

Numerische und experimentelle Untersuchung des Bewegungsverhaltens flexibler, innendruckgesteuerter Endoskope

U. Lauschke, U. Gabbert

In dem vorliegenden Beitrag werden die mechanischen Eigenschaften und das Bewegungsverhalten faserarmerter, mehrlumiger Druckschlauchstrukturen, die die wesentliche Komponente eines neuen Typs flexibler Endoskope darstellen, untersucht. Für die numerische Analyse dieser Endoskopschläuche, deren mechanisches Verhalten durch geometrische und physikalische Nichtlinearitäten gekennzeichnet ist, wird von den Autoren ein spezielles 3D Finite-Elemente-Konzept entwickelt, das auf einer Update-Lagrange-Formulierung basiert. Die Armierungsfasern werden als diskrete 1D Elemente berücksichtigt und mit Hilfe einer Penaltystrategie mit den 3D Elementen verknüpft. Die auf dieser Grundlage entwickelte Simulationssoftware MINOP-FEM wird vorgestellt. Zur Verifikation der Simulationsergebnisse wurde von den Autoren ein Meßstandes mit entwickelt und betreut. Der Meßstand wird kurz vorgestellt, und es werden einige Meßergebnisse mit numerischen Lösungen verglichen. Weitere Anwendungsrechnungen und eine Zusammenfassung der Ergebnisse schließen den Beitrag ab.

1 Einleitung

Die extrem hohen Anforderungen der Neurochirurgie im Hinblick auf eine sichere und präzise Operationsdurchführung haben in den letzten Jahren zu verstärkten Anstrengungen bei der Entwicklung neuartiger minimal-invasiver Techniken geführt [3]. Das vom BMBF geförderte Verbundprojekt MINOP, in dem Neurochirurgen, Naturwissenschaftler und Ingenieure eng zusammenarbeiten, ist ein Beispiel dafür [11]. Ein Ziel des MINOP-Projektes war es, ein Operationssystem für minimal-invasive neurochirurgische Eingriffe zu entwickeln. Kernstück dieses Operationssystems ist ein flexibles, dünnes, multifunktionales Endoskop, dessen Steuerung über einen fluidisch erzeugten Innendruck bei asymmetrischem Strukturaufbau realisiert wird.

Das Fasergeflecht von symmetrisch faser- bzw. gewebearmierten Druckschlauchstrukturen hat in der Regel einen Flechtwinkel von etwa 35° . Das Geflecht hat dabei die Funktion, den Innendruck aufzunehmen, da das Matrixmaterial weich und flexibel ist. Große Deformationen während der Lastzunahme gibt es aufgrund der ausgeglichenen axialen und tangentialen Kräfte im Fasergeflecht nicht. In der vorliegenden Arbeit werden faserarmierte Druckschläuche mit asymmetrischem Strukturaufbau analysiert, deren Fasergeflecht einen von 35° abweichenden Flechtwinkel besitzt. Sie bestehen aus einem weichen Matrixmaterial (z.B. Polyurethan) und fest eingegossenen, bidirektional gewickelten, relativ dehnsteifen Armierungsfasern in monofiler (z.B. Glasfaser) oder multifiler Ausführung (z.B. Polyamid). Das Matrixmaterial ist mit einem oder mehreren Lumen versehen (vgl. Bild 1), in die Axialfasern (z.B. Lichtleiter) eingeschoben oder fest eingeklebt sind. Das proximale Schlauchende ist im Trokar eingespannt, das distale Schlauchende ist räumlich frei beweglich. Ein Lumen dient der Aufnahme eines Innendruckes, der als Steuerparameter verwendet wird. Der Innendruck breitet sich über den Querschnitt in unterschiedlichem Maße aus (je nach Struktur) aus, wobei höhere Drücke maßgeblich vom Fasergeflecht aufgenommen werden. Ist die Schlauchstruktur mit einem Flechtwinkel von kleiner als 35° versehen, kommt es unter zunehmendem Druck zu einer Verlängerung des Schlauches und auch zu einer Querschnittsabnahme, der aber eine radiale Aufweitung infolge des Innendruckes überlagert ist. Beträgt der Flechtwinkel mehr als 35° , kommt es zu einer Verkürzung des Schlauches, die Querschnittsfläche nimmt insgesamt zu. Das Bewegungsverhalten infolge Fasergeflechtreaktion ist abgeschlossen, wenn die Struktur sich derart verformt hat, daß ein Gleichgewicht zwischen inneren und äußeren Kräften erreicht ist. Es läßt sich zeigen, daß dies bei vernachlässigbarem Matrixmaterial (dieses dient dann nur dem Formerhalt des Fasergeflechtes und nimmt selbst keine Kräfte auf) bei einem Flechtwinkel von ca. 35° der Fall ist. Im Betriebszustand unterliegt das Schlauchsystem großen Verformungen, d.h. großen Verschiebungen und Verdrehungen. Es zeigt sich, daß das Matrixmaterial durch eine lineare, hyperelastische Spannungs-Dehnungsbeziehung modelliert werden kann. Die Filamentfasern sowie die eingearbeiteten Axialfasern liefern mit einem linear-elastischen Materialmodell eine ausreichende Genauigkeit. In der Arbeit wer-

den folgende Schwerpunkte behandelt: Entwicklung eines mechanischen Modells zur Beschreibung des Spannungs- und Verformungsverhaltens der Gesamtstruktur; Entwicklung einer FEM Berechnungs- und Simulationssoftware zur grafisch-interaktiven Analyse des Verformungs- und Spannungsverhaltens flexibler, faserverstärkter, mehrlumiger Schlauchstrukturen; Validierung des FEM-Programmsystems mit Hilfe anderer Theorien sowie mit Hilfe experimenteller Meßdaten; Erarbeitung und Auswertung von Experimenten (berührungslose Bewegungsmessung, Bildverarbeitung) und Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den FEM-Lösungen.

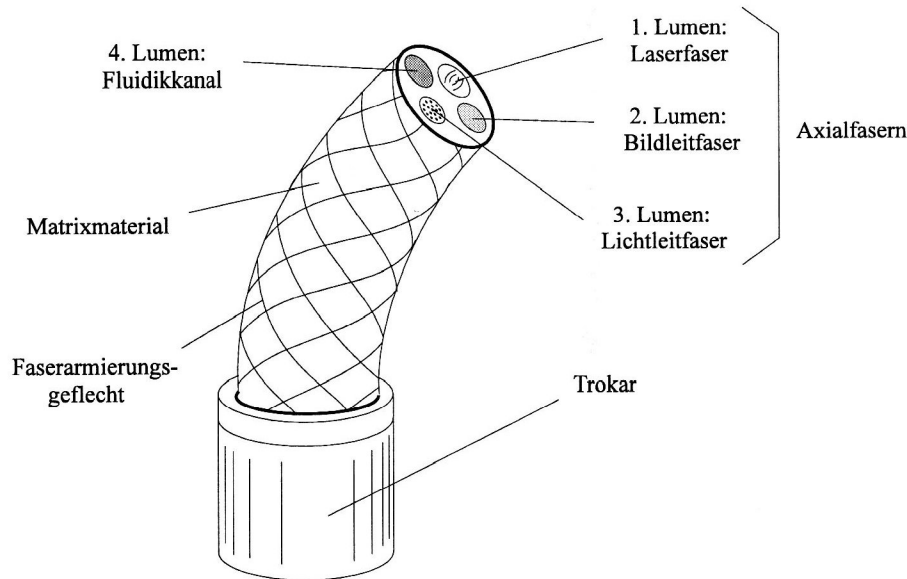


Bild 1: Mehrlumiger, faserverstärkter Druckschlauch für die Endoskopanwendung

2 Überblick über die Anwendung faserverstärkter Strukturen

Faserverstärkte Strukturen dienen im allgemeinen der Erzielung spezieller mechanischer Eigenschaften, welche mit den einzelnen Komponenten nicht realisierbar wären. Im Regelfall wird dabei eine Erhöhung der spezifischen, d.h. massenbezogenen Festigkeit bzw. des spezifischen Lastwiderstandes angestrebt. Weitere gewünschte Eigenschaften sind die Erhöhung der spezifischen Steifigkeit sowie die Gestaltgebung. Eine der neueren Applikationen ist die Gerätesteuerung (Deflektion), wie sie im Abschnitt 1 beschrieben ist.

Zu den wichtigsten Anwendungsgebieten faserverstärkter Strukturen zählen der Leichtbau (u.a. Schiffbau, Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt) [5, 18], das Bauwesen [14], die Reifenindustrie [10, 12], der Druckrohr- und -behälterbau [21] sowie die Fertigung von Druckschläuchen [11], die Fördertechnik [17] und die Textiltechnik [6]. Es gibt eine Reihe von Methoden, mit denen faserverstärkte Strukturen gegenwärtig berechnet werden. Im Leichtbau (dünnwandige Strukturen mit einem extrem hohen Verhältnis von Steifigkeit zu Gewicht) kommt häufig die Laminattheorie zum Einsatz [18]. Ein *Laminat* ist eine Verbundstruktur, welche aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen Orthotropierichtungen aufgebaut ist. Material-, Geometrie- und Struktureigenschaften der einzelnen Schichtkomponenten werden mit Hilfe der Modelle der Mikromechanik zu homogenen Materialgesetzen verknüpft, so daß die Schicht als nach außen homogen und makroskopisch orthotrop angenommen wird. Den Zwang zur Homogenisierung begründet Rohwer in [18] mit den extrem unterschiedlichen Abmessungen von Fasern und Matrixstruktur. Die weitere Berechnung erfolgt in der Regel numerisch mit speziellen Laminat-Programmen oder der Finite-Elemente-Methode [1]. Durch die Homogenisierung der unidirektionalen Schichten, die zur Transversalisotropie führt, erreicht man einen verhältnismäßig niedrigen Rechenaufwand, was als großer Vorteil dieser Methode angesehen werden kann. In der Homogenisierung liegt allerdings auch der gravierende Nachteil, daß wichtige lokale Effekte, beispielsweise das Ausbeulen in Rauten, nicht modelliert werden können. Deshalb kommt die Laminattheorie für eine Modellierung der oben beschriebenen Endoskopschläuche nicht in Betracht, wird aber im Rahmen der vorliegenden Arbeit für Vergleichsuntersuchungen benutzt.

Ein weiteres Anwendungsfeld faserverstärkter Strukturen ist der Behälterbau. Fadengewickelte Behälter

sind in der Regel dünnwandig und rotationssymmetrisch und besitzen eine weiche bzw. vernachlässigbar dünne Matrix. Setzt man weiterhin voraus, daß nur die Fäden die (Zug-)Kraft aufnehmen, während das Bettungsmaterial nur führende, schützende und abdichtende Funktion besitzt, läßt sich für Näherungslösungen die Netztheorie anwenden [21]. Eine von den Autoren auf der Basis der Netztheorie vorgenommene Programmentwicklung zeigte jedoch, daß die Vernachlässigung des Matrixmaterials im vorliegenden Fall unzulässig ist und zu keinen brauchbaren Lösungen führt.

3 Finite-Element-Analyse

Grundgleichungen der nichtlinearen Finite-Element-Analyse

Grundlage für die mechanische Simulation des Verhaltens flexibler Endoskopscäuche der in Bild 1 dargestellten Bauart, sind die folgenden Annahmen. Das Bewegungsverhalten ist quasi-statisch, d.h. Trägheits- und Dämpfungseffekte können vernachlässigt werden. Die Verzerrungen sind noch als klein anzusehen. Die Verschiebungen und Drehungen einer Faser können im Verlauf der Bewegung große Werte annehmen. Die Spannungs-Verzerrungsbeziehung zeigt für das Matrixmaterial ein hyperelastisches Verhalten, während sich die Armierungs- und Axialfasern linear-elastisch verhalten. Aufgrund des Innendruckes sind die Lasten verformungsabhängig, während sich die Randbedingungen im Verlaufe der Bewegung nicht ändern. Eine grundlegende Klassifizierung von physikalisch und geometrisch nichtlinearen Problemen und ihrer Behandlung findet sich u.a. in [2] und [4]. Für die hier vorliegende Problemstellung hat sich eine Formulierung auf der Grundlage einer Update-Lagrange Beschreibung als zweckmäßig erwiesen. Der Gleichgewichtszustand eines Körpers kann mit Hilfe des *Prinzips der virtuellen Verschiebungen*

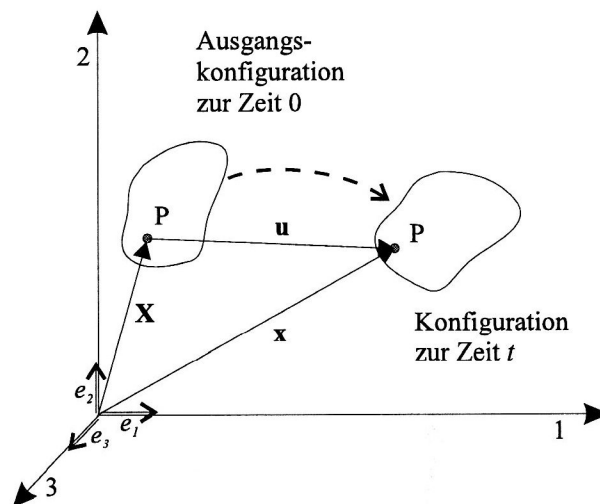


Bild 2: Bewegung eines Körpers in stationären, kartesischen Koordinaten

ausgedrückt werden. Als geeignete, arbeitskonjugierte Spannungs- und Dehnungsmaße werden der 2. Piola-Kirchhoff'sche Spannungstensor \mathbf{S} und der Green-Lagrange'sche Verzerrungstensor \mathbf{C} verwendet. Wird ein im Gleichgewicht befindliches System einer virtuellen Verschiebung unterworfen, müssen die virtuelle Arbeit der inneren Kräfte W_{int} und die virtuelle Arbeit der äußeren Kräfte W_{ext} gleich groß sein.

$$\delta\chi(\mathbf{u}) = \underbrace{\int_{\Omega} \mathbf{S} \cdot \delta\mathbf{C} \, d\Omega}_{\delta W_{int}} - \underbrace{\left[\int_{\Omega} \bar{\mathbf{p}} \cdot \delta\mathbf{u} \, d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{\mathbf{t}} \cdot \delta\mathbf{u} \, d\Gamma \right]}_{\delta W_{ext}} = 0 \quad (1)$$

wobei Ω das Gebiet des Volumens und Γ das Gebiet der Oberfläche des Systems kennzeichnet. δ bedeutet *Variation*, $\bar{\mathbf{p}}$ und $\bar{\mathbf{t}}$ sind die Vektoren der bekannten Körperkräfte bezogen auf eine Volumen- bzw.

Flächeneinheit. Der invariante Tensor \mathbf{C} läßt sich durch den Deformationsgradienten

$$\mathbf{F} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} (e_i \otimes e_j)$$

für kartesische Koordinaten in der Form

$$\mathbf{C} = \frac{1}{2} (\mathbf{F}^T \mathbf{F} - \mathbf{I}) \quad \text{bzw.} \quad C_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial x_k}{\partial X_i} \frac{\partial x_k}{\partial X_j} - \delta_{ij} \right) \quad (2)$$

darstellen, wobei \mathbf{I} den Einheitstensor und δ_{ij} das Kronecker-Symbol bezeichnen. Es gilt die Einstein'sche Summationsvereinbarung.

Der 2. Piola-Kirchhoff'sche Spannungstensor ist ebenfalls ein invarianter Tensor und steht in folgender Beziehung zum Cauchy'schen Spannungstensor $\boldsymbol{\sigma}$

$$\mathbf{S} = \frac{\rho_r}{\rho} \mathbf{F}^{-1} \boldsymbol{\sigma} \mathbf{F}^{-T} \quad \text{bzw.} \quad S_{ij} = \frac{\rho_r}{\rho} \frac{\partial X_i}{\partial x_k} \sigma_{kl} \frac{\partial X_j}{\partial x_l} \quad (3)$$

ρ_r/ρ ist das Verhältnis der Massendichten in der Referenzkonfiguration und in der aktuellen Konfiguration (vgl. Bild 2).

Der Green-Lagrange'sche Verzerrungstensor kann anschaulicher mit Hilfe der Verschiebungsableitungen dargestellt werden

$$C_{ij} = \underbrace{\frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i})}_{\mathbf{C}^{lin}} + \frac{1}{2} (u_{k,i} u_{k,j}) \quad (4)$$

\mathbf{C}^{lin} ist der lineare Anteil des Green-Lagrange'schen Verzerrungstensors. Dieser wird auch als Ingenieur-Verzerrungstensor $\boldsymbol{\epsilon}$ bezeichnet.

Elastische und hyperelastische Materialmodelle

Spannungen und Verzerrungen sind durch das Materialgesetz verknüpft. Im linear-elastischen Fall ist die Spannungs-Verzerrungsbeziehung über das verallgemeinerte Hooke'sche Gesetz gegeben

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \cdot \cdot \mathbf{C} \quad (5)$$

wobei \mathbf{E} einen Elastizitäts- bzw. Materialtensor vierter Stufe bezeichnet. Sind kleine Verzerrungen zu erwarten, werden konstante Materialkoeffizienten verwendet. Für isotropes Material schreibt sich die Tetrade \mathbf{E} nach Voigt'scher Notation wie folgt:

- für den dreidimensionalen Spannungszustand (Anwendung eines finiten Volumenelementes)

$$\mathbf{E} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad \text{und}$$

- für den eindimensionalen Spannungszustand (Anwendung eines finiten Stabelementes)
 E .

Für die Modellierung einer hyperelastischen Spannungs-Verzerrungs-Beziehung werden die Spannungen von einer Funktion der Verzerrungsenergie W , die durch Green-Lagrange'sche Verzerrungen ausgedrückt wird, abgeleitet

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial C_{ij}} \quad (6)$$

Für die Darstellung der Verzerrungsenergiefunktion findet man in der Literatur eine Reihe von Formulierungen. Eine umfangreiche Untersuchung verschiedener Formulierungen wurde von Reese in [16] durchgeführt. Von den Autoren wurde die St.-Venant'sche Formulierung der Verzerrungsenergie

$$W = \frac{1}{2} \lambda (sp \mathbf{C})^2 + \mu sp \mathbf{C}^2 \quad (7)$$

verwendet, wobei λ und μ die Lamé'schen Konstanten sind. Sie sind wie folgt definiert:

$$\lambda = \frac{E \nu}{(1 + \nu)(1 - 2 \nu)} \quad \mu = G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

In der Verzerrungsenergie sind geometrische Nichtlinearitäten (im Gegensatz zum Hooke'schen Gesetz) in vollem Umfang enthalten. Die Forderung nach Polykonvexität erfüllt dieses Modell nicht, was bei kleinen Verzerrungen keinen Nachteil darstellt [16].

Die 2. Piola-Kirchhoff-Spannungsinkremente werden nach jedem Lastschritt Δt aufsummiert. Die Transformation in Cauchy-Spannungen ist bei Verwendung der Update-Lagrange-Formulierung (Bezugskonfiguration ist die Konfiguration zur Zeit t) durch die folgende Beziehung in Indexschreibweise gegeben:

$${}^{t+\Delta t} \sigma_{mn} = \frac{{}^{t+\Delta t} \rho}{{}^t \rho} {}^t x_{m,i} {}^t S_{ij} {}^t x_{n,j} \quad (8)$$

Finite Elemente und Ansatzfunktionen

Für die Modellierung des Matrixmaterials sowie der Axialfasern werden Hexaeder-Elemente mit quadratischen Ansatzfunktionen verwendet (vgl. Bild 3). Sie liefern ausreichende Genauigkeit bei vertretbarem Rechenaufwand. Das Faserarmierungsgeflecht wird mit Stabelementen (Zug-/Druckelemente ohne Biegeefflüsse) mit quadratischen Ansatzfunktionen beschrieben. Die Verwendung weiterer Elemente ist nicht zwingend erforderlich. In der vorliegenden Arbeit wird die Diskretisierung mit isoparametrischen finiten

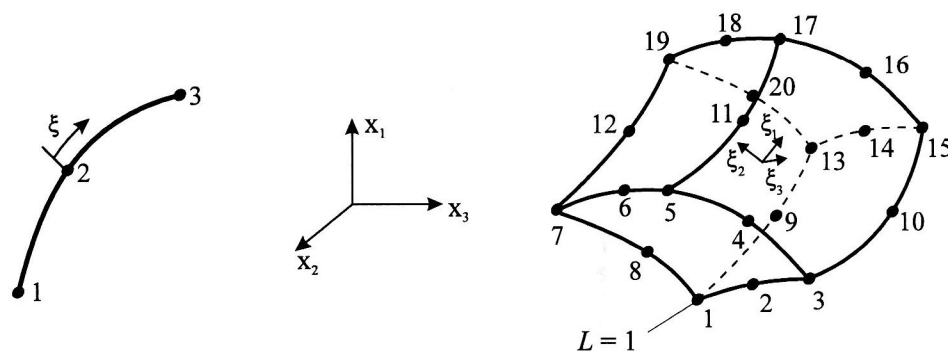


Bild 3: Finites Stab- und Volumenelement

Elementen vorgenommen, d.h. für die Transformation des Einheitselementes in das verzerrte Element werden die gleichen Funktionen benutzt, wie für die Interpolation der Verschiebungen im Element aus den Knotenpunktverschiebungen. ξ_i sind die normierten lokalen Element-Koordinaten, für die $\xi_i \in [-1, 1]$ gilt. Es ergibt sich damit

$$x_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = \sum_{L=1}^N \phi_L(\xi_1, \xi_2, \xi_3) x_{iL} \quad i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

$$u_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = \sum_{L=1}^N \phi_L(\xi_1, \xi_2, \xi_3) u_{iL}$$

wobei N die Anzahl der Elementknoten und ϕ_L die Interpolationspolynome bezeichnen. Letztere werden

zur Matrix der Formfunktionen wie folgt zusammengefaßt

$$\mathbf{G} = [\phi_1 \mathbf{I} \dots \phi_L \mathbf{I} \dots \phi_N \mathbf{I}] \quad (10)$$

Die Elementgeometrie wird mit Hilfe der Formfunktionen durch

$$\mathbf{x}(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = \mathbf{G}(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \mathbf{y} \quad (11)$$

mit $\mathbf{y}^T = [x_{11} \ x_{21} \ x_{31} \ \dots \ x_{1L} \ x_{2L} \ x_{3L} \ \dots \ x_{1N} \ x_{2N} \ x_{3N}]$ angenähert. Der Verschiebungsansatz lautet

$$\mathbf{u}(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = \mathbf{G}(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \mathbf{v} \quad (12)$$

mit

$$\mathbf{v}^T = [u_{11} u_{21} u_{31} \dots u_{1L} u_{2L} u_{3L} \dots u_{1N} u_{2N} u_{3N}]$$

und den Interpolationsfunktionen für Stabelemente

$$G_1 = \frac{1}{2}(1 - \xi) - \frac{1}{2}(1 - \xi^2) \quad G_2 = 1 - \xi^2, G_3 = \frac{1}{2}(1 + \xi) - \frac{1}{2}(1 - \xi^2)$$

und für Volumenelemente

$$G_L = \frac{1}{8}(1 + \xi_{1L}\xi_1)(1 + \xi_{2L}\xi_2)(1 + \xi_{3L}\xi_3)(\xi_{1L}\xi_1 + \xi_{2L}\xi_2 + \xi_{3L}\xi_3 - 2)$$

$$L = 1, 3, 5, 7, 13, 15, 17, 19$$

$$G_L = \frac{1}{4}(1 + \xi_{1L}\xi_1)(1 + \xi_{2L}\xi_2)(1 + \xi_{3L}\xi_3) \left[1 - (\xi_1\xi_{2L}\xi_{3L})^2 - (\xi_{1L}\xi_2\xi_{3L})^2 - (\xi_{1L}\xi_{2L}\xi_3)^2 \right]$$

$$L = 2, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20$$

ξ_{iL} bezeichnet den Wert der lokalen Koordinate ξ_i am Knoten L . Die Auswertung von Gl. (1) mit den oben genannten Ansatzfunktionen führt bei Verwendung der Update-Lagrange'schen Formulierung und Linearisierung im Zeitschritt t auf die Finite-Element-Gleichungen

$$\begin{aligned} \int_{tV} {}^t\mathbf{D}_L^T {}^t\mathbf{E} {}^t\mathbf{D}_L d^tV \Delta \mathbf{v}^{(i)} + \int_{tV} {}^t\mathbf{D}_{NL}^T {}^t\boldsymbol{\sigma} {}^t\mathbf{D}_{NL} d^tV \Delta \mathbf{v}^{(i)} \\ = {}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_{ext} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_{int}^{(i-1)} \end{aligned} \quad (13)$$

Der Ausdruck

$${}^t\mathbf{K}_L = \int_{tV} {}^t\mathbf{D}_L^T {}^t\mathbf{E} {}^t\mathbf{D}_L d^tV$$

wird als auf die Konfiguration zum Zeitpunkt t bezogene lineare Steifigkeitsmatrix bezeichnet, und

$${}^t\mathbf{K}_{NL} = \int_{tV} {}^t\mathbf{D}_{NL}^T {}^t\boldsymbol{\sigma} {}^t\mathbf{D}_{NL} d^tV$$

bezeichnet die auf die Konfiguration zum Zeitpunkt t bezogene Steifigkeitsmatrix, welche aus dem zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Anfangsspannungszustand resultiert. Der Ausdruck

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_{int}^{(i-1)} = \int_{tV} {}^t\mathbf{D}_L^T {}^t\hat{\boldsymbol{\sigma}} d^tV \quad (14)$$

ist der aus den Elementspannungen resultierende Vektor der inneren Kräfte im Iterationsschritt $(i - 1)$. ${}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_{ext}$ bezeichnet den Vektor der äußeren Knotenlasten und ${}^t\boldsymbol{\sigma}$ bzw. ${}^t\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ sind die Cauchy'sche Spannungsmatrix bzw. der Cauchy'sche Spannungsvektor, ${}^t\mathbf{E}$ ist die Materialmatrix. Die Differentialoperatoren in den Gleichungen (13) bis (14) haben unter Verwendung der abkürzenden Schreibweise

$${}^tG_{i,j} = \frac{\partial G_i}{\partial {}^tx_j}$$

die folgende Form:

$${}^t\mathbf{D}_L^T = \begin{bmatrix} {}^tG_{1,1} & 0 & 0 & {}^tG_{2,1} & \dots & 0 \\ 0 & {}^tG_{1,2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & {}^tG_{1,3} & 0 & \dots & {}^tG_{N,3} \\ {}^tG_{1,2} & {}^tG_{1,1} & 0 & {}^tG_{2,2} & \dots & 0 \\ 0 & {}^tG_{1,3} & {}^tG_{1,2} & 0 & \dots & {}^tG_{N,2} \\ {}^tG_{1,3} & 0 & {}^tG_{1,1} & {}^tG_{2,3} & \dots & {}^tG_{N,1} \end{bmatrix}$$

$${}^t\mathbf{D}_{NL}^T = \begin{bmatrix} {}^t\tilde{\mathbf{D}}_{NL} & \tilde{\mathbf{N}} & \tilde{\mathbf{N}} \\ \tilde{\mathbf{N}} & {}^t\tilde{\mathbf{D}}_{NL} & \tilde{\mathbf{N}} \\ \tilde{\mathbf{N}} & \tilde{\mathbf{N}} & {}^t\tilde{\mathbf{D}}_{NL} \end{bmatrix}$$

mit

$${}^t\tilde{\mathbf{D}}_{NL}^T = \begin{bmatrix} {}^tG_{1,1} & 0 & 0 & {}^tG_{2,1} & \dots & {}^tG_{N,1} \\ {}^tG_{1,2} & 0 & 0 & {}^tG_{2,2} & \dots & {}^tG_{N,2} \\ {}^tG_{1,3} & 0 & 0 & {}^tG_{2,3} & \dots & {}^tG_{N,3} \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \tilde{\mathbf{N}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Da es sich bei der vorliegenden Aufgabe um ein statisches, zeitunabhängiges Problem handelt, ist t keine Zeitvariable, sondern eine Variable für die Lastinkrementierung. Unter Verwendung der o.g. Abkürzungen kann Gl. (13) wie folgt dargestellt werden:

$$({}^t\mathbf{K}_L + {}^t\mathbf{K}_{NL}) \Delta \mathbf{v}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_{ext} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_{int}^{(i-1)} \quad (15)$$

Die Gesamtverschiebung ergibt sich aus der Summe der Verschiebungsinkremente.

Die Penalty-Methode zur Verknüpfung unterschiedlicher Elementtypen

Die diskrete Einkopplung von Faserelementen beispielsweise in Volumenelemente wird über Zwangsgleichungen realisiert. Weit verbreitet sind die *Methode der Lagrange'schen Multiplikatoren* und die *Penalty-Methode*. Während bei der Methode der Lagrange'schen Multiplikatoren das Gleichungssystem um Zwangsbedingungsgleichungen erweitert wird, werden bei der Penalty-Methode [7, 8] keine zusätzlichen Variablen und damit Gleichungen benötigt. In der vorliegenden Arbeit wurde die Penalty-Methode mit dem Update-Lagrange-Verfahren kombiniert. Bandbreite und Symmetrie der Koeffizientenmatrix bleiben erhalten, was eine effektive numerische Behandlung ermöglicht. Die Zwangsbedingungen ergeben sich aus der Forderung, daß im Verlauf der Bewegung stets die Verschiebung eines Faserknotens identisch mit der Verschiebung des entsprechenden Volumenpunktes mit den lokalen Koordinaten ξ_i und identischen globalen Ausgangskordinaten sein muß (vgl. Bild 4). In Gl. (16) ist diese Forderung als Zwangsbedingung formuliert

$$\mathbf{z}_A = \mathbf{u}_A^H - \mathbf{u}_A^S = 0 \quad (16)$$

aus der sich nach Einsetzen von Gl. (12)

$$\mathbf{z}_A(\mathbf{v}) = \mathbf{Z}_A \mathbf{v}_A = [\mathbf{G}^H(\xi_{1A}, \xi_{2A}, \xi_{3A}) - \mathbf{I}_3] \begin{bmatrix} \mathbf{v}_A^H \\ \mathbf{v}_A^S \end{bmatrix} = 0 \quad (17)$$

ergibt. Gl. (1) kann somit erweitert werden zu

$$\delta\chi^* = \delta\chi + \delta\chi_P = \delta\chi + \delta\mathbf{v}_A^T \underbrace{\alpha_P \mathbf{Z}_A^T \mathbf{Z}_A}_{\mathbf{K}_{PA}} \mathbf{v}_A = 0 \quad (18)$$

wobei $\alpha \gg \max(k_{ii})$ die sogenannte Penalty-Zahl ist. Sie ist ein Korrekturfaktor, der in Abhängigkeit von seiner Größe, bezogen auf das maximale Hauptdiagonalelement, die Verletzung der Zwangsbedingung beeinflusst. Das Gleichungssystem (15) nimmt unter Berücksichtigung der Zwangsbedingungen dann die Form

$$({}^t\mathbf{K}_L + {}^t\mathbf{K}_{NL} + {}^t\mathbf{K}_P)^{(i-1)} \Delta\mathbf{u}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_{ext} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_{int}^{(i-1)}$$

an, wobei ${}^t\mathbf{K}_P$ die Summe aller Zwangsbedingungsmatrizen ${}^t\mathbf{K}_{PA}$ darstellt.

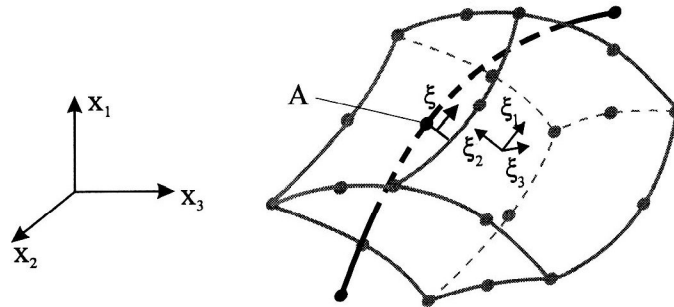


Bild 4: Finites Volumenelement gekoppelt mit einem Stabelement

Für den in Bild 4 dargestellten Fall, bei dem ein gekrümmtes Stabelement durch ein 20-Knoten-Hexaederelement verläuft, ergibt sich die Zwangsbedingungsmatrix \mathbf{K}_{PA} für den Knoten A des Stabelementes ($\xi_{1A}, \xi_{2A}, \xi_{3A}$ lokale Koordinaten des Punktes A im Hexaederelement) zu

$$\mathbf{K}_{pA} = \alpha \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 G_1^A G_1^A & \mathbf{I}_3 G_1^A G_2^A & \dots & \mathbf{I}_3 G_1^A G_{20}^A & -\mathbf{I}_3 G_1^A \\ & \mathbf{I}_3 G_2^A G_2^A & \dots & \mathbf{I}_3 G_1^A G_{20}^A & -\mathbf{I}_3 G_2^A \\ & & & \vdots & \vdots \\ & & & & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}$$

wobei \mathbf{I}_3 eine Einheitsmatrix vom Rang 3 ist. Da sich die Lage des Koppelknotens A bezüglich der lokalen Koordinaten auch bei großen Verformungen nicht ändert, ist diese Matrix konstant, weshalb der Index t nicht erforderlich ist.

Programmkonzeption

Zum Zwecke der effizienten Analyse und Auslegung faserverstärkter Schlauchstrukturen wurde von Lausche [9] ein spezielles FEA-Programmsystem (*MINOP-FEM*) entwickelt. In Bild 5 sind die wichtigsten Programmbausteine schematisch dargestellt. Eine zentrale Bedeutung hat die Modelldatei, welche neben Verwaltungsangaben eine globale Beschreibung der Struktur-, Geometrie- und Materialeigenschaften sowie Steuerdaten für die nichtlineare Analyse (Inkrementierung, Iterationstiefe usw.) enthält. Sie wird vom Eingabemodul erzeugt und von allen anderen Prozessoren eingelesen. Nach der Beschreibung der Eingabedaten kann der Nutzer Bewegungs- oder Zielpunktsimulationen auf Basis der Netztheorie ausführen (die Ergebnisse haben wiederum Einfluß auf die Eingabedaten) oder eine vollständige nichtlineare Finite-Element-Analyse durchführen. Zu diesem Zweck steht ein vollautomatischer Netzgenerator für faserverstärkte Ein- und Mehrlumenschläuche zur Verfügung, der aus den Angaben der Modelldatei ein FEM-Modell erzeugt (FEM-Eingabedatei). Diese wird vom Analyse-Modul eingelesen, und es erfolgt die Berechnung. Abschließend werden Ergebnisdateien für den grafischen Postprozessor (Spannungs- und Verformungsdarstellung) und die grafische Bewegungssimulation erzeugt. Der Postprozessor besitzt eine Schnittstelle zum Einlesen der experimentellen Meßdaten. Die Meßergebnisse können so im gleichen Diagramm wie die Berechnungsergebnisse dargestellt und so visuell verglichen werden. Ein exakter Ergebnisvergleich in Diagrammform ist ebenfalls möglich.

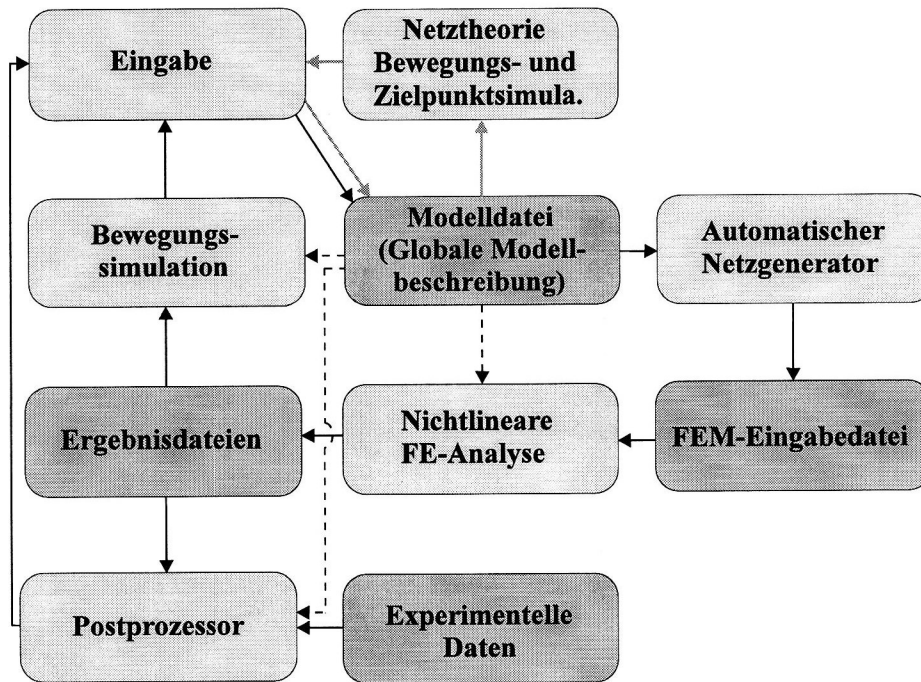


Bild 5: Module des Programmsystems MINOP-FEM

4 Experimentelle Analyse

Ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklung und Testung von innendruckgesteuerten Endoskopen im MINOP-Projekt ist ein Meßstand, mit dem berührungslos geometrische Daten sowie Bewegungsabläufe erfaßt und ausgewertet werden können. Der Meßstand wurde von den Projektpartnern *Aesculap AG Tuttlingen* und *Techno Team GmbH Ilmenau* entwickelt und aufgebaut. In Bild 6 ist die komplette Meß-

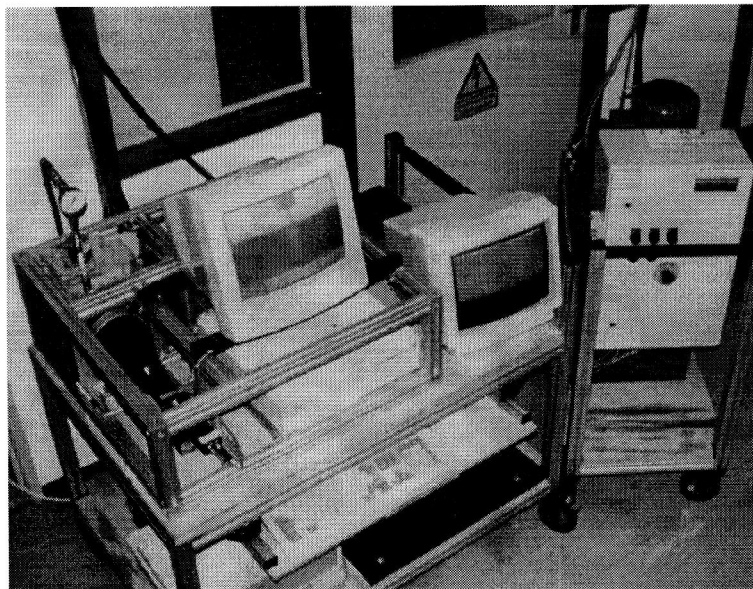


Bild 6: Meßeinrichtung

einrichtung bestehend aus temperierter Meßkammer mit CCD-Kameras (vgl. auch Bild 7a), Schlauchhalterung und Manometer (vgl. auch Bild 7b), Pumpenaggregat (rechts im Bild) und Personalcomputer zur Versuchssteuerung sowie zur Meßwerterfassung dargestellt. Die Software zur Steuerung des Meßstandes sowie zur Verarbeitung der anfallenden Meßdaten stammt im wesentlichen von Neuhäuser und ist in [15] ausführlich beschrieben. Der Meßvorgang ist schematisch in Bild 8 dargestellt. Zwei CCD-Kameras mit

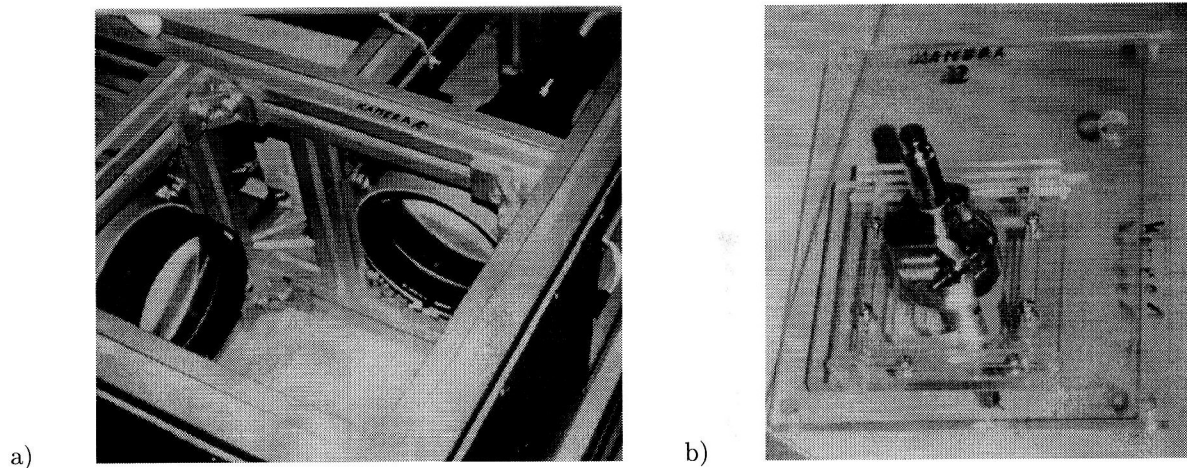


Bild 7: Meßstand a) Temperierte Meßkammer, b) Deckplatte

telezentrischen Objektiven sind in einer Ebene senkrecht zueinander angeordnet. Auf Basis einer Konturverfolgung liefern sie jeweils ein pixelgenaues Abbild einer Kontur in Form einer Koordinatenliste. Die eindeutige Bestimmung der dreidimensionalen Koordinaten ist dadurch möglich, daß die Kamerakoordinatensysteme so definiert sind, daß der Koordinatenursprung und genau eine Koordinatenachse dieser beiden Kamerakoordinatensysteme identisch sind. Diese Herangehensweise ist zulässig, da durch

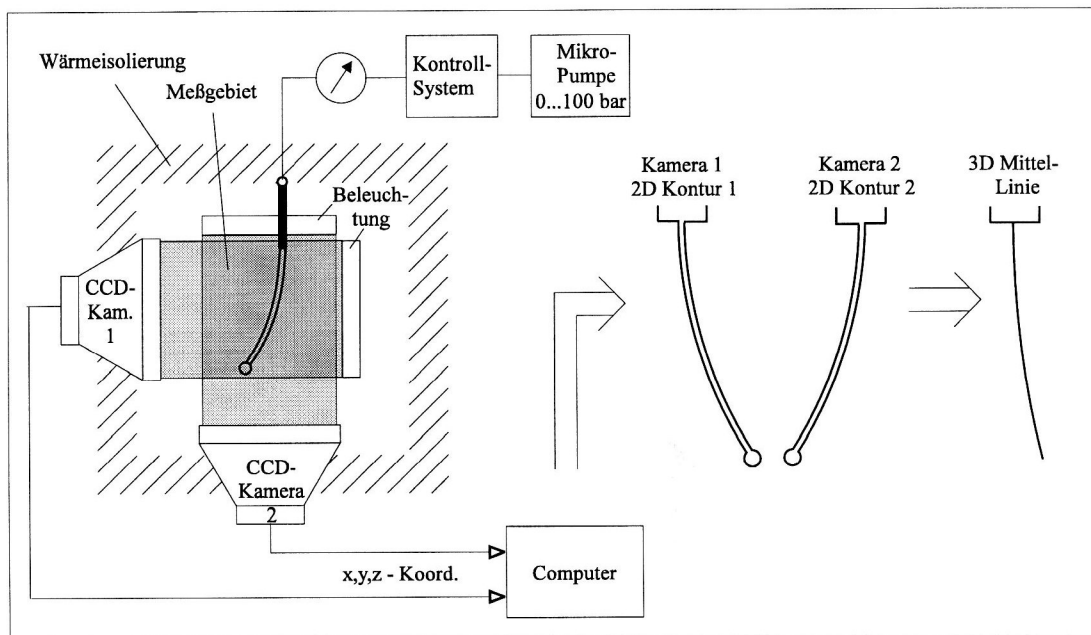


Bild 8: Schematische Darstellung des Meßvorganges

die ebene Krümmung der Endoskopschläuche stets eine eindeutige Korrespondenz der Meßpunkte in beiden Bildern gegeben ist. Die Anordnung des Schlauches zwischen Kamera und Beleuchtungssystem ermöglicht eine kontrastreiche Durchlichtaufnahme unabhängig von Material und Farbe des Schlauches.

Meßprogramm

Von den Autoren wurde in Abstimmung mit den oben genannten Projektpartnern ein Meßprogramm erarbeitet, das 30 Grundmeßreihen bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen beinhaltet, wobei eine Meßreihe wiederum aus fünf identischen Versuchen besteht. "Identische Versuche" sind Versuche mit gleichem Versuchsablauf unter gleichen Versuchsbedingungen, die mit Schlauchabschnitten derselben Charge durchgeführt werden. Es werden grundsätzlich nur die aus den fünf Versuchen gemittelten Ergebnisse gespeichert und weiterverarbeitet. Die Meßreihen unterscheiden sich je nach Untersuchungs-

ziel bezüglich der Schlauchtypen (Struktur, Geometrie, Material), der Umgebungstemperatur (20°C und 37°C zur Untersuchung des Temperatureinflusses), der Lasthöhe (Berstversuche etc.), der Lastarten (Innendruck und/oder Einzelkraft und/oder Schwerkraft, wobei letztere nur bei horizontaler Anordnung einen meßbaren Einfluß hat), der geometrischen Anordnung (horizontal/vertikal zur Untersuchung des Einflusses der Schwerkraft), der Lastgeschwindigkeit (Untersuchung von Hysterese-Effekten und Versagenserscheinungen) und der Anzahl der Belastungszyklen (Dauerfestigkeitsuntersuchungen und Untersuchungen zu besonderen Effekten, wie z.B. Einschneiden von Fasern in das Matrixmaterial usw.). Ein Meßablauf stellt sich wie folgt dar:

1. Erzeugen eines definierten Druckes (linearer Druckanstieg)
2. Zeitsynchrone Bildaufnahme mit beiden Kameras
3. Konturverfolgung und Vermessung der Außenkontur des Endoskopschlauches
4. Numerische Auswertung, Datenaufbereitung

Die Konturverfolgung liefert eine pixelgenaue Koordinatenliste. Sie ermöglicht das schnelle Finden der interessierenden Meßzonen für die anschließende subpixelgenaue Vermessung. Als Subpixelverfahren kommt das Verfahren der fotometrischen Mitte [15] zum Einsatz.

Auswertung der Meßergebnisse

Von besonderer Bedeutung für die Ergebnisqualität ist das Einmessen des 3D-Meßsystems. Dies ist ein zeitaufwendiger und komplizierter Vorgang [13, 19, 20]. Die Kameras sind so zu justieren, daß die durch die Kamerakoordinatensysteme (x_1, y_1) und (x_2, y_2) aufgespannten Sensorebenen senkrecht aufeinander stehen, die Koordinatenachsen x_1 und x_2 der Sensorebenen senkrecht aufeinander stehen und die Koordinatenachsen y_1 und y_2 der Sensorebenen parallel zueinander stehen. Diese Forderungen können nur näherungsweise erfüllt werden. Weitere Meßfehler bei der optischen Abbildung entstehen durch die Verzeichnung der Objektive sowie durch Abweichungen von der idealen Telezentrie. Auch das Verfahren der fotometrischen Mitte ist als Näherungsverfahren fehlerbehaftet. Der dadurch verursachte Gesamtfehler kann nach [15] mit etwa 1,5% bezogen auf die maximale Auslenkung beziffert werden. Die exakte Auswertung der Meßergebnisse erfolgt in Diagrammform, wobei wegen der zum Teil kleinen Deflektionen (insbesondere bei 4-Lumen-Schläuchen) auf Maßstabstreue verzichtet wurde. Die Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnungen werden in gleicher Weise dargestellt. Um den Einfluß lokaler Effekte zu

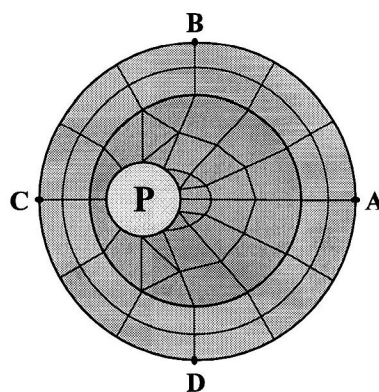


Bild 9: Meßpunkte am FE-Querschnitt

minimieren, wurden je Rechnung vier axiale Punktreihen entlang der Schlauchoberfläche ausgewertet. Die Anordnung dieser Punktreihen entspricht den Punkten A, B, C, D in Bild 9. Aus den entsprechenden Ergebnislisten wurden die Verschiebungen der Punkte im Abstand von 0,5mm entnommen, gemittelt und grafisch dargestellt (vgl. Bild 13).

5 Beispiele

Testbeispiel 35°-Effekt

Das Programmsystem *MINOP-FEM* wurde anhand von zahlreichen Beispielen getestet und mit theoretischen Lösungen verglichen. Im folgenden Testbeispiel wird ein einseitig eingespannter, einlumiger, mit einem Fasergeflecht ohne axiale Armierung versehener Schlauch untersucht. Der Schlauch wird mit stei-

gendem Innendruck belastet. Es wurden Materialdaten verwendet, die denen relevanter Materialien, d.h. Polyurethan als Matrix- und Polyamid als Fasermaterial, entsprechen:

- Elastizitätsmodul des Matrixmaterials: $E_{Matrix} = 23 \text{ MPa}$
- Querkontraktion des Matrixmaterials: $\nu_{Matrix} = 0,34$
- Elastizitätsmodul des Fasermaterials: $E_{Faser} = 75000 \text{ MPa}$
- Querschnittsfläche einer Faser: $A_{Faser} = 0,012 \text{ mm}^2$

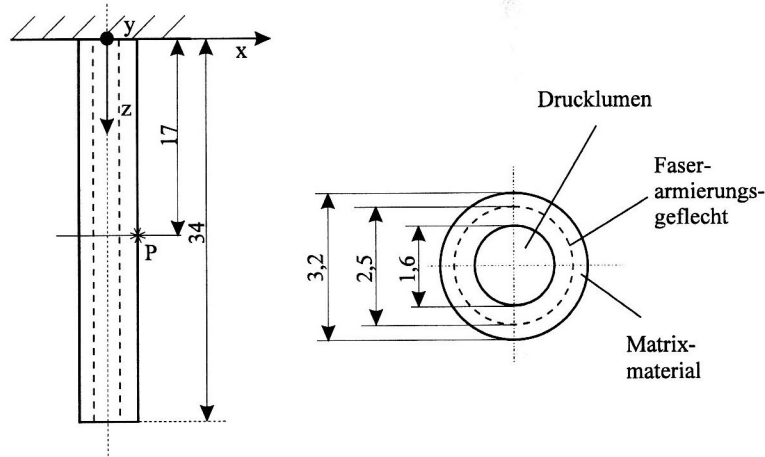


Bild 10: Modellskizze eines faserverstärkten Einlumenschlauches

Mit den in Bild 10 gegebenen geometrischen Daten ergibt sich ein Faservolumengehalt von etwa 3% bei acht und etwa 1,5% bei vier unidirektionalen Armierungsfäden, was weit unter den für die Anwendung der Laminattheorie zulässigen Werten liegt. Das Deformationsverhalten (Verkürzung / Verlängerung) wird maßgeblich durch den Anstiegswinkel des Fasergeflechtes bestimmt. Im Fall **A** ist der Anfangs-

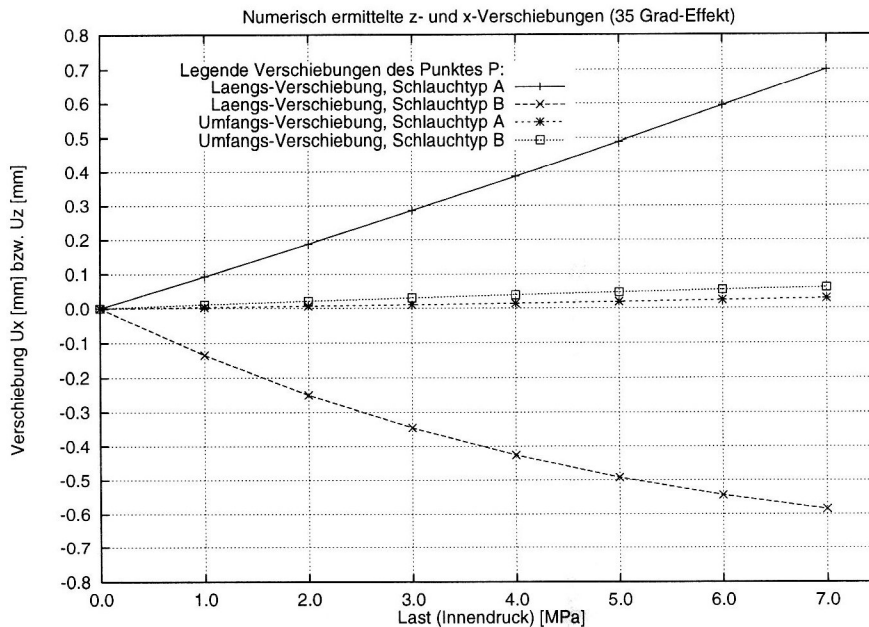


Bild 11: Numerisch ermittelte z- und x-Verschiebungen (35-Grad-Effekt)

anstiegswinkel 30° (der Schlauch hat das Bestreben, länger und dünner zu werden), und im Fall **B** ist der Anfangsanstiegswinkel 40° (der Schlauch hat umgekehrtes Bestreben). Nach der Generierung des entsprechenden FE-Modells mit ca. 560 Hexaeder- und je nach Faseranzahl bis zu 1400 Stabelementen, wird die nichtlineare Analyse ausgeführt. Bild 11 stellt die Verschiebungen des Punktes P in Längsrichtung (als Maß der Verlängerung des Schlauches) und in radialer Richtung (als Maß für die radiale Aufweitung des Schlauches) dar. Es ist eine deutliche Verlängerung des Schlauches **A** (30° Flechtwinkel)

bzw. Verkürzung des Schlauches **B** (40° Flechtwinkel) zu erkennen. Der Durchmesser des Schlauches **B** nimmt erwartungsgemäß zu. Für den Schlauch **A** tritt der in Abschnitt 1 beschriebene Effekt ein, daß sich Durchmesserabnahme durch Strukturverlängerung und Durchmesserzunahme infolge Gesamtausdehnung der Struktur durch Innendruck überlagern, weshalb die Durchmesseränderung wesentlich kleiner ist.

Vergleich von FE-Analyse und experimentellen Meßdaten

Ein wichtiges Kriterium der Ergebnisqualität der Finite-Element-Rechnungen ist der Vergleich mit experimentellen Meßdaten. Im Verbundprojekt MINOP wurde u.a. zu diesem Zweck der oben beschriebene Meßstand zur berührungslosen Bewegungsmessung von Endoskopschläuchen entwickelt. Das in diesem

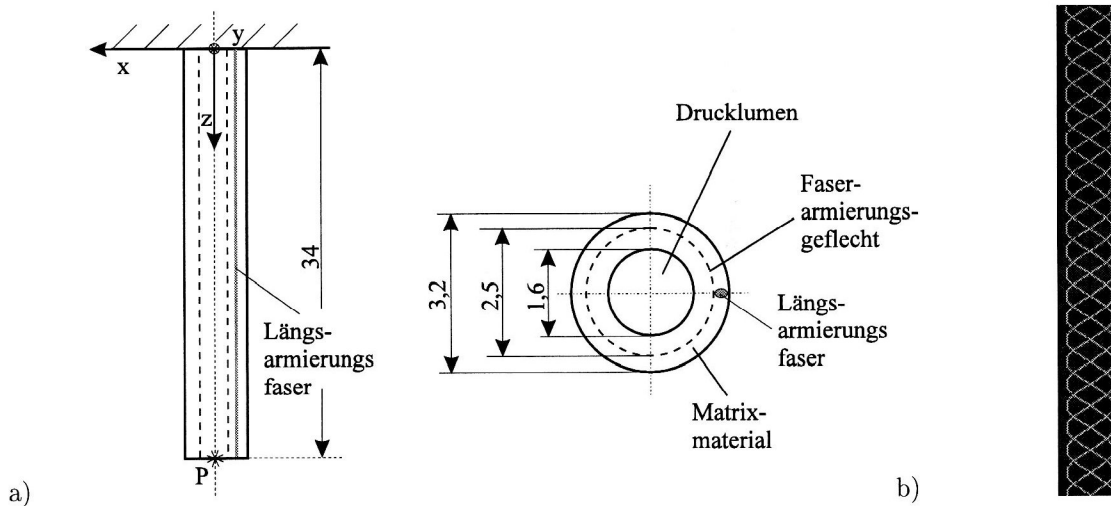


Bild 12: a) Modellskizze (links ohne Faserarmierungsgeflecht), b) FE-Modell des faserarmierten Einlumenschlauches

Abschnitt behandelte Beispiel steht stellvertretend für eine Vielzahl von vergleichenden Untersuchungen (FEM \leftrightarrow Experiment), welche von den Autoren vorgenommen wurde. In Bild 12 a) ist eine Modellskizze mit den geometrischen Daten und in Bild 12 b) das FE-Modell eines mit je vier unidirektional gewickel-

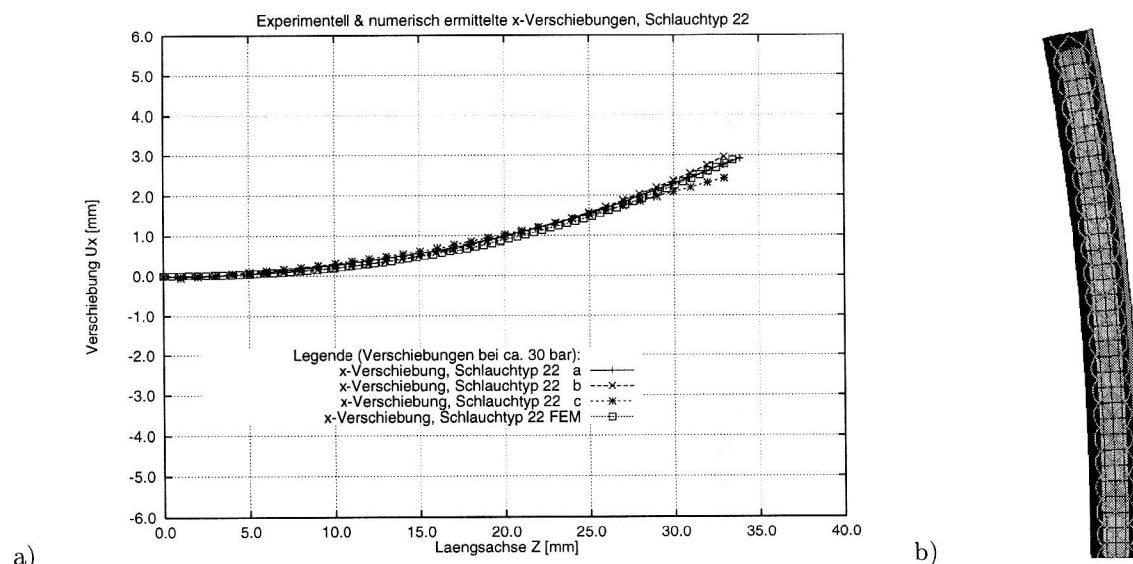


Bild 13: a) Experimentell und numerisch ermittelte Deflektion der Schlauchmittellinie in x-Richtung, b) FE-Modell (Symmetrieschnitt durch deform. Struktur)

ten Fasern verstärkten Endoskopschlauches dargestellt. Der Wickel- bzw. Flechtwinkel (Anstiegswinkel) des Fasergeflechtes beträgt 40° . Aufgrund der oben beschriebenen Kraftwirkungen hat der Schlauch unter steigendem Innendruck das prinzipielle Bestreben, sich in axialer Richtung zu verkürzen. Um eine

Deflektion in x-Richtung zu realisieren, wurde der Schlauch mit einer axialen Verstärkungsfaser versehen (rechtsseitig in Bild 12 a) und b)). Die Elastizitätsmoduln des Matrixmaterials (PUR unbekannter Mischung) sowie der Armierungsfasern (multifiles Polyamid, 32-Einzelfasern) wurden experimentell ermittelt und die Querkontraktionszahl der Literatur entnommen. Die Querschnittsfläche der Polyamidfäden wurde meßtechnisch bestimmt. Numerische Untersuchungen zeigten, daß die Wahl der Querkontraktionszahl in dem ermittelten Bereich von $\nu_{Matrix} = 0,3 \dots 0,4$ keinen meßbaren Einfluß auf das Ergebnis hat.

- Elastizitätsmodul des Matrixmaterials: $E_{Matrix} = 30 \text{ MPa}$
- Querkontraktion des Matrixmaterials: $\nu_{Matrix} = 0,34$
- Elastizitätsmodul des Fasermaterials: $E_{Faser} = 8500 \text{ MPa}$
- Querschnittsfläche einer Faser: $A_{Faser} = 0,012 \text{ mm}^2$
- Faservolumengehalt ca. 1,5 %

Die mit dem Programmsystem *MINOP-FEM* ermittelten Ergebnisse wurden mit drei identischen Experimenten (drei Schlauchabschnitte desselben Schlauchtyps) verglichen und in Bild 13 grafisch dargestellt. Darin bezeichnen a, b und c die experimentell ermittelten Kurven. Zwei Experimente (a und b) weisen eine nahezu exakte Übereinstimmung mit der numerischen Lösung auf. Die Übereinstimmung des dritten Experimentes (c) mit der numerischen Lösung kann ebenfalls als befriedigend angesehen werden. Die Ursachen für eine Abweichung von der numerischen Lösung bzw. anderen Experimenten sind sehr vielfältig und können in diesem Beitrag nicht diskutiert werden.

Mehrlumenschläuche

Das abschließende Beispiel untersucht das Deflektionsvermögen von Mehrlumenschläuchen bei konstantem Druck und steigendem Elastizitätsmodul der Axialfasern. Eine Modellskizze mit den geometrischen Daten eines Zwei- sowie eines Vierlumenschlauches ist in Bild 14 gegeben.

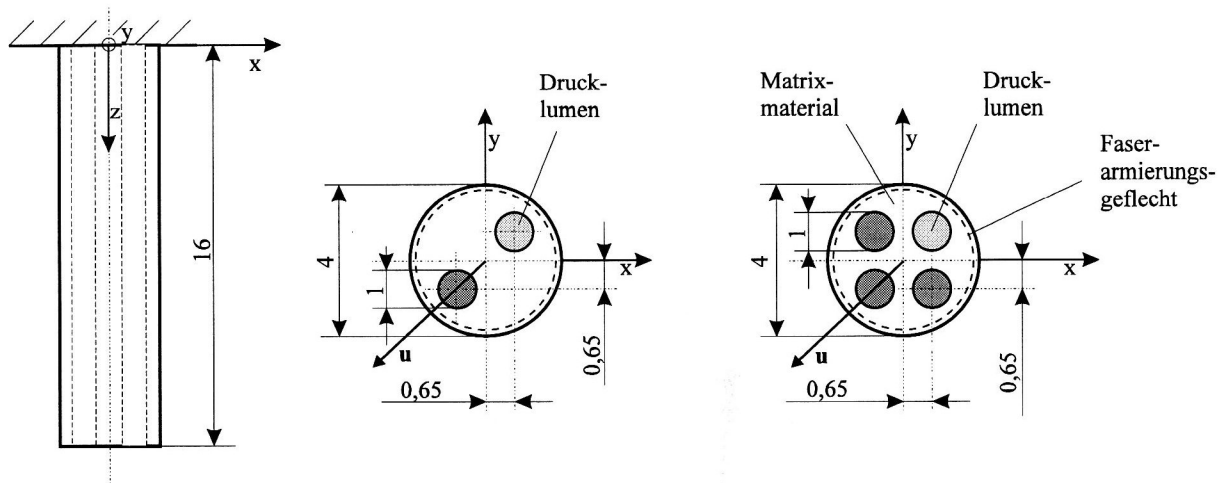


Bild 14: Modellskizze vom Zwei- und Vierlumenschlauch

Die Materialwerte wurden wie folgt gewählt:

- Elastizitätsmodul des Matrixmaterials: $E_{Matrix} = 30 \text{ MPa}$
- Querkontraktion des Matrixmaterials: $\nu_{Matrix} = 0,34$
- Elastizitätsmodul des Fasermaterials: $E_{Faser} = 8500 \text{ MPa}$
- Querschnittsfläche einer Faser: $A_{Faser} = 0,012 \text{ mm}^2$
- Faservolumengehalt ca. 3 % bei einer Außenschlauchdicke von 0,4 mm.

In einer Variantenuntersuchung zum Einfluß des E-Modul der Axialfasern wurde ein Wertebereich von 30 MPa bis 4000 Mpa durchlaufen. Dies betrifft das dem Drucklumen gegenüberliegende Lumen beim 2-Lumenschlauch bzw. die drei weiteren Lumen beim 4-Lumenschlauch. Die Struktur ist im Drucklumen mit einem Innendruck von 3 MPa belastet. Als Maß für die Deflektion wird die Verschiebung des distalen Schlauchendes in u-Richtung ausgewertet. In Bild 15 sind die Ergebnisse dieser Parameterstudie grafisch dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die Faserverstärkung beim Zweilumenschlauch zunächst die Deflektion begünstigt. Offensichtlich kommt die axial wirkende Verstärkung eher zum Tragen. Mit zunehmendem

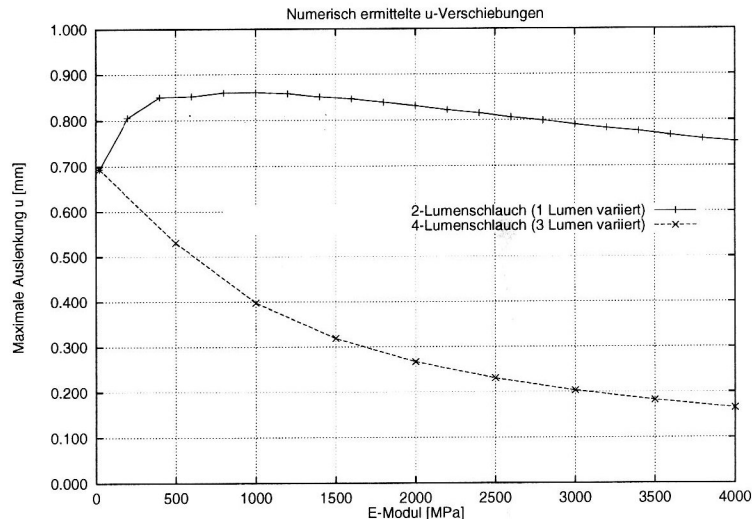


Bild 15: Numerisch ermittelte Verschiebungen in u-Richtung

Elastizitätsmodul nimmt allerdings auch die Biegesteifigkeit der Faser zu, was im weiteren Verlauf die Deflektion behindert. Bei der Auswertung des Vierlumenschlauches stellt man fest, daß das Deflektionsvermögen schon bei geringfügiger Steigerung der Elastizitätsmoduln drastisch verringert wird. Diese Erscheinung ist bei der Auslegung von Endoskopen zu berücksichtigen, sofern monofile Axialfasern für Laser, Licht, Optik u.ä. verwendet werden.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde das Bewegungsverhalten faserarmerter, ein- und mehrlumiger Schlauchstrukturen unter Nutzung theoretischer und experimenteller Methoden untersucht. Da sich Annahmen der Netztheorie als unzureichend erwiesen, wurde von den Autoren eine Finite-Element-Konzeption entwickelt und in dem Programmsystem *MINOP-FEM* realisiert. Darin wurde die Update-Lagrange-Formulierung zur Berechnung großer Verformungen mit der Penalty-Methode zur diskreten Einkopplung von Faserelementen in Volumenelemente verknüpft. Anhand verschiedener Beispiele (*35°-Effekt*, *Vergleich mit Experimenten*) wurde die Funktionsfähigkeit der entwickelten Software demonstriert. Weiterhin wurde ein Versuchsaufbau zur berührungslosen Vermessung der Endoskopschläuche sowie ein von den Autoren entworfenes Meßprogramm dargestellt. In Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen wurde nachgewiesen, daß die in Abschnitt 1 (Bild 1) dargestellte Konstruktion als *fluidisches Aktorprinzip* verwendet werden kann. Mit dem Programmsystem *MINOP-FEM* ist es ferner möglich, Endoskopschläuche durch Variation von Gestaltungsparametern (Material, Geometrie, Struktur) auszulegen. Gegenwärtige Arbeiten, so auch die Beispiele zum Zwei- und Vierlumenschlauch, zeigen, daß mit zunehmender Lumenzahl das Deflektionsvermögen abnimmt. Dies ist zum einen durch das kleiner werdende Drucklumen begründet, zum anderen durch die mit den Axialfasern (Licht, Optik, Laser etc.) eingebrachte Biegesteifigkeit. Einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit innendruckgesteuerter Instrumente stellen gegenwärtige Untersuchungen zu Versagenserscheinungen dar, die ebenfalls mit dem Programmsystem *MINOP-FEM* durchgeführt werden. Dazu zählen das Reißen von Armierungsfasern, das Ausbeulen in Rauten, das Verschlußversagen, Materialimperfectionen sowie herstellungsbedingte Anomalien. Weiterführend sind Untersuchungen zur Auswirkung verschiedener Herstellungsungenauigkeiten erforderlich. Dies betrifft insbesondere geometrische Daten wie Flechtwinkel, Radien und Lage der Lumen sowie Wanddicken zwischen den Lumen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) geförderten Verbundprojektes *Mikrosystemtechnik zum Einsatz in der minimal-invasiven neurochirurgischen Operationstechnik (MINOP)*. Die Verbundpartner sind *Aesculap AG Tuttlingen*, *Aesculap Meditec GmbH Jena*, *Johannes-Gutenberg-Universität Mainz*, *Forschungszentrum Karlsruhe GmbH*, *Universität Pécs (Ungarn)*, *TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH Ilmenau*, *Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg*. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] *ANSYS User's Manual, Volume III: Elements*. Swanson Analysis Systems, Inc. USA 1994.
- [2] K.-J. Bathe: *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice Hall, London, 1982.
- [3] B.L. Bauer und D. Hellweg: *Minimal invasive endoskopische Neurochirurgie (MIEN)*. Deutsches Ärzteblatt 92(42), S. 1848–1863, 1995.
- [4] P.G. Bergan, K.-J. Bathe und W. Wunderlich, Hrsg. *Finite Element Methods for Nonlinear Problems*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1986.
- [5] H. W. Bergmann: *Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile*. Springer, Berlin, 1992.
- [6] W.-A. Buesgen: *Neue Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Textilien für den Einsatz in Faserbundwerkstoffen*. Dissertation, RWTH Aachen 1993.
- [7] U. Gabbert: *Berücksichtigung von Zwangsbedingungen in der FEM mittels der Penalty-Funktion-Methode*. Technische Mechanik 4(2), S. 44–51, 1983.
- [8] U. Gabbert: *Zwangskoppelung von Schalen- und 3D-Finite-Elemente-Modellen mittels Penalty-Methode*. Technische Mechanik 7(3), S. 40–46, 1986.
- [9] U. Gabbert und U. Lauschke: *Nichtlineare Finite-Element-Analyse des mechanischen Verhaltens faserarmerter Endoskopschläuche*. Preprint Nr. 7, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg Fakultät für Maschinenbau, Magdeburg, 1996.
- [10] R. Gall: *Zur Berechnung von faserverstärkten Reifen mit der Methode der Finiten Elemente*. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg 1985.
- [11] A. Guber, W. Menz, A. Perneckzy, F. Hüwel, G. Fries, T. Doczi, F. Gallyas, P. Wieneke, M. Reindl, K. Vogler, U. Gabbert, U. Lauschke, F. Schmidt und U. Neuhäuser: *MINOP - Entwicklung eines miniaturisierten neuro-endoskopischen Operationssystems*. FZK-Nachrichten 27, S. 155–164, 1995.
- [12] A. Härtwig: *Modellierung der mechanischen Eigenschaften des Gürtelpaketes von Reifen*. Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Mechanik August 1995.
- [13] R. Leßmann: *3D-Digitalisierung von Freiformflächen*. Diplomarbeit, TU Ilmenau 1994.
- [14] V.P. McConnell: *Demo bridge benchmarks composites*. High Performance Composites S. 37–41, 1996.
- [15] U. Neuhäuser: *Messen im Bild – eine Herausforderung*. Dissertation, TU Ilmenau 1996.
- [16] S. Reese: *Theorie und Numerik des Stabilitätsverhaltens hyperelastischer Festkörper*. Dissertation, TH Darmstadt, 1994.
- [17] G. Reitor: *Fördertechnik*. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1979.
- [18] K. Rohwer: *Modelle und Methoden zur Berechnung von Laminaten aus unidirektionalen Faserverbunden*. Habilitationsschrift, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 1995.
- [19] W. Wester-Ebbinghaus: *Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen*. Zeitschrift für Vermessungswesen 110(3), 1985.
- [20] W. Wester-Ebbinghaus: *Photogrammetrie – Räumliche Punktbestimmung durch Triangulation mit Richtungsbündeln*. Bericht Nr. 659, VDI, 1987.
- [21] R. Zimmermann: *Berechnung dünnwandiger, rotationssymmetrischer, fadengewickelter Innendruckbehälter nach der Membrantheorie*. Forschungsbericht 69-83, Deutsche Luft- und Raumfahrt, 1969.

Anschrift: Prof. Dr.-Ing. U. Gabbert, Dipl.-Ing. U. Lauschke, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Mechanik, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg