezieht sich auf den Lastfall 1:0,25 und ist für das Material WTN dargestellt.

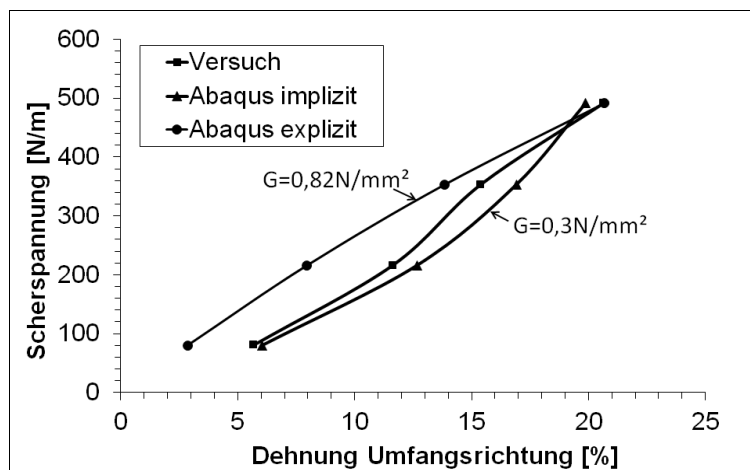
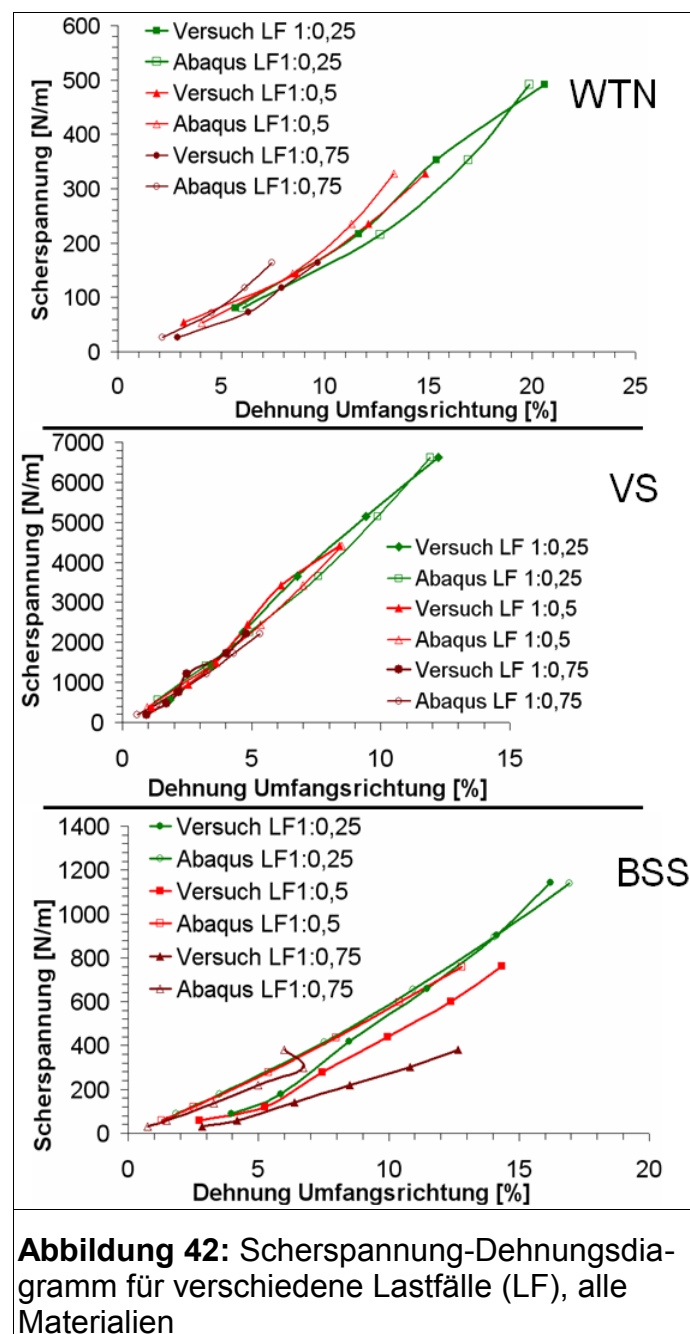


Abbildung 41: Scherspannungs-Dehnungsdiagramm von Versuch und Berechnung, Material WTN

Die Scherspannung erzeugt die Dehnung in Umfangsrichtung. Die Differenzen zwischen Versuch und Berechnung sind damit zu begründen, dass

- im Materialmodell keine lastfallabhängige Deformation berücksichtigt werden kann,
- der G-Modul im Materialmodell nicht vom Betrag der Scherspannung abhängt.

Somit ist die Berechnung der Deformation im Rahmen der Möglichkeiten dieser Materialmodellierung nur mit einer großen Toleranzbreite von 1-2% Dehnung möglich. Dies gilt für implizite Berechnungen mit dem System Abaqus für die Dehnung in Umfangsrichtung. In Abbildung 42 wird gezeigt, dass diese Toleranzbreite auch für weitere Lastfälle und die anderen Materialien gilt.



In Abbildung 42 ist zu erkennen, dass das beschichtete Material VS die beste Übereinstimmung von Versuch und Berechnung zeigt. Die größten Abweichungen hingegen treten beim Material BSS auf, dessen extrem anisotropen Eigenschaften sich auf die einzelnen Lastfälle auswirken. Zwischen Versuch und Berechnung zeigt sich im Lastfall 1:0,75 bei maximaler Scherspannung die größte Differenz von ungefähr 6% Dehnung beim Material BSS und <0,5% beim Material VS. Grund dafür sind die unterschiedliche Struktur der Materialien (BSS: Maschenware, VS: Gewebe) und die Beschichtung des Materials VS, welche die Scherung signifikant beeinflusst.

Da die impliziten Berechnungen zum Material VS in Abbildung 43 geringe Differenzen aufweisen, werden die Dehnungen in Achsrichtung für dieses Material in Abhängigkeit der Scherspannung (Abbildung 43) aufgezeichnet.

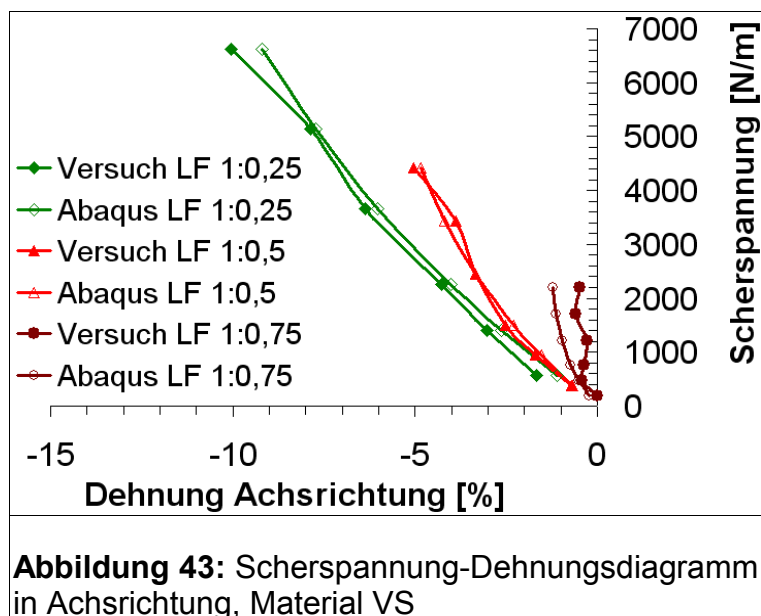


Abbildung 43 lässt erkennen, dass die Differenzen zwischen Versuch und Berechnung in den dargestellten Lastfällen (LF) bei maximal 1% Dehnung liegen.

7.2.4 Diskussion der Berechnungsergebnisse

Vergleicht man die Berechnungen mit den Versuchsergebnissen, so deckt sich die Dehnung in Versuch und Berechnung nur in begrenzten Bereichen und für die getesteten Materialien unterschiedlich. Zwei Gründe sind dafür zu nennen:

- Versuchstechnische Voraussetzungen: Beim Zugversuch unter 45°-Richtung und dem Spannungsverhältnis 1:1 ist es schwierig, einen stationären Zustand zu finden. Die Probe kann mit nur sehr wenig Kraft in Achsrichtung gezogen werden, ähnlich einer Ziehharmonika. Die Empfindlichkeit der Instrumentierung des Versuchs ist für diese Verhältnisse zu gering, die Automatisierung des Versuchs wäre vorteilhaft.

- G-Modul im Materialmodell: Die Vereinfachung des G-Modul auf eine Konstante erzeugt eine erhebliche Unschärfe in der Genauigkeit der Berechnung. Außerdem bleibt die Variation des Modul mit den Lastfällen im Materialmodell unberücksichtigt.
- Struktur der textilen Fläche: Die Verformung von Geweben lässt sich mit dem gewählten Materialmodell deutlich genauer abbilden als die Verformung von Gestriicken. Die Theorie, die in Kapitel 4 beschrieben ist, wird durch den Versuch bestätigt.

Das Berechnungsbeispiel zeigt, dass anwendungsorientiert geprüft werden muss, ob die Differenzen zwischen Versuch und Berechnung, vor allem in der Belastungsrichtung unter 45° Winkel zur Faserrichtung, toleriert werden können. Es wird deutlich, dass weitergehende Forschungsarbeiten zur Versuchstechnik sowie zur exakteren Formulierung des G-Moduls notwendig sind. Darüber hinaus ist die bleibende Verformung in 45° -Richtung, die als Verzug oder Verrautung bezeichnet wird, qualitativ und quantitativ zu erfassen. Es gilt die Frage zu beantworten, wie diese Verformung vermieden oder gezielt in ein Materialmodell eingebunden werden kann.

Zusammenfassend lässt sich zeigen, dass die Berechnungen um so mehr an Genauigkeit verlieren, je ausgeprägter die Orthotropie des untersuchten Materials ist. Dies gilt insbesondere für die Verformungen in der 45° -Richtung. Die bereits erwähnte Verdrehung des Prüfkörpers im 45° -Schlauchversuch, welche die Ausprägung der Orthotropie des Materials visualisiert, kann in der Berechnung nachgewiesen werden, wie Abbildung 44 zeigt.

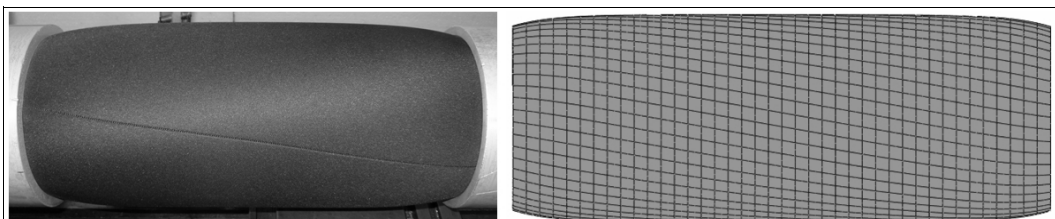


Abbildung 44: Verdrehung einer Probe im 45° -Schlauchversuch (links, Material BSS) und der FEM-Berechnung (rechts)

8. Die Biaxial-Zugprüfmaschine

Die Ergebnisse aus den Versuchen und Berechnungen, sowie weitere wünschenswerte Versuchsbedingungen führen zum Entschluss, eine Biaxial-Zugprüfmaschine völlig neu zu konzipieren. Zunächst werden Anforderungen an eine solche Maschine gesammelt, dann Lösungen dazu gefunden und schließlich in einem Lastenheft festgehalten. Dann werden detaillierte Konstruktionen durchgeführt, Fertigungszeichnungen abgeleitet, die Einzelteile gefertigt und gefügt sowie Zukaufteile montiert. Die Antriebsmotoren und die Steuerungssoftware werden beschafft und die Elektrik installiert. Die Maschine soll im Jahr 2013 erstmalig zum Einsatz kommen.

8.1 Konzipierung der Biaxial-Zugprüfmaschine

Die maßgeblichen Anforderungen und die dazugehörigen Lösungsansätze aus dem Lastenheft sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16: Anforderungen und Lösungsansätze der Biaxial-Zugprüfmaschine	
Anforderung	Lösungsansatz
Biaxialer Zugversuch	Vier Antriebe, ebene Probe
Schlauchversuch zusätzlich möglich	Unabhängige Steuerung der Antriebe
Variable Probengröße bis 50 cm Breite	Großer Verfahrensweg jeder Zugeinheit
Zugkraft soll durch Druckbelastung kompensiert werden	Zentralrahmen mit vier Auslegern, Biegebelastung vermeiden
Zugkraft: max. 2 kN bis 150 kN	Auslegung auf 150 kN, auswechselbare Kraftsensoren
Dynamische Prüfung bei max. 40 kN Zuglast, Sinus 2 cm/sec. pro Antrieb	Servomotoren, minimale Masse der Antriebseinheit
Freier Zugang zur Probe zum Zwecke der Belastung senkrecht zur Probe	Zugänglicher Zentralrahmen
Wahlweise kraft-, weg- oder dehnungsgesteuerte Zugprüfung	Frei programmierbare Steuerung der Antriebsmotoren
Optische Dehnungsaufnahme im Zentrum der Probe	Einsehbare Probenoberfläche
Einspannung ohne Querkraft, die Probe soll nicht eingeschnitten werden	Dehnungstolerantes Einspannprinzip mit Profilstab und Rollensegmenten

8.2 Beschreibung der Konstruktion

Antriebseinheit

Der Servomotor treibt über ein Planetengetriebe und einem Zahnriemen die Mutter einer Kugelumlaufspindel an. Die Spindel ist gegen Verdrehen gesichert und bewegt sich rein translatorisch. Die gesamte Antriebseinheit ist über ein Kreuzgelenk und über einen Ausleger an der Maschine befestigt. Dadurch ist die Spindel um ein Winkel von etwa 3° in allen Richtungen drehbar gelagert.

Dehnungstolerante Einspannung

Die Probe wird an allen vier Rändern umgeschlagen und vorzugsweise mit einer Zick-Zack-Naht vernäht oder durch eine andere Technik gefügt. In die entstehende Schlaufe wird ein Profilstab mit frei beweglichen Rollensegmenten eingeschoben und anschließend an der Zugvorrichtung befestigt. Die Probe liegt nur auf den Rollensegmenten und kann sich frei dehnen. Das Einschneiden der Probe wegen der Spannungsreduzierung ist somit nicht erforderlich.

Konzeption der Maschine

Die Biaxial-Zugprüfmaschine ist eine reine Anlage für den Forschungsbetrieb. Die Anforderungen sind so umfassend wie sie in keiner kommerziell erhältlichen Maschine bislang zur Verfügung stehen. Abbildung 45 zeigt die fertige Konstruktion in der Auslegung mit großer Probengeometrie.

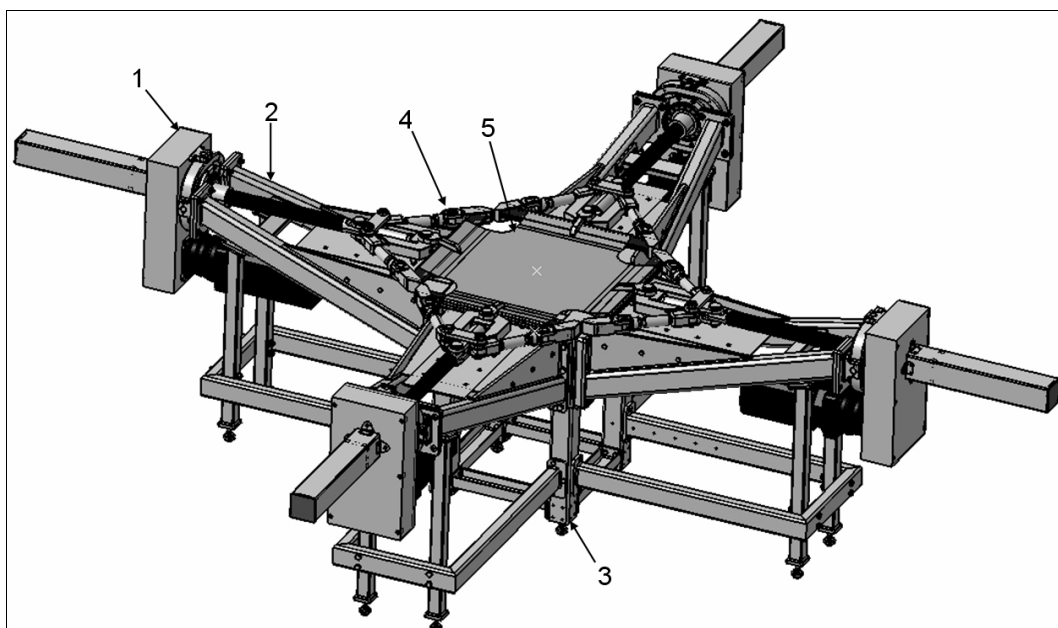


Abbildung 45: Konstruktion der Biax-Zugprüfmaschine am ITV Denkendorf; 1: Antriebseinheit; 2: Ausleger; 3: Zentralrahmen; 4: Einspannung; 5: Probe

8.3 Versuchsplanung

Für die virtuelle Zuschnittsermittlung ist es wichtig, die zulässige Dehnung des technischen Textils zu kennen. Die Dehnungswerte sind somit über entsprechende Versuchstechnik einzustellen und die Spannungswerte sind richtungsabhängig zuzuordnen. Außerdem sind zusätzliche Lastfälle senkrecht zur Fläche aufzubringen. Diese können in Dauertests die Ermüdung des Materials simulieren, was beispielsweise für die Auslegung von Membranbauten notwendig ist. Deshalb wird folgendes Versuchsverfahren vorgeschlagen:

1. Die Vorreckung im Lastfall 1:1 kraftgesteuert durchführen.
2. Die kraftgesteuerte, kontinuierliche Zugprüfung bis zur maximal zulässigen Zugkraft für alle Lastfälle Kett- zu Schussrichtung 1:0,1 bis 0,1:1 durchführen.
3. Das mögliche Dehnungsfeld aus dem vorhergehenden Versuch bestimmen und bestimmte Dehnungsfälle auswählen, dehnungsgesteuert anfahren und die Veränderung der Spannung über eine bestimmte Haltezeit analysieren.
4. Den dynamischen Zugversuch als Ermüdungstest.
5. Den triaxialen Zugversuch durch Belastung senkrecht zur Probe mit einem Festkörper oder durch Druckluft als Ermüdungstest.
6. Biaxialer Zugversuch 45° zur Garnrichtung mit dem auf die Biaxial-Zugprüfmaschine adaptierten Schlauchversuch.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Technische Textilien werden mehrheitlich unter den Gesichtspunkten der Funktionalität konstruiert und sie müssen definierte anwendungsbezogene Spezifikationen erfüllen. Eine dieser Funktionen ist die mechanische Steifigkeit, die hauptsächlich im Dehnungsverhalten unter Zugbeanspruchung Ausdruck findet. Da es sich bei technischen Textilien um weitestgehend biegeeweiche Materialien handelt, ist die Spannung des Materials in dessen Fläche konzentriert. Dies trifft auf die Textilien zu, deren Ausmaße in Dickenrichtung sehr gering sind gegenüber deren Länge und Breite. So werden auch Belastungen senkrecht auf die Fläche, wie sie beispielsweise durch den Kontakt mit Tragkörpern hervorgerufen werden, neben der Zugbelastung in der Ebene, durch reine Zugkräfte im Textil abgetragen. Diese Tragkörper können aus kompressiblen oder inkompressiblen Feststoff, Flüssigkeit oder auch im Aggregatzustand gasförmig sein. Ein gasförmiger Tragkörper erzeugt Druck auf eine textile Hülle, der in jedem inkrementellen Flächenstück gleich große Kraft in Normalenrichtung ausübt. Abhängig von den Einspann- und Randbedingungen formt sich die textile Hülle unter Einfluss der besagten Kräfte aus. Die Ausformung ist dann abgeschlossen, wenn die Wechselwirkung von Druck auf und Zugkräften in der Fläche zum Gleichgewicht kommt. Es liegt somit auf der Hand, dass eine durch Innendruck erzeugte Form einer textilen Hülle mit der Kenntnis über deren Verformungsverhalten infolge Zugkräften eng verknüpft ist. Diese Arbeit widmet sich der Versuchstechnik zur Ermittlung der Dehnung und Verformung textiler Hüllen unter Innendruck sowie deren Berechnung und der Zuschnittsermittlung.

Der Stand der Technik legt nahe, dass das Verformungsverhalten von textilen Materialien zunächst nicht in die klassische Kontinuumsmechanik einzugliedern ist. Ursächlich ist die Scherung, die sich bei Textilien in der Änderung der Winkel der Hauptrichtungen, die durch die Faserrichtungen gekennzeichnet sind, auswirkt. Bei Geweben ist die Faserrichtung die Kett- und Schussrichtung, bei Maschenware die Maschenstäbchen- und Maschenreihenrichtung. Eine Lösung zur Erfassung der Verformung von Textilien bietet der experimentelle Weg. Die Ermittlung der Spannungs-Dehnungszusammenhänge sind kompliziert, da sie maßgeblich von folgenden Größen abhängen:

- dem Lastfall,
- der Lastrichtung.

Erstmalig wird ein Versuchsaufbau und -durchführung vorgestellt, mit dem diese Einflussfaktoren in genügendem Umfang erfasst und ausgewertet werden. Dieser Versuchsaufbau besteht aus einer zylindrischen textile Hülle, in der durch Innendruck Spannung aufgebaut wird (Schlauchversuch). Zur Spannungsberechnung wird die „Kesselformel“ genutzt. Ausgewählte Lastfälle werden durch zusätzliche Kräfte in Achsrichtung des Zylinders erzeugt. Die Lastrichtung ist durch verschiedene Proben, die in Faser- und 45°-Richtung orientiert sind, berücksichtigt. Drei ausgewählte, sehr unterschiedlich dehbare Materialien, davon ein Gestrick, werden geprüft und ausgewertet.

Ein Vergleich der Ergebnisse des Schlauchversuchs mit der Biaxial-Zugprüfung des Forschungspartners ITM Dresden validiert den Schlauchversuch.

Der Einfluss der Naht auf die Steifigkeit des Textils wird an einer Probe ermittelt (Nahtschlauchversuch). Es kann keine signifikante Erhöhung der Steifigkeit mit steigender Anzahl an Nähten (Kappnaht) bei dem im Versuch verwendeten Material festgestellt werden.

Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Zusammenstellung von Eingabewerten, die für eine FEM-Berechnung mit orthotropem Materialmodell benötigt werden. Aus den Spannungs-Dehnungsdiagrammen sind dafür das linearisierte Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von Richtungs- und Lastfällen gelistet. Zusätzlich sind in Dehnungs-Dehnungsdiagrammen die Dehnung des Textils im Schlauchversuch in Umfangs- und Achsrichtung mit Angaben zur Spannung dargestellt. Es wird gezeigt, wie sich daraus eine „Antwortfläche“ entwickeln lässt. Die Antwortfläche beschreibt für alle möglichen Spannungszustände richtungsabhängig die Dehnung einer textilen Probe durch Approximation von einzelnen Spannungs-Dehnungskurven zur dreidimensionalen Fläche.

Aus den Ergebnissen des im 45° -Winkel orientierten Schlauchversuch wird das G- oder Schubmodul ermittelt. Die dafür notwendigen mechanischen Grundlagen sind zusammengefasst. Es wird die Abhängigkeit des G-Moduls von der Schubspannung dargestellt. Gegenüber anderen Versuchen, die zur Ermittlung des G-Modul dienen, hat der 45° -Schlauchversuch den Vorteil, dass alle einzelnen Fäden oder Garne entweder in der Naht oder in der Einspannung fest fixiert sind. Das erzeugt einen weitestgehend homogenen Spannungszustand, der zur Lösung dieser Aufgabe unerlässlich ist.

Die gemittelten Werte des Moduls sind tabellarisch zusammengefasst und dienen als Eingabewert im orthotropen Materialmodell anhand der „Ingenieurskonstanten“ für eine näherungsweise FEM-Berechnung.

Um die FEM-Berechnung mit diesem Materialmodell zu validieren wird zunächst der genormte Wölbversuch durchgeführt und anschließend die Ergebnisse mit der FEM-Berechnung verglichen. Die hervorgehenden Unterschiede zwischen Versuch und Berechnung lassen sich aus den Randbedingungen qualitativ, jedoch nicht quantitativ begründen. Um die Toleranzen einer Berechnung genauer zu erfassen, wird dasselbe Verfahren auf den Schlauchversuch angewandt. Das Ergebnis ist, dass die Abweichung mit den linearisierten und gemittelten Modulwerten der getesteten Materialien in Faserrichtung maximal 10% beträgt. Die Berechnung der Scherverformung unter 45° -Winkel zur Faserrichtung gelingt in weitgehend unveränderten Toleranzgrenzen lediglich bei der beschichteten Gewebemembran (Kürzel VS). Für das unbeschichtete Gewebe oder die Maschenware ist die Berechnung der Scherdeformationen zu unpräzise. Grund dafür ist, dass hier das Materialmodell nicht zutrifft.

Im Zusammenhang mit der Erzeugung von Schnittmustern wird ein weiterer Versuch beschrieben und durchgeführt. Dabei handelt es sich ebenso um eine Schlauchform, die aber mit einem konstanten Radius gekrümmt ist (ein Torusausschnitt). Der Versuch wird als „gekrümmter Schlauch“ bezeichnet. Eine eigens entwickelte Vorrichtung ermöglicht, dass sich die textile Hülle unter dem Innendruck ungehindert ausformen kann.

Es ist erstmalig dargestellt, wie mithilfe der FEM-Berechnung aus einer Abwicklung ein Zuschnitt ermittelt wird. Im Versuch wird gezeigt, dass nach dem Fügen der Zuschnitte und der Innendruckbelastung die Kontur der textilen Hülle der gewünschten Geometrie weitgehend exakt erreicht wird. Ein allgemein gültiges Verfahren lässt sich daraus allerdings nicht herleiten. Es konnte aber experimentell gezeigt werden, dass sich die Faserrichtung im Textil nach den in der FEM-Berechnung ermittelten Hauptspannungsrichtungen ausrichtet.

Im letzten Kapitel wird eine vollständig neu entwickelte Versuchsmaschine vorgestellt, die dazu geeignet ist, sowohl den ebenen, biaxialen Zugversuch als auch den Schlauchversuch aufzunehmen. Die Maschine besitzt bislang einzigartige Versuchsmöglichkeiten und -kombinationen um viele, vor allem für die Baubranche wichtige Prüfungen durchzuführen. Die wichtigsten Anforderungen an die Maschine sind gemeinsam mit deren konstruktiver Ausführung aufgeführt und die gesamte Konstruktion der Maschine ist dargestellt. Es sind die Versuchsmöglichkeiten und ein möglicher Versuchsablaufplan aufgelistet.

Zusammenfassend zeigt diese Arbeit, wie anhand von Versuchen die Kennwerte für das orthotrope Materialmodell ermittelt werden. Mit diesem Modell lassen sich erste, überschlägige Berechnungen von Spannung und Dehnung von technischen Textilien durchführen. Die Ergebnisse zeigen die Notwendigkeit der Weiterentwicklung makromechanischer Materialmodelle und der dazugehörigen mechanischen Theorie in zukünftigen Forschungsarbeiten.

Literaturverzeichnis

- [ALB 00] Albertini, C. et al: Biaxial direct tensile tests in a large range of strain rates. Results on a ferritic nuclear steel, Journ. de Phys. IV, France, 2000.
- [APP 65] Appel, H.: Buckling modes of orthotropic circular cylinders under axial compression for various combinations of stiffness parameters, Forschungsbericht 65-47, DLR, 1965.
- [BAH 03] Bahei-El-Din, Y.A., Rajendran, A.M., Zikry, M.A.: A Material model for multi-scale analysis of textile composites. Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf. 7.-10.4.2003, Norfolk, US, Vol.1, S. 685-690.
- [BAL 07] Ballhause, D.: Diskrete Modellierung des Verformungs- und Versagensverhaltens von Gewebemembranen. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, 2007.
- [BAS 90] Bassett, R.; J.: Postle, R.: Fabric Mechanical and Physical Properties – Part 4: The Fitting of Woven Fabrics to Three-Dimensional Surface. Journal of Clothing Science and Technology, 2 (1990) 1, pp. 26 – 31.
- [BAS 99] Bassett, R.; J.: Postle, R.; Pan, N.: Experimental Methods for Measuring Fabric Mechanical Properties: A Review and Analysis. Textile Research Journal, 69 (11), 1999, pp. 866 – 874.
- [BAT 86] Bathe, K.J.: Finite Elemente Methoden, Springer Verlag, Berlin 1986.
- [BID 89] Bidmon, W.: Zum Weiterreißverhalten von beschichteten Geweben, Dissertation Stuttgart 1989.
- [BIG 03] Bigaud, D.; Szostkiewicz, C.; Hamelin, P.: Tearing analysis for textile reinforced soft composites under monoaxial and biaxial tensile stresses. Composites Structures 62, S. 129 - 137, 2003.
- [BLU 87] Blum, R., Bidmon, W.: Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Bau-textilien, Theorie und Experiment, Sonderforschungsbereich 64, Universität Stuttgart.
- [BOI 01] Boisse, P., Gasser, A., Hivet, G.: Analyses of fabric tensile behaviour: determination of the biaxial tension - strain surfaces and their use in forming simulations, Composites Heft 10: Part A 32, pp 1395-1414, 2001.
- [BÖG 04] Bögner, H.B.: Vorgespannte Konstruktionen aus beschichteten Geweben und die Rolle des Schubverhaltens bei der Bildung von zweifach gekrümmten Flächen aus ebenen Streifen, Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, 2004.
- [BRE 03] Brew, J.S., Lewis, W.J.: Computational formfinding of tension membrane structures – Nonfinite element approaches: Part 2. Triangular mesh discretization and control of mesh distortion in modelling minimal surface membranes, Int. Journal for numerical methods in engineering, 2003, Heft 5, S. 669-684.
- [BRI 04] Bridgens, B.; Gosling, P.; Birchall, M.: Membran material behaviour: concepts, practice & developments. The Structural Engineer, (2004), pp 28-33.

- [BRU 02] Brueggert, M., Tanov, R.: An LS-DYNA User defined Material Model for Loosely Woven Fabric with Non-Orthogonal Varying Weft and Warp Angle, 7th Int. LS-DYNA Users Conf. Dearborn, US, 2002, Konferenz-Einzelbericht: 7th Int. LS-DYNA Users Conf. Dearborn, US, 2002, S. 8.1 – 8.13.
- [CAR 01] Carvelli, V., Poggi, C.: A homogenisation procedure for the numerical analysis of woven fabric composites, Composites: Part A 32, 2001, Heft 10, S. 1425-1432.
- [CEB 01] Cebulla, H., Diestel, O., Offermann, P.: Modellierung und Umsetzung konturgerechter Biaxialgestricke, DWI-Reports 124, 2001, S. 56-64.
- [CHR 12] Christ, M.; Sköck-Hartmann, B.; Krieger, H.; Hoffmeister, C.; Herrmann, A. S.; Gries, T.: Prüfverfahren und Methoden zur Charakterisierung der Drapierbarkeit von technischen Textilien, 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Tagungsband, 14.-15.03.2012, S. 250-257.
- [COM 06] www.compasstech.com/downloads_open/CTIF_FTI_FormingSuite.pdf
- [DAN 02] Daniel, J.L., et al: Forming Simulation of very unbalanced woven composite reinforcements, 5th Int. ESAFORM Conf. on Material Forming, Krakow, PL, 14-17.04.2002, S. 319-322.
- [DIE 03] Diehl, T., et al: The Development and Use of a Robust Modeling Approach for Predicting Structural Performance of Woven Fabrics Using ABAQUS, ABAQUS Users' Conference, München 2003, Konferenz-Einzelbericht: ABAQUS Users' Conference 2003, Proc. (2003), S.103-118.
- [DUR 03] Durville, D.: Numerical Simulation of the mechanical behaviour of textile Structures at a mesoscopic Scale, Text. Comp. and Inflatable Structures (CIMNE), 2003, Barcelona.
- [EBE 99] Eberlein, R., Finite-Elemente-Konzepte für Schalen mit großen elastischen und plastischen Verzerrungen, Dissertation Darmstadt 1999.
- [ESS 99] Universität Essen: Biaxiale Zugprüfung an technischen Membranen, Fachbereich Bauwesen, Prospekt 1999.
- [FAL 95] Falk, A.: Adaptive Verfahren für die Formoptimierung von Flächentragwerken unter Berücksichtigung der CAD-FEM Kopplung, Dissertation Hannover 1995.
- [FIN 98] Finckh, H.: Computer simulation of mechanical behaviour of dynamically stressed protective clothings, Techtexil Symp. 1998 – Vol. 2, Lyon, France.
- [FIN 04] Finckh, H., Stegmaier, T., Planck, H.: FEM zur numerischen Simulation statischer und dynamischer Eigenschaften von Schutztextilien, Technische Textilien, Jahrgang 47, August 2004, Seite 146-149.
- [GAU 99] Gaul, L., Willner, K., Hurlebaus, S.: Determination of Material Properties of Plates from modal ESPI Measurements, Internat. Modal Analysis Conf. Orlando 1999, Vol.2, S.1756-1762.
- [GOT 96] Gottschalk, T.: Automatisiertes Nähen von Zuschnitten ungleicher Kontur, Dissertation Berlin 1996, ISBN 3-8167-4531-8.
- [GRE 70] Green, A.E., Adkins, J.E.: Large Elastic Deformations, Second Edition, Oxford University Press 1970

- [GRE 91] Greuel, M.; Weisse, F.; Zastrow, U.: Das Kawabata-Messgeräte- und Berechnungssystem, Teil 2. Bekleidung und Wäsche/Bekleidung und Maschenwaren, (1991) 5, S. 36 – 45.
- [GRO 04] Gross, D., Hauger, W., Schnell, W., Wriggers, P.: Technische Mechanik 4, 5. Auflage, Springer Verlag 2004, ISBN 3-540-22099-2.
- [HAA 79] Haase, J.: Zur natürlichen Formulierung von Simplexelementen höherer Ordnung für die Berechnung elastischer Membranschalen und Seilkonstruktionen unter großen Verformungen, Dissertation Stuttgart 1979.
- [HAJ 02] Hajdarovic, K., Hudec, G.: Woven Fabric Deformation Measurement System, 1st International Textile, Clothing and Design Conference – Magic World of Textiles, Oct. 06.-09.2002, Dubrovnik, Croatia, S. 493-498.
- [HIE 86] Hiemer, H.P.: Abwicklung von Bekleidungsentwürfen, Bekleidungstechnik Nähtechnik Heft 17, 1986, Dokumentation 1.
- [HOL 00] Holzapfel, G. A.: Nonlinear Solid Mechanics. A Continuum Approach for Engineering. John Wiley & Sons, Chichester, 2000 (5th print in 1/07)
- [HOR 04] Hornig, J.: Analyse der Faltenbildung in Membranen aus unterschiedlichen Materialien, Dissertation Berlin 2004.
- [HOY 00] Hoyler, G.: CAD für technische Textilien, Vortrag auf dem Kolloquium „Konfektion technischer Textilien“, 8-9.11.2000, assyst Gesellschaft für Automatisierung Software und Systeme mbH.
- [HU 96] Hu, H., de Araujo, M., Fanguero, R.: The use of flat knitting machines for the production of 3D technical fabrics, Technitex 96, Torino 21-23.11.1996, Vol. 2, S. G-46-G-53.
- [INU 01] Inui, S.: A preliminary study of a deformable body model for clothing simulation, Int. Journal of Clothing Science and Technology, Vol.13 No. 5, 2001, S. 339-350.
- [JON 77/1] de Jong, S., Postle, R.: An Energy Analysis of Woven Fabric Mechanics by Means of Optimal-control Theory, Part I: Tensile Properties, J. Textile Inst. 68, 350-361, 1977.
- [JON 77/2] de Jong, S., Postle, R.: An Energie Analysis of Woven Fabric Mechanics by Means of Optimal-control Theory, Part II: Pure-bending Properties, J. Textile Inst. 68, 362-369, 1977.
- [JON 77/3] de Jong, S., Postle, R.: An Introduction of the Study of Fabric Mechanics Using Energy Methods, Textile Inst. Ind. 15, 376-379, 1977.
- [JON 78] de Jong, S., Postle, R.: A General Energy Analysis of Fabric Mechanics Using Opimal-Control Theory, Textile Res. J. 48, 127-135, 1978.
- [KAW 64] Kawabata, S., Niwa, M., and Kawai, H.: The Finite Deformation Theories of Plain Weave Fabric, Part I: The Biaxial-deformation Theory, J. Textile Inst. 64, 21-46, 1964.
- [KEL 01] Kelkar, A.D., Shenoy, S.: Behaviour of plain woven textile composites subjected to uniaxial tensile loading, Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf., 16-19.4.2001, Seattle, US, S. 2443-2453
- [KLO 03] Klopp, K.: Analyse des Nahtbildungsprozesses von Verstärkungstextilien für Faserverbundkunststoffe, Dissertation Aachen 2003, ISBN 3-8322-1170-5.

- [KÖR 02] Körwien, T.: Konfektionstechnisches Verfahren zur Herstellung von endkonturnahen textilen Vorformlingen zur Versteifung von Schalensegmenten, ISBN 3-8325-0130-4, Dissertation 2002.
- [KUN 90] Kuntz, E.: Kartennetzentwurfslehre. Grundlagen und Anwendungen, Herbert Wiechmann Verlag, 2. Auflage 1990.
- [KRZ 04] Krzywinski, S., Siegmund, J.: Schnittgestaltung für körpernahe Bekleidung aus Maschenwaren mit Elastangarnen, AIF-Forschungsvorhaben Nr. 13190 BR, Institut für Textil- und Bekleidungstechnik der TUD, 2004.
- [LOS 71] Losch, M.: Bestimmung der mechanischen Konstanten für einen zweidimensionalen, nichtlinearen, anisotropen Stoff am Beispiel beschichteter Gewebe, Dissertation Stuttgart, 1971.
- [MEM11] <http://www.membranes24.com>
- [MET 03] Methner-Opel, B.: 3D-Konstruktion – zweite Generation, dritte Art des Zugangs, Maschenindustrie 7/8 2003, S. 38-39.[MIK 01] Mikolajczyk, Z.: Model of Spatial Structure of Anisotropic Warp Knitted Fabrics, Fibres & Textiles in Eastern Europe, April/June 2001, Vol.9, Heft 2, S. 23-27.
- [MIN 00] Mingjie, Z., Dongyu, H., Aiyang, Z., Shimizu, Y.: Three-dimensional Simulation and Pattern Making of Collar Using Geometric Model, Journal of Dong Hua University, Vol. 18 No. 3, 2001, S. 53-57.
- [MIN 06] Minami, H.: A Multi-Step Linear Approximation Method for Nonlinear Analysis of Stress and Deformation of Coated Plain-Weave Fabric, Journal of Textile Engineering, Vol. 52, No. 5, S. 189 – 195, 2006.
- [MOL 99] Moll, K.-U.: Nähverfahren zur Herstellung von belastungsgerechten Fügezonen in Faserverbundwerkstoffen, Dissertation Aachen 1999, ISBN 3-8265-6765-X.
- [MON 99] Moncrieff, E., Gründig, L., Ströbel, D.: Zur Zuschnittberechnung von Pilgerzelten bei der Phase II des Mina Valley Projektes, Bauen mit Textilien, Heft 4/1999, S. 18-21.[MON 05] Moncrieff, E.; Houtman, R.; Coenders, J. L.: Appropriate Modelling of textile for the Design of Surface Stressed Structures, Proceedings Techtexil Symposium 2005, Frankfurt.
- [MOT 85] Mott, R., Huber, G., Leewood, A.: Biaxial Test Method for Characterization of Fabric Materials Used in Permanent Fabric Roof Structures, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 13, No. 1, Jan. 1985, S. 9-16.
- [MÜL 00] Müllen, J.: Nichtlineare Verformung einachsig belasteter Gewebe, Dissertation, RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, 2000
- [MUR 95] Münsch, R., Reinhardt, H.-W.: Zur Berechnung von Membrantragwerken aus beschichteten Geweben mit Hilfe genäherter elastischer Materialparameter, Bauingenieur 70, S. 271-275, Springer-Verlag 1995.
- [NIC 97] Nick, A.: Untersuchungen zum Kleben und zu den viscoelastischen Eigenschaften von Verbundkunststoffen aus kohlefaserverstärktem Epoxidharz, Dissertation Aachen 1997, ISBN 3-8265-2319-9.
- [NG 97] Ng, K.R., Chan, C., Pong, T., Au, W.R.: Distortional Properties of the Bijective Pattern Map (Part I: Distortion in length), Journal of China Textile University, Vol.14, No. 3 (1997), S. 28-33.

- [OGD 92] Ogden, R.-W.: Non-linear Elastic Deformations. Dover, New York 1992.
- [ORA 06] Orawattanasrikul, S.: Experimentelle Analyse der Scherdeformationen biaxial verstärkter Mehrlagengestricke, Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, Stuttgart 2006.
- [PAP 86] Papula, L.: Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Vieweg + Teubner Verlag 1986, (10. Auflage 2009).
- [PAB 08] Pabst, S.; Krzywinski, S.; Schenk, A.; Thomaszewski, B.: Seams and Bending in Cloth Simulation, in: EG Workshop on Virtual Reality Interaction and Physical Simulation (VRIPHYS), 2008 .
- [PAR 77] Parisch, H.: Zur Berechnung von Membranschalen unter endlicher Deformation mit der Methode der Finiten Elemente, Dissertation Stuttgart 1977.
- [PAR 03] Park, G., Sausse, M., Inman, D.J., Main, J.A.: Vibration Testing and Finite Element Analysis of an Inflatable Structure, AIAA Journal, Vol. 41, No. 8, Aug. 2003, S. 1556-1563.
- [PEI 36] Peirce, F.T.: The Geometry of Cloth Structure, J. Textile Inst. 28, 45-96, 1936.
- [PEN 02] Peng, X.Q., Xue, P., Cao, J., Lussier, D.S., Chen, J.: Normalisation in the picture frame test of woven composites: length or area?, 5th Int. ESAFORM Conf. on Material Forming, Krakow, PL, 14-17.04.2002, S. 287-290.
- [PFE 96] Pfeiffer, A., Zschenderlein, D.: Teilkonstruktion in der dritten Dimension, Textile Clothing, Magyar Textiltechnika 1996, Spec. Issue, S. 54-57.
- [PLA 04] Planck, H.: Herstellung und Eigenschaften Funktionaler Textilien, Vorlesungsskript des Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf, Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart, 2004.
- [PRO 02] Provatidis, C.G., Vassiliadis, S.G.: On the Numerical Estimation of the Mechanical Behaviour of Fabrics, World Textile Conf. 2nd AUTEX Conference, July 2002, Bruges Belgium.
- [RAI 00] Raible, T., Reese, S., Wriggers, P.: Finite element modeling of orthotropic material behaviour in pneumatic membranes, ZAMM – Z. Angew. Math. Mech. 80 (2000) S2, S.409-410.
- [RAI 03] Raible, T.: Concepts for Nonlinear Orthotropic Material Modeling with Applications to Membrane Structures, Dissertation, Hannover 2003, S.79-101.
- [REE 01] Reese, S., Raible, T., Wriggers, P., Finite Element modelling of orthotropic material behaviour in pneumatic membranes, Int. Journ. of Solids and Structures 38, 2001, S. 9525-9544.
- [REU 00] Reumann, R.D., Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik, Springer Verlag 2000, ISBN 3-540-66147-6.
- [RÖD 06] Rödel, H.; Krzywinski, S.; Schenk, A.: Erarbeitung einer geschlossenen Prozesskette für die Zuschnittgenerierung von Autositzen unter Berücksichtigung innovativer Textilkonstruktionen. AiF 13641 BR, Abschlussbericht, 2006.
- [ROH 05] Rohr, I.; Harwick, W.; Nahme, H.: Der biaxiale Kreuzzugversuch zur Ermittlung von Werkstoffkennwerten von Airbaggeweben am Beispiel von Polyamid 6.6., Mat.-wiss. und Werkstofftechnik, 36, Nr. 5, 2005.

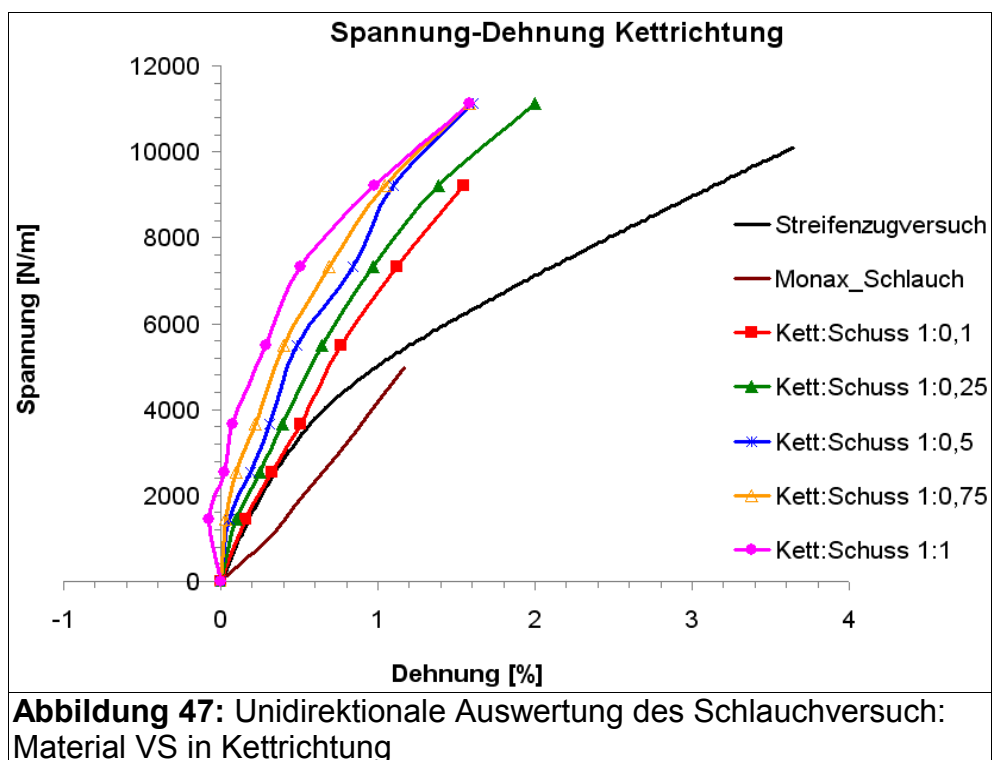
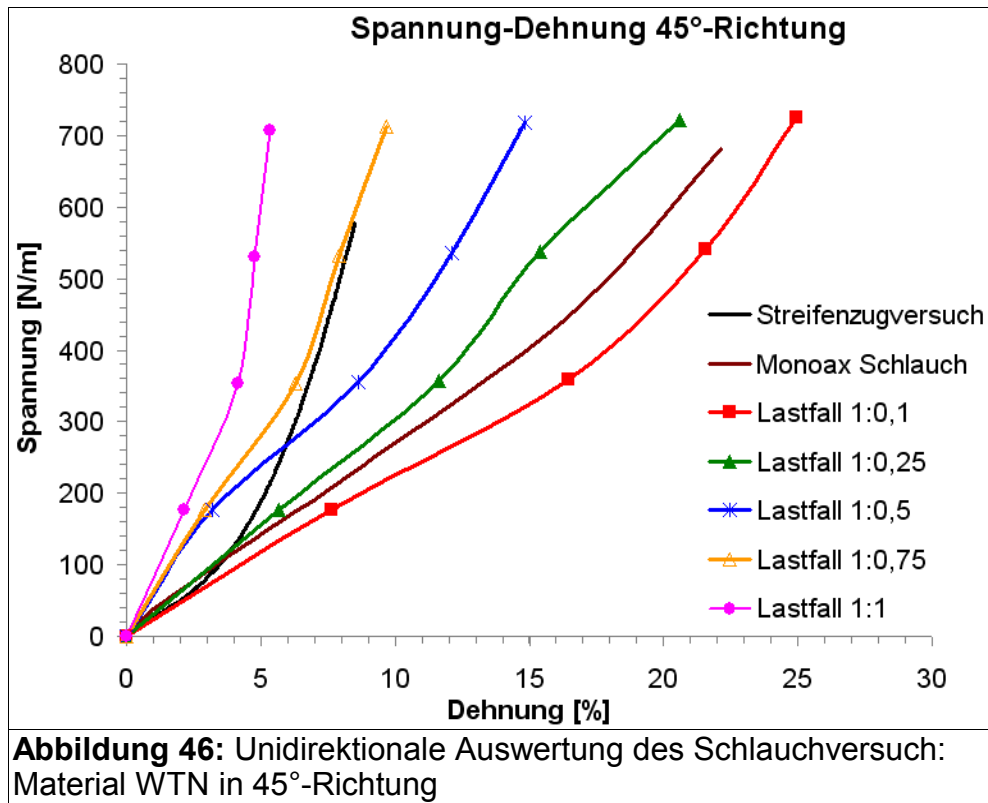
-
- [SAL 00] Salama, M., Kuo, C.P., Lou, M.: Simulation of Deployment Dynamics of Inflatable Structures, AIAA Journal, Vol. 12, 2000, S. 2277-2283.
- [SCH 84] Schweizerhof, K., Ramm, E.: Displacement Dependent Pressure Loads in Nonlinear Finite Element Analysis, Computers & Structures Vol. 18, No. 6, 1099-1114, 1984.
- [SCH 88] Schlosser, B.: Verfahren zur Ermittlung von Abwicklungen bandförmiger Oberflächenbereiche beliebig gekrümmter Körper, Silikattechnik 39, 1988, Heft 6, S. 191-193.
- [SCH 89] Schieck, B.: Große elastische Dehnungen in Schalen aus hyperelastischen inkompressiblen Materialien, Dissertation Bochum 1989.
- [SCH 95] Schuhmacher, G.: Multidisziplinäre, fertigungsgerechte Optimierung von Faserverbund-Flächentragwerken, Dissertation Siegen 1995.
- [SCH 96] Schröder, J.: Theoretische und algorithmische Konzepte zur phänomenologischen Beschreibung anisotropen Materialverhaltens, Dissertation Hannover 1996.
- [SCH 01/1] Schmidt, M.: Adaptive Finite-Element-Methoden für elastoplastische Deformationen – Algorithmen und Visualisierung, Dissertation Hannover 2001.
- [SCH 01/2] Schweitzer, G.: Methodik zur rechnergestützten Entwicklung von Formkörpern für das automatisierte Nähen mit Robotern, Dissertation Aachen 2001, ISBN 3-8265-9249-2.
- [SCH 05] Schelkle, E.: Computerunterstützte Simulationsmethoden (MCAE) im modernen Entwicklungsprozess, Vorlesungsmanuskript der Universität Stuttgart, Fakultät Maschinenbau, Modellierung und Simulation im Maschinenbau, SS 2005.
- [SEI 07] Seif, M.: Bereitstellung von Materialkennwerten für die Simulation von Bekleidungsprodukten, Dissertation TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, 2007
- [SFB64 85] Sonderforschungsbereich 64: Weitgespannte Flächentragwerke, Universität Stuttgart 1985.
- [SIM 91] Simo, J.C., Taylor, R.L., Wriggers, P.: A Note on Finite-Element Implementation of Pressure Boundary Loading, Com. in Applied Numerical Methods, Vol. 7, S. 513-525, 1991.
- [SOM 03] Somodi, Z., Hursa, A., Rogale, D.: Numerical simulation of textile flexibility testing, Int. Journal of Clothing Science and Technology, Vol.15 No. 3/4, 2003, S. 276-283.
- [SOT 95] Sotton, M.: The biaxial mechanical Properties of Geotextiles: Principles for better Designs, Techtextil-Symposium 1995, Lecture no. 547.
- [TAB 02] Tabiei, A., Ivanov, I.: Materially & Geometrically Nonlinear Woven Composite Micro-mechanical Model with Failure for Finite Element Simulations, 7th Int. LS-DYNA Users Conf. Dearborn, US, 2002, Konferenz-Einzelbericht: 7th Int. LS-DYNA Users Conf. Dearborn, US, 2002, S. 8-57 – 8-75.
- [TAN 01/1] Tanov, R.R., Brueggert, M.: Finite Element modeling of non-orthogonal loosely woven fabrics in advanced occupant restraint systems, ASME Int. mech. Engineering Congress and Exposition, 11.-16.11.2001, New York, De-Vol.112, S.225-230.

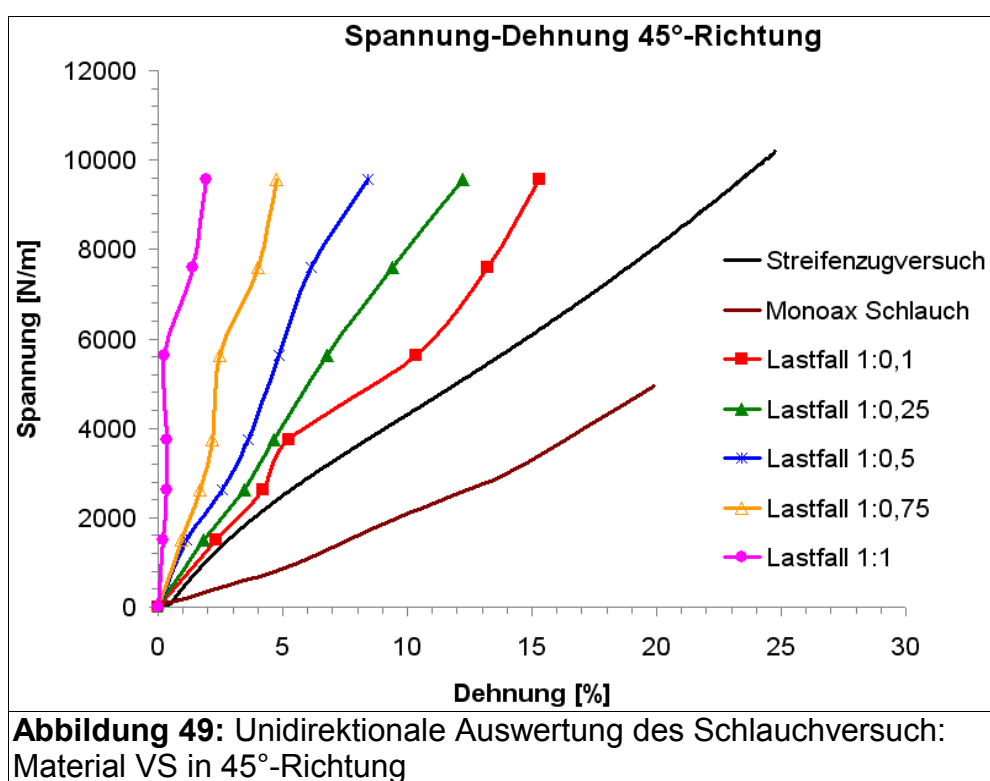
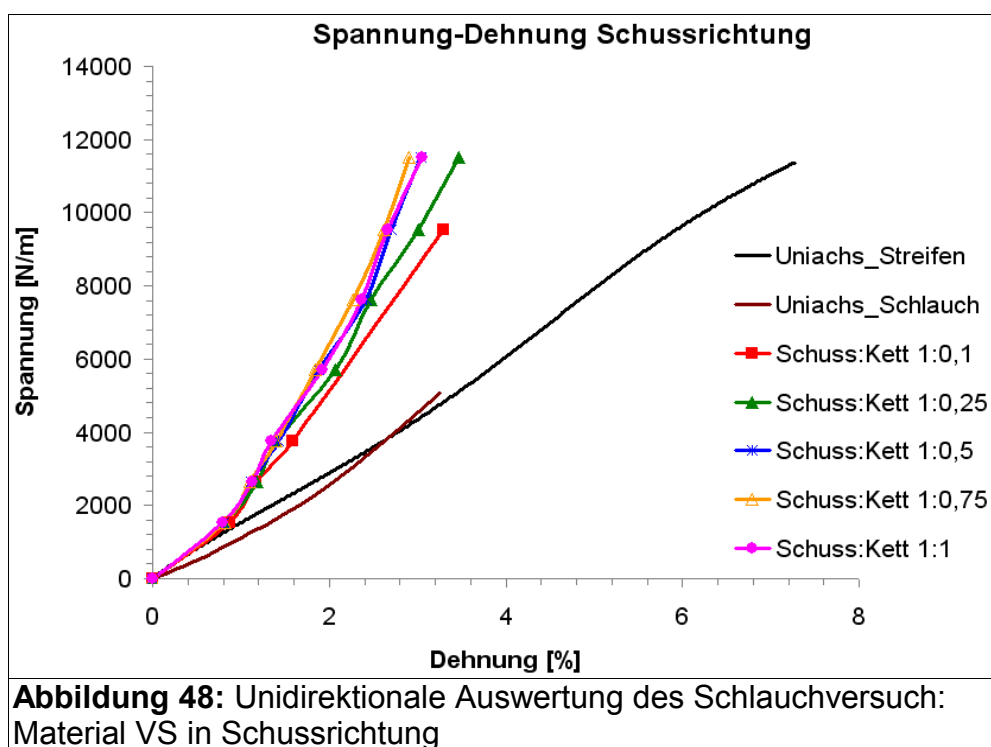
- [TAN 01/2] Tanov, R.R., Tabiei, A.: Computationally Efficient Micromechanical Models for Woven Fabric Composite Elastic Moduli, *Journ. of Applied Mechanics*, July 2001, Vol. 68, S. 553-560.
- [TAN 02] Tang, W., Keefe, M.: Stress analyses and structural modifications of fabric composite seams, *ASME Int. mech. Engineering Congress and Exposition*, 17.-22.11.2002, New Orleans, Louisiana, S.71-80.
- [TAR 01/1] Tarfaoui, M., Drean, J.Y.: Predicting the Stress-Strain Behaviour of Woven Fabrics Using the Finite Element Method, *Textile Res. J.* 71 (9), S. 790-795, 2001.
- [TAR 01/2] Tarfaoui, M., Akesbi, S.: Numerical study of the mechanical behaviour of textile structures, *Int. Journ. of Clothing, Science and Technologie*, Vol. 13 No. 3/4, 2001, S. 166-175.
- [THO 03] Thomas, J.C., Wielgosz, C.: Analytical and Numerical Solutions for highly inflated fabric tubes, *Textile Composites and Inflatable Structures (CIMNE)*, Barcelona 2003.
- [THO 06] Thomée, B.: Physikalisch nichtlineare Berechnung von Stahlfaserbetonkonstruktionen, *Dissertationsschrift*, Institut für Statik, Technische Universität München 2006.
- [VER 01] Verpoest, I., et al.: An integrated modelling strategy for processing and properties of textile composites, *46th Int. SAMPE Symposium*, May 6-10, 2001, S. 2472-2483.
- [VOH 03] Vohrer, A.: Virtuelle Schnitterstellung von Sitzbezügen bei der Entwicklung von Mustersitzen in der Automobilbranche, *Mastertesis Hochschule Reutlingen* 2003.
- [VOH 06] Vohrer, A.: Grundlegende Werkstoffanalysen für die numerische Simulation von Konstruktionen mit technischen Textilien, *Diplomarbeit Universität Stuttgart* 2006.
- [VOH 11] Vohrer, A., Lorenz, I., Stegmaier, T., Planck, H.: Biaxiales Deformationsverhalten von technischen Textilien und der Schlauchzugversuch, *Technische Textilien* 3/2011, S. 150 – 154.
- [WAL 03] Wallentowitz, H., Urban, P., Franzen, M.: Development of Crashrelated Structural Components made of Fibre Reinforced Plastics for the Motorvehicle Industry, *Int. Man-Made Fibres Congress*, 17-19.09.2003, Dornbirn.
- [WAN 93] Wang, W.P., Beck, J.M.: Solid Modeling in Manufacturing of Advanced Composite Materials, *Manufacturing Science and Engineering ASME* 1993, Vol. 64, S. 167-172.
- [WEN 11] Wendt, E., Krzywinski, S.: Untersuchung uniaxialer und biaxialer Prüfverfahren zur Bestimmung des Deformationsverhaltens technischer Textilien als Voraussetzung für numerische Simulationsverfahren, *Technische Textilien*, Heft 5-6, Nov. 2011.
- [WIE 01] Wiechmann, K.: Theorie und Numerik zur Berechnung und Optimierung von Strukturen mit elastoplastischen Deformationen, *Dissertation Hannover* 2001.
- [YAN 03] Yang, Q., Cox, B.: Spatially Averaged Local Strains in Textile Composites via the Binary Model Formulation, *Journal of Eng. Materials and Techn.*, Vol. 125, Oct. 2003, Heft 4, S. 418-425.
- [YUE 01] Yueqi, Z., Shanyuan, W.: Cloth Modeling Based on Particle System, *Journal of Dong Hua University*, Vol. 18 No. 2 (2001), S. 41-44.

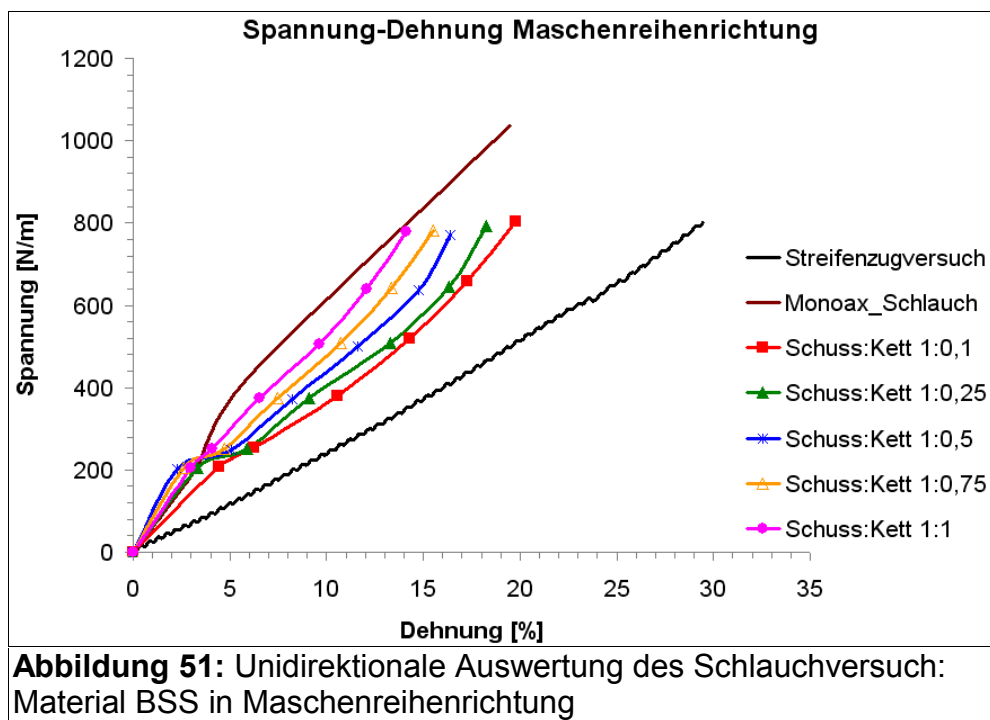
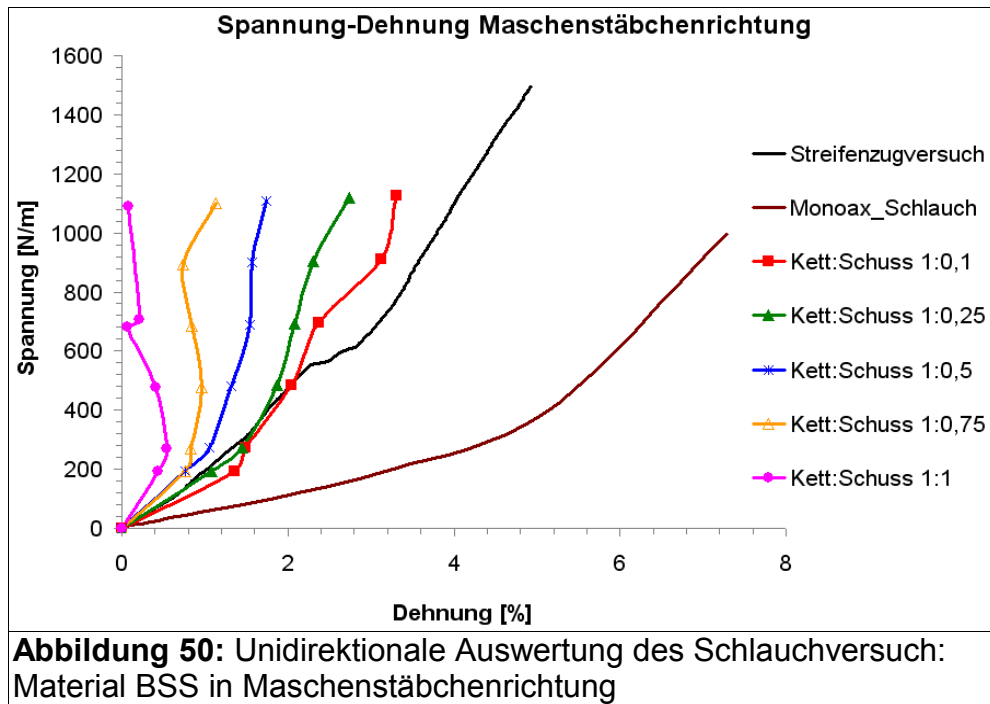
-
- [ZHA 95] Zhao, L., Porat, I.: Greenwood, K., The Computerised Weaving of Preforms for Composites – Part I: The flattening of 3-dimensional Preforms, J. Text. Inst., 1996, 87 Part 1, No. 1, S. 183-194.
- [ZHO 02] Zhong, Y., Wang, S.: An Efficient Way of fabric Simulation, Journal of Dong Hua University, Vol. 19, No.1 (2002), S. 44-48.
- [ZWI 11] <http://www.zwick.de/de/produkte/sonderpruefmaschinen/biaxiale-pruefmaschinen.html>

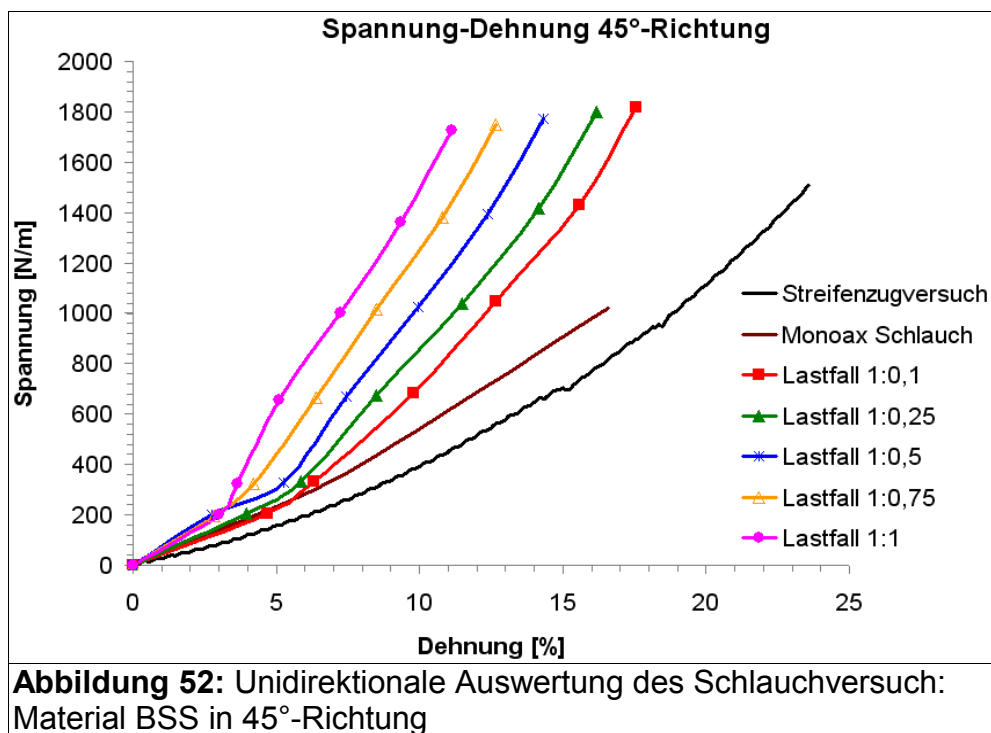
Anhang

Unidirektionale Auswertung des Schlauchversuchs (siehe Kapitel 6.2.4)

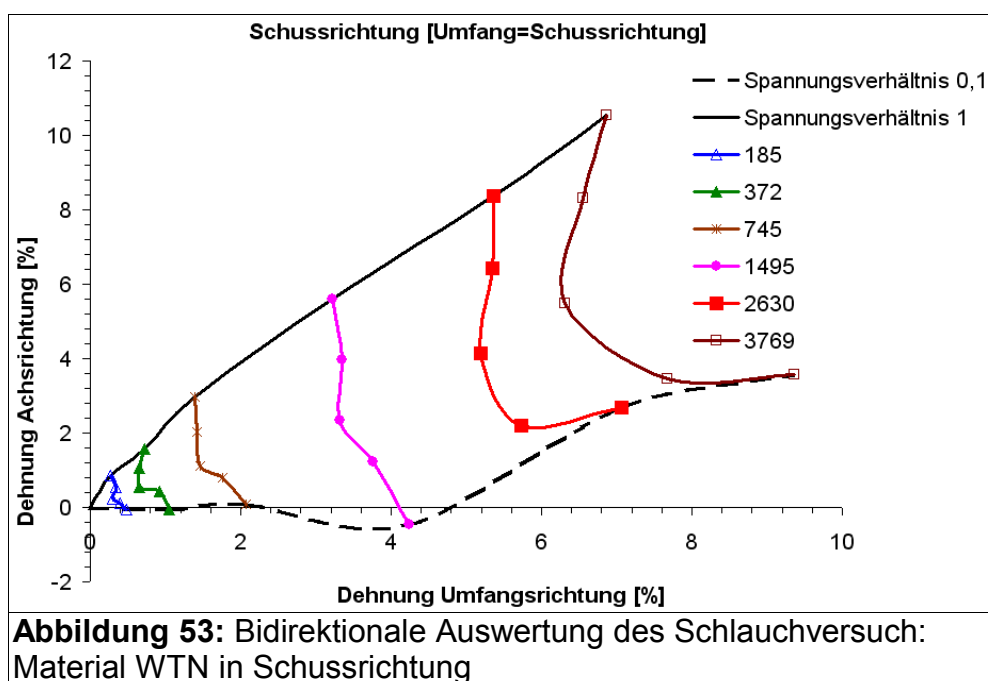


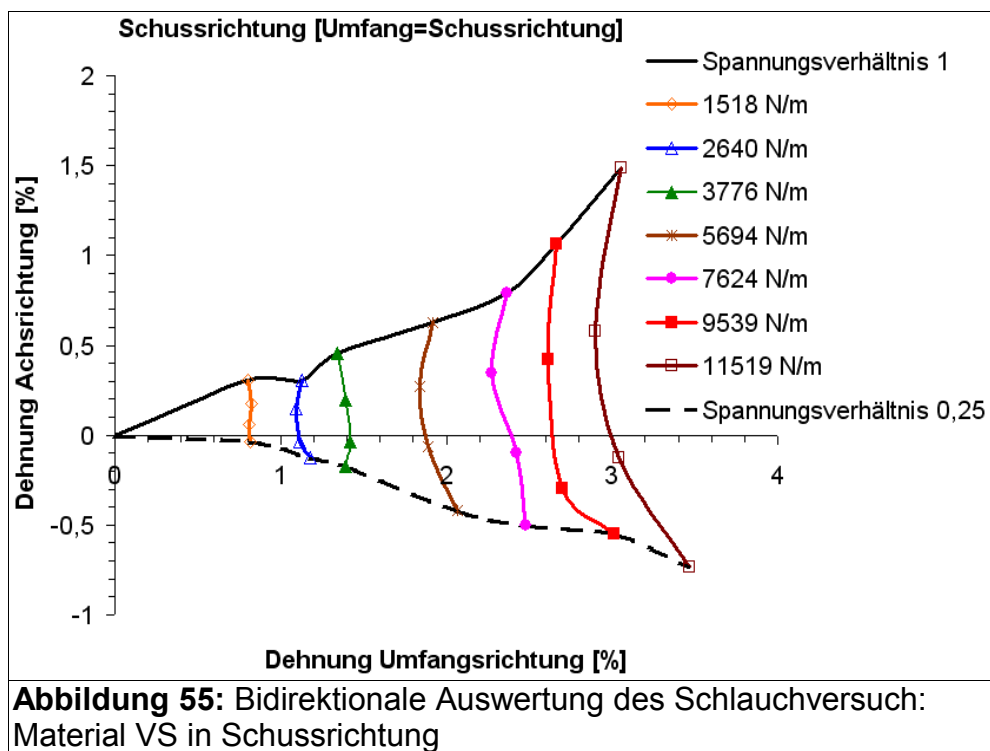
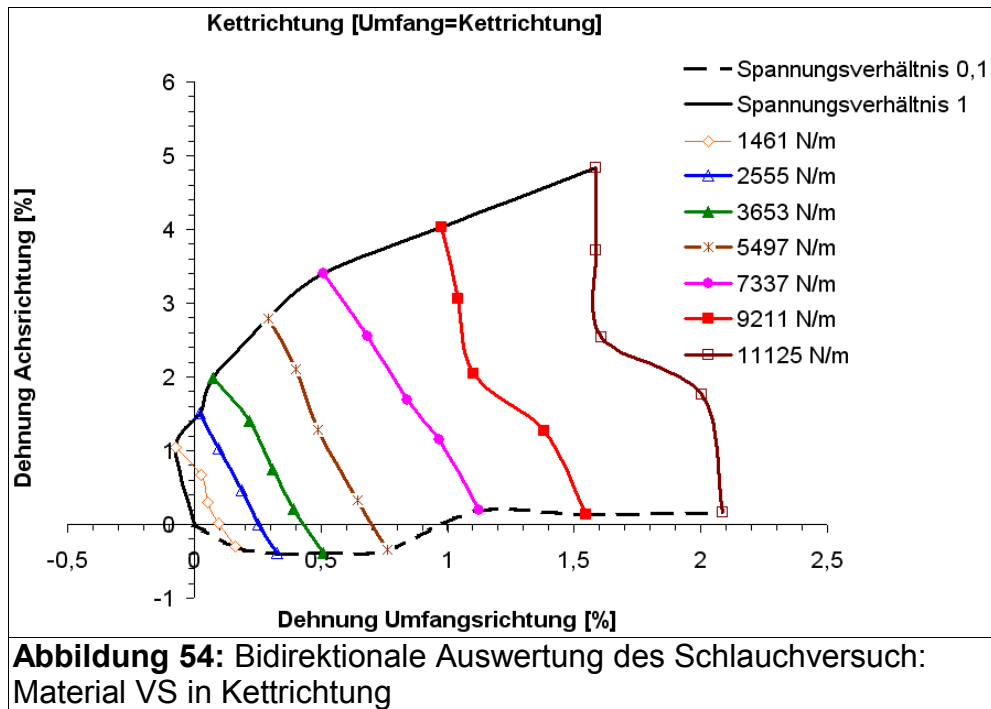






Bidirektionale Auswertung des Schlauchversuchs (siehe Kapitel 6.2.5)





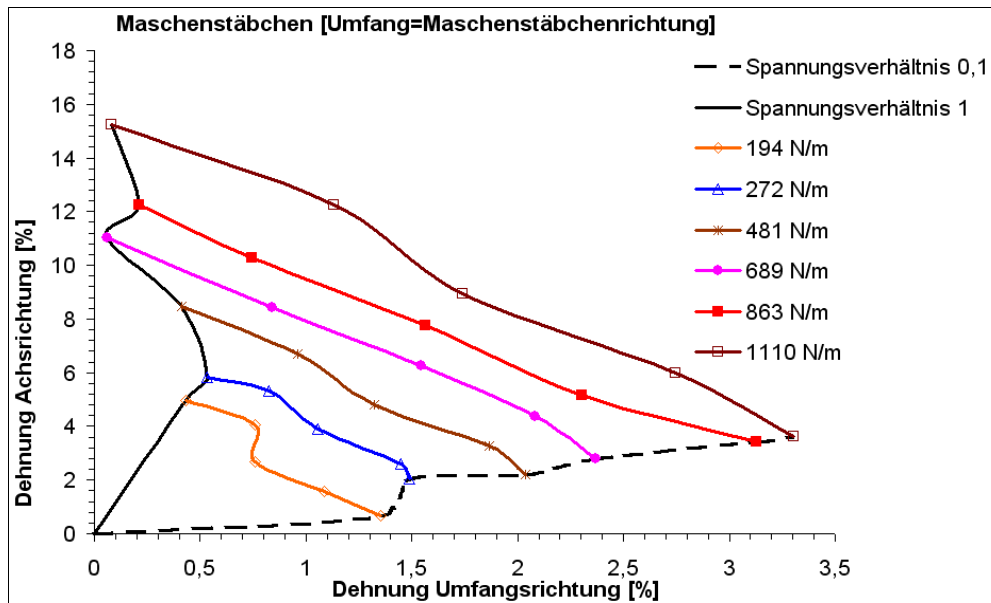


Abbildung 56: Bidirektionale Auswertung des Schlauchversuch: Material BSS in Maschenstäbchenrichtung

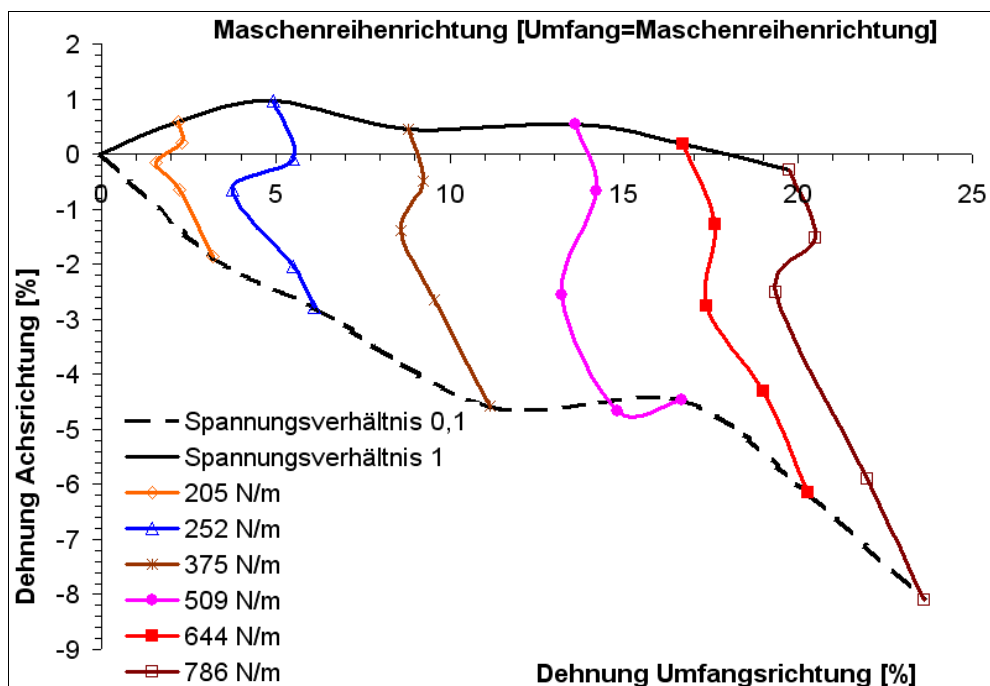
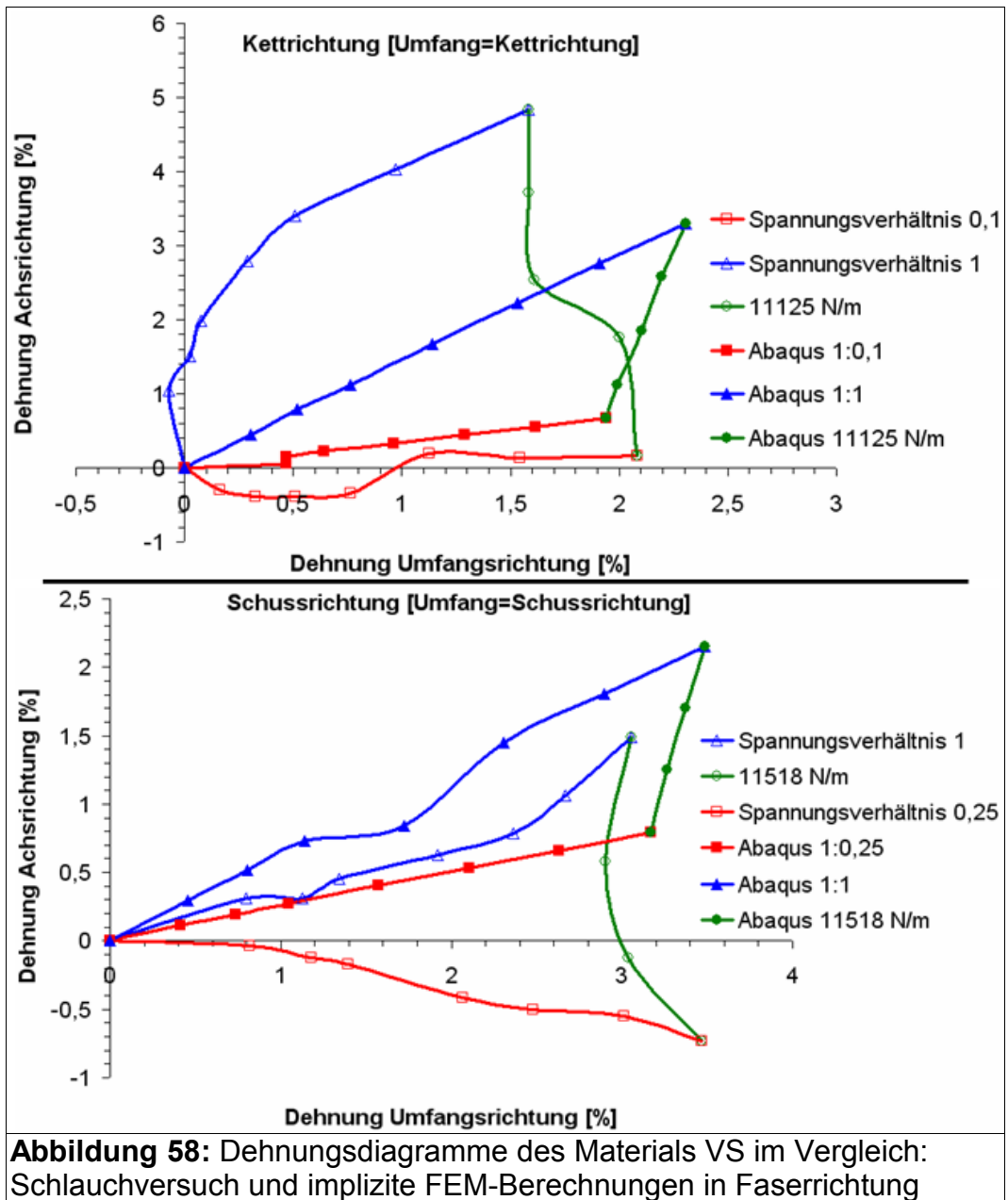
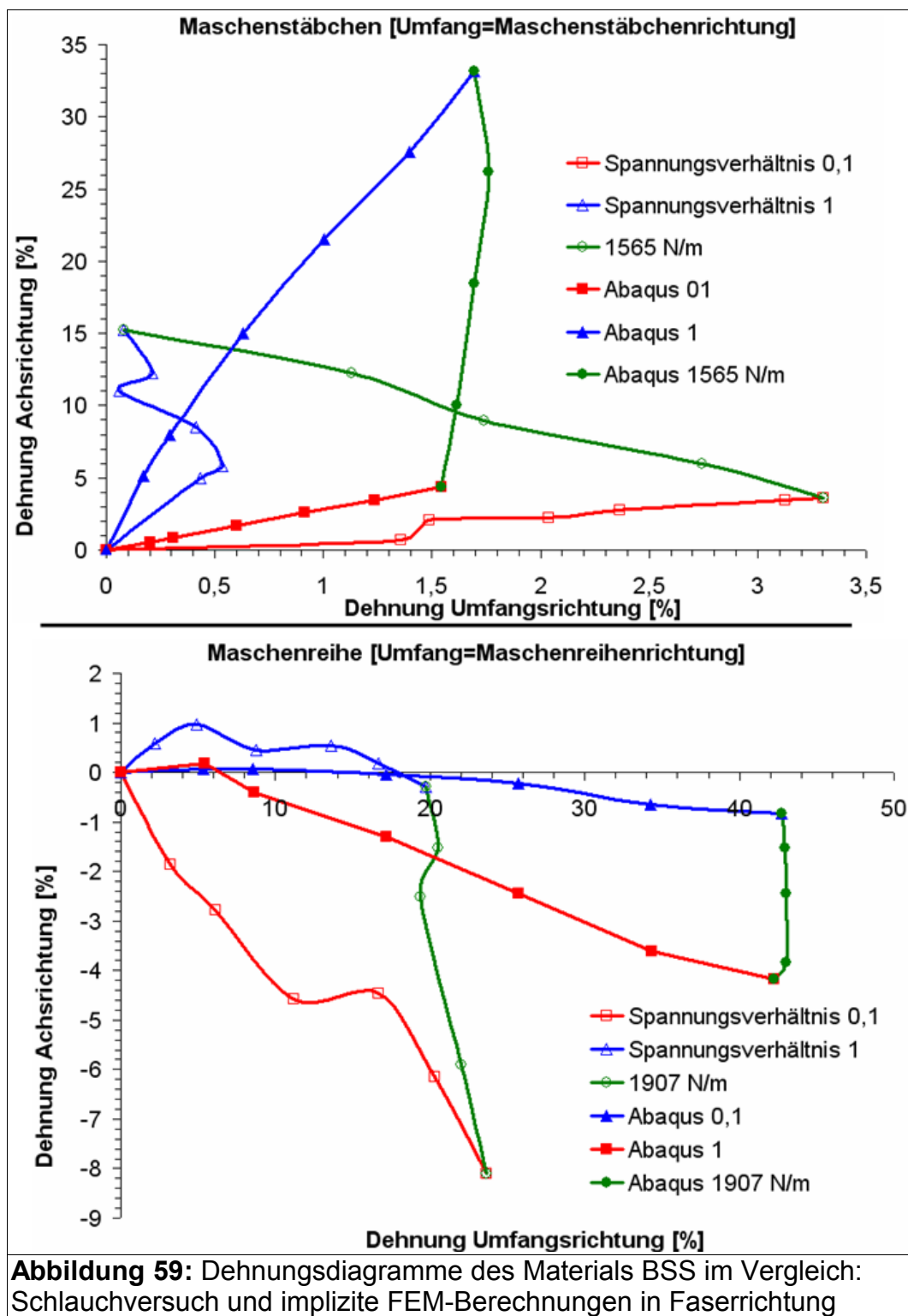


Abbildung 57: Bidirektionale Auswertung des Schlauchversuch: Material BSS in Maschenreihenrichtung

Implizite Berechnung des Schlauchversuchs (Kapitel 7.2.1)





Explizite Berechnung des Schlauchversuchs (Kapitel 7.2.2)

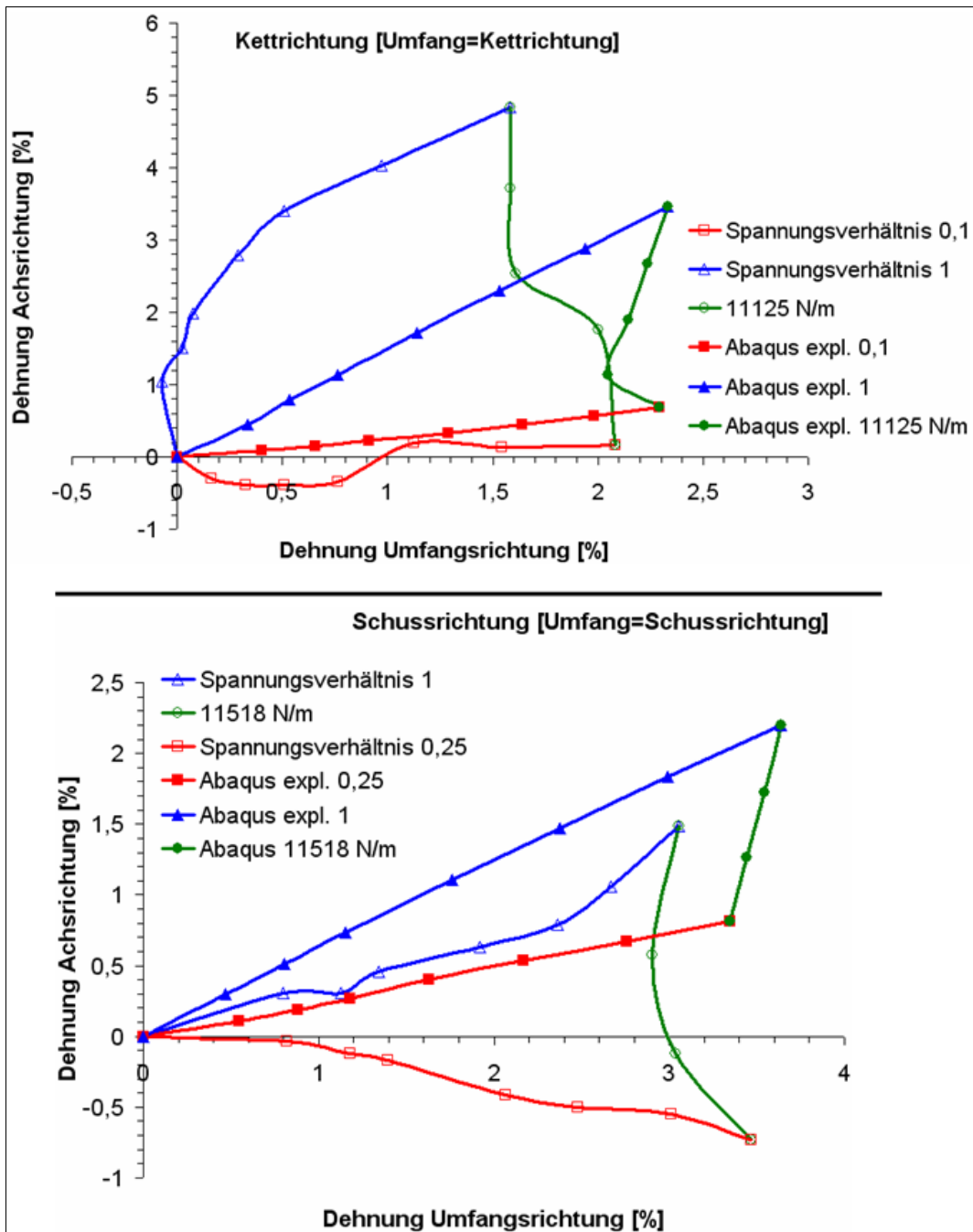


Abbildung 60: Dehnungsdiagramme des Materials VS im Vergleich: Schlauchversuch und explizite FEM-Berechnungen in Faserrichtung

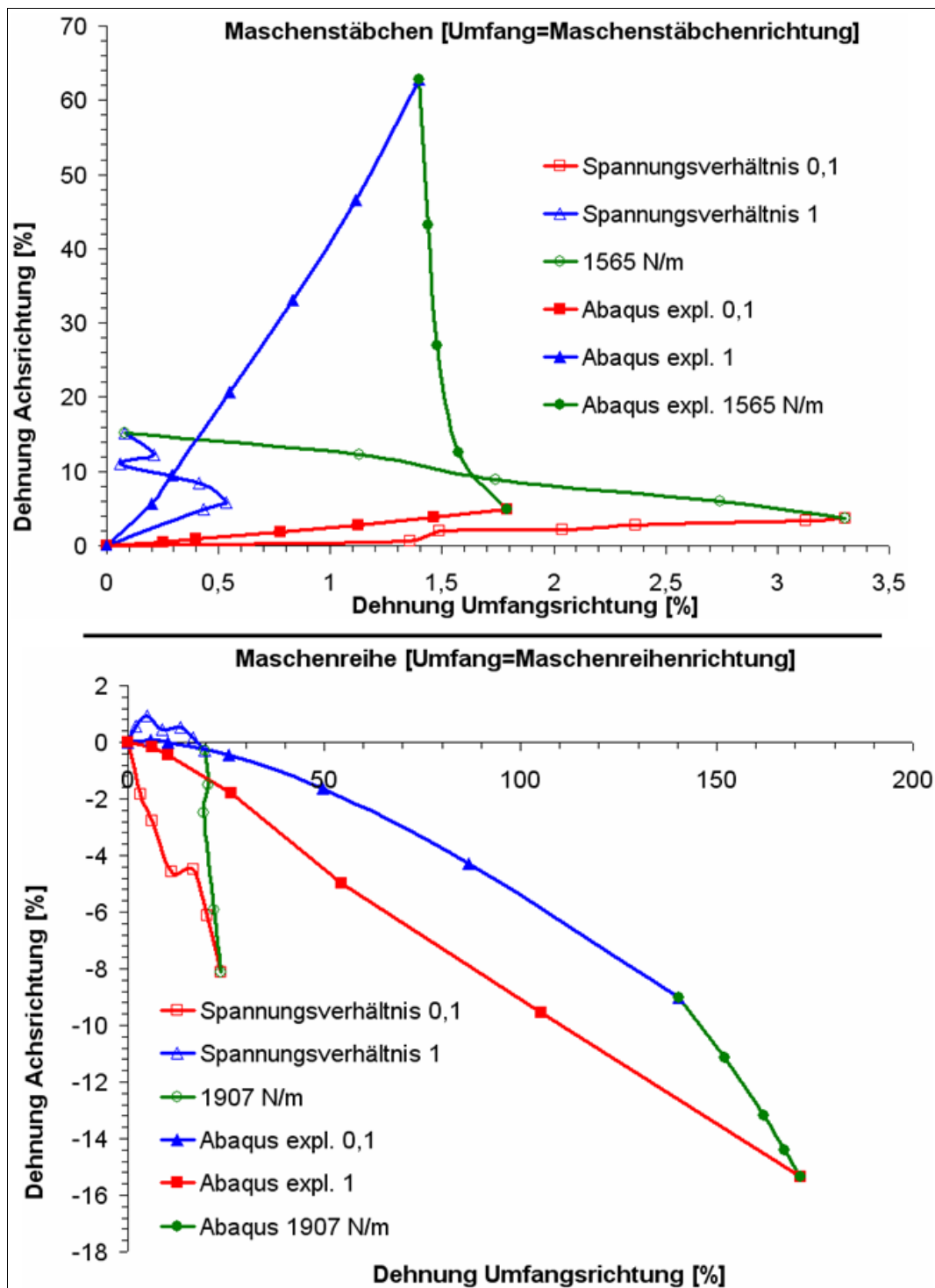


Abbildung 61: Dehnungsdiagramme des Materials BSS im Vergleich: Schlauchversuch und explizite FEM-Berechnungen in Faserrichtung

Lebenslauf

Name: Achim Vohrer
Geboren: 24. August 1971 in Reutlingen
Staatsangehörigkeit: deutsch
Eltern: Dieter (Werkzeugmachermeister) und Ilse Vohrer (Hausfrau)

Schulbildung

1983 - 1988 Isolde-Kurz-Gymnasium in Reutlingen
1988 - 1991 Technisches Gymnasium Reutlingen: Abschluss Abitur

Studium

1991 - 1996 Maschinenbau mit Fachrichtung Betriebs- und Fertigungstechnik an der Fachhochschule für Technik in Konstanz
Abschluss: Diplom Ingenieur Dipl.-Ing. (FH)

Industrietätigkeit

1996 - 1998 Fa. Rücker, Sindelfingen, Karosseriekonstruktion PKW
1998 - 2003 Fa. Recaro, Kirchheim/Teck, Konstruktion, UNIX Systembetreuung, Anwenderbetreuung in verschiedenen CAD-Systemen. Einführung eines PDM-Systems.
*2001 - 2003 Aufbaustudium "Computer Based Engineering" an der Hochschule Reutlingen.
Abschluss: Master of Science M.Sc.*
2003 - 2005 Fa. Automotive Lighting, Reutlingen, Konstruktion
2006 Diplomarbeit bei der Fa. CES Eckard / ITV Denkendorf
*2004 - 2006 Promotionsstudent an der Uni Stuttgart
Abschluss: Diplom Ingenieur Dipl.-Ing. (TU)*
2006 - 2007 Selbstständige Tätigkeit in Konstruktion und Berechnung

Wissenschaftliche Tätigkeit:

seit 2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textil- und Verfahrenstechnik, Denkendorf