

Funktionsintegrierte Faserverbundwerkstoffe - ein Beitrag zu strukturintegrierter Sensorik

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

Vorgelegt von
Markus Gabler
aus Gunzenhausen (Franken)

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers
Mitberichter:	Prof. Dr. Thomas Keller
2. Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Wallmersperger

Tag der mündlichen Prüfung: 30. November 2012

Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der Universität Stuttgart

2012

Für Magdalena, Stilla und Ludwig Gabler

Inhalt

Funktionsintegrierte Faserverbundwerkstoffe - ein Beitrag zu strukturintegrierter Sensorik.....	i
Inhalt	v
Zusammenfassung	vii
Abstract	ix
Vorwort	xi
Abkürzungs- und Definitionsverzeichnis	xii
A. Einführung.....	1
A 1 Motivation	2
A 2 Begleitendes Entwicklungsprojekt	6
B. Funktionsintegrierte Faserverbundwerkstoffe	9
B 1 Überblick	10
B 2 Mechanische Eigenschaften	13
B 3 Bauphysikalische Funktionen	17
B 4 Sensorik	21
B 5 Aktorik	24
C. Faseroptische Sensoren.....	39
C 1 Optische Fasern (Lichtwellenleiter)	40
C 2 Faser-Bragg-Gitter	45
C 3 Weitere faseroptische Sensoren	56
C 4 Extern applizierte Faser-Bragg-Gitter	59
D. Sensor-Bauteil-Interaktion.....	61
D 1 Untersuchungsgegenstand	62
D 2 Mikromechanische Analyse	74
D 3 Bauteilversuche	118
D 4 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Analyse und Versuchen	149
E. Sensornetzwerk und Herstellung.....	151
E 1 Entwurf des Sensornetzwerks	152
E 2 Herstellung und Kontaktierung	156
E 3 Signalverarbeitung	168
E 4 Bionischer Ansatz	177
F. Zusammenfassung und Ausblick.....	183
Literatur	187
Softwareverzeichnis	196
Normen- und Richtlinienverzeichnis	197
Anhang	199
Lebenslauf	219

Zusammenfassung

Faserverbundwerkstoffe eignen sich aufgrund ihres geschichteten Aufbaus besonders gut für die Integration zusätzlicher Funktionalitäten. Dabei können einerseits die Werkstoffeigenschaften gezielt optimiert werden, andererseits ist es möglich, mehrere Komponenten in einem Element zu vereinigen. Der umgebende Faserverbundwerkstoff schützt die strukturintegrierte Funktionalität, was zu robusten Systemen führt. Für architektonische Anwendungen sind die Integration von wärmespeichernden Materialien, der Einbau von Sensoren sowie die aktive mechanische Steuerbarkeit von Bauteilen von maßgeblicher Relevanz.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Einbettung faseroptischer Sensoren in Verbundwerkstoffe eingehender untersucht. Dabei werden optische Fasern mit integrierten Reflexionsgittern (Bragg-Gitter) verwendet - die bei der Lichtleitung reflektierte Wellenlänge lässt einen Rückschluss auf Dehnung und Temperatur in der Sensorfaser zu. Durch die Strukturintegration werden die Dehnung der optischen Faser und damit der resultierende Messwert von der Beschichtung der Sensorfaser sowie dem lokalen Laminatgefüge und von Fehlstellen beeinflusst. Eine mikromechanische Analyse zeigt, dass der dreidimensionale Dehnungszustand in der Sensorfaser nicht dem Dehnungszustand im umgebenden Faserverbundwerkstoff entspricht. Temperaturdifferenzen und Dehnungen längs der Orientierung der Sensorfaser werden zwar affin in diese übertragen und können daher zuverlässig gemessen werden. Dehnungen senkrecht zur optischen Faser werden von dieser jedoch weniger stark wahrgenommen und deren Einfluss auf das Messergebnis variiert außerdem erheblich, in Abhängigkeit des Laminataufbaus und der Faserbeschichtung. Praktischer Versuche bestätigen umfänglich die rechnerischen Vorhersagen und zeigen grundsätzlich eine gute Leistungsfähigkeit strukturintegrierter faseroptischer Sensoren.

Die Untersuchungen bilden die Grundlage für die Entwicklung großformatiger Faserverbundbauteile mit automatisiert integrierten Sensorfasern. Die planmäßige Ermittlung von Querdehnungen ist bei strukturintegrierten Fasersensoren nicht zuverlässig möglich, weshalb deren Entkopplung erstrebenswert ist. Es hat sich als zielführend erwiesen, eine möglichst weiche Schutzschicht für die Sensorfaser einzusetzen, um die Effekte aus Querdehnung zu minimieren.

Da die Messergebnisse von der Orientierung der optischen Faser und den mechanischen Kennwerten des Laminats abhängen, ist eine präzise Vorhersage der Korrelation zwischen Einwirkung und Messsignal schwierig. Daher wird ein künstliches neuronales Netz zur Auswertung der Daten entwickelt, welches die beschriebenen Streuungen ausgleichen kann. Eine exemplarische Untersuchung beweist die Leistungsfähigkeit neuronaler Netze für die Auswertung strukturintegrierter Sensornetzwerke. Damit wird es auch möglich, neben der quantitativen Dehnungsermittlung auch qualitative Einwirkungsszenarien zu beschreiben und zu detektieren.

Abstract

Due to the layering nature of the structure, fibre composites are particularly well suited for the integration of additional functionalities. On the one hand, material properties can be optimised specifically; on the other hand, it is possible to combine multiple components into one single element. The surrounding fibre composite structure protects the integrated functionality, resulting in robust systems. For architectural applications, the integration of heat storage materials, embedding of sensors and the active mechanical actuation of components are of significant relevance.

In the present work, the embedding of fibre optic sensors in composites is further investigated. In this case, optical fibres with integrated reflection gratings (Bragg gratings) are utilized - reflected wavelength in the light-guiding allows for a capturing of strain and temperature in the sensor fibre. Due to the structural integration, the strain of the optical fibre and the resulting measurements are influenced by the coating of the sensor fibre as well as by the local laminate structure and defects. Micro-mechanical analysis shows that the three-dimensional strain state in the sensor fibre does not comply with the strain state in the surrounding fibre composite material. On the one hand, temperature shifts and strain along the orientation of the sensor fibre are transmitted affine into it and can be reliably measured. On the other hand, strain perpendicular to the optical fibre is less noticeable and, moreover, its influence on the measurement varies considerably, depending on the laminate structure and the fibre coating. Laboratory experiments confirm the theoretical predictions entirely and show generally good performance of structurally integrated fibre optic sensors.

The results of this research serve as basis for the development of large-scale composite structures with automatically integrated sensor fibres. The systematic investigation of transverse strain cannot be performed reliably with structurally integrated fibre sensors, therefore decoupling is desirable. It has proven to be appropriate to employ a soft enough coating for the sensor fibre to minimize the effects of transverse strain.

Since the measured results depend on the orientation of the optical fibre and the mechanical parameters of the laminate, a precise prediction of the correlation between the action and the measurement is a challenging task. Therefore, an artificial neural network for data analysis is being developed, which can compensate for the variations as described. An exemplary study has proven the efficiency of neural networks for the analysis of structurally integrated sensor networks. It is thus possible not only to determine the strain quantitatively but also to describe and recognize the scenarios of action.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit konnte ich im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) an der Fakultät Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart anfertigen. Die Zielsetzung der Dissertation ergab sich im Zusammenhang mit der Planung, Prüfung und dem Bau der Straßenbrücke Friedberg (Hessen), welche eine Fahrbahnplatte aus glasfaserverstärktem Kunststoff hat. Trotz des erfolgreichen Projekts fiel es uns schwer, weitere Brücken folgen zu lassen, was nicht zuletzt an der Skepsis unserer Fachkollegen hinsichtlich der Ausfallsicherheit und Zuverlässigkeit von Verbundwerkstoffen lag. Zusammen mit Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers entstand daher die Idee, die Potentiale funktionsintegrierter Faserverbundwerkstoffe näher zu beleuchten und die Implementierung zu entwickeln. Dabei war es mir besonders wichtig, stets die Leistungsfähigkeit solcher Systeme im Auge zu behalten und die Anwendung in der Architektur in den Vordergrund zu stellen.

Mein besonderer Dank gilt dem Hauptberichter der vorliegenden Arbeit für die Möglichkeit, die Dissertationsschrift zu erstellen, sowie dem von ihm entgegen gebrachtem Vertrauen bezüglich der thematischen Ausgestaltung. Ich danke Prof. Dr. Thomas Keller von der EPFL (Lausanne) und Prof. Dr.-Ing. Thomas Wallmersperger von der TU Dresden für die Bereitschaft der Berichterstellung.

Die praktischen Versuche konnte ich dank der Förderung durch das Programm „Zentrale Initiative Mittelstand (ZIM)“ durchführen. Dabei gelang es, fünf Projektpartner aus der Industrie und Forschung zu gewinnen, mit denen ich die Integration von Sensoren in pultrudierten Bauteile untersuchen und umsetzen konnte. Mein besonderer Dank gilt dabei Viktoriya Tkachenko von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin für den fruchtbaren wissenschaftlichen Austausch und der Anfertigung mikroskopischer Aufnahmen, welche mir zur Analyse überlassen wurden. Daneben gilt mein Dank allen Partnern des gemeinsamen Entwicklungsprojekts für die produktive Zusammenarbeit.

Am ITKE wäre die Durchführung der Arbeiten ohne die tatkräftige Unterstützung meiner Kollegen nicht möglich gewesen. Michael Tondera hat mich mit der Planung und Durchführung der Versuchsaufbauten stets mit pragmatischen und kreativen Ansätzen unterstützt. Ich danke meinen studentischen Mitarbeitern, die mich in den letzten Jahren unterstützt haben, vor allem Marco Baur, auf dessen Unterstützung ich mich jederzeit verlassen konnte.

Stuttgart, im November 2012

Markus Gabler

Abkürzungs- und Definitionsverzeichnis

CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CNT:	Kohlenstoffnanoröhrchen (engl.: Carbon Nano Tubes)
Coating:	hier: Beschichtung einer Sensorfaser, meist aus thermoplastischen Kunststoff
Doppelbrechung:	Auftreten von zwei Wellenlängenmaxima im Reflexionsspektrum infolge eines anisotropen Querdehnungsverhältnisses $\epsilon_2 \neq \epsilon_3$ (engl.: birefringence)
EP	Epoxidharz, ein duroplastischer Kunststoff für die Herstellung faserverstärkter Kunststoffe
FBG	Faser-Bragg-Gitter: Reflexionsgitter in einer optischen Faser zur Verwendung als Dehnungs- und Temperatursensor
FOS	faseroptischer Sensor, Überbegriff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HTAC	Hochtemperaturacrylat, ein temperaturbeständiges thermoplastisches Coating
LWL	Lichtwellenleiter, Synonym für optische Faser
Roving	Bündel von mehreren tausend parallelen, endlosen Fasern, als Verstärkung in einem Faserverbundwerkstoff
SHM	Structural Health Monitoring (Bauwerksüberwachung)
SMA	Shape Memory Alloy (Formgedächtnis-Legierung)
SMP	Shape Memory Polymer (Formgedächtnis-Polymer)
UP	ungesättigtes Polyesterharz, ein duroplastischer Kunststoff für die Herstellung faserverstärkter Kunststoffe
VE	Vinylesterharz, ein duroplastischer Kunststoff für die Herstellung faserverstärkter Kunststoffe

A.

Einführung

A 1 Motivation

Faserverbundwerkstoffe bieten in der Architektur einige Vorteile gegenüber tradierten Werkstoffen wie Stahl oder Stahlbeton. Neben der besseren Korrosionsbeständigkeit sind dies vor allem die freie Formbarkeit und - aufgrund ihres geringen Eigengewichts - die Möglichkeit, auch große Bauteile vorzufertigen und am Stück zur Baustelle zu transportieren. Andererseits sind sie vergleichsweise teuer und haben ein sprödes Bruchverhalten¹. Durch eine Funktionsintegration kann jedoch die Leistungsfähigkeit von Faserverbundbauteilen gesteigert und deren Ausfallsicherheit verbessert werden.

Bei der Planung und Ausführung von Bauwerken aus faserverstärktem Kunststoff wurde dem Autor bewusst, dass die hohen Materialsicherheitsfaktoren bei der Dimensionierung einem effizienten Entwurf entgegenstehen. Durch eine kontinuierliche Bauteilüberwachung können aber Schädigungen frühzeitig detektiert werden, weshalb es möglich ist, die Sicherheitsaufschläge und damit den Materialbedarf zu reduzieren. Die nachträgliche Applikation von Sensoren am Bauwerk und deren Ankopplung ist jedoch mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden, weshalb der Einbau von Sensoren bereits bei der Fertigung erstrebenswert ist. Strukturintegrierte Sensoren haben außerdem den Vorteil, dass sie von Witterungseinflüssen und mechanischen Beschädigungen geschützt sind.

A 1.1 GFK-Straßenbrücke Friedberg (Hessen)

Die Straßenbrücke Friedberg (Hessen) ist eine Verbundkonstruktion aus Stahlträgern und einer aufgeklebten Fahrbahnplatte aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) [Kni10]. Der Überbau mit einer Länge von 20 m wurde vollständig in einer Industriehalle vormontiert, zur Baustelle gefahren und dort innerhalb von 2 Stunden auf die Stahlbetonwiderlager platziert (Abbildung A-1).



Abbildung A-1: Einbau der vorgefertigten GFK-Straßenbrücke Friedberg (Hessen)

¹ Das Bruchverhalten statisch unbestimmter Bauteile oder von Laminaten, welche auf Biegung beansprucht werden, kann auch duktil dimensioniert werden. Dabei wird jedoch die Zerstörung einer oder mehrerer Einzelschichten in Kauf genommen oder es muss eine duktile Verbindung eingeführt werden.

Für die Bauteilbemessung war die die Drucktragfähigkeit der GFK-Platten senkrecht zur Pultrusionsrichtung maßgebend. In Laborversuchen wurde ermittelt, dass das Versagen durch ein lokales Ausknicken der Verbindungslaschen der Plattensegmente hervorgerufen wird, es handelt sich also um einen plötzlichen bzw. spröden Versagensmechanismus. Aus diesem Grund mussten die Stahlträger deutlich überdimensioniert werden, um die Druckbeanspruchung in der GFK-Platte zu reduzieren und dadurch eine ausreichende Ausfallsicherheit zu gewährleisten. Eine umfassende Bauteilüberwachung hätte hier zu beträchtlichen Einsparungen führen können, da diese eine Herabsetzung der Materialsicherheit erlaubt.

Zur weiteren wissenschaftlichen Untersuchung wurden an den Oberflächen der Bauteile und in der Klebefuge zwischen Stahlträger und GFK-Platte 113 elektronische Dehnungsmessstreifen und 12 faseroptische Sensoren installiert. Die Arbeiten während der Vormontage in der Halle sind verglichen mit Arbeiten an einer fertigen Brücke vergleichsweise zuverlässig ausführbar. Dennoch ist der Installationsaufwand immens, außerdem wurde eine nicht unerhebliche Menge der extern applizierten Sensoren während folgender Arbeitsschritte beschädigt und war für die Auswertung unbrauchbar.

Die Kontaktierung der faseroptischen Sensoren ist mit einer wesentlich geringeren Menge an Zuleitungen verbunden als die der elektronischen Dehnungsmessstreifen (DMS). Letztere benötigen je Sensor drei Zuleitungsdrähte, die bis zum Messgerät geführt werden müssen. Außerdem sind die korrosionsempfindlichen Kupferdrähte gegen Witterungseinflüsse zu isolieren. Bei den faseroptischen Sensoren konnten jedoch jeweils 6 Messpunkte parallel an nur einer Glasfaser geschaltet werden, welche außerdem nur eine vergleichsweise dünne Schutzsicht benötigt. Die praktische Handhabung der optischen Sensoren war damit wesentlich besser als die der elektronischen Dehnungsmessstreifen (Abbildung A-2).

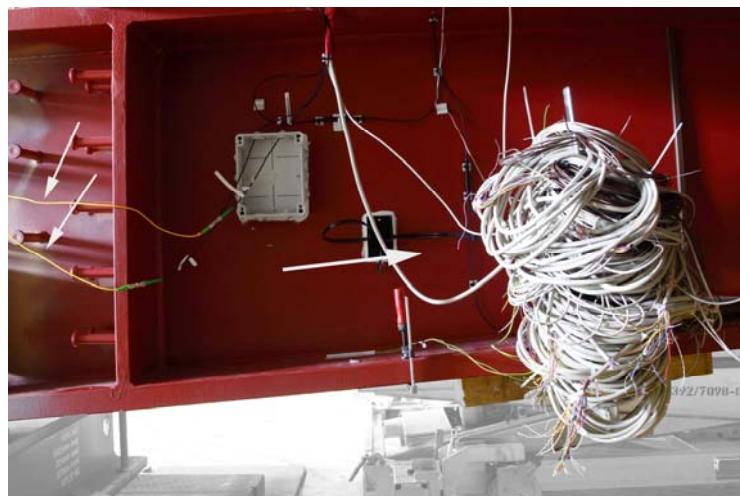


Abbildung A-2: Verkabelung für 12 faseroptische Sensoren (links) und 113 elektronische Dehnungsmessstreifen (rechts)

Die Sensoren werden für die Auswertung der Dehnungen während der Belastungsversuche herangezogen, dabei sind die Ergebnisse der elektronischen und optischen Sensoren durchweg identisch. Nach einer Betriebsdauer von ca. 3 Jahren sind jedoch bereits 20% der elektronischen DMS infolge Korrosion nicht mehr brauchbar, während alle optischen Sensoren noch voll funktionsfähig sind. Die Diskussion der Messergebnisse ist nicht Inhalt der vorliegenden Arbeit. Eine erste Auswertung zeigt die Temperaturabhängigkeit der gemessenen Dehnungen (Abbildung A-3). Dabei wird ausschließlich die Dehnungsdifferenz infolge der Belastung mit einem Prüffahrzeug von ca. 19 to Gesamtlast dargestellt, die Differenzen resultieren also von der Temperaturabhängigkeit des E-Moduls.

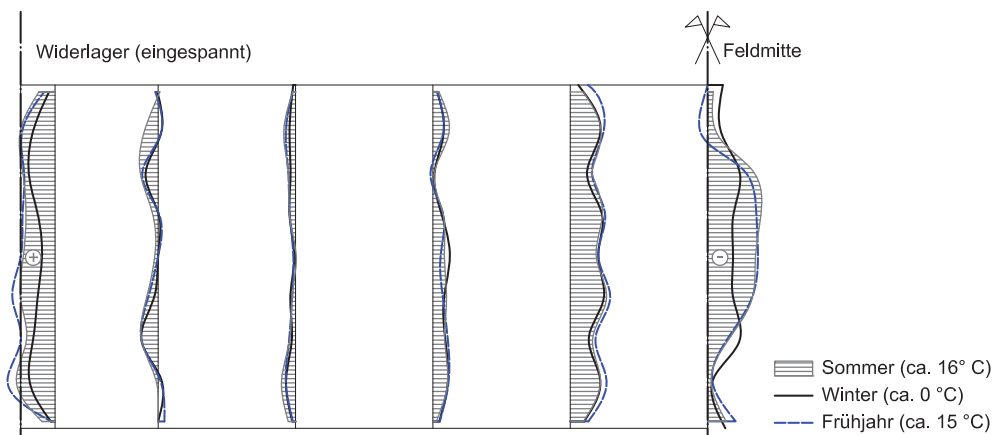


Abbildung A-3: Dehnung auf der Unterseite der GFK-Fahrbahnplatte in Brückenlängsrichtung (senkrecht zur Pultrusionsrichtung) infolge eines Belastungsfahrzeugs von 19 to, Vergleich unterschiedlicher Messzeitpunkte

Auch bei anderen Brücken aus faserverstärkten Kunststoffen wurden extern applizierte faseroptische Sensoren für das Monitoring herangezogen [Geb05]. Zusammenfassend zeigt sich also das Potential einer strukturintegrierten Sensorik und insbesondere der Verwendung faseroptischer Sensoren. Diese haben hinsichtlich Installation und Betrieb Vorteile gegenüber gebräuchlichen DMS, außerdem wird von der beabsichtigten strukturintegrierten Applikation ein verbesserter Schutz gegen Beschädigung der Sensoren erwartet.

A 1.2 Untersuchungsgegenstand

A 1.2.1 Faserverbundwerkstoff

Die durchgeführten Untersuchungen konzentrieren sich auf großformatige pultrudierte Profile mit komplexem Laminataufbau aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Im Gegensatz zur Luft- und Raumfahrt ist es aus wirtschaftlichen Gründen im Bauwesen üblich, auf diese vorgefertigten Profile zurückzugreifen. Pultrudierte Profile werden in einem linearen Prozess (Pultrusion) hergestellt, indem die Verstärkungskomponenten (Endlosfasern, Textilien oder Vliese) mit duroplastischem Kunststoff getränkt und in einer beheizten Form kontinuierlich ausgehärtet werden. Der Prozessablauf wird in D 1.3 auf S. 66ff. erläutert.

Während flächige Laminare doppelt gekrümmt sind und Wandstärken von wenigen Millimetern haben, sind Pultrusionsprofile überwiegend prismatisch mit Wandstärken von mehreren Millimetern bis Zentimetern. Die stabförmigen Querschnitte werden i.d.R. auf Biegung beansprucht, womit interlaminaer Schub auftritt. Außerdem werden die Profile häufig mit Schrauben verbunden und damit auf Scherung beansprucht. Daher ist neben den Endlosfasern auch eine flächige Textilverstärkung für die Übertragung der Schubkräfte notwendig. Diese Mischlaminare unterscheiden sich grundsätzlich von den flächigen Laminaten der Luft- und Raumfahrt, wo lediglich unidirektional verstärkte Schichten übereinander gelegt werden. Aus diesem Grund kann auf die vorliegenden Ergebnisse der Aeronautik nur eingeschränkt zurückgegriffen werden, die dort untersuchten Laminare können als vereinfachter Sonderfall der hier betrachteten komplexen Schichtaufbauten angesehen werden.

Die Untersuchungen gehen zunächst vom Grundfall einer ausschließlich unidirektionalen Einzelschicht aus, decken dann jedoch auch die Auswirkungen komplexer Lamine ab. Eine Übertragung hin zu einem einfacheren Laminataufbau ist daher problemlos möglich.

A 1.2.2 Sensoren

Als Sensoren werden optische Fasern mit eingebauten Bragg-Gitter verwendet (FBG: Faser-Bragg-Gitter). Das durch die Glasfaser geleitete Licht wird an vorher lokal mittels Laser eingezeichneten Rückstreugittern in der Faser reflektiert. Die Veränderung der reflektierten Wellenlänge lässt einen Rückschluss auf die Dehnungs- und Temperaturänderung am Messpunkt zu. Diese Art faseroptischer Sensoren ist technisch ausgereift, vergleichsweise robust und mit geringem Aufwand auswertbar. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit lassen sich jedoch auch auf andere Arten von Fasersensoren übertragen, insofern dort ein Zusammenhang zwischen dem Dehnungs- und Temperaturzustand in der optischen Faser und der resultierenden Wellenlängenverschiebung besteht.

A 2 Begleitendes Entwicklungsprojekt

Die Bauteilversuche in Kapitel D 3 sowie grundsätzliche praktische Fragestellungen konnten im Rahmen eines begleitenden Entwicklungsprojekts durchgeführt werden. Das zweijährige Vorhaben² „Multifunktionaler GFK“ mit drei beteiligten Unternehmen und drei Forschungseinrichtungen wurde durch die Förderung der „Zentralen Initiative Mittelstand (ZIM)“ ermöglicht. Die Zusammensetzung der Forschungsgruppe kann entsprechend den Entwicklungsstufen im Projekt dargestellt werden (Abbildung A-4).

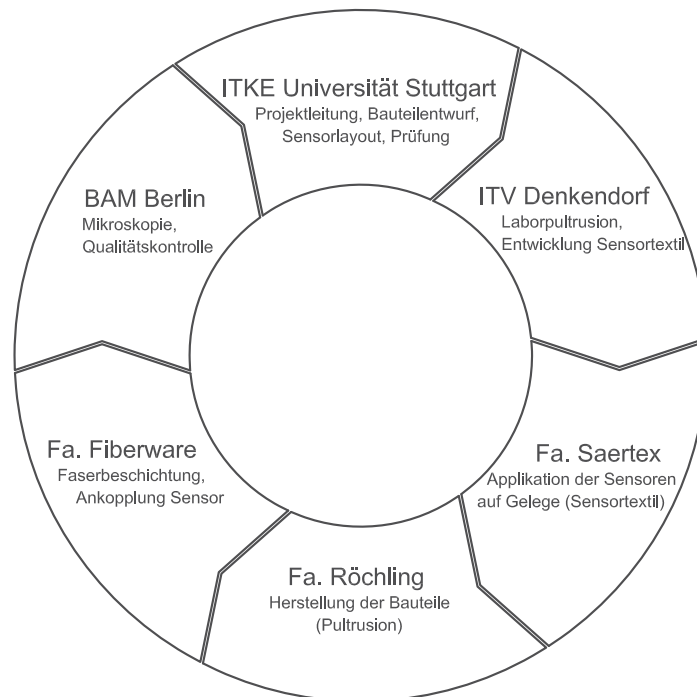


Abbildung A-4: Organigramm des Entwicklungsprojekts „Multifunktionaler GFK“

Dabei war es Aufgabe des Autors, am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE), das Projekt zu koordinieren, die zu untersuchenden Bauteile und das Sensorlayout zu entwerfen sowie am Ende der Entwicklungskette die mechanischen und thermischen Prüfungen durchzuführen. Die experimentelle, labortechnische Fertigung der Sensortextilien und Pultrudate fand am Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) in Denkendorf statt. Basierend auf den Ergebnissen zur Applikation der Sensoren auf Textilien (bzw. hier: Gelege) wurden diese von der Firma Saertex / Saerbeck in ein industrielles Umfeld übertragen. Gleichzeitig wurde die Einbettung von faseroptischen Sensoren bei der Pultrusion von der Firma Röchling / Haren industriell erprobt. Letztlich wurden bei der Pultrusion auch die Sensortextilien mit den vorab applizierten Sensoren in die Pultrusion eingebaut. Die Firma Fiberware / Mittweida übernahm die Kontaktierung der eingebauten optischen Fasern sowie, vorbereitend, den Entwurf und die Optimierung der Faserbeschichtung. An der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin fand eine eingehende Qualitätskontrolle mittels mikroskopischer Aufnahmen, zerstörungsfreier und fertigungsbegleitender Prüfungen statt sowie orientierende Temperaturversuche.

² Laufzeit vom 01.11.2009 bis 31.10.2011

Alle Untersuchungen und Ergebnisse dieses Projekts, welche nicht ausschließlich selbstständig durch den Autor erzielt wurden, werden im Folgenden als [Projekt] gekennzeichnet. Dabei handelt es sich im Einzelnen um:

- mikroskopische Aufnahmen, die auf Veranlassung des Autors an der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) durchgeführt wurden
- Herstellerangaben und Prüfergebnisse zu den Werkstoffkennwerte der Sensoren und Beschichtung, die im Projekt eingesetzt wurden, durch die Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)
- fotografische Aufnahmen der Platzierung der Sensoren über Roboter von dem Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV)
- Fotografische Aufnahmen der Kontaktierung strukturintegrierter Fasersensoren durch die Firma Fiberware

B.

Funktionsintegrierte Faserverbundwerkstoffe

B 1 Überblick

B 1.1 Multifunktionalität als Mehrwert für Faserverbundwerkstoffe

B 1.1.1 Abgrenzung

Die vorliegende Arbeit basiert auf einer werkstoffbezogenen Betrachtungsweise, weniger auf einer systembezogenen. Letztere sind in der Regel materialunabhängig und daher im Rahmen einer wesentlich breiteren Basis zu betrachten, welche den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen würde. Auf der anderen Seite ist eine reine Veränderung der Bruchfestigkeit, des Elastizitätsmoduls oder beispielsweise der Ermüdungsfestigkeit keine Funktionsintegration, da bestehende Eigenschaften nur verändert, jedoch nicht hinzugefügt werden.

Es stehen daher vor allem Funktionen im Fokus, welche in den Faserverbundwerkstoff selbst eingebracht und immanenter Bestandteil des Bauteils werden. Man kann so weit gehen, festzustellen, dass per Definition ein multifunktionales Material ein Verbundwerkstoff sein muss [Gib10]³. Die Größe dieser Komponenten kann dabei variieren zwischen Nanopartikeln und großformatigen Komponenten, die in vorgehaltenen Hohlkammern oder Taschen eingebracht werden.

Ein wesentlicher Vorteil integrierter Funktionalitäten im Gegensatz zu extern applizierten Komponenten ist vor allem, dass die integrierte Funktionalität durch den Werkstoff geschützt ist und andererseits eine strukturintegrierte Funktionalität wesentlich universeller einsetzbar ist, als eine für ein spezifisches System applizierte externe Erweiterung. Vollständig externe Bauteile wie Dämpfer oder motorisierte Stelleinheiten an Stabwerksgelenken sind damit keine funktionsintegrierten Komponenten, es handelt sich vielmehr um eine Addition verschiedener Bauteile.

Zusammenfassend werden folgende Voraussetzungen an einen funktionsintegrierten Werkstoff gestellt:

- Funktionalität ist universell einsetzbar auf unterschiedliche Systeme
- Implementierung der Funktionalität und damit Schutz durch den Werkstoff
- Leistung zusätzlicher Aufgaben neben der mechanischen Tragfähigkeit und den materialspezifischen bauphysikalischen Eigenschaften

B 1.1.2 Anforderungen der Architektur gegenüber der Luft- und Raumfahrt

Im Gegensatz zu einigen Anwendungen der Luft- und Raumfahrt wird in der Architektur die volle Leistungsfähigkeit aller sicherheitsrelevanten Funktionen auch bei Ausfall von Steuereinheiten vorausgesetzt⁴. Daher können Funktionserweiterungen nur bedingt die mechanische Tragfähigkeit umfassen, sondern viel mehr die Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks. Dies kann die Reduktion von Verformungen und Schwingungen oder die Beeinflussung bauphysikalischer Eigenschaften sein. Viele der im Folgenden beschriebenen Entwicklungen wurden aus Bedürfnissen der Luft- und Raumfahrt initiiert und haben daher auch entsprechende Optimierungsziele, welche nicht unbedingt für architektonische Anforderungen relevant sind.

³ Der in der angegebenen Literatur getroffene Aussage muss nicht vollumfänglich zugestimmt werden, da auch bei homogenen Werkstoffen eine Funktionsintegration möglich ist, z.B. durch geeignete Füllstoffe.

⁴ Bei Verkehrsflugzeugen wird eine entsprechende Redundanz vorausgesetzt, bei ausgewählten militärischen oder Forschungsobjekten würde jedoch der Ausfall sämtlicher elektronischer Steuerungen zur Manövrierunfähigkeit und damit zum Absturz führen.

B 1.1.3 Adaptivität

Eine Funktionsintegration muss nicht zwangsläufig adaptiv sein. So ist beispielsweise eine strukturintegrierte Sensorik in ihrer Funktionalität unveränderlich, kann jedoch die Grundlage für eine Adaptivität der Struktur darstellen. Adaptivität bedeutet, dass eine oder mehrere Eigenschaften eines Bauteils an die Einwirkungen oder geänderte Randbedingungen angepasst werden können bzw. sich selbst anpassen. Explizit nicht adaptiv sind Eigenschaftsveränderungen, welche sich zwangsläufig aus dem Werkstoffverhalten ergeben, z.B. Längenänderung von faserverstärkten Kunststoffen unter geänderter Feuchtigkeit.

Adaptivität hängt wesentlich von der Rückkopplung zwischen der Umweltbedingung und der entsprechenden Eigenschaftsveränderung zusammen, dabei kann unterschieden werden in:

- lokal autonome Adaptivität (z.B. Farbveränderung infolge UV-Strahlung)
- zentral gesteuerte Adaptivität (z.B. Formveränderung infolge globaler Belastung)

Lokal gesteuerte Anpassungsfähigkeit hat den Vorteil, dass eine aufwändige Steuerung und Informationsverarbeitung entfallen kann. Der Werkstoff reagiert auf lokale Reizänderung und passt sich entsprechend an. Dies muss jedoch nicht immer zielführend sein, da für das betrachtete Gesamtsystem möglicherweise ein abweichendes Verhalten vorteilhaft ist. Beispielsweise führt bei einer adaptiven Hülle eine starke Sonneneinstrahlung zur Verschattung, für das Gesamtgebäude kann dies jedoch vorteilhaft sein, um Heizenergie aufzunehmen. Eine globale Steuerung ist andererseits aufwändiger und fehlerempfindlicher, kann jedoch bessere Ergebnisse liefern. Insbesondere bei einer Reaktion auf Belastungszustände ist eine globale Steuerung unumgänglich, um überhaupt den aktuellen globalen Zustand erfassen und entsprechend reagieren zu können. Zu diesem Themenkomplex können auch biologische Vorbilder zur Problemlösung beitragen (Kapitel E 4.4.2, S. 181).

B 1.2 Optimierungen von Faserverbundwerkstoffen

B 1.2.1 Sprödes Materialverhalten

Grundsätzlich sind Faserverbundwerkstoffe spröde Werkstoffe mit streng linearem Verhalten bis zum Bruch. Bei mehrschichtigen Laminaten ist jedoch teilweise nach der Schädigung der ersten Schicht (first-ply-failure) eine weitere Laststeigerung möglich, wenn die dauerhafte Schädigung von Einzelschichten aus Aspekten der Gebrauchstauglichkeit akzeptiert werden kann. Dies tritt insbesondere unter Biegebeanspruchung auf, die äußere Lage mit der höchsten Dehnung kann dabei über die Dehngrenze beansprucht werden, durch eine Lastumlagerung auf die innen liegende Schichten ist jedoch eine weitere Rotation des Querschnitts möglich⁵. Daneben gibt es aber auch die Möglichkeit, Systeme durch die Verwendung weicher Klebefugen wesentlich duktiler zu gestalten [Cas10].

Ist jedoch ein sprödes Versagen nicht auszuschließen, kann durch strukturintegrierte Sensorik eine zusätzliche Ausfallsicherheit erzielt werden. Dadurch können Schädigungen frühzeitig detektiert und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden. Insbesondere für rein unidirektionale Bauteile wie Bewehrungsstäbe [Web06] oder Erdanker [Fra01] kommt damit eine strukturintegrierte Überwachung in Betracht.

⁵ Kritisch sind insbesondere ausschließlich unidirektional verstärkte Faserverbundwerkstoffe unter Zug sowie interlaminares Scherversagen, da dort keine Lastumlagerung stattfinden kann. Letzteres sollte jedoch grundsätzlich durch den Entwurf des Bauteils vermieden werden, indem ein Laminat nicht lokal auf Biegung beansprucht wird.

Außerdem ist es möglich, die Duktilität von Faserverbundwerkstoffen über integrierte Formgedächtnis-Materialien zu erhöhen, welche eine hohe Energiedissipation aufweisen und außerordentlich dehnbar sind (vgl. B 5.3.2).

B 1.2.2 Materialermüdung

Das Ermüdungsverhalten von Faserverbundwerkstoffen hängt von der dynamischen Dehnung der Matrix ab. Eine Einwirkung, die entlang der Faserverstärkung wirkt, führt daher zu geringer Materialermüdung, insbesondere bei Fasern mit hohem E-Modul und einem hohen Faservolumenanteil. Wird die Belastung jedoch hauptsächlich durch die Matrix abgetragen (z.B.: interlaminaer Schub, Dehnung senkrecht zur Faserorientierung) oder treten hohen Dehnungen auf (geringer Faservolumengehalt, niedriger E-Modul der Verstärkungsfasern), spielt Materialermüdung eine wichtige Rolle bei der Dimensionierung von Faserverbundwerkstoffen.

Materialermüdung ist mit dem Entstehen von Mikrorissen in der Matrix verbunden, welche kontinuierlich wachsen. Bei der Verwendung selbstheilender Systeme können diese Risse frühzeitig geschlossen und damit das Risswachstum unterbrochen werden (B 2.3).

B 1.2.3 Wärmespeicherung

Die spezifische Wärmekapazität faserverstärkter Kunststoffe liegt zwar im Bereich anderer Baumaterialien wie Beton, aufgrund der geringen Materialstärke haben Hüllsysteme aus faserverstärktem Kunststoff nur eine geringe wärmedämpfende bzw. -speichernde Wirkung. Eine Integration energiespeichernder Materialien kann die spezifische Wärmekapazität des Bauteils erhöhen. Außerdem lassen sich bei der Verwendung von Latentwärmespeichern definierte Temperaturplateaus generieren, zu welchen das System hin tendiert (B 3.4).

B 2 Mechanische Eigenschaften

Auch wenn die Anpassung mechanischer Eigenschaften nur im weiteren Sinne als Funktionsintegration zu verstehen ist, sollen hier einige Ansätze aufgrund ihres besonderen Potentials kurz dargestellt werden. Durch die Zugabe von Additiven können einzelne Materialkennwerte gesteuert und wesentlich verändert werden. Bezüglich mechanischer Optimierungspotentiale sieht der Autor drei besonders interessante Ansätze für Faserverbundwerkstoffe:

- Erhöhung der Querkzugfestigkeit zwischen den Faserlagen (Faser-Matrix-Haftung)
- Verbesserung der Kerbschlagzähigkeit
- Selbstheilung von Ermüdungsrissen bzw. nach Überbelastung

Darüber hinaus können durch die Zugabe von Additiven auch die Festigkeit oder der E-Modul eines Laminats gesteuert werden. Durch die Einbettung von Formgedächtnis-Materialien lässt sich außerdem auch die Duktilität des Bauteils beeinflussen (s. Kapitel B 5.3, S. 29ff.)

B 2.1 Querkzugfestigkeit

B 2.1.1 Problematik

Die Haftzugfestigkeit zwischen Faser und Matrix liegt meist erheblich unter der Zugfestigkeit der ungestörten Matrix. Damit ist die interlaminare Scher- und Zugfestigkeit wesentlich geringer als die Festigkeiten in Laminebene. Bei geklebten Verbindungen mit glasfaserverstärktem Kunststoff wird die Querkzugfestigkeit des Laminats bzw. die damit korrelierende interlaminare Scherfestigkeit für die Tragfähigkeit von Verklebungen maßgebend [Val04] [Pet06] [Kni10]. Die Verbesserung dieser Eigenschaften erlaubt nicht nur höhere übertragbare Kräfte, sondern die Möglichkeit, ein Bauteil grundsätzlich anders zu entwerfen. Ein erfolgreicher Ansatz für die Verbesserung der Haftzugfestigkeit zwischen Matrix und Faser ist die Verwendung von Nanopartikeln, welche in die Matrix eingebaut werden oder auf der Faser (i.d.R.: Kohlenstofffaser) haften, bzw. auf dieser gezüchtet werden.

B 2.1.2 Einbau in der Matrix

In die Matrix lassen sich beispielsweise Silizium-, Aluminium- oder CNT⁶-Nanopartikel einbauen. Nanopartikel füllen kleinste Hohlräume im Gefüge und können damit bei entsprechend geringer Korngröße die mechanischen Eigenschaften des Laminats verbessern. Die Größe von Additiven hat zunächst keinen merklichen Einfluss auf den E-Modul eines Verbundwerkstoffs, solange es sich um Korngrößen im Mikrobereich ($> 1 \mu\text{m}$) handelt. Liegen die Dimensionen jedoch darunter, im Nanobereich ($< 1 \mu\text{m}$) geht mit einer verkleinerten Korngröße ein vergrößerter E-Modul einher. Die Zugfestigkeit erhöht sich unabhängig von der Korngröße bei der Zugabe von Nanopartikeln [Cho06]. Durch das Auffüllen von Fehlstellen werden lokale Spannungskonzentrationen am Übergang zwischen Fasern und Matrix reduziert und damit die Haftzugfestigkeit verbessert.

⁶ CNT: „Carbon Nanotubes“ (Kohlenstoffnanoröhrchen); rohrartige Struktur mit hexagonaler Anordnung der Kohlenstoffatome, Durchmesser im Bereich weniger Nanometer

B 2.1.3 Einbau auf der Faser

Insbesondere für die Verbesserung der interlaminaren Scherfestigkeit ist jedoch der Ansatz zielführender, CNT auf der Oberfläche der Verstärkungsfasern über einen gesteuerten Wachstumsprozess zu züchten. Diese bilden einen Anker auf der Faser und erhöhen dabei die Haftfestigkeit zwischen Fasern und Matrix wesentlich. Die CNT werden über einen initiierten Anordnungsprozess radial an die Kohlenstofffaser appliziert. Die interlaminare Scherfestigkeit kann damit um den Faktor 1,5 bis 2,5 verbessert werden. Die CNT wirken als Rissbrücken bei Zugspannung senkrecht zur Laminatenebene (Abbildung B-1) [Gar08].

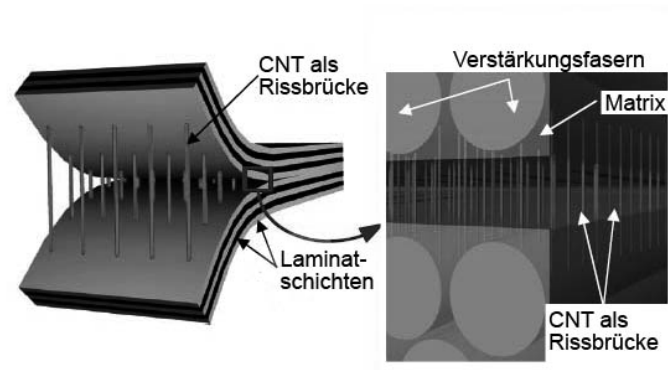


Abbildung B-1: Radial an den Verstärkungsfasern angebrachte CNT, Verbesserung der interlaminaren Scher- und Zugfestigkeit, nach [Gar08]

B 2.2 Kerbschlagzähigkeit

Die Zähigkeit von Bauteilen ist direkt auf das Risswachstum im Werkstoff bzw. auf den Energieaufwand bei Risswachstum zurückzuführen. Durch die Anordnung weicher Zwischenschichten kann auch aus einem spröden Werkstoff ein duktileres Bauteil erzeugt werden, da Risse nicht über die Fuge fortwachsen können. Die Analyse natürlicher Morphologien wie der des Glasschwamms Euplectella zeigen, dass weiche Zwischenschichten das Bruchwachstum verhindern bzw. einschränken [Aiz05]. Trotz des an und für sich spröden Grundwerkstoffs Glas erreicht die Struktur damit eine beachtliche Duktilität (Abbildung B-2).

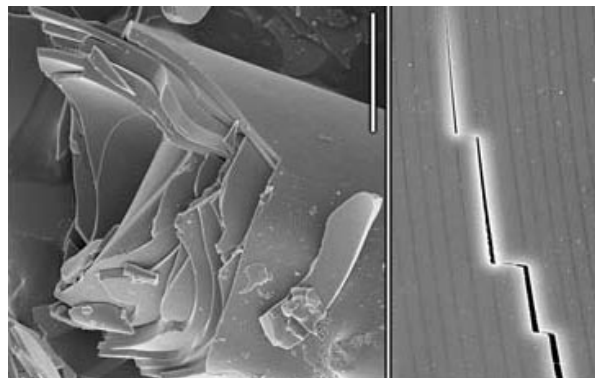


Abbildung B-2: Geschichteter Aufbau des Glasschwamms Euplectella, Behinderung des Risswachstums durch weiche Zwischenschichten [Aiz05]

Im Allgemeinen müssen die weichen Zwischenschichten jedoch dünner als die hauptsächlich tragenden sein, auf der anderen Seite einen kritischen Wert Minimalwert nicht unterschreiten [Gib10]. Die Strukturdämpfung des Bauteils erhöht sich hingegen kontinuierlich bei zunehmender Zwischenschichtdicke. Gute Ergebnisse liefern

zum Beispiel Sandwich-Platten aus Acrylglas mit dünnen Zwischenschichten aus speziellem Kunststoffklebstoff. Durch die Zugabe von Aluminium-Nanopartikeln konnte die aufnehmbare Stoßenergie wesentlich verbessert werden, wobei jedoch die Transparenz des Bauteils abnimmt [Rai09].

Eine weitere Möglichkeit zur Herabsetzung des Risswachstums ist die Einbettung von Kohlenstoffnanoröhrchen in eine polymere Matrix. Durch die Zugabe von oxidierten einschaligen CNT in Polycarbonat ist eine wesentliche Verbesserung des Verlustmoduls⁷ möglich (Faktor 12,5), ohne dass der Speichermodul signifikant abnimmt [Kor05]. Als Ursache für die Eigenschaftsverbesserung wird die Reibung zwischen den beiden Komponenten bei der Schlagbeanspruchung angesehen. Auch für Epoxidharz kann die Dämpfung wesentlich erhöht werden, wobei hier mehrschalige CNT effektiver sind [Raj05]. Daneben können auch andere Additive wie Silizium- oder Elastomer-Mikropartikel nennenswerte Verbesserung in der Kerbschlagzähigkeit liefern. Dabei führen jedoch zu hohe Gewichtsanteile zu einer signifikanten Herabsetzung der Festigkeitswerte oder des E-Moduls [Man09].

B 2.3 Selbstheilung

Bei kurzzeitiger Überlastung infolge Stoßeinwirkung oder durch Materialermüdung können in der Matrix des Faserverbundwerkstoffs kleine Risse entstehen, welche bei einem stetigen Wachstum zum Versagen des gesamten Bauteils führen können. Das Prinzip der Selbstheilung basiert darauf, dass diese Risse nach dem Entstehen gefüllt werden, was die Dauerhaftigkeit eines Faserverbundbauteils erhöht. Auch der Ansatz selbstheilender Werkstoffe ist der Bionik entlehnt, seit den 90er Jahren des vorherigen Jahrhunderts wurden auf diesem Gebiet sehr große Fortschritte gemacht [Wu08].

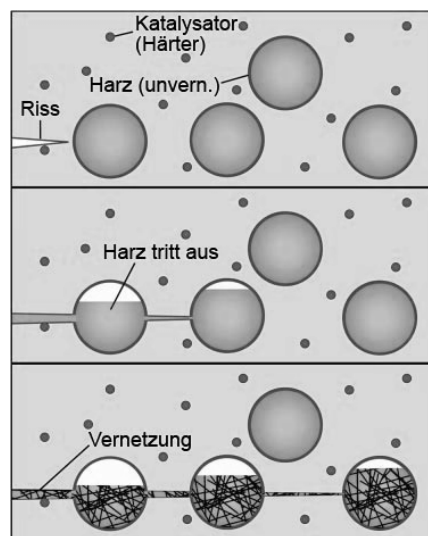


Abbildung B-3: Selbstheilung über unvernetztes Harz in Mikrokapseln, nach [Whi01]

Ein sehr effektiver Ansatz ist, ein mikroverkapseltes, unvernetztes⁸ Harz in der Matrix einzubringen und den entsprechenden Katalysator dem Harz direkt beizumischen (Abbildung B-3). Das Harz härtet zunächst nicht aus, da es mit dem Katalysator nicht in Kontakt treten kann. Bei Rissentstehung werden die Kapseln aufgebrochen

⁷ Bei oszillierender Beanspruchung eines Bauteils wird der Zusammenhang zwischen einwirkender Spannung und vorhandener Dehnung über den Speichermodul E' und den Verlustmodul E'' beschrieben. Der Speichermodul beschreibt dabei den im Werkstoff gespeicherten Energieanteil, während der Verlustmodul die Dämpfung des Werkstoffs wiedergibt. Für statische Beanspruchungen wird der Speichermodul zum E-Modul und der Verlustmodul zu null.

⁸ Ein duroplastischer Kunststoff härtet bzw. vernetzt, wenn das flüssige Harz mit dem Katalysator (Härter) in Verbindung tritt.

und das Harz tritt aus, durch Kapillarkräfte wird es in den Riss eingesogen. Da das Harz nun mit dem im Laminat beigemischten Katalysator in Kontakt tritt, härtet es aus und der Riss wird geschlossen [Whi01]. Die Optimierung dieses Mechanismus erlaubt mittlerweile eine nahezu vollständige Wiederherstellung der Ausgangsparameter des ungerissenen Laminats [Car08].

B 2.4 Gesundheitsgefahren durch CNT

Einige der zuvor beschriebenen Funktionserweiterungen beruhen auf Nanopartikel und insbesondere auf Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT). Der geringe Durchmesser von Kohlenstoffnanoröhrchen im Bereich einiger Nanometer und maximal weniger Mikrometer birgt die Gefahr einer Gesundheitsschädigung durch das Eindringen der Partikel in das Körper- und vor allem Lungengewebe. Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 3 μm gelten als lungengängig.

Im Gegensatz zu gedrunghenen Nanopartikeln (z.B. Feinstaub) sind Fasern und CNT deswegen kritisch, da deren Länge mehrere Größenordnungen über deren Durchmesser liegt, sie also ein großes Längenverhältnis haben (engl.: aspect ratio)⁹. Dringen CNT in Zellen ein, erfolgt dies meist stirnseitig, aufgrund des geringen Durchmessers ist die Zelle bestrebt, den Fremdkörper komplett aufzunehmen, was aufgrund der großen Länge jedoch scheitert und zu genetischen Schädigungen mit resultierenden Erkrankungen führen kann (Abbildung B-4). Die Anpassung der stirnseitigen Oberflächen könnte das Eindringen in Zellwände verhindern [Shi11]. Es hat sich jedoch bei in-vitro Versuchen herausgestellt, dass die Hornschicht der menschlichen Haut eine ausreichende Barriere gegenüber Kohlenstoffnanoröhrchen darstellt [Voh08].

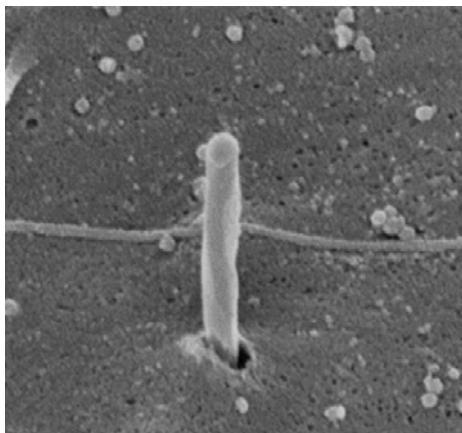


Abbildung B-4: Eindringen eines mehrschaligen CNT in eine Mäuseleber [Shi11]

Während Verstärkungsfasern aus Glas, Kohlenstoff oder Polymeren so produziert werden, dass ihr Durchmesser über den kritischen Wert liegt und diese außerdem nicht in Längsrichtung brechen können, sind CNT grundsätzlich als kritisch einzustufen. Durch die Bündelung von CNT in einem flächigen Verbund, dem sog. „Buckypaper“ wird daher versucht, das Auslösen einzelner Nanoröhrchen zu verhindern.

⁹ Auch bei Asbestfasern liegt sowohl der Durchmesser unter einem kritischen und die Länge über einem kritischen Wert und ist damit gesundheitsgefährdend. Der geringe Durchmesser entsteht dadurch, dass Asbestfasern in Längsrichtung brechen können und damit einen Durchmesser erhalten, der geringer ist als bei der Herstellung.

B 3 Bauphysikalische Funktionen

B 3.1 Wärmeleitfähigkeit

Die thermische Leitfähigkeit von Kunststoffen ist vergleichsweise gering, sie liegt deutlich unter den Werten von Beton und Metallen. Da Faserverbundwerkstoffe jedoch mit dünnen Materialstärken ausgeführt werden und außerdem die Verstärkungsfasern eine höhere Wärmeleitfähigkeit haben, ist der Wärmedurchgangskoeffizient¹⁰ des gesamten Bauteils meist zu hoch, um als thermische Hülle verwendet zu werden. Hier werden zusätzliche Maßnahmen zur Wärmedämmung erforderlich. Auf der anderen Seite kann bei bestimmten Anwendungen eine hohe Wärmeleitfähigkeit vorteilhaft sein, wenn z.B. eine ungleichmäßige Temperaturverteilung eines einseitig erwärmten Bauteils ausgeschlossen werden soll, z.B. bei Brückenfahrbahnen. Auch in diesem Fall kann eine Eigenschaftsanpassung erforderlich werden.

Eine mögliche Lösung zur Verringerung des Wärmedurchgangs ist, Stegplatten einzusetzen und die Hohlkammern mit einem wärmedämmenden Material zu füllen, z.B. Schaumstoff oder Aerogel (Abbildung B-5). Da das tragende Laminat bereits eine relativ geringe Wärmeleitfähigkeit hat, haben die entstehenden Wärmebrücken insgesamt einen geringen Einfluss auf den Wärmedurchgang des Bauteils. Die wärmedämmende Füllung ist dabei jedoch nicht statisch wirksam. Zur gleichzeitigen Verbesserung der Tragfähigkeit können jedoch auch Hartschaumplatten eingesetzt werden [Kel10].

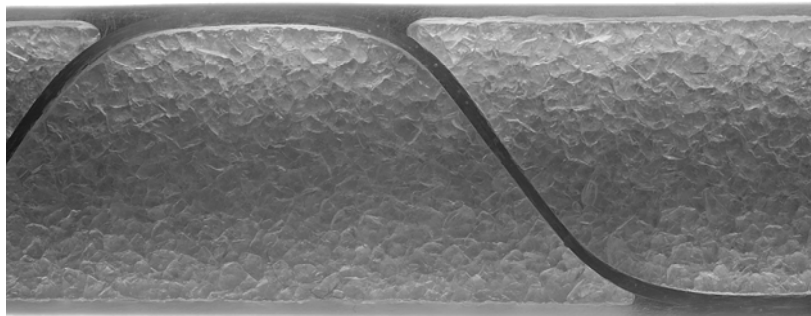


Abbildung B-5: Transluzente GFK-Hohlkammerplatte mit Aerogelfüllung

Eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit hingegen kann über die Zugabe von Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) erzielt werden. Durch die Zugabe von 1 (Massen-)Prozent CNT steigt die Wärmeleitfähigkeit von Epoxidharz um 125% [Bie02]. Noch effektiver ist die Zugabe von Graphit-Flocken, ein Gehalt von 20 (Massen-)Prozent erlaubt die Steigerung der thermischen Leitfähigkeit um den Faktor 28, geht jedoch mit einer schlechteren Verarbeitbarkeit einher [Gan08].

¹⁰ Während die Wärmeleitfähigkeit $[W/(m \cdot K)]$ die Eigenschaft eines Werkstoffs wiedergibt, beschreibt der Wärmedurchgangskoeffizient $[W/(m^2 \cdot K)]$ das Bauteilverhalten unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs von der umgebenden Luft- zur Oberflächentemperatur sowie der Dicke des Bauteils.

B 3.2 Wärmespeicherung

Die für Faserverbundwerkstoffe gebräuchlichen Harze haben eine recht hohe Wärmespeicherfähigkeit, wegen der dünnen Wandungen von Fassadenplatten oder Raumtrennungen fehlt jedoch die notwendige Masse für eine effektive Temperaturregelung von Innenräumen. Durch die Zugabe eines Latentwärmespeichers wie Paraffin kann die Temperaturdämpfung wesentlich optimiert werden. Latentwärmespeicher (engl.: „phase change material“ - PCM) haben einerseits eine relativ hohe spezifische Wärmekapazität¹¹, andererseits kann die Plateautemperatur in gewissen Grenzen an den raumklimatischen Bedarf angepasst werden. Bei dieser Temperatur geht der Latentwärmespeicher von dem festen in den flüssigen Zustand über bzw. umgekehrt, der damit verbundene Phasenübergang ist mit einer Energiespeicherung bzw. -abgabe verbunden, weshalb das Durchschreiten dieser Grenze in beide Richtungen abgebremst wird.

Da Latentwärmespeicher auf Paraffin-Basis beim Phasenübergang flüssig werden, sind entsprechende Kammern vorzusehen. Dies können beispielsweise Taschen in einem Gitterrost sein, für Aluminium werden entsprechende Systeme bereits erfolgreich eingesetzt [Wir09]. Eine andere Möglichkeit ist, das PCM in kugelförmigen Kapseln zu verarbeiten, welche wiederum dem Harz des Faserverbundwerkstoffs beigemischt werden können (Abbildung B-6). Im Rahmen eines studentischen Projekts an der Universität Stuttgart wurde verkapseltes PCM einem Bioharz beigemischt und zu einem Faserverbundbauteil laminiert. Dabei konnten gute Ergebnisse hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Wärmespeicherung erzielt werden.



Abbildung B-6: Verkapselter Latentwärmespeicher als Additiv für ein Harz, Studentenprojekt¹²

¹¹ Menge an Wärmeenergie, die je Masse des Materials gespeichert werden kann, flüssiges Wasser hat mit $4,18 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ den höchsten Wert gebräuchlicher Werkstoffe, für Paraffin liegt dieser bei ca. 2,5, für Holz im Mittel bei ca. 1,7 und für Beton bei ca. $0,88 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$.

¹² Universität Stuttgart, Fakultät Architektur und Stadtplanung, Projekt des 4. Semesters im Sommer 2010, Antonia Bollenbach, Jonathan Feldmann, Michael Riker, Filip Vejin, Maria Zacher

B 3.3 Elektrische Leitfähigkeit

Kunststoffe sind grundsätzlich nicht leitfähig, bei Verbundwerkstoffen lediglich Kohlenstofffasern, wobei für das Laminat aufgrund der äußeren Reinharzschichten keine durchgehende Leitfähigkeit gegeben ist. Für den Blitzschutz von Gebäuden kann jedoch eine elektrisch leitende Fassade von Interesse sein, ähnlich dem Flugzeugbau, wo ein Faraday'scher Käfig gegen Blitzschlag unerlässlich ist. Ein kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff ist hierfür jedoch nicht ausreichend.

Durch die Zugabe von Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) kann die elektrische Leitfähigkeit von Verbundwerkstoffen wesentlich erhöht werden. Die elektrische Leitfähigkeit steigt überproportional mit der Erhöhung der CNT-Konzentration [Bau09]. Je größer das Längenverhältnis der CNT ist, desto geringere Konzentrationen sind erforderlich. Dies liegt daran, dass die CNT durch ausreichend Kontaktstellen ein durchgehendes Gitter an Leitern durch die isolierende Matrix bilden können.

B 3.4 Energieeintrag und –speicherung

B 3.4.1 Integration

Der geschichtete Aufbau faserverstärkter Kunststoffe erlaubt die Integration funktionaler Zusatzschichten, welche der Erzeugung und Speicherung von Energie dienen können. Das Laminat schützt dabei die eingebetteten funktionalen Einheiten vor klimatischen Einwirkungen oder mechanischer Beschädigung, außerdem wird aufgrund des integrierten Aufbaus die Installation am Bauwerk wesentlich vereinfacht. Solche funktionsintegrierten Bauteile können dann als Fassade oder Dach eingesetzt werden.

Eine bedeutende Rolle spielt die funktionsintegrierte Erzeugung und Speicherung von Energie bei Bauwerksüberwachungssystemen. Die für die Sensorik und Datenübermittlung notwendige Energiemenge ist einerseits gering, andererseits jedoch meist vor Ort nicht zugänglich. Daher bieten sich besonders hier funktionsintegrierte Systeme an. Der Forschungsbereich des „energy harvesting“ umfasst solche gekoppelten Systeme zur Gewinnung und Speicherung von Energie [Pri09].

B 3.4.2 Energieerzeugung

Piezoelemente (B 5.2) erlauben es, mechanische Energie (Schwingungen) über deren elektromechanische Wechselwirkung in elektrische Energie umzuwandeln. Die entstehenden Energiemengen sind ausreichend für den Betrieb von Bauwerksüberwachungs-Netzwerken [Par08]. Jedoch kann nur bei höheren Schwingungsfrequenzen effektiv Energie erzeugt werden.

Eine sehr vielversprechende Alternative ist, Solarzellen in Folienform als äußerste Schicht auf ein Faserverbundbauteil zu laminieren (Abbildung B-7). Für eine Dachkonstruktion oder Fassade ist es damit möglich, ein multifunktionelles Sandwich zu realisieren, das tragende Funktion übernimmt, als Wärmedämmung und zur Energiegewinnung dient. Dabei kann jedoch die Erwärmung der Solarzelle infolge solarer Einstrahlung problematisch werden, da die üblicherweise verwendeten duroplastischen Harze temperaturempfindlich sind. Die Laminatdehnungen im Gebrauchslastniveau können von der Verbundkonstruktion sehr gut ertragen

werden, es tritt keine Delamination auf [Kel10]. Die Fertigung kann über die Verwendung eines Prepreg¹³ in einem Arbeitsschritt erfolgen, was sehr dauerhafte Ergebnisse liefert. Jedoch kann eine Dauerschwingbeanspruchung mit bereits weniger als 1% Dehnung zu Materialschädigungen führen [Mau10].

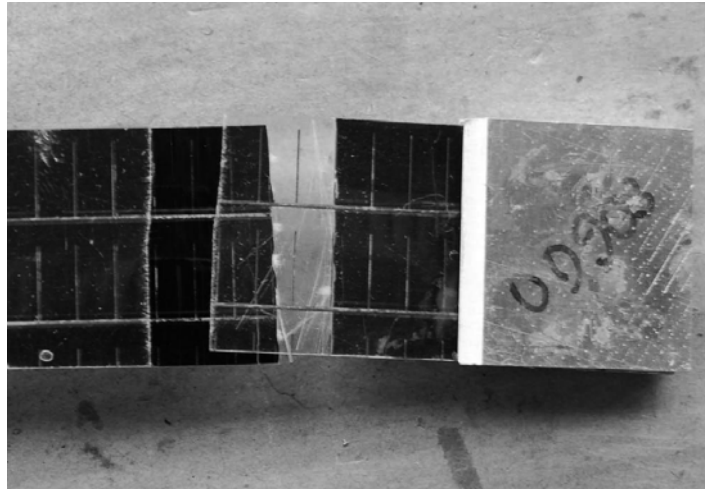


Abbildung B-7: Bruchtest eines Laminats mit integrierter Solarzelle [Kel10]

B 3.4.3 Energiespeicherung

Für die Speicherung elektrischer Energie in einem Faserverbundwerkstoff können in diesem folienartige Speicherzellen integriert werden. Vor allem in der Raumfahrt stehen aufgrund der angestrebten Gewichtsminimierung derartige Ansätze im Fokus. Die Integration von Lithium-Zellen in kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff ist schon vor einigen Jahren gelungen [Oza08]. Die Ladung der Batterien kann über Piezoelemente erfolgen. Die strukturintegrierten Batterien beeinflussen die Tragfähigkeit des Bauteils nicht negativ, sie erlauben eine Laminatdehnung von ca. 50% der Bruchdehnung [Per09]. Eine alternative Möglichkeit der Energiespeicherung ist die Verwendung von Latentwärmespeichern (B 3.2).

¹³ Prepreg: preimpregnated (vorgetränkt): das textile Halbzeug wird mit einem zähflüssigem Harz getränkt, welches erst unter erhöhten Temperaturen und Druck aushärtet, die Reaktion erfolgt im Rahmen der Endverarbeitung durch die Wirkung erhöhter Temperatur und/oder von Druck.

B 4 Sensorik

B 4.1 Zielsetzung

Eine kontinuierliche Bauteilkontrolle (structural health monitoring – SHM) erlaubt eine beträchtliche Materialersparnis, da im Gegensatz zum materialeitigen Sicherheitskonzept die Schädigung des Bauteils bei der Dimensionierung zu einem gewissen Grad in Kauf genommen wird¹⁴. Dies spielt insbesondere bei Faserverbundwerkstoffen eine nicht unerhebliche Rolle, da hier Materialschwankungen wesentlich größer sind als beispielsweise im Stahlbau und damit mehr Potential für die Reduktion der Materialsicherheitsbeiwerte vorhanden ist. Dafür ist eine kontinuierliche oder zumindest regelmäßige Überwachung notwendig, welche durch ein Sensornetzwerk erfüllt werden kann. Für das structural health monitoring wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Sensoren, Datenübertragungswege und Datenerfassungssysteme entwickelt, welche jedoch nicht Inhalt der vorliegenden Arbeit sein können.

Im Gegensatz zu extern applizierten Sensoren kann eine strukturintegrierte Sensorik unmittelbar die Zustandsgrößen im betrachteten Bauteil wiedergeben. Außerdem schützt das Bauteil die eingebetteten Sensoren vor Umwelteinflüssen und mechanischer Beschädigung.

Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass der strukturintegrierte Sensor die Lastpfade und Temperaturzustände am Messpunkt nicht beeinflusst. Des Weiteren sollte der Sensor nicht zu einer Gefügestörung führen, welche Spannungskonzentrationen im Bauteil verursacht und damit dessen Tragfähigkeit herabsetzt. Für Faserverbundwerkstoffe erfüllen faseroptische Sensoren diese Voraussetzungen am besten, weshalb diese in der vorliegenden Arbeit ausführlich betrachtet werden. Dabei spielt die Sensor-Bauteil-Interaktion eine maßgebende Rolle, vgl. Kapitel D.

Es ist außerdem in der Regel eine möglichst punktuelle Messung anzustreben. Lediglich bei der Kontrolle des Risswachstums wird den Sensoren eine größere Korrelationslänge zugeordnet, da einerseits die genaue Lage eines entstehenden Risses nicht vorherzusehen ist und andererseits unmittelbar am Riss zu hohe Klaffungen auftreten, welche von den meisten Sensoren nicht ertragen werden. Vielmehr wird der Sensor dann so appliziert, dass der das integrative Mittel der Dehnung über den Riss und den benachbarten Bereichen wahrnimmt.

B 4.2 Elektronische Dehnungsmesstreifen

Elektronische Dehnungsmesstreifen (DMS) sind preiswerte und sehr genaue Sensoren für die Bestimmung von Dehnungen. Der nur 10 µm dünne Streifen wird auf das zu messende Bauteil (Substrat) aufgeklebt. Durch die Änderung des Widerstands des Metallgitters auf der Trägerfolie kann auf die Dehnung in Orientierung des Gitters zurückgeschlossen werden. Ein DMS misst die Dehnungen grundsätzlich eindimensional, ist aber auch temperaturempfindlich. Über die Querdehnung des Substrats führen jedoch auch Einwirkungen senkrecht zum Gitter zu Messwerten.

¹⁴ Im Flugzeugbau basiert das traditionelle Bemessungskonzept „safe life“ auf der Anforderung, dass über die gesamte Lebensdauer keine Schädigung auftreten darf. Bei der heute üblichen Dimensionierung „fail safe“ wird zwar eine Schädigung in Kauf genommen, die Ausfallsicherheit wird dann jedoch über regelmäßige Kontrollen gewährleistet, z.B. Protokollieren des Risswachstums oder eben einem „structural health monitoring“.

Der strukturintegrierte Einbau hat den Vorteil, dass der korrosionsempfindliche DMS geschützt wird und außerdem unter Biegebeanspruchung kleiner Dehnungen auftreten als bei der Applikation auf der Außenseite. Entsprechende Sensoren sind mittlerweile standardmäßig verfügbar (Abbildung B-8).

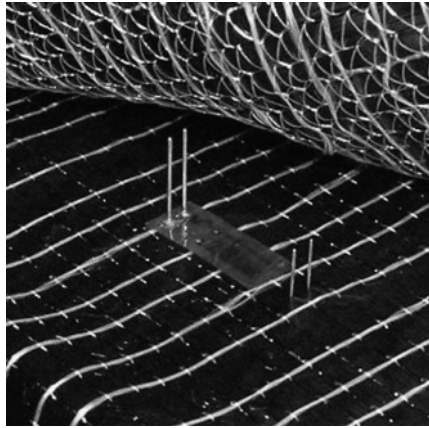


Abbildung B-8: Elektronischer Dehnungsmessstreifen (DMS) in kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff eingebettet [Hottinger Baldwin Messtechnik]

B 4.3 Piezoelemente

Piezoelemente können sowohl als Sensor als auch als Aktor eingesetzt werden. Ihre Wirkungsweise basiert auf einer Wechselwirkung zwischen mechanischer Verformung und elektrischer Potentialänderung, welche in beide Richtungen gilt (s. Kapitel B 5.2.1, S. 27). Diese Doppelfunktion macht Piezoelemente vor allem bei akustisch basierten Schadensmessungen interessant, wo sie gleichzeitig Schallwellen im Bauteil hervorrufen und messen können. Die Sensoren im oder auf dem Laminat werden dabei als Netzwerk konfiguriert, um zum Beispiel lokale Delamination oder Schädigung durch Stoßbeanspruchung zu lokalisieren [Wat07] [Wei08].

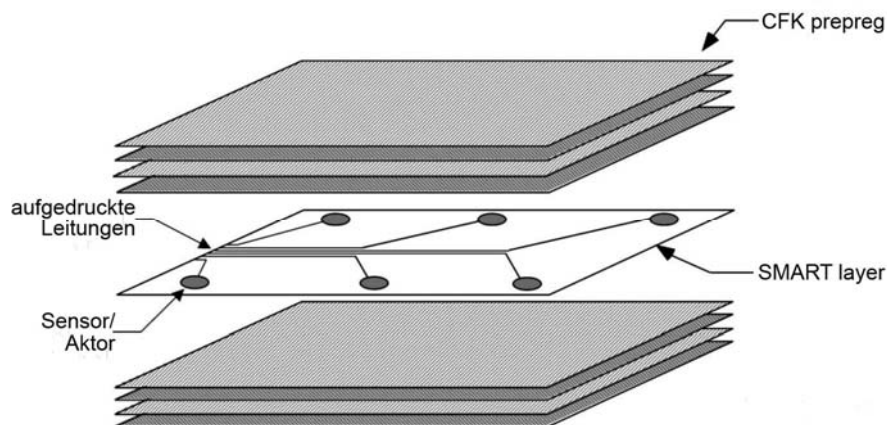


Abbildung B-9: „SMART“¹⁵: Sensor-Aktor-Netzwerk, Folie mit aufgedruckten Piezosensoren wird in Laminat eingebaut, nach [Lin02]

Für die Integration in flächige Faserverbundwerkstoffe eignen sich vorkonfektionierte Netzwerke, welche auf einer Folie aufgedruckt sind (Abbildung B-9). Die Piezoelemente dienen gleichzeitig der Emission und Messung von Schallwellen, durch die Phasenverschiebung der gemessenen Ultraschallpeaks lässt sich bereits die

¹⁵ „SMART“: Stanford Multi Actuator Receiver Transduction

Aushärtung kontrollieren das Bauwerk über die gesamte Lebensdauer kontrollieren. Diese Schicht setzt die mechanischen Eigenschaften des Laminats nicht signifikant herab [Lin02].

B 4.4 Faseroptische Sensoren

Optische Fasern eignen sich für die Integration in Faserverbundwerkstoffen hervorragend, da sie einen geringen Durchmesser (mit Schutzschicht 0,25 mm) und eine beliebig große Länge haben. Bei den hier betrachteten Systemen ist der Sensor Bestandteil der Faser und stellt daher keine Gefügestörung für das Laminat dar. Diese Lichtleiter unterscheiden sich jedoch von den Glasfasern, die für Textilien oder als Faserverstärkung Anwendung finden. Letztere erlauben keine zuverlässige Lichtleitung und kommen daher in der Regel als Sensor nicht in Betracht.

Die Verwendung faseroptischer Sensoren zur strukturintegrierten Bauteilüberwachung stellt den Hauptteil der vorliegenden Arbeit dar und wird in den folgenden Kapiteln ausführlich behandelt.

B 5 Aktorik

B 5.1 Überblick

B 5.1.1 Eingrenzung

Aktoren¹⁶ erlauben eine Formveränderung von Bauteilen und damit bei statisch überstimmten Systemen auch die Umlagerung des Kraftflusses. Daneben sind Aktoren auch für die Verrichtung mechanischer Arbeit geeignet, was in der Architektur jedoch eine untergeordnete Rolle spielt. Während passive Strukturen so dimensioniert werden müssen, dass sie alle relevanten Einwirkungen gleichermaßen ertragen können und dabei die Gebrauchstauglichkeit garantieren, kann über die Aktoren auf veränderte Einwirkungen reagiert werden. Damit ist eine erhebliche Materialersparnis verbunden. Vor allem glasfaserverstärkte Kunststoffe haben den Nachteil, das beim Bauteilwurf meist die Verformung (Durchbiegung, Schwingung) maßgebend wird und damit nur ein Bruchteil der Tragfähigkeit nutzbar ist. Aktive Faserverbundwerkstoffe erlauben es jedoch, die Verformung zu reduzieren, in dem das Bauteil der lokalen Belastung bzw. Anregung entgegen wirkt. Es kann unterschieden werden in:

- externe, diskrete Aktoren zwischen starren Bauteilen (vgl. Muskel-Knochen-System)
- strukturintegrierte Aktoren in flexiblen Bauteilen (biegsame Systeme)

Entsprechend der werkstofflichen Fokussierung der vorliegenden Arbeit sollen im Folgenden nur strukturintegrierte Sensoren betrachtet werden. Diskrete Aktoren erlauben jedoch materialunabhängig eine belastungsgerechte Anpassung von Tragstrukturen über Stellmechanismen [Teu04] [Mat07]. Daneben können aktiv steuerbare Dämpfer wie magnetorheologische Elastomere [Fuc07] oder Flüssigkeiten [Zsc05] ihre Eigenschaften an die aktuelle Erregerfrequenz anpassen und damit wesentlich effektiver arbeiten als passive Dämpfer. Bei diesen Systemen wird die Viskosität der Werkstoffe durch ein externes Magnetfeld gesteuert.

B 5.1.2 Problematik statischer Adaptivität

Die bisherigen technischen Anwendungen von strukturintegrierten Aktoren beschränken sich fast ausschließlich auf dynamische Einwirkungen. Dies hängt mit dem grundsätzlichen Dilemma zusammen, dass bei einer statischen Anpassungsfähigkeit die passiven Anteile des Bauteils von den Aktoren überdrückt werden müssen. Andererseits haben die meisten Aktoren nicht die erforderliche Eigensteifigkeit oder Festigkeit, um als autonomes Bauteil verwendet zu werden und sind außerdem zu teuer. Bei dynamischen Systemen wird durch die Aktoren eine Erregerfrequenz erzeugt, weshalb schon geringe Kräfte bzw. Energiemengen für die Beeinflussung ausreichend sind. Diese dynamische Aktoren haben in Abhängigkeit ihrer Bauart und der eingesetzten Frequenz ein Energieoptimum, bei der sich die Struktur optimal beeinflussen lässt.

Ist jedoch eine statische Beeinflussung erwünscht, sollte das Bauteil in der Wirkungsrichtung des Aktors eine möglichst geringe Eigensteifigkeit besitzen. Grundsätzlich sind glasfaserverstärkte Kunststoffe aufgrund des geringeren E-Moduls besser geeignet als kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe. Außerdem ist im Laminat die Richtung mit der geringeren Steifigkeit besser steuerbar, also z.B. senkrecht zur Faserrichtung. Die Orientierung der strukturintegrierten Aktoren sollte daher möglichst senkrecht zur primären Tragrichtung gewählt werden (Abbildung B-10).

¹⁶ Von der englischen Bezeichnung ‚actuator‘ zum Teil auch als ‚Aktuator‘ übersetzt.

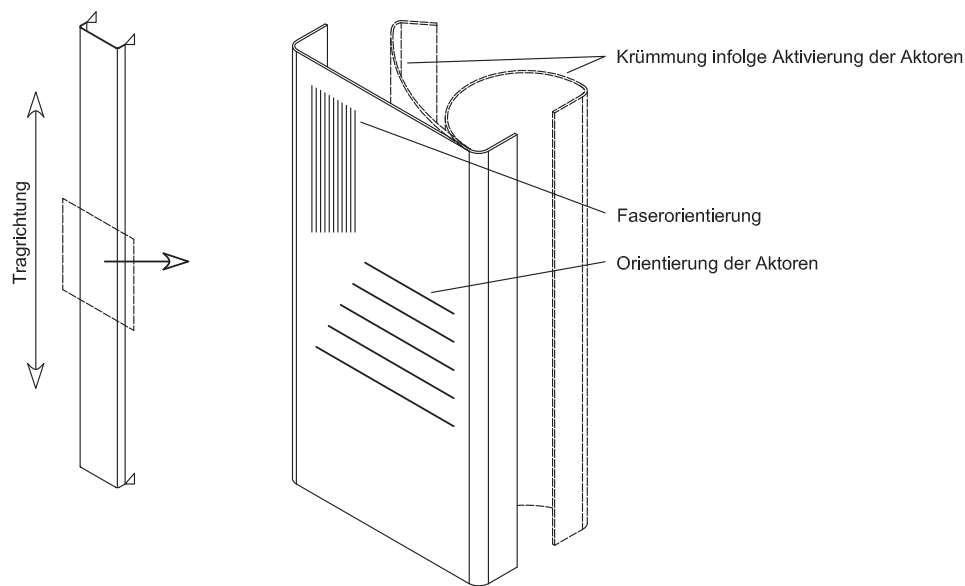


Abbildung B-10: Entkopplung der Trag- und Adaptionrichtung am Beispiel eines Faserverbundbauteils, Aktoren sind senkrecht zur hauptsächlichlichen Faserorientierung orientiert (Schema)

Bei dem dargestellten Bauteil - zum Beispiel ein Verschattungselement einer Fassade – ist die Faserverstärkung entlang der Tragrichtung angeordnet. Es bietet es sich an, die Aktoren senkrecht zur Tragrichtung anzuordnen, da der Bauteilwiderstand hier am geringsten ist. Die Aktorik kann dazu eingesetzt werden, dass sich das Bauteil einrollt. Daneben ist auch die Ansteuerung einer Verdrillung für Faserverbundwerkstoffe effektiv, da diese vergleichsweise torsionsweich sind.

B 5.1.3 Auswahl des Aktors

Die wichtigste Einflussgröße zur Auswahl des geeigneten Aktors ist die Frequenz der beabsichtigten Bauteilbeeinflussung. Die im Bauwesen relevanten Frequenzen (Tabelle B-1) liegen fast ausnahmslos unter 10 Hz, lediglich für Seile kann bei hoher Windgeschwindigkeit infolge Wirbelablösung eine höhere Anregfrequenz auftreten, welche jedoch baupraktisch meist nicht relevant wird. Für Verkehrslasten oder Erdbeben liegen die Einwirkungen bzw. Antwortspektren stets unter 10 Hz.

In der Automobilindustrie sowie der Luft- und Raumfahrt werden Aktoren häufig zur Vibrationskontrolle infolge maschineninduzierter Schwingungen eingesetzt. Dieser Anwendungsbereich spielt in der Architektur jedoch nur in Ausnahmefällen eine Rolle.

Tabelle B-1: Frequenzen veränderlicher Lasten im Bauwesen¹⁷

Einwirkung	Frequenz [Hz]	Anmerkung bzw. Quelle
Straßenbrücken	≈ 1	
Fußgängerbrücken	0,5 ... 4,6	horizontal - vertikal [But08]
Wirbelerregte Schwingungen (Seil)	≤ 500	d = 20 mm, v = 200 km/h [Ste10]
Wirbelerregte Schwingungen (Schornstein)	≤ 2	d = 5 m, v = 200 km/h [Ste10]
Erdbeben	---	Antwortspektrum bauwerksabhängig

Vergleicht man die in der Architektur relevanten Frequenzen mit den typischen Einsatzbereichen von aktiven Werkstoffen (Tabelle B-2 und Abbildung B-11), sieht man, dass lediglich Formgedächtnis-Materialien und aus der Gruppe der elektroaktiven Polymere (EAP) die Polymer-Gele für die genannten Anwendungen in Betracht kommen. Bei Formgedächtnis-Legierungen sind Schaltfrequenzen unter 10 Hz und Dehnungen bis 8% ansteuerbar, während Polymer-Gele Frequenzen unter 1 Hz und Dehnungen über $1.000 \cdot 10^{-3}$ erlauben [Gro00]. Piezowerkstoffe und Elektro- bzw. Magnetostriktiva erlauben - bis auf die Piezopolymere - nur sehr geringe Dehnungen. Sie können daher nur bei höheren Frequenzen effektiv eingesetzt werden, also ausreichend Energie in das Bauteil eintragen.

Tabelle B-2: Erzielbare Dehnung und Frequenzbereich für ausgewählte Aktoren [Gro00]

Gruppe	Werkstoff	Frequenz [Hz]	max. Dehnung [10^{-3}]
Piezoelektrische Materialien	Piezokeramik PZT	$> 10^4$	≈ 1,0
	Piezopolymer	> 10	≈ 100
Formgedächtnis-Materialien	Formgedächtnis-Legierung Nitinol	< 10	60 ... 80
Elektroaktive Polymere	Polymer-Gele PAN- bzw. (PAAm/PAA)-Gel	< 1	$> 10^3$

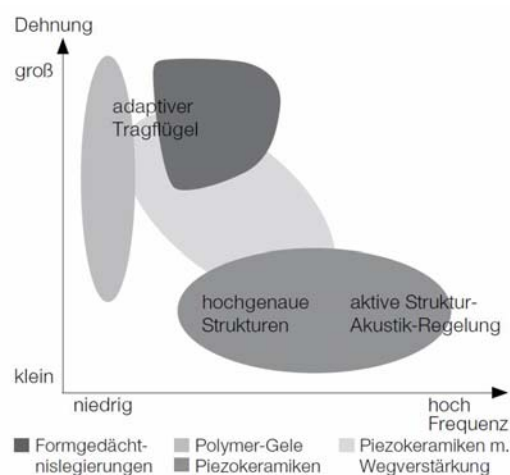


Abbildung B-11: Übersicht typischer Einsatzbereiche adaptiver Werkstoffe, nach [Gro00]

¹⁷ Die Wirbelablösefrequenz beträgt: $f = S \cdot v/b$ mit $S=0,18$ (Strouhalzahl für kreisrunde Querschnitte), v : Windgeschwindigkeit, b : Anströmbreite. Meist werden für die Bemessung geringe Eigenfrequenzen bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten maßgebend, da sie der Eigenfrequenz entsprechen [Ste10].

B 5.1.4 Anwendungsbeispiel Flugzeugtragflächen

Die Querschnittsanpassung der Tragflächen von Flugzeugen oder Hubschraubern spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung adaptiver Systeme. Die optimale Querschnittsform des Flügels hängt von dem Anströmwinkel und der Luftgeschwindigkeit ab, variiert also innerhalb eines Flugs. Das Ziel ist daher, den Querschnitt laufend an die sich ändernden Randbedingungen anzupassen, um im Vergleich zu den heute gebräuchlichen Klappmechanismen für Starts und Landungen Konstruktionsmaterial und damit Eigengewicht zu sparen.

Wie oben beschrieben, wird die Adaptivität häufig dadurch gelöst, dass die Lastabtragung und Formveränderbarkeit in orthogonal zueinander angeordnet sind. Eine Tragfläche wird beispielsweise in Richtung der Auskrümmung beansprucht, während die Anpassung des Querschnitts senkrecht dazu stattfindet. Neben gelenkig verbundenen Starrkörper mit Membranbespannung oder Faltmechanismen ist der Einsatz einer strukturintegrierten Adaptivität des tragenden Laminats möglich [Thi08]. Grundsätzlich muss dabei die Hülle verformbar sein, im Betriebszustand aber streng elastisch und ausreichend steif. Die erforderlichen Dehnungsdifferenzen für einen strukturintegrierten Ansatz können derzeit nur von Formgedächtnis-Materialien erzielt werden [Kik03] [Thi08].

B 5.2 Piezoelektrische Materialien

B 5.2.1 Grundlagen

Piezoelektrische Materialien, insbesondere Piezokeramiken, haben von den hier besprochenen aktiven Materialien die höchste Anwendungsreife, sie werden seit einigen Jahren industriell eingesetzt. Vor allem Piezokeramiken haben eine hohe Steifigkeit, lassen sich äußerst präzise und in einem weiten Frequenzband ansteuern. Nachteilig für statische Anwendungen sind jedoch die vergleichsweise kleinen erreichbaren Dehnungen von ca. $\varepsilon = 10^{-3}$, was bei handelsüblichen Sensoren einem maximalen Hubweg von 0,2 mm entspricht [Jan04]. Da Piezokeramiken sehr spröde sind, ist bei der Verarbeitung auf Schutzmaßnahmen gegen Risse zu achten.

Piezokeramiken besteht aus asymmetrischen Gittern mit unterschiedlich geladenen Atomen, durch eine uniaxiale Dehnung verschieben sich die geladenen Atome zueinander, so dass elektrische Dipole entstehen. Da der Werkstoff nicht elektrisch leitfähig ist, kann sich das entstehende elektrische Feld nicht ausgleichen, es entsteht eine elektrische Spannung. Die elektrische Feldstärke¹⁸ ist proportional zur Dehnung. Beim umgekehrten piezoelektrischen Effekt wird dem Werkstoff durch eine von außen angelegte Spannung eine Dehnung aufgezwungen, er wirkt als Aktor. Die gegenseitige Orientierung von Feldstärke und Dehnung kann in zwei Moden auftreten: einerseits in identischer Richtung (d_{33}) oder in zueinander senkrechter Richtung (d_{31}), s. Abbildung B-12.

¹⁸ Die elektrische Feldstärke E [V/m] entspricht in diesem Fall dem Quotienten aus angelegter Spannung und dem Abstand der Elektroden, es handelt sich um eine vektorielle Größe.

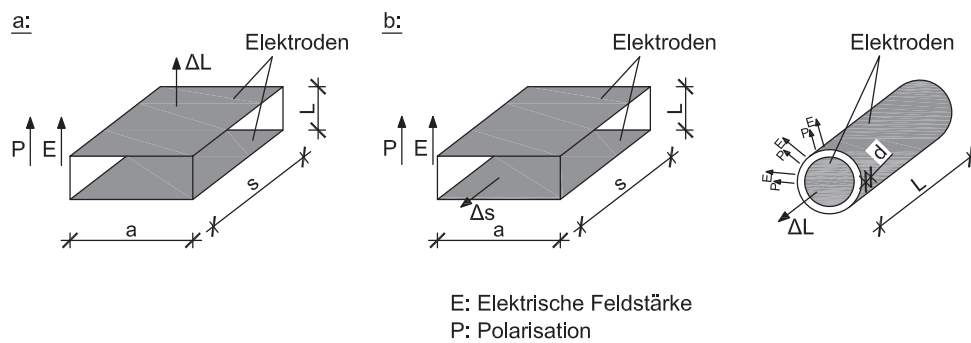


Abbildung B-12: Orientierung von elektrischer Feldstärke und Dehnung bei Piezokeramiken
a: gleichgerichteter Modus (d_{33}); b: zueinander senkrechter Modus (d_{31}), nach [Jan04]

Die erforderlichen Feldstärken zur vollen Aktivierung des Piezoeffekts sind sehr hoch (ca. 1 MV/m), weshalb in der Regel auf sehr dünne Bauteile zurückgegriffen werden muss. Bei dem gleichgerichteten Modus (d_{33}) können dennoch hohe Dehnwege erzielt werden, indem man mehrere Platten mit dazwischen angeordneten Elektroden stapelt. Piezopolymere erlauben Dehnungen von ca. 10% und damit wesentlich mehr als Piezokeramiken [Gro00].

Elektrostriktion ist ein Überbegriff weiterer Effekte, bei denen ein elektrisches Feld in eine Dehnung umgewandelt wird, im Gegensatz zum Piezoeffekt ist Elektrostriktion nicht umkehrbar und außerdem ist der Zusammenhang zwischen Feldstärke und Dehnung nicht linear. Daneben wird bei Magnetostruktiva die Dehnung über ein Magnetfeld induziert.

B 5.2.2 Anwendungen

Piezo-Aktoren werden häufig in der Form von „Piezo-Fasern“¹⁹ verarbeitet. Dabei werden Streifen bzw. Stäbchen dünner Piezokeramiken parallel zueinander in einem elastischen Polymer angeordnet, die Trennung verhindert das Risswachstum des spröden Werkstoffs bei lokaler Beschädigung. Der Aktor lässt sich infolge seiner Anordnung einachsrig gekrümmt einsetzen. Bei „Piezo-Fasern-Aktoren“ lassen sich geringere Schaltfrequenzen einstellen als bei massiven Scheibenaktoren, die Ansteuerung erfolgt über außen liegende folienartige Elektroden [Wil02].

Eine sehr effektive Verarbeitungsform sind Hohlfasern aus Piezokeramik, dabei bilden Silberbeschichtungen an der Innen- und Außenseite der Faser die erforderlichen Elektroden (Abbildung B-12, rechts). Da so die Elektroden sehr nahe zusammen liegen, reduziert sich die erforderliche Feldstärke. Das elektrische Feld wirkt radial, die Dehnung in Längsrichtung der Faser, es wird also der d_{31} -Effekt verwendet. Dieser erlaubt zwar nur die halbe Dehnung des Längseffekts, aufgrund der beliebigen Länge der Hohlfaser sind in der Summe jedoch große Verschiebungen realisierbar [Bre04]. Eine andere Bauart basiert auf einer elektrisch leitenden Keramikfaser mit einem Durchmesser von 140 μm , welche mit einer piezoelektrischen Beschichtung versehen ist. Als zweite Elektrode (neben der zentralen Keramikfaser) dient eine außen liegende Metallbeschichtung. Im Gegensatz zu den bislang gebräuchlichen Verfahren kann diese Faser direkt in den Verbundwerkstoff eingebettet werden und sowohl als Sensor als auch als Aktor dienen [Lin09].

¹⁹ Der Begriff ‚Faser‘ ist hier etwas missverständlich, da es sich um vergleichsweise große und meist rechteckige Querschnitte handelt, die in der Form am ehesten als ‚Stäbchen‘ zu bezeichnen wären.

Faserverbundwerkstoffe

Aufgrund der geringen Materialstärke sind Faserverbundbauteile besonders schwingungsanfällig. Daher werden Piezoelemente eingesetzt für die Schalldämpfung von Flugzeugrümpfen, der Vibrationsreduktion von Helikopterflügeln oder der Kontrolle wirbelerregter Schwingungen der Heckflossen von Kampfflugzeugen [Wil02] [Zür04]. Die Aktoren sollten dabei symmetrisch platziert werden und wirken am effektivsten bei der Erzeugung bzw. Dämpfung von Biegeschwingungen [Sri01].

Bei Helikopterflügeln lassen sich beispielsweise die Torsion und damit das aerodynamische Verhalten steuern. Dabei werden Piezofasern in Epoxidharz eingebettet und mit dünnen Elektroden flankiert (Abbildung B-13). Am effektivsten sind Piezofasern mit rechteckigem Querschnitt [Kov07].

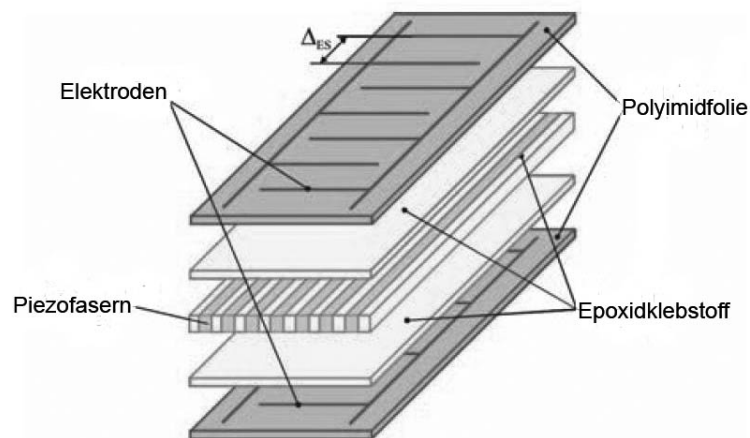


Abbildung B-13: Aufbau des Piezo-Faser-Aktors („Macro Fiber Composite“) mit rechteckigem Faserquerschnitt, nach [Kov07]

B 5.3 Formgedächtnis-Materialien

B 5.3.1 Grundlagen

Formgedächtnis-Materialien sind Legierungen oder Polymer-Blends²⁰, bei denen die Moleküle zwei unterschiedliche stabile Geometrien einnehmen können. Der Werkstoff lässt sich zwischen beiden Zuständen über Energiezufuhr - meist Temperatur - schalten. Dabei kann der Werkstoff zu einer gespeicherten Deformation zurückkehren, er „erinnert“ sich also an die ursprüngliche Form. Wird das Material in einem der beiden Zustände plastisch verformt, hat die bis zu einem gewissen Grad keine Auswirkung auf den anderen Zustand, da sich die Moleküle beim Sprung wieder neu orientieren. Formgedächtnis-Legierungen sind wesentlich weiter verbreitet und erforscht als Formgedächtnis-Polymere, weshalb die grundlegenden Zusammenhänge zunächst für erstere diskutiert werden.

²⁰ Ein Blend bezeichnet die Mischung zweier Kunststoffe, wobei eine Vernetzung der Bestandteile erfolgen kann, vergleichbar mit dem Begriff Legierung in der Metallurgie.

Formgedächtnis-Legierungen (Shape Memory Alloys - SMA)

SMA haben zwei unterschiedliche Gitterstrukturen, zwischen denen der Werkstoff springen kann. Um eine vollständige Rückbildung zu gewährleisten, dürfen die Dehnungen einen einstelligen Prozentsatz nicht überschreiten, damit die Molekülbindungen wieder zurückfinden können [Ots98].

Die gebräuchlichste Formgedächtnis-Legierung ist eine Nickel-Titan-Legierung mit gleichen Atomanteilen (NiTiNoI²¹), mittlerweile sind jedoch gut ein Dutzend anderer Werkstoffe verfügbar. Neben den klassischen Nickel-Titan-Legierungen werden vermehrt auch die kostengünstigeren Eisen-Legierungen verwendet, sie haben eine hohe Festigkeit und E-Modul, wurden bislang jedoch nur für den Einwegeffekt verwendet, s. unten [Jan05].

Grundsätzlich werden drei Umformmechanismen unterscheiden [Hum09]:

- **Einwegeffekt:** im „kalten“ bzw. martensitischen²² Zustand kann die Legierung verformt werden, jedoch in der Regel nicht mehr als 8% Dehnung, um später eine volle Rückstellung zu gewährleisten. Bei einer Erwärmung oberhalb der Übergangstemperatur tritt das Gefüge in den austenitischen bzw. „warmen“ Zustand über und nimmt wiederum die Form an, welche in diesem Zustand eingepägt wurde, dabei kann das Material Arbeit verrichten, wenn der Umformvorgang behindert wird. Wird die Legierung wieder abgekühlt, bleibt die Form des warmen Zustands jedoch erhalten, es wird also nur ein Zustand gespeichert. Die Umformtemperatur lässt sich über die Zusammensetzung der Legierung und die Bearbeitung steuern.
- **Zweiwegereffekt:** hier werden beide Zustände gespeichert und vom Legierung wieder angenommen. Das Material muss thermomechanisch angelernt werden. Nur der Übergang zum heißen Zustand erlaubt die Verwendung als Aktor, es können Umstellspannungen von bis zu 900 N/mm² [Jan05] erreicht werden. In der umgekehrten Richtung sind wesentlich geringere Spannungen möglich, das Bauteil muss in der Regel zum Rückformen entspannt sein.
- **Pseudoelastizität:** im Gegensatz zu den zwei genannten Effekten wird hier der Übergang nicht über Temperatur, sondern über Dehnungen gesteuert. Dabei ist es möglich, bei nahezu konstanter Spannung eine Dehnung von bis zu 8% in Form von Umformenergie im Material zu speichern, welche jedoch elastisch wieder abgegeben wird. Die Legierung kann die hohe Dehnung ohne Fließen aufnehmen, da es infolge der Einwirkung von der martensitischen in die austenitische Phase übergeht.

Während die ersten beiden Effekte für die Verwendung von SMA als Aktor interessant sind, ist die Pseudoelastizität vor allem für die Dämpfung von Interesse. Im Gegensatz zu duktilen Werkstoffen wie Stahl mit einer Streckdehnung von ca. 2%, zeigen SMA nicht nur höhere Werte, wegen des elastischen Verhaltens ist der Vorgang außerdem wiederholbar.

²¹ NiTiNOL: Nickel-Titanium Naval Ordnance Laboratory - Eigenname der Entwicklung der Marine der USA, welcher die erste entdeckte Formgedächtnis-Legierung bezeichnet.

²² Martensit und Austenit sind zwei Molekülstrukturen bei Metallen, beim Übergang von Austenit zu Martensit findet ein Übergang von einem kubisch-flächenzentriert zu einem kubisch-raumzentrierten Gitter statt (vgl. Abschrecken von Stahl).

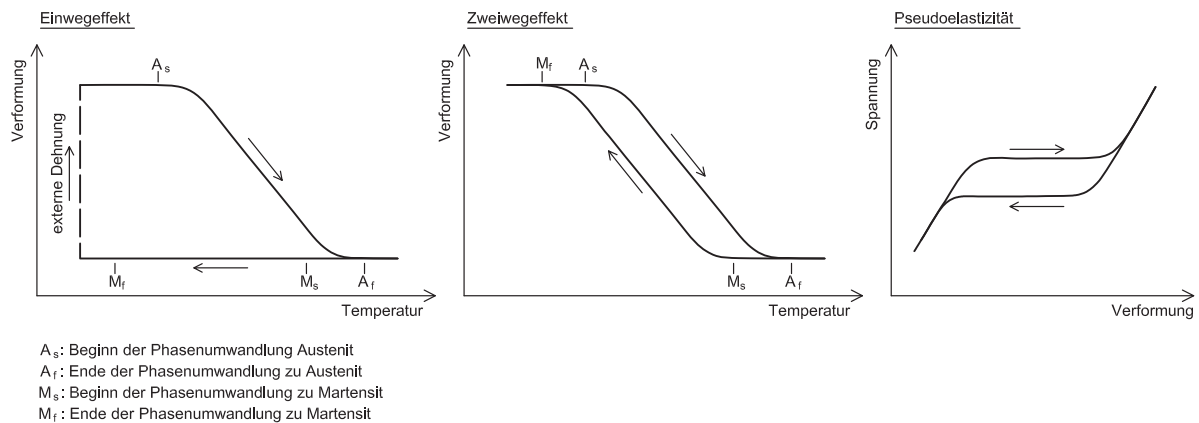


Abbildung B-14: Schematische Darstellung der Wirkungsweise von Formgedächtnis-Legierungen, nach [Jus01]

Formgedächtnis-Polymere (Shape Memory Polymers - SMP)

Formgedächtnis-Polymere sind gegenüber -Legierungen kostengünstiger und korrosionsbeständiger. Sie erlauben nicht nur wesentlich höhere Dehnungen, sondern auch eine bessere Variabilität ihrer Eigenschaften. Bislang sind die Einstellkräfte aber noch recht gering, außerdem haben sie einen niedrigeren E-Modul, was der Verwendung als strukturintegrierter Aktor entgegensteht.

Der Formgedächtnis-Effekt wird durch die Kombination unterschiedlicher Kunststoffe (Blend) und der entsprechenden Nachbehandlung erreicht. Die Polymere können physikalisch oder chemisch gekoppelt sein, dabei gibt es eine harte und eine weiche bzw. wechselnde Komponente. Neben den heute vorherrschenden thermoaktiven SMP wurden auch fotoaktive oder elektro- bzw. magnetaktive Systeme entwickelt, welche eine Fernsteuerung zulassen und auch als Sensor in Frage kommen [Rat08]. Aus gestalterischen Gründen sind Blends mit amorphen (=transparenten) Bestandteilen von Vorteil, auch wenn kristalline Vorteile in den mechanischen Eigenschaften bieten.

Abbildung B-15 zeigt einen Formgedächtnis-Polymer aus Polydimethacrylat und Butylacrylat zu gleichen Gewichtsanteilen. Die Umformtemperatur beträgt 46 °C, die Aufnahmen erfolgten in einem Zeitfenster von 35 Sekunden bei einer Umgebungstemperatur von 70 °C. Das System wurde für chirurgische Anwendungen konzipiert [Len02].

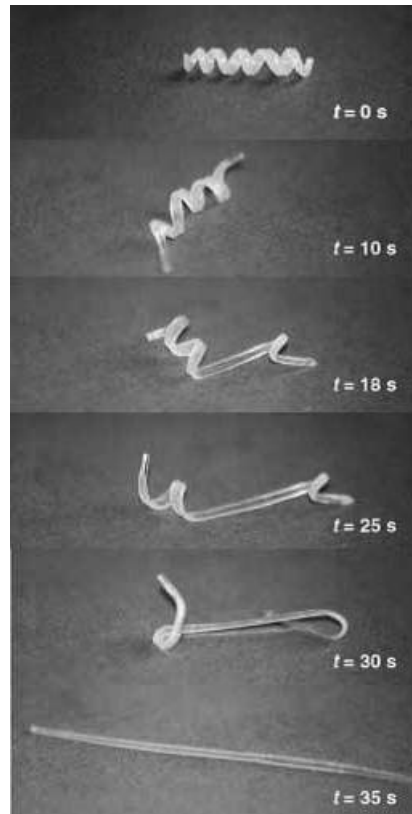


Abbildung B-15: Formgedächtnis-Polymer während der Umwandlung bei einer Umgebungstemperatur von 70 °C [Len02]

B 5.3.2 Anwendungen

Formgedächtnis-Legierungen (SMA) finden seit den 1950er Jahren Anwendung. Sehr häufig werden sie in Form von Drähten verarbeitet, weil so die erforderliche Wärmeenergie über einen durch den Draht geleiteten Stromfluss erzielt werden kann.

Im Bauwesen sind SMAs für Schwingungsdämpfung und Erdbebenschutz (Pseudoelastizität) sowie zur Vorspannung von Betonspanngliedern oder Schrauben von Interesse (Einwegeffekt) [Jan05] [Ala07]. Wesentlich weiter verbreitet sind Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, zum Beispiel für die Steuerung des Ausgangs bei Düsentriebwerken. Durch die Formgedächtnis-Legierung kann bei Starts und Landungen die Schallemissionen verringert werden (Zweiwegeffekt) [Har10]. Daneben gibt es zahlreiche Anwendungen als Ventile, Steuereinheiten, Feinjustierung oder für chirurgische Anwendungen.

Formgedächtnis-Polymere (SMP) haben derzeit noch kaum Anwendungsreife erreicht. Eine potentielle Anwendung wird für den Bau verformbarer Tragflächen gesehen. Interessant hierfür sind insbesondere Gitter- oder Hohlzellenstrukturen aus Formgedächtnis-Polymeren, welche durch Aktivierung ihr Volumen dreidimensional variieren können [Thi08].

Faserverbundwerkstoffe

Durch das Einbetten von SMA-Drähten in das Laminat wird es möglich, aktiv formbare Faserverbundwerkstoffe zu erreichen. Damit lassen sich zum Beispiel die Eigenfrequenzen von GFK-Balken beeinflussen [Lau02] oder CFK-Streifen aktiv steuern [Ara08]. Die Aktivierung erfolgt dabei jeweils über elektrischen Strom, die dabei

entstehende Abwärme kann für die polymere Matrix jedoch problematisch werden. Eine zusätzliche Kontrolle der Bauteiltemperaturen über integrierte faseroptische Sensoren kann also erforderlich werden [Ruo09].

Neben der aktiven Steuerung kann auch die Pseudoelastizität der Formgedächtnis-Legierungen bei Faserverbundwerkstoffen ausgenutzt werden. Kurze SMA-Drähte in der Matrix können zum Beispiel Zwängungsrisse²³ infolge von Temperatursprüngen im Laminat überbrücken [Kat07]. Die Zugabe von SMA-Drähten beeinflusst daneben das Bruchverhalten positiv. Insbesondere bei ausschließlich unidirektional verstärkten Bauteilen wie GFK-Bewehrungsstäben kann durch den Einbau endloser SMA-Drähte eine gute Duktilität erzielt werden (Abbildung B-16). Damit sich der pseudoelastische Effekt einstellt ist jedoch eine Dehnungen der Formgedächtnis-Legierung von 1% erforderlich, weshalb der Einbau vorgedehnter Drähte vorgeschlagen wird. Die Integration in den GFK-Bewehrungsstab im Gegensatz zum Einbau in den Beton selbst hat den Vorteil, die Drähte aus der Formgedächtnis-Legierung mit der Matrix einen besseren Haftverbund haben als mit Beton [Wie10].

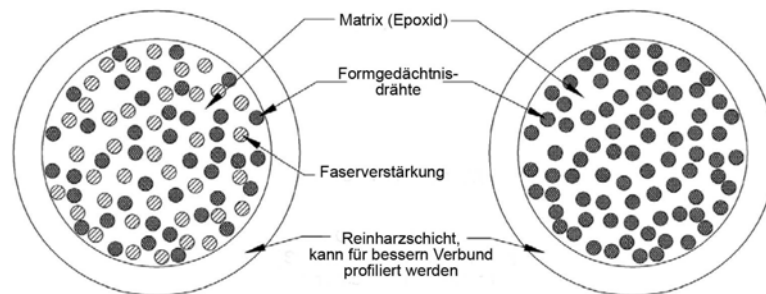


Abbildung B-16: GFK-Bewehrungsstäbe mit unterschiedlichem Anteil an Formgedächtnis-Drähten
links: mit Faserverstärkung und Formgedächtnis-Drähten,
rechts: ausschließlich Formgedächtnis-Drähte, nach [Wie10]

Werden die SMA-Drähte nur für ein kurzes Intervall erhitzt, ist auch eine dynamische Beeinflussung möglich. Da die Abkühlung und somit die Rückstellzeit einen Zeitraum von mehreren Sekunden beansprucht, bietet es sich an, die eingebauten Drähte zu gruppieren und alternierend eine der Gruppen zu erhitzen, während die anderen abkühlen [Sri01].

Modellrechnung

Um die erforderliche Menge von SMA-Drähten für die aktive Steuerung von Pultrusionsprofilen abschätzen zu können, wird im Folgenden eine vereinfachte quantitative Abschätzung durchgeführt. Eine übliche Formgedächtnis-Legierung auf Nickel-Titan Basis kann eine Umformspannung von bis zu 900 N/mm² erreichen [Hum09] und hat einen E-Modul von ca. 80 000 N/mm² in der „warmen“ (austensitischen) Phase. Kommerziell erhältliche Drähte haben dabei einen Durchmesser von ca. 0,5 mm [Kat07].

Für die Funktionsintegration wird ein Flachprofil aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit einer Dicke von 18 mm zu Grunde gelegt. Das Laminat entspricht dem in Kapitel D 1.4.2 (S. 70) behandeltem Laminat. Dabei ergibt sich in die Längsrichtung eine E-Modul von 21.777 N/mm² hat. Mit den integrierten Formgedächtnis-Drähten soll ein Einfeldträger mit 10 m Spannweite, auf eine Auslenkung von 1 m gekrümmt werden (Abbildung B-17).

²³ Da Verstärkungsfasern und Harz stark abweichende Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen, treten bei einer Temperaturdifferenz stets Zwängungsspannungen im Laminat auf. Diese können zu Rissen oder Delamination führen.

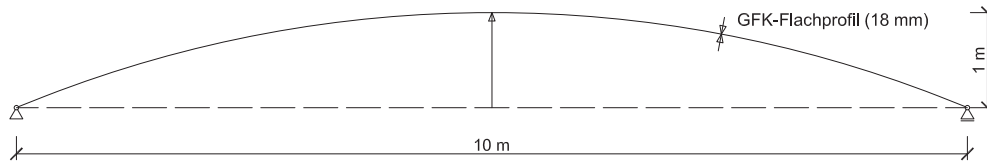


Abbildung B-17: Gewähltes System: GFK-Flachprofil mit statischer Verformung von 1 m auf 10 m Länge

Um die gewünschte Auslenkung zu erzielen, muss das antreibende Moment $0,855 \text{ kNm/m}$ betragen, bei einem inneren Hebelarm von ca. 15 mm werden damit je Seite $63 \text{ mm}^2/\text{m}$ SMA erforderlich, was 322 Drähten je laufenden Meter und je Seite Oberfläche entspricht oder einem Volumenanteil von $0,35\%$ (Abbildung B-18). Bei einem Materialpreis von minimal 250 €/kg ²⁴ Nitinol ergeben sich Zusatzkosten für das Laminat von ca. 100 €/m^2 , während das eigentliche Laminat Herstellungskosten von ca. 275 € hat.

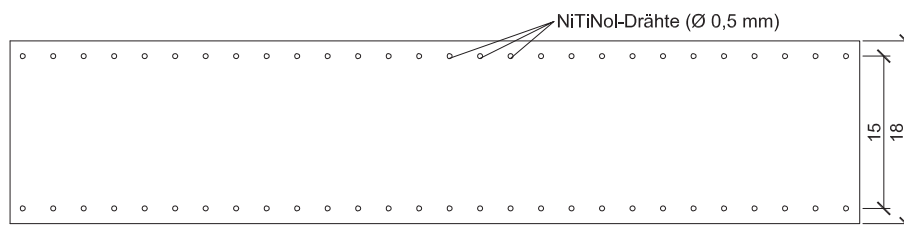


Abbildung B-18: Anordnung von NiTiNol-Drähten in einem Faserverbundwerkstoff (Angaben in mm)

Dieses Rechenbeispiel geht von einer erzielbaren Spannung von $\pm 900 \text{ N/mm}^2$ aus, Formgedächtnis-Legierungen können jedoch stets nur in eine Richtung Spannungen aufbringen, weshalb auch bei gezielter Vorspannung und Verkürzung der gezeigt Effekt nur einmalig ausführbar ist. Für Wechselbeanspruchung ist der jeweils doppelte aktive Querschnitt notwendig.

Obwohl hier der Aktor in die hauptsächliche Faserrichtung orientiert ist, kann bereits mit einem sehr geringen Volumenanteil an SMA-Drähten eine merkbare Aktivierung des Bauteils erzielt werden. Wie in B 5.1.2 auf S. 24 beschrieben, wäre eine Aktivierung senkrecht zur Tragrichtung noch effektiver. Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass sich Formgedächtnislegierungen sehr gut für eine adaptive Verformung von Faserverbundwerkstoffen eignen und auch die entstehenden Mehrkosten in einem vertretbaren Maß zu den Produktionskosten des passiven Laminats liegen.

²⁴ <http://german.alibaba.com/product-gs/nitinol-wires-282475060.html> (zuletzt geprüft am 04.08.2011)

B 5.4 Elektroaktive Polymere (EAP)

Elektroaktive Polymere ändern ihre Form bzw. ihr Volumen unter dem Einfluss eines elektrischen Felds über den Massentransport von Ionen (ionische EAPs) oder der Dilatation elektrischer Ladung (elektronische EAPs)²⁵. Elektroaktive Polymere ermöglichen sehr hohe Dehnungen (bis zu 380%), im Gegensatz zu piezoelektrischen Werkstoffen (ca. 1%) und Formgedächtnis-Materialien (max. 8%). Auf der anderen Seite ist die Eigensteifigkeit vergleichsweise gering und es werden weniger hohe Stellkräfte erzielt [Bar04]. EAPs können auch als Sensor eingesetzt werden, gebräuchlicher ist jedoch die Verwendung als Aktor.

B 5.4.1 Elektronische EAP

Elektronische EAPs werden durch ein elektrisches Feld aktiviert und arbeiten damit sehr schnell, die Dehnungen werden auch nach Ablegen der Aktivierungsspannung gehalten. Die erzielbaren Spannungen sind höher als bei ionischen Systemen. Problematisch können die hohen erforderlichen Aktivierungsspannungen sein.

Die wichtigste Bauart elektronischer EAPs ist der „dielektrische Elastomer-Aktor (DEA)“, eine zentrale Elastomerfolie wird dabei beidseitig mit Elektroden beschichtet. Beim Anlegen einer Spannung von mehreren Kilovolt entsteht infolge der elektromagnetischen Anziehung der Elektroden eine Druckkraft in Dickenrichtung der Elastomerfolie, infolge der Querkontraktion dehnt sich die Folie flächig aus. Werden zwei dielektrische Elastomer-Aktoren gegenüber an einem biegsamen Substrat appliziert, ergibt sich ein in beide Richtungen steuerbares Filmgelenk [Loc08-1]. Gleiches ist für eine flächige Struktur möglich [Loc08-2].

Abbildung B-19 zeigt ein kleinformatiges Prallluftschiff, bei dem sowohl am Rumpf als auch an der Wurzel der Schwanzflosse ein dielektrischer Elastomer-Aktor angebracht ist. Da die Steuerung nicht punktuell, sondern kontinuierlich erfolgt, ist es möglich, den natürlichen Antrieb eines Fisches nachzuahmen [Jor10].



Abbildung B-19: Verwendung dielektrischer Polymere für den Antrieb eines kleinformatigen Prallluftschiffs [Jor10]

²⁵ Bei piezoelektrische Polymeren findet keine Verschiebung von Ladungen statt, sondern nur die Bildung von Dipolen infolge einer Deformation der Molekülstruktur, daher sind dort die erzielbaren Dehnungen wesentlich geringer.

B 5.4.2 Ionische EAP

Bei ionischen EAPs wird die Volumenänderung über den Stofftransport elektrisch geladener Atome bzw. Moleküle (= Ionen) erreicht. Dieser kann über ein von außen aufgebracht elektrisches Feld oder eine chemische Einwirkung aktiviert werden. Die elektrolytische Lösung des ionischen EAPs muss stets vorhanden sein, weshalb ein dauerhafter Leck- bzw. Eintrocknungsschutz erforderlich ist. Bei der elektrischen Steuerung ist die erforderliche elektrische Feldstärke wesentlich geringer als bei elektronischen EAPs, die Reaktionszeit jedoch wesentlich länger. Die erzielbaren Spannungen sind vergleichsweise gering, unter Wegnahme der Aktivierungsspannung kann die Verformung nicht aufrechterhalten werden.

Von den zahlreichen Aktoren sind derzeit ionische Polymergele (IPG) und ionische Polymer-Metall-Verbunde (IPMC) von besonderer technischer Relevanz – auf diese wird im Folgenden noch näher eingegangen. Daneben gibt es zahlreiche weitere Systeme wie leitfähige Polymere, Kohlenstoffnanoröhrchen-Elektrolyt-Verbunde sowie elektro- und magnetorheologische Elastomere [Fuc07].

Ionische Polymer-Gele (IPG)

Polymergele sind Zweiphasensysteme, sie setzen sich aus einem porösen Feststoff und einem diesen durchdringenden Lösungsmittel zusammen. Der Feststoff besteht aus elastischen, schwach vernetzten Polymerfäden mit fest gebundenen Anionen²⁶ (= Gel), in dem flüssigen Lösungsmittel befinden sich ungebundene Ionen. Durch die elektrische Spannung werden die ungebundenen Ionen des Lösungsmittel in den porösen Feststoff hinein- oder herausgedrückt, dadurch ergibt sich eine Volumenänderung, welche das 100-fache des Ausgangswerts betragen kann. Die Reaktionsfrequenz beträgt dabei ca. 1 Hz [Gro00].

EAP-Hydrogele bestehen standardmäßig aus Polyvinyl-Alkohol-Systemen (PVA), wobei Epoxid-Hydrogele bessere mechanische Eigenschaften und eine einfachere Herstellung ermöglichen [Etc11]. Als Grundwerkstoff ist auch das natürliche Chitosan sehr interessant, welches aus dem Citin vor allem von Schalentieren wie Garnelen gewonnen wird [Yao09].

Ionische Polymer - Metall- Verbunde (Ionic polymer metal composites - IPMC)

Ionische Polymer-Metall-Verbunde bestehen aus einer für Ionen diffusionsoffenen Membran, welche zwischen zwei metallischen Elektroden angeordnet ist. Während die Anionen fixiert sind, kann ein Anteil der Kationen wandern, und zwar in Richtung der negativ geladenen Kathode. Durch den sich ergebenden Massentransport sind Dehnungen von 5 bis 10 % einstellbar (Abbildung B-20). Dabei ist es gelungen, die ionische Flüssigkeit als Weichmacher in dem Polymer zu integrieren, was hervorragende Ergebnisse an Luft liefert und die ansonsten erforderliche hermetische Abkapselung der Lösung erübrigt [Wal08].

²⁶ Ion: elektrisch geladenes Atom bzw. Molekül; Anion: negativ geladenes Ion; Kation: positiv geladenes Ion

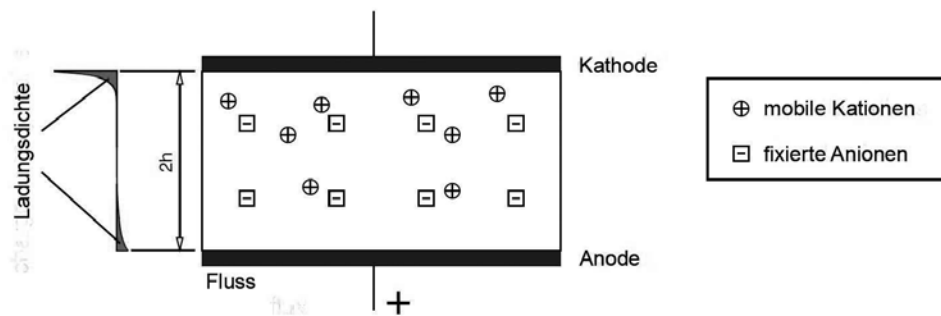


Abbildung B-20: Funktionsweise von ionischem Polymer-Metall-Verbund, nach [Wal08]

Aktoren auf der Basis von ionischem Polymer-Metall-Verbund (IPMC) haben derzeit mit die höchste Anwendungsreife von allen elektroaktiven Polymeren. Dazu gehören unter anderem Greifarme für Roboter, wobei jeder ‚Finger‘ aus einem Streifen IPMC besteht, welche an einem Ende eingespannt sind. Durch Aktivierung biegen sich die Streifen und umgreifen ein Objekt. Daneben finden IPMC Einsatz als wechslende Heckflosse eines künstlichen Fisches oder als Antrieb einer Mikro-Pumpe. In der Medizintechnik wird unter anderem eine Anwendung als Herzkomprende entwickelt [Sha05].

B 5.4.3 Faserverbundwerkstoffe

Da der E-Modul von ionischen EAPs vergleichsweise gering ist, bietet es sich an, in dem Polymer eine Faserverstärkung einzubauen. Letztlich muss dabei ein Kompromiss zwischen der gewünschten Steifigkeit und der erzielbaren Formänderungen gefunden werden, da die passiven Fasern die Volumenänderung behindern. So ist es zum Beispiel möglich, einen Faserverbundwerkstoff auf Epoxidharzbasis in eine flüssige Lösung (Elektrolyt) einzubringen und die Volumenänderung über eine Variation des pH-Werts zu steuern. Während in Laminebene nur sehr geringe Dehnungen auftreten, kann die Dicke des aktiven Laminats verdoppelt werden [Etc11]. Wie bereits in B 5.1.2 auf Seite 24 beschrieben, sollte also die hauptsächliche Tragrichtung und damit die Faserlage senkrecht zur gewünschten aktiven Steuerung orientiert sein.

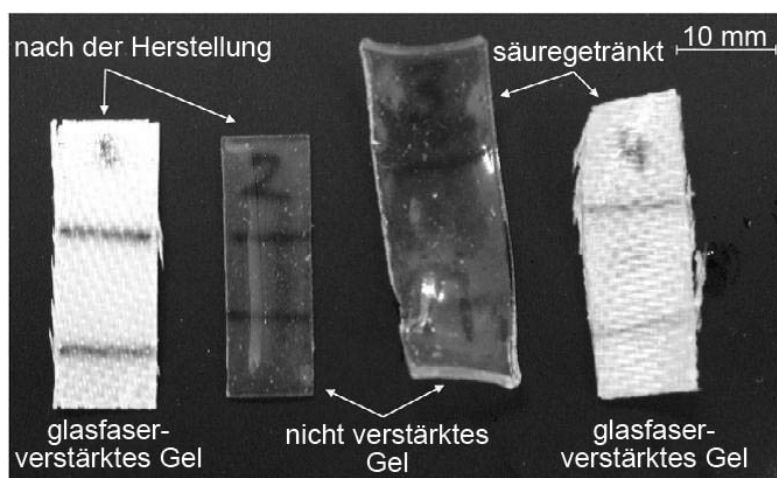


Abbildung B-21: Volumenänderung eines faserverstärkten EAPs durch Sättigung mit geladenen Lösung, Vergleich mit und ohne Faserverstärkung, nach [Etc11]

C.

Faseroptische Sensoren

C 1 Optische Fasern (Lichtwellenleiter)

C 1.1 Überblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden faseroptische Sensoren für die strukturintegrierte Sensorik eingesetzt, da im Gegensatz zu elektronischen Dehnungsmessstreifen oder Sensorfolien (Kapitel B 4) der Einbau in großformatige und vor allem lineare Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen einige Vorteile bietet. Sie haben einen geringen Durchmesser und gleichbleibende Abmessungen über die gesamte Länge, stellen also keine lokale Gefügestörung dar wie andere punktuelle Sensoren.

Als Sensor dienen optische Glasfasern, sogenannte Lichtwellenleiter (LWL), die für die Datenübertragung in der Telekommunikation entwickelt wurden (Kapitel C 1.4, S. 42). Bei der Datenübertragung wurden störende Effekte in der Signalübertragung festgestellt, welche auf Wellung des Leiters, Dehnung und Temperaturveränderung zurückgeführt werden konnten. Die Einwirkungen beeinflussen den Brechungsindex der optischen Faser und damit die Wellenlänge des Lichts, außerdem werden an lokalen Störungen Anteile des Lichtstrahls zurück reflektiert. Die Verwendung von optischen Fasern als Sensoren nützt genau diese Effekte aus, um die Größe des störenden Einflusses zu messen. Dabei ist der Einfluss auf das durch den Sensor geleitete Lichtspektrum vergleichsweise gering, bzw. es kann nur die summierte Beeinflussung über die Gesamtlänge des Lichtwellenleiters nachvollzogen werden.

Einige Arten faseroptischer Sensoren basieren auf der Betrachtung des reflektierten Lichts, es ist oft besser zu identifizieren. Bei Sensoren wird diese Reflexion künstlich hervorgerufen, um einen eindeutig zuzuordnenden Messwert zu erhalten, zum Beispiel über Faser-Bragg-Gitter²⁷.

Die theoretischen Grundlagen für den Zusammenhang zwischen der Dehnung in Glas und der Veränderung des Brechungsindex lieferte bereits Pockels um die vorletzte Jahrhundertwende [Poc1889]. Dieser Zusammenhang kann auf Lichtwellenleiter übertragen werden, welche ebenfalls aus Glas bestehen [Hil78]. Basierend auf diesen Arbeiten wurden die physikalischen Zusammenhänge zwischen dem Dehnungs- und Temperaturzustand in der optischen Faser und der Beeinflussung des Reflexionsspektrums quantitativ hergeleitet und stehen heute allgemein zur Verfügung [Kim93]. Die folgenden physikalischen Zusammenhänge beziehen sich zu großen Teilen auf diese Grundlagen.

C 1.2 Sensormechanismen

Wie erwähnt, kann bei faseroptischen Sensoren das durchgeleitete oder das reflektierte Licht gemessen werden. Daneben gibt es verschiedene Technologien, welche unterschiedliche Eigenschaften des Lichts aufnehmen und sind damit unterschiedlich ortsspezifisch. Grundsätzlich existieren drei Sensorgattungen [Udd08]:

- spektral (Faser-Bragg-Gitter, Rückstreusysteme)
- intensitätsbasiert (Mikrobiegung)
- interferenzbasiert (Mach-Zehnder, Michelson)

²⁷ Faser-Bragg-Gitter sind durch die punktuelle Variation des Brechungsindex in der optischen Faser planmäßig eingebrachte Störungen, welche die Rückstreuung wesentlich erhöhen und damit eine gezielte Auswertung des Rückstreuungsspektrums ermöglichen.

Daneben kann unterschieden werden in intrinsische und extrinsische Systeme. Im ersten Fall ist der Sensor Teil der optischen Faser, insbesondere können daher mehrere Sensoren in einer Faser angeordnet werden oder der Sensor hat eine beliebig lange Ausdehnung über die Faserlänge. Bei extrinsischen Sensoren befindet sich der Sensor am Ende der Faser, welche selbst nur als Zuleitung dient. Je Sensorfaser ist dann nur ein Sensor möglich, außerdem sind die Abmessungen der Messstelle größer als die der zuleitenden Faser, diese Sensoren stellen bei strukturintegrierter Verwendung also eine Gefügestörung dar.

Im Folgenden werden ausschließlich Faser-Bragg-Gitter betrachtet, da diese an einer beliebigen Stelle in der Sensorfaser platziert werden können, mehrere Sensoren in einem Lichtwellenleiter angeordnet werden können und die Technologie industriell verfügbar ist. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit lassen sich jedoch auch auf andere Rückstreuungssysteme übertragen (C 3.1, S. 56).

C 1.3 Herstellung

C 1.3.1 Ziehturm

Eine optische Faser ist zweischichtig: der zentralen Faserkern (fibre core) aus germaniumdotierten Quarzglas²⁸ ist von einem Fasermantel (fibre cladding) aus reinem Quarzglas umgeben. Durch die Germaniumdotierung hat der Faserkern einen abweichenden Brechungsindex, was die Lichtleitung erst ermöglicht. Zur Herstellung dient eine Vorform die bereits aus beiden Materialien besteht, der Aufbau ist affin zur späteren Faser, jedoch mit einem Durchmesser von 10 ... 20 cm. Dieser Zylinder wird in einem Graphit-Elektroofen auf ca. 2.000 °C erhitzt, verflüssigt sich an der Unterseite, wo dann die Faser abgezogen wird. Dieser Prozess erfolgt in einem sogenannten Ziehturm, bei dem sich am höchsten Punkt die Vorform befindet und die Faser vertikal nach unten abgezogen wird. Unmittelbar nach dem Abkühlen der Faser erfolgen eine Lackierung und das Aufbringen der Beschichtung (= Coating).

Bei Sensorfasern mit Faser-Bragg-Gittern werden diese entweder beim Ziehprozess vor dem Aufbringen des Coatings eingeschrieben (Ziehturm-gitter) oder zu einem späteren Zeitpunkt, wobei dann die Beschichtung entfernt und wieder aufgebracht werden muss (recoating). Die nachträgliche Wiederbeschichtung wirkt sich negativ auf die Stabilität des Coatings aus.

C 1.3.2 Beschichtung (Coating)

Das Coating dient dem Schutz der Faser gegen mechanische Beschädigung. Für Lichtwellenleiter hat sich ein zweischichtiges Acrylatcoating bewährt. Bei einer für Sensoren gebräuchlichen Faser mit einem Durchmesser von 125 µm wird zunächst ein weiches Acrylat ($E = \text{ca. } 1.000 \text{ N/mm}^2$) mit einer Schichtstärke von 37,5 µm aufgebracht. Als zweite Schicht folgt ein härteres Coating ($E = \text{ca. } 2.000 \text{ N/mm}^2$) mit einer Schichtstärke von 25 µm [Projekt]. Die Applikation findet unmittelbar im Rahmen der Herstellung statt, der thermoplastische Werkstoff wird beim Beschichten über UV-Einwirkung vernetzt. Bei Lichtwellenleitern folgt auf das Coating eine sekundäre Schutzschicht, welches jedoch nicht schubfest verbunden ist und erst zu einem späteren Zeitpunkt aufgebracht wird. Daneben gibt es viele weitere Beschichtungen, je nach technischer Anforderung. Für die Strukturintegration wurden beispielsweise Beschichtungen mit höherem E-Modul, geringerer Dicke oder besseren Verbundeigenschaften bevorzugt [Fra01] [Rot08]. Zum Beispiel konnten anorganisch-organische Hybridpolymere die Anbindung der Beschichtung an die Quarzglasfaser wesentlich verbessern [Bue01].

²⁸ Quarzglas besteht aus reinem Siliziumoxid (SiO_2), es wird auch als synthetisches Kieselglas bezeichnet.

C 1.4 Lichtleitung

C 1.4.1 Lichtbrechung

Beim Übergang eines Lichtstrahls zwischen zwei transparenten Medien mit unterschiedlichen Brechungsindices wird dieser an der Grenzfläche gebeugt. Maßgebend ist dabei der Winkel des einfallenden Lichtstrahls zur Normalen und das Verhältnis der beiden Brechungsindices. Tritt das Licht senkrecht zur Grenzfläche auf, findet keine Brechung statt. In allen anderen Fällen ist der Winkel zur Normalen auf der Seite des „optisch dichteren“ Mediums geringer. Zum Beispiel hat Vakuum einen Brechungsindex von $n = 1,0$ und Wasser von $n = 1,33$. Ein Lichtstrahl hat dann im Vakuum einen höheren Winkel zur Normalen als im Wasser. Ab einem Eintrittswinkel von ca. 48° im Wasser würde der Austrittswinkel größer 90° , es tritt eine Totalreflexion auf, d.h.: der Lichtstrahl wird an der Grenzfläche in das dichtere Medium zurück reflektiert. Die Winkel verhalten sich zueinander in folgendem Verhältnis:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{C.1})$$

θ_i : Winkel des Lichtstrahls zur Normalen im Medium i

n_i : Brechungsindex des Mediums i

Für die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Faser-Bragg-Gitter werden Standard-Singlemode-Fasern (SSMF) aus Quarzglas verwendet²⁹. Aus Kostengründen und wegen der geringeren Knickempfindlichkeit finden zunehmend auch Polymerfasern Verwendung, erreichen jedoch derzeit noch nicht die Qualität in der Lichtleitung wie optische Fasern aus Quarzglas [Zie07]. Sie werden zum Beispiel bei (nicht laminierten) Textilien eingesetzt, wenn eine hohe mechanische Belastung zu erwarten ist [Lie08].

Der Kern der Singlemode-Fasern hat einen Durchmesser von $10 \mu\text{m}$, der Mantel einen Außendurchmesser von $125 \mu\text{m}$. Für den germaniumdotierten Faserkern ergibt sich ein Brechungsindex von beispielsweise $1,464$, während der Fasermantel aus reinem Quarzglas einen Brechungsindex von $1,460$ hat. Der Grenzwinkel der Totalreflexion liegt damit bei ca. 86° zur Normalen. Tritt also ein Lichtstrahl in einem Winkel von weniger als ca. 4° zur Grenzfläche auf, wird er in den Kern zurückreflektiert, alle anderen dringen in den Fasermantel ein.

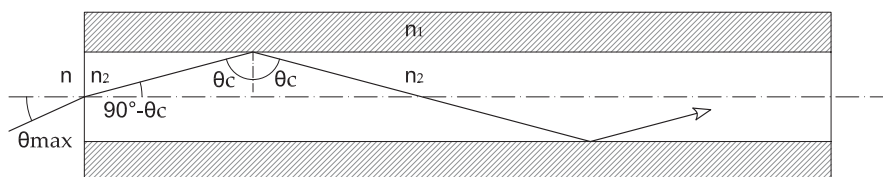


Abbildung C-1: Ermittlung der numerischen Apertur für Lichtwellenleiter (Schema)

Eine Kennzahl zur Beschreibung der Brechungsindexabstufung ist die numerische Apertur bzw. im betrachteten Fall der Akzeptanzwinkel eines in den Lichtleiter einfallenden Strahls, der gerade noch weiter geleitet wird.

²⁹ Im Gegensatz zu Lichtwellenleitern sind Glasfasern für Textilien oder als Verstärkung nur aus einem Werkstoff aufgebaut. Befindet sich die Verstärkungsfaser in einem optisch weniger dichten Medium, ist auch hier eine Lichtleitung möglich. Die Brechungsindices gebräuchlicher Harze bewegen sich im Bereich $n = 1,50 \dots 1,65$, für Verstärkungsfasern aus E-Glas liegt der Brechungsindex bei $n = 1,548$ [Kan10].

Dabei werden zwei Medienübergänge relevant: der Eintritt des Lichtstrahls in den Lichtwellenleiter und die Reflexion an der Grenzfläche zwischen Kern und Mantel (Abbildung C-1). Die numerische Apertur berechnet sich zu [Udd08]:

$$n \cdot \sin \theta_{\max} = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} = \text{NA} \quad (\text{C.2})$$

θ_{\max} : Maximaler Eintrittswinkel in den Faserkern, vom umgebendem Medium aus

n : Brechungsindex des umgebenden Mediums, z.B. Luft

n_1 : Brechungsindex des Fasermantels

n_2 : Brechungsindex des Faserkerns

NA: Numerische Apertur

Für das gewählte Zahlenbeispiel für die Brechungsindices von Faserkern und -mantel ergibt sich für die numerische Apertur ein Wert von ca. 0,11. Je höher der Wert, umso größer ist der Akzeptanzwinkel für die Lichtleitung. Da bei Singlemode-Fasern jedoch nur flache Lichtstrahlen geleitet werden sollen, wird hier eine geringe Apertur gewählt (s. C 1.4.2 Moden).

Eine lokale Krümmung der optischen Faser führt dazu, dass auf der außen liegenden Seite der Winkel des Lichtstrahls zur Grenzfläche größer wird, damit tritt ein Teil des Lichts aus dem Faserkern aus, was zu einem Intensitätsverlust (= Dämpfung) führt. Der zulässige Biegeradius ist je höher, je größer die numerische Apertur wird (Tabelle C-1). Die Grenzbiegeradien hinsichtlich mechanischer Stabilität sind den optischen Anforderungen gegenübergestellt.

Tabelle C-1: Grenzbiegeradien für faseroptische Sensoren [Projekt: Fa. Fiberware]

Kenngröße	Einheit	SSMF 1	SSMF 2	SSMF 3
Numerische Apertur	[-]	0,11	0,16	0,24
Faserdurchmesser	[μm]	125	125	125
min. Biegeradius, optisch	[mm]	7,5	6,0	5,0
min. Biegeradius, mechanisch	[mm]	12,5	12,5	12,5

C 1.4.2 Moden

Betrachtet man die geleitete Lichtwelle ausschließlich als linearen Strahl, ergeben sich unendlich viele erlaubte Winkel, welche nur kleiner als die numerische Apertur sein müssen. Da die Lichtwellen für eine Reflexion jedoch die Maxwell-Bedingungen erfüllen müssen, ergeben sich nur diskrete Lösungen für zulässige Winkel - vgl. der Lichtbeugung am Spalt [Nol08]. Die Beschreibung der auftretenden Moden kann über die Kennzahl V erfolgen, bleibt diese kleiner 2,405 wird nur die Grundmode übertragen [Lin07]:

$$V = \frac{2\pi \cdot a \cdot n_2}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_2^2}} = \frac{2\pi \cdot a}{\lambda} \cdot \text{NA} \quad (\text{C.3})$$

a : Radius des Faserkerns

n_2, n_1 : Brechungsindex des Faserkerns, -mantels ($n_2 > n_1$)

λ : Wellenlänge des Lichts

NA: numerische Apertur

Bei der Messung mit Faser-Bragg-Gittern wird im Mittel eine Wellenlänge λ von 1550 nm verwendet. Bei einer numerische Apertur von 0,11 und einem Radius des Faserkerns a von 5.000 nm (Durchmesser: 10 μm), ergibt sich

in diesem Fall eine Kennzahl $V = 2,230$. Diese ist kleiner als der Grenzwert von $V = 2,405$, daher wird in der Faser nur die Grundmode geführt, welche sich längs der Faserachse ausbreitet.

Neben den hier betrachteten Singlemode-Fasern gibt es auch Multimode-Fasern mit einem größeren Kern. Es werden neben der Grundmode weitere Moden übertragen. Infolge der Maxwell-Gleichung (C.3) handelt es sich dabei um eine endliche Anzahl von Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Winkeln zur Längsachse der Sensorfaser. Aufgrund der Überlagerung der Moden sind Multimode-Fasern für die Messtechnik nicht unbedingt geeignet, erlauben bei der Telekommunikation jedoch eine höhere Datenrate (Bandbreite).

Bisher wurde für die Reflexion nur die Grenzfläche zwischen Faserkern und -mantel betrachtet. Der Lichtstrahl kann jedoch diese Grenzfläche zunächst durchwandern, dann aber an der Außenseite des Mantels reflektiert werden. Man spricht in diesem Fall von einer Mantelmode, diese kann unter Umständen für die Sensorik von Interesse sein (Kapitel C 2.3.3, S. 54). Dazu muss jedoch auf der Außenseite des Mantels ein transparentes Medium mit einem geringeren Brechungsindex liegen, z.B. Luft.

C 1.4.3 Bänder

Durch das in dem Quarzglas eingelagerte Wasser wird das Licht bei bestimmten Frequenzen überproportional gedämpft. Die Lichtwellenleiter werden daher nur in Bereichen verwendet, die zwischen diesen Peaks liegen. Diese „optischen Fenster“ liegen in den Bereichen von Wellenlängen um $\lambda = 850$ nm, 1300 nm und 1.550 nm [Eku06]. Letzteres ist sowohl für die Datenübertragung als auch die Sensorik mit Abstand am gebräuchlichsten. Alle im Folgenden gemachten wellenlängenabhängigen Kennwerte beziehen sich auf eine Grundwellenlänge von $\lambda = 1.550$ nm.

C 2 Faser-Bragg-Gitter

C 2.1 Funktion und Anwendung

C 2.1.1 Industrielle Anwendung

Faser-Bragg-Gitter (fibre-bragg-grating FBG) sind derzeit wohl die gebräuchlichsten faseroptischen Sensoren. Durch lokale Manipulation des Brechungsindex im Faserkern wird ein Reflexionsgitter erzeugt, welches das einfallende Licht in einer spezifischen Wellenlänge reflektiert. Wird das Gitter gedehnt oder einer Temperaturänderung unterworfen, verändert sich die reflektierte Wellenlänge.

FBGs sind seit einigen Jahren industriell verfügbar, die Kosten für die benötigten Messgeräte (Interrogator) sind moderat verglichen mit anderen Technologien wie z.B. bei der Rückstreuung (Kapitel C 3). Innerhalb einer optischen Faser sind die Gitter von einer Länge von ca. 5 .. 6 mm an diskreten Punkten einbeschrieben, je nach Verteilung der Wellenlängen können mehr als ein Dutzend auf einer Faser angebracht werden. Die spätere Identifikation der einzelnen Messpunkte findet über deren spezifischen Grundwellenlänge statt, welche den einzelnen Gittern zugeordnet wird. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass die optische Faser kontinuierlich läuft und von einem beliebigen Ende her angesteuert werden kann. Es reicht aus, eines der Enden an das Messgerät anzuschließen, es können Zuleitungen und Zwischenstücke mit mehreren Kilometern Länge verwendet werden.

Da die Sensoren empfindlich auf Dehnungen und Temperaturänderung sind, kann die Wirkungsweise mit elektronischen Dehnungsmessstreifen (DMS) verglichen werden. Im Gegensatz zu diesen sind Glasfasern jedoch weniger korrosionsempfindlich, was vor allem für Langzeitanwendungen vorteilhaft ist [Bet04].

C 2.1.2 Herstellung der Gitter

Die Reflexionsgitter werden über eine Laserbestrahlung in den Faserkern eingeschrieben. Mit zwei Lasern wird der Brechungsindex über eine Länge von einigen Millimetern periodisch variiert, die Periodenlänge bzw. der resultierende Gitterabstand beträgt ungefähr $\Lambda = 0,5 \mu\text{m}$ [Leb04]. Die Variation erfolgt dabei möglichst sinusförmig, um eine optimale Rückstreuung der Wellenlänge zu ermöglichen. Das Gitter wird entweder während der Faserherstellung im Ziehturm eingeschrieben oder in einem nachträglichen Arbeitsschritt. In diesem Fall muss das bereits vorhandene Coating lokal entfernt werden und das Gitter wird einbeschrieben. Transparente Coatings, durch die die Laserstrahlen durchdringen könnten, haben meist nicht die gewünschten mechanischen Eigenschaften und entfallen daher [Wei08]. Im Anschluss muss an der Stelle des Gitters wieder ein Coating angebracht werden, die Freilegung und Wiederbeschichtung führt zu einer lokalen Beschädigung der Glasfaser und einer Kerbwirkung in der Beschichtung [Keh01].

C 2.1.3 Messwerterfassung

Von dem Messgerät wird ein Lichtstrahl in die optische Faser geleitet und gleichzeitig das reflektierte Wellenlängenspektrum aufgezeichnet. Im Messgerät wird der abgehende und einfallende Lichtstrahl über eine Weiche getrennt und ausgewertet. Als Lichtquelle dient in der Regel eine LED-Leuchte mit Lichtspektrum im Infrarotbereich. Da im Gegensatz zu anderen Messmethoden die Laufzeit des Lichtstrahls nicht zur Ortsbestimmung herangezogen wird, ist es nicht erforderlich, Laserimpulse zu verwenden. Für die Messung ist nur ein Faserende notwendig, das zweite kann als Redundanz dienen.

C 2.1.4 Reflexionsspektrum

Für den Ausgangszustand ohne Dehnungs- und Temperaturdifferenz ergibt sich der Grundwert der reflektierten Bragg-Wellenlänge λ_0 aus dem Ausgangswerten für den Brechungsindex des Faserkerns n_0 ³⁰ und dem Gitterabstand Λ_0 (Periode) zu:

$$\lambda_0 = 2 \cdot n_0 \cdot \Lambda_0 \quad (\text{C.4})$$

- λ_0 : Grundwellenläng des Faser-Bragg-Gitters
 n_0 : Brechungsindex des Faserkerns im Ausgangszustand
 Λ_0 : Gitterabstand im Ausgangszustand

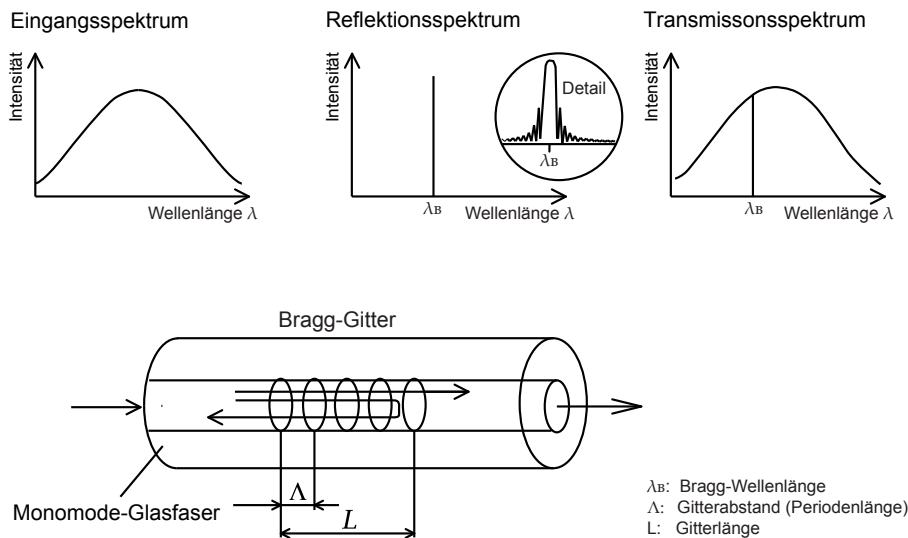


Abbildung C-2: Einfallendes Licht, Reflexionsspektrum und Transmissionsspektrum bei Faser-Bragg-Gittern, nach [Kre08]

Eine wesentliche Grundannahme ist, dass die Dehnungen und die Temperatur über den Querschnitt des Faserkerns (Durchmesser ca. 10 μm) konstant sind. Bei sehr kleinen Krümmungsradien oder lokalen Spannungen kann jedoch eine veränderliche Dehnungsverteilung auftreten. In diesem Fall müssen die opto-mechanischen Zusammenhänge nicht für die globalen Zustandsgrößen sondern für jeden finiten Ort innerhalb des Faserkerns ausgewertet und über FEM-Berechnung zum absoluten Ergebnis integriert werden. Ist jedoch ein ausreichend dickes Coating vorhanden, kann dieser Fall ausgeschlossen werden [Pra05].

Die in Kapitel D 2 durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Dehnungen innerhalb des Faserkerns als konstant angenommen werden dürfen.

³⁰ Im Folgenden ist lediglich der Brechungsindex des Faserkerns von Interesse, dieser wird daher vereinfachend mit n bzw. für den Grundwert im Ausgangszustand mit n_0 wiedergegeben.

C.2.2 Dehnungs- und Temperaturempfindlichkeit

C.2.2.1 Herleitung

Die reflektierte Wellenlänge ist abhängig von der Dehnung längs zur optischen Faser ε_1 , den Querdehnungen ε_2 und ε_3 sowie der Temperatur T ³¹. Basierend auf Formel (C.4) gilt allgemeiner formuliert:

$$\lambda(\varepsilon_i, T) = 2 \cdot n(\varepsilon_i, T) \cdot \Lambda(\varepsilon_i, T) \quad (\text{C.5})$$

- λ : Reflektierte Wellenlänge des Faser-Bragg-Gitters
- n : Brechungsindex des Faserkerns
- Λ : Gitterabstand
- ε_i : Dehnungen entlang der Hauptachse x_i
- T : Temperatur

Die Wellenlänge ergibt sich aus dem Produkt des Brechungsindex und des Gitterabstands, beide Werte hängen wiederum von den drei Hauptdehnungen und der Temperatur ab, es ergeben sich also 4 unabhängige Einflussgrößen. Schubverzerrungen haben keinen Einfluss auf die Wellenlängenänderung in der optischen Faser [Gue02]. Bei den Dehnungen handelt es sich um die Werte im Faserkern, an der Stelle des Faser-Bragg-Gitters.

Der Term wird zunächst partiell nach den 4 Variablen $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ und T differenziert und anschließend auf beiden Seiten durch die Grundwellenlänge ($\lambda_0 = 2 \cdot n_0 \cdot \Lambda_0$) dividiert³²:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta\Lambda(\varepsilon_i, T)}{\Lambda_0} + \frac{\Delta n(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)}{n_0} + \frac{\Delta n(T)}{n_0} \quad (\text{C.6})$$

- $\Delta\lambda, \lambda_0$: Differenz der Wellenlänge, Grundwellenlänge
- $\Delta n, n_0$: Differenz des Brechungsindex, Grundwert des Brechungsindex
- $\Delta\Lambda, \Lambda_0$: Differenz des Gitterabstands, Grundwert des Gitterabstands
- ε_i : Dehnungen entlang der Hauptachse x_i
- T : Temperatur

Der 1. Term beschreibt die Veränderung des Gitterabstands in Abhängigkeit der Dehnungen und Temperaturänderung. Die Querdehnungen haben hierauf keinen Einfluss, der Term kann daher durch die Summe aus Längsdehnung ε_1 und temperaturbedingter Ausdehnung ersetzt werden:

$$\frac{\Delta\Lambda(\varepsilon_1, T)}{\Lambda_0} = \varepsilon_1 + \alpha_T \cdot \Delta T \quad (\text{C.7})$$

- α_T : Wärmeausdehnungskoeffizient
- ΔT : Temperaturdifferenz

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Folgenden statt $\Delta\varepsilon_1$ die Kurzform ε_1 verwendet, wobei in jedem Fall die Dehnungsdifferenz relativ zum Ausgangszustand verstanden wird.

³¹ Im Widerspruch zu den gängigen Konventionen in der Faseroptik wird die Längsachse mit dem Index 1 versehen, um konform mit den Definitionen für Faserverbundwerkstoffe zu bleiben.

³² Die Herleitung von Formel (C.6) wird in Anhang 1 auf Seite 190 erläutert. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Differentialterme im betrachteten Bereich linear bleiben.

Der 2. Term beschreibt die Änderung der Brechzahl n in Abhängigkeit des dreidimensionalen Dehnungszustands, der Zusammenhang wird über den opto-mechanischen Effekt beschrieben. Die sogenannten Pockels-Konstanten p_{ij} beschreiben den Zusammenhang der Dehnungen ε_{ij} mit der dielektrischen Matrix B , welche wiederum die Änderung des Brechungsindex beschreibt. Für ein isotropes Material (Sensorfaser) werden nur die Koeffizienten p_{11} und p_{12} maßgebend [Ste97]. Die Kennwerte p_{11} und p_{12} sind empirische Kennzahlen, welche über Kalibrierungsversuche bestimmt werden. Es ergibt sich [Kim93]:

$$\frac{\Delta n(\varepsilon_i)}{n_0} = -\frac{n_0^2}{2} \cdot \left[p_{12} \cdot \varepsilon_1 + \left(\frac{p_{11} + p_{12}}{2} \right) \cdot (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \pm \frac{p_{11} - p_{12}}{2} (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) \right] \quad (C.8)$$

Ist der Dehnungszustand nicht transversal isotrop, also $\varepsilon_2 \neq \varepsilon_3$, ergeben sich zwei Werte für die Wellenlängenverschiebung. Das bedeutet, dass die resultierende Wellenlänge aufgespalten wird. Die sogenannte Doppelbrechung kann auch von herstellungsbedingte Inhomogenitäten oder durch äußere Fehlerquellen wie die Kontaktierung, Dehnungs- oder Temperaturunterschiede beim Einbau oder durch Sensorbiegung hervorgerufen werden [Gaf00]. Letztlich entstehen zwei Brechungsindices, welche als n_p und n_q bezeichnet werden. Die effektive Brechzahl n_{eff} entspricht dem Mittelwert beider Werte. Da das durch den Sensor geleitete Licht jedoch in der Regel nicht polarisiert ist, also die Wellen nicht nur in Richtung der Hauptachsen orientiert sind, weitet sich das Reflexionsspektrum in diesem Bereich kontinuierlich auf.

Der 3. Term beschreibt die Änderung des Brechungsindex in Abhängigkeit der Temperaturänderung. Er wird über den empirisch ermittelten thermoelastischen Koeffizient und den Quereffekten aus der Temperaturdehnung beschrieben [Kim93]. Wird bereits eingerechnet, dass sich die Temperaturveränderung auch auf die Dehnungen ε_i auswirkt, kann von folgendem Zusammenhang ausgegangen werden:

$$\frac{\Delta n(T)}{n_0} = \frac{\partial n_0}{\partial T} \cdot \frac{1}{n_0} \cdot \Delta T = \alpha_n \cdot \Delta T \quad (C.9)$$

α_n : thermoelastischer Koeffizient³³

Damit ergibt sich aus Formel (C.6) insgesamt folgender Zusammenhang:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \left(1 - \frac{n_0^2}{2} p_{12} \right) \varepsilon_1 - \frac{n_0^2}{2} \cdot \left[\left(\frac{p_{11} + p_{12}}{2} \right) \cdot (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \pm \frac{p_{11} - p_{12}}{2} (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) \right] + (\alpha_n + \alpha_T) \cdot \Delta T \quad (C.10)$$

Die Anteile aus spannungsloser Temperaturdehnung sind hier bereits berücksichtigt (!) und müssen nicht gesondert aufgebracht werden. Bei den oben dargestellten Zusammenhängen wird ebenfalls davon ausgegangen, dass die betrachteten Querdehnungen des kreisförmigen Querschnitts den Hauptspannungen entsprechen, also die beiden Werte ε_2 und ε_3 Extrema sind.

C.2.2.2 Kennwerte

Die Ermittlung der Faserkennwerte erfolgt am über Kalibrierungsversuche an einer unbeschichteten Faser. Dabei werden nach [Ste97] drei Versuche ausgewertet:

- Uniaxialer Zugversuch bei konstanter Temperatur
- Temperaturerhöhung ohne mechanische Einwirkung, zwei Temperaturniveaus
- Hydrostatischer Druckzustand bei konstanter Temperatur, zwei Druckniveaus

³³ Der thermoelastische Koeffizient wird in der Literatur unterschiedlich definiert, teilweise wird der Ausgangswert des Brechungsindex nicht eingerechnet, womit ein um ca. 45% höherer Zahlenwert entsteht.

Daneben gibt es auch andere Ansätze zur Ermittlung der Faserkonstanten, beispielsweise über Torsionsversuche [Ber88]. Für die Kennwerte n_0 , p_{11} , p_{12} , $\partial n/\partial T$ und n werden in Tabelle C-2 unterschiedliche Literaturangaben verglichen. Für die weiteren Berechnungen werden die im Rahmen des Entwicklungsprojekts ermittelten Kenngrößen angesetzt [Projekt].

Tabelle C-2: Materialkennwerte der verwendeten faseroptischen Sensoren

Kennwerte		[Sch10]	[Fra01]	[Leb04]	[Ste97]	[Projekt]
Brechungsindex des Faserkerns	n_0 [-]	1,482	1,45	1,482	1,456	1,4682
Brechungsindex des Fasermantels	n_c [-]					1,4615
Wärmeausdehnungsk. Quarzglas	α_T [10^{-6} / K]	0,55	0,5	0,55	0,5	0,51
Thermooptischer Koeffizient	$\partial n/\partial T$ [10^{-6} / K]	12,75/ n_0	8,033	11/ n_0	12/ n_0	10,9/ n_0
E-Modul	E [N/mm ²]		72.000	74.000	73.100	
Querdehnzahl der Sensorfaser	ν [-]	0,17	0,16		0,16	0,16
Pockels Konstanten	p_{11} [-]		0,168		0,17	0,113
	p_{12} [-]		0,247		0,36	0,252

Werden die Materialkennwerte aus Tabelle C-2 in die hergeleitete Beziehung (C.10) eingesetzt, ergibt sich folgender quantitativer Zusammenhang:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 0,728 \cdot \varepsilon_1 - 0,197 \cdot (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \pm 0,075 \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) + 7,93 \cdot 10^{-6} / \text{K} \cdot \Delta T \quad (\text{C.11})$$

C 2.2.3 Vereinfachte Zusammenhänge für grundlegende Belastungsfälle

Wirkt eine äußere Last auf die Sensorfaser, werden aufgrund der Querkontraktion und der Temperaturendeckung des Werkstoffs mehrere der 4 Variablen beeinflusst. Für die grundlegenden Einwirkungen wie Belastung längs bzw. quer zur Sensorfaser und Temperatur wird daher meist mit Korrelationsfaktoren bzw. „K-Faktoren“ gearbeitet, welche den direkten Zusammenhang zwischen der äußeren Einwirkung und der daraus resultierenden Wellenlängenverschiebung beschreiben.

Die folgenden Herleitungen gelten ausschließlich für blanke Sensorfasern ohne Beschichtung. Bei der strukturintegrierten Verwendung sind die Dehnungen im Faserkern nicht mit den Dehnungen des Laminats gleichzusetzen, wie in Kapitel D 2 gezeigt wird. Teilweise werden jedoch in anderen Forschungsarbeiten diese komplexeren Zusammenhänge nicht beachtet [Tao00], was jedoch zu erheblichen Fehlinterpretationen führt.

Abweichend von der in der Literatur gängigen Praxis wird im Hinblick auf die in den folgenden Kapiteln durchgeführten Untersuchungen der Kehrwert des Korrelationsfaktors $1/K$ betrachtet. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird dieser Wert im Folgenden als „Proportionalitätsfaktor“ bezeichnet.

Belastung längs zur Sensorfaser

Bei diesem Lastfall wird die Sensorfaser längs zu ihrer Achse mit einer Dehnung ε_1 beansprucht. Die Querdehnungen $\varepsilon_2, \varepsilon_3$ ergeben sich aus der Querkontraktion des Quarzglas:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu \cdot \varepsilon_1 \quad (\text{wobei: } \Delta T = 0)$$

Die Querdehnzahl von Quarzglas beträgt $\nu = 0,16$. Werden die Variablen nun in Formel (C.11) eingesetzt, ist die relative Wellenlängenverschiebung nur von der eingebrachten Längsdehnung abhängig:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 0,791 \cdot \varepsilon_1$$

Die absolute Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$ ist abhängig von der Grundwellenlänge λ_0 des betrachteten Reflexionsgitters. Für handelsübliche Bragg-Gitter-Sensoren sind Wellenlängen von $\lambda_0 = 1515 \text{ nm} \dots 1585 \text{ nm}$ gebräuchlich, daher wird von einer mittleren Grundwellenlänge von $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ ausgegangen. Für abweichende Grundwellenlängen ergibt sich gegenüber einer differenzierteren Betrachtung ein Fehler von maximal 2,2%, was für die folgenden Betrachtungen akzeptiert wird.

Der Proportionalitätskoeffizient $1/K$ für Belastung längs zur Faser, also der Quotient aus absoluter Wellenlängenverschiebung und einwirkender Dehnung ergibt sich damit zu:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_1}} = \frac{\Delta\lambda}{\varepsilon_1} = 0,791 \cdot \lambda_0 = 0,791 \cdot 1550 \text{ nm} = 1,228 \frac{\text{nm}}{10^{-3}} \quad (\text{C.12})$$

Belastung quer zur Sensorfaser

Bei diesem (imaginären) Lastfall wird die Sensorfaser so beansprucht, dass sich eine homogene Dehnung ε_3 in Querrichtung einstellt. Die Längsdehnung ε_1 sowie die zur Beanspruchung senkrechte Querdehnung ε_2 lassen sich wiederum unmittelbar über die Querdehnzahl von Quarzglas ermitteln:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\nu \cdot \varepsilon_3 \quad (\text{wobei: } \Delta T = 0)$$

Der resultierende dreidimensionale Dehnungszustand wird wiederum in Formel (C.11) eingesetzt. Für die Querdehnzahl von Quarzglas wird $\nu = 0,16$ und für die Grundwellenlänge des Reflexionsgitters $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ angesetzt.

Da in dem betrachteten Fall ein inhomogener Querdehnungszustand vorliegt ($\varepsilon_2 \neq \varepsilon_3$), liefert die Beziehung (C.11) zwei resultierende Wellenlängenverschiebungen, welche als $\Delta\lambda_p$ und $\Delta\lambda_q$ bzw. p, q bezeichnet werden. Die beiden Lösungen können auch über deren Mittelwert $\frac{1}{2}(\Delta\lambda_p + \Delta\lambda_q)$ und der sich ergebenden Differenz $\pm\frac{1}{2}(\Delta\lambda_p - \Delta\lambda_q)$ beschrieben werden. Damit ergibt sich für den Proportionalitätskoeffizienten folgendes Intervall:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_3}} = \frac{\Delta\lambda}{\varepsilon_3} = (-0,437 \pm 0,135) \frac{\text{nm}}{10^{-3}} \quad (\text{C.13})$$

Wie unterhalb Formel (C.8) auf S. 48 erläutert, tritt hier Doppelbrechung auf, das Reflexionsspektrum weitet sich auf. Da die unpolarisierten Lichtwellen radial angeordnet sind, ist für jeden Winkel die Brechung unterschiedlich. Es ergibt sich also ein kontinuierlicher Verlauf der resultierenden Wellenlängenverschiebung, welcher durch die Randwerte p, q begrenzt wird.

Punktuelle Belastung quer zur Sensorfaser

In einem tatsächlichen Belastungsversuch gemäß Literatur ist der oben beschriebene homogene Dehnungszustand nicht einstellbar. Bei dem Test wird zur Ermittlung der Querdehnungsempfindlichkeit eine punktuelle Belastung der Faser beschrieben, welche aufgrund der Lastausbreitung im kreisförmigen Querschnitt zu einem inhomogenen Dehnungszustand führt. Dabei entstehen Zugspannungen senkrecht zur Orientierung der Einwirkung (Abbildung C-3).

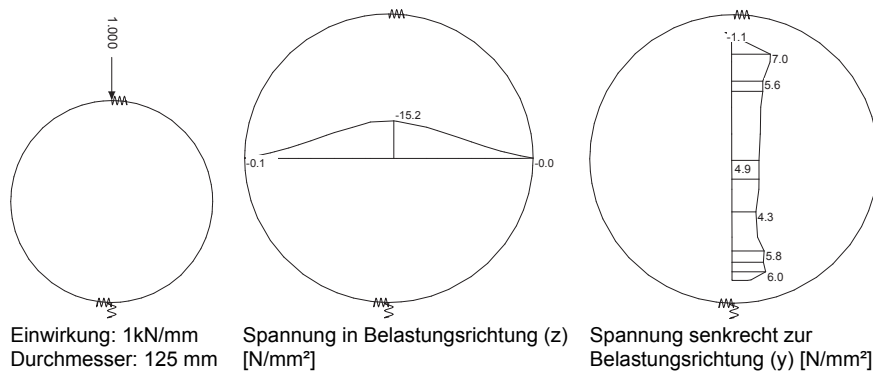


Abbildung C-3: Berechnung im Halbraum zur Querbelastung einer blanken Sensorfaser, die Einwirkung führt im Faserkern zu Druckspannungen in Belastungsrichtung (z) und Zugspannungen senkrecht zur Belastungsrichtung (y)

Aufgrund der hier verwendeten Software „Sofistik“ muss der Querschnitt im Maßstab 1000:1 abgebildet werden³⁴. Da es sich um einen isotropen Werkstoff handelt, ist die Lastausbreitung maßstabsaffin, die im Rechenmodell aufgebrachte Einwirkung von 1,0 kN/mm entspricht damit einer tatsächlichen Einwirkung von 1,0 N/mm. Die Berechnung findet im Halbraum statt, also an einem prismatischen Querschnitt. Aus den Ergebnissen in Abbildung C-3 ergibt sich im Faserkern folgender Spannungszustand im Hauptachsensystem:

$$\bar{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4,9 \\ -15,2 \end{pmatrix} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Bei einer Querdehnzahl der Sensorfaser von $\nu = 0,16$ und einem Elastizitätsmodul von $E = 74.000 \text{ N/mm}^2$ ergibt sich im Faserkern der folgende Dehnungszustand, es handelt sich um ein Hauptachsensystem:

$$\bar{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{31}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} \end{bmatrix} \cdot \bar{\sigma} = \frac{1}{E} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \cdot \bar{\sigma} = \begin{pmatrix} 0,022 \\ 0,099 \\ -0,216 \end{pmatrix} 10^{-3}$$

³⁴ Die ausführlichen FEM-Berechnungen in Kapitel D 2 werden aus diesem Grund mit einem anderen Software-Programm durchgeführt, da dort keine Übertragung des Maßstabs möglich ist. In diesem Fall kann auf eine Ähnlichkeitsbetrachtung verzichtet werden, da die Lastausbreitung von der Querdehnzahl ν abhängt und damit zwischen Modell und tatsächlichem Bauteil affin ist.

Der rechnerisch ermittelte Dehnungszustand wird in die Beziehung (C.11) eingesetzt, um die resultierende Wellenlängenverschiebung zu ermitteln. Dabei wird von einer Grundwellenlänge von $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ ausgegangen. Zur Unterscheidung des Ergebnisses für homogene Dehnung in Querrichtung gem. Gleichung (C.13), werden hier die resultierende Wellenlängenverschiebung und der Proportionalitätsfaktor $1/K$ mit einem "*" versehen.

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_3}^*} = \frac{\Delta\lambda^*}{\varepsilon_3} = (-0,280 \pm 0,170) \frac{\text{nm}}{10^{-3}} \quad (\text{C.14})$$

Es zeigt sich, dass beim praktischen Versuch die mittlere Wellenlängenverschiebung wesentlich geringer ausfällt als für den homogenen Querdehnungszustand. Der Effekt der Doppelbrechung, also die Differenz $\Delta\lambda_p - \Delta\lambda_q$ ist jedoch größer als für den homogenen Zustand.

Die berechnete Einwirkung wird durch einen Belastungsversuch überprüft (Abbildung C-4). Dabei ist die Sensorfaser an der Prüfstelle von der Beschichtung befreit, zwei identische Fasern werden über eine Wippe bis zu einer maximalen Einwirkung von $-2,3 \text{ N/mm}$ je Faser stufenweise belastet. Daraus ergibt sich eine maximale Querdehnung in Belastungsrichtung $\varepsilon_3 = -0,5 \cdot 10^{-3}$.

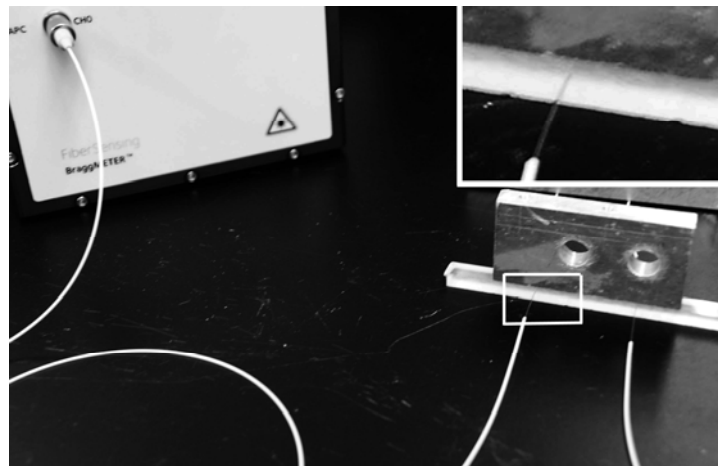


Abbildung C-4: Versuchsaufbau für Querdruck auf blanke Faser, zwei identische Sensorfaser ohne Coating werden über eine Wippe belastet

Die Prüfergebnisse zeigen erwartungsgemäß eine Verschiebung der reflektierten Wellenlänge und eine Aufweitung des Reflexionsspektrums. Dies erschwert bei zunehmender Last das Ablesen der Spitzenwerte (Abbildung C-5). Die Ergebnisse der rechnerischen Abschätzung aus Formel (C.14) sind als Zahlenwerte bzw. Begrenzungslinien ebenfalls in dem Schaubild eingetragen und zwar für die Maximallast (100%). Dabei ergibt sich unter der aufgebrachtten Dehnung von $\varepsilon_3 = -0,5 \cdot 10^{-3}$ eine resultierende mittlere Wellenlängenverschiebung von $0,14 \text{ nm}$ sowie eine Aufspaltung infolge der Doppelbrechung von $\pm 0,085 \text{ nm}$.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die versuchstechnisch ermittelte Wellenlängenverschiebung zwar im Erwartungsbereich der rechnerischen Vorhersage liegt, jedoch eine zuverlässige Auswertung nicht möglich ist, da klar ablesbare Spitzenwerte fehlen. Bei dem verwendeten unpolarisiertem Licht führt die Doppelbrechung nicht zu zwei definierten Spitzenwerten (Peaks), sondern verursacht vielmehr ein „verschmiertes“ Reflexionsspektrum.

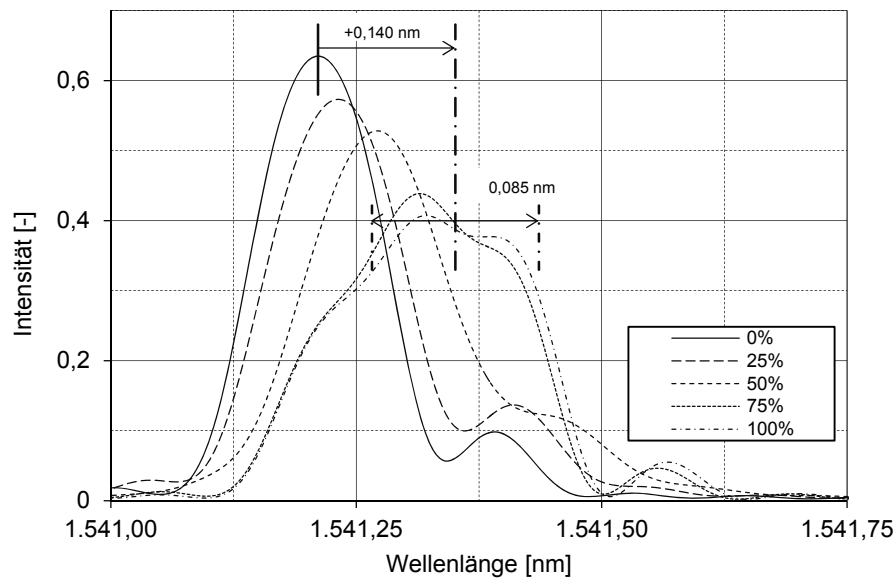


Abbildung C-5: Wellenlängenspektrum bei unmittelbarer Querbelastung der Sensorfaser, Kurven: Versuchsergebnisse unter verschiedenen Lastniveaus, wobei 100% $\triangleq \epsilon_3 = -0,5 \cdot 10^{-3}$ Markierte Grenzlinien: rechnerische Vorhersage für das Lastniveau 100% mit einer mittleren Wellenlängenverschiebung von 0,140 nm und einer Doppelbrechung von $\pm 0,085$ nm

Temperaturdifferenz

Die spannungslosen Temperaturdehnungen sind in den Zusammenhängen nach (C.11) bereits integriert. Aus diesem Grund kann die Temperatur dort unmittelbar eingesetzt werden, die Dehnungen werden zu null gesetzt. Bei einer mittleren Wellenlänge von $\lambda_0 = 1550$ nm folgt damit ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_T} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = 0,0123 \frac{\text{nm}}{\text{K}} \quad (\text{C.15})$$

C 2.3 Kombinierte Einwirkungen

Wie bei elektrischen Dehnungsmessstreifen haben auch Faser-Bragg-Gitter den Nachteil, dass eine gemessene Wellenlängenverschiebung keinen Aufschluss darüber gibt, ob diese von der Änderung des Dehnungszustands oder einer Temperaturdifferenz hervorgerufen wird, dies ist vor allem bei der strukturintegrierten Verwendung der Fall. Darüber hinaus kann in der Regel nicht geklärt werden, zu welchem Anteil eine Wellenlängenverschiebung aus Längs- (ϵ_1) oder aus Querdehnung (ϵ_2, ϵ_3) hervorgerufen wird. Aus diesem Grund wurden verschiedene Ansätze entwickelt, die 4 Eingangsgrößen zu differenzieren, diese sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

C 2.3.1 Dehnungsisolierte Gitter oder Kombination mit anderen Sensoren

Da die Temperaturempfindlichkeit von Faser-Bragg-Gittern bekannt ist, reicht es aus, die Temperatur am Messpunkt zu bestimmen und den entsprechenden Effekt aus der Wellenlängenverschiebung herauszurechnen. Für die Ermittlung der Temperatur kann ein dehnungsentkoppelter FBG-Sensor verwendet werden. Dabei wird die Faser mittels PTFE- oder Silikonhülse isoliert und gleichzeitig ein Ende gekappt, der Sensor misst dann nur Temperaturveränderung. Es ist vorteilhaft, die Beschichtung des Sensors zu entfernen, um die Reibung herabzusetzen und, weil der Anteil des Coatings an der Temperaturdehnung aufgrund des um zwei

Größenordnungen höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten nicht zu vernachlässigen ist [Fra01]. Daneben können die Öffnungen der Hülse mit je einem Tropfen Epoxidklebstoff verschlossen werden, um beim Einbau in faserverstärkten Kunststoff das Eindringen von Harz zu verhindern [Luy08].

Statt einem präparierten Faser-Bragg-Gitter kann für die getrennte Temperaturmessung auch ein Thermoelement oder ein Fabry-Perot-Sensor (C 3.2) verwendet werden. Eine weitere Möglichkeit wäre, zwei FBG-Sensoren mit unterschiedlichen Durchmessern einzusetzen, die bei gleicher Kraft eine unterschiedliche Dehnung erfahren. Diese Methode kann jedoch nicht auf strukturintegrierte Systeme übertragen werden, da dann die Dehnungen in beiden Fasern identisch sind. Die genannten Ansätze beziehen sich auf den Sonderfall, dass von außen einwirkender Querdruck keine Rolle spielt.

C 2.3.2 Gitter mit stark abweichenden Grundwellenlängen

Der Brechungsindex von Glas ist abhängig von der Wellenlänge des Lichtstrahls, der Effekt ist jedoch im Vergleich zur Dehnungs- und Temperaturabhängigkeit sehr gering ausgeprägt. Aus diesem Grund wurde bei den Herleitungen in Kapitel C 2.2.1 die Wellenlängenabhängigkeit vernachlässigt und der Brechungsindex für eine Grundwellenlänge von $\lambda_0 = 1550$ nm verwendet. Insbesondere bei Wellenlängen unter $\lambda_0 = 800$ nm ist die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Grundwellenlänge messbar [Shi81]. Zwei FBG mit stark unterschiedlichen Grundwellenlängen haben dann unterschiedliche Temperaturempfindlichkeiten, weshalb sich die Einflüsse aus Temperatur und Dehnung auseinanderhalten lassen. Dafür reicht ein Faser-Bragg-Gitter aus, welches lediglich mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen ausgelesen wird, z.B. bei $\lambda_0 = 1.300 \dots 1.550$ nm. Praktische Versuche zeigen jedoch, dass die Unterschiede für die tatsächliche Umsetzung zu gering ausfallen [Fra01].

C 2.3.3 Long-Period-Gitter

Grundsätzlich breiten sich bei einer optischen Faser die Lichtstrahlen im Kern aus, der Mantel dient nur der Lichtleitung. Befindet sich an der Außenseite der Faser jedoch ein transparentes und optisch weniger dichtes Medium (Vakuum, Luft), werden auch Lichtstrahlen mit einem stumpferen Winkel weitergeleitet. Der Lichtstrahl wird dann an der Außenseite reflektiert und als sogenannte Mantelmode weitergeleitet. (Abbildung C-6).

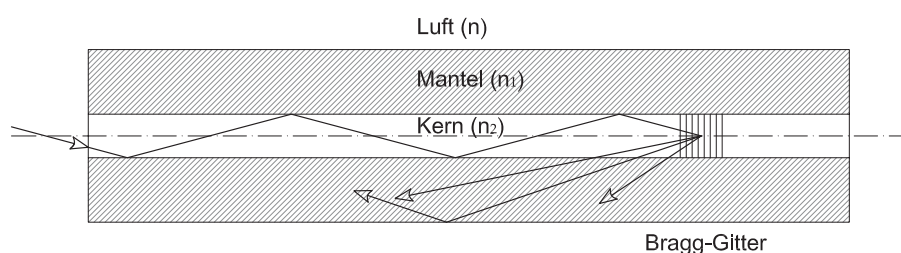


Abbildung C-6: Neben der Lichtleitung im Kern kann bei einer unbeschichteten Außenseite der optischen Faser auch eine Lichtleitung im Mantel stattfinden, sog. Mantelmode

Ein einzelnes Bragg-Gitter reflektiert dann nicht nur die Bragg-Wellenlänge, welche sich aus dem Brechungsindex des Kerns ermitteln lässt, sondern auch eine Reihe weiterer Wellenlängen, welche vom Brechungsindex des Kerns und des Mantels abhängen. Aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindizes haben diese Wellenlängen eine unterschiedliche Temperatur- und Dehnungsempfindlichkeit. Da die Dämpfung der

Mantelmoden vergleichsweise groß ist, lassen sich die Wellenlängenpeaks nicht über das Reflexions-, sondern nur über das Transmissionsspektrum ermitteln. Die Lichtquelle und der Messwertaufnehmer müssen sich also an unterschiedlichen Enden der Faser befinden [Fra01].

C 2.3.4 Polarisationserhaltende Fasern

Wie in Kapitel C 2.2.1 (S. 47f.) hergeleitet, führt ein anisotroper Querdehnungszustand in der optischen Faser zu einer Doppelbrechung, also dem Aufweiten des Reflexionsspektrums. Bei polarisationserhaltenen Fasern (polarisation maintaining fibres -PM) wird das Licht polarisiert in das Faser-Bragg-Gitter geleitet, statt einem „verschmierten“ Spektrum entstehen dann zwei voneinander zu unterscheidende Spitzenwerte (Peaks) [Udd96] [Nol08] [Maw08] [Ems07]. Außerdem wird bereits im Grundzustand durch erzwungenen, bleibenden Querdruck oder geometrischer Asymmetrie in der Faser ein anisotroper Zustand eingepägt. Dies kann über integrierte Stäbe eines anderen Werkstoffs oder einen elliptischen Querschnitt erfolgen.

Es ergeben sich also zwei Wellenlängenpeaks, welche sich unter von außen aufgebrachtem Querdruck wiederum in je zwei definierte Peaks aufspalten. Dadurch werden 4 unabhängige Messwerte erzielt, welche den 4 Variablen $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \Delta T$ zugeordnet werden können. Die eingepägte Asymmetrie muss hoch genug sein, damit die Achsenorientierung nicht durch externe Lasten gedreht wird [Bos03].

C 2.3.5 Sensornetzwerk

Die vorgestellten Methoden basieren auf dem Ansatz, an einem Punkt mehrere Messgrößen aufzunehmen, um damit die 4 Variablen eindeutig bestimmen zu können. Für die strukturintegrierte Verwendung ist das insofern problematisch, da der dreidimensionale Dehnungszustand von der Sensorfaser nicht vollständig wahrgenommen werden kann und außerdem lokale Gefügestörungen einen wesentlichen Einfluss auf das Messergebnis haben. Wie die rechnerischen Untersuchungen in Kapitel D 2 zeigen werden, können Einwirkungen senkrecht zur Faser nur sehr ungenau erfasst werden. Auf der anderen Seite wird durch die praktischen Versuche in Kapitel D 3 klar, dass die Streuung der Sensor-Bauteil-Interaktion einer quantitativen Messung von Querdehnungen entgegensteht. Nur Längsdehnungen und Temperatur können bei strukturintegrierter Sensorik zuverlässig ausgewertet werden. Die Ermittlung eines dreidimensionalen Dehnungszustands muss also über die Kopplung mehrerer, linear unabhängig orientierter Sensoren erfolgen. Hierzu wird in Kapitel E ein geeignetes Sensornetzwerk entwickelt und beschrieben. Im Gegensatz zu den beschriebenen Methoden, mehrdimensionale Sensoren zu entwickeln wird vielmehr vorgeschlagen viele, aber nur eindimensionale Sensoren einzusetzen und die 4 Variablen erst durch die Auswertung mit Hilfe der Methode künstlicher neuronaler Netze voneinander zu trennen.

C 3 Weitere faseroptische Sensoren

Neben den in C 2 beschriebenen Faser-Bragg-Gittern gibt es weitere Sensoren, die auf optischen Fasern beruhen. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen lassen sich grundsätzlich auf andere Systeme übertragen, in Einzelfällen kann also für die strukturintegrierte Sensorik die Verwendung einer alternativen Sensortechnologie zielführend sein. Vor allem Rückstreuensysteme (C 3.1) werden auf absehbare Zeit eine wichtigere Rolle spielen, sind aber derzeit für einen industriellen Einsatz meist noch zu teuer. Andere Technologien (C 3.2 und C 3.3) haben für die Anwendung als strukturintegrierte Sensoren jedoch einige Einschränkungen, weshalb sie nur für besondere Problemstellungen in Betracht kommen.

C 3.1 Spektrale Sensoren (Rückstreuensysteme)

Durch eine Interaktion mit akustischen Wellen können Photonen eines Lichtstrahls zurückreflektiert werden, der Effekt ist nach Leon Brillouin benannt, der diesen 1922 beschrieb. Die reflektierte Wellenlänge ist vom Brechungsindex des Mediums und der Wellenlänge des Schalls abhängig. Dieser Effekt wird in einer optischen Faser künstlich hervorgerufen, indem eine hohe Lichtleistung durch diese geleitet, sog. „stimulierte Brillouin-Streuung“ [Pas11]. Die Rückstreuung ist abhängig von Diskontinuitäten, der Dehnung und Temperatur im Lichtwellenleiter, sie tritt über die gesamte Länge der Faser auf. Um die Rückstreuung an einem diskreten Punkt auswerten zu können, müssen monochromatische³⁵ Lichtimpulse in die Faser gepumpt werden. Durch den Zeitversatz zwischen Generierung des Impulses bis zum Eintreffen des Antwortspektrums lässt sich der Ort der Reflexion ermitteln, die Veränderung der Wellenlänge gibt wie bei FBG einen Hinweis auf den geänderten Dehnungs- bzw. Temperaturzustand. In der Messung wird das Antwortsignal über den Zeitverlauf aufgezeichnet und kann dann einem Ort zugewiesen werden, das System wird auch als „Brillouin Optical Time Domain Reflectometer“ (BOTDR) bezeichnet.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode ist, dass Standard-Telekommunikationsfasern verwendet werden können, die Herstellungskosten für das Einschreiben von Reflexionsgittern entfallen. Außerdem ist die Messung an jedem beliebigen Punkt der Faser möglich. Nachteilig sind die wesentlich höheren Kosten des Messgeräts³⁶, die geringe Ortsauflösung und die schwierigere Auswertung der Messergebnisse. Lichtwellen haben eine sehr hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit, daher ist die Genauigkeit der Ortsauflösung durch technische Parameter beschränkt. Eine Ortsauflösung von 1 m entspricht beispielsweise einer zeitlichen Auflösung von ca. $3,3 \cdot 10^{-9}$ Sekunden.

Bei praktischen Anwendungen wurden Sensorlängen von bis zu 1,2 km umgesetzt und lieferten sehr gute Ergebnisse [Kre01] [Mat08]. Dabei erfolgte jedoch keine strukturintegrierte Verwendung, sondern z.B. die Applikation auf Stahlträger einer Brücke. Da bei großen Bauwerken viele Messpunkte erforderlich werden und andererseits eine gewisse Toleranz in der Ortsauflösung akzeptable ist, eignet sich die Rückstremethode hier hervorragend.

³⁵ monochromatisch: eine Wellenlänge

³⁶ Stand 2011 kosten handelsüblich Messgeräte für Faser-Bragg-Gitter ab 10.000 €, während die für Rückstreuung erforderlichen Messgeräte ab 150.000 € kosten.

C 3.2 Intensitätsbasierte Sensoren

Intensitätsbasierte Sensoren sind die frühesten und einfachsten faseroptischen Sensoren. Die Faser dient genau genommen nur der Zuleitung zum Sensor, welcher am Ende des Lichtwellenleiters liegt (extrinsisch). Der Lichtstrahl tritt am Faserende aus und weitet sich als Lichtkegel aus. In einem definierten Abstand befindet sich ein Spiegel, der einen Teil des Lichtstrahls zurück in die Faser reflektiert. Die Intensität des reflektierten Lichts ist abhängig vom Abstand des Spiegels zur Stirnfläche der Faser, damit kann die Änderung des Abstands gemessen werden. Problematisch ist jedoch grundsätzlich, dass jegliche Dämpfung, z.B. durch Mikrobiegung als Messgröße wahrgenommen wird, da dann ein Teil des Lichts aus der Faser ausgekoppelt wird und die Intensität sinkt [Mit08].

Fabry-Perot-Sensoren beruhen auf einer zwei hintereinander liegenden Spiegeln, wobei der erste nur einen Teil des Lichts reflektiert. Es kann die Verschiebung der beiden Spiegel zueinander gemessen werden oder die Änderung des Brechungsindex des Mediums, das sich zwischen den Spiegeln befindet (Flüssigkeit, Gas). Fabry-Perot-Sensoren werden sowohl mit Multimode als auch mit Singlemode-Fasern ausgeführt, erstere erlauben eine LED-Lichtquelle und höhere Intensitäten, die geringere Auflösung ist meist messtechnisch vertretbar. Die Funktion der beiden notwendigen Spiegel können auch zwei Faser-Bragg-Gitter übernehmen.

Mikrobiegungs-Sensoren messen den Intensitätsverlust in einer Faser, der durch kleine Krümmungsradien verursacht wird, vgl. auch C 1.4 auf S. 42. Durch eine spezielle Vorrichtung (Abbildung C-7) kann eine Dehnung senkrecht zur Faser in eine Mikrobiegung übertragen werden, deren Grad wiederum über den Intensitätsverlust gemessen wird [Bra02].

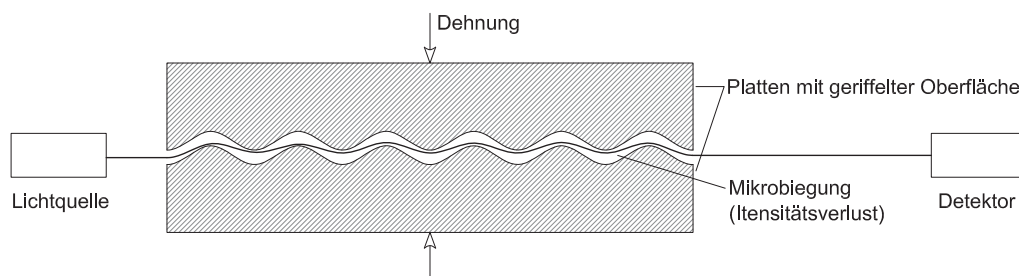


Abbildung C-7: Mikrobiegungssensor: durch die Verschiebung der profilierten Platten wird die Krümmung der optischen Faser gesteuert, welche zu einem zunehmenden Intensitätsverlust führt, nach [Nol08]

Alle drei genannten Sensorarten messen nur eindimensional, außerdem nur diskrete Verschiebungen, keine Dehnung. Andererseits sind sie unempfindlich gegenüber Querdehnung und einer Temperaturdifferenz, falls sie entsprechend installiert werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass viele andere Messgrößen aufgenommen werden können, Fabry-Perot-Sensoren sind beispielsweise als Gassensoren einsetzbar. Das Auftreten von Gas im Bereich zwischen den Spiegeln ändert den Brechungsindex und damit den Messwert.

Für die strukturintegrierte Verwendung müssen die Sensoren jedoch abgekapselt werden, was eine Störung für das Bauteilgefüge darstellt. Außerdem ist keine Reihenschaltung mehrerer Sensoren in einer optischen Faser möglich.

C 3.3 Interferenzbasierte Sensoren

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht ist vom Brechungsindex des Mediums abhängig³⁷. Damit kann über die Messung der Laufzeit eines Lichtstrahls auf Änderungen des Brechungsindex in der optischen Faser zurückgeschlossen werden. Der Brechungsindex ist bekanntlich wiederum abhängig von der Dehnung und Temperatur in der Sensorfaser.

Da die Laufzeitunterschiede – insbesondere bei nur lokaler Änderung des Brechungsindex – sehr gering sind, muss auf spezielle Verfahren zurückgegriffen werden. Ein Mach-Zehnder-Interferometer besteht aus zwei identischen optischen Fasern, die parallel zueinander geführt werden. Die Wellenlängenspektren beider Fasern werden überlagert, es entsteht eine spezifische Interferenz. Ändert sich die Laufzeit in einer der beiden Fasern, führt dies zu einer Änderung des Interferenzspektrums, aus der auf die Messgröße zurückgeschlossen werden kann [Dan08].

Durch die geringe Dämpfung sind Systeme auch über 10 km durchführbar, einzelne Einflussgrößen sind jedoch im Messsignal nicht unterscheidbar, es kann also nur die gesamte Beeinflussung festgestellt werden. Damit eignen sich diese Sensoren nicht für die Ermittlung lokaler Zustandsgrößen.

³⁷ Die Lichtgeschwindigkeit $c = 299.792.458$ m/s gilt nur für eine Ausbreitung im Vakuum. In allen anderen Medien ist die tatsächliche Lichtgeschwindigkeit geringer.

C 4 Extern applizierte Faser-Bragg-Gitter

Faser-Bragg-Gitter-Sensoren werden meist extern auf das zu überwachende Material aufgebracht, überwiegend geklebt. Die Anbindung der Sensorfaser erfolgt dabei über eine vergleichsweise kurze Klebefuge im Bereich des Reflexionsgitters. Bei diesen Anwendungen spielt Querdruck keine Rolle bzw. steht nicht im Mittelpunkt der Untersuchungen, vielmehr sollen Dehnungen in Faserrichtung vom Substrat (Bauteil) zum Sensor möglichst unmittelbar übertragen werden.

Da die optische Faser nur auf einer Seite mit dem Substrat verbunden werden kann, ergibt sich eine gewisse Mindestlänge der Anbindung, damit in der optischen Faser die gleiche Dehnung wie in dem Substrat vorhanden ist. Dies steht häufig im Widerspruch zur Anforderung, die lokalen Dehnungen möglichst punktuell zu messen. Das Messergebnis extern applizierter Sensoren ist als Integration der Dehnungen im Substrat über die Kontaktlänge zu verstehen, lokale Rissbildung kann daher nur über erhöhte Dehnungen wahrgenommen werden, die lokalen Maxima werden quasi homogenisiert [Wei08].

Für punktuelle Messungen muss daher eine möglichst starre Anbindung geschaffen werden. Diese wird vom E-Modul des verwendeten Klebstoffs und der Dicke der Klebefuge beeinflusst [Che05]. Außerdem ist es vorteilhaft, das weiche Fasercoating zu entfernen und die blanke Faser direkt auf das Substrat zu kleben. Dabei hat die Technik des Entcoatens einen hohen Einfluss auf die anschließende Zugfestigkeit der Sensorfaser. Während eine rein mechanische Bearbeitung die Zugfestigkeit um fast 85% herabgesetzt, liefern chemische Methoden wesentlich bessere Werte. Optimal sind hingegen kombinierte thermisch-mechanische Methoden [Kre08]. Alternativ kann die Sensorfaser a priori mit einer steiferen Beschichtung versehen werden, dann kann das kritische Entcoaten entfallen. Mittlerweile steht für oberflächennahe Faser-Bragg-Gitter ein reproduzierbares und zertifiziertes Applikationsverfahren zur Verfügung, welches in der VDI-Richtlinie 2660 dokumentiert wird [Sch10].

Diese Untersuchungen sind für die vorliegende Arbeit insofern interessant, da hier die Rolle der Faserbeschichtung (Coating) bei der Dehnungsübertragung eingehend untersucht wird. Die beiden Anforderungen einer möglichst punktuellen Messung einerseits und einer identischen Dehnung in der Sensorfaser und dem Substrat andererseits führen zur Empfehlung einer starren Anbindung. Wie in Kapitel D ausgeführt wird, ergibt sich für eine strukturintegrierte Sensorik das genau gegenteilige Ergebnis, weil hier die notwendige Übertragungslänge nicht relevant wird und andererseits Querdehnungen eine entscheidende Rolle spielen.

D.

Sensor-Bauteil-Interaktion

D 1 Untersuchungsgegenstand

D 1.1 Vorgehensweise

Durch den unmittelbaren Einbau der Sensorfasern in Faserverbundwerkstoffe ergeben sich zwei grundsätzliche Unwägbarkeiten: einerseits weichen die mechanischen und thermischen Kennwerte des Laminats von denen der optischen Faser ab, andererseits besteht eine erhebliche Variabilität hinsichtlich der exakten Lage des Sensors im Querschnitt und den geometrischen Imperfektionen aufgrund der Gefügestörung. Liegt die Sensorfaser zwischen zwei Einzelschichten eines Laminats, können darüber hinaus keine eindeutigen Randbedingungen für das Grundmaterial zu Grunde gelegt werden. Trotz zahlreicher Arbeiten auf diesem Gebiet, steht eine grundsätzliche Klärung der Sensor-Bauteil-Interaktion bislang aus. Bisherige Untersuchungen beschränken sich auf geometrisch einfache Stäbe mit ausschließlich unidirektionaler Faserverstärkung und Dehnung in Bauteillängsrichtung oder auf flächige Lamine mit der Lage der Sensorfaser innerhalb einer homogenen Einzelschicht.

Das vorliegende Kapitel D gliedert sich in vier Abschnitte. Zunächst werden die Grundlagen für die Sensor-Bauteil-Interaktion beleuchtet und die zu untersuchenden Faserverbundwerkstoffe analysiert (Kapitel D 1). Es folgt die mikromechanische Analyse einer in Faserverbundwerkstoff eingebetteten Sensorfaser. Mit Hilfe von dreidimensionalen Finite-Element-Berechnungen wird die Dehnungsverteilung im Querschnitt und Materialkompatibilität untersucht (Kapitel D 2). Die Berechnungsergebnisse werden über orientierende Laborversuche überprüft und dabei die praktische Leistungsfähigkeit integrierter Sensoren bewertet (Kapitel D 3). Eine abschließende Gegenüberstellung der rechnerischen Vorhersagen mit den Ergebnissen der Versuche erfolgt in Kapitel D 4 auf Seite 149.

Zustandsanalyse

Bei den verwendeten Faser-Bragg-Gittern ist der Zusammenhang zwischen dem vorhandenen dreidimensionalen Dehnungs- und Temperaturzustand im Faserkern zur damit verbundenen Änderung der Bragg-Wellenlänge λ_B und des Spektrums des reflektierten Lichts hinlänglich bekannt. Die dazu erforderlichen opto-mechanischen Beziehungen wurden in Kapitel C erläutert. Ebenfalls bekannt ist die Ermittlung der Dehnungen an einem diskreten Punkt in einem Faserverbundwerkstoff infolge äußerer Einwirkungen mittels klassischer Laminattheorie (CLT).

Jedoch entspricht der Dehnungszustand in der Sensorfaser nicht dem Dehnungszustand im angrenzenden (peripheren) Faserverbundwerkstoff und zwar unabhängig davon, ob der Sensor in Richtung der Hauptachsen des Laminats orientiert ist. Daher wird als Bindeglied eine mikromechanische Analyse eingeführt, welche die Sensor-Bauteil-Interaktion beschreibt (Abbildung D-1).

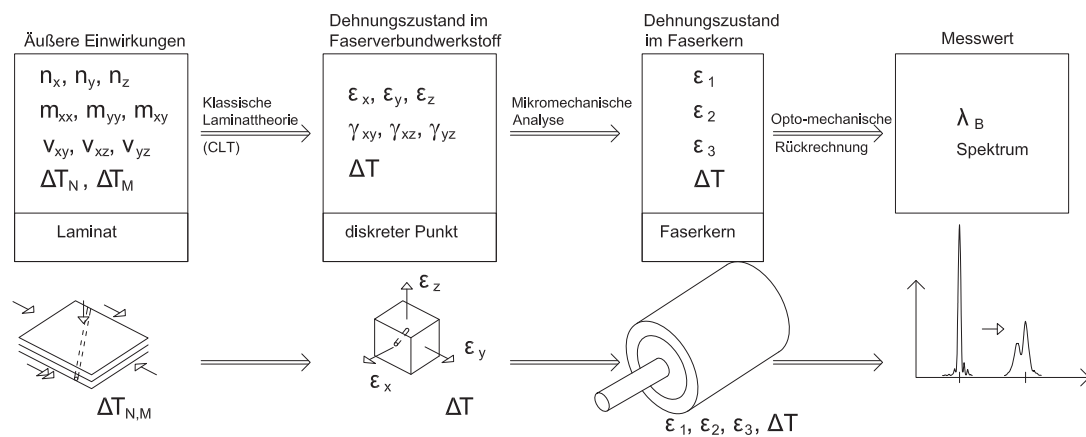


Abbildung D-1: Ablaufschema zur Bauteilanalyse, dabei weicht das Hauptachsensystem des Laminats (x,y,z) von der Achsdefinition bezüglich der Sensorfaser ab (x_1,x_2,x_3)

Integration von Sensorfasern

Die Einbettung der Sensorfasern in den Verbundwerkstoff kann über unterschiedliche Verfahren erfolgen. Entscheidend ist dabei die Herstellung des betrachteten Bauteils – dieses kann flächig gefertigt werden (Handlaminat, Harzinfusion) oder in einem kontinuierlichen Prozess (Pultrusion, Wickeln). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Sensorfasern mit drei unterschiedlichen Technologien integriert:

- manuell während dem schichtweisen Laminieren des Verbundwerkstoffs (Handlaminat)
- automatisiert während der Pultrusion, unmittelbar zusammen mit den Verstärkungsfasern oder über eine Kanüle
- vorab auf ein Textil fixiert („Sensortexil“), welches in einem zweiten Schritt bei der Pultrusion eingebaut wird

Die Einbaumethode hat keinen unmittelbaren Einfluss auf die Interaktion zwischen Sensor und Bauteil im fertigen Zustand. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen, die Entwicklung und Umsetzung der Integrationsverfahren wird in E 2.1 auf S. 156ff. eingehend erläutert.

D 1.2 Stand der Forschung

D 1.2.1 Prismatische Stäbe mit kleinem Querschnitt

Der Einbau von Sensorfasern in prismatische Stäbe wurde bereits mehrfach erfolgreich umgesetzt und in der Praxis verwendet. Bei diesen Anwendungen handelt es sich jedoch bislang nur um kleinformatige pultrudierte Stäbe oder Lamellen und ausschließlich unidirektionaler Bewehrung aus Glas- oder Kohlenstofffasern. Diese stabförmigen Bauteile dienen als Bewehrungsstäbe, Verstärkungslamellen, Zugseile oder lediglich dem Schutz der Sensorfaser bei der Applikation. Es wird nur Längsdehnung und Temperatur relevant, aufgrund des unidirektionalen Aufbaus ist die Längsdehnung im Stab mit der im Faserkern identisch. Bei Kalibrierungsversuchen mit integrierten Fabry-Perot-Sensoren [Kal00-1] [Kal00-2] und Faser-Bragg-Gittern [Fra01] konnte ein streng linearer Zusammenhang zwischen globaler Dehnung und Wellenlängenverschiebung bestätigt werden. Die quantitative Auswertung zeigt in einigen Fällen eine Unterschätzung der tatsächlichen

Dehnungen [Wan09]. Die exakten Auswirkungen der Querkontraktion des Sensor-Bauteil-System werden dabei bislang nicht untersucht, sondern - stark vereinfachend - die Querdehnzahl des Laminats angesetzt.

Häufig dient bei diesen Bauteilen der Verbundwerkstoff nur dem Schutz des Sensors [Mat08] [Bra02]. Der einlamierte Sensor kann anschließend auf das zu überwachende Bauteil, beispielsweise Beton, aufgeklebt werden. Im Gegensatz zur direkten Applikation der Sensorfaser hat das den Vorteil, dass bei lokalen Rissen im Substrat durch den Faserverbundstab die Spannungen vergleichmäßig werden und der Sensor nicht reißt [Bas07] [Jia10].

D 1.2.2 Einbau in flächigen Laminaten

Der Einbau faseroptischer Sensoren in flächige Lamine wurde bereits wesentlich grundlegender untersucht, dabei stehen vor allem die in der Luft- und Raumfahrt gebräuchlichen kohlenstofffaserverstärkten Lamine mit unidirektionalen Verstärkungslagen im Mittelpunkt [Kol98]. Die Ankopplung der integrierten Sensoren ist vergleichsweise unproblematisch, da vorkonfektionierte Stecker bereits mit einlaminiert werden, möglicherweise mit einem Knickschutz am Laminataustritt [Udd96]. Liegt die Faser zwischen zwei senkrecht zu ihr orientierten Einzelschichten, ergeben sich seitliche Harzansammlungen (Abbildung D-2).

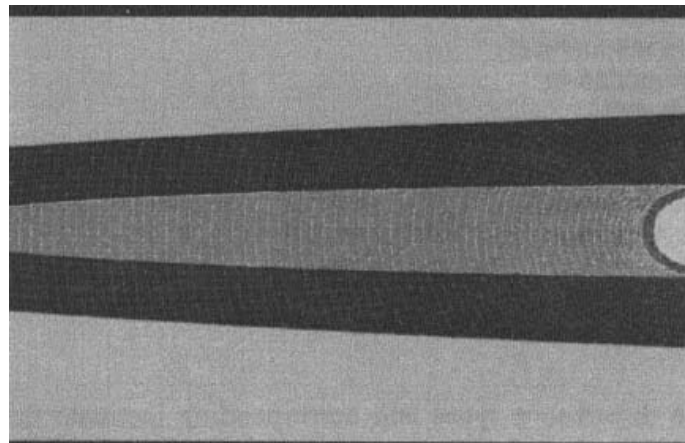


Abbildung D-2: Harzansammlung bei einer senkrecht zur Faserrichtung eingebauten Sensorfaser, Rechenmodell aufgrund geometrischer Auswertung von 100 Probekörpern [Eat95]

Bei der zweidimensionalen rechnerischen Analyse zeigt sich, dass die Spannungslinien aufgrund des geringeren E-Moduls der Harztaschen um den Sensor herum fließen, die Querdehnungen in Laminebene werden also unterschätzt. Die auftretenden Spannungskonzentrationen können Auslöser für eine Delamination sein [Eat95]. Die Harztasche ist kompakter ausgeprägt, wenn die Sensorfaser in 45°-Richtung zur Faserverstärkung orientiert ist (Abbildung D-3) [Lev01]. Wird die Sensorfaser längs zur unidirektionalen Faserverstärkung orientiert und ist die Schichtdicke ausreichend groß, beeinflusst die Sensorfaser das Messergebnis nicht [Tao00].

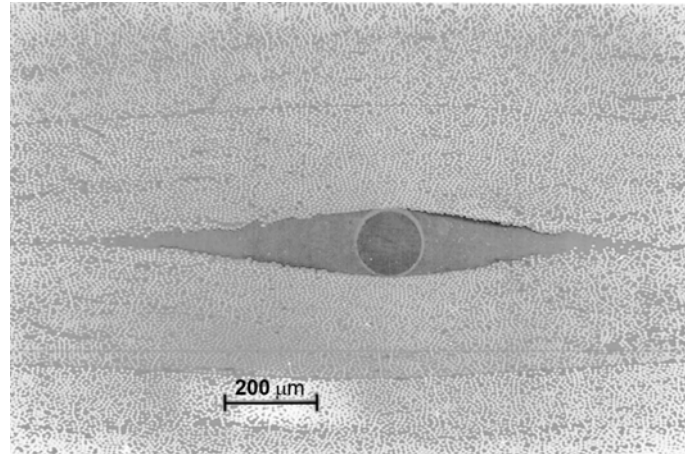


Abbildung D-3: Geometrie der Harzansammlung bei einer mit $\pm 45^\circ$ zur Faserrichtung eingebauten Sensorfaser mit einem Durchmesser von $125 \mu\text{m}$, nach [Lev01]

Eine dreidimensionale Berechnung lässt auch Rückschlüsse auf die notwendige Übertragungsrichtung längs zur Sensorfaser zu. Bei den bisher durchgeführten Forschungsarbeiten werden nur unidirektionale Schichten ohne Diskontinuitäten und ohne Fasercoating untersucht. In diesem Fall hat die Querdehnzahl des Laminats keinen Einfluss bei der Messung von Längsdehnungen, jedoch einen überproportionalen Einfluss auf die Bestimmung von Querdehnungen. Außerdem wirkt sich der E-Modul des Laminats Einfluss auf die Proportionalität zwischen einwirkender Querdehnung und der resultierenden Wellenlängenverschiebung aus [Luy08] [Luy10].

Von extern applizierten Sensoren ist bekannt, dass eine minimale Einbindlänge für eine zuverlässige Übertragung der Längsdehnungen vom Grundmaterial zur Faser erforderlich ist [Wei08] [Sch10]. Bei strukturintegrierter Verwendung sind die Kontaktlängen jedoch wesentlich größer und damit unproblematisch. Ein Herausziehen der Faser kann unter Last nicht festgestellt werden [Tao00].

Für die weitere Auswertung ist außerdem relevant, dass Schubverzerrungen in der Sensorfaser keinen Einfluss auf das Messergebnis haben, es genügt daher, die Hauptdehnungen in dieser zu ermitteln [Wae02].

D 1.2.3 Zusammenfassung

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass die Messung von Längsdehnung bei strukturintegrierter Sensorik unproblematisch ist, auch bei Harzansammlungen neben den Fasern und variierten Werkstoffparametern des umgebenden Laminats. Die Übertragung der Querdehnung ist jedoch von zahlreichen Parametern abhängig, bislang wurden nur ausgewählte Sonderfälle untersucht, welche die im Rahmen der vorliegenden Arbeit relevanten Laminats nicht abdecken. Es wurden weder Mischlaminats noch Coatings untersucht, weshalb zusätzliche Untersuchungen notwendig werden.

D 1.3 Pultrudierte Faserverbundwerkstoffe

Im Bauwesen, insbesondere im Brückenbau, hat sich die Verwendung vorgefertigter Halbzeuge aus faserverstärktem Kunststoff bewährt. Ähnlich wie im Stahlbau werden diese nicht für einzelne Bauvorhaben entworfen, sondern können in wirtschaftlichen Mengen vorgefertigt und dann individuell zur Struktur gefügt werden. Im Gegensatz zu flächigen Laminaten reduziert sich der Arbeitsaufwand für Formenbau und Herstellung erheblich, was zu günstigeren Produktionskosten führt³⁸. Außerdem ist die Faserarchitektur nach erfolgreicher Einstellung der Fertigungsvariablen vergleichsweise konstant, es werden hohe Faservolumenanteile (bis zu 70 Vol-%) und damit gute mechanische Eigenschaften erzielt. Nachteilig an der Fertigungsmethode ist die Beschränkung auf prismatische oder einfach gekrümmte Stäbe. Außerdem ist es im Gegensatz zu frei geformten Faserverbundwerkstoffen nicht möglich, Verbindungsdetails in das Bauteil zu integrieren.

Aufgrund der besonderen Bedeutung pultrudierter Profile werden die folgenden Untersuchungen auf diese fokussiert. Die faseroptischen Sensoren sollen dabei bereits im Fertigungsprozess integriert werden. Neben den Fragen zur Lagegenauigkeit und der Werkstoffinteraktion stellt sich vor allem die Herausforderung, dass pultrudierte Profile kontinuierlich gefertigt und anschließend individuell abgelängt werden. Es können also keine vorkonfektionierten Stecker für die spätere Kontaktierung eingebaut werden. Die Untersuchungsergebnisse können auch auf andere Fertigungsverfahren übertragen werden.

D 1.3.1 Herstellung

Bei der Pultrusion³⁹ werden Endlosfasern und Textilien mit Harz (duroplastischer Kunststoff) getränkt und kontinuierlich durch eine beheizte Form gezogen, wo das Harz erhärtet (Abbildung D-4). Es ist auch möglich, das Harz direkt in die beheizte Form zu injizieren. Das Harz härtet innerhalb weniger Minuten aus, die Formtemperatur beträgt beispielsweise für das gebräuchliche ungesättigte Polyesterharz ca. 120 °C. Für die Fertigungsqualität ist die exakte Führung der Faserverstärkung beim Einlaufen in die Form entscheidend, da sonst Wellungen oder Lufteinschlüsse auftreten können. Da für die Einstellung der Fertigungsparameter eine gewisse Anlaufzeit erforderlich ist, erfolgt der Prozess kontinuierlich, meist über mehrere Tage. Die Abzugsgeschwindigkeit beträgt durchschnittlich 1 m/min, die Profile werden direkt nach Verlassen der Form den Erfordernissen entsprechend abgelängt.

Pultrudierte Profile können mit Wandstärken von 0,5 ... 100 mm hergestellt werden, die Außenabmessungen betragen derzeit maximal 1,25 x 0,65 m. In der Regel sind Pultrusionsprofile prismatisch, gekrümmte Profile sind derzeit nur mit vergleichsweise kleinem Querschnitt realisierbar. Der Querschnitt kann flexibel gestaltet werden, aufgrund der Stabilität der Bauteile werden häufig Hohlprofile oder Stegplatten gefertigt.

³⁸ Stand 2011 beträgt der Produktionspreis für pultrudierte glasfaserverstärkte Profile ca. 8 €/kg, während frei geformte Laminaten wegen dem höheren Aufwand für Formenbau und Herstellung ca. 15 bis 25 €/kg kosten.

³⁹ Pultrusion (Strangziehen): zusammengesetzt aus engl. „pull“ (ziehen) und engl. „extrude“ (durchdrücken, extrudieren)

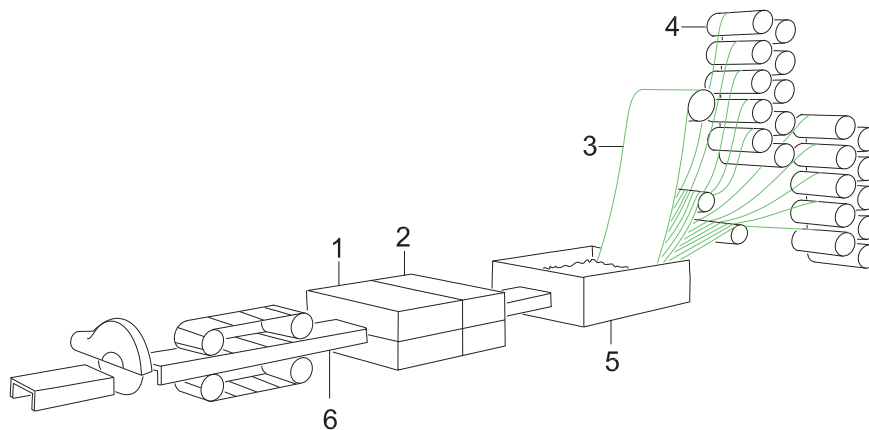


Abbildung D-4: Herstellung von faserverstärkten Profilen im Pultrusionsverfahren:
 1: beheizte Form, 2: Einlauf der Fasern, 3: textile Faserverstärkung, 4: Endlosfasern (Rovings), 5: Tränkwanne mit flüssigem Harz, 6: fertiges Profil

Harz

Als Harz kommen unterschiedliche duroplastische Kunststoffe in Frage, je nach mechanischen und chemischen Anforderungen. Das Harz bildet das Grundgerüst für den Faserverbundwerkstoff und dient hauptsächlich der Fixierung der Fasern und dem sekundären Lastabtrag. Grundsätzlich sollte ein Faserverbundwerkstoff so entworfen werden, dass die Einwirkungen direkt über die Fasern abgetragen werden. Die gebräuchlichsten Harze sind:

- Ungesättigtes Polyesterharz (UP): Standardharz, für glasfaserverstärkte Kunststoffe
- Vinylesterharz (VE bzw. PHA): bessere mechanische Eigenschaften und chemische Resistenz
- Epoxidharz (EP): hohe mechanische Eigenschaften, für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
- Acrylharz: hohe UV-Beständigkeit, gute optische Qualitäten
- Phenolharz (PF): bei besonderen Brandschutzanforderungen

Einige Harze, darunter ungesättigtes Polyesterharz schrumpfen bei der Aushärtung. Durch die Zugabe von mineralischen Füllstoffen (Kreide) kann die chemische Schrumpfung merklich reduziert werden, dies reduziert jedoch die Bindekraft des Kunststoffs. Daneben können weitere Additive und Füllstoffe hinzugefügt werden, um Farbe, chemische Widerstandsfähigkeit oder Brandverhalten zu beeinflussen, die Volumenanteile dieser Zugaben sind jedoch wesentlich geringer als die der mineralischen Füllstoffe.

Faserverstärkung

Die Faserverstärkung besteht bei der Pultrusion traditionell überwiegend aus Bündeln von Endlosfasern (Rovings) mit mehreren Tausend Fasern je Strang. Ein Roving kann glatt oder textuiert sein, wobei bei letzterem durch Nachbearbeitung Schlaufen und Verknötungen gebildet werden. Dadurch verbessern sich später im Laminat die Querzeigenschaften gegenüber Glattrovingen, meistens werden bei der Pultrusion beide Arten gemischt, wobei Glattrovingen überwiegen. Daneben werden bei größeren Querschnitten Wirrfasermatten eingebaut, um die Lochleibungsfestigkeit und Quereigenschaften der Pultrudate zu erhöhen. Gewebe spielen für

Pultrudate kaum mehr eine Rolle, da die Wellung der Fasern sich negativ auf deren Festigkeit auswirkt und zu wenig Flexibilität hinsichtlich der Faseranordnung besteht. An der Außenseite von pultrudierten Querschnitten wird häufig ein feines Vlies platziert, um eine glatte Oberfläche und einen besseren Witterungsschutz zu erzielen.

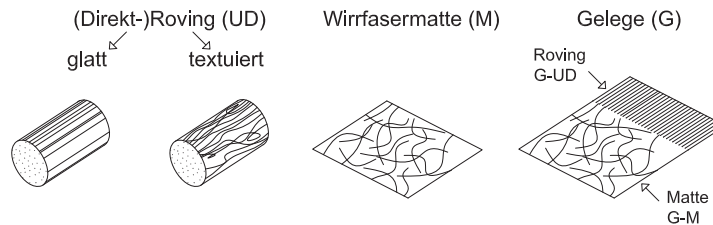


Abbildung D-5: Verarbeitungsformen der Faserverstärkung bei der Pultrusion

In den letzten Jahren werden statt loser Rovings (= Direktrovings) und Wirrfasermatten zunehmend „Gelege“ eingesetzt, bei denen beide Komponenten bereits kombiniert und vernäht sind. Damit ist es möglich, auch mehrere Lagen der Rovings zu stapeln und diese individuell in jedem beliebigen Winkel zur Fertigungsrichtung zu orientieren. Gelege spielen mittlerweile die wichtigste Rolle als Faserverstärkung bei größeren Pultrusionsprofilen und werden daher auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit herangezogen. Im Rahmen des begleitenden Entwicklungsprojekts wird die Sensorfaser unmittelbar auf das Gelege fixiert, dieses „Sensortextil“ wird anschließend bei der Pultrusion in den Querschnitt eingebaut.

D 1.3.2 Verarbeitung

Pultrudierte Profile werden unmittelbar nach der Fertigung bedarfsgerecht abgelängt. An der Schnittkante treten die Verstärkungsfasern unmittelbar an die Oberfläche, meist ist daher eine nachträgliche Lackierung an der Schnittkante erforderlich. Die Fügung einzelner Bauteile erfolgt dann durch Schrauben oder Verklebungen (Abbildung D-6).

Daher ist es nicht möglich, für die eingebauten Sensorfasern Stecker zu integrieren, da die Bauteillängen variieren und außerdem mit Gleichlaufschwankungen der Fertigung zu rechnen ist. Die optische Faser muss im Nachhinein an der glatten Schnittkante gefunden und angekoppelt werden (s. 0, S. 166).

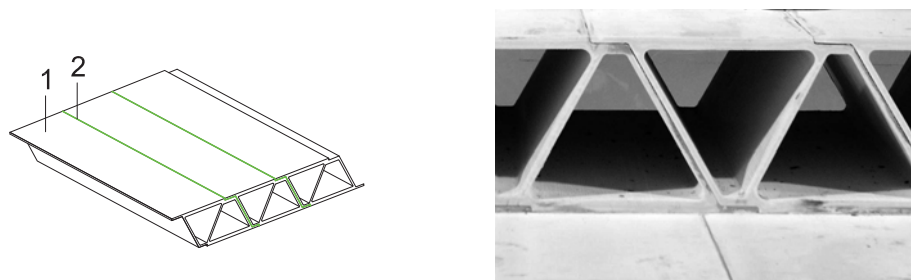


Abbildung D-6: Pultrudierte Profile, als Fahrbahnplatte für eine Brücke verklebt (1: pultrudiertes Profil, entsprechend Erfordernissen abgelängt; 2: Klebefuge)

D 1.4 Laminatanalyse

D 1.4.1 Überblick der untersuchten Lamine

Für die Untersuchungen werden pultrudierte Querschnitte ausgewählt, die im Bauwesen Verwendung finden bzw. dem typischem Laminataufbau für tragende Profile entsprechen. Daneben werden zur Vorbereitung der automatisierten Fertigung auch Handlamine hergestellt, welche im Faseraufbau an typische pultrudierte Profile orientiert sind. Die untersuchten Querschnitte sind in Tabelle D-1 zusammengestellt⁴⁰, es handelt sich ausnahmslos um glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK).

Tabelle D-1: Überblick der untersuchten Lamine aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)

Bez.	Herstellung	Geometrie	Maße [mm]	Faseraufbau	Faservolumengehalt	Harz	Füllstoffe
0	Pultrudat	Hohlprofil	280 x 240 x 18	Gelege, Matten, Rovings	M: 34% / UD: 60%	UP	Kreide
A, C	Handlaminat	rechteckig	60 x 7	Gelege, Matten	M: 27% / UD: 48%	UP-2	-
B	Pultrudat	rund	3	Rovings	60%	EP-VE	-
G	Pultrudat	rechteckig	21 x 5	Rovings	60%	VE-1	-
K	Pultrudat	rechteckig	21 x 5	Rovings	60%	VE-2	-
Q	Pultrudat	massiv	25 x 19	Rovings	50%	VE-3	-
R	Pultrudat	U-Profil	240 x 72 x 8	Gelege, Matten, Rovings	M: 27% / UD: 48% (53%)	VE-3	Pigmente (schwarz)
S	Pultrudat	L-Profil	100 x 60 x 3	Gelege	M: 27% / UD: 48%	UP	Kreide
VE-1...VE-3		unterschiedliche Vinylesterharze					
VE-2		Aropol FS 8963					
UP-1, UP-2		unterschiedliche ungesättigte Polyesterharze					
EP-VE		Mischung aus Vinylester- und Epoxidharz					

Die Herstellung der Handlamine Serie A und C erfolgt am ITKE der Universität Stuttgart. Die kleinformatigen Pultrusionsprofile B, G und K werden am ITV Denkendorf gefertigt, die großformatigen Profile Q, R, S bei Röchling Engineering Plastics (Haren), beides Projektpartner des begleitenden Entwicklungsprojekts. Das Laminat 0 bildet den Ausgangspunkt der Untersuchungen, der Querschnitt wurde als exemplarisch für ein im Bauwesen gebräuchliches Bauteil ausgewählt, an diesem finden jedoch keine praktischen Versuche statt.

Zweischichtiges Gelege „860“

Die Faserverstärkung der untersuchten Lamine besteht vorwiegend aus einem zweischichtigen Gelege aus unidirektional orientierten Rovings (360 g/m²) und einer aufgenähten Lage Wirrfasern (500 g/m²): Beide Komponenten sind über Polyesterfäden vernäht (Abbildung D-7). Das Gelege wird kontinuierlich bei einer Fertigungsgeschwindigkeit von 1 m/min kontinuierlich zusammengesetzt und vernäht. Die Breite ergibt sich aus den Anforderungen für das Pultrusionsprofil, sie beträgt typischerweise 100 bis 2.000 mm, kann aber auch wesentlich darüber liegen. Die Rovings sind bei den betrachteten Laminen immer in Längs- bzw. Pultrusionsrichtung angeordnet. Die effektive Dicke des Geleges im eingebauten Zustand beträgt ca. 1,0 mm, je nach Faservolumengehalt. Bei den betrachteten Laminen sind 3 bis 17 Gelege übereinander angeordnet. Für die rechnerische Betrachtung wird jedes Gelege in zwei Einzelschichten unterteilt, welche analog zu Direktrovings (UD) und Wirrfasermatten (M) über die klassische Laminattheorie abgebildet werden können.

⁴⁰ Die in der alphabetischen Reihenfolge ausgelassenen Buchstaben beziehen sich auf Probekörper, welche zwar im Rahmen eines Kooperationsprojekts untersucht, im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht behandelt werden.

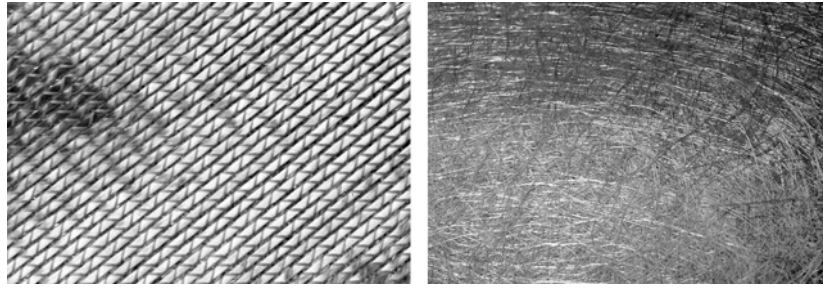


Abbildung D-7: Zweisichtiges Gelege „860“
links: Blick auf die Roving-Seite mit Nähfäden aus Polyester; rechts: Wirrfasermatte

Verwendete Harze

Bei den untersuchten Laminaten wird hauptsächlich Vinylesterharz eingesetzt. Da die mechanischen Eigenschaften produkt- und füllstoffabhängig sind, werden im Folgenden drei verwendeten Rezepturen des Vinylesterharzes unterschieden. Daneben wird ein Probekörper mit einem Mischsystem aus Vinylester- und Epoxidharz untersucht, die Handlamine basieren auf ungesättigtem Polyesterharz. Folgende Harze kommen für die untersuchten Probekörper zur Anwendung:

- UP-1: Ungesättigtes Polyesterharz mit Kreide zur Reduktion der Schrumpfung
- UP-2: Ungesättigtes Polyesterharz, ohne Füllstoffe, mit Härter und Beschleuniger
- EP-VE: Epoxid-Vinylesterharz, Aushärtetemperatur (Einstellung) von 90 °C
- VE-1: Vinylesterharz „Derakane Momentum 470-300“
- VE-2: Vinylesterharz „Aropol FS 8963“
- VE-3: Vinylesterharz nach „Rezeptur 400“ der Firma Röchling Engineering Plastics

Ermittlung der Laminatkennwerte

Die Laminatkennwerte werden nach VDI-Richtlinie 2014 ermittelt, wobei für die Rechenschritte die Software „Compositor“ genutzt wird, s. Softwareverzeichnis. Die Kennwerte der Matrices entstammen Tabellenbüchern [Bau07], die Faserkennwerte sind in der Software „Compositor“ bereits abgelegt. Der Faservolumengehalt wird über eine Vermessung von Probekörpern abgeschätzt und in die Laminatanalyse übertragen.

D 1.4.2 Grundlaminat Serie 0

Als Grundsystem dient das Laminat eines großformatigen GFK-Hohlprofils 280 x 240 18 mm. Der Querschnitt ist in Anhang 3 abgebildet. Für die Laminatanalyse wird die Faserverstärkung in 4 unterschiedliche Typen eingeteilt:

- G-UD: Roving-Schicht der Gelege (360 g/m², in Längsrichtung orientiert)
- G-M: Wirrfaserschicht der Gelege (500 g/m²)
- M: Wirrfasermatten (450 g/m², Eigenschaften wie G-M)
- UD: Direktrovings, Eigenschaften etwas besser als G-UD, da nicht gewellt

Der Hersteller (Röchling) gibt für das Laminat einen über Versuche ermittelten Zug-E-Modul von 25.000 N/mm² und einen Biege-E-Modul mit 21.000 N/mm² an. Die Laminatanalyse liefert um 13 bzw. 15% niedrigere E-Moduln (Tabelle D-2).

Tabelle D-2: Laminataufbau des Grundlaminats Serie 0

	No. k	Bez.	Dicke t [mm]	G.-Masse g [g/m ²]	VoL-% [%]	Orient. φ [°]	Dichte ρ [g/cm ³]	Mechanische Kennwerte					
								E ₁ [N/mm ²]	E ₂ [N/mm ²]	G ₂₁ [N/mm ²]	ν_{21} [-]	$\alpha_{T,1}$ [10 ⁻⁶ /K]	$\alpha_{T,2}$ [10 ⁻⁶ /K]
2x	1,3	G-M	0,59	500	34	-	1,66	12205	12205	3912	0,56	23,9	23,9
	2,4	G-UD	0,24	360	60	0	2,01	43584	17125	6115	0,28	7,2	40,0
2x	5,6	M	0,53	450	34	-	1,66	12205	12205	3912	0,56	23,9	23,9
6x	7,9,...17	G-M	0,59	500	34	-	1,66	12205	12205	3912	0,56	23,9	23,9
	8,10,...18	G-UD	0,24	360	60	0	2,01	43584	17125	6115	0,28	7,2	40,0
	19	M	0,53	450	34	-	1,66	12205	12205	3912	0,56	23,9	23,9
	20	UD	0,58	870	60	0	2,01	45400	17125	6115	0,28	7,5	40,0
	21	M	0,53	450	34	-	1,66	12205	12205	3912	0,56	23,9	23,9
	22	UD	0,58	870	60	0	2,01	45400	17125	6115	0,28	7,5	40,0
	23	M	0,53	450	34	-	1,66	12205	12205	3912	0,56	23,9	23,9
9x	24,26,...40	G-UD	0,24	360	60	0	2,01	43584	17125	6115	0,28	7,2	40,0
	25,27,...41	G-M	0,59	500	34	-	1,66	12205	12205	3912	0,56	23,9	23,9
Gesamt			17,9	18610	41	div.	1,75	21777	14947	4556	0,48	13,5	32,2
<i>Harz: Ungesättigtes Polyesterharz mit Kreide; Welligkeit der Gelege: 0,96</i>								17851	14085	<-- Biegung			

Bei der Darstellung der Querdehnzahl wird die Konvention nach VDI 2014 angewendet, wonach der erste Index den Ort und der zweite die Wirkung beschreibt. Damit bedeutet ν_{21} die Dehnung in Richtung x_2 infolge einer Einwirkung in Richtung x_1 . Bei den Wirrfaserschichten treten Querdehnzahlen höher als 0,5 auf. Da jedoch die Querdehnzahl in Dickenrichtung (x_3) kleiner 0,5 ist, ist der Volumenerhalt gegeben.

Für Gelege wird von einer Welligkeit von 0,96 ausgegangen, was zu einer Reduktion des E-Moduls führt, bei Geweben läge der Faktor bei 0,85 ... 0,9 – je nach Bindungsart.

Kennwerte in Dickenrichtung

Bei einer klassischen Laminatanalyse sind die Materialkennwerte in Richtung der Bauteildicke (x_3) nicht relevant, im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind diese jedoch erforderlich. Bei den unidirektionalen Schichten (UD, G-UD) sind die Kennwerte in Dickenrichtung identisch mit denen senkrecht zur Faserorientierung. Sie können einfach übernommen werden. Die Eigenschaftender Wirrfaserschichten (M, G-M) in Dickenrichtung können abgeschätzt werden, indem eine fiktive unidirektionale Schicht mit identischem Faservolumengehalt betrachtet wird. Die Kennwerte dieses Laminates in senkrecht zur Faserorientierung entsprechen in guter Näherung den gesuchten Kennwerten für die Wirrfaserschicht in Dickenrichtung:

$$E_{3,M} = 8326 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{13,M} = G_{23,M} = 3200 \text{ N/mm}^2$$

$$\nu_{13,M} = \nu_{23,M} = 0,33$$

$$\alpha_{T,3,M} = 61,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$$

Abschätzung der Festigkeit

Zur Abschätzung der Bruchfestigkeit bzw. Bruchdehnung werden zunächst die Festigkeiten der Einzelschichten ermittelt. Die Kennwerte der Wirrfaserlagen (G-M, M) werden gemäß DIN 18820 abgeschätzt, für die unidirektionalen Schichten (UD, G-UD) ist eine direkte Berechnung über die klassische Laminattheorie möglich. Da für die weiteren Arbeitsschritte nur eine ungefähre Abschätzung benötigt wird, werden die Festigkeitswerte in einem stark vereinfachten Verfahren berechnet.

Tabelle D-3: Festigkeitskennwerte der Einzelschichten für das Grundlaminat Serie 0

Bez.	Festigkeiten				
	f_{1z} [N/mm ²]	f_{1d} [N/mm ²]	f_{2z} [N/mm ²]	f_{2d} [N/mm ²]	f_{2l} [N/mm ²]
G-M, M	100	100	100	100	50
G-UD	951	507	28	96	47

Unter zentrischer Zuglast verteilen sich die Spannungen entsprechend den E-Moduln der Einzelschichten. Das erste Versagen (first-ply-failure) tritt bei einer globalen Dehnung $\varepsilon_{1,k} = 9,88 \cdot 10^{-3}$ auf. Aufgrund der unterschiedlichen E-Moduln beträgt die Spannung in der Wirrfaserschicht 100 N/mm², während die unidirektionalen Schichten bei einer Spannung von 377 bzw. 397 N/mm² noch deutlich unter der Bruchspannung liegen. Im Mittel beträgt die Festigkeit für das Bauteil:

$$f_{1,k} = 183 \text{ N/mm}^2 \text{ (first ply failure)}$$

Bei anschließender Laststeigerung liefern die Wirrfaserschichten rechnerisch keinen Beitrag mehr zur Festigkeit, es ist jedoch noch eine Laststeigerung möglich, da die unidirektionalen Schichten noch nicht versagt haben. Vernachlässigt man die sukzessive zunehmende Rissbildung, würde die Spannung der unidirektionalen Schichten auf 620 bzw. 644 N/mm² springen, die Last könnte nochmals bis zu einer Grenzdehnung von $\varepsilon_{L,k} = 22,60 \cdot 10^{-3}$ gesteigert werden, dies entspricht für das Gesamtbauteil einer imaginären Festigkeit von:

$$f_{L,k} = 281 \text{ N/mm}^2 \text{ (last ply failure, bezogen auf Anfangsquerschnitt)}$$

Aus Materialtests des Herstellers wurde eine effektive charakteristische Zugfestigkeit ermittelt von:

$$f_{U,k} = 267 \text{ N/mm}^2 \text{ (Prüfung)}$$

D 1.4.3 Handlaminat Serie A, C

Für die Materialtests werden zunächst Handlaminat mit integrierten Sensorfasern angefertigt, welche sich bezüglich Werkstoff und Faseraufbau am Grundlaminat (Serie 0) orientieren, jedoch eine geringere Schichtanzahl haben. Das Laminat besteht aus sechs Gelegen und einer zentralen Wirrfasermatte, dabei ergibt sich eine effektive Gesamtstärke von 7 mm. Da die manuelle Tränkung und Verdichtung des Laminats einen höheren Harzanteil erfordert, erreichen die Faservolumenanteile nur ca. 80% der Werte des Grundlaminats (Tabelle D-4).

Die Laborfertigung der Probekörper erlaubt eine klare Nachvollziehbarkeit und Optimierung des Faseraufbaus und Fertigungsprozesses, weshalb sie für den ersten Entwicklungsschritt unerlässlich ist. Insbesondere hinsichtlich der Verarbeitung der Sensoren konnten dabei wertvolle Hinweise gewonnen werden. Es werden vorkonfektionierte Sensoren verwendet, welche bereits mit Steckern versehen sind. Diese sind sowohl längs zur hauptsächlichen Faserrichtung als auch +/- 45° dazu angeordnet, es ergibt sich eine sogenannte Rosette zur Ermittlung eines flächigen Dehnungszustands. Diese Rosetten sind bei den Probekörpern C-0xx und C-1xx in mittlerer Lage, zwischen Schicht 6 und 7 platziert. Bei den Probekörpern C-2xx sind die Rosetten auf beiden Außenseiten, jeweils unter dem ersten Gelege angeordnet, also zwischen Schicht 2 und 3, sowie den Schichten 11 und 12.

Tabelle D-4: Laminataufbau der Handlamine (Serie C)

No. k	Bez.	Dicke t [mm]	G.-Masse g [g/m ²]	Vol-%	Orient. φ [°]	Dichte ρ [g/cm ³]	Mechanische Kennwerte					
							E ₁ [N/mm ²]	E ₂ [N/mm ²]	G ₂₁ [N/mm ²]	ν ₂₁ [-]	α _{T,1} [10 ⁻⁶ /K]	α _{T,2} [10 ⁻⁶ /K]
1	G-M	0,75	500	27	-	1,56	10219	10219	3270	0,56	27,4	27,4
2	G-UD	0,3	360	48	0	1,85	35635	11837	4414	0,30	8,6	50,1
3	G-M	0,75	500	27	-	1,56	10219	10219	3270	0,56	27,4	27,4
4	G-UD	0,3	360	48	0	1,85	35635	11837	4414	0,30	8,6	50,1
5	G-M	0,75	500	27	-	1,56	10219	10219	3270	0,56	27,4	27,4
6	G-UD	0,3	360	48	0	1,85	35635	11837	4414	0,30	8,6	50,1
7	M	0,7	450	27	-	1,56	10219	10219	3270	0,56	27,4	27,4
8	G-UD	0,3	360	48	0	1,85	35635	11837	4414	0,30	8,6	50,1
9	G-M	0,75	500	27	-	1,56	10219	10219	3270	0,56	27,4	27,4
10	G-UD	0,3	360	48	0	1,85	35635	11837	4414	0,30	8,6	50,1
11	G-M	0,75	500	27	-	1,56	10219	10219	3270	0,56	27,4	27,4
12	G-UD	0,3	360	48	0	1,85	35635	11837	4414	0,30	8,6	50,1
13	G-M	0,75	500	27	-	1,56	10219	10219	3270	0,56	27,4	27,4
Gesamt		7,0	5610	32	div.	1,65	16919	11725	3564	0,51	16,6	36,6
<i>Harz: Unges. Polyesterharz ohne Füllstoffe; Welligkeit der Gelege: 0,96</i>							15388	11506	<-- Biegung			

Ein orientierender weggesteuerter Zugversuch nach DIN EN ISO 527-4 mit extern applizierten elektronischen Dehnungsmessstreifen liefert im Dehnungsbereich von $0,5 \dots 2,5 \cdot 10^{-3}$ einen effektiven E-Modul von 19.600 N/mm^2 , was ca. 16% über der rechnerischen Vorhersage von 16.919 N/mm^2 liegt.

D 1.4.4 Unidirektional verstärkte Profile (Serien B, G)

Die Einbettung von Sensorfasern in der automatischen Pultrusion wird zunächst mit kleinen und ausschließlich unidirektional verstärkten Querschnitten durchgeführt. Bei den einzelnen Probekörpern kommen unterschiedliche Vinylesterharze bzw. ein Vinylester-Epoxidharz-Gemisch zur Anwendung, jeweils ohne Füllstoffe. Für die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften kann dieser Unterschied vernachlässigt werden, jedoch unterscheiden sich die Haftzugfestigkeiten der einzelnen Harze beträchtlich. Dies kann bezüglich der Anbindung der Sensorfaser an die Matrix entscheidend werden (E 2.1.3, S. 159). Die Sensorfasern werden bei der Pultrusion unmittelbar eingebaut.

Weitere untersuchte Lamine, welche jedoch nicht für die Versuche herangezogen wurden, sind in Anhang 7 auf Seite 212 zusammengestellt.

Tabelle D-5: Mechanische Eigenschaften unidirektional verstärkter Profile in Abhängigkeit des Faservolumengehalts

No. k	Bez.	Dicke t [mm]	G.-Masse g [g/m ²]	Vol-%	Orient. φ [°]	Dichte ρ [g/cm ³]	Mechanische Kennwerte					
							E ₁ [N/mm ²]	E ₂ [N/mm ²]	G ₂₁ [N/mm ²]	ν ₂₁ [-]	α _{T,1} [10 ⁻⁶ /K]	α _{T,2} [10 ⁻⁶ /K]
35	UD	div.	div.	35	0	1,67	27630	6698	2688	0,30	9,0	46,5
40	UD	div.	div.	40	0	1,74	31120	7559	3006	0,30	8,3	43,5
45	UD	div.	div.	45	0	1,81	34610	8616	3382	0,29	7,7	40,4
50	UD	div.	div.	50	0	1,88	38100	9927	3834	0,29	7,2	37,3
55	UD	div.	div.	55	0	1,94	41590	11576	4387	0,28	6,8	34,1
60	UD	div.	div.	60	0	2,01	45080	13682	5078	0,27	6,5	30,9
65	UD	div.	div.	65	0	2,08	48570	16429	5962	0,27	6,2	27,7
70	UD	div.	div.	70	0	2,15	52060	20100	7128	0,26	6,0	24,5

Harz: Vinylesterharz ohne Füllstoffe

D 2 Mikromechanische Analyse

D 2.1 Systemgenerierung

D 2.1.1 Zielstellung

Die folgenden Betrachtungen untersuchen die Dehnungsübertragung zwischen dem Grundmaterial (Laminat) und dem Kern der optischen Faser, wo sich das Faser-Bragg-Gitter (FBG) befindet. Der für das Messergebnis maßgebende Faserkern hat einen Durchmesser von lediglich 10 μm , die gesamte Sensorfaser mit Coating jedoch einen Durchmesser von 250 μm und die Einzelschichten der Lamine Dicken von 300 ... 750 μm ⁴¹. Es soll untersucht werden, wie das Coating, unterschiedliche Lamine und Geometrien den Zusammenhang zwischen Einwirkung und Messergebnis beeinflussen. Die Ergebnisse dienen der Vorhersage der zu erwartenden Messwerte, der Auswahl eines geeigneten Coatings und der Analyse von Fehlerquellen. Das Berechnungsergebnis ist der dreidimensionale Dehnungszustand Faserkern entlang der Hauptachsen⁴². Unter Anwendung der bekannten opto-mechanischen Zusammenhänge kann daraus auf die resultierende Wellenlängenverschiebung geschlossen werden.

D 2.1.2 Werkstoffkennwerte

Die Materialkennwerte werden konstant, also linear-elastisch und isotherm angenommen. Bei den untersuchten Systemen liegen die Beanspruchungen im elastischen Bereich der Werkstoffe, außerdem sollen nur Temperaturänderungen im unweit der Raumtemperatur untersucht werden. Es lagen keine temperaturabhängigen Materialkennwerte der untersuchten Werkstoffe vor.

Faserverbundwerkstoff

Für die Berechnungen werden die Materialkennwerte zunächst für das in D 1.4.2 beschriebene Grundlaminat angesetzt. Dabei werden die unidirektionale Faserlage (UD) und die Wirrfaserschicht (M) angesetzt. Bei den folgenden Systemen werden weitere unidirektionale Schichten mit abweichenden E-Moduln untersucht, außerdem Bereiche mit Harzansammlung ohne Faserverstärkung. Aufgrund des geringen Durchmessers der Verstärkungsfasern (16 ... 30 μm) im Verhältnis zur Sensorfaser mit Coating (250 μm) wird auf eine Diskretisierung von Einzelfasern verzichtet und vielmehr die mittleren Eigenschaften der Einzelschichten angesetzt. Die Kennwerte sind in Tabelle D-6 auf S. 75 zusammengefasst.

Die Querkontraktion des Laminats ist von besonderer Bedeutung für die Sensor-Bauteil-Interaktion. Jedoch sind die Querdehnzahlen in der Praxis häufig nur ungenau bekannt. Außerdem existieren konkurrierende Definitionen der Querdehnzahl. Gemäß der VDI-Richtlinie 2014 gilt:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_{12} \frac{\sigma_2}{E_2} - \nu_{13} \frac{\sigma_3}{E_3}; \quad (\text{D.1})$$

⁴¹ Aufgrund der Größenverhältnisse kann innerhalb des Faserkerns von einem einheitlichen Dehnungszustand ausgegangen werden [Pra05]

⁴² Im Kern der Sensorfaser werden nur Dehnungen in Richtung der Hauptachsen ε_1 , ε_2 , ε_3 sowie Temperaturänderung untersucht, da Schubverzerrungen γ_{ij} keine Einfluss auf das Spektrum des reflektierten Lichts und damit auf das Messergebnis haben [Wae02].

Außerdem gilt gemäß VDI-Richtlinie 2014:

$$\nu_{12} \cdot E_1 = \nu_{21} \cdot E_2 \quad (\text{D.2})$$

Wird also eine zweidimensionale UD-Schicht mit Faserorientierung in Richtung x_1 betrachtet ($E_1 > E_2$), so ist ν_{12} stets kleiner als ν_{21} ⁴³. In der vorliegenden Arbeit wird die Notation der VDI-Richtlinie 2014 verwendet, wonach der erste Index die Wirkung und der zweite die Ursache beschreibt, diese ist für Faserverbundwerkstoffe auch gebräuchlich [Puc96]. Im Gegensatz dazu bezieht sich das verwendete FEM-Programm ANSYS auf die umgekehrte Notation, was bei der Eingabe zu beachten ist⁴⁴.

Optische Faser

Bei den Berechnungen werden ausschließlich Standard Singlemode Fasern (SSMF) untersucht. Die mechanischen Kennwerte (E-Modul, Querdehnzahl) der optischen Faser aus Quarzglas sind aus der Literatur hinlänglich bekannt. Die Eigenschaften des Faserkerns sind identisch mit denen des Fasermantels.

Tabelle D-6: Mechanische Kennwerte für die durchgeführten Berechnungen

Kenngrößen	Opt. Faser		Faserverbundwerkstoff ³⁾				Coating ⁵⁾			
	Quarzglas	UD1 unidir. GFK ¹⁾	M Wirrfaser GFK ⁴⁾	UP unges. Polyester- harz	inneres	äußeres	ein- schichtig			
Außendurchmesser	d	[μm]	125				200	250	250	
Eigengewicht	γ	[kN/m^3]	25,0	20,1	16,6	12,0	12,0	12,0	12,0	
E-Modul	x-Achse	E_1	[N/mm^2]	74000	43584	12205	4000	1270	2280	2100 ⁶⁾
	y-Achse	E_2	[N/mm^2]	--	17125	12205	--	--	--	--
	z-Achse	E_3	[N/mm^2]	--	17125	8326 ²⁾	--	--	--	--
G-Modul	xy-Achse	G_{12}	[N/mm^2]	$E/(2+2\nu)$	6115	3912	$E/(2+2\nu)$	$E/(2+2\nu)$	$E/(2+2\nu)$	$E/(2+2\nu)$
	xz-Achse	G_{13}	[N/mm^2]	--	6115	3200 ²⁾	--	--	--	--
	yz-Achse	G_{23}	[N/mm^2]	--	6116	3200 ²⁾	--	--	--	--
Querdehnzahl	xy-Achse	ν_{21}	[-]	0,16	0,28	0,56	0,38	0,40	0,40	0,40
	xz-Achse	ν_{31}	[-]	--	0,28	0,33 ²⁾	--	--	--	--
	yz-Achse	ν_{32}	[-]	--	0,40	0,33 ²⁾	--	--	--	--
Wärmeausdehnungskoeffizient	x-Achse	$\alpha_{T,1}$	[$10^{-6} / \text{K}$]	0,51	7,17	23,9	75,0	80,0	80,0	80,0 ⁶⁾
	y-Achse	$\alpha_{T,2}$	[$10^{-6} / \text{K}$]	--	40,0	23,9	--	--	--	--
	z-Achse	$\alpha_{T,3}$	[$10^{-6} / \text{K}$]	--	40,0	61,5 ²⁾	--	--	--	--
Quelle			Projekt	Projekt	Projekt	[Bau07]	Projekt	Projekt	--	

1) : unidirektionale Schicht des Geleges entsprechend dem Grundsystem (Serie 0)

2) : zur Ermittlung der Eigenschaften in der Dicke werden die Kennwerte einer vergleichbaren UD-Schicht in Querrichtung angen.

3) : aus dem Programm Compositor Mix ermittelt

4) : Mattenschicht des Geleges bzw. reine Mattenschicht gemäß Grundsystem (Serie 0)

5) : Projektergebnisse

6) : wird im Rahmen der Parameterstudie variiert

⁴³ Mit anderen Worten: eine Spannung in Querrichtung (σ_2) führt nur zu kleinen Dehnungen in Längsrichtung, da die höhere Steifigkeit in diese Richtung die Dehnung behindert.

⁴⁴ Das Programm ANSYS fragt die Querdehnzahl „ ν_{xy} “ ab, dabei ist jedoch nach Definition für Faserverbundwerkstoffe der Wert von ν_{21} einzutragen, analog ist dies für „ ν_{yz} “ und „ ν_{xz} “ zu beachten.

Coating

Die Beschichtung der optischen Faser – das Coating – kann hinsichtlich Dicke, Werkstoff und Schichtung erheblich variieren. Das Standardsystem für extern applizierte optische Fasern besteht aus einem zweischichtigen Acrylsystem mit einer weichen Innenschicht und einer härteren Außenschicht. Das Coating wird bereits bei der Fertigung der optischen Faser aufgebracht und dient dem Schutz gegen mechanische Beschädigung. Ausgehend von dem Grundsystem wird auch ein einschichtiges Coating betrachtet und die Auswirkung der Variation des E-Moduls betrachtet. Außerdem werden Systeme ohne Coating untersucht.

D 2.1.3 Statisches System

Die mikromechanischen Berechnungen werden mit der Finite-Element-Software ANSYS durchgeführt (s. Softwareverzeichnis auf S. 196). Das Programm erlaubt es einerseits die finiten Elemente mit der erforderlichen Dimension von wenigen Mikrometern abzubilden, außerdem ist eine in alle drei Dimensionen variable Elementvernetzung möglich⁴⁵.

Für die Berechnung wird ein quaderförmiger Ausschnitt mit einer Länge von 10 mm und eine Breite sowie Dicke von jeweils 4 mm angesetzt, in dem sich die optische Faser zentrisch befindet. Dies ist zwar erheblich größer als die tatsächliche Dicke einer homogenen Einzelschicht mit 0,3 ... 0,75 mm, dient aber der Homogenisierung der einwirkenden Dehnungen. Um die Berechnungszeiten zu reduzieren, wird die dreifache bzw. doppelte Symmetrie der untersuchten Struktur ausgenutzt. Für die Diskretisierung wird daher ein räumliches Achtel- bzw. in Ausnahmefällen ein Viertelmodell verwendet.

Achsdefinition

Wie in Abbildung D-1 (S. 63) erläutert, müssen für die Untersuchungen drei Koordinatensysteme betrachtet werden:

1. Koordinatensystem des Laminats (hier: des pultrudierten Profils) mit x, y, z - Koordinaten
2. Koordinatensystem der Einzelschicht mit ξ, ζ, ς - Koordinaten
3. Koordinatensystem bzgl. der Sensorfaser mit x_1, x_2, x_3 - Koordinaten

Für die Berechnungen wird das Koordinatensystem bezüglich der Sensorfaser angesetzt, damit ist die x_1 -Achse entlang der Sensorfaser orientiert⁴⁶, x_2 entlang der Fläche des Laminats und x_3 in Dickenrichtung (Abbildung D-8).

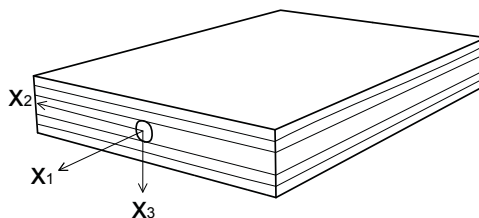


Abbildung D-8: Achsdefinition, orientiert an der Ausrichtung der Sensorfaser

⁴⁵ Einige andere Finite-Element-Programme erlauben lediglich eine zweidimensionale Vernetzung, bei Volumenkörpern müssen dann identische Elementdicken verwendet werden. Es handelt sich dabei nur um eine Halbraumbetrachtung.

⁴⁶ Die für Faserverbundbauteile gebräuchliche Definition, dass die Faserorientierung der x_1 -Achse entspricht, steht teilweise im Widerspruch zur Handhabung bei faseroptischen Sensoren, wo die Faserorientierung in der Regel als x_3 -Achse definiert wird.

Vernetzung

Die Netzfeinheit variiert zwischen einer Elementgröße von ca. 15 μm im Kern der optischen Faser bis zu 150 μm in den Randbereichen des Laminats, jeweils in alle drei Dimensionen⁴⁷. Insbesondere im Bereich des Coatings wird eine höhere Netzfeinheit gewählt, da wegen der Übergänge zwischen den unterschiedlichen Werkstoffen mit Sprüngen in den Dehnungsverläufen zu rechnen ist. Die eigentliche optische Faser kann als homogen angesehen werden, der Faserkern hat identische mechanische Eigenschaften wie der Fasermantel. Aus diesem Grund ist die dort gewählte Netzfeinheit geringer.

Die Anzahl der finiten Elemente war durch die verwendete Berechnungssoftware begrenzt, ein feineres Netz war daher nicht realisierbar. Aus diesem Grund sind vor allem die ermittelten Dehnungen an den Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Werkstoffen mit Unsicherheiten behaftet. Eine feinere Netzeinteilung wäre vor allem für das Coating wünschenswert, da aufgrund der unterschiedlichen Materialkennwerte von Laminat, Coating und Sensorfaser an den Grenzflächen Sprünge in den Dehnungsverläufen auftreten.

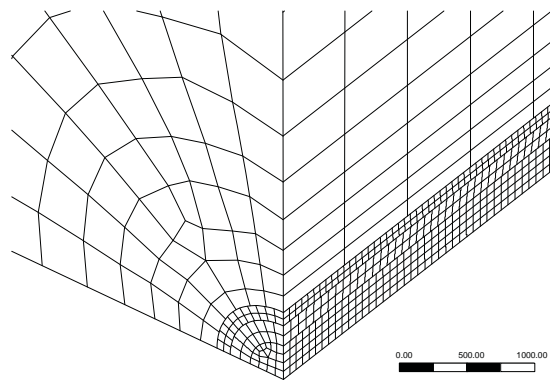


Abbildung D-9: Vernetzung des Berechnungsmodells am Beispiel des Grundsystems
Abmessungen des 1/8-Modells: 5 mm x 2mm x 2mm
Netzfeinheit war durch verwendete Berechnungssoftware beschränkt

Grenzflächen

Als Grenzflächen werden die Übergänge zwischen zwei Werkstoffen bezeichnet. Dort ändern sich die mechanischen Eigenschaften sowie die Netzfeinheit, wobei deutliche Sprünge in der Elementgröße vermieden werden. Regulär ist die Grenzfläche als starr definiert⁴⁸, dies entspricht einer vollständigen Verhaftung der Werkstoffe untereinander. Bei Nebenbetrachtungen werden ausnahmsweise auch gelöste Grenzflächen untersucht.

Auflagerbedingungen

Die berechneten Systeme sind in der Regel als 1/8-Modell definiert, an den 3 Symmetrieebenen wird jeweils eine reibungsfreie Lagerung angesetzt. Das heißt; die Elemente sind dort in lotrechte zur Ebene starr gehalten, können sich jedoch planar frei verschieben. Bei den 1/4-Modellen sind die 2 Symmetrieebenen und eine Außenfläche reibungsfrei gelagert. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt entlang der Symmetrieebenen, damit können die

⁴⁷ Nominelle Netzfeinheit: Faser 15 μm , inneres Coating 20 μm , äußeres Coating 15 μm , Grenzfläche Coating-Laminat 30 μm , Laminat 150 μm ; Generierungsvorgaben: Vernetzung strikt, Glätten hoch, Übergang langsam, Spannwinkel fein

⁴⁸ Kontaktbereich, Typ Verbund

Berechnungsmodelle als unendlich groß angesehen werden. Bei Nebenbetrachtungen werden ausnahmsweise auch Ergebnisse an einem freien Ende untersucht, um die Auswirkung eines endlichen Systems zu analysieren.

D 2.1.4 Einwirkungen

Die Einwirkungen sind als erzwungene Verschiebung Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 oder als konstante Temperaturerhöhung ΔT definiert, aufgrund der linear-elastischen Rechnung ist eine spätere Superposition zulässig. Die Verschiebung wirkt senkrecht auf eine Außenseite, sie beträgt in Längsrichtung $5 \mu\text{m}$ und in Querrichtung jeweils $2 \mu\text{m}$. Dies entspricht jeweils einer mittleren Dehnung von 10^{-3} bzw. $1000 \mu\text{m/m}$. In Nebenbetrachtungen wird die erzwungene Verschiebungen in Längsrichtung (x_1) nur auf eine Teilfläche aufgebracht.

Wie in D 2.1.1 auf S. 74 erwähnt, haben Schubverzerrungen in der Sensorfaser keine Auswirkung auf das Messergebnis. Andererseits können zwar globale Schubverzerrungen auch zu einem geänderten Hauptdehnungszustand in der Sensorfaser führen, diese Lastfälle spielen bei den untersuchten Laminaten nur eine untergeordnete Rolle und wurden daher nicht untersucht.

Die eingebrachte Temperaturveränderung beträgt 100 K ⁴⁹. Der Wert der Temperaturveränderung ist als Einheitsgröße zu verstehen. Tatsächlich sind die Berechnungsergebnisse nur für Temperaturveränderungen im Bereich der Raumtemperatur zulässig, da sowohl Laminat als auch Coating temperaturabhängige mechanische Kennwerte haben und daher eine nichtlineare Berechnung notwendig wäre.

D 2.1.5 Auswertung

Die mikromechanischen Untersuchungen dienen zunächst dazu, aus unterschiedlichen Belastungszuständen auf den resultierenden Dehnungszustand im Kern der optischen Faser zu schließen. Letztlich werden diese Dehnungen dazu herangezogen, um die Wellenlängenverschiebung zu ermitteln, also das letztliche Messergebnis. Die Zusammenhänge zwischen dem Dehnungszustand bzw. der Temperatur in der optischen Faser und dem Messwert sind hinlänglich bekannt, die Zusammenhänge wurden in C 2.2 hergeleitet. Aus (C.11) auf S. 49 ergibt sich unter Zugrundelegung eine Faser-Bragg-Gitters mit einer Grundwellenlänge von $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ ⁵⁰ folgender Zusammenhang:

$$\Delta\lambda = 1,13 \frac{\text{nm}}{10^{-3}} \cdot \varepsilon_1 - 0,305 \frac{\text{nm}}{10^{-3}} \cdot (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \pm 0,116 \frac{\text{nm}}{10^{-3}} \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) + 0,012 \frac{\text{nm}}{\text{K}} \cdot \Delta T \quad (\text{D.3})$$

$\Delta\lambda$: resultierende Wellenlängenverschiebung

ε_i : Dehnung in Richtung der Achse x_i (ohne spannungslose Temperaturdehnung)

ΔT : Temperaturdifferenz

Die Herleitung ist einheitentreu, gebräuchliche Einheiten sind jedoch Nanometer [nm] für die Wellenlängenverschiebung, Promille [10^{-3}] für die Dehnung und Kelvin [K] für die Temperaturänderung.⁵¹

Der Zusammenhang zwischen der Wellenlängenverschiebung und der Einwirkung (Dehnung oder Temperatur) wird auch als Korrelationsfaktor K bezeichnet. Die folgenden Betrachtungen erfolgen jedoch in inverser

⁴⁹ Bei der verwendeten Software ist als Einwirkung eine Temperatur von 122 °C einzugeben, da von einem Nullzustand von 22 °C ausgegangen wird.

⁵⁰ Bei handelsüblichen Messsystemen liegt die Bandbreite der auswertbaren Wellenlängen bei 1515 bis 1585 nm , die maximale Abweichung von der gewählten Grundwellenlänge beträgt damit $2,3\%$.

⁵¹ In der Messtechnik ist im Gegensatz dazu für die Dehnung die Angabe in Millionstel [$\mu\text{m/m}$, 10^{-6} oder microstrain] gebräuchlich.

Blickrichtung, weshalb der Kehrwert des Korrelationsfaktors aussagekräftiger ist. Um den Unterschied im Folgenden zu verdeutlichen, wird der Kehrwert als Proportionalitätsfaktor $1/K$ bezeichnet.

$$\frac{1}{K_{\hat{\epsilon}_i}} = \frac{\Delta\lambda}{\hat{\epsilon}_i} \left[\frac{\text{nm}}{10^{-3}} \right] \quad (\text{D.4})$$

$$\frac{1}{K_T} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T} \left[\frac{\text{nm}}{\text{K}} \right] \quad (\text{D.5})$$

- $\Delta\lambda$: resultierende Wellenlängenverschiebung
 $\hat{\epsilon}_i$: von außen eingeprägte Dehnung in Richtung der Achse i
 ΔT : Temperaturänderung

Die Faktoren beziehen sich nicht auf die lokalen Dehnungen in der Sensorfaser, sondern auf die von außen eingepprägten globalen, mittleren Dehnungen. Wird beispielsweise ein Laminat mit eingebautem Sensor uniaxial belastet, treten im Werkstoff auch Querdehnungen auf, welche die resultierende Wellenlänge beeinflussen. Genauso ist eine gleichmäßige Temperaturänderung von strukturintegrierten Sensoren Zwängungen verbunden, welche ebenfalls das Messergebnis beeinflussen.

D 2.1.6 Untersuchte Systeme

Die berechneten Systeme sind zusammen mit den relevanten Parametern und der Geometrie in Tabelle D-7 und Abbildung D-10 gegenübergestellt.

Tabelle D-7: Überblick der untersuchten Berechnungsmodelle

System	Coating ¹⁾	Laminat	Randbed. ²⁾	Einwirkungen	System No.	Referenz	
Grundsystem	HTAC	UD	unendlich	$\epsilon_1, \epsilon_2, \Delta T$	1/8, 150, 151a+b	SENS-G	
Geometrie	Zwischenschichtlage	HTAC	UD / M	endlich	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \Delta T$	1/4, 305	SENS-M
	Coating ovalisiert	HTAC	UD	endlich	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \Delta T$	1/8, 405	SENS-G-41
	ohne Coating	---	UD	unendlich	$\epsilon_1, \epsilon_2, \Delta T$	1/8, 100	keine
	ohne Coating, Zwischenschichtlage	---	UD / M	endlich	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \Delta T$	1/4, 355, 356	SENS-C
	Harztasche	HTAC	UD	unendlich	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \Delta T$	1/8, 200	keine
	sternförmiges Coating	HTAC	UD	unendlich	$\epsilon_1, \epsilon_2, \Delta T$	1/8, 500	keine
	Kennwerte	Parameterstudie 1	VAR (E)	UD	unendlich	$\epsilon_1, \epsilon_2, \Delta T$	1/8, 110
Parameterstudie 2		VAR (E)	UD	endlich	ϵ_1	1/8, 115	keine
Parameterstudie 3		VAR (α_T)	UD	endlich	ΔT	1/8, 116	keine
Herstellung (defekte Grenzfläche)	HTAC	UD	unendlich	ΔT	1/8, 150-riss	keine	

1) HTAC: zweischichtiges Coating aus Hochtemperaturacrylat; VAR: einschichtiges Coating mit variablem E-Modul oder Wärmeausdehnungskoeffizient

2) unendlich: Sensorfaser in Längsrichtung beidseitig mit Matrix gekoppelt; endlich: einseitig mit Matrix gekoppelt

Im Grundsystem (Sys 150) wird zunächst der reguläre Aufbau, nämlich eine Sensorfaser mit Doppelacrylat in einer unendlich großen UD-Schicht untersucht. Dabei sollen die Störungen im Laminatgefüge beschrieben und die Korrelationsfaktoren, also der Zusammenhang zwischen äußerer Einwirkung und Messergebnis, ermittelt werden.

Darauf basierend folgen Variationen der Geometrie. Betrachtet werden die Auswirkungen einer Harztasche, eines ovalisierten Coatings, eines sternförmigen und eines fehlenden Coatings. Außerdem wird die Lage der Sensorfaser zwischen zwei unterschiedlichen Einzelschichten, also einer unidirektionalen Lage und einer Wirrfaserschicht, betrachtet. Die Ergebnisse dienen der Fehlerabschätzung und Eingrenzung der Variabilität.

Die Kennwerte des Coatings werden Parameterstudien variiert, bei konstanter Geometrie soll hier untersucht werden, wie sich das E-Modul und der Wärmeausdehnungskoeffizient auf die Sensor-Bauteil-Interaktion auswirken. Die Ergebnisse dienen der Wahl eines geeigneten Coatings.

Zur Beurteilung von im Rahmen des Entwicklungsprojekts beobachteten Herstellungsfehler (Kapitel E 2.1.3, S. 159ff.) werden Nebenbetrachtungen zum Ausdehnungsverhalten des Coatings bei gerissener Grenzfläche durchgeführt. Diese sollen Hinweise für die Eingrenzung der Fehlerursache liefern.

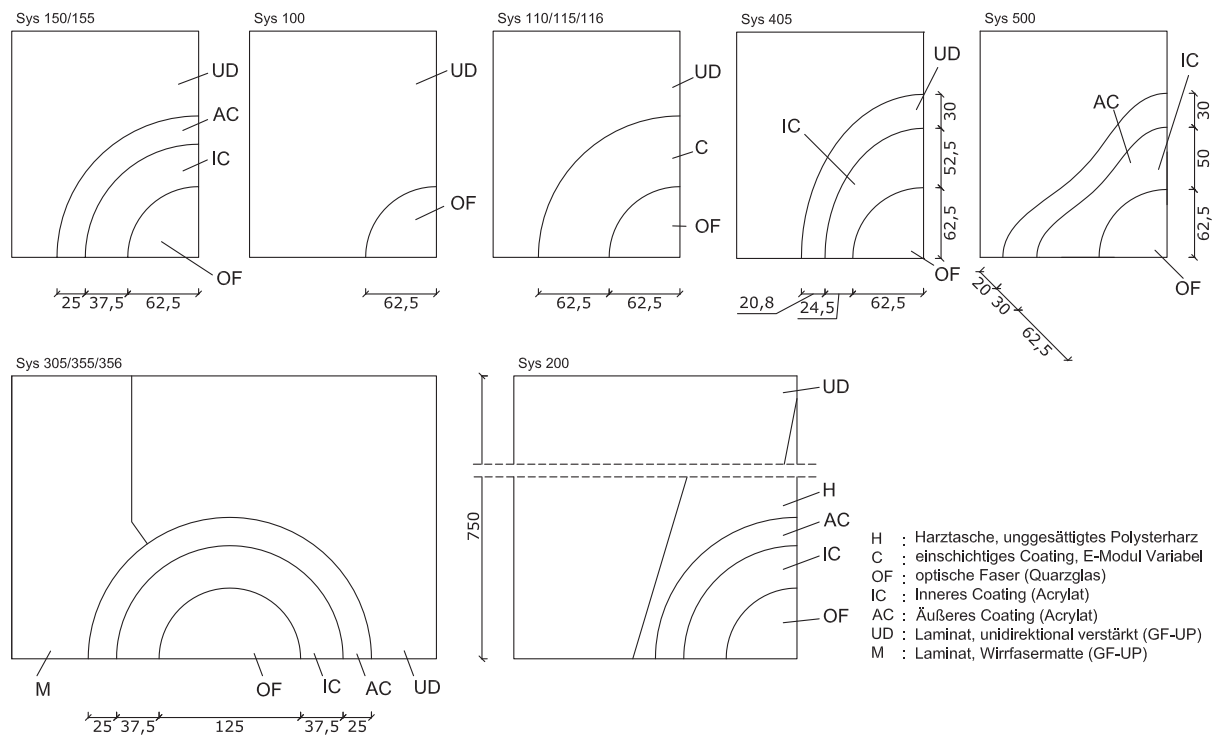


Abbildung D-10: Überblick der untersuchten FEM-Modelle (Abmessungen in μm)

D 2.2 Grundsystem (System 150)

D 2.2.1 Geometrie

Das Grundsystem bildet eine unendlich große unidirektionale Einzelschicht ab, die mechanischen Kennwerte entsprechen einem Pultrudat mit 60% Faservolumengehalt in ausschließlich unidirektionaler Anordnung (Grundlaminat, D 1.4.2, S. 70). Zentral ist ein faseroptischer Sensor mit zweischichtigen Acrylatcoating platziert, der Sensor ist längs der Faserverstärkung ausgerichtet. Das Coating ist kreisrund bei einem Außendurchmesser von 250 μm . Das Laminat umschließt die Sensorfaser mit Coating ohne Fehlstellen oder Deformationen.

Die Verschiebungen werden jeweils auf den ganzen Querschnitt aufgebracht, die drei Symmetrieebenen sind jeweils reibungsfrei gelagert. Daher geht die dritte Dimension nur über Querdehneffekte in die Berechnung ein.

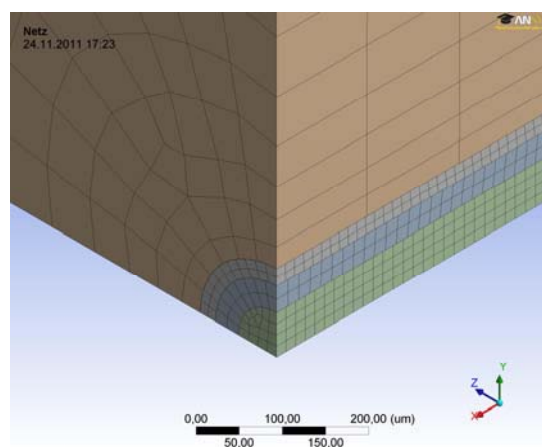


Abbildung D-11: Berechnungsmodell für das Grundsystem (System 150)

D 2.2.2 Belastung längs zur Sensorfaser

Bei einer Verschiebung in Längsrichtung (x_1) ergibt sich bei dem unendlich langen System erwartungsgemäß eine konstante Längsdehnung, unabhängig von der Koordinate im betrachteten Querschnitt. Die Querdehnungen im Laminat entsprechen den Querdehnzahlen des Werkstoffs, lediglich im Grenzbereich zum Coating weichen die Werte ab (Abbildung D-12). Im Laminat ist der gestörte Bereich ungefähr gleich dem Durchmesser der Sensorfaser mit Coating (250 μm). In der optischen Faser ist die Querdehnung konstant, sie entspricht - im Rahmen der Berechnungsgenauigkeit - dem zu erwartenden Wert aus der Querdehnzahl ($\nu = 0,16$).

Der Proportionalitätsfaktor ist damit nahezu identisch mit dem einer blanken Sensorfaser ($1/K = 1,228 \text{ nm}/10^{-3}$, vgl. Gleichung (C.12), S. 50):

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_1}} = 1,227 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Die Einbettung der Sensorfaser in das Laminat hat damit keinen Einfluss auf das Messergebnis. Das zweischichtige Coating aus einer weichen inneren und härteren äußeren Beschichtung liefert hier die gewünschten Ergebnisse.

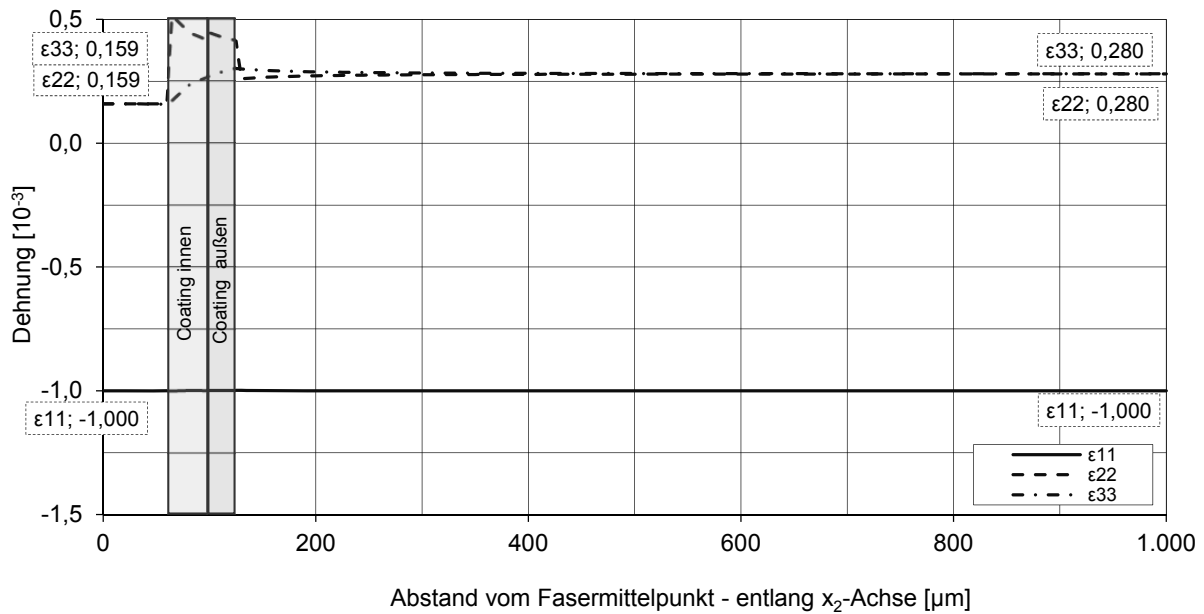


Abbildung D-12 Dehnungsverteilung über den Querschnitt bei Längsdehnung von 10^{-3} (System 150-11y)

D 2.2.3 Belastung quer zur Sensorfaser

Wird das Laminat senkrecht zur Orientierung der Sensorfaser belastet (x_2 -Achse), entsteht Querdehnung in der optischen Faser, welche jedoch deutlich geringer ist als im umgebenden Laminat. Einerseits liegt das am höheren E-Modul des Quarzglas im Vergleich zum Faserverbundwerkstoff, andererseits nimmt das weiche Coating die Differenzdehnungen auf, weshalb die Sensorfaser teilweise vom Dehnungszustand im Laminat entkoppelt wird (Abbildung D-13).

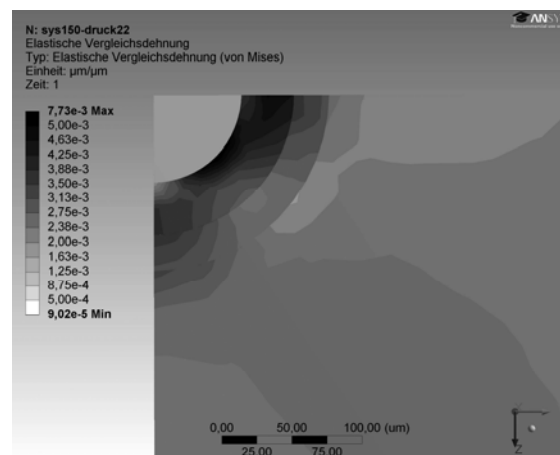


Abbildung D-13: Vergleichsdehnungen unter Querdruck längs der x_2 - bzw. y -Achse (System 150-22)

Dehnungszustand

Abbildung D-14 zeigt, dass die Querdehnung ϵ_2 im Laminat der einwirkenden Größe von $-1,0 \cdot 10^{-3}$ entspricht. Sie liegt aber im Bereich der Sensorfaser mit $-0,15 \cdot 10^{-3}$ deutlich unter diesem Wert. Die dazu senkrechte Querdehnung ϵ_3 ist in der optischen Faser quasi gleich null. Die resultierenden Längsdehnungen sind über den gesamten Querschnitt konstant. Der Wert entspricht der Querdehnzahl des Laminats, mit nur sehr geringfügigen Abweichungen im Bereich des Coatings.

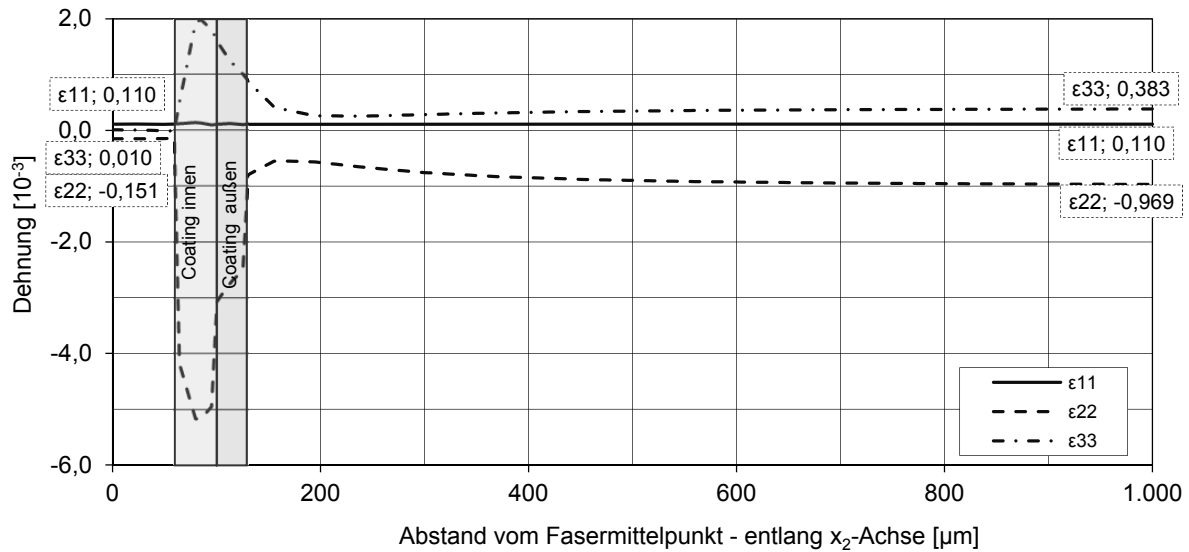


Abbildung D-14 Dehnungsverteilung über den Querschnitt bei erzwungener Stauchung von 10^{-3} in Querrichtung (System 150-22y)

Dadurch ergibt sich insgesamt ein Proportionalitätsfaktor der wesentlich unter dem Wert für eine blanke Sensorfaser liegt:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_2}} = -0,167 \pm 0,019 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Für die blanke Sensorfaser ergibt sich dem hingegen gemäß Gleichung (C.13) auf S. 50 ein Wert von:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_2}} = -0,437 \pm 0,135 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Es ist also nicht nur der Einfluss aus Querdruck wesentlich geringer als bei einer blanken Faser, vor allem die Doppelbrechung beträgt nur 14% verglichen mit dem Effekt, der bei einer blanken Sensorfaser zu erwarten ist. Dies zeigt, dass die planmäßige Aufzeichnung der Doppelbrechung zur Unterscheidung von Längs- und Querdruck bei der vorliegenden Materialzusammensetzung nicht handhabbar ist. Wird Querdehnung hingegen als Störeffekt angesehen, ist der geringe Proportionalitätsfaktor von Vorteil.

Spannungsverlauf längs der Belastungsrichtung

Die Analyse der Spannungen erfolgt zur Plausibilitätsprüfung der diskutierten Berechnungsergebnisse. Da im betrachteten Lastfall lediglich eine Verschiebung in Querrichtung x_2 aufgebracht wird und das Modell ansonsten zwangungsfrei gelagert ist, sind im ungestörten Bereich auch nur Normalspannungen σ_2 in diese Richtung zu erwarten. Die Ergebnisse in Abbildung D-15 bestätigen diese Annahme. In der Umgebung der Sensorfaser tritt jedoch erwartungsgemäß eine Störung des Spannungszustandes infolge Lastumlagerung auf. Im Kern der Sensorfaser ergibt sich aufgrund der Querkontraktion des Laminats und der geringeren Querkontraktion des Quarzglas eine resultierende Zugspannung σ_1 in Richtung der Sensorfaser. Außerdem bleibt festzuhalten, dass die Schubspannung in der Ebene senkrecht zur Sensorfaser τ_{23} nur unmittelbar an Grenzflächen zwischen zwei unterschiedlichen Werkstoffen ungleich null ist, es handelt sich also um ein Hauptachsensystem.

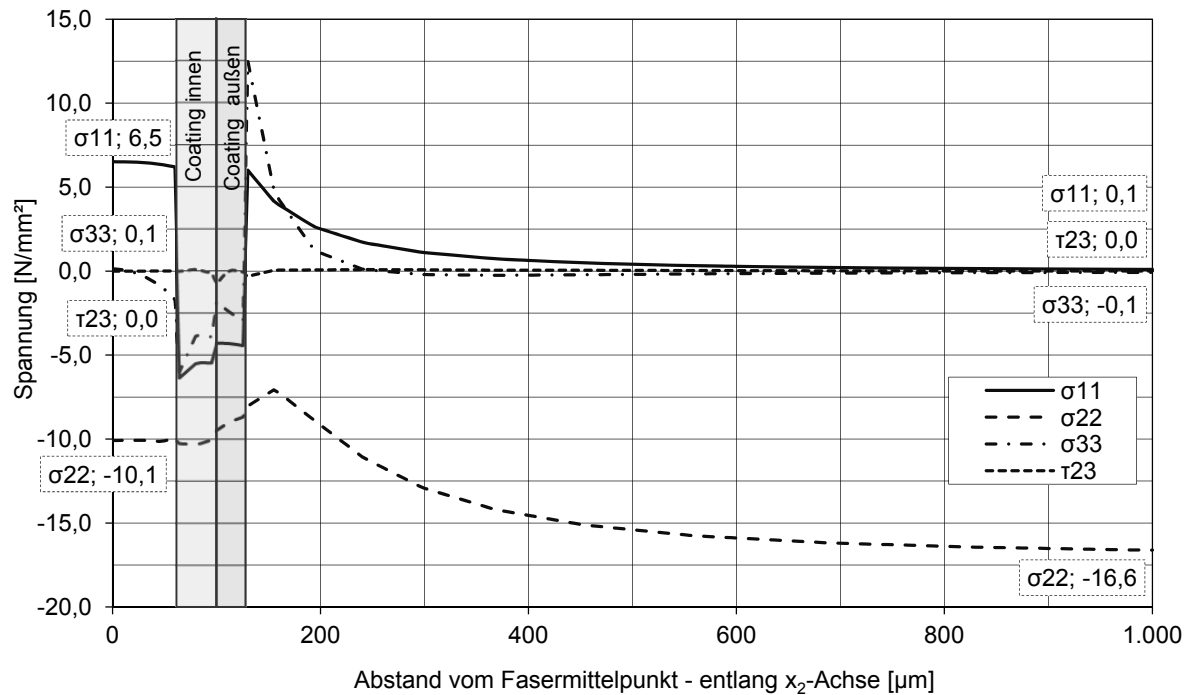


Abbildung D-15: Spannungsverlauf an einem Pfad längs der Belastungsrichtung x_2 , im ungestörten Bereich (rechts) sind die Spannungen $\sigma_1 = \sigma_3 = \tau_{23} = 0$; in der Sensorfaser ist die Längsspannung infolge der Querkontraktion jedoch ungleich null

Aus dem in Abbildung D-15 (links) dargestellten Spannungszustand in der Mitte der Sensorfaser kann über die bekannten Materialkennwerte der isotropen Quarzglasfaser (Tabelle D-6, S. 75) der zugehörige Dehnungszustand ermittelt werden:

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{E} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 6,5 \\ -10,1 \\ 0,0 \end{pmatrix} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \begin{pmatrix} 0,110 \\ -0,151 \\ -0,008 \end{pmatrix} 10^{-3}$$

Dieser befindet sich in sehr guter Übereinstimmung mit aus der FEM-Software ausgegebenen Dehnungen nach Abbildung D-14 (S. 83), links. Der Vergleich der Spannungs- und Dehnungsverläufe zeigt also, dass die Diskretisierung des Modells gemäß den gestellten Anforderungen erfolgte, insbesondere nämlich einer zwängungsfreien Lagerung.

Spannungsverlauf senkrecht zur Belastungsrichtung

In dieser Nebenbetrachtung werden die Spannungsverteilungen an zwei Schnittebenen betrachtet, welche zueinander parallel und senkrecht zur Belastungsrichtung orientiert sind (Abbildung D-16). Dabei ist ein Schnitt an der freien Außenkante des Systems angeordnet (*Lasteinleitung*) und ein weiterer an der zentralen Symmetrieebene (*Sensorebene*). Während im ungestörten Bereich eine gleichmäßige Spannungsverteilung vorliegt, ist beim Schnitt durch die Sensorfaser eine Spannungsspitze im Laminat - unmittelbar neben der Grenzfläche zum Coating - erkennbar. Wegen des geringeren E-Moduls des Coatings lagern sich die Lastpfade hier lokal zum Laminat hin um.

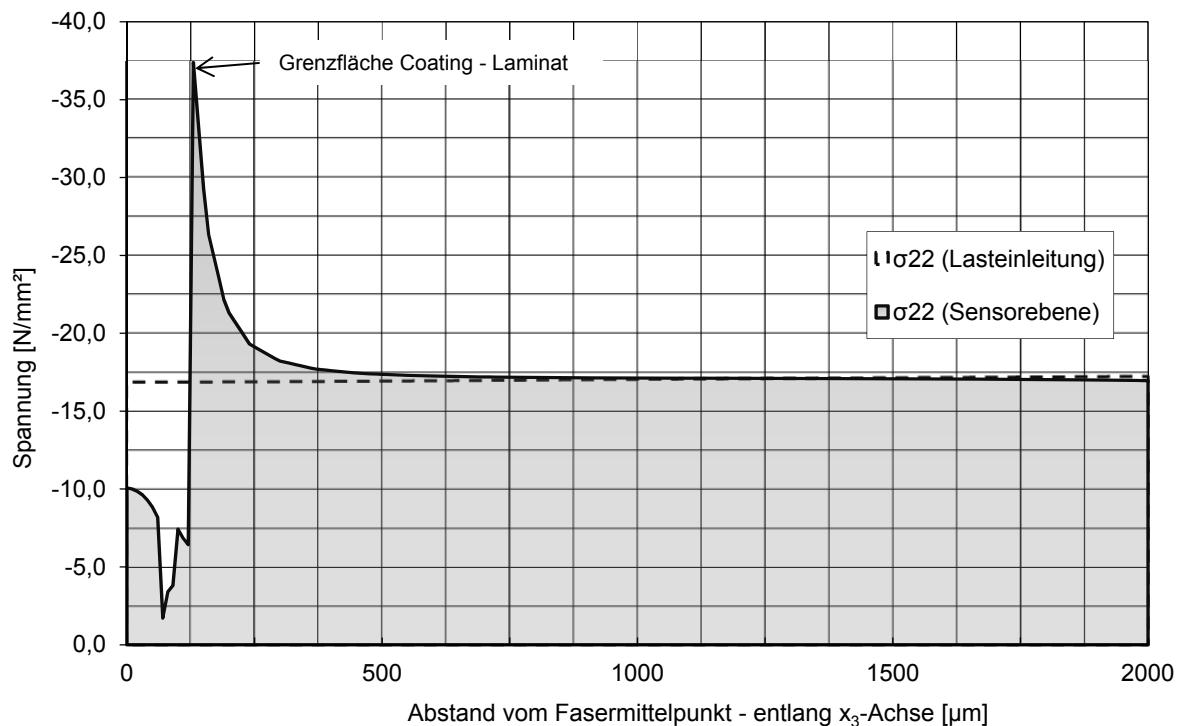


Abbildung D-16: Vergleich der Spannungsverläufe σ_2 an zwei Schnittebenen senkrecht zur Belastungsrichtung x_2 ,
Lasteinleitung: Schnitt im Abstand von 2.000 μm zur Sensorfaser (ungestörter Bereich)
Sensorebene: Schnitt durch die Sensorfaser, Spannungsspitze am Übergang Coating-Laminat

Als Einwirkung wurde eine Verschiebung $\Delta L_2 = 2 \mu\text{m}$ definiert, bei einer Querabmessung des Modells von $L_2 = 2.000 \mu\text{m}$ entspricht dies im Mittel einer Dehnung $\varepsilon_2 = 1,0 \cdot 10^{-3}$. Das betrachtete Laminat hat in Querrichtung einen Elastizitätsmodul $E_2 = 17.125 \text{ N/mm}^2$, summiert auf die Auflagerbreite von $L_3 = 2.000 \mu\text{m}$ ergäbe sich somit für ein ungestörtes Laminat eine summierte Auflagerlast von $\int (\varepsilon_2 \cdot E_2) dx_3 = -34,25 \text{ N/mm}$ (Halbraumsystem).

Die Lastsummen des tatsächlichen Systems mit Sensorfaser werden aus den in Abbildung D-16 dargestellten Spannungsverläufen ermittelt. Dabei wird auf eine numerische Integration nach der Sehnentrapezregel zurückgegriffen:

$$\int_{x_3=a}^b \sigma_2(x_3) dx_3 \rightarrow h \cdot \left[\frac{1}{2} \sigma_2(a) + \frac{1}{2} \sigma_2(b) + \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_2(a + i \cdot h) \right]; h = \frac{b-a}{n} \quad (\text{D.6})$$

- a: Startpunkt der Integration
- b: Endpunkt der Integration
- n: Anzahl der Intervalle
- h: Intervallbreite

Für den Schnitt in Sensorebene ergibt sich eine summierte Auflagerlast von $-34,12 \text{ N/mm}$, im ungestörten Bereich an der Lasteinleitung leicht abweichend von $-34,06 \text{ N/mm}$. Die Differenz von 0,2% liegt im Bereich der Berechnungsgenauigkeit bzw. dem unvermeidbaren Fehler bei einer numerischen Integration. Die summierten Werte des betrachteten Systems liegen im Mittel 0,5% unter der Abschätzung für das ungestörte Laminat ohne Sensorfaser. Dies ist eine Folge des vergleichsweise weichen Coatings, welches die mittlere Steifigkeit des Gesamtsystems geringfügig herabsetzt.

D 2.2.4 Temperaturdifferenz

Eine gleichmäßige Temperaturveränderung beeinflusst die reflektierte Wellenlänge des strukturintegrierten Bragg-Gitters auf zweierlei Weise. Einerseits besteht der bekannte thermooptische Zusammenhang, der aus der Änderung von Brechungsindex und Gitterlänge resultiert, dabei spielt der sehr geringe Wärmeausdehnungskoeffizient von Quarzglas ($0,51 \cdot 10^{-6}$) eine untergeordnete Rolle. Andererseits ergeben sich im Verbundsystem Zwängungen, die zu einem abweichenden Dehnungszustand führen und daher das Messergebnis beeinflussen. Abbildung D-17 zeigt den Dehnungsverlauf - unabhängig von der spannungslosen Temperaturdehnung - bei einer Erwärmung des Querschnitts um 100 K. Im Regelbereich des Laminats sind die Dehnungen gleich null, da infolge des homogenen Aufbaus keine Zwängungen auftreten. Die Sensorfaser wird aufgrund der Laminatdehnung in Längsrichtung gestreckt ($\epsilon_1 > 0$), in Querrichtung wegen der hohen Wärmeausdehnung des Coatings gestaucht ($\epsilon_2, \epsilon_3 < 0$).

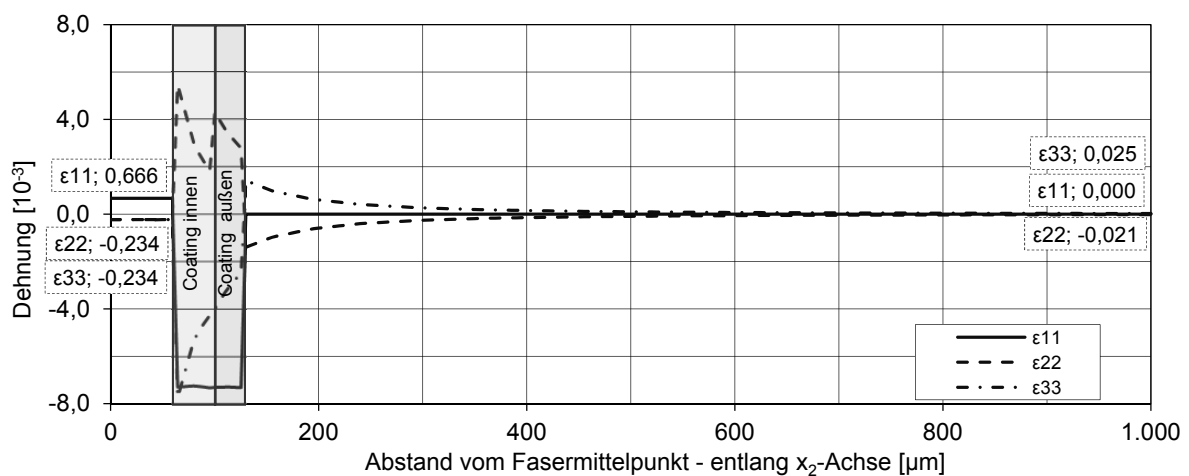


Abbildung D-17 Dehnungsverteilung über den Querschnitt bei gleichmäßiger Temperaturerhöhung von 100K (System 150-ty)

Insgesamt ergibt sich dadurch ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_T} = 0,0212 \frac{\text{nm}}{\text{K}}$$

Für die blanke Sensorfaser nach (C.15) auf S. 53 ein Wert von 0,0123 nm/K. Der Temperatureffekt fällt damit wesentlich stärker ins Gewicht als bei einer blanken Sensorfaser. Der Wert ist primär abhängig von den Wärmeausdehnungskoeffizienten des Coatings und des Laminats in Längsrichtung.

D 2.2.5 Variation des Laminatkennwerte (Systeme 151a, b)

Für das beschriebene Grundsystem wurden noch zwei Varianten untersucht, bei denen statt ungesättigtem Polyesterharz ein Vinylesterharz angesetzt wurde, der Faservolumengehalt beträgt dabei 40 Vol-% (System 151a) bzw. 60 Vol-% (System 151b). Der Aufbau entspricht dem Laminataufbau der im Folgenden im Labor geprüften Probekörper „Serie G“ (Tabelle D-5 auf S. 73). Hinsichtlich Längsdehnung liegt die Abweichung dieser Varianten unter 0,1% und ist damit vernachlässigbar. Für Querdehnungen sind die Proportionalitätsfaktoren bei Vinylesterharz 22 ...34% geringer als beim Grundsystem. Der Effekt der Doppelbrechung bleibt ungefähr im gleichen Größenbereich. Für eine Temperaturänderung wird der Proportionalitätsfaktor je nach Faservolumengehalt größer oder kleiner mit einer Abweichung nicht größer als 4%, die Veränderung sind also vergleichsweise gering hinsichtlich der praktischen Auswertung. Zahlenwerte s. Kapitel D 2.4.4 (S. 117ff.).

D 2.3 Einfluss der Geometrie

In den folgenden Berechnungsmodellen werden, basierend auf dem Grundsystem, verschiedene Geometrien untersucht. Dazu gehören:

- Mischlaminat, bei denen sich die Sensorfaser am Übergang zwischen zwei Einzelschichten befindet
- Harztaschen neben der Sensorfaser
- Sensorfaser mit deformiertem Coatings
- Sensorfaser ohne Coating

Durch die Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse dieser Variationen mit dem Grundsystem wird die zu erwartende Bandbreite für die Proportionalitätsfaktoren abgeschätzt. Dadurch können gezielte Vorhersagen getroffen und die Fehlerempfindlichkeit von Messungen abgeschätzt werden.

D 2.3.1 Sensorfaser an der Grenzfläche zwischen zwei Laminatschichten (System 505)

Pultrudierte Profile bestehen entweder vollständig aus unidirektionaler Verstärkung (vgl. Grundsystem) oder aus einer Schichtung von Wirrfaserschichten und unidirektionalen Lagen, wobei diese kombiniert in Form von Gelegen oder getrennt voneinander eingebaut werden können. Die Sensorfaser kann folglich innerhalb einer UD-Schicht oder an der Grenzfläche der beiden Einzelschichten liegen, vgl. Abbildung D-18

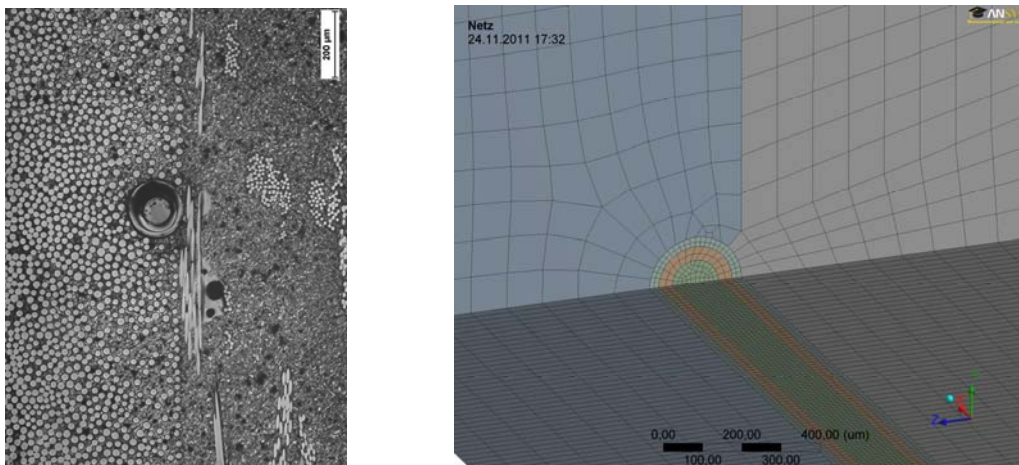


Abbildung D-18: links: Mikroskopaufnahme eines untersuchten Pultrudats, Sensorfaser am Übergang zwischen unidirektionaler und Wirrfaserschicht [Aufnahme: BAM]
rechts: Berechnungsmodell System 305, dort links: UD-Schicht, rechts: Wirrfaserschicht

Belastung längs zur Sensorfaser

Die Längsdehnung ist über den gesamten Querschnitt konstant. Die Störungen um den Sensor sind jedoch deutlich stärker ausgeprägt als im Grundsystem, sie entsprechen in jede Richtung ungefähr dem dreifachen Durchmesser der Sensorfaser (inkl. Coating), vgl. Abbildung D-19. Die Querdehnungen im ungestörten Bereich entsprechen den zu erwartenden Werten infolge der unterschiedlichen Querdehnzahlen. In der Wirrfaserschicht ist die Querdehnzahl in Laminatenebene (x_2 -Achse) größer als in Dickenrichtung (x_3 -Achse), aus diesem Grund ergibt sich auch für die Sensorfaser ein ungleichmäßiger Querdehnungszustand ($\varepsilon_2 \neq \varepsilon_3$), der zu Doppelbrechung der Wellenlänge führt.

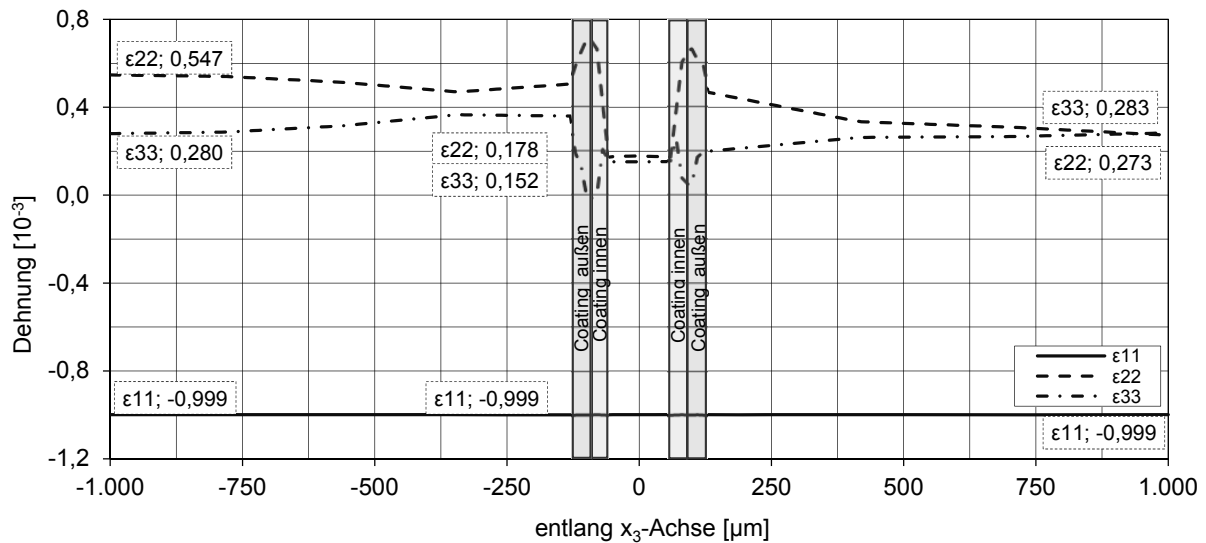


Abbildung D-19: Dehnungsverteilung über den Querschnitt bei Längsdehnung, links: Wirrfaserschicht (M), rechts: unidirektionale Schicht (UD) (System 305-11z)

Infolge der Doppelbrechung ergeben sich zwei Werte für den Proportionalitätsfaktor:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_1}} = 1,230 \pm 0,003 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Der Mittelwert liegt damit minimal über dem Wert des Grundsystems ($1,227 \text{ nm}/10^{-3}$), der Effekt der Doppelbrechung ist außerdem vergleichsweise gering ausgeprägt. Dennoch kann festgehalten werden, dass beim Einbau einer Sensorfaser in Mischlamine die Qualität des Wellenlängenspektrums auch bei Längsbelastung beeinträchtigt wird, das heißt: der Spitzenwert (Peak) ist weniger prägnant ausgeprägt.

Belastung quer zur Sensorfaser

Unabhängig von der Orientierung des Querdrucks (x_2 bzw. x_3 -Achse) reichen die Gefügestörungen weit in das Laminat hinein (Abbildung D-20). Die Querdehnungen in der Quarzglasfaser sind vergleichsweise gering, da die Dehnungen wiederum vom weichen Coating gedämpft werden.

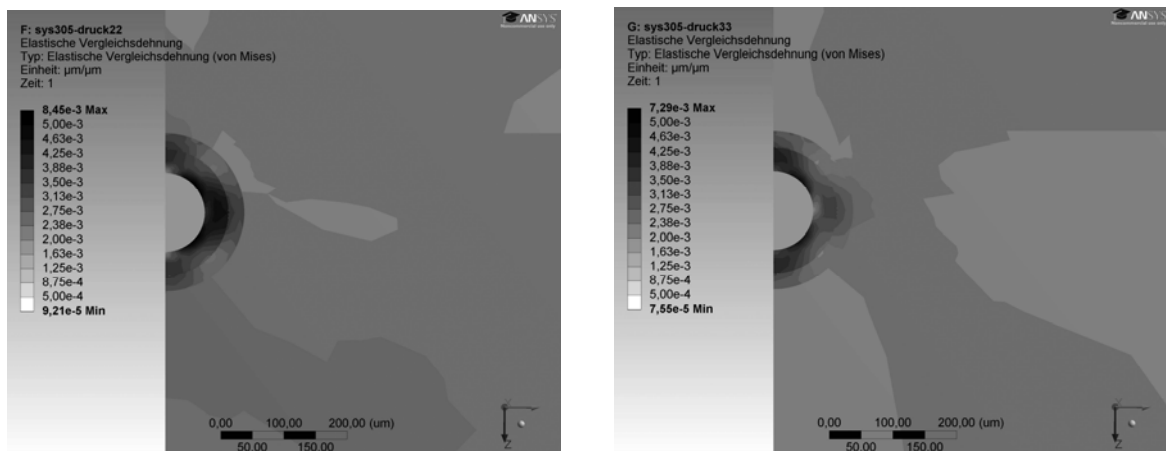


Abbildung D-20: Vergleichsdehnungen, jeweils oben Wirrfaserschicht (M), unten unidirektionale S. (UD), links: Querdruck in Laminebene x_2 - bzw. y -Achse (System 305-22) rechts: Querdruck in Dickenrichtung x_3 - bzw. z -Achse (System 305-33)

Bei einer Einwirkung in Laminalebene (x_2) ist die Dehnung ε_2 konstant in den ungestörten Bereich des Laminats, die dazu senkrechten Querdehnungen ε_3 ergeben sich aus den Querdehnzahlen der Lamine (Abbildung D-21). In der Quarzglasfaser ist die Querdehnung etwas höher als im Grundsystem. Dies liegt vor allem an der wesentlich höheren Querdehnzahl der Wirrfaserschicht, welche auch zu einem beträchtlichen Längszug führt. Es ergibt sich damit ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_2}} = -0,304 \pm 0,018 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Der Mittelwert ist deutlich höher als für das Grundsystem ($-0,168 \pm 0,019 \text{ nm}/10^{-3}$), der Grad der Doppelbrechung ist mit dem Grundsystem jedoch nahezu identisch.

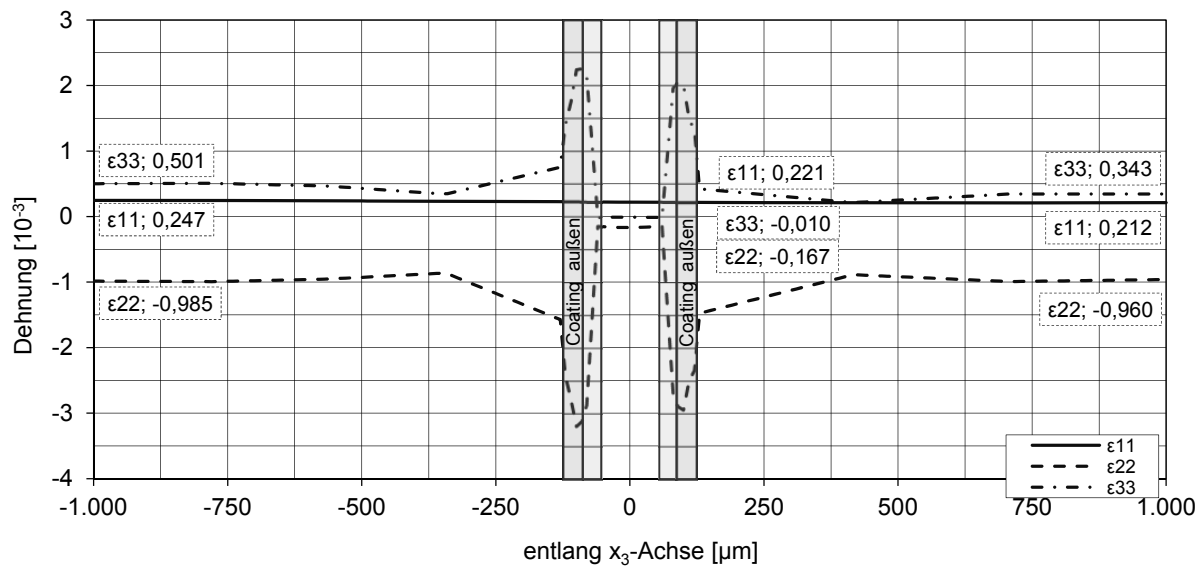


Abbildung D-21: Dehnungsverteilung über den Querschnitt bei Querdehnung in Laminatrichtung (x_2), links: Wirrfaserschicht (M), rechts: unidirektionale Schicht (UD) (System 305-22z)

Bei der Belastung in Dickenrichtung (x_3) ist die Dehnung ε_3 über die Laminathöhe aufgrund der unterschiedlichen E-Moduln der Wirrfaser- und UD-Schicht nicht konstant. In der weicheren Wirrfaserschicht tritt eine höhere Dehnung auf als in der steiferen UD-Schicht (Abbildung D-22). Bei einer Integration der Dehnungen über die gesamte Höhe ergibt sich im Mittel jedoch wiederum der Wert von $1,0 \cdot 10^{-3}$.

Da in der Wirrfaserschicht die Querdehnzahl ν_{13} kleiner als ν_{12} ist, ist hier der resultierende Längszug geringer als für eine Einwirkung in Laminalebene. Es ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_3}} = -0,174 \pm 0,015 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Der Beiwert ist damit nur ungefähr halb so groß wie für eine Belastung in Laminatrichtung. Dies bedeutet, dass die Sensorfaser für Querdruck in Dickenrichtung wesentlich weniger empfindlich ist als für Querdruck in Laminatrichtung.

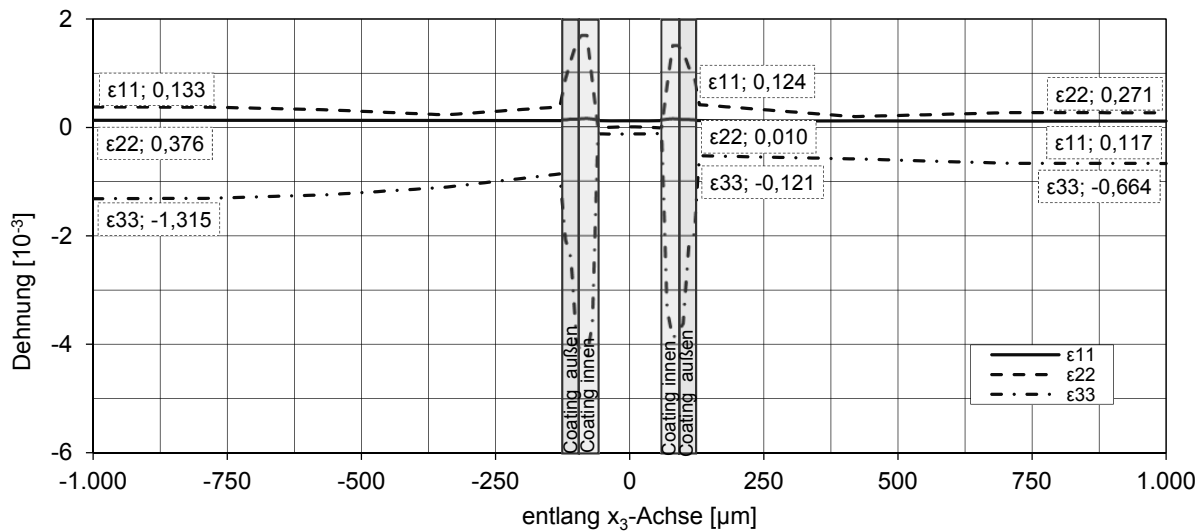


Abbildung D-22: Dehnungsverteilung über den Querschnitt bei Querdehnung in Dickenrichtung, links: Wirrfaserschicht (M), rechts: unidirektionale Schicht (UD) (System 305-33z)

Temperaturdifferenz

Bei einer Temperaturdifferenz treten im betrachteten Mischlaminat infolge der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Einzelschichten Zwangsspannungen im Laminat auf. Die resultierenden Dehnungen sind aufgrund der geringeren E-Moduln in der Wirrfaserschicht höher als in unidirektionaler Lage. Die Gefügestörungen im Übergangsbereich der beiden Einzelschichten bzw. im Bereich der Sensorfaser haben eine Ausbreitung von ungefähr des einfachen Durchmessers der optischen Faser mit Coating (Abbildung D-23). Innerhalb der optischen Faser ist der Dehnungszustand homogen. Durch den höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten der Wirrfaserschicht ist die absolute Dehnung der Sensorfaser in Längsrichtung höher als bei ausschließlich unidirektionaler Verstärkung.

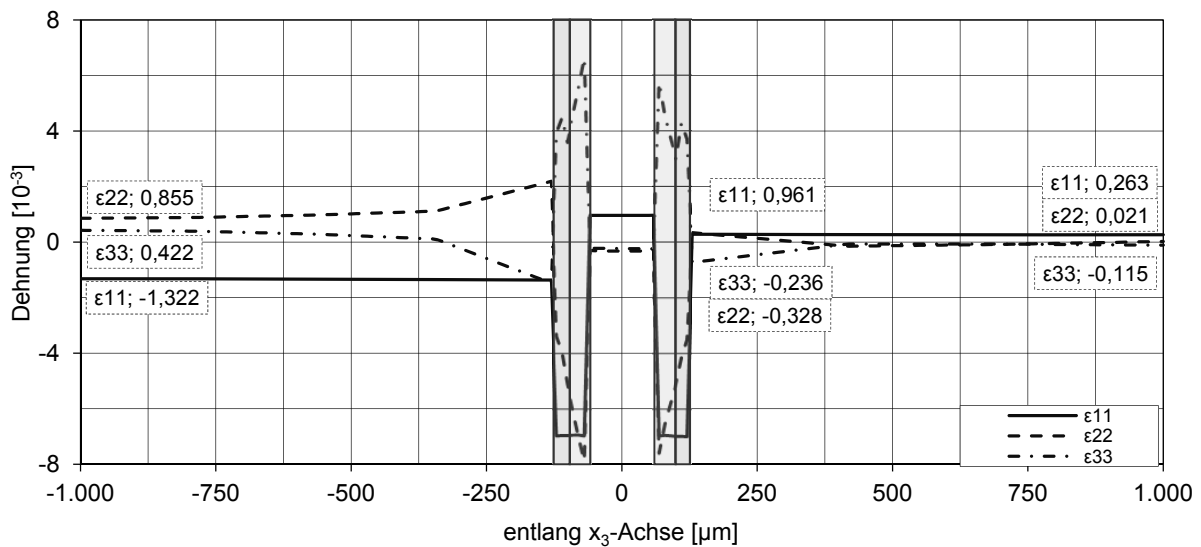


Abbildung D-23: Dehnungsverteilung über den Querschnitt bei gleichmäßiger Temperaturerhöhung von 100K (System 305-tz) links: Wirrfaserschicht (M), rechts: unidirektionale Schicht (UD)

Es ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_T} = 0,0248 \pm 0,0001 \frac{\text{nm}}{\text{K}}$$

Damit liegt der Mittelwert ca. 17% über dem des Grundsystems. Durch den anisotropen Dehnungszustand tritt in geringem Umfang Doppelbrechung auf, welche jedoch für die praktische Auswertung nicht relevant wird.

D 2.3.2 Ovalisiertes Coating (System 405)

Die Beschichtung der Sensorfaser ist bei der Herstellung kreisrund. Im Rahmen der mikroskopischen Untersuchung von eingebetteten Sensorfasern wurde jedoch eine Ovalisierung des Coatings festgestellt [Projekt]. Für die rechnerische Untersuchung wird die Verformung über Ellipsen approximiert. Es soll untersucht werden, in welchem Maß ein deformiertes Coating die Messergebnisse beeinflusst. Die größere Halbachse wurde dabei als x_2 -Achse definiert, die Sensorfaser liegt in einer unendlich großen unidirektionalen Schicht.

Dabei wird jeweils der große Halbmesser der beiden Coating-Schichten grafisch anhand der mikroskopischen Aufnahmen bestimmt. Der kleine Halbmesser wird jeweils rechnerisch hergeleitet, indem von einem Erhalt der Flächen relativ zum kreisrunden Ausgangszustand ausgegangen wird (Abbildung D-24).

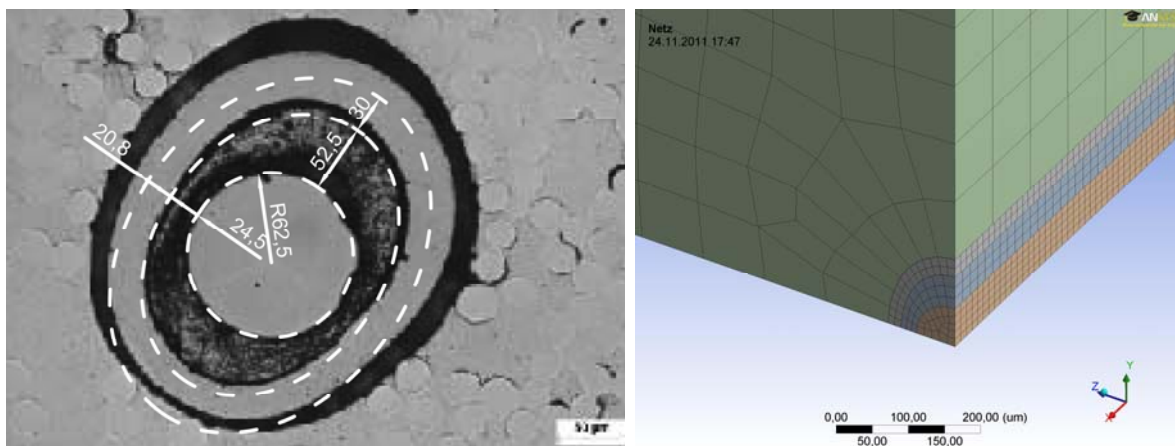


Abbildung D-24: Berechnungsmodell für die Auswirkung eines ovalisierten Coatings (System 405), links: Approximation der Coating-Verformung am Beispiel des Probekörpers G-41 [Hintergrundfoto: Projekt/BAM], rechts: abgeleitetes FEM-Modell, große Halbachse entlang x_2 bzw. y -Achse orientiert

Belastung längs zur Sensorfaser

Trotz identischer Materialkennwerte wie im Grundmodell ergibt sich aufgrund der ungleichmäßigen Stärke des Coatings ein geänderter Dehnungszustand in der optischen Faser (Abbildung D-25). Die Dehnungsverläufe entsprechen grundsätzlich dem Grundmodell, jedoch liegt die Dehnung in Laminatrichtung (x_2) etwas unter dem Wert des Grundmodells und die Dehnung in Dickenrichtung (x_3) etwas über den Ausgangswerten. Diese Ergebnisse entsprechen der Orientierung der Ovalisierung, bei der die größere Halbachse in x_2 -Richtung gelegt wurde. Die dort dickere Coatings-Schicht dämpft die Dehnungen folglich stärker. Aufgrund der Dehnungsverteilung ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_1}} = 1,226 \pm 0,0004 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Der Mittelwert liegt damit etwas unter dem Wert des Grundmodells von $1,227 \text{ nm}/10^{-3}$. Aufgrund des asymmetrischen Systems tritt Doppelbrechung auf, welche jedoch für die praktische Anwendung ohne Relevanz ist.

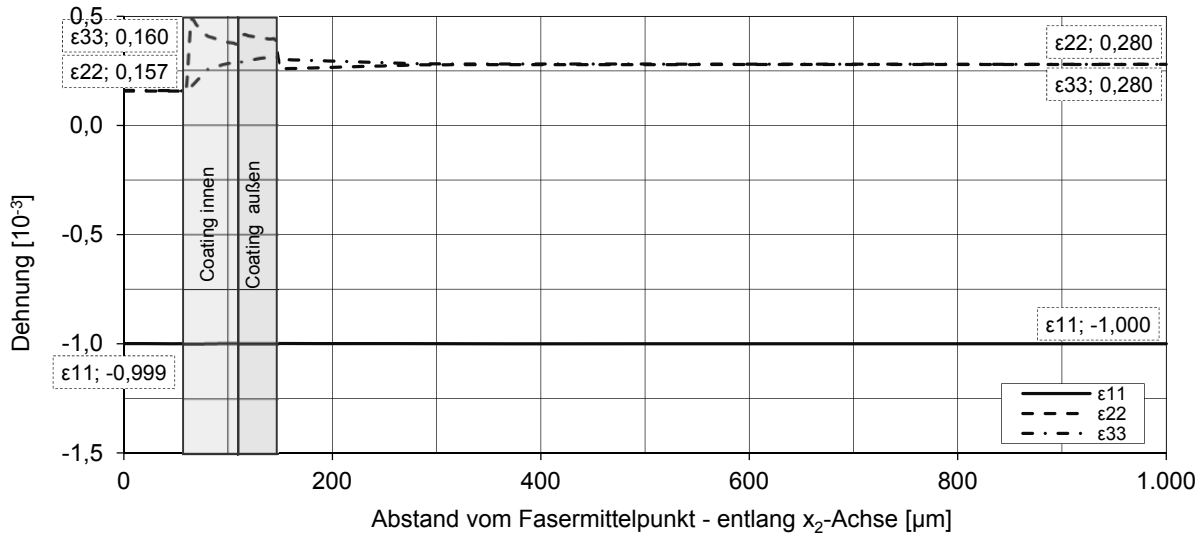


Abbildung D-25: Dehnungsverteilung über den Querschnitt infolge Längsdruck bei deformiertem Coating (System 405-11y)

Belastung quer zur Sensorfaser

Das ovalisierte Coating hat in Richtung der x_2 -Achse eine Gesamtstärke von $82,5 \mu\text{m}$, in Dickenrichtung (x_3) hingegen nur $45,3 \mu\text{m}$. Aus diesem Grund treten bei der Belastung in x_3 -Richtung höhere Dehnungen im Coating und der Quarzglasfaser auf als in der Richtung des dickeren Coatings (Abbildung D-26).

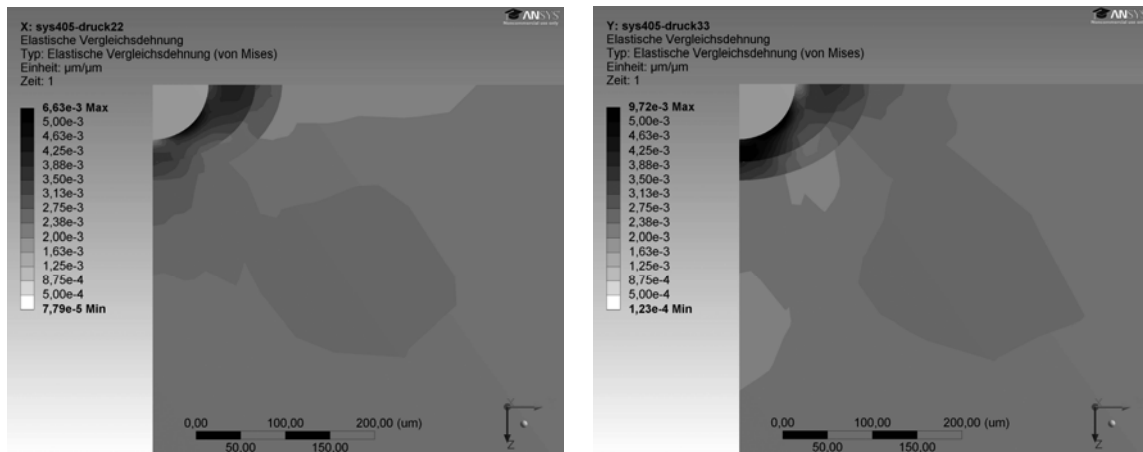


Abbildung D-26: Vergleichsdehnungen im Querschnitt infolge Querdruck, links: Einwirkung in Laminebene x_2 - bzw. y -Achse (System 405-22), rechts: Einwirkung in Dickenrichtung x_3 - bzw. z -Achse (System 405-33)

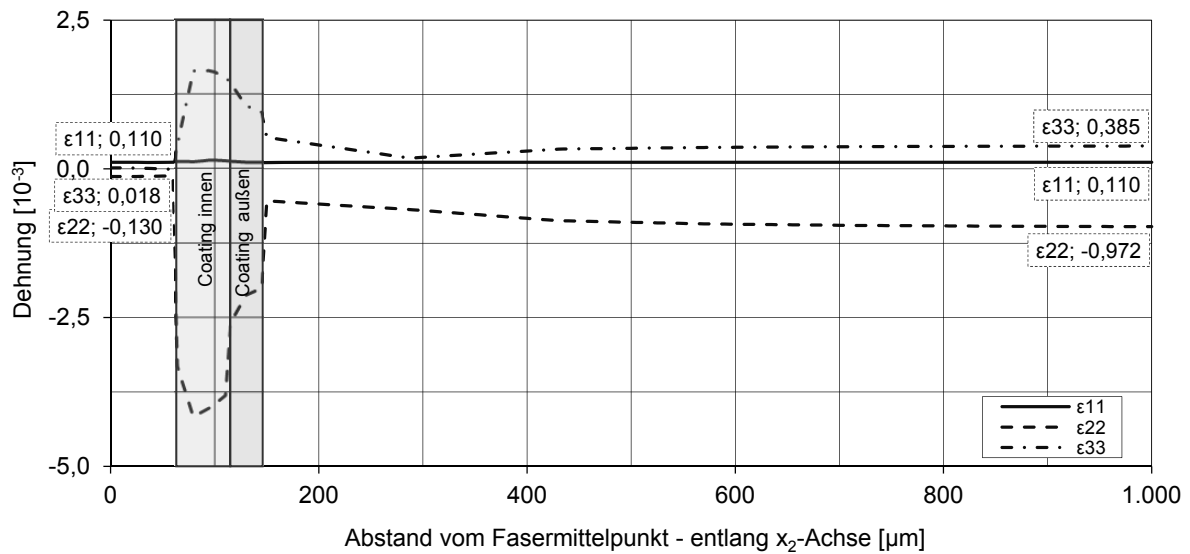


Abbildung D-27: Dehnungsverteilung bei ovalisiertem Coating infolge Querdruck in Richtung des dickeren Coatings (x₂) (System 405-22y)

Aufgrund des Dehnungszustands in der optischen Faser ergibt sich für die Belastung in Richtung der größeren Coating-Abmessung x₂ folgender Proportionalitätsfaktor (vgl. Abbildung D-27):

$$\frac{1}{K_{\epsilon_2}} = -0,158 \pm 0,017 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Im Vergleich zum Grundsystem liegt der Mittelwert ungefähr 6% unter dem Wert für das Grundsystem (0,168 nm/10⁻³), die Doppelbrechung ist um ca. 10% geringer als für das Grundsystem. Der Effekt ist also vergleichsweise gering ausgeprägt.

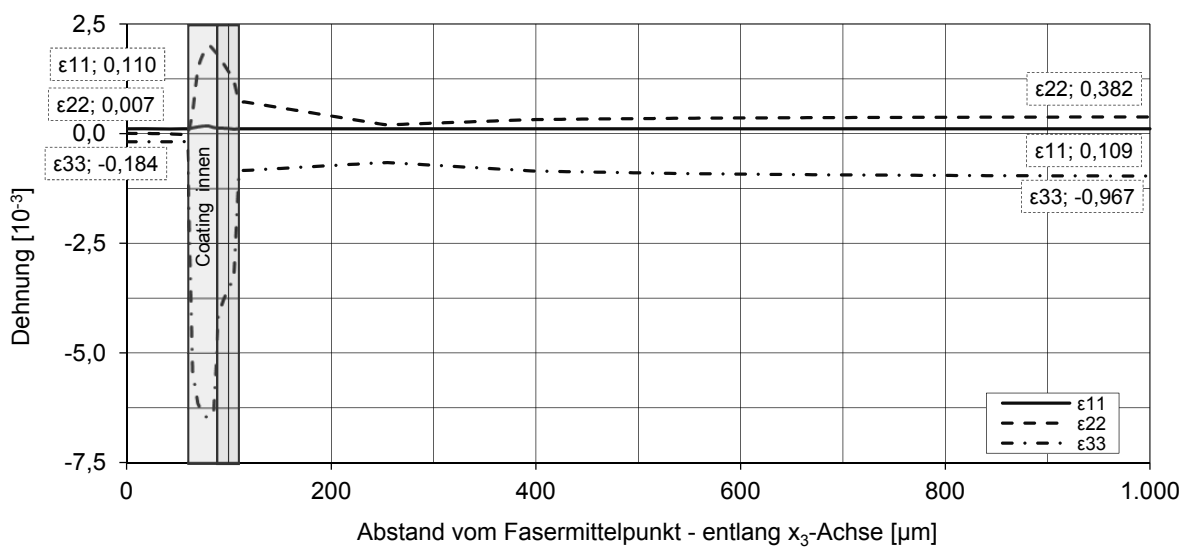


Abbildung D-28: Dehnungsverteilung bei ovalisiertem Coating infolge Querdruck in Richtung des dünnenen Coatings (x₃) (System 405-33z)

Bei einer Einwirkung in Richtung des dünneren Coatings werden die Querdehnungen in der optischen Faser höher (Abbildung D-28). Aus diesem Grund ergibt sich ein höherer Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_3}} = -0,178 \pm 0,022 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Im Vergleich zum Grundsystem liegt der Mittelwert ungefähr 6% über dem Wert für das Grundsystem ($0,168 \text{ nm}/10^{-3}$), die Doppelbrechung ist ca. 16% stärker ausgeprägt als beim Grundsystem. Bei einer Belastung in Richtung des dünneren Coatings ist daher mit einer schlechteren Qualität des Wellenlängenspektrums zu rechnen. Der Mittelwert verändert sich jedoch kaum, wie bei der Belastung entlang des dickeren Coatings.

Temperaturdifferenz

Wie im Grundsystem sind die Laminatdehnungen im ungestörten Bereich des Laminats gleich null, da es sich ausschließlich um eine unidirektionale Schicht handelt und folglich keine Zwängungen auftreten.

Wie bei der Belastung in Längsrichtung sind die Auswirkungen des deformierten Coatings bei einer Temperaturdifferenz sehr gering. Im Vergleich zum Grundsystem ergeben sich leichte Abweichungen infolge der unterschiedlichen Empfindlichkeit infolge der Quereinflüsse (Abbildung D-29). Das Coating federt in Abhängigkeit seiner Dicke die Temperaturdehnung des Laminats unterschiedlich stark ab, andererseits drückt es ebenfalls in Abhängigkeit der Dicke mit unterschiedlicher Spannung auf die Quarzglasfaser.

Infolge der Asymmetrie des Coatings ergibt sich ein anisotroper Dehnungszustand in der optischen Faser, weshalb Doppelbrechung auftritt. Der Proportionalitätsfaktor ergibt sich zu:

$$\frac{1}{K_T} = 0,0212 \pm 0,0002 \frac{\text{nm}}{\text{K}}$$

Der Mittelwert ist damit nahezu identisch zum Grundsystem, der Effekt der Doppelbrechung ist recht gering und für praktische Anwendungen nicht von Relevanz.

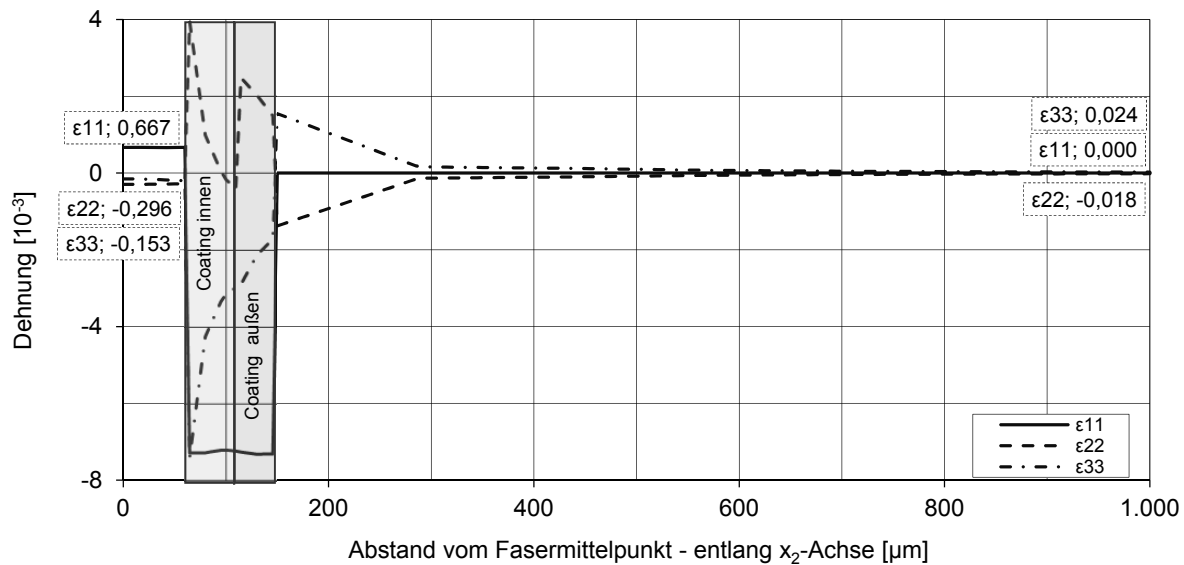


Abbildung D-29: Dehnungsverteilung über den Querschnitt bei gleichmäßiger Temperaturerhöhung von 100K (Sytsem 405-ty)

D 2.3.3 Sensorfaser ohne Coating (System 100)

Die Verwendung einer Sensorfaser ohne Coating hat den Vorteil, dass die Dehnungen aus dem Laminat direkt in die optische Faser einwirken und nicht durch das weiche Coating abgedämpft werden. Dennoch unterscheiden sich die Werkstoffkenngrößen der Quarzfaser von dem umgebenden Laminat, weshalb sich auch ohne Beschichtung die Dehnungen in der Faser von denen des Laminats unterscheiden. Es wird von einer unendlich großen unidirektionalen Schicht ausgegangen.

Grundsätzlich dient das Coating dem Schutz der optischen Faser gegen mechanische Beschädigung bei der Verarbeitung und Anwendung. Beim maschinellen Einsatz im Rahmen der Pultrusion oder der robotergesteuerten Applikation auf Gelege ist ein Coating quasi unumgänglich. Im Rahmen der Bauteilversuche werden jedoch Handlaminat gefertigt, bei denen die Sensorfaser an der Stelle, an der sich das Bragg-Gitter befindet, keine Beschichtung aufweisen (D 3). Das Rechenmodell dient also einerseits der Beschreibung der späteren Bauteilversuche, andererseits der Grenzwertabschätzung besonders steifer Coatings.

Belastung längs zur Sensorfaser

Da die weiche Zwischenschicht hier entfällt, nähert sich der Dehnungszustand in der optischen Faser dem des Laminats an. Das heißt: die Querdehnung in der Sensorfaser entspricht nicht deren Querdehnzahl ($\nu = 0,16$), sondern tendiert in Richtung der höheren Querdehnzahlen des Laminats (Abbildung D-30). Die Gefügestörungen haben ungefähr eine Ausbreitung des doppelten Durchmessers der optischen Faser (ca. $250 \mu\text{m}$), was mit dem Grundsystem vergleichbar ist. Im ungestörten Bereich entspricht der Dehnungszustand des Laminats exakt den dessen Querdehnzahlen.

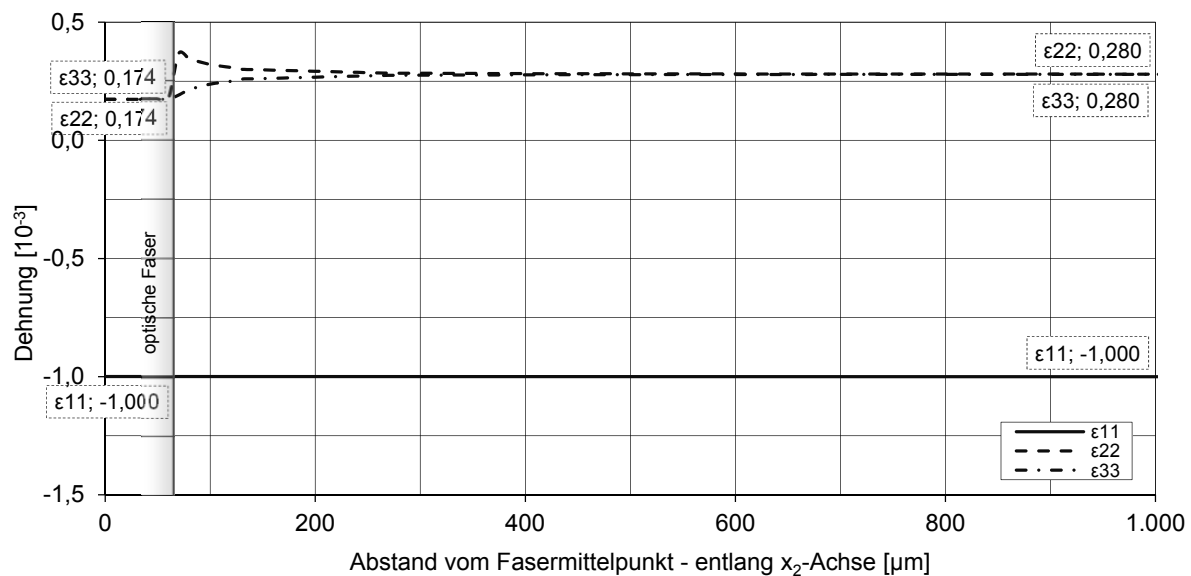


Abbildung D-30: Dehnungsverteilung über den Querschnitt bei Längsdruck (System 100-11y)

Es ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_{\epsilon_1}} = 1,236 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Im Vergleich zum Grundsystem entspricht dies einer Erhöhung von weniger als 1%, der Effekt der erhöhten Querdehnung ist damit für die praktische Auswertung nicht relevant.

Belastung quer zur Sensorfaser

Ohne den dämpfenden Effekt des weichen Coatings wirken Querdrücke unmittelbar auf die optische Faser. Da das Quarzglas einen höheren E-Modul als der umgebende faserverstärkte Kunststoff hat, ist dennoch die Dehnung in der optischen Faser kleiner als im umgebenden Laminat (Abbildung D-31). Der gestörte Bereich hat wie bei Längsdruck eine Ausdehnung von ca. 250 μm . Es ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_{\epsilon_2}} = -0,203 \pm 0,044 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Damit liefert der Sensor einem um ca. 22% höheren Messwert als beim Grundsystem, gleichzeitig ist der Effekt der Doppelbrechung mehr als doppelt so groß. Die Einwirkung von Querdruck ist hier also mit qualitativ schlechten Messwerten verbunden.

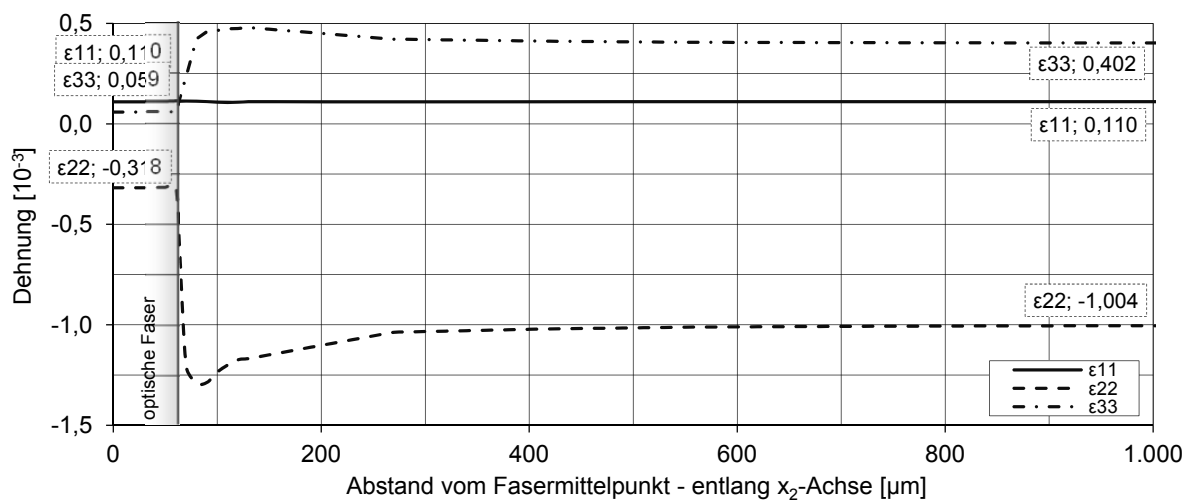


Abbildung D-31: Dehnungsverteilung über den Querschnitt bei Querdruck x_2 (System 100-22y)

Temperaturdifferenz

Das Quarzglas der optischen Faser hat im Vergleich zum unidirektionalen Laminat einen sehr kleinen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Bei einer Temperaturerhöhung dehnt sich das Laminat aus, wird aber an der Grenzfläche zur optischen Faser von dieser behindert. Daraus resultieren positive Querdehnungen in der optischen Faser mit Spannungsspitzen an der Grenzfläche (Abbildung D-32).

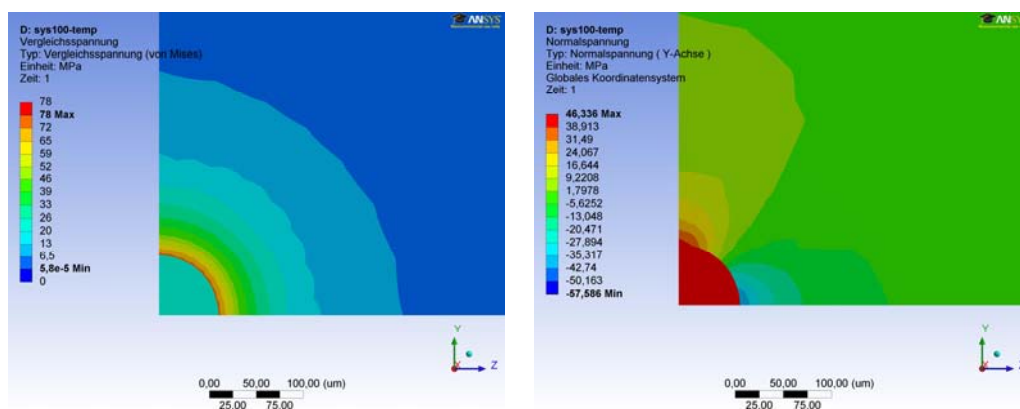


Abbildung D-32: Spannungen infolge einer gleichmäßigen Temperaturdifferenz von 100 K (System 100-T), links: Vergleichsspannungen, rechts: Normalspannung in Richtung der Y- bzw. x_2 -Achse

Die Vorzeichen drehen sich im Gegensatz zum Grundsystem um, wo das Coating mit dem nochmals höheren Wärmeausdehnungskoeffizient gegen die optische Faser drückt. Die Längsdehnung hängt ausschließlich von den Lamineigenschaften ab und ist daher mit dem Grundsystem identisch (Abbildung D-33). Es ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_T} = 0,0176 \frac{\text{nm}}{\text{K}}$$

Da die sich die jeweils resultierenden Wellenlängenverschiebungen infolge Längs- und Querdehnungen entgegen wirken, wird der Faktor 17% geringer als für das identische System mit Coating (Grundsystem). In beiden Fällen hängt der Faktor jedoch auch vom Faservolumengehalt des Laminats ab, weshalb die Auswirkung aus dem Coating nicht unbedingt maßgebend wird.

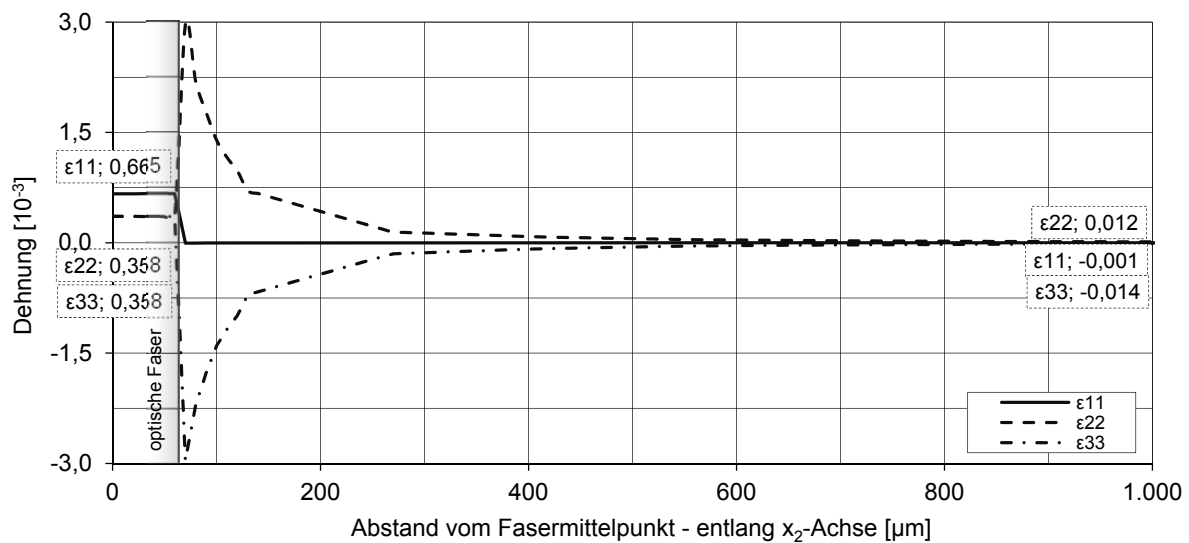


Abbildung D-33: Dehnungsverteilung über den Querschnitt bei gleichmäßiger Temperaturerhöhung um 100K (System 100-ty)

Die Spannungsspitzen an den Grenzflächen liegen wesentlich über den Werten des Grundsystems, was hinsichtlich der Dauerhaftigkeit des Sensor-Laminat-Verbunds problematisch werden kann. Die Haftzugfestigkeit zwischen dem Harz und der Faser ist experimentell schwer ermittelbar, da Maßstabeffekte hier eine tragende Rolle spielen. Als Anhaltspunkt kann die interlaminare Scherspannung sein, welche für ungesättigtes Polyesterharz mit Glasfasern bei ungefähr 10 N/mm^2 liegt [Val04].

In dem Berechnungsmodell treten an der Grenzfläche bei einer Temperaturdifferenz von 100 K Zugspannungen von ca. 46 N/mm^2 auf, die Vergleichsspannungen im Laminat sind mit 78 N/mm^2 ebenfalls recht hoch (Abbildung D-32). Damit wäre bereits eine Temperaturveränderung von 22 K als kritisch hinsichtlich zu bewerten. Der tatsächliche Wert liegt jedoch höher, da die Haftzugspannung nicht als lokaler Spitzenwert an der Grenzfläche Glasfaser-Matrix, sondern als mittlere Spannung zwischen zwei Einzelschichten definiert ist.

D 2.3.4 Sensorfaser ohne Coating und in Zwischenschichtlage (System 355)

Das betrachtete System identisch mit dem bereits untersuchten Mischlaminat (Kapitel D 2.3.1, S. 87), jedoch wird eine optische Faser ohne Coating angesetzt. Die Sensorfaser kommt damit innerhalb der unidirektionalen Schicht zum Liegen, was auch der praktischen Herstellung entspricht, wo die Faser zumindest im Randbereich in der UD-Schicht liegt (Abbildung D-34).

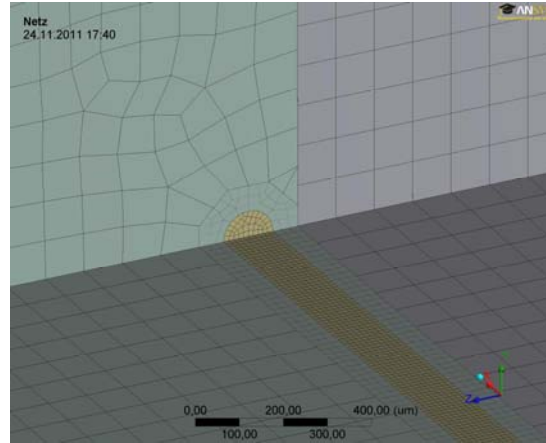


Abbildung D-34: Rechenmodell zum Mischlaminat mit optischer Faser ohne Coating (System 355)
links: UD-Schicht mit Elementverfeinerung an der Sensorfaser, rechts: Wirrfaserschicht

Belastung längs zur Sensorfaser

Die Dehnungen im ungestörten Bereich des Laminats sind mit dem bereits untersuchten Mischlaminat vergleichbar, wenn auch die Gefügestörung etwas weiter in das Laminat hinein wirkt (Abbildung D-35). Aufgrund des fehlenden Coatings sind die Querdehnungen (infolge Querkontraktion) in der Sensorfaser ungleichmäßiger und insgesamt höher. Innerhalb der optischen Faser ist der Verlauf gleichmäßig. Der Proportionalitätskoeffizient für Längsdehnung ist:

$$\frac{1}{K_{\epsilon_1}} = 1,243 \pm 0,006 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Im Vergleich zur identischen Geometrie bei einer Sensorfaser mit Coating liegt der Mittelwert nur um 1% höher, da die Querdehnungen bei Belastung in Faserrichtung nur eine untergeordnete Rolle spielen. Der Effekt der Doppelbrechung verdoppelt sich und kann damit Qualität des Reflexionsspektrums negativ beeinflussen. Von allen untersuchten Systemen zeigt dieses den größten Wert der Doppelbrechung unter Längsdruck.

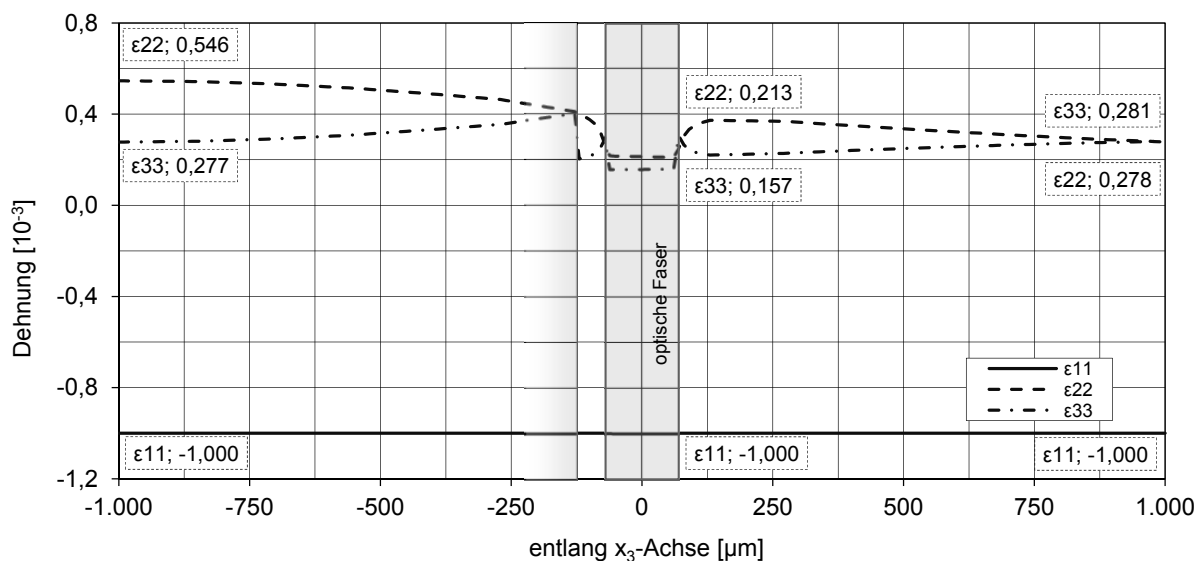


Abbildung D-35: Dehnungsverteilung über den Querschnitt bei Längsdehnung (System 355-11z),
links: Wirrfaserschicht (M), rechts: unidirektionale Schicht (UD)

Belastung quer zur Sensorfaser

Sowohl bei Querdruck in Laminat- als auch in Dickenrichtung sind die Querdehnungen im Vergleich zum identischen System mit Coating wesentlich höher und ungleichmäßiger ($\varepsilon_2 \neq \varepsilon_3$). Die Wirkungstiefe der Gefügestörung ist jedoch geringer, die Dehnungsdifferenzen bauen sich innerhalb weniger als dem halben Durchmesser der optischen Faser wieder ab. Eine Ausnahme ist hier jedoch in beiden Belastungsbildern die Dehnung in Dickenrichtung ε_3 , welche jedoch auch durch die Kombination zweier unterschiedlicher Einzelschichten (UD, M) bedingt ist.

Für die Dehnung in Laminatenebene (Abbildung D-36) ergibt sich der Proportionalitätsfaktor zu:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_2}} = -0,339 \pm 0,042 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Während infolge des direkten Einbaus ohne Coating der Mittelwert für Querdruck in Laminatenebene um ca. 12% steigt, wird der Effekt der Doppelbrechung mehr als verdoppelt.

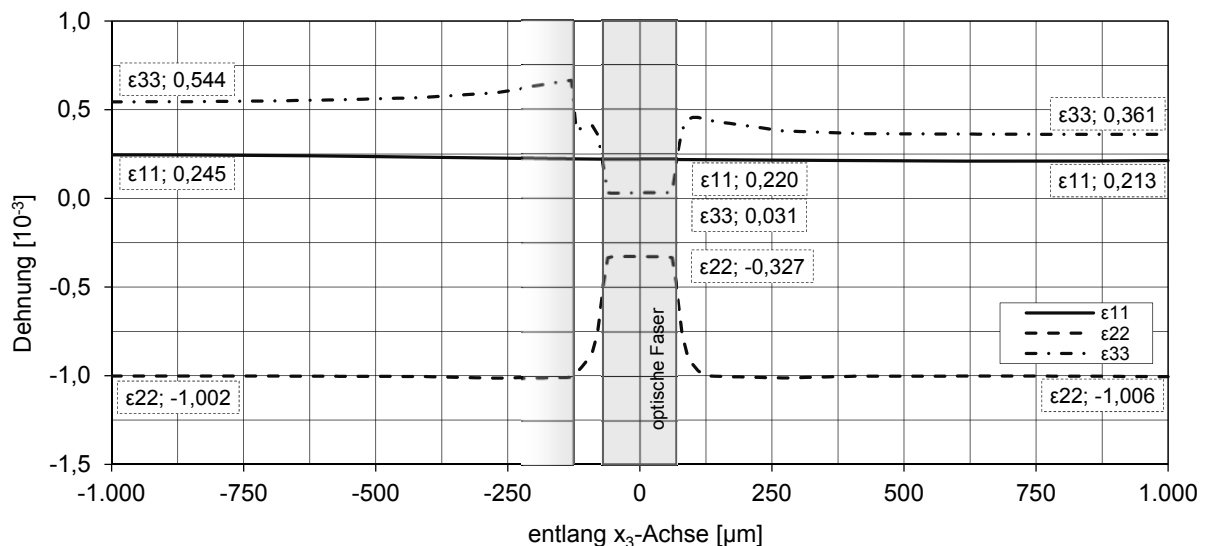


Abbildung D-36: Dehnungsverteilung bei Querdruck in Laminatrichtung x_2 (System 305-22z), links: Wirrfaserschicht (M), rechts: unidirektionale Schicht (UD)

Für die Belastung in Dickenrichtung (Abbildung D-37) ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_3}} = -0,209 \pm 0,027 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Der Mittelwert liegt ca. 20% über dem identischen System mit Coating, wobei sich der Effekt der Doppelbrechung um 80% steigert.

Bei beiden Orientierungen für Querdruck liefert eine Sensorfaser ohne Coating merklich höhere Proportionalitätskoeffizienten. Die Größenordnung der Doppelbrechung wird jedoch ungefähr verdoppelt, was die Qualität des Messsignals herabsetzt.

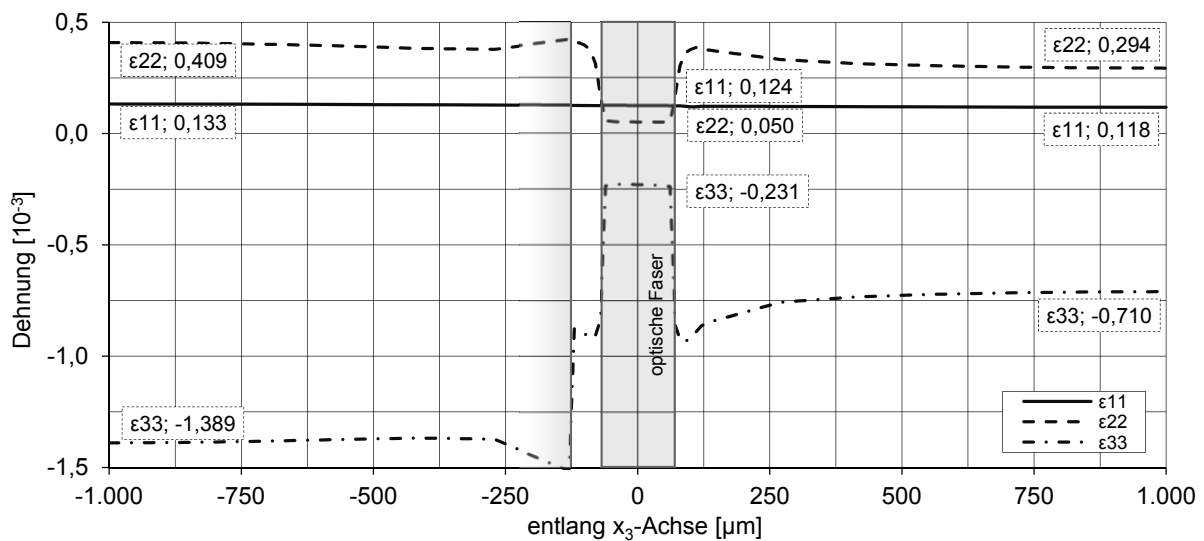


Abbildung D-37: Dehnungsverteilung bei Querdruck in Dickenrichtung x_3 (System 355-33z), links: Wirrfaserschicht (M), rechts: unidirektionale Schicht (UD)

Temperaturdifferenz

Wird eine Sensorfaser ohne Coating eingesetzt, ändern sich die Querdehnungen infolge einer Temperaturdifferenz grundsätzlich, vgl. „Temperaturdifferenz“, S. 96. Im Zusammenhang mit einem Mischlaminat aus unidirektionaler und Wirrfaserschicht ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_T} = 0,0215 \pm 0,0001 \frac{\text{nm}}{\text{K}}$$

Der Proportionalitätsfaktor ist damit im Mittel um 13% geringer als bei einer Sensorfaser mit Coating, die Doppelbrechung wird quasi nicht beeinflusst und ist für praktische Anwendungen nicht relevant.

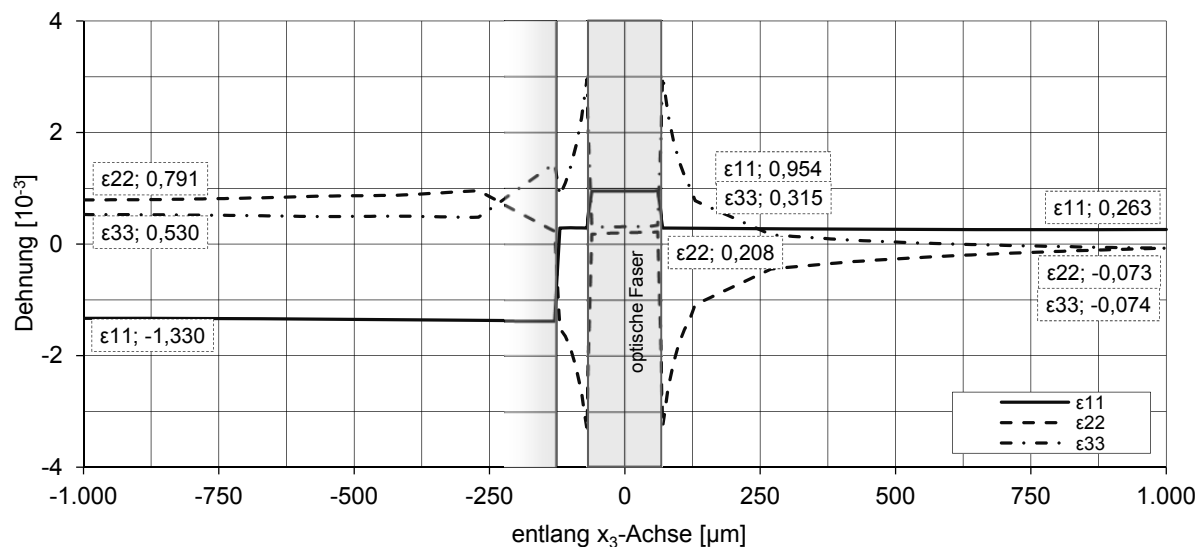


Abbildung D-38: Dehnungsverteilung bei gleichmäßiger Temperaturerhöhung von 100K (System 355-tz), links: Wirrfaserschicht (M), rechts: unidirektionale Schicht (UD)

Variation der Lamineigenschaften (System 356)

In einer Nebenbetrachtung wird das System so angepasst, dass die Berechnungsergebnisse den Bauteilversuchen an den Handlaminaten (Serie C) gegenübergestellt werden können (Tabelle D-4, S.73). Dabei beträgt bei beiden Einzelschichten der Faservolumengehalt ca. 80% des vorher beschriebenen Mischlaminats. Außerdem liegt ein volumenbezogenes Mischungsverhältnis von 71% Wirrfaserschicht zu 29% UD-Schicht vor im Gegensatz zu dem vorher betrachteten gleichmäßigen Mengenverhältnis. Die resultierenden Proportionalitätskoeffizienten werden auf S. 108ff. zusammengefasst.

Infolge der Anpassungen ändert sich der Proportionalitätsfaktor für Längsdruck um lediglich 0,3%, was praktisch vernachlässigbar ist. Unter Querdruck in Laminatrichtung reduziert sich der Faktor um ca. 7%, bei Belastung in Dickenrichtung um ca. 10%. Die Doppelbrechung wird bei Querdruck in Laminatrichtung geringer, für die Dickenrichtung bleibt der Wert ungefähr gleich. Infolge einer gleichmäßigen Temperaturveränderung erhöht sich der Proportionalitätsfaktor infolge des geringeren Faservolumengehalts und dem abweichenden Mischungsverhältnis um ca. 12%.

D 2.3.5 Harztasche (System 200)

Ist die Sensorfaser nicht längs einer unidirektionalen Schicht angeordnet, werden die anliegenden Faserverstärkungen gewellt, der entstehende dreiecksförmige Hohlraum wird mit reinem Harz ohne Faserverstärkung gefüllt. Diese Problematik wurde in anderen Forschungsarbeiten eingehend diskutiert, die gewählte Systemgeometrie wurde an diese Ergebnisse angelehnt, vgl. Abbildung D-3 (S. 65). Der Öffnungswinkel der Harztasche beträgt 22° , die Harztasche ist in Laminatenebene x_2 bzw. y -Achse ausgerichtet (Abbildung D-39).

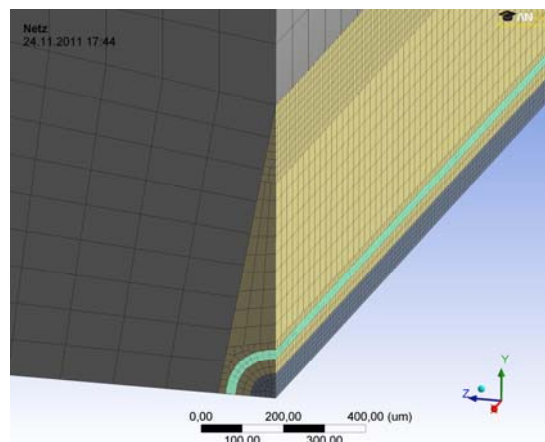


Abbildung D-39: Geometrie des Rechenmodells mit Harztasche (System 200)

Die beschriebenen Harztaschen konnten im Rahmen des begleitenden Entwicklungsprojekts nicht bestätigt werden, dies trifft auch für diese Sensorfasern zu, welche 45° zur unidirektionalen Verstärkung angeordnet wurden. Als Ursache ist zu sehen, dass die hier vergleichsweise dicken Einzelschichten einen wesentlich unregelmäßigeren Aufbau bedingen als die in der Luft- und Raumfahrt üblichen dünnen und rein unidirektionalen Lagen.

Belastung längs zur Sensorfaser

Trotz der ausgedehnten Harztasche und damit unterschiedlicher Werkstoffe in Laminat- bzw. Dickenrichtung, ist der Dehnungszustand infolge Querkontraktion vergleichsweise ausgeglichen (Abbildung D-40). Da die

Harztasche in Laminebene (x_2) orientiert ist, sind dort die Querdehnungen infolge des niedrigeren E-Moduls auch etwas geringer. Der resultierende Proportionalitätsfaktor ergibt sich zu:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_1}} = 1,227 \pm 0,001 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Der Mittelwert ist damit mit dem des Grundsystems identisch, es tritt daneben eine sehr geringe Doppelbrechung auf, welche für die praktische Anwendung jedoch ohne Relevanz ist.

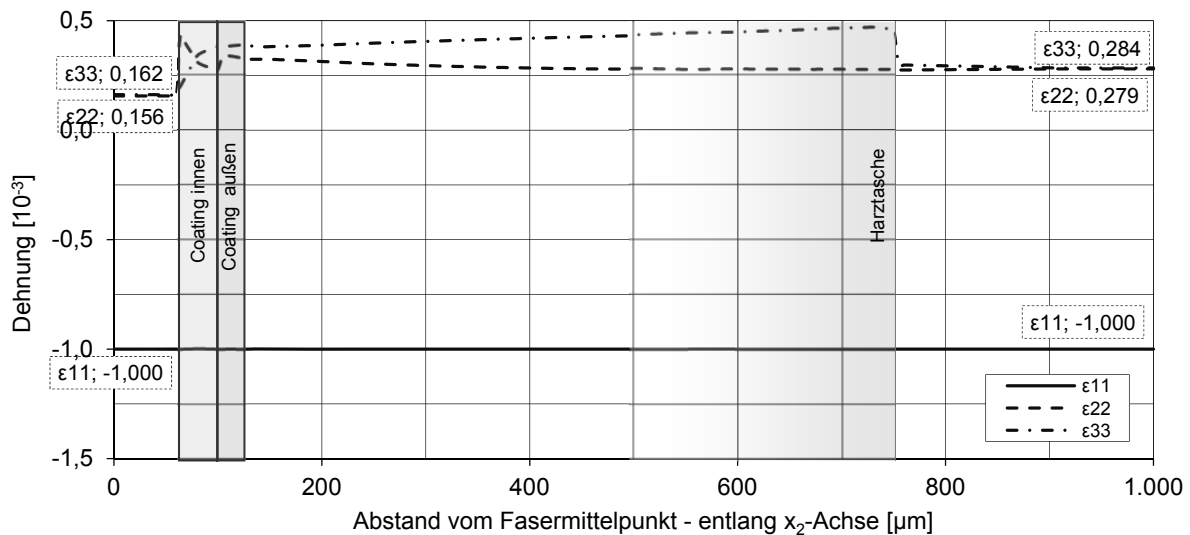


Abbildung D-40: Dehnungsverlauf über den Querschnitt bei Längsdruck (System 200-11y)

Belastung quer zur Sensorfaser

Die betrachtete Harztasche wirkt sich vor allem auf die Querdruckempfindlichkeit der Sensorfaser aus. Bei Druck in Orientierung der weichen Harztasche (Laminebene x_2) lagern sich die Spannungen um, die Lastpfade fließen um die Sensorfaser herum. Die Dehnungen im Coating und der optischen Faser sind wesentlich geringer als bei einer Belastung senkrecht zur Harztasche (Dickenrichtung x_3), vgl. Abbildung D-41.

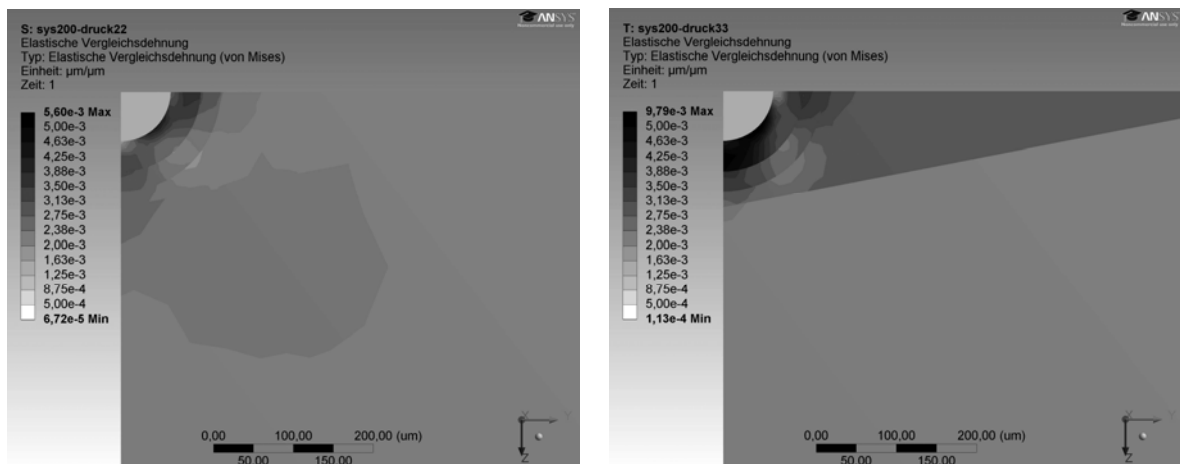


Abbildung D-41: Vergleichsdehnungen über den Querschnitt unter Querdruck, links: Einwirkung längs der Harztasche, x_2 - bzw. y -Achse (System 200-22), rechts: Einwirkung senkrecht zur Harztasche, x_3 - bzw. z -Achse (System 200-33)

Bei Querdruck längs der Harztasche (entlang x_2 -Achse) nimmt die Dehnung ε_2 vom Laminat Richtung Harztasche zunächst ab, die Spannungen lagern sich also seitlich um (Abbildung D-42). An der Spitze der Harztasche (*Kreis*) beträgt die Dehnung in Laminatenebene nur noch 75% des Wertes im ungestörten Bereich. Die resultierenden Dehnungen in Coating und Quarzglasfaser sind deutlich unter den Werten des Grundsystems. Es ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_2}} = -0,154 \pm 0,013 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Der Mittelwert liegt damit ca. 8% unter dem Wert des Grundsystems, der Effekt der Doppelbrechung ist aufgrund der weniger divergierenden Werte beider Querdehnungen geringer als im Grundsystem.

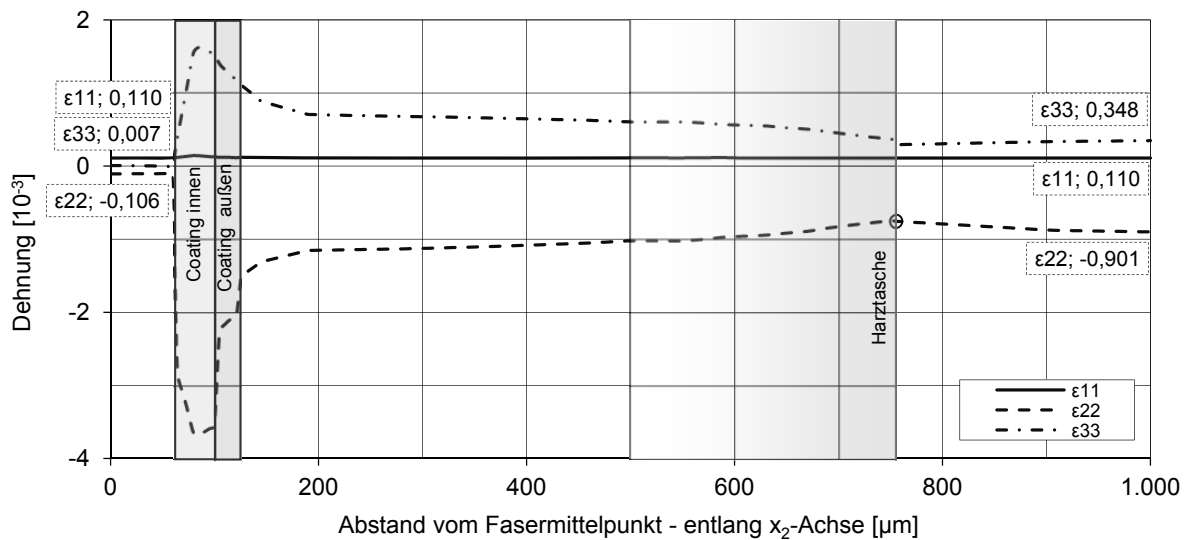


Abbildung D-42: Dehnungsverteilung unter Querdruck längs der Harztasche (System 200-22y)

Für eine Belastung senkrecht zur Harztasche, also in Richtung der x_3 -Achse, tritt der umgekehrte Effekt auf. Dadurch, dass die neben der Sensorfaser liegende Harzschicht einen geringeren E-Modul als das reguläre Laminat oder die Quarzglasfaser hat, entfällt ein höherer Anteil des Kraftflusses auf die Sensorfaser. Im Vergleich zum Grundsystem entstehen höhere Querdehnungen ε_3 (Abbildung D-43). Damit ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_3}} = -0,192 \pm 0,017 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Dieser ist 15% höher als für das Grundsystem, der Effekt der Doppelbrechung fällt hingegen etwas geringer aus.

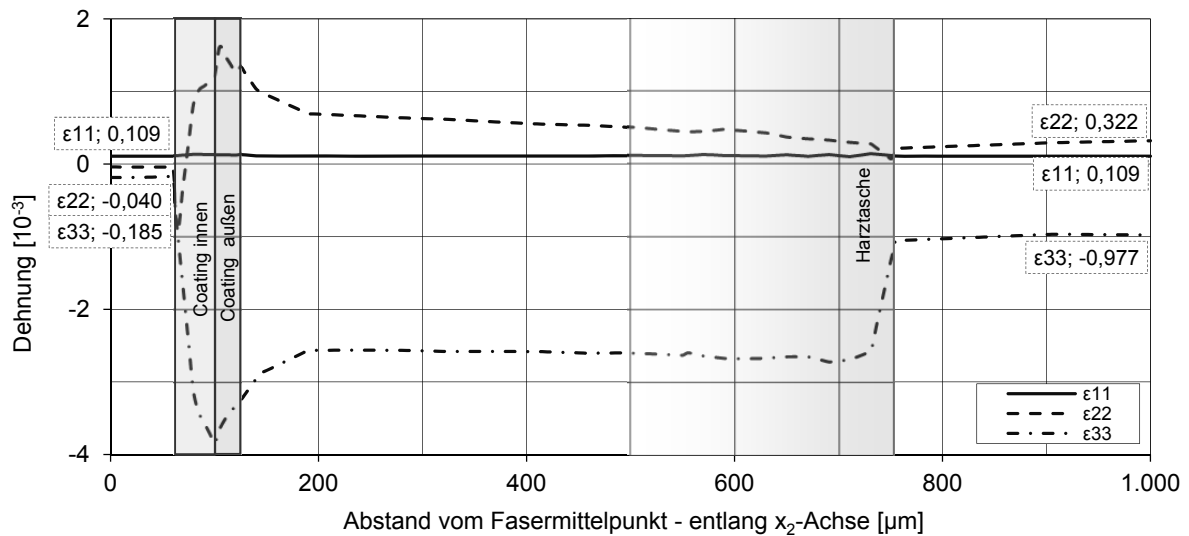


Abbildung D-43: Dehnungsverteilung unter Querdruck senkrecht zur Harztasche (System 200-33y)

Temperaturdifferenz

Das Harz neben der Sensorfaser hat einen höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten als die umliegenden Laminatschichten, bei einer Temperaturerhöhung spreizt es sich daher gegen das Laminat und verursacht in der Sensorfaser höhere Dehnungen in Laminatrichtung (ϵ_2) und infolge der Querdehnung etwas erhöhte Längsdehnungen (Abbildung D-44). Der Proportionalitätsfaktor wird dann zu:

$$\frac{1}{K_T} = 0,0212 \pm 0,0004 \frac{\text{nm}}{\text{K}}$$

Der Mittelwert ist nahezu identisch mit dem Grundsystem, da Querdehnungen zu diesem Wert einen untergeordneten Beitrag liefern. Jedoch wird aufgrund der anisotropen Dehnungsverteilung die Doppelbrechung sehr groß.

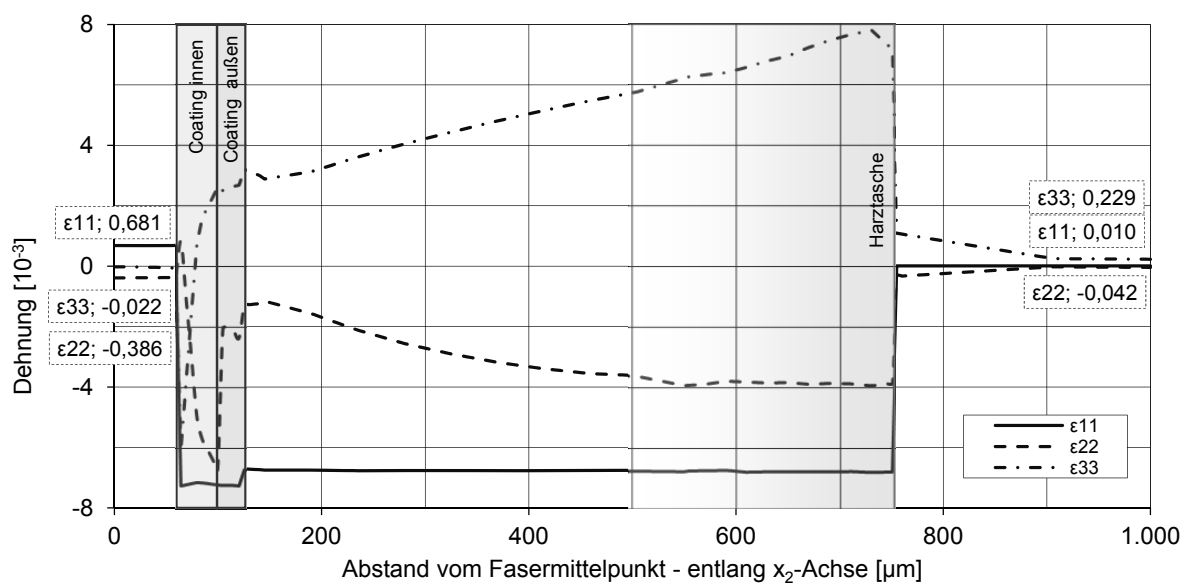


Abbildung D-44: Dehnungsverteilung infolge gleichmäßiger Temperaturerhöhung um 100 K (System 200-ty)

D 2.3.6 Sternförmiges Coating (System 500)

Die Berechnungen an einem ovalisierten Coating (Kapitel D 2.3.2, S. 91ff.) zeigen, dass in Richtung des größeren Halbmessers die Empfindlichkeit gegen Querdehnung zurückgeht. Dies kann ein gewünschter Effekt sein, wenn Querdehnungen als störender Einfluss gesehen werden. Aus diesem Grund wird in einem ergänzenden Berechnungsmodell geprüft, ob sternförmiges Coating die Empfindlichkeit für Querdruck generell herabsetzt. Die Querschnittsflächen der beiden Coating-Schichten entsprechen denen des undeformierten Grundsystems, die Geometrie ist jedoch sternförmig verformt (Abbildung D-45). Der Sensor befindet sich in einer unendlich großen unidirektional verstärkten Schicht, die „Strahlen“ werden längs der Hauptachsen definiert.

Erwartungsgemäß ist der Dehnungszustand unter Längsdruck identisch mit dem des Grundsystems. Der Proportionalitätsfaktor ist daher auch mit $1,227 \text{ nm}/10^{-3}$ identisch, ohne dass Doppelbrechung auftritt.

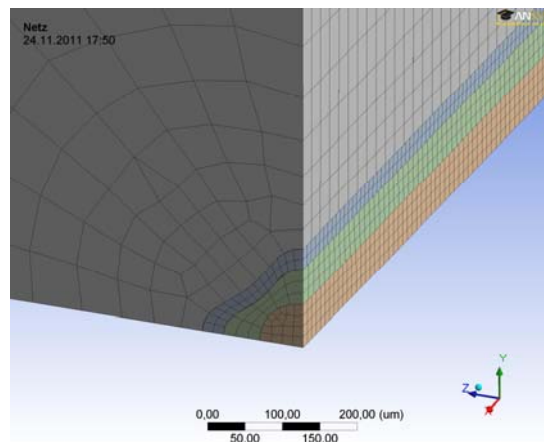


Abbildung D-45: Geometrie des Rechenmodells mit sternförmigen Coating (System 500)

Belastung quer zur Sensorfaser

Für Querdruck wird neben der Belastung längs der Hauptachsen auch eine Einwirkung 45° zu den Hauptachsen untersucht, also in die Richtung der dünnsten Stelle des Coatings (Abbildung D-46).

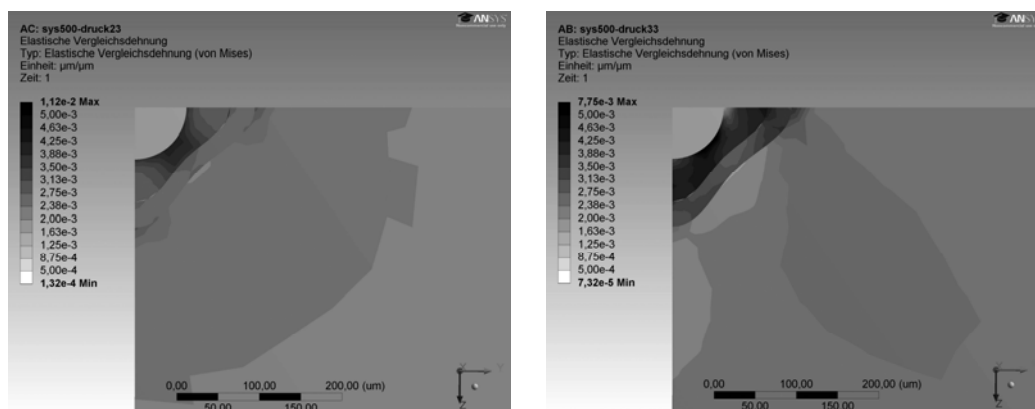


Abbildung D-46: Vergleichsdehnungen unter Querdruck
links: Einwirkung in 45° -Richtung zu den Hauptachsen⁵², (System 500-23)
rechts: Einwirkung in Dickenrichtung, x_3 - bzw. z -Achse (System 500-33)

⁵² Die Vergleichsdehnungen links sind um den Faktor 2,36 zu hoch angegeben, das Maximum ist damit $4,75 \cdot 10^{-3}$.

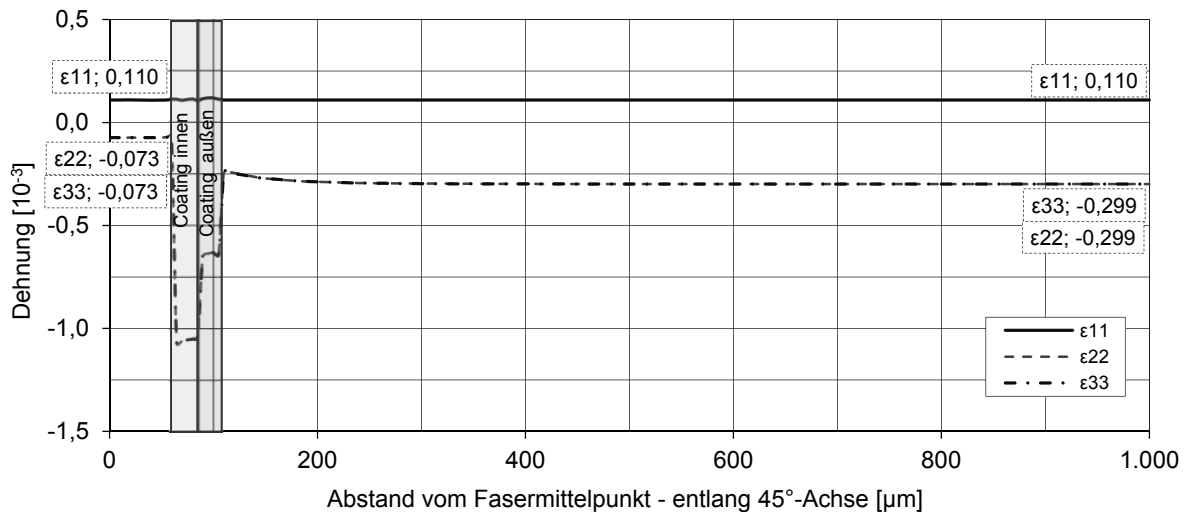


Abbildung D-47: Dehnungsverteilung Querdruck in Diagonalrichtung 45° (System 500-23yz)

Um in 45°-Richtung eine Einheitsdehnung von $1,0 \cdot 10^{-3}$ zu erzeugen, wird in Richtung der beiden Hauptachsen eine Dehnung von jeweils $0,3 \cdot 10^{-3}$ aufgebracht. Die aus Querkontraktion resultierende Dehnung in Längsrichtung ist dann identisch mit dem Wert des Grundsystems (Abbildung D-47). Die Querdehnungen nehmen in beide Richtungen den gleichen Wert an, der Proportionalitätsfaktor ergibt sich damit zu:

$$\frac{1}{K_{\epsilon_{45^\circ}}} = -0,169 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Dieser ist ca. 1% größer als bei dem Grundsystem, sind also der einwirkende Querdruck längs der Strahlen orientiert ergeben sich quasi keine Veränderungen gegenüber einem kreisrunden Coating. Aufgrund der Symmetrie der Querdehnungen tritt keine Doppelbrechung auf.

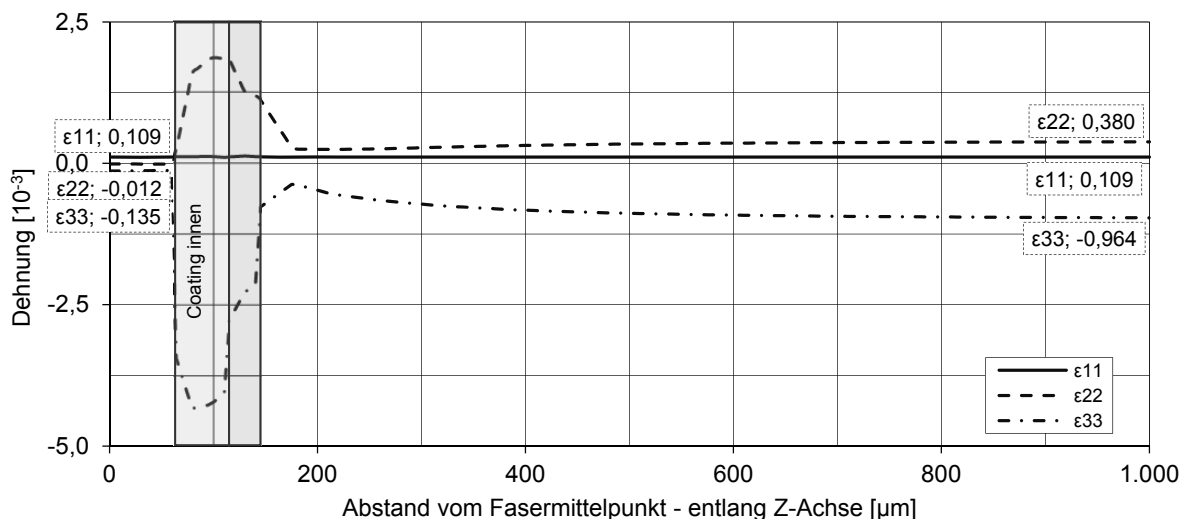


Abbildung D-48: Dehnungsverteilung bei Querdruck in Dickenrichtung x_3 (System 500-33z)

Wird der Querdruck längs der „Strahlen“, also entlang der Hauptachsen aufgebracht, entsteht ein asymmetrischer Dehnungszustand in Coating und optischer Faser (Abbildung D-48). Die aus der Querkontraktion resultierende Längsdehnung ist dem Grundsystem bzw. dem Wert für die Einwirkung in 45°-Richtung identisch.

Der Proportionalitätsfaktor ergibt sich damit zu:

$$\frac{1}{K_{\epsilon_3}} = -0,168 \pm 0,014 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Der Wert ist damit geringfügig größer als bei dem Grundsystem ($-0,167 \text{ nm}/10^{-3}$), die Doppelbrechung reduziert sich um 26%. Das heißt, dass der beabsichtigte Effekt einer geringeren Empfindlichkeit des Systems gegen Querdruck nicht eingetreten ist, lediglich eine Verringerung der Doppelbrechung kann für eine Belastung in Querrichtung erzielt werden.

Temperaturdifferenz

Ähnlich wie bei den untersuchten Querbelastungen, treten auch hier im Vergleich zum Grundsystem geringere Querdehnungseffekte auf (Abbildung D-49). Der Proportionalitätsfaktor ergibt sich damit zu:

$$\frac{1}{K_T} = 0,0211 \frac{\text{nm}}{\text{K}}$$

Der Wert liegt geringfügig unter dem des Grundsystems, dies hat für die praktische Anwendung jedoch keine Auswirkungen.

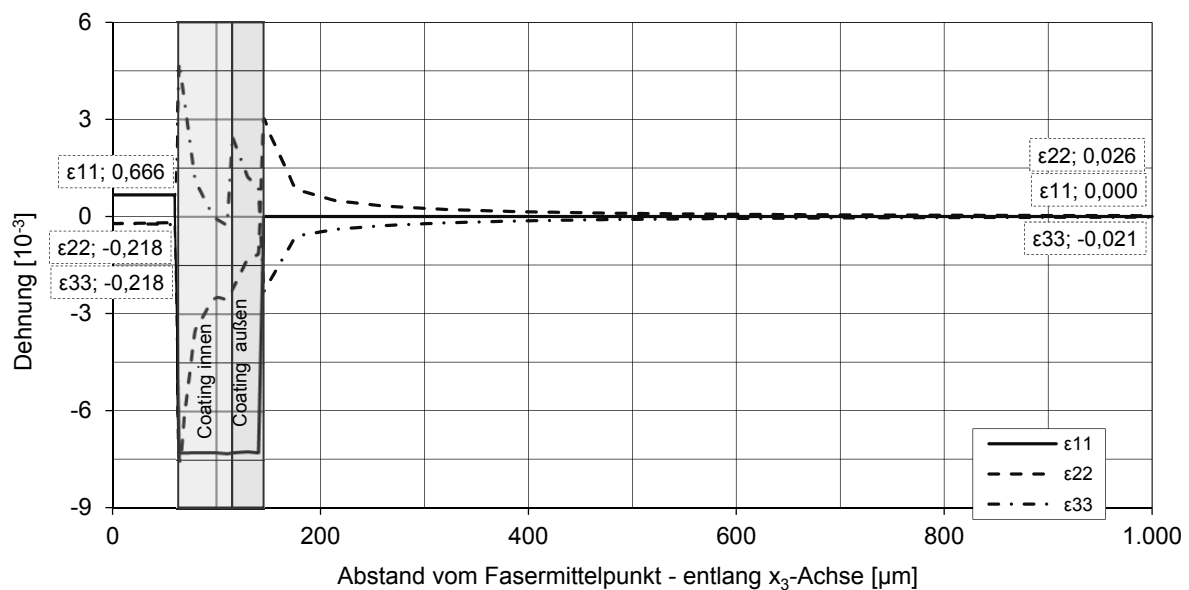


Abbildung D-49: Dehnungsverteilung bei gleichmäßiger Temperaturerwärmung um 100 K (System 500-tz)

Die Berechnungen zeigen, dass die sternförmige Ausbildung des Coatings nicht zielführend ist, wenn beabsichtigt wird, dadurch die Empfindlichkeit auf Querdruck herabzusetzen. Vielmehr weisen die Ergebnisse darauf hin, dass die geometrische Variation bis zu einem gewissen Grad keinen Einfluss auf die Sensor-Bauteil-Interaktion hat.

D.2.3.7 Zusammenfassung der geometrischen Untersuchungen

Bei den Berechnungen wurden jeweils die Dehnungen im Faserkern in Abhängigkeit von äußeren Einwirkungen ermittelt. Der Zusammenhang zwischen dem Dehnungszustand und der Temperaturdifferenz zur resultierenden Wellenlängenverschiebung wird über den Proportionalitätsfaktors ermittelt. Hierzu werden die Zusammenhänge gemäß (D.3), (D.4) und (D.5) auf S. 78f herangezogen. Bei den Temperaturlastfällen ist dabei der spannungslose Anteil der Temperaturdehnung der optischen Faser bereits in der zu Grunde gelegten Formel berücksichtigt, er ist jedoch ohnehin sehr gering⁵³. Die zusätzlichen Dehnungen aus Zwängung sind jedoch zu addieren.

Die Ergebnisse werden im Folgenden getrennt für die verschiedenen Einwirkungen verglichen, eine tabellarische Auflistung aller Berechnungsergebnisse ist in Anhang 8 auf Seite 214 zusammengefasst.

Belastung längs zur Sensorfaser

Der Proportionalitätsfaktor bleibt für alle untersuchten Systeme vergleichsweise konstant, die Werte streuen nur um ca. 1% um den Wert für das Grundmodell bzw. dem der blanken Sensorfaser (Abbildung D-50). Dies ist hinsichtlich der geometrischen Unterschiede der untersuchten Lamine und Modelle durchaus beachtlich. Dies liegt vor allem daran, dass der Wert hauptsächlich durch die Längsdehnung in der optischen Faser beeinflusst wird, weniger von Querkontraktionseffekten⁵⁴. Für die praktische Anwendung kann daher in guter Näherung stets der Proportionalitätsfaktor einer blanken Faser verwendet werden, unabhängig vom lokalen Gefüge. Die Lage der Sensorfaser zwischen zwei unterschiedlichen Einzelschichten kann jedoch zu einer unerwünschten Doppelbrechung führen, welche bei hohen Dehnungen die Qualität des Messergebnisses negativ beeinflusst.

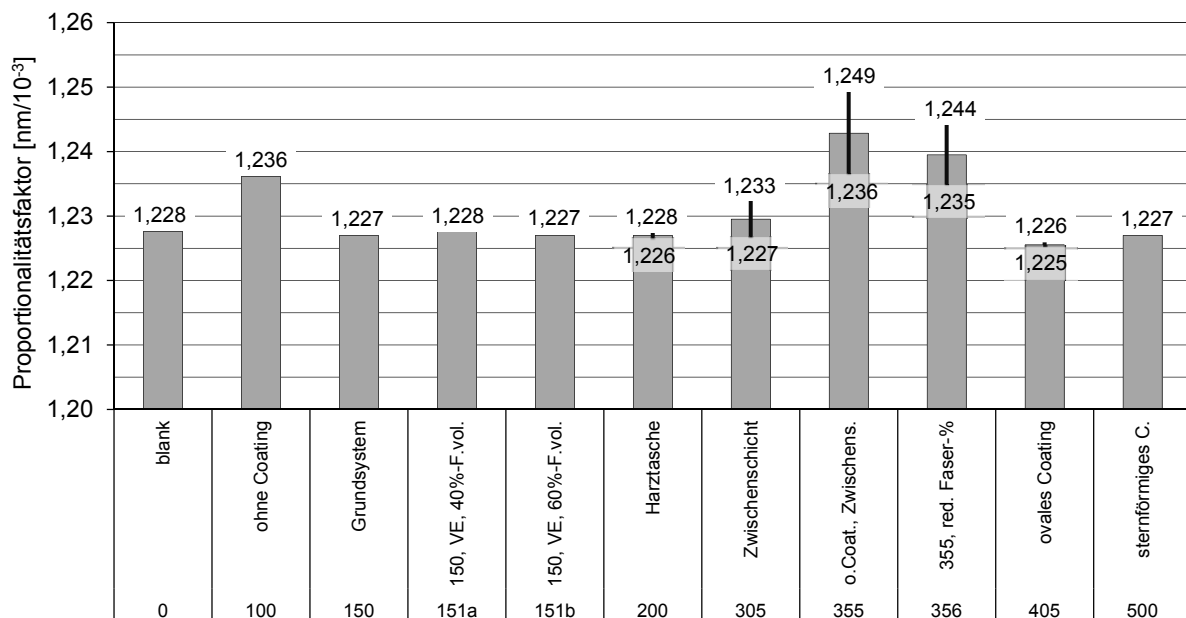


Abbildung D-50: Zusammenstellung der Proportionalitätsfaktoren für Längsdruck, die Spannweite zwischen den Wertepaaren beschreibt den Effekt der Doppelbrechung

⁵³ Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Quarzglas beträgt $0,51 \cdot 10^{-6}/K$, dies entspricht einer Differenz des Proportionalitätsfaktors von $0,0003 \text{ nm/K}$ oder $2,4\%$ des Gesamtwerts für das Grundsystem.

⁵⁴ Wie in Formel (C.10) auf S. 35 gezeigt, wird der Zusammenhang zwischen Längsdehnung in der optischen Faser und der korrespondierenden Wellenlängenverschiebung vor allem durch die Streckung des Reflexionsgitters beeinflusst. Die Änderung der Brechungsindex wirkt diesem entgegen, entspricht jedoch nur ca. $\frac{1}{4}$ des ersteren Wertes.

Belastung quer zur Sensorfaser

Die Proportionalitätsfaktoren für Querdruck streuen in wesentlich größerem Maß als die Faktoren für Längsdruck (Abbildung D-51, Abbildung D-52). Zunächst haben alle untersuchten Systeme mit strukturintegrierten Sensoren geringere Faktoren als eine blanke⁵⁵ Sensorfaser, sowohl Mittelwert als auch Doppelbrechung fallen betragsmäßig geringer aus. Wie jedoch bei der Untersuchung „Punktueller Belastung quer zur Sensorfaser“ (S. 51) gezeigt wird, ist der in der Literatur beschriebene Zustand einer uniaxialen Querdehnung bei einer blanken Faser ohnehin nicht relevant für die praktische Anwendung.

Dennoch gilt, dass bei strukturintegrierter Sensorik die Empfindlichkeit gegenüber einer Einwirkung senkrecht zur Sensorfaser deutlich unter der Empfindlichkeit bei einer Einwirkung in axialer Richtung liegt. Außerdem fällt die Doppelbrechung bei strukturintegrierter Sensorik wesentlich geringer aus, als bei einer blanken Sensorfaser. Folglich kann die in der Literatur theoretisch beschriebene Möglichkeit, Querdehnungen explizit über die Doppelbrechung zu messen, nicht auf strukturintegrierte Systeme übertragen werden.

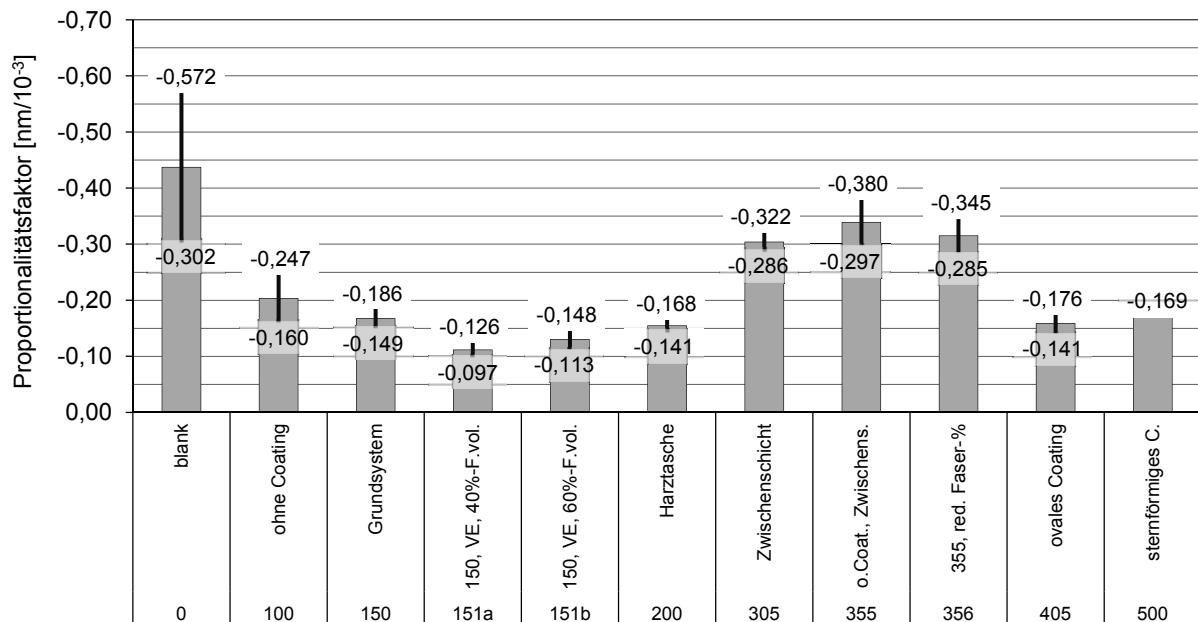


Abbildung D-51: Zusammenstellung der Proportionalitätsfaktoren für Querdruck in Laminatrichtung (x_2), bei System 500: 45° zu den Hauptachsen geneigt, die Spannweite zwischen den Wertepaaren beschreibt den Effekt der Doppelbrechung

Bei einer Einwirkung in Laminebene (x_2) hängt der Proportionalitätsfaktor hauptsächlich von der Faserarchitektur des Laminats ab. Bei den Mischlaminaten sind aufgrund der abweichenden Querdehnzahlen wesentlich höhere Faktoren zu erwarten als bei rein unidirektionale verstärkte Schichten. Außerdem steigt der Proportionalitätsfaktor mit zunehmendem Faservolumengehalt. Die Streuung, also die Auswirkung der Doppelbrechung, ist bei Sensorfasern mit Coating wesentlich geringer ausgeprägt, als bei Sensorfasern ohne Coating.

⁵⁵ Blanke Faser: Sensorfaser ohne Coating, nicht in einen Faserverbundwerkstoff integriert, Einwirkungen wirken unmittelbar auf die Quarzglasfaser.

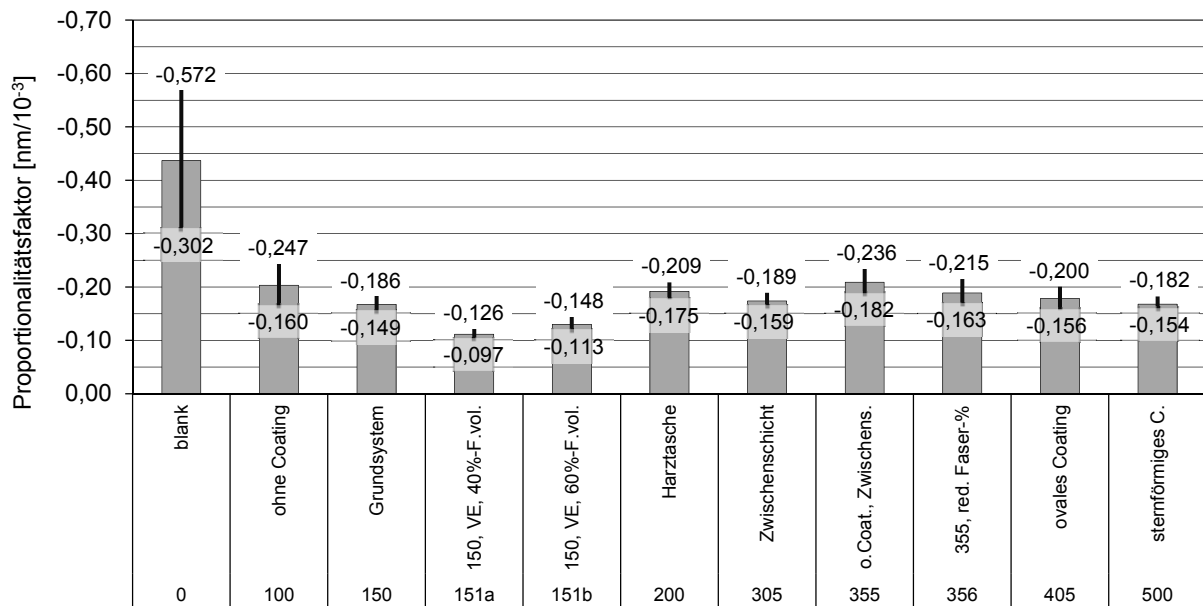


Abbildung D-52: Zusammenstellung der Proportionalitätsfaktoren für Querdruck in Dickenrichtung (x_3), die Spannweite zwischen den Wertepaaren beschreibt den Effekt der Doppelbrechung

Bei einer Einwirkung in Dickenrichtung (x_3) haben Mischlaminat ähnliche Proportionalitätsfaktoren wie rein unidirektional verstärkte Systeme. Wie bei der Beanspruchung in Laminatenebene, führt hier ein höherer Faservolumengehalt zu einer größeren Empfindlichkeit, außerdem haben Systeme ohne Coating einen höheren Proportionalitätsfaktor und eine größere Streuung als Systeme mit Coating.

Temperaturdifferenz

Infolge der vergleichsweise hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten faserverstärkter Kunststoffe werden bei einer Temperaturdifferenz die integrierten Sensoren in axiale Richtung gedehnt. Durch die Überlagerung der Effekte aus Temperatur und Längsdehnung ist der Proportionalitätsfaktor bei strukturintegrierten Sensoren grundsätzlich größer als bei blanken Sensorfasern (Abbildung D-53). Bei dem Grundsystem (Sys 150) liegt der Faktor beispielsweise ca. 72% über dem der blanken Faser.

Die Werte streuen in Abhängigkeit der Werkstoffe und der Geometrie des betrachteten System, grundsätzlich überlagern sich dabei zwei Effekte:

- der effektive Wärmeausdehnungskoeffizient des Gesamtlaminats in Richtung des Sensors (x_1) beeinflusst den Wert unmittelbar⁵⁶
- eine Sensorfaser ohne Coating hat jeweils einen geringeren Proportionalitätskoeffizienten als das identische System mit Coating⁵⁷

Daneben gibt es weitere Einflussfaktoren wie das verwendete Harz und lokale Gefügestörungen, welche zu Unsicherheiten in der Interpretation der Werte führen können.

⁵⁶ Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist umso größer, desto geringer der Faservolumenanteil entlang der x_1 -Achse ist, bei Wirrfaserschichten ist er außerdem größer als bei UD-Schichten in Faserrichtung.

⁵⁷ Da das thermoplastische Coating einen wesentlich höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten als das Laminat hat, drückt es gegen die optische Faser und verursacht höheren Querdruck. Dieser verursacht eine positive Wellenlängenverschiebung, welche wiederum den Effekt aus Längszug verstärkt.

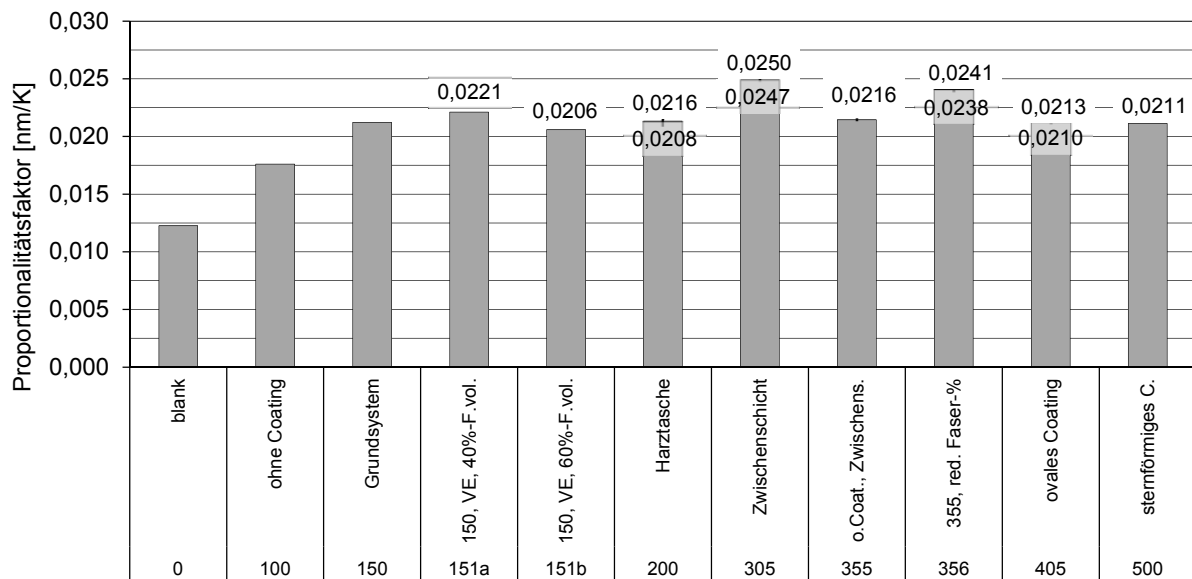


Abbildung D-53: Zusammenstellung der Proportionalitätsfaktoren für gleichmäßige Temperaturänderung, die Spannweite zwischen den Wertepaaren beschreibt den Effekt der Doppelbrechung

Verglichen mit den Proportionalitätsfaktoren aus Längsdruck und Querdruck, ergeben sich beispielsweise beim Grundsystem identische Wellenlängenverschiebungen für eine Temperaturdifferenz von 58 K wie bei einer Dehnung in Längsrichtung von 10^{-3} (entspr. $43,6 \text{ N/mm}^2$) bzw. einer Dehnung in Querrichtung von $-7,35 \cdot 10^{-3}$ (entspr. $-125,8 \text{ N/mm}^2$). Es ist erkennbar, dass vor allem Längsdehnung und Temperaturänderung eine Auswirkung auf die gemessene Wellenlängenverschiebung haben, weniger jedoch Dehnungen senkrecht zur Sensorfaser.

D 2.4 Einfluss des Coatings

Während im vorherigen Abschnitt die Auswirkung der Laminatarchitektur auf die Sensor-Bauteil-Interaktion im Mittelpunkt stand, konzentrieren sich die folgenden Untersuchungen auf den Werkstoff der Beschichtung (Coating). Hierbei wird die Geometrie des Grundsystems konstant gehalten und lediglich der E-Modul und Wärmeausdehnungskoeffizient des Coating variiert.

D 2.4.1 Erforderliche Übertragungslänge (System 115)

Bei extern applizierten Sensoren spielt die Kontaktlänge zwischen Sensorfaser und Bauteil eine wichtige Rolle, da die Längsdehnung in der optischen Faser der des Substrats entsprechen soll. Dort ist eine steife Anbindung zielführend, also ein dünnes Coating mit hohem E-Modul (Kapitel C 4, S. 59). Dies ist bei strukturintegrierten Sensoren jedoch weniger relevant, da eine kontinuierliche Dehnungsübertragung stattfinden kann, das Coating muss daher nicht unbedingt steif ausgeführt werden. Die Berechnungen sollen Aufschluss über den Mindestwert des E-Moduls des Coatings bei strukturintegrierter Verwendung geben.

Zur Ermittlung der notwendigen Übertragungslänge wird die Einwirkung so abgeändert, dass die eingeprägte Dehnung nur auf das Laminat, nicht jedoch auf Quarzfaser und Coating aufgebracht wird (Abbildung D-54). Die von außen aufgebrachte Stauchung von $5\ \mu\text{m}$ entspricht bei der Gesamtlänge des Modells von $5\ \text{mm}$ einer mittleren Dehnungsänderung von $-1,0 \cdot 10^{-3}$. Die Geometrie des Rechenmodells entspricht dabei dem Grundsystem (Kapitel D 2.2, S. 81ff.), jedoch wird ein einschichtiges Coating mit einer Gesamtstärke von $62,5\ \mu\text{m}$ angesetzt.

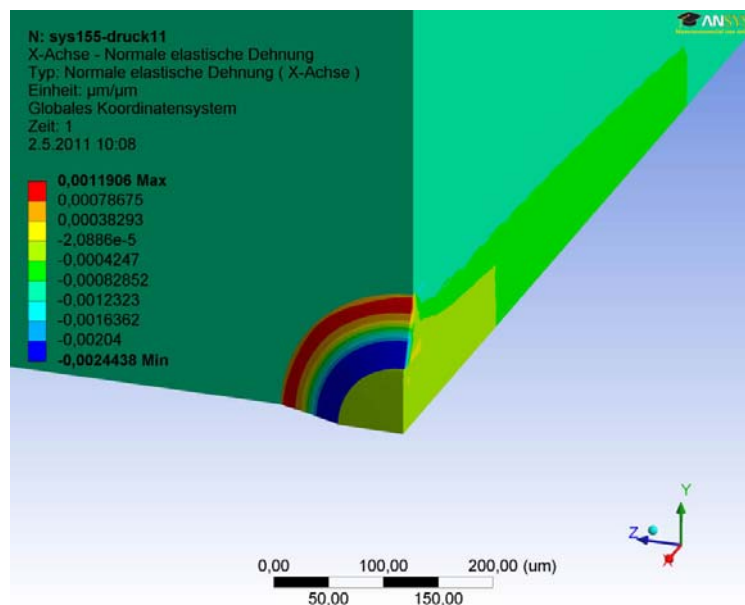


Abbildung D-54: Lokale Verformungen an der Lasteinleitung (x_1 bzw. x -Achse), überhöht dargestellt

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass - auch bei sehr weichen Coatings - im Abstand von wenigen Millimetern von der Lasteinleitung die Dehnung im Kern der Sensorfaser ausreichend genau der Dehnung im umgebenden Laminat entspricht (Abbildung D-55). Bei einem gebräuchlichen E-Modul von $2.000\ \text{N}/\text{mm}^2$ weicht nach einer

Übertragungslänge von 1,2 mm die Dehnung in der Sensorfaser weniger als 5% von der aufgetragenen Dehnung ab.

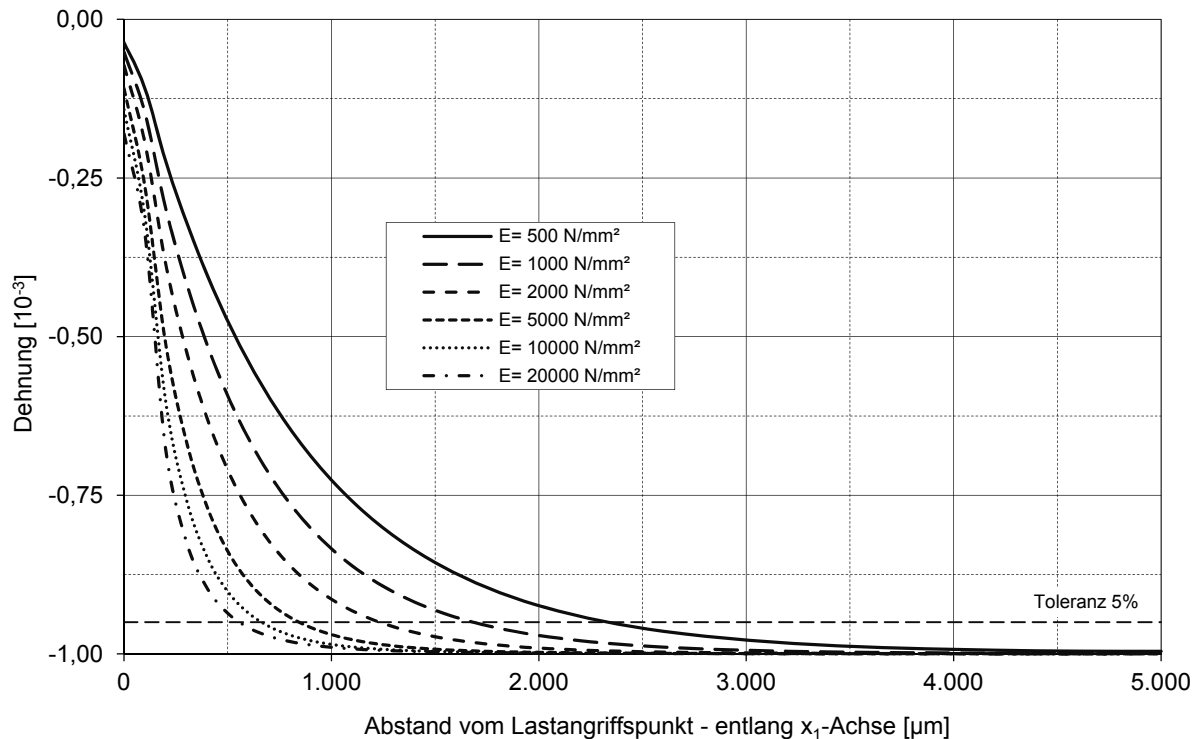


Abbildung D-55 Einfluss des E-Moduls des Coatings auf die notwendige Kontaktlänge (System 115-11x)

Die Berechnung zeigt einerseits, dass Coatings mit höherem E-Modul keine signifikante Verkürzung der Übertragungslänge bewirken. Die angenommene Dehnungsdifferenz von 10^{-3} an einem Punkt ist bereits sehr hoch gewählt, sie entspricht einer punktuellen Eintragung von $43,6 \text{ N/mm}^2$. In der Praxis wird der Dehnungsverlauf bei Laminaten wesentlich homogener verlaufen.

Diese Voruntersuchung ist insofern wichtig, dass ein weiches Coating vorteilhaft ist, die störenden Querdruckeffekte zu reduzieren. Der Ansatz, ein weiches Coating zu verwenden steht dabei konträr zu den bisherigen Versuchen, die Dehnungsübertragung durch ein steifes Coating zu erhöhen [Fra01] [Keh01] [Rot08].

D 2.4.2 Auswirkungen des E-Moduls (System 110)

Es soll geklärt werden, wie die Variation des E-Moduls des Coatings die Beziehung zwischen Einwirkung und Messwert, also den Proportionalitätsfaktor, beeinflusst. Konkret soll durch eine geeignete Auswahl der Materialparameter der Proportionalitätskoeffizient und die Doppelbrechung für Querdruck minimiert werden, da dieser als Störeffekt angesehen wird.

Das Rechenmodell basiert wiederum auf dem Grundsystem, also einer unidirektionalen Verstärkung in Richtung der Sensorfaser. Das Coating besteht aus einem einheitlichen Werkstoff mit einer Gesamtstärke von $62,5 \mu\text{m}$, der E-Modul des Coatings wird im Bereich $500 \dots 20.000 \text{ N/mm}^2$ variiert. Dabei wird der Wärmeausdehnungskoeffizient konstant bei $80 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ gehalten, die Querdehnzahl entspricht gleichbleibend $0,4$. Die Einwirkungen entsprechen den vorangegangenen Untersuchungen, mit einer Einheitsdehnung von 10^{-3} bzw. einer Temperaturdifferenz von 100 K .

Belastung längs zur Sensorfaser

Der Dehnungszustand für Längsdruck wird vom E-Modul des Coatings nur unmerklich beeinflusst. Die Längsdehnung ε_1 ist identisch mit der Einwirkung ($1,0 \cdot 10^{-3}$), die Querdehnung ε_2 entspricht der Querdehnzahl der Quarzglasfaser ($\nu = 0,16$), steigt jedoch mit zunehmenden E-Modul des Coatings leicht an. Der resultierende Proportionalitätsfaktor variiert weniger als 1% gegenüber dem Wert des Grundsystems (Abbildung D-56).

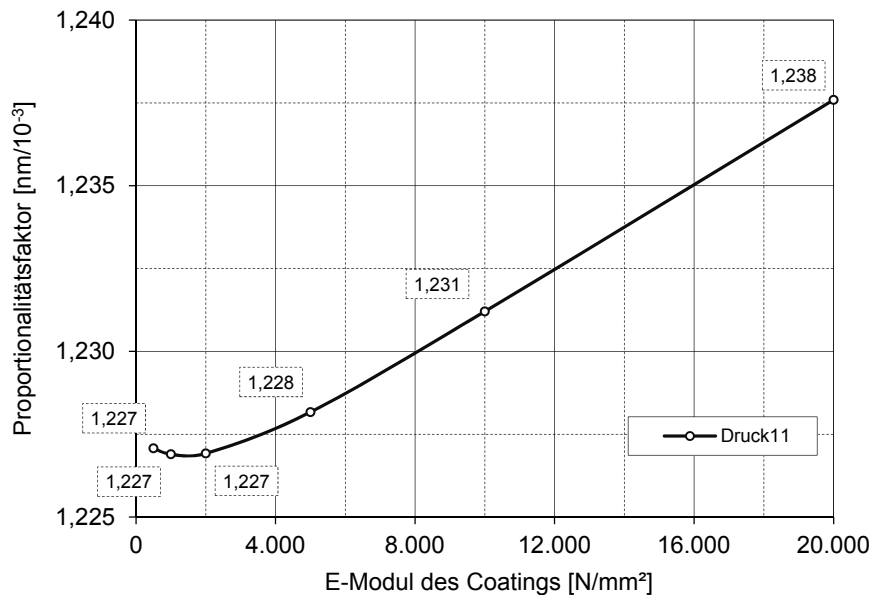


Abbildung D-56: Einfluss des E-Moduls des Coatings auf den Proportionalitätsfaktor unter Längsdruck (System 110-11)

Belastung quer zur Sensorfaser

Bei Querdruck ergibt sich unabhängig vom E-Modul des Coatings im Faserkern eine gleichbleibende Längsdehnung ε_1 , welche der Querdehnzahl des Laminats entspricht ($\nu_{12} = 0,11$). Die Querdehnung entlang der Belastungsrichtung (ε_2) nimmt bei steigendem E-Modul kontinuierlich zu (Abbildung D-55). Die Zahlenwerte sind dabei mit den einzelnen Ergebnissen der geometrischen Untersuchungen im vorangegangenen Abschnitt vergleichbar. Dort wird beim Grundsystem mit Coating (2 Lagen mit 1.270 bzw. 2.280 N/mm²) die Querdehnung ca. $0,15 \cdot 10^{-3}$ und beim identischen Modell ohne Coating (Laminat $E_2 = 17.125$ N/mm²) wird sie zu $0,32 \cdot 10^{-3}$.

Die Querdehnung ε_3 senkrecht zur Einwirkung hängt ebenfalls vom E-Modul des Coatings ab, variiert jedoch in geringerem Maß. Bis zu einem E-Modul von ca. 900 N/mm² ist die Querdehnung ε_3 negativ, bei höheren Werten wird sie zunehmend positiv. Dieser Effekt hängt damit zusammen, dass bei weichem Coating die Querkontraktion des Laminats hauptsächlich auf die Längsdehnung der Faser Einfluss hat, diese wiederum führt zu Druckspannungen im Faserkern in Richtung der x_3 -Achse. Bei höherem E-Modul wird die Querkontraktion des Laminats unmittelbar auf die Querdehnung ε_3 in der optischen Faser übertragen, weshalb diese positiv wird.

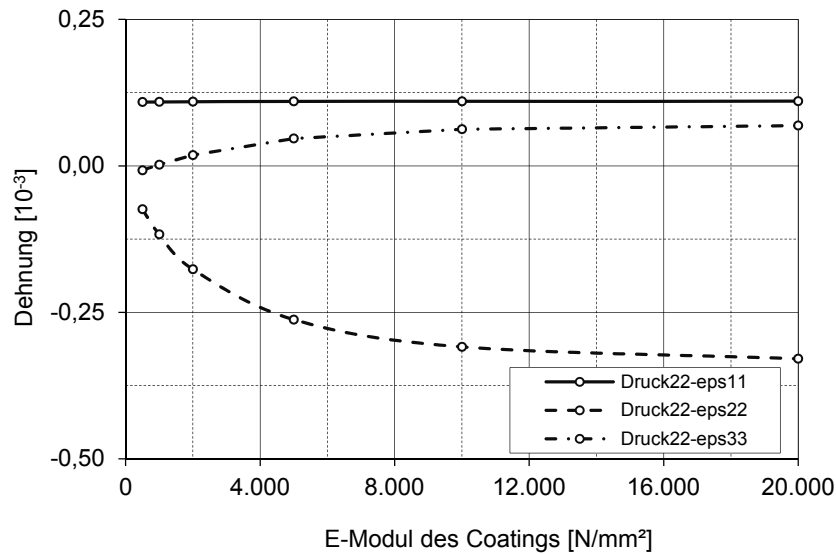


Abbildung D-57: Dehnungszustand im Faserkern infolge Querdruck \times_2 (System 110-22)

Der resultierende Proportionalitätsfaktor sowie die Doppelbrechung werden betragsmäßig größer, je höher der E-Modul des Coatings ist (Abbildung D-59). Ein weiches Coating verringert die Querdruckempfindlichkeit also erheblich. Die explizite Auswertung der Differenz der beiden Proportionalitätsfaktoren zeigt, dass insbesondere bei einem E-Modul unter ca. 3.000 N/mm² der Effekt der Doppelbrechung in hohem Maße vom Coating der Sensorfaser abhängig ist, bei zunehmenden E-Modul wird also die Qualität des Messsignals schlechter.

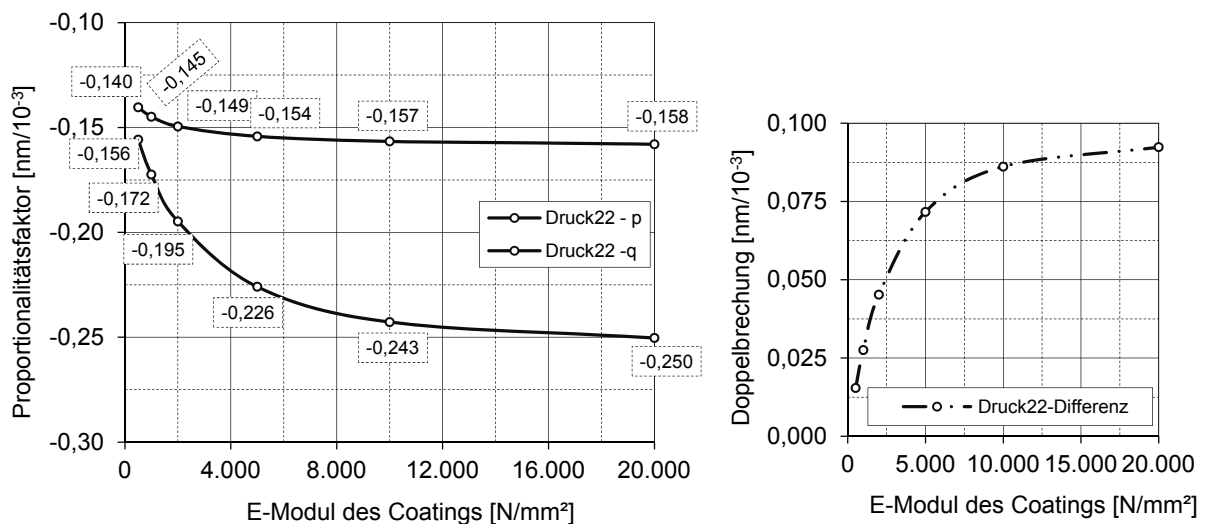


Abbildung D-58: Proportionalitätsfaktor und Doppelbrechung (Differenz) unter Querdruck (System 110-22)

Temperaturdifferenz

Bei einer Temperaturdifferenz ist die Längsdehnung ϵ_1 in der Sensorfaser nur in sehr geringem Maße vom E-Modul des Coatings abhängig. Die Querdehnung $\epsilon_2 = \epsilon_3$ ist für ein E-Modul unter ca. 9.000 N/mm² negativ, hier überwiegt der Querdruck des Coatings infolge dessen hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Wegen des geringen E-Moduls wird gleichzeitige die Ausdehnung des Laminats nicht maßgebend. Bei zunehmendem E-Modul überwiegen jedoch die Zugspannungen aus der Ausdehnung des Laminats, daher wird die Querdehnung positiv.

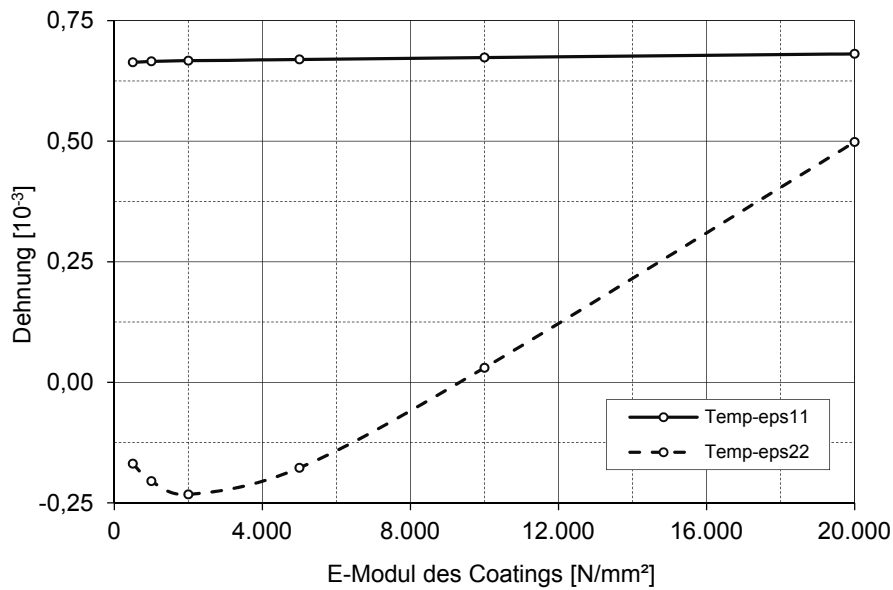


Abbildung D-59: Lokale Dehnungen im Faserkern infolge Temperaturänderung um 100 K, in Abhängigkeit des E-Moduls des Coatings (System 110-t)

Der resultierende Proportionalitätsfaktor ändert sich nur in geringem Maße in Abhängigkeit des E-Moduls des Coatings. Im Bereich 500 ... 5.000 N/mm² variiert der Faktor weniger als 2% um den Grundwert, erst bei höheren E-Moduln werden signifikante Unterschiede bemerkbar. Es ergibt sich ein Maximum bei einem E-Modul von 2.000 N/mm², was ungefähr den Materialkennwerten des Grundsystems „150“ entspricht.

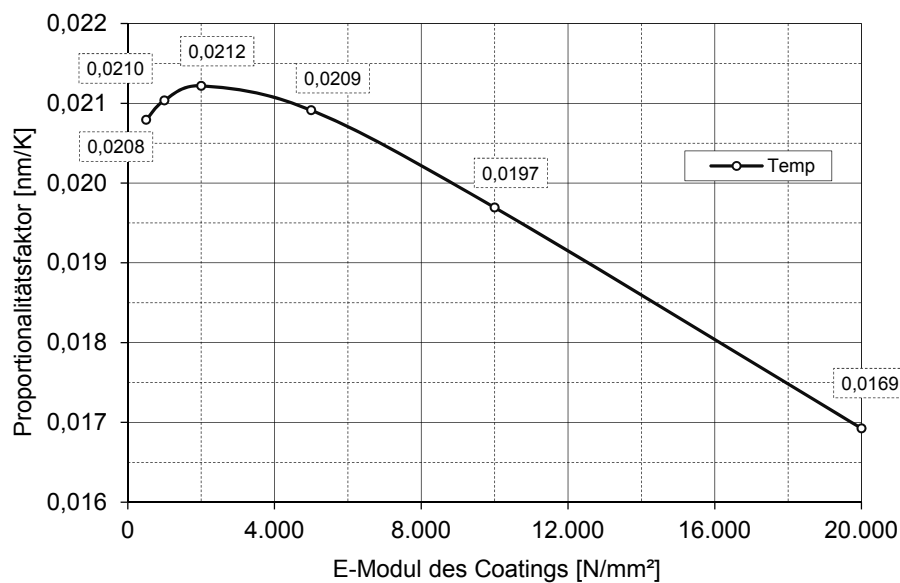


Abbildung D-60: Einfluss des E-Moduls auf den Proportionalitätsfaktor unter gleichmäßiger Temperaturdifferenz (System 110-t)

D 2.4.3 Auswirkungen des Wärmeausdehnungskoeffizienten (System 116)

Im Rahmen dieser Parameterstudie wird der Wärmeausdehnungskoeffizient des Coatings im Bereich $40 \dots 140 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ variiert, bei den Untersuchungen wurde in den vorherigen Abschnitten jeweils ein konstanter Wert von $80 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ angesetzt. Das Berechnungsmodell entspricht dem Grundsystem mit ausschließlich unidirektionaler Verstärkung längs zur Sensorfaser. Das einschichtige Coating hat eine Dicke von $62,5 \mu\text{m}$ bei einem E-Modul von 2.100 N/mm^2 und einer Querdehnzahl von $0,4$.

Die Längsdehnung in der Sensorfaser wird durch den Wärmeausdehnungskoeffizienten nicht beeinflusst, da die Wirkung des Laminats überwiegt. Die Querdehnung $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ wiederum ist linear abhängig vom Wärmeausdehnungskoeffizienten, da diese den Querdruck des sich ausdehnenden Coatings auf die Sensorfaser beeinflusst. Für den Proportionalitätsfaktor ergibt sich damit ebenfalls eine lineare Abhängigkeit, wobei bei einer Erhöhung des Wärmeausdehnungskoeffizienten um $20 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ eine Differenz um ca. 3% auftritt, die Veränderlichkeit fällt also vergleichsweise gering aus.

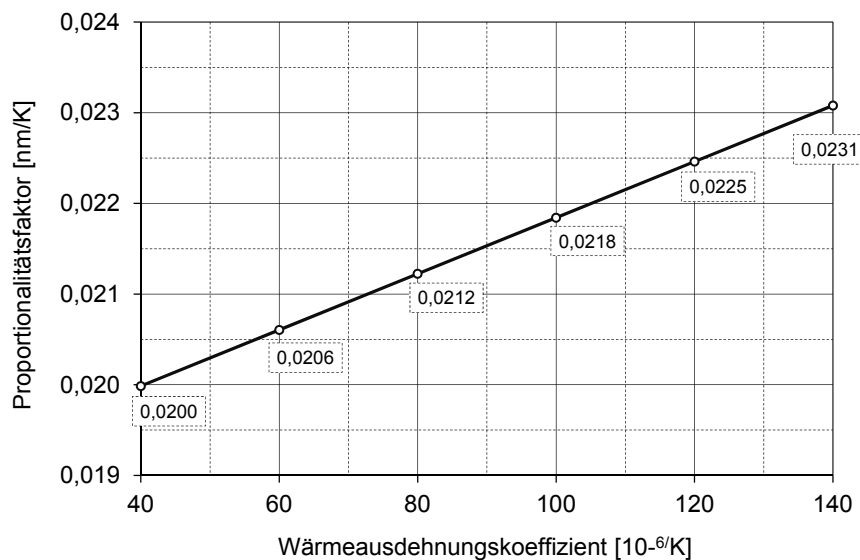


Abbildung D-61: Einfluss des Wärmeausdehnungskoeffizienten auf den Proportionalitätsfaktor bei gleichmäßiger Temperaturdifferenz (System 116-t)

D 2.4.4 Gegenüberstellung

Die Untersuchungen zeigen, dass selbst bei sehr weichen Coatings schon nach maximal 2 mm Kontaktlänge die Dehnung in der Faser gleich der Dehnung in der Matrix ist. Dabei wird von einer zulässigen Abweichung von 5% ausgegangen. Dies heißt wiederum, dass lokale Fehlstellen wie Lufteinschlüsse akzeptiert werden können und vergleichsweise weiche Coatings zulässig sind.

Die Proportionalitätskoeffizienten für Längsdruck und Temperaturdifferenz sind nur in sehr geringem Maß abhängig vom E-Modul des Coatings, es sind also alle Materialkennwerte einstellbar.

Für Querdruck ergibt sich jedoch eine deutliche Abhängigkeit der Sensor-Bauteil-Interaktion vom E-Modul des Coatings. Dies trifft insbesondere auf den Effekt der Doppelbrechung zu, welcher die Qualität des Messergebnisses beeinflusst. Die Doppelbrechung steht einer planmäßigen Messung des Querdrucks entgegen. Wird diese Einwirkung jedoch als störende Größe betrachtet, sollte der E-Modul möglichst gering gewählt werden. Ein Optimum ergäbe sich beispielsweise bei einem E-Modul von 500 N/mm^2 für das Coating.

D 3 Bauteilversuche

D 3.1 Überblick

D 3.1.1 Aufgabenstellung

Die Bauteilversuche dienen einerseits der Überprüfung der Berechnungen im vorhergehenden Kapitel, andererseits soll die Zuverlässigkeit der strukturintegrierten Sensoren unter Wechselbeanspruchung und konstanter Last (Kriechen) abgeschätzt werden. Aufgrund der aufwendigen Fertigung der Probekörper und der breiten Variabilität hinsichtlich des Laminataufbaus können nur kleine Prüfserien durchgeführt werden. Außerdem können nur ausgewählte Geometrien betrachtet werden. Die Untersuchungen sind daher als Orientierungsversuche zu interpretieren.

Bei den Versuchen werden definierte Belastungszustände in das Laminat eingebracht und mittels externer Referenzsensoren (elektronische Dehnungsmessstreifen bzw. Thermolemente) referenziert. Daraus werden die effektiven Proportionalitätsfaktoren ermittelt, also der Zusammenhang zwischen der äußeren Einwirkung (Dehnung, Temperaturdifferenz) und der aufgezeichneten Wellenlängenverschiebung am Faser-Bragg-Gitter. Abschließend werden die ermittelten Faktoren mit den rechnerischen Vorhersagen des vorherigen Kapitels verglichen. Neben der Ermittlung der Wellenlängenverschiebung fällt aber auch der Untersuchung der Qualität des Reflexionsspektrums eine besondere Rolle zu. Insbesondere durch Querdehneinflüsse wird das Spektrum verzerrt (Doppelbrechung), dies kann zu Fehlinterpretationen der Messsoftware führen oder eine Signalauswertung unmöglich machen.

D 3.1.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm gliedert sich in unterschiedliche Belastungsszenarien wie Längszug, Querdruck und Temperaturdifferenz. Darüber hinaus werden ergänzende Versuche durchgeführt, welche das Verhalten des Coatings im Gebrauch beschreiben sollen, dies ist ein Schwellversuch unter wechselnder Zuglast sowie unterschiedliche Kriechversuche (Tabelle D-8). Die untersuchten Lamine, das verwendete Coating und die Sensorpositionierung in Kapitel D 1.4 (S. 69ff.) ausführlich dargestellt. Es handelt sich um Handlamine der Serie C mit einer Sensorfaser ohne Coating am Reflexionsgitter, sowie Pultrudate der Serien B, G mit Doppel-Acrylatcoating.

Eine grafische Darstellung der Probekörper mit der Lage der jeweils integrierten Sensoren ist in Anhang 11 (S. 217) ersichtlich.

Tabelle D-8: Überblick der durchgeführten Versuche

Gruppe	Test	Bez.	Untersuchte Probekörper	
			ohne Coating (Handlaminat)	mit Coating (Pultrudat)
Längszug	weggesteuerter Zugversuch	11w	C-001, C-002, C-101	B-001, G-11, G-61
	Schwellversuch (dynamisch)	11s	C-002, C-102, C-201	G-11
	Kriechversuch	11k	C-002, C-202	G-61
Querdruck	Laminatenebene	22	C-101, C-102, C-201, C-202, C-203	---
	Dickenrichtung	33	C-101	G-11, G-61
Temperaturdifferenz	Temperaturzyklen	Tz	C-002, C-101, C-102	G-11, G-61

Das verwendete Acrylat-Coating ist eine verhältnismäßig weiche Beschichtung, im Gegensatz dazu stellen die Probekörper mit Sensorfaser ohne Coating eine Grenzwertbetrachtung für besonders steife Beschichtungen dar.

D 3.1.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche werden an der Fakultätswerkstatt Architektur der Universität Stuttgart durch den Autor durchgeführt. Dabei kommen folgende Messeinrichtungen zum Einsatz:

- dynamische Hydraulikanlage, SCHENCK Hydropuls, Nennlast 400 kN
- statische Tischprüfanlage, ZWICK, Nennlast 20 kN
- Kriechprüfstand mit Waagebalken und statischem Gegengewicht
- Laborofen, Temperaturbereich 20 ... 300 °C
- faseroptischer Messwertaufnehmer, FIBERSENSING, 1 Messkanal, Messbereich 1515 ... 1585 nm, produktspezifische Software
- elektronische Messwertverstärker UPM 60 und Spider 8, HBM, für elektronische Dehnungsmessstreifen, induktive Wegaufnehmer, Thermoelemente Typ T, Software Catman 4.0
- Werkzeug zur Kontaktierung von Sensorfasern, Werkzeug zur Applikation elektronischer Dehnungsmessstreifen (DMS)

Aufzeichnung und Auswertung

Die Messwerte der faseroptischen Sensoren müssen aus technischen Gründen mit einer anderen Software aufgezeichnet werden als die Referenzgrößen, nämlich die Prüfkraft der Belastungsanlage oder die Ergebnisse der elektronischen Sensoren wie DMS, Wegaufnehmer oder Thermoelemente. Die Messintervalle sind zwar in beiden Systemen grundsätzlich frei definierbar, weichen aber tatsächlich infolge der Verarbeitungsgeschwindigkeit der Software voneinander ab. Aus diesem Grund muss eine Zeiteinheit definiert werden, auf welche die Messwerte bezogen werden, in diesem Fall wurde ein ganzzahliges Vielfaches einer Sekunde gewählt⁵⁸. Dabei kann es auftreten, dass die Messwerte gemittelt werden müssen, wobei Fehler in der zeitlichen Zuordnung von bis zu 0,5 s auftreten können, was insbesondere bei Schwellversuchen nicht unerheblich ist. Bei diesem Vorgehen müssen die beiden Zeitskalen gegeneinander in Beziehung gesetzt werden, dazu können Ereignisse wie der Belastungsbeginn oder Bruch herangezogen werden⁵⁹.

D 3.1.4 Einschränkungen

Grundsätzlich handelt es sich bei den Referenzsensoren um extern applizierte Aufnehmer. Daher beschreiben die aufgezeichneten Dehnungen und Temperaturen den Zustand auf der Oberfläche der Lamine, nicht den Werten an der Lage der strukturintegrierten Sensorfaser. Durch den Versuchsaufbau wird versucht, die Messgrößen im Laminat und an der Oberfläche anzugleichen. Da es sich jedoch bei einigen Probekörpern um Mischlamine handelt, sind auch bei Zugversuchen die lokalen Dehnungen auf der Oberfläche nicht mit dem Werten im Bauteil gleichzusetzen.

⁵⁸ Das verwendete faseroptische Messgerät hat eine maximale Abtastrate von 1 Hz.

⁵⁹ Die Zusammenführung erfolgt in dem Programm Excel mit dem Befehl „S-Verweis“. Dieser Befehl sucht aus mehreren Datenblättern die jeweils korrespondierenden Werte heraus und stellt diese gegenüber.

D 3.2 Belastung längs zur Sensorfaser

D 3.2.1 Weggesteuerter Zugversuch

Die Prüfung erfolgt weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von $v = 0,033 \text{ mm/s}$ bis zum Verlassen des linearen Bereichs des Bauteils bzw. Versagen der Sensoren. Die Referenzdehnung wird bei dem Rundstab der Serie B durch einem am Probekörper fixierten induktiven Wegaufnehmer gemessen, bei den weiteren Probekörpern über oberflächlich applizierte Dehnungsmessstreifen (DMS).

Die Probekörper werden mittels Klemmbacken an der hydraulisch gesteuerten Prüfmaschine eingespannt. Die an der Einspannstelle auftretenden Verschiebungen (Durchrutschen), werden durch die Verwendung von Referenzsensoren aus dem Messergebnis eliminiert.

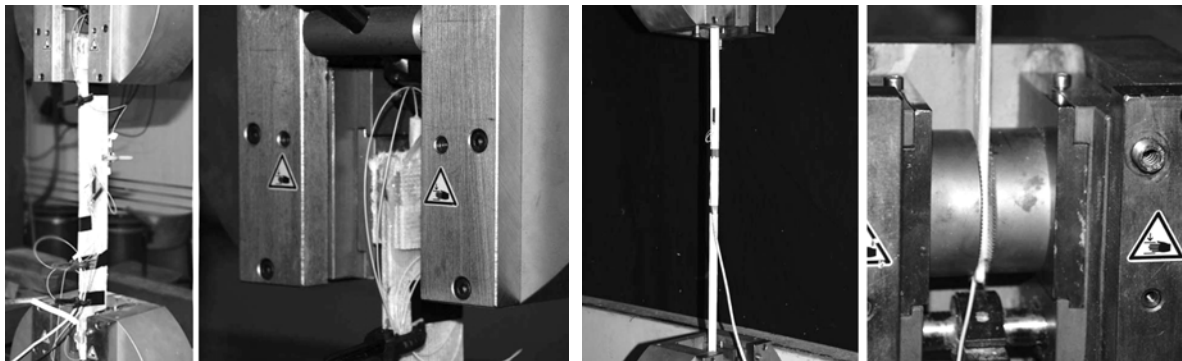


Abbildung D-62: Durchführung der Zugversuche, links: Probekörper Serie C, rechts: Probekörper Serie G

Sensorfaser ohne Coating

In einem Vorversuch werden zunächst die mechanischen Kennwerte für Längszug (x_1) für die Handlaminat der Serie C ermittelt. Es ergibt sich eine mittlere Bruchspannung von ca. 295 N/mm^2 und ein mittleres E-Modul von ca. 19.600 N/mm^2 (Abbildung D-63).

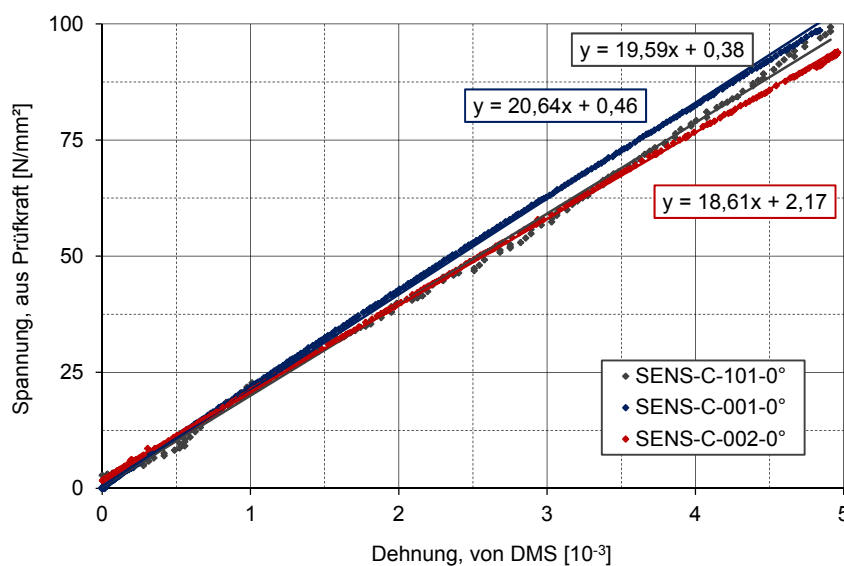


Abbildung D-63: Spannungs-Dehnung-Linien für axialen Zugversuch im linearen Bereich der Prüfung; Spannung aus der gemessenen Prüfkraft, Dehnung aus oberflächenapplizierten DMS

Der effektive E-Modul liegt deutlich über dem rechnerisch vorhergesagten Wert von 16.919 N/mm^2 (Tabelle D-4, S. 73). Diese Abweichung ist u.a. damit zu erklären, dass der angenommene Faservolumengehalt bei den Handlaminaten überschritten wurde. Die über die DMS ermittelten mechanischen Kennwerte dienen jedoch ohnehin nur der Einstellung der Versuchsparameter, daher kann eine nähere Analyse entfallen.

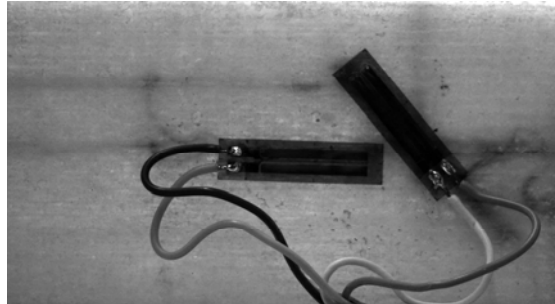


Abbildung D-64: Handlaminat Serie C mit eingebauten Sensorfasern und externen Referenz-DMS, jeweils längs der Bauteilachse und in 45° -Richtung

In den Probekörpern ist jeweils ein faseroptischer Sensor und ein Referenz-DMS in Längsrichtung appliziert, daneben ein weiteres Sensorpaar in 45° -Richtung dazu (Abbildung D-64). Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt getrennt für beide Orientierungen, da aufgrund der abweichenden Lamineigenschaften bzgl. der Sensorausrichtung mit unterschiedlichen Proportionalitätsfaktoren zu rechnen ist.

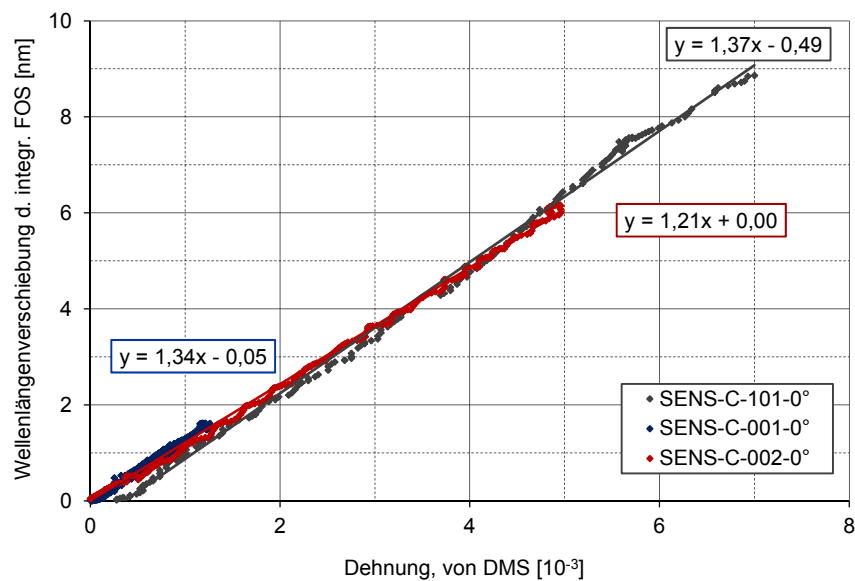


Abbildung D-65: Gemessene Wellenlängenverschiebung über die Dehnung im linearen Bereich; Sensoren längs zur UD-Schicht bzw. Belastungsrichtung orientiert; Dehnungen aus oberflächenapplizierten DMS, Wellenlängenverschiebung der integrierten faseroptischen Sensoren (FOS)

Für den faseroptischen Sensor in 0° -Richtung ist der Zusammenhang zwischen der Dehnung und Wellenlängenverschiebung linear bis zu einer Dehnung von $7,0 \cdot 10^{-3}$, darüber hinaus liefern die faseroptischen Sensoren keine brauchbaren Ergebnisse mehr (Abbildung D-65). Der Proportionalitätsfaktor für die 0° -Richtung beträgt im Mittel:

$$\frac{1}{K_{\delta_i}} = 1,31 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Der Faktor liegt ca. 6% über der rechnerischen Vorhersage von $1,239 \text{ nm}/10^{-3}$ für das entsprechende Rechenmodell 356. Im Rahmen der erzielbaren Genauigkeit ist insgesamt die Übereinstimmung zwischen Vorhersage und Versuch als sehr gut zu bewerten.

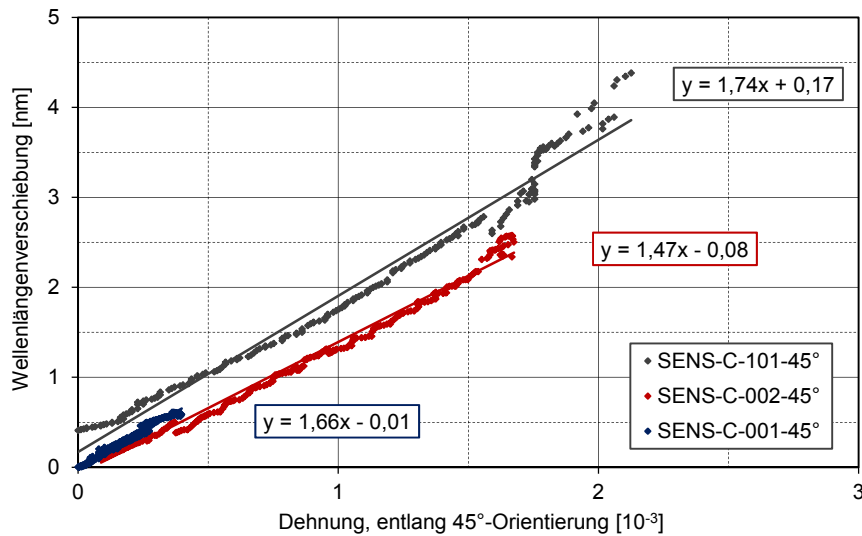


Abbildung D-66: Gemessene Wellenlängenverschiebung über die Dehnung im linearen Bereich, Sensoren 45° zur UD-Schicht bzw. Belastungsrichtung geneigt⁶⁰

Die Sensoren in 45° -Richtung zeigen zunächst ebenfalls einen linearen Verlauf, die Grenzdehnung ist aufgrund ihrer Orientierung zur einwirkenden Belastung jedoch geringer (Abbildung D-66). Es ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_{\delta 45}} = 1,62 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Die Streuung der Ergebnisse ist merklich größer als für die in 0° -Richtung applizierten Sensoren, sie beträgt bis zu 10% relativ zum Mittelwert. Die Abweichungen und die teilweise nicht gegebene Linearität lassen sich dadurch erklären, dass diese Sensoren aufgrund der 45° -Orientierung zur Einwirkung eine Überlagerung von Längs- und Querdehnung messen und daher höheren Schwankungen unterliegen. Außerdem zeigt eine mikroskopische Aufnahme die unregelmäßige Anordnung der Verstärkungsfasern im Bereich der Sensoren (Abbildung D-67).

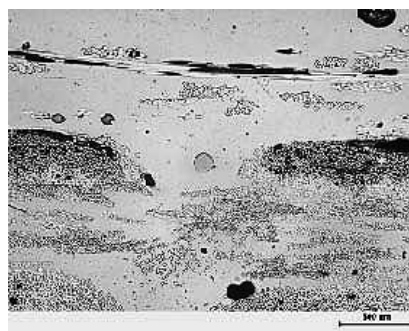


Abbildung D-67: Mikroskopische Aufnahme eines Handlaminats Serie C mit Sensor [Foto: Projekt]

⁶⁰ Die Dehnungen in 45° -Richtung betragen entsprechend den in Tabelle D-4 hergeleiteten Materialkennwerten rechnerisch 35% der Längsdehnung, die Überprüfung mittels DMS ergab einen Wert von ungefähr 31% der Dehnungen in Längsrichtung.

Neben der quantitativen Auswertung des Zusammenhangs zwischen Wellenlängenverschiebung und Dehnung, erfolgt auch eine qualitative Analyse des aufgezeichneten Reflexionsspektrums. Hierzu wurden exemplarisch für den Probekörper C-101 bei unterschiedlichen Dehnungsniveaus eine Spektralanalyse durchgeführt (Abbildung D-68). Da beide Sensoren in einer optischen Faser in Reihe geschaltet sind, werden die Reflexionsspektren beider Bragg-Gitter gleichzeitig angezeigt.

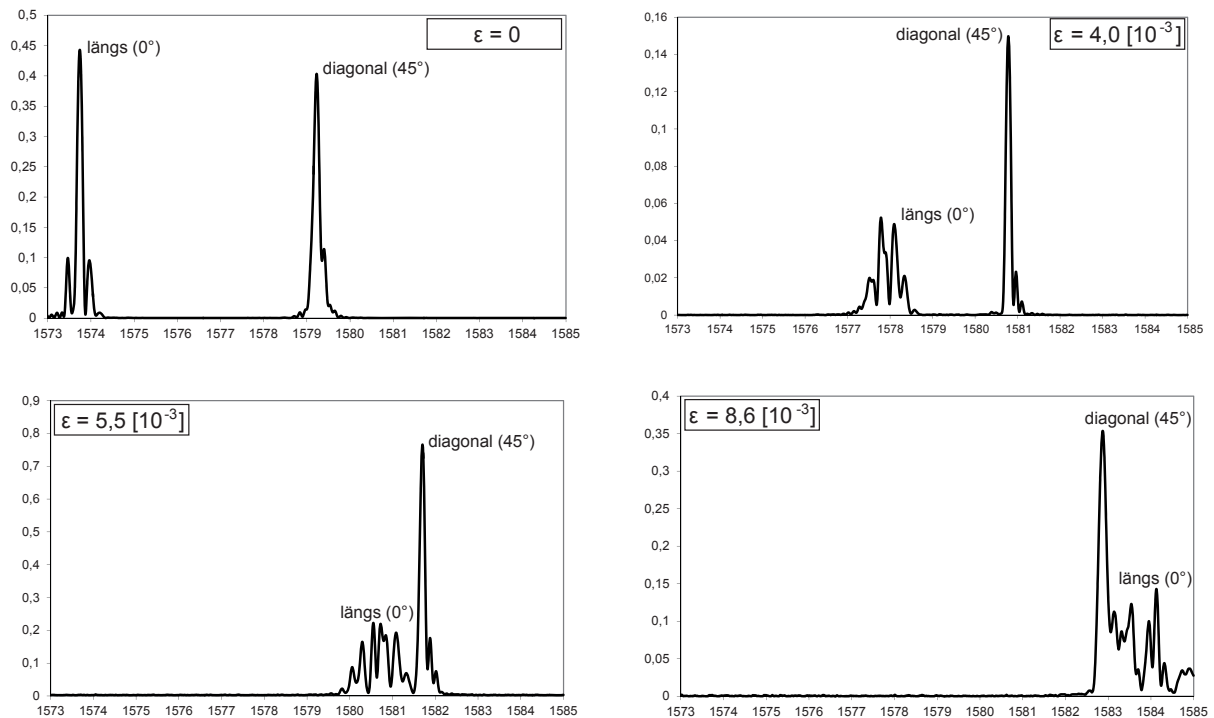


Abbildung D-68: Veränderung des aufgezeichneten Reflexionsspektrums des Probekörpers C-101 während des Zugversuchs; zunächst links der in 0° - Richtung orientierte Sensor und rechts der in 45° - Richtung orientierte Sensor, die Spitzenwerte laufen bei zunehmender globaler Dehnung ϵ aneinander vorbei (Bild UL: Beginn der Überschneidung)

Bei der Aufzeichnung sind zwei getrennte Spitzenwerte erkennbar, der Peak bei ca. 1574 nm entspricht dem Sensor in Längsrichtung (0°), der Peak bei ca. 1579 nm dem Sensor in diagonaler Orientierung (45°). Die Software des faseroptischen Messwertsystems erkennt beide Peaks automatisch und verfolgt die Verschiebung kontinuierlich mit, auch wenn sich wie hier beide Peaks gegenseitig überholen. Bei zunehmender Längsdehnung zeigt der in Längsrichtung orientierte Sensor eine ungefähr doppelt so große Wellenlängenverschiebung wie der Sensor in 45° -Richtung. Erstaunlich ist außerdem, dass das Spektrum des in Längsrichtung orientierten Sensors wesentlich stärker gebeugt wird, als das des 45° -Sensors.

Die Auswertungsergebnisse in Abbildung D-66 zeigen, dass für den 45° -Sensor des betrachteten Probekörpers C-101 ab einer Wellenlängenverschiebung von ca. 2,8 nm Streuungen im Messwert auftreten. Hier beträgt die Dehnung längs des Sensors $\epsilon_{45} = 1,6 \cdot 10^{-3}$, was einer globalen Längsdehnung entspricht von $\epsilon = 5,2 \cdot 10^{-3}$ - also ungefähr dem Zustand im Bild UL der Abbildung D-68. Das Auftreten der Streuungen fällt also mit dem Bereich zusammen, in dem die sich die beiden Reflexionsspektren überschneiden. Der Algorithmus der Auslesesoftware kann offensichtlich die Peaks nicht mehr ausreichend voneinander unterscheiden.

Sensorfaser mit Coating

Die untersuchten Pultrusionsprofile sind ausschließlich unidirektional verstärkt. Bei Probekörper B-001 handelt es sich um einen Rundstab mit einem Durchmesser von 3 mm und einem Faservolumenanteil von 60%. Die anderen Probekörper sind Rechteckstäbe $21 \times 5 \text{ mm}^2$. Dabei hat der Probekörper G-11 einen Faservolumenanteil von 60%, hingegen hat G-61 einen Anteil von 40%. Die gemessenen E-Moduln der drei Probekörper unterscheiden sich erheblich (Abbildung D-69), weshalb hier keine pauschale Mittelwertbildung erfolgen kann.

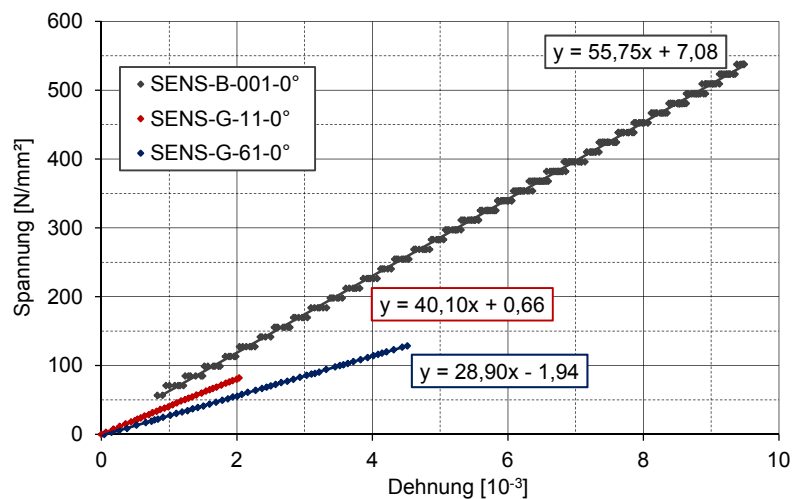


Abbildung D-69: Gesamter Prüfbereich der Pultrusionsprofile unter Längszug, Spannungs-Dehnungs-Linie⁶¹

Die Sensorfasern sind längs der Faser- bzw. Belastungsrichtung orientiert, sie sind mit einem zweischichtigen Hochtemperatur-Acrylat versehen. Trotz der streuenden E-Moduln sind die Proportionalitätskoeffizienten der Probekörper vergleichsweise einheitlich (Abbildung D-70). Die Verläufe zeigen eine sehr gute Linearität.

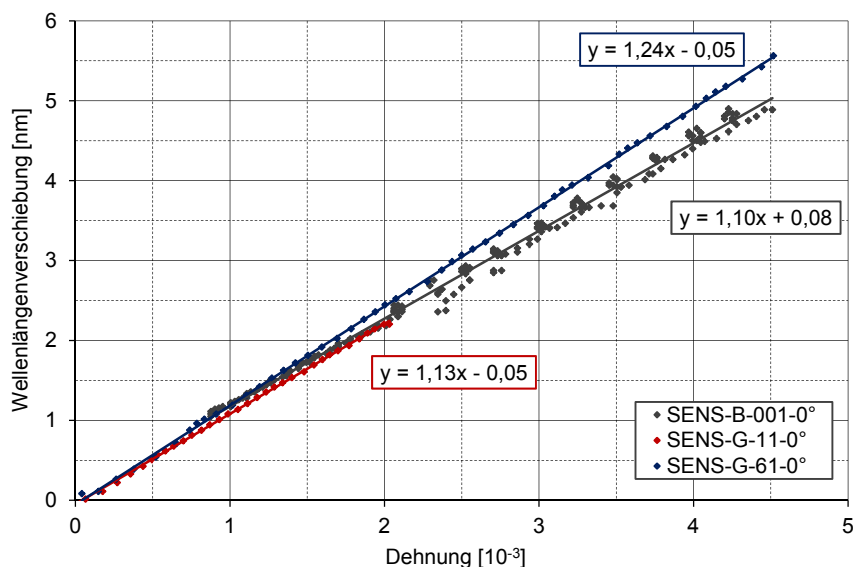


Abbildung D-70: Gemessene Wellenlängenverschiebung über die Längsdehnung im linearen Bereich

⁶¹ Durch die geringe Querschnittsfläche des Probekörpers B-001 treten nur sehr geringe Prüfkräfte auf, welche nahe der Auflösungsgrenze der Kraftmessdose liegen, daher ergibt sich der stufenförmige Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie.

Für den Proportionalitätsfaktor ergibt sich ein Mittelwert von:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_1}} = 1,16 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Der Wert liegt ca. 5% unter der rechnerischen Vorhersage von 1,227 bzw. 1,228 nm/10⁻³ für das entsprechende Modell 151 mit 40 bzw. 60% Faservolumenanteil.

D 3.2.2 Schwelllastversuche

Die Zugschwellversuche dienen dazu, Schädigungen im Coating oder im Gefüge infolge wechselnder Beanspruchung zu ermitteln. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten nur eine begrenzte Anzahl von Lastwechseln durchgeführt werden, die Versuche sind daher als orientierende Prüfungen zu verstehen.

Der Versuch ist kraftgesteuert, wobei das untere Spannungsniveau mit 15 N/mm² und das obere Niveau mit 150 N/mm² definiert werden, die Laststeigerung erfolgt linear (Abbildung D-71). In einzelnen Versuchsreihen musste die Zyklendauern bzw. Spannungsniveaus jedoch aus technischen Gründen angepasst werden. Bezüglich der Probenbefestigung und der Referenzsensoren entspricht der Versuchsaufbau dem weggesteuerten Zugversuch.

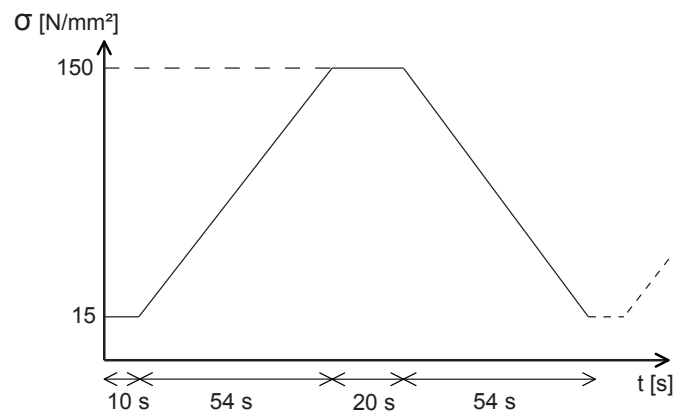


Abbildung D-71: Steuerung der Zugschwellversuche

Sensorfaser ohne Coating

Die ersten Versuche zeigen zunächst, dass die einmalige Dehnung des Sensors auf $9,0 \cdot 10^{-3}$ zu einer dauerhaften Beeinflussung des Messresultats führt (Abbildung D-72). Nach der Entlastung kehrt die Wellenlänge nicht auf das Ausgangsniveau zurück. Außerdem ist im Bereich des ersten oberen Plateaus und der ersten Entlastung ein sprunghafter Verlauf der Wellenlänge erkennbar. Letzteres ist ein Hinweis auf eine unzureichende Qualität des Reflexionsspektrums infolge Querdruck oder einer lokalen Schädigung. Für die spätere Auswertung konnte nur der erste Ast der Belastungskurve ausgewertet werden.

Die gleichzeitig über Referenz-DMS aufgezeichneten Dehnungen nehmen trotz gleichbleibender Kraftansteuerung (15 ... 150 N/mm²) kontinuierlich zu, dies ist ein Hinweis auf eine fortschreitende Bauteilschädigung. Aus diesem Grund wurden die Maximaldehnungen der folgenden Versuche reduziert.

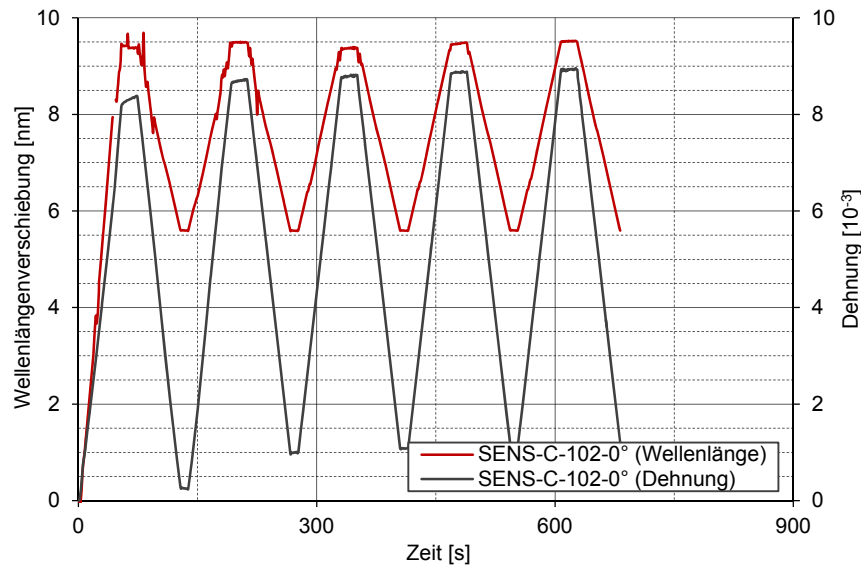


Abbildung D-72: Prüfung des Probekörpers SENS-C-102, trotz anfänglicher Linearität kehrt der die gemessene Wellenlänge bei Entlastung nicht wieder auf die Grundwellenlänge zurück

Die Schwingbreiten der Längsspannungen wurden auf 10 ... 100 N/mm² (C-002) bzw. 15 ... 75 N/mm² (C-201) eingestellt. In diesen Bereichen verlaufen die Dehnungen und Wellenlängenverschiebungen gleichmäßig ohne erkennbare Schädigung (Abbildung D-73).

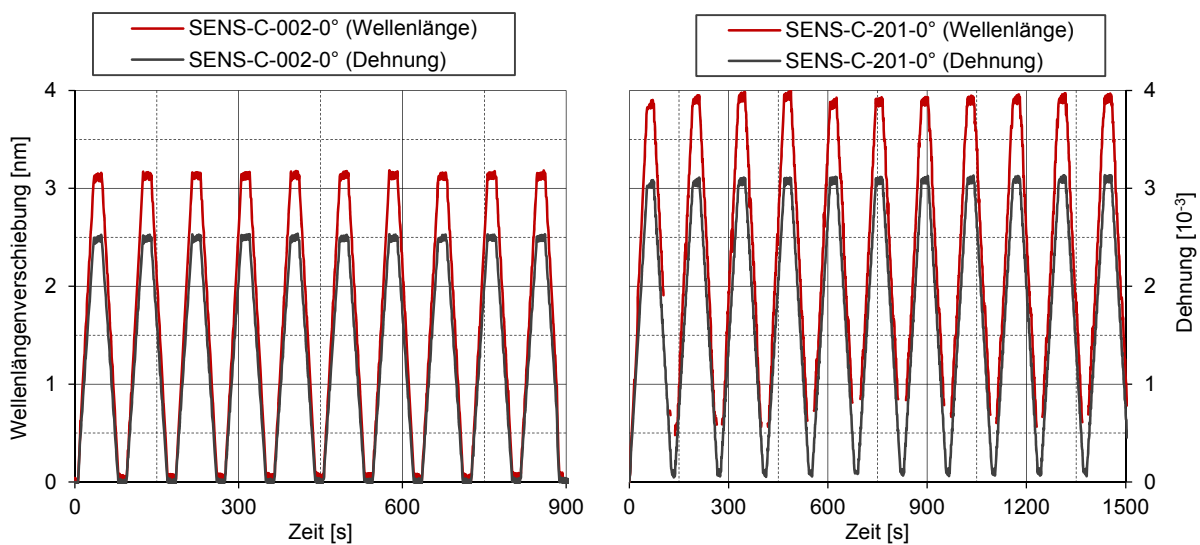


Abbildung D-73: Zugschwellversuch an den Probekörpern C-002 (links) und C-201 (rechts)

Die Gegenüberstellung der gemessenen Wellenlängenverschiebungen zu den Dehnungen zeigt eine sehr gute Linearität ohne erkennbare Hysterese (Abbildung D-74). Soweit kann eine gute Schwingstabilität für Dehnungen unter $3,0 \cdot 10^{-3}$ prognostiziert werden, was jedoch weniger als $1/3$ der Bruchdehnung entspricht. Der mittlere Proportionalitätsfaktor liegt mit $1,28 \text{ nm}/10^{-3}$ nur 3% über der rechnerischen Vorhersage und geringfügig unter dem Wert des weggesteuerten Zugversuchs.

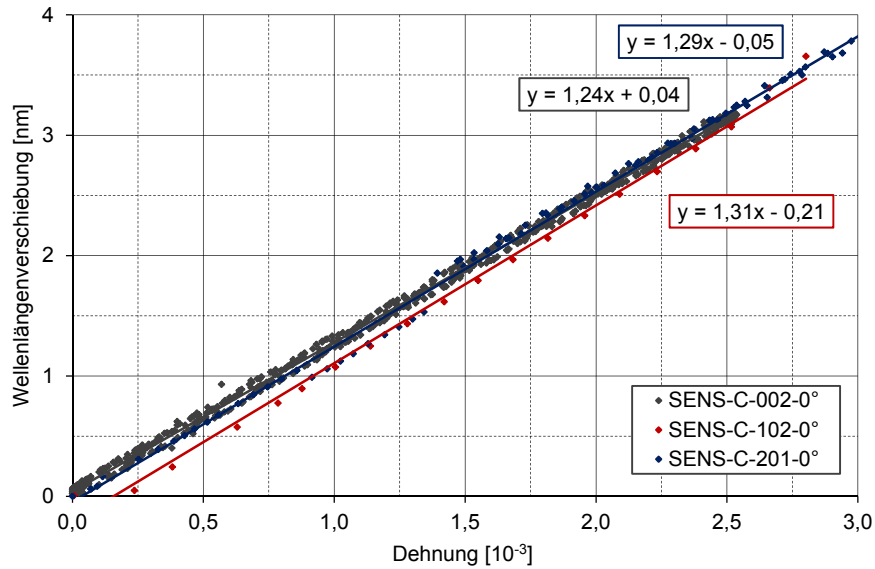


Abbildung D-74: Wellenlängenverschiebung während des Schwellversuchs, für C-102 wurde nur der erste Ast ausgewertet

Die qualitative Analyse der Messergebnisse (Reflexionsspektren) unter beiden Lastniveaus des Zugschwellversuchs zeigt eine Verzerrung infolge Doppelbrechung. Diese wird durch die heterogene Dehnungsverteilung im Mischlaminat hervorgerufen und fällt besonders stark aus, da die optische Faser ohne Coating eingebaut wurde. Die reflektierte Lichtmenge bleibt davon jedoch unberührt, es findet also keine Dämpfung⁶² statt.

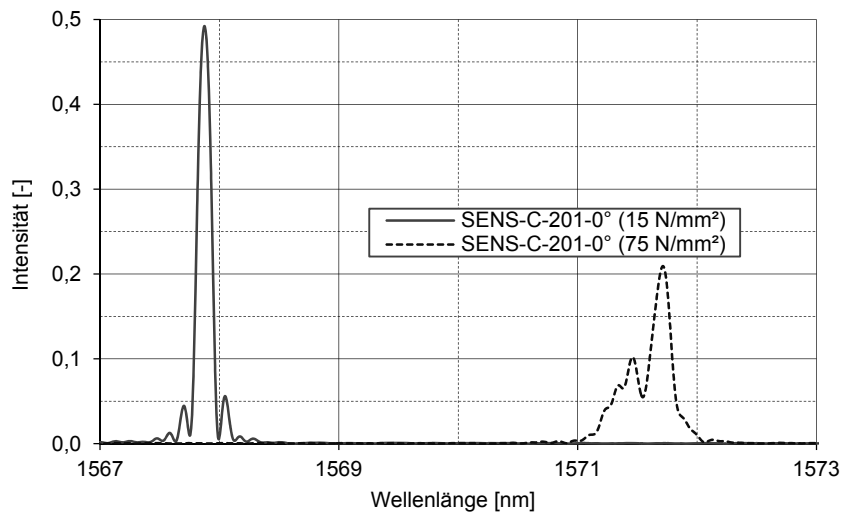


Abbildung D-75: Spektrum des reflektierten Lichts unter zwei Lastniveaus des Zugschwellversuchs am Beispiel des Probekörpers C-201

⁶² Unter Dämpfung wird der Intensitätsverlust der Lichtenergie verstanden, dies kann zum Beispiel durch kleine Krümmungsradien oder einen anisotropen Dehnungszustand verursacht werden. Die Verringerung des Peaks in Abbildung D-75 ist durch die Verbreiterung des Spektrums begründet. Die Lichtmenge, also das Integral der dargestellten Funktionen, reduziert sich lediglich von 27,1 auf 25,9 (einheitenlos).

Sensorfaser mit Coating

Das unidirektional verstärkte Pultrusionsprofil G-61 hat eine wesentlich höhere Bruchspannung in Längsrichtung als die zuvor untersuchten Handlaminat der Serie C. Aus diesem Grund kann eine Schwingbreite von 15 ... 150 N/mm² gewählt werden, welche hier zu einer Dehnungsdifferenz von $4,5 \cdot 10^{-3}$ führt (Abbildung D-76).

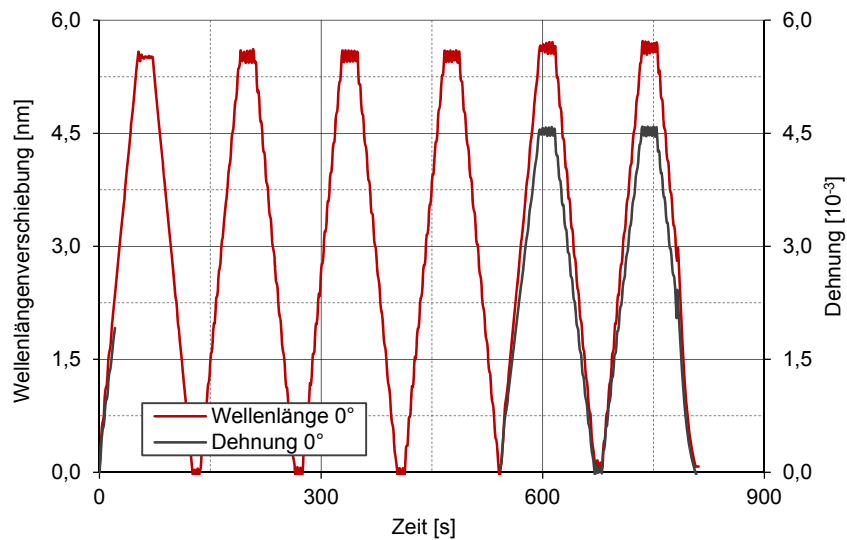


Abbildung D-76: Versuchsdurchführung für Probekörper G-11⁶³

Der Zusammenhang zwischen Dehnung und Wellenlänge ist streng linear (Abbildung D-77). Der sich ergebende Proportionalitätsfaktor von 1,23 nm/10⁻³ steht in sehr guter Übereinstimmung zur rechnerischen Vorhersage bzw. dem Ergebnis des weggesteuerten Zugversuchs. Soweit dies durch den Versuch beurteilt werden kann, ist die Interaktion zwischen Sensor und Bauteil stabil.

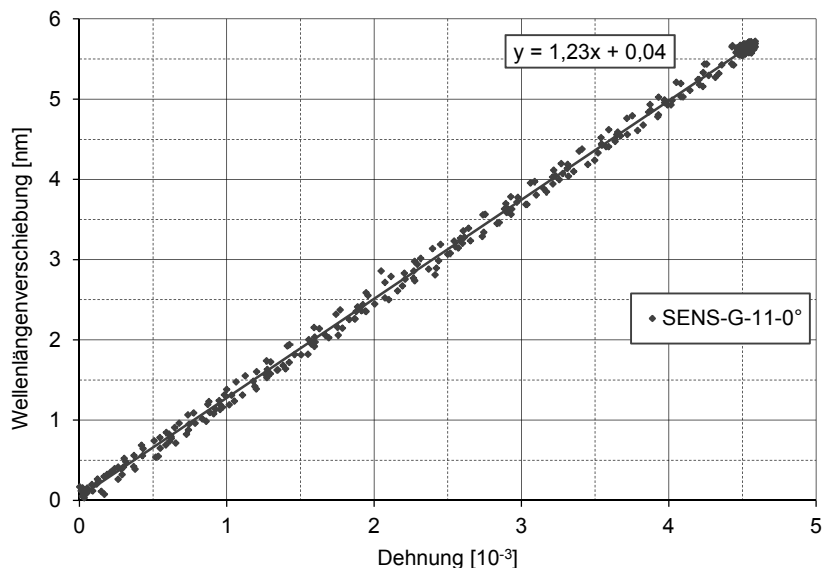


Abbildung D-77: Ergebnisse des Zugschwellversuchs für eine Sensorfaser mit Coating

⁶³ Nach dem 4. Lastzyklus fand eine Versuchsunterbrechung statt, die eine leichte Verschiebung der Lastniveaus zur Folge hat, der scheinbare Sprung in den Wellenlängenplateaus ist also kalibrierungsbedingt.

D 3.2.3 Kriechversuche

Die Kriechversuche werden mit zwei unterschiedlichen Verfahren durchgeführt, welche jeweils spezifische Vorteile in der Durchführbarkeit und Auswertung haben. Einerseits sind dies kraftgesteuerte Versuche an der hydraulischen Belastungseinrichtung. Der Versuchsaufbau ist dabei identisch zu dem bereits beschriebenen weggesteuerten Zugversuch. Dabei sind die erforderlichen Kräfte für eine Zugbeanspruchung unproblematisch einstellbar. Problematisch ist jedoch, dass die hydraulische Steuerung das Lastniveau nicht exakt einhalten kann, sondern vielmehr um einen Mittelwert oszilliert (Abbildung D-78). Dies erschwert die Zuordnung der einzelnen Messreihen der faseroptischen Sensoren und der Referenzwerte der elektronischen DMS, da die Schwankungsbreite von $1,5 \text{ N/mm}^2$ für Kriechversuche erheblich ist. Die vorhandene Oszillation von ca. $0,25 \text{ Hz}$ ist noch zu hoch bei der technisch bedingten Messrate von 1 Hz , die Zuordnung der tatsächlichen Kraftkurve wird dadurch zu ungenau.

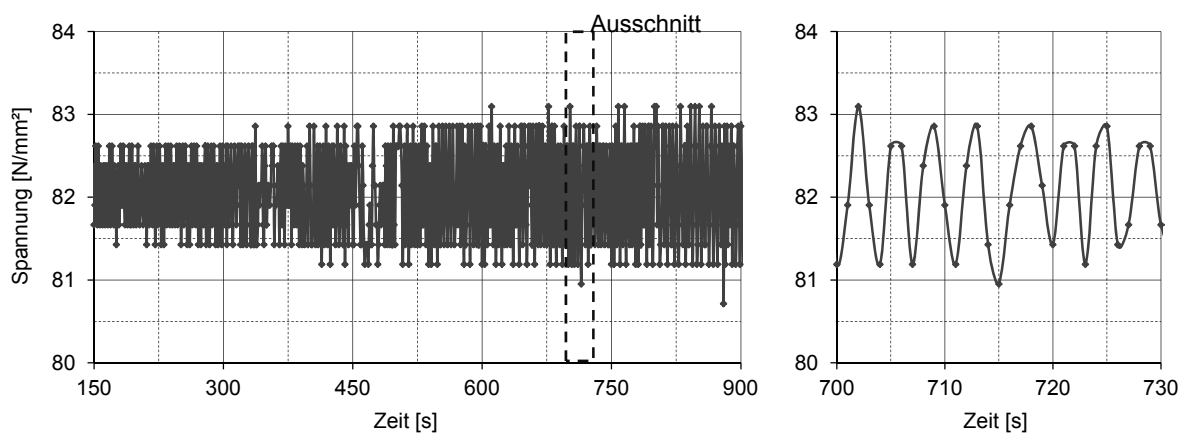


Abbildung D-78: Verlauf der Spannungen im Probekörper C-002 bei kraftgesteuertem Kriechversuch infolge von Gleichlaufschwankungen der hydraulischen Steuerung

Alternativ werden Versuche an einem Kriechprüfstand durchgeführt, dort wird die Belastung über einen Waagebalken mit statischem Gegengewicht aufgebracht (Abbildung D-79). Die einwirkende Last bleibt dabei konstant und der Versuch kann über einen beliebig langen Zeitraum durchgeführt werden. Andererseits können nicht die erforderlichen Kräfte für eine Zugbelastung aufgebracht werden, weshalb auf einen Vier-Punkt-Biegeversuch zurückgegriffen werden muss. Dies hat den Nachteil, dass die Referenz-DMS an der Oberfläche des Laminats eine abweichende Dehnung messen als die strukturintegrierten faseroptischen Sensoren.

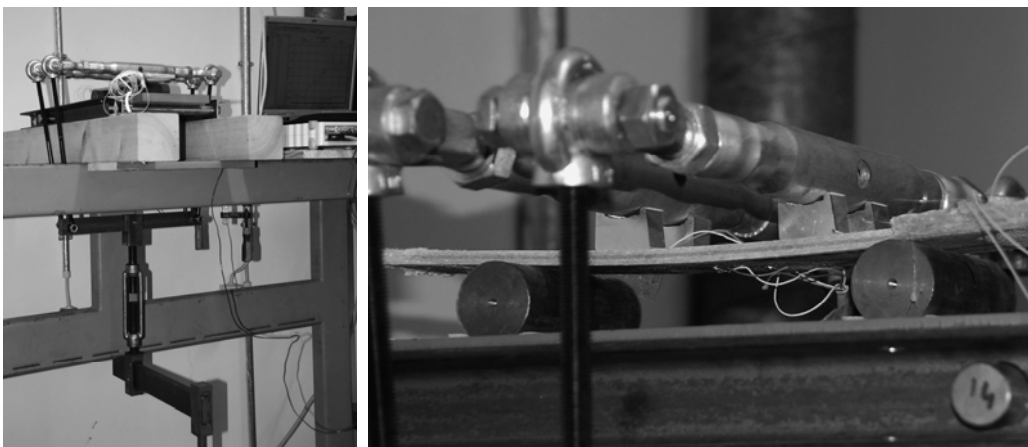


Abbildung D-79: Alternativ eingesetzter Prüfstand für Biegekriechversuche

Sensorfaser ohne Coating

Beim kraftgesteuerten Kriechversuch wird der Probekörper bei einer Spannung von ca. 80 N/mm² für ungefähr 15 Minuten belastet. Erwartungsgemäß zeigen die Wellenlänge und Referenz-Dehnung eine erhebliche Streuung, welche mit der Oszillation des Hydraulikkolbens zusammenhängt (Abbildung D-80).

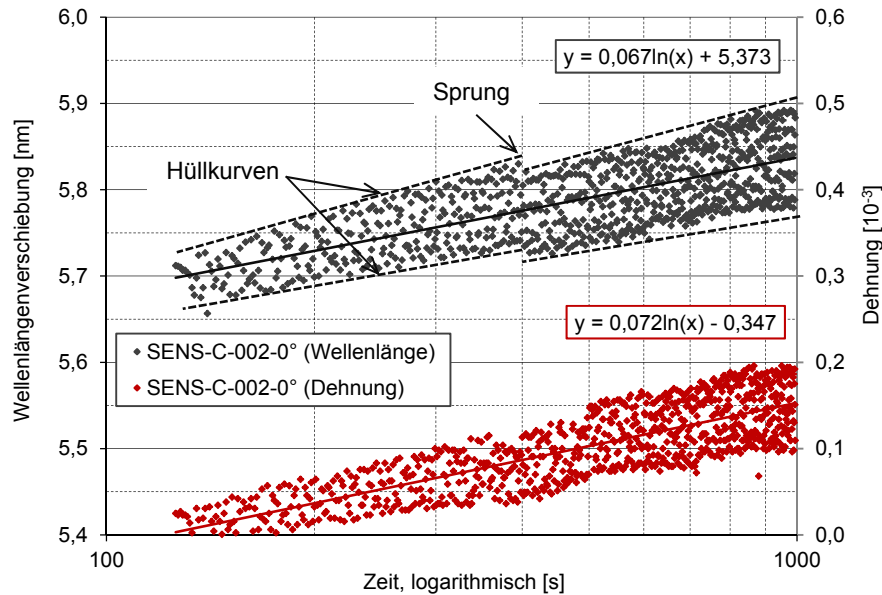


Abbildung D-80: Veränderung der Wellenlänge über den Kriechzeitraum (kraftgesteuert), nach ca. 5 Min ist ein Sprung bei der Wellenlänge erkennbar

Die zeitlichen Verläufe von Wellenlänge und Dehnung zeigen einen logarithmischen Verlauf. Bei der aufgezeichneten Wellenlänge ist nach ca. 5 Minuten (= 300 s) Versuchsdauer ein Sprung des Messwertes zu erkennen. Dieser ist entweder durch eine Fehlinterpretation der Messsoftware (Bestimmung des Peaks) oder durch eine lokale Schädigung bedingt. In beiden Fällen handelt es sich um ein kritisches Verhalten, da dies bedeutet, dass bei lang anhaltender last kein zuverlässiger absoluter Messwert zu erwarten ist.

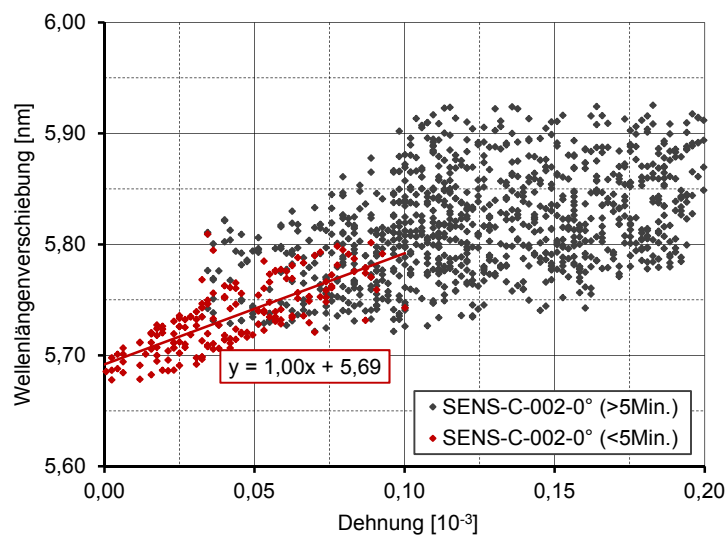


Abbildung D-81: Zusammenhang zwischen Wellenlängenverschiebung und Dehnung beim Zug-Kriechversuch für Probekörper C-002

Die Gegenüberstellung der aufgezeichneten Wellenlänge und der Dehnung zeigt eine nicht unerhebliche Streuung (Abbildung D-81). Diese ist durch die Oszillation der hydraulischen Steuerung und der damit erschwerten korrekten Zuordnung der beiden Datenreihen aus Dehnung und Wellenlänge verursacht. In den ersten 5 Minuten des Versuchs ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von $1,00 \text{ nm}/10^{-3}$, welcher ca. 24% unter dem Wert des weggesteuerten Zugversuchs liegt.

Ergänzend wird für den Probekörper C-202 ein über Gegengewicht gesteuerter Biege-Kriechversuch durchgeführt. Dabei beträgt die Spannweite 200 mm bei einer Lastexzentrizität von 100 mm (Abbildung D-82). Bei einer Gesamtlast von $P = 0,8 \text{ kN}$ ergibt sich in Feldmitte eine rechnerische Randspannung von ca. 30 N/mm^2 .

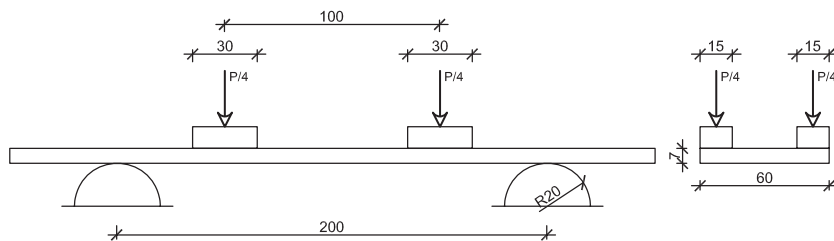


Abbildung D-82: Biegekriechversuch am Probekörper C-202, statische Gesamtlast $P = 0,8 \text{ kN}$

Alle Sensoren sind in Feldmitte appliziert, wo ein homogener Dehnungsverlauf zu erwarten ist. Die oberflächlich applizierten Referenz-DMS haben einen Hebelarm von 3,5 mm zur Schwerlinie, während die strukturintegrierten faseroptischen Sensoren nur von 2,45 mm von der Mitte des Laminats entfernt liegen (Abbildung D-83). Um beide Messwerte gegenüberzustellen, müssen daher die abweichenden Hebelarme über einen Formbeiwert berücksichtigt werden:

$$\alpha = 0,70^{64}$$

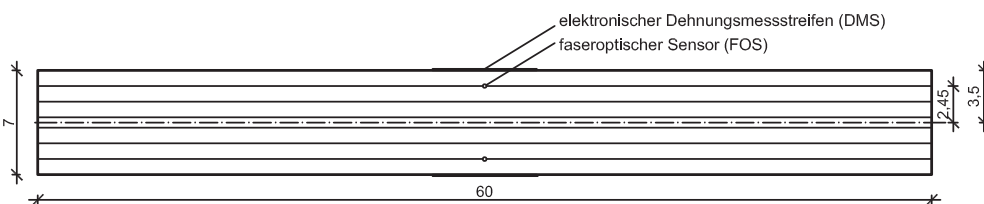


Abbildung D-83: Lage der Sensoren im Querschnitt

Die Auswertung des Kriechversuchs zeigt im logarithmischen Maßstab einen geraden Verlauf für die Dehnung des Referenz-DMS als auch für die Wellenlängenverschiebung des integrierten Sensors (Abbildung D-84). Der Verlauf ist kontinuierlich und stellt sich - bei einem Diagramm im logarithmischen Maßstab - in guter Näherung

⁶⁴ Unter Annahme eines Bernoulli-Balken mit eben bleibenden Querschnitten. Tatsächlich ist die Schubverformung bei Faserverbundwerkstoffen nicht unerheblich, weshalb ein höherer Wert zu erwarten ist.

als Gerade dar. Innerhalb der ersten 10 Minuten ist noch eine überproportionale Erhöhung der Dehnung und Wellenlänge feststellbar. Nach ca. 6 Stunden zeigt sich ein Abfall der Werte, welcher mit der aufgezeichneten Temperaturschwankung im Prüfraum von ca. - 1 °K zusammenhängt.

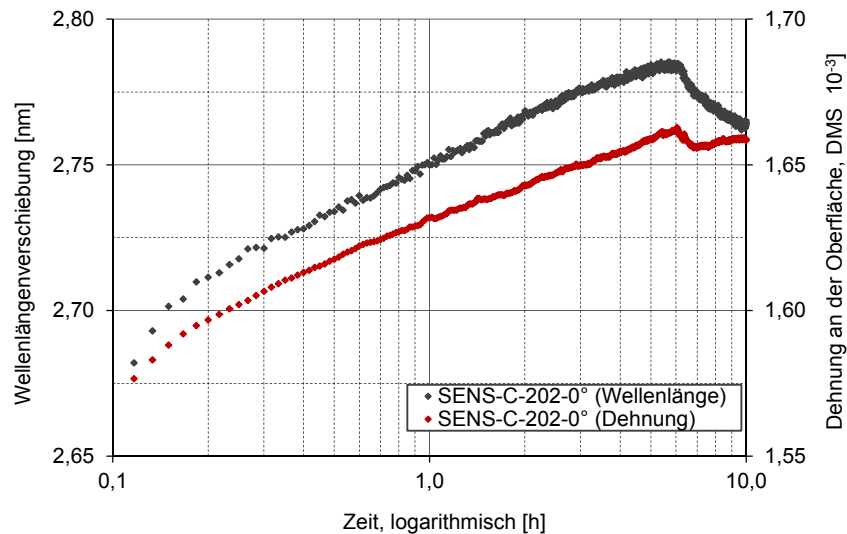


Abbildung D-84: Biege-Kriechversuch am Probekörper C-202 bei konstanter Belastung, nach ca. 6 h werden Effekte aus Temperaturschwankung im Prüfraum sichtbar

Unter Auswertung der Messergebnisse in den ersten 6 Stunden und der Beachtung des Formbeiwerts α ergibt sich, ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_1}} = \frac{1}{0,70} \cdot 1,18 \frac{\text{nm}}{10^{-3}} = 1,69 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Es ergibt sich ein deutlich höherer Wert als für den weggesteuerten Zugversuch (1,31 nm/10⁻³). Die Abweichung von ca. 29% kann in den Schubverformungen infolge der Biegebelastung zu suchen sein.

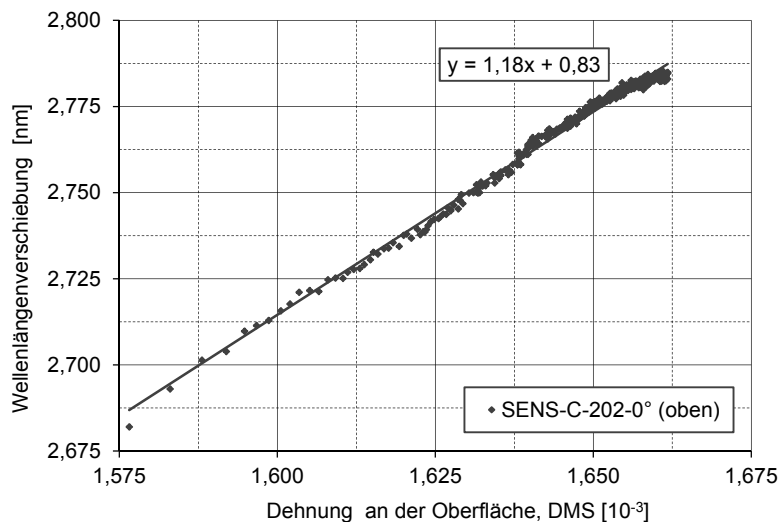


Abbildung D-85: Gegenüberstellung der Wellenlängenverschiebung zur Referenz-Dehnung beim Biege-Kriechversuch an Probekörper C-202, Sensor auf der Zugseite

Sensorfaser mit Coating

Für den Probekörper G-61, ein pultrudiertes Rechteckprofil mit unidirektionaler Faserverstärkung und 40% Faservolumengehalt, wird ein kraftgesteuerter Kriechversuch durchgeführt. Dabei wird eine Belastung von 150 N/mm² aufgebracht, der Versuch läuft über ca. 2 Stunden. Sowohl Dehnungen als auch die Wellenlängenverschiebung folgen erst nach ca. 10 Minuten (= 600 s) einem logarithmischen Verlauf (Abbildung D-86). Da beide Kurven diesen Knick zeigen, ist von einem werkstoffbedingten Effekt auszugehen, was hier jedoch nicht näher betrachtet werden soll.

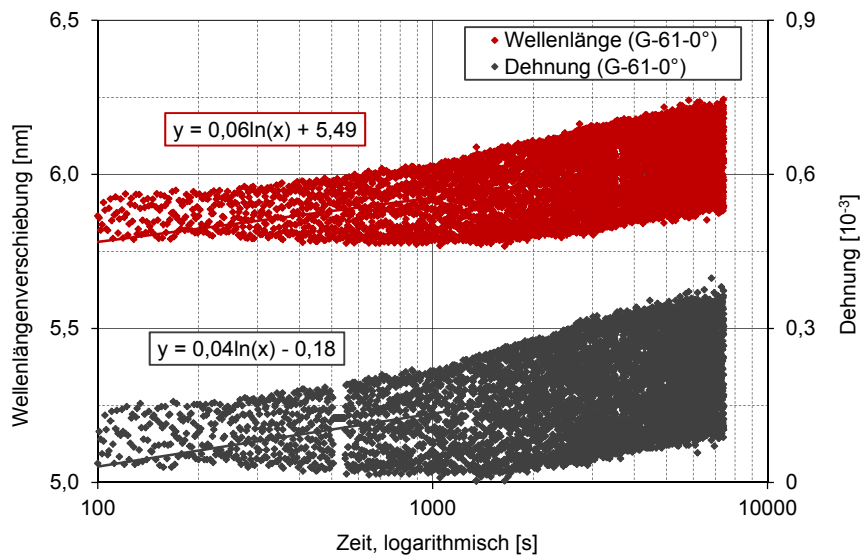


Abbildung D-86: Verlauf der Wellenlängenverschiebung und Dehnung für G-61 (kraftgesteuert)

Aus den Versuchsergebnissen (Abbildung D-87) ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von 1,04 nm/10⁻³, was ca. 10% unter dem Wert des weggesteuerten Zugversuchs liegt. Im Rahmen der Messgenauigkeit kann damit die Linearität der Messung bestätigt werden, es sind keine Langzeiteinflüsse in der Proportionalität zwischen Wellenlängenverschiebung und Dehnung feststellbar.

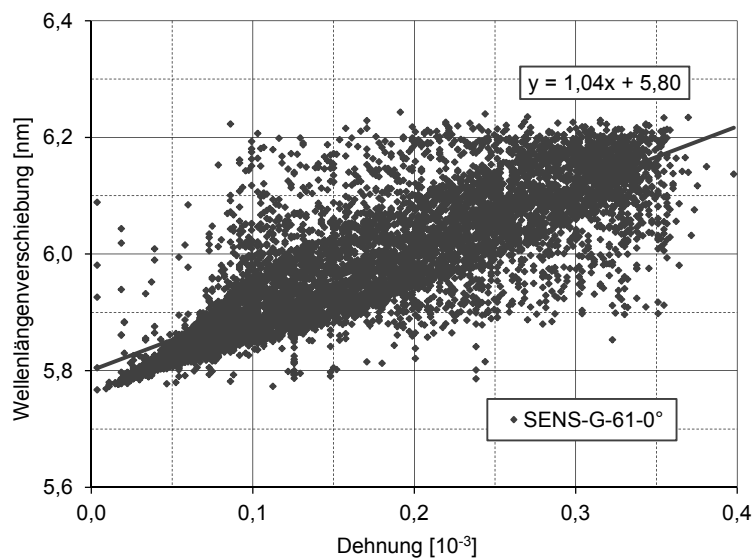


Abbildung D-87: Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Kriechdehnung bei G-61 (kraftgesteuert)

D 3.3 Belastung quer zur Sensorfaser

Mit den Versuchen sollen die Einflüsse von Querdruck auf die Wellenlängenverschiebung und die qualitative Änderung des Reflexionsspektrums untersucht werden. Bei den untersuchten Mischlaminaten wird Querdruck in zwei Orientierungen untersucht: längs der Laminebene (x_2) und, senkrecht dazu, in Dickenrichtung (x_3). Für rein unidirektional verstärkte Bauteile sind beide Querrichtungen identisch, es ist also lediglich der Versuchsaufbau in Dickenrichtung relevant.

Bei den Versuchen treten aufgrund der geringen Bauteilabmessungen in der Breite bzw. Dicke nur sehr geringe Verschiebungen auf, weshalb die Versuche kraftgesteuert gefahren werden. Die Dehnungen müssen dabei über den rechnerisch ermittelten E-Modul aus der gemessenen Prüfkraft abgeschätzt werden. Eine Referenzierung mittels extern applizierter DMS ist aufgrund des Versuchsaufbaus in der Regel nicht möglich.

D 3.3.1 Laminebene x_2

Die Versuche in Laminebene werden nur an den Handlaminaten der Serie C durchgeführt, da nur diese eine flächig ausgeprägte Faserverstärkung haben – die integrierten Sensorfasern haben kein Coating. Die Prüfkraft F wird über Aluminiumblöcke auf die Kanten des Laminats aufgebracht (Abbildung D-88). Die Kontaktfläche wird dabei mit Epoxidharz gefüllt, um eine gleichmäßige Spannungsübertragung zu gewährleisten. Die Einwirkungsbreite der Last entspricht ungefähr der Laminatbreite, damit ergibt sich ein quadratisches Spannungsfeld.

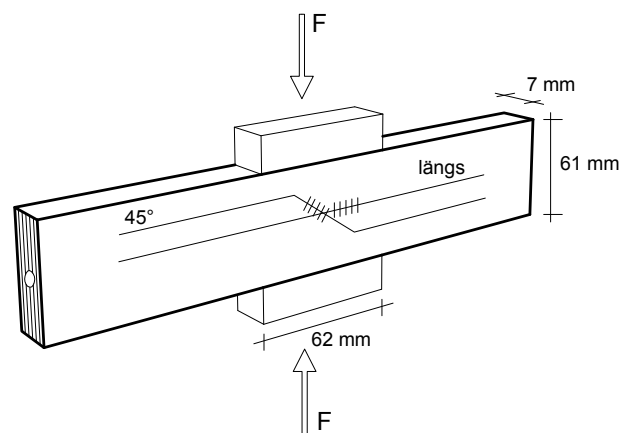


Abbildung D-88: Versuchsaufbau für die Untersuchung von Querdruck in Laminebene x_2

Da das Laminat nur auf einer Teilfläche belastet wird, ergibt sich in der Mittelebene ein veränderlicher Dehnungsverlauf. Bei der Bauteilgeometrie und den mechanischen Kennwerten der Probekörper Serie C wird bei einer Prüfkraft von 22,3 kN die Querdehnung ε_2 in der Mittelachse $4,43 \cdot 10^{-3}$ (Abbildung D-89). Dies entspricht einem Querdruck von ca. 50 N/mm². Im Bereich des zentrisch angeordneten Faser-Bragg-Gitters mit einer Länge von 6 mm kann die Veränderlichkeit der Dehnung jedoch vernachlässigt werden.

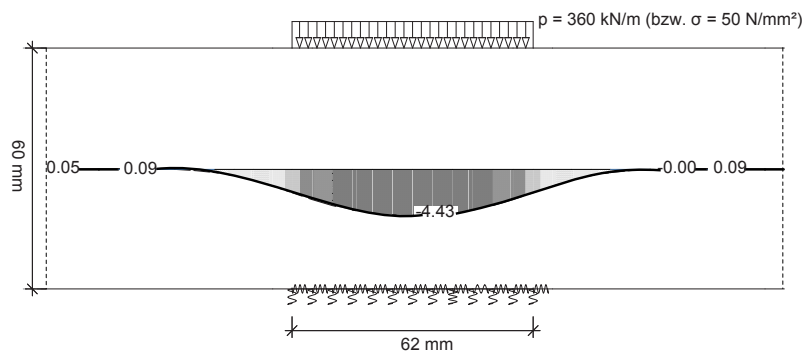


Abbildung D-89: Rechnerische Querdehnungsverteilung ε_2 [10^{-3}] in der Mittellinie infolge einer Prüfkraft von 360 kN/m bzw. 50 N/mm²

Die Querdehnung im Laminat führt nicht nur zu einer Wellenlängenverschiebung, sondern insbesondere auch zu einer qualitativen Veränderung des Reflexionsspektrums infolge einer Doppelbrechung der Lichtwellen. Der Vergleich der Reflexionsspektren unter verschiedenen Lastniveaus zeigt zunächst eine gleichmäßige Verschiebung der Wellenlänge (Abbildung D-90). Ab einem Querdruck von ca. 40 N/mm² wird jedoch zunehmend die Doppelbrechung des Lichtstrahls erkennbar, das Spektrum weitet sich zwischen zwei Randwerten auf.

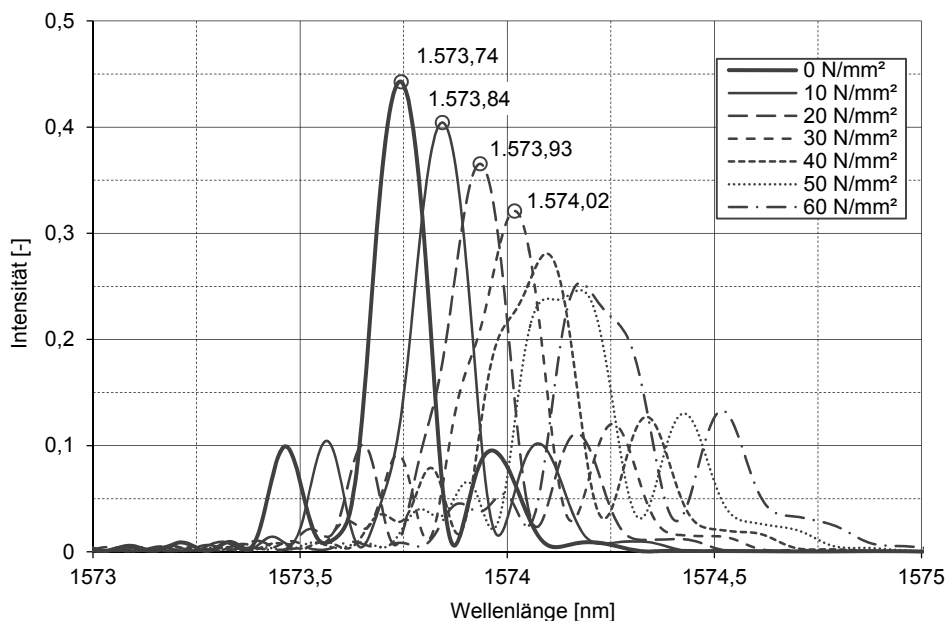


Abbildung D-90: Wellenlängenspektrum des Probekörpers C-101 bei unterschiedlichen Querdrücken in Laminebene x_2

Die nähere Betrachtung der Spektren bei Querdrücken ab 40 N/mm² zeigt, dass sich die Wellenlängenverteilung zwischen zwei Peaks aufspannt (Abbildung D-91). Wie in „Punktueller Belastung quer zur Sensorfaser“ auf S. 50f. ausgeführt, führt ein inhomogener Dehnungszustand im Faserkern zu einer Aufspaltung des Spektrums. Da jedoch nicht mit polarisiertem Licht gearbeitet wird, entstehen nicht zwei ausgeprägte Peaks, sondern vielmehr ein kontinuierlicher Bereich, der von den beiden rechnerisch ermittelten Werten begrenzt wird.

Im Bereich von 40 ... 60 N/mm² ($\varepsilon = 3,4 \dots 5,1 \cdot 10^{-3}$) beträgt die Doppelbrechung – also der Differenz der beiden Peaks - zwischen 0,092 und 0,104 nm. Dies entspricht im Mittel einer Relation von 0,023 nm/10⁻³. Rechnerisch

wurde eine Doppelbrechung von $2 \cdot 0,030 = 0,060 \text{ nm}/10^{-3}$ vorhergesagt (Abbildung D-51, S. 109, System 356). Der gemessene Wert liegt damit deutlich unter der rechnerischen Vorhersage.

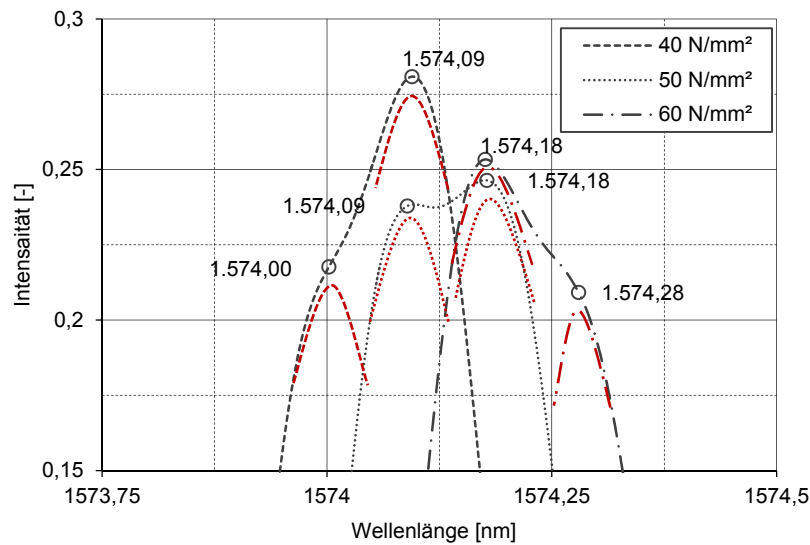


Abbildung D-91: Analyse der Doppelbrechung bei Querdruck in Laminebene auf das Handlaminat C-101, die Wellenlänge wird zwischen zwei Peaks aufgespannt

Bis zu einem gewissen Grad des Querdrucks kann die mittlere Wellenlängenverschiebung recht zuverlässig ausgewertet werden. Dabei zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Querdehnung (Abbildung D-92). Es ergibt sich ein mittlerer Proportionalitätskoeffizient von:

$$\frac{1}{K_{\epsilon_2}} = -0,33 \pm 0,012 \frac{\text{nm}}{10^{-3}}$$

Die mittlere Wellenlängenverschiebung entspricht damit im Durchschnitt sehr gut der rechnerischen Vorhersage, der Sprung der mittleren Wellenlänge bei Probekörper C-203 ist durch eine Fehlinterpretation der Wellenlängenpeaks durch die Auslesesoftware begründet.

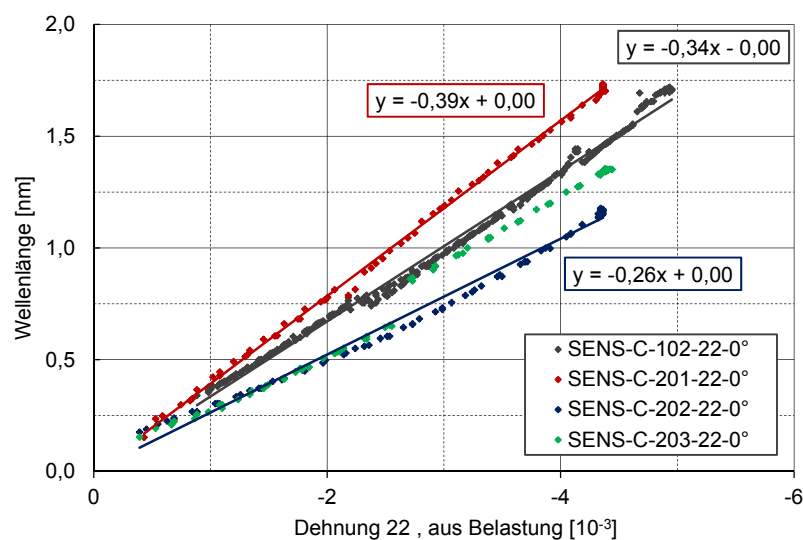


Abbildung D-92: Wellenlänge relativ zur einwirkenden Dehnung in Laminebene x_2

Die Streuung der gemessenen Proportionalitätskoeffizienten ist teilweise in der Variation der Querdehnzahlen in den untersuchten Probekörpern begründet. Wird die aus der Prüfkraft und dem rechnerisch E-Modul ermittelte Querdehnung ε_2 mit der über DMS gemessenen Längsdehnung ε_1 gegenübergestellt, ergibt sich die effektive Querdehnzahl ν_{12} der Laminats (Abbildung D-93). Die Werte streuen zwischen 0,17 und 0,35 bei einer rechnerischen Vorhersage von 0,35 (Tabelle D-4, S. 73). Der Proportionalitätskoeffizient für Querdruck ist also in besonderem Maße von der effektiven Querdehnzahl des Laminats abhängig, welcher jedoch herstellungsbedingt einer hohen Streuung unterworfen ist.

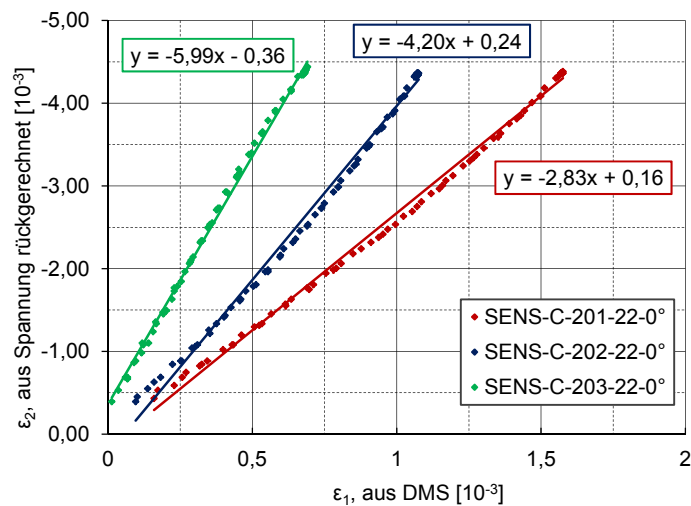


Abbildung D-93: Kehrwert der Querdehnzahl ($1/\nu_{12}$) bei den untersuchten Laminaten

D 3.3.2 Dickenrichtung x_3

Der Versuchsaufbau entspricht im Wesentlichen den zuvor beschriebenen Untersuchungen in Laminatenebene. Die Belastung wird ebenfalls über Aluminiumblöcke aufgebracht, die sich ergebende Druckfläche ist für die Handlaminats der Serie C ungefähr quadratisch (Abbildung D-94). Für die schmäleren pultrudierten Profile wurde eine identische Breite der Lasteinleitung von 62 mm gewählt.

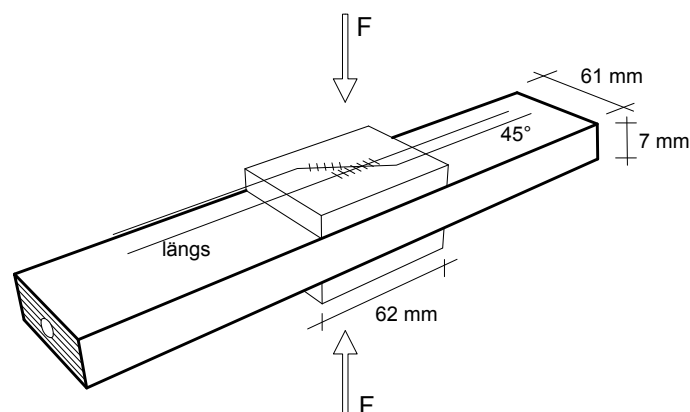


Abbildung D-94: Versuchsaufbau für die Untersuchung von Querdruck in Dickenrichtung x_3

Sensorfaser ohne Coating

Druck in Dickenrichtung führt bereits bei deutlich geringeren Lastniveaus zu einer qualitativen Beeinflussung des Reflexionsspektrums als bei der vorher untersuchten Laminatenebene (Abbildung D-95). Obwohl rechnerisch der Effekt der Doppelbrechung für die Belastung in Laminat- und Dickenrichtung nahezu identisch ist, sind hier ab einem Querdruck von 10 N/mm² die Ergebnisse praktisch nicht mehr auswertbar.

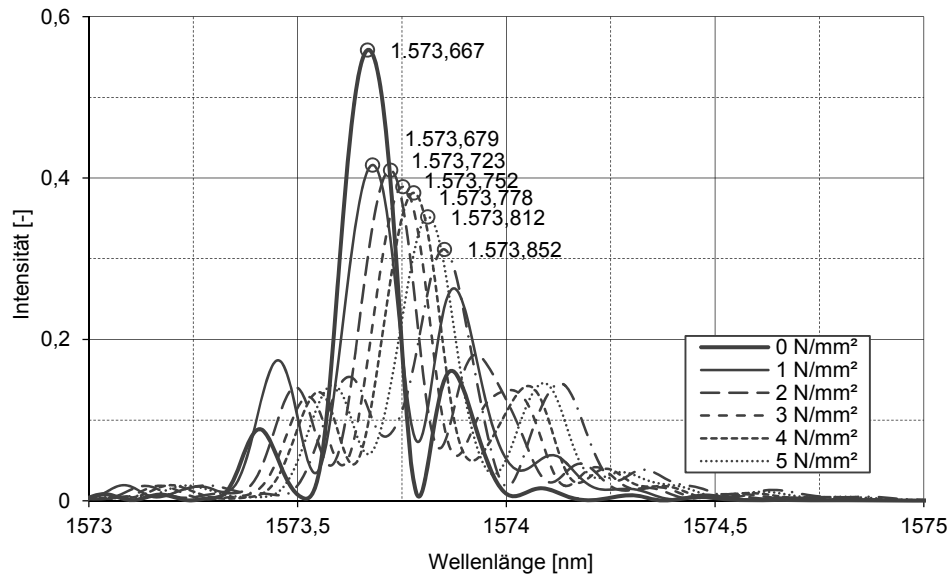


Abbildung D-95: Wellenlängenspektren des Probekörpers C-101 bei unterschiedlichen Querdrücken in Dickenrichtung x_3

Bei der Auswertung der Ergebnisse wird die Dehnung über den rechnerischen E-Modul in Dickenrichtung von $E_3 = 7.795 \text{ N/mm}^2$ von der einwirkenden Spannung zurückgerechnet (Abbildung D-96). Es ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_{\lambda 3}} = -0,24 \frac{\text{nm}}{10^{-3}} \pm \frac{1}{\Delta K_{\lambda 3}}$$

Der Wert liegt damit ca. 27% über der rechnerischen Vorhersage von $0,189 \text{ nm}/10^{-3}$ (Abbildung D-52, S. 110, System 356). Die Linearität ist jedoch nur bei sehr geringen Querdrücken gegeben.

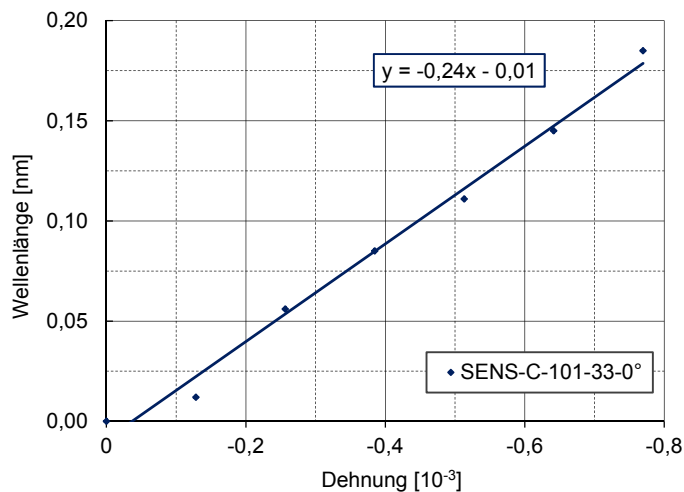


Abbildung D-96: Wellenlänge relativ zur einwirkenden Dehnung in Dickenrichtung x_3

Sensorfaser mit Coating

Bei den untersuchten Probekörpern handelt es sich um unidirektional verstärkte Rechteckstäbe, welche maschinell pultrudiert wurden. Der Einbau der Sensorfasern erfolgte unmittelbar während der Pultrusion, daher ist deren exakte Lage im Querschnitt nicht steuerbar. Insbesondere bei Probekörper G-11 liegt die Sensorfaser exzentrisch nahe der Oberfläche, daher ist diese besonders empfindlich gegenüber Querdruck, die Qualität des Reflexionsspektrums wird merklich beeinflusst (Abbildung D-97). Die qualitative Beeinflussung des Reflexionsspektrums ist jedoch wesentlich geringer als bei dem Mischlaminat der Serie C und einer Belastung in Dickenrichtung.

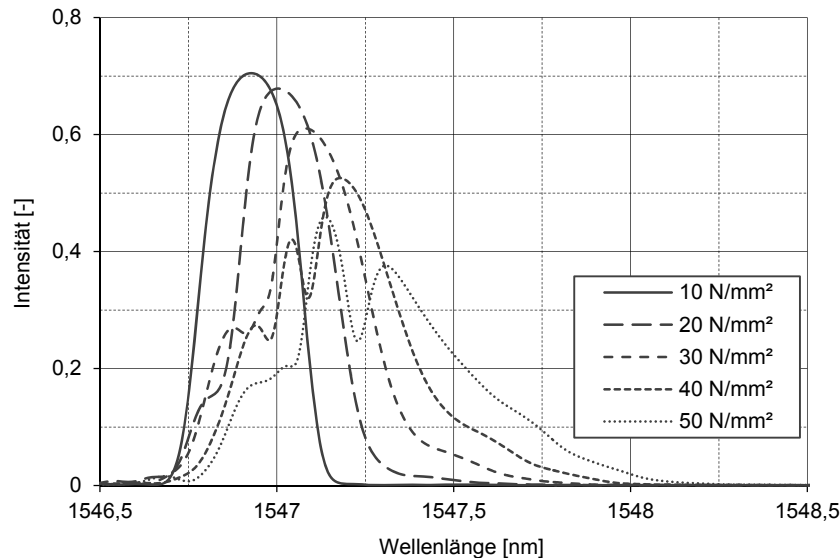


Abbildung D-97: Wellenlängenspektrum des Probekörpers G-11 bei unterschiedlichen Querdrücken in Dickenrichtung x_3

Der quantitative Zusammenhang zwischen Wellenlängenverschiebung und Querdehnung ist bei den untersuchten Probekörper linear (Abbildung D-98). Die Dehnung in Dickenrichtung wird über den E-Modul aus dem einwirkenden Querdruck abgeleitet. Dabei variiert der E-Modul infolge unterschiedlicher Faservolumenanteile der Probekörper zwischen $E_3 = 7.559$ bzw. 13.682 N/mm². Die Proportionalitätsfaktoren ergeben sich damit zu:

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_3}} = -0,092 \frac{\text{nm}}{10^{-3}} \pm \frac{1}{\Delta K_{\varepsilon_3}} \quad (\text{G-11, 60\% Faservolumengehalt})$$

$$\frac{1}{K_{\varepsilon_3}} = -0,111 \frac{\text{nm}}{10^{-3}} \pm \frac{1}{\Delta K_{\varepsilon_3}} \quad (\text{G-61, 40\% Faservolumengehalt})$$

Während die Messwerte des Probekörpers G-61 exakt den rechnerischen Vorhersage entsprechen, liegt Proportionalitätsfaktor für das Pultrudat G-11 ca. 29% unter dem in der FEM-Berechnung ermitteltem Wert (Abbildung D-52, S. 110, Systeme 151a+b). Die Abweichung bei Probekörper G-61 wird auf die exzentrische Lage des Sensors im Querschnitt zurückgeführt.

Es zeigt sich, dass unidirektional verstärkte Querschnitte grundsätzlich zuverlässiger für die Messung von Querdruck sind, problematisch ist jedoch die schlechte Steuerbarkeit der Lage des Sensors im Querschnitt.

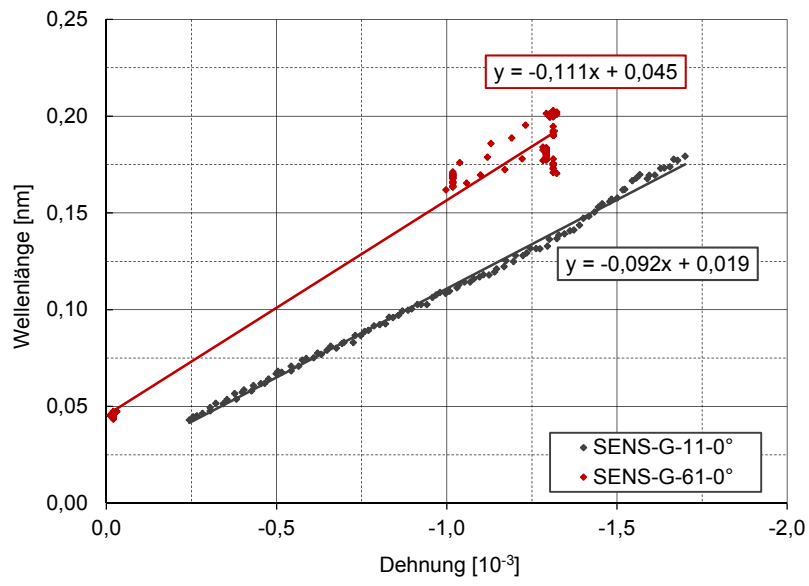


Abbildung D-98: Wellenlänge relativ zur einwirkenden Dehnung in Dickenrichtung x_3

D 3.4 Temperaturdifferenz

Bei den Versuchen wird der Zusammenhang zwischen der Wellenlängenverschiebung im Reflexionsspektrum und einer gleichmäßigen Temperaturdifferenz des Laminats untersucht. Das untersuchte Bauteil befindet sich in einem manuell regelbaren Laborofen (Abbildung D-99): Während des Versuchs wird die Wellenlänge des eingebauten faseroptischen Sensors kontinuierlich aufgezeichnet und die Temperaturen mittels oberflächlich applizierter Thermoelemente Typ T referenziert. Der Sensor wird über eine wärmedämmende Elastomerschicht und einer aufgeklebten Aluminiumfolie von Umgebungsluft und Strahlung abgeschirmt. Daneben sind ein weiterer Temperatursensor und eine zusätzliche, blanke Sensorfaser im Innenraum des Laborofens platziert, um die umgebende Lufttemperatur aufzuzeichnen. Die Referenzierung der Messwerte über oberflächenapplizierte Dehnungsmessstreifen hat sich als nicht zielführend erwiesen, da deren Temperaturgang nicht linear ist. Die durchgeführten Untersuchungen für DMS sind in Anhang 5 dargestellt.

Trotz der Abschirmung des oberflächenapplizierten Thermoelements ergibt sich ein Gangunterschied bei der Erwärmung und Abkühlung des Probekörpers zwischen integrierten faseroptischen Sensor (FOS) und oberflächlichen Thermoelementen. Aus diesem Grund werden bei der Auswertung der Proportionalität nur die Abkühlzyklen herangezogen, da der zeitliche Temperaturgradient dort wesentlich geringer ist als bei den Heizzyklen.

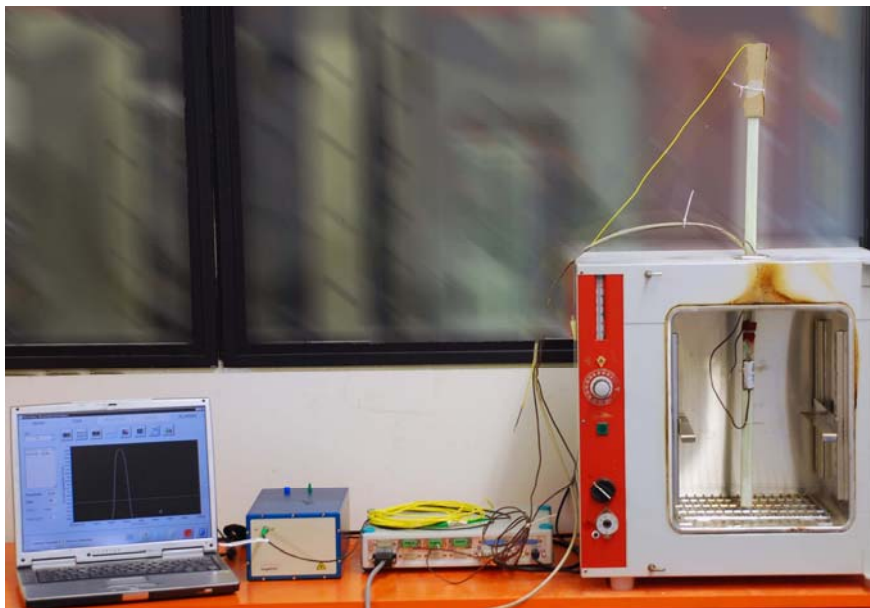


Abbildung D-99: Versuchsaufbau zur Untersuchung gleichmäßiger Temperaturdifferenz, von links: Laptop mit Software, faseroptisches Messgerät, elektronisches Messgerät, Laborofen mit Probekörper und extern applizierten Thermoelementen (Tür geöffnet)

Die Ansteuerung von Temperaturplateaus war technisch nur mit einer Schwankungsbreite von ca. $\pm 3,5$ °C möglich (Abbildung D-100). Grundsätzlich wurde eine maximale Versuchstemperatur von 60 °C gewählt, um Effekte aus der Temperaturabhängigkeit der mechanischen Kennwerte des Laminats zu minimieren, diese konnten dennoch nicht vollständig ausgeschlossen werden⁶⁵.

⁶⁵ Da sowohl Mischlaminat als auch reine UD-Schichten ein Verbundsystem darstellen, ist eine Temperaturdifferenz stets mit Zwängungsspannungen im Laminat verbunden. Aus diesem Grund ist der effektive Wärmeausdehnungskoeffizient des

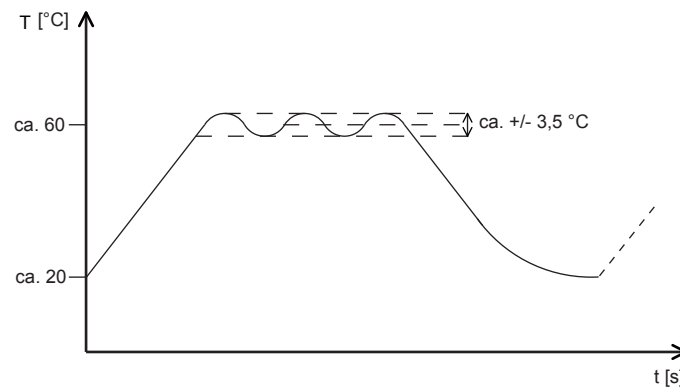


Abbildung D-100: Steuerung der Temperaturversuche, regelungsbedingt schwankt das obere Temperaturplateau um +/- 3,5 °C

Sensorfaser ohne Coating

Der erste Orientierungsversuch zeigt zunächst, dass der Grad der Wellenlängenverschiebung bei zunehmender Temperatur geringer wird (Abbildung D-101). Um Effekte aus der Nachhärtung des Harzes auszuschließen, wurde bei den folgenden Probekörpern eine mehrfache Erwärmung durchgeführt und jeweils der erste Temperaturzyklus nicht ausgewertet.

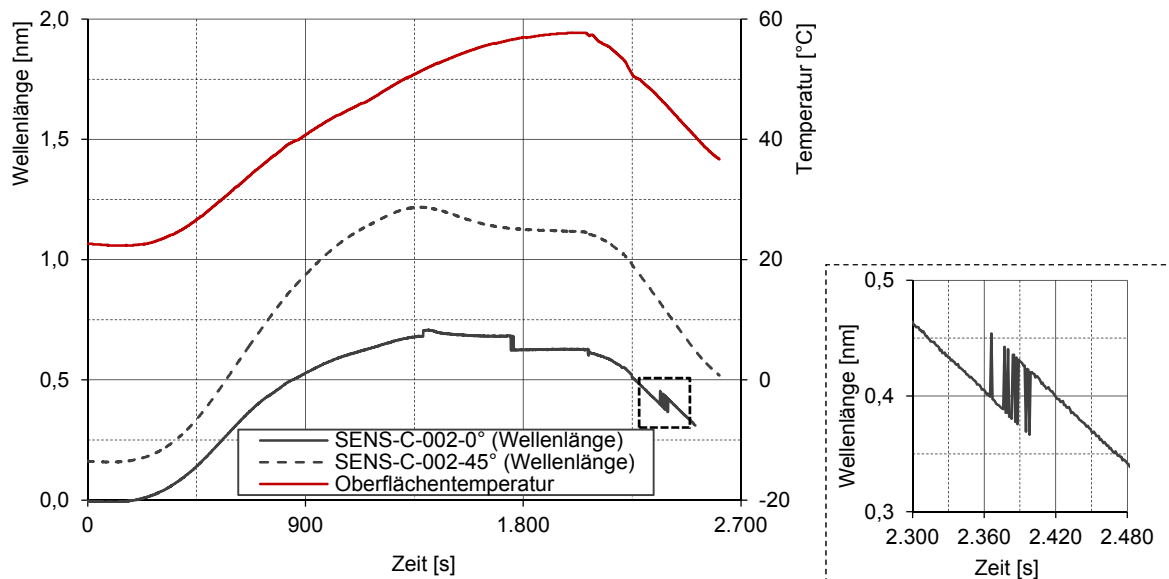


Abbildung D-101: Versuch zur Temperaturdifferenz an Probekörper C-002, Ausschnitt (Teilstrich von 900 s entspricht 15 min, Laufzeit: 43 min)

Bei dem Sensor, der in 0°-Richtung eingebaut ist, treten ab einer Oberflächentemperatur von 50 °C und bei der Abkühlung Sprünge der Wellenlänge auf. Dabei handelt es sich jedoch nicht um einen diskreten Sprung, vielmehr oszilliert die gemessene Wellenlänge mehrfach zwischen zwei Werten. Es liegt daher eine Fehlinterpretation der Messsoftware nahe, da möglicherweise der maßgebenden Peak im Reflexionsspektrum

Laminats temperaturabhängig, da der E-Modul des Harzes in hohem Maße temperaturabhängig ist. Bei zunehmender Temperatur fällt daher der tangentielle Wärmeausdehnungskoeffizient des Laminats kontinuierlich ab.

nicht eindeutig identifiziert kann. Aufgrund der Oszillation des Messwerts kann eine bleibende Schädigung der Grenzfläche zwischen Sensorfaser und Laminat ausgeschlossen werden. Außerdem hat der betrachtete Probekörper Sensorfasern ohne Coating, weshalb Schädigungen des Coatings ebenfalls nicht als Ursache in Betracht kommen.

Die qualitative Auswertung des Reflexionsspektrums unter erhöhter Temperatur zeigt jedoch keine Doppelbrechung, also Aufweitung des Reflexionsspektrums (Abbildung D-102). Es konnte nicht abschließend geklärt werden, wo die Ursache für diese Unstetigkeit zu suchen ist. Dieses Phänomen tritt jedoch nur in den Mischlaminaten mit Sensorfasern ohne Coating auf.

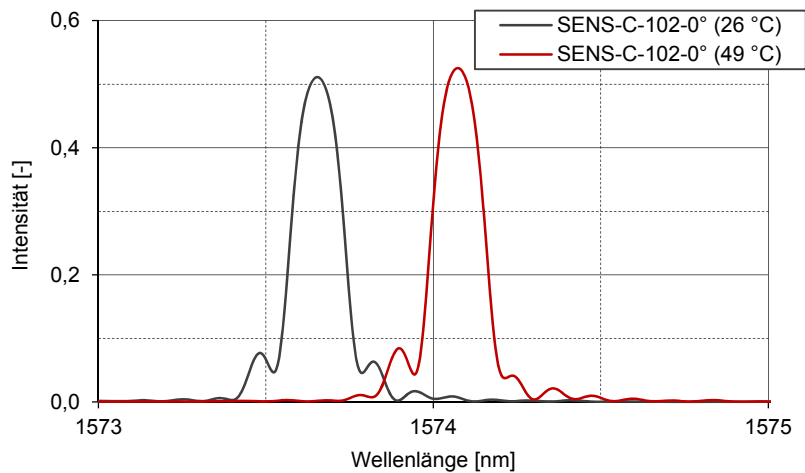


Abbildung D-102: Reflexionsspektrum des Sensors in 0°-Richtung von Probekörper C-102 bei zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus

Bei den folgenden Versuchen wird zunächst ein Temperaturzyklus durchfahren, um Nachhärtung des Laminats als Einflussgröße auszuschließen. Anschließend wird der Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und Wellenlängenverschiebung ausgewertet (Abbildung D-103, Abbildung D-104). Auch hier sind wiederum Sprünge in der Wellenlänge erkennbar.

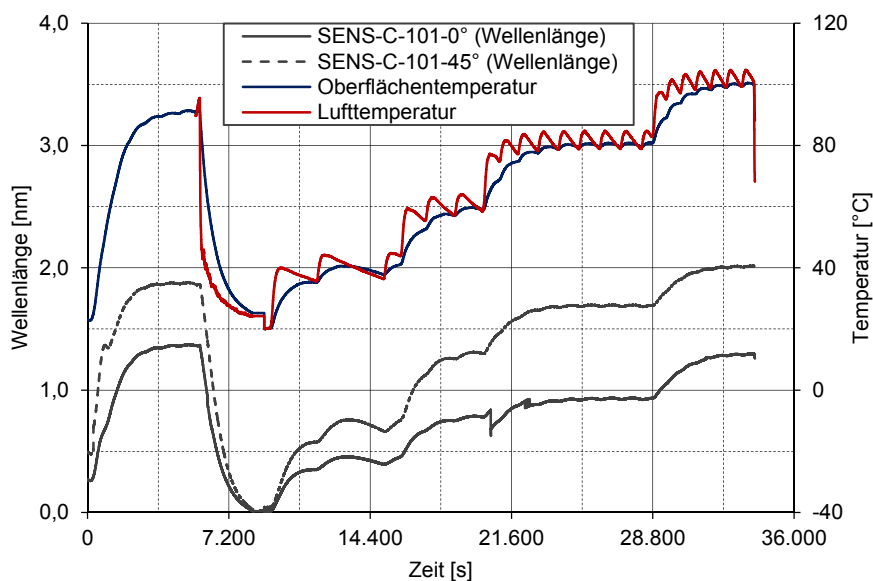


Abbildung D-103: Versuch zur Temperaturdifferenz an Probekörper C-101 (Teilstrich von 7.200 s entspricht 2 h, Laufzeit: 9,5 h)

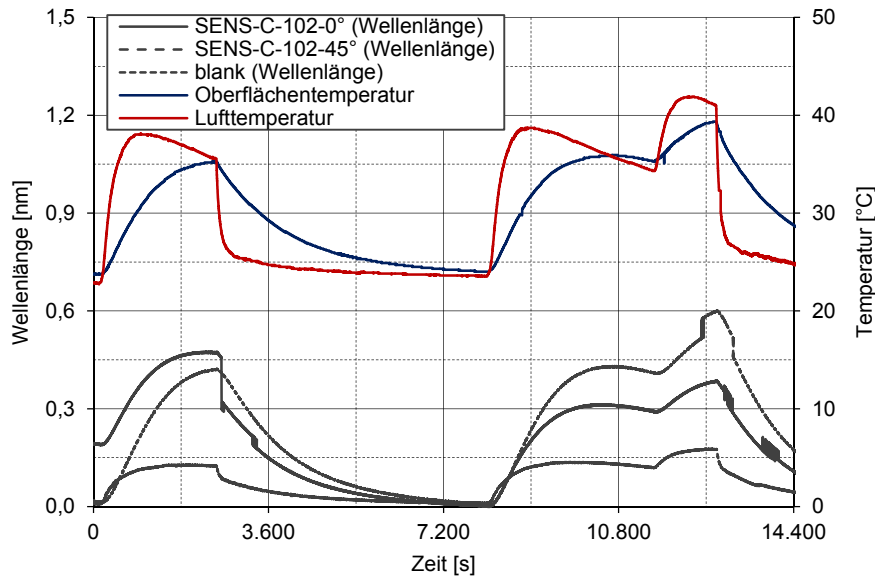


Abbildung D-104: Versuch zur Temperaturdifferenz an Probekörper C-102 (Teilstrich von 3.600 s entspricht 1 h, Laufzeit: 4 h)

Die Gegenüberstellung der Wellenlängenverschiebung und der Oberflächentemperatur zeigt für die Sensoren in 0°-Richtung einen linearen Zusammenhang (Abbildung D-105). Es werden nur die Werte des Abkühlzyklus ausgewertet, da die Abkühlung wesentlich langsamer gesteuert werden kann als das Aufheizen und damit die Differenz zwischen Oberflächen- und Bauteiltemperatur minimiert wird. Es ergibt sich ein Proportionalitätskoeffizient von:

$$\frac{1}{K_T} = 0,027 \frac{\text{nm}}{\text{K}} \pm \frac{1}{\Delta K_T} \quad (\text{Sensor in } 0^\circ\text{-Richtung})$$

Der Messwert für die Sensoren in 0°-Richtung liegt damit ca. 12% über der rechnerischen Vorhersage von 0,0240 nm/K (Abbildung D-53, S. 111, System 356). Der Zusammenhang entspricht zwar den Vorhersagen, die Auswertung ist aber wegen der Sprünge in der Wellenlänge erschwert, z.B. hier für den Probekörper C-002.

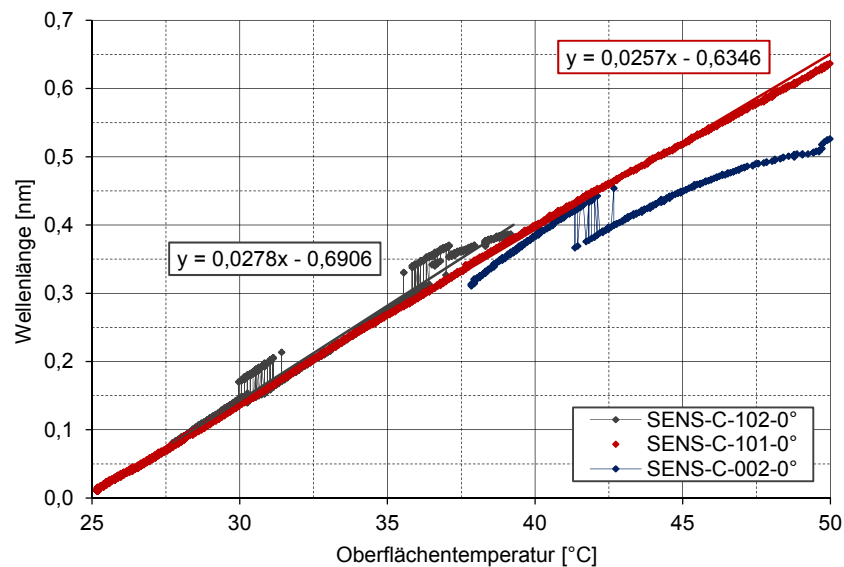


Abbildung D-105: Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur und der gemessenen Wellenlängenverschiebung bei den Sensoren in 0°-Richtung (≤ 50 °C, Abkühlung)

Für die Sensoren, die in 45°-Richtung appliziert sind, ist der Zusammenhang zwischen aufgezeichneter Wellenlängenverschiebung und Oberflächentemperatur ebenfalls linear (Abbildung D-106). Die Streuung ist höher als bei den in 0°-Richtung angeordneten Sensoren, da z.B. deren Orientierung stärker abweichen kann. Es ergibt sich im Mittel ein Proportionalitätsfaktor von:

$$\frac{1}{K_T} = 0,040 \frac{\text{nm}}{\text{K}} \pm \frac{1}{\Delta K_T} \quad (\text{Sensor in } 45^\circ\text{-Richtung})$$

Der quantitative Zusammenhang ist größer als bei den Sensoren, die entlang der unidirektionalen Verstärkung angeordnet sind, da in diese Richtung auch die Wärmeausdehnung des Laminats höher ist. Es zeigt sich also, dass der Proportionalitätsfaktor vor allem von der Ausdehnung des Laminats in Richtung der Sensorfaser bestimmt wird. Damit kann nur bei ausreichender Kenntnis des richtungsabhängigen Wärmeausdehnungskoeffizienten eine rechnerische Prognose der Sensor-Bauteil-Interaktion gegeben werden.

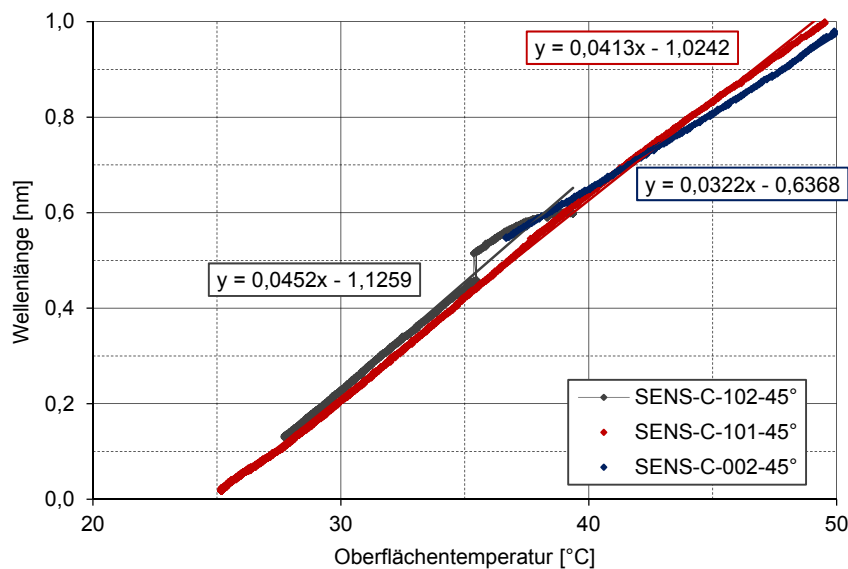


Abbildung D-106: Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur und der gemessenen Wellenlängenverschiebung für die Sensoren in 45°-Richtung (≤ 50 °C, Abkühlung)

Sensorfaser mit Coating

Den Versuchen wird ebenfalls ein Temperaturzyklus zur Nachhärtung des Laminats vorangestellt, an den sich die eigentliche Messung anschließt. Die Plateaus werden über einen längeren Zeitraum gehalten, um mögliche Langzeit-Veränderungen festzustellen (Abbildung D-107, Abbildung D-108). Im Gegensatz zu den vorher untersuchten Probekörpern treten hier keine Temperatursprünge auf. Dies kann entweder an der ausschließlich unidirektionalen Faserverstärkung oder an dem hier vorhandenen Coating liegen.

Da die untersuchten Probekörper einen dünner sind als die zuvor untersuchten Handlaminat, ist der Zeitversatz zwischen Oberflächen- und Bauteiltemperatur wesentlich geringer. Daher kann neben dem Abkühlzyklus auch der Heizzyklus für die Auswertung herangezogen werden.

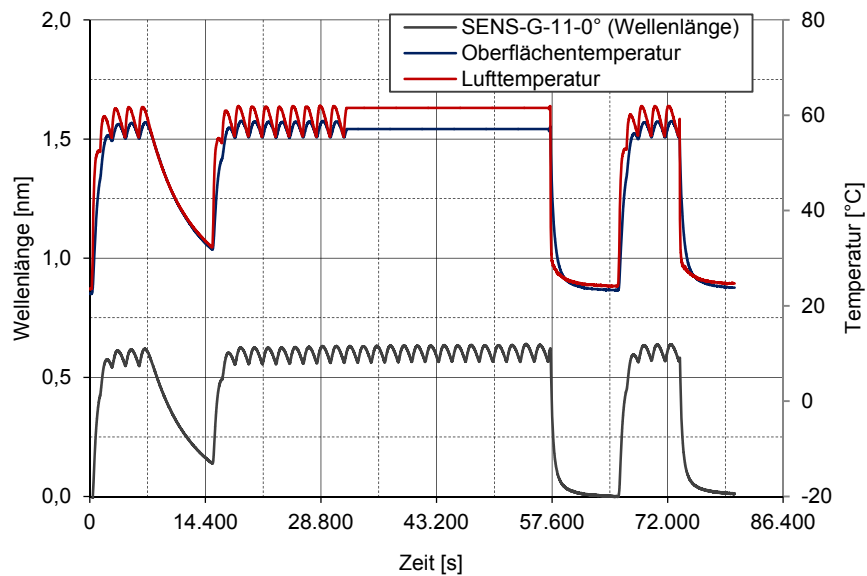


Abbildung D-107: Versuch zur Temperaturdifferenz an Probekörper G-11
(Teilstrich von 14.400 s entspricht 4 h, Laufzeit: 22 h)
(im Bereich 32.000 ... 57.000 s liegen keine Messwerte der Thermoelemente vor)

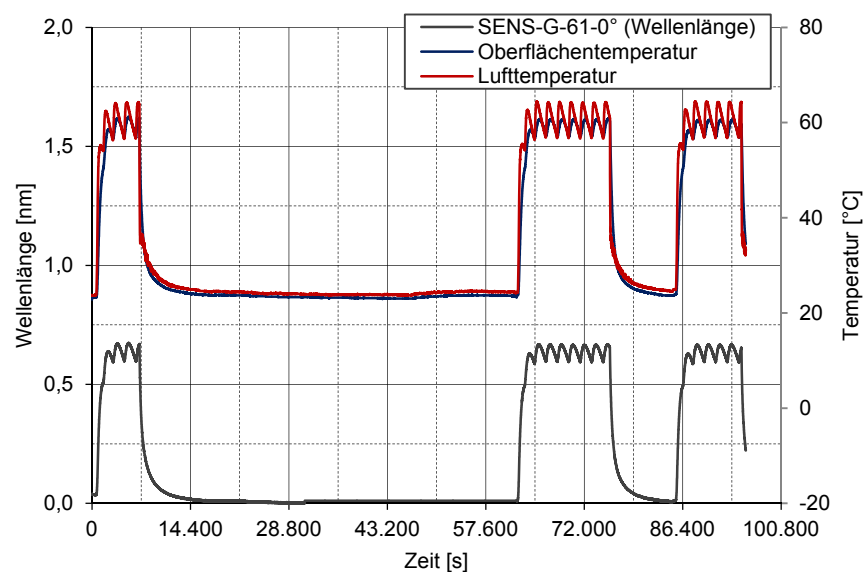


Abbildung D-108: Versuch zur Temperaturdifferenz an Probekörper G-61
(Teilstrich von 14.400 s entspricht 4 h, Laufzeit: 27 h)

Der Probekörper G-11 mit dem höheren Faservolumengehalt zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und resultierender Wellenlängenverschiebung (Abbildung D-109). Dem hingegen ist der Verlauf bei dem Pultrudat G-61 gekrümmt. Da hier der Faservolumengehalt geringer ist, wirkt sich das temperaturabhängige E-Modul des Harzes merklich aus, der effektive Wärmeausdehnungskoeffizient sinkt bei zunehmenden Temperaturen.

Trotz der unterschiedlichen Faservolumengehalte beider Probekörper ergeben sich nahezu identische Proportionalitätskoeffizienten von:

$$\frac{1}{K_T} = 0,0179 \frac{\text{nm}}{\text{K}} \pm \frac{1}{\Delta K_T} \quad (\text{G-11, 60\% Faservolumengehalt})$$

$$\frac{1}{K_T} = 0,0176 \frac{\text{nm}}{\text{K}} \pm \frac{1}{\Delta K_T} \quad (\text{G-61, 40\% Faservolumengehalt})$$

Das Profil G-11 mit 60% Faservolumengehalt zeigt einen Messwert, der 13% unter der rechnerischen Vorhersage von 0,0206 nm/K liegt. Für das Profil G-61 mit 40% Faservolumengehalt liegt der Messwert ca. 20% unter dem Wert der FEM-Berechnung (Abbildung D-53, S. 111, System 151a+b)

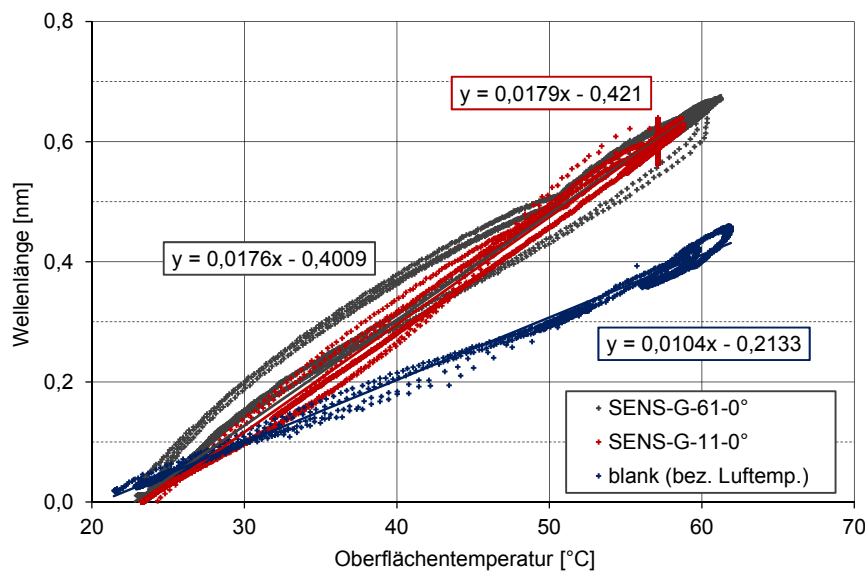


Abbildung D-109: Zusammenhang der Oberflächentemperatur mit der Wellenlänge für die Pultrudate der Serie G

In Abbildung D-109 ist auch der Zusammenhang zwischen der Wellenlängenverschiebung einer blanken Sensorfaser und der Lufttemperatur dargestellt. Beide Sensoren befinden sich frei im beheizten Prüfraum. Es ergibt sich im Gegensatz zu den strukturintegrierten Sensoren ein wesentlich geringerer Proportionalitätsfaktor von 0,0104 nm/K. Die Abweichung von 15% von der theoretischen Vorhersage für eine nicht integrierte Sensorfaser (Abbildung D-53, S. 111, „blank“) ist durch nicht vermeidbare Luftströmungen im Prüfraum begründet.

D 3.5 Zusammenfassung der Bauteilversuche

Es wurden zwei Probekörperkonfigurationen untersucht:

- manuell hergestellte Mischlaminat mit Sensorfasern ohne Coating, in 0°- und 45°-Orientierung (Serie C)
- maschinell gefertigte Pultrudate mit ausschließlich unidirektionaler Verstärkung und einer Sensorfaser mit Coating, in 0°-Richtung (Serie B, G)

Für eine Einwirkung längs der Orientierung der Sensorfaser ergibt sich jeweils ein streng linearer Zusammenhang zwischen Wellenlängenverschiebung und Dehnung. Unabhängig davon, ob die Sensorfaser ein Coating hat und unabhängig vom betrachteten Laminat können Längsdehnungen bis ca. $5,0 \cdot 10^{-3}$ zuverlässig ausgewertet werden. Der quantitative Zusammenhang zwischen Wellenlängenverschiebung und Einwirkung entspricht in guter Näherung der rechnerischen Vorhersage. Orientierende Schwelllast- und Kriechversuche zeigen keine Beeinträchtigung des linearen Zusammenhangs, wenn die genannte Grenzdehnung nicht überschritten wird. Ist die Sensorfaser 45° zur vorwiegenden Faserverstärkung bzw. Belastungsrichtung orientiert, streuen die Proportionalitätskoeffizienten wesentlich stärker.

In dem Zuverlässigkeitsbereich von $\pm 5,0 \cdot 10^{-3}$ ergibt sich ein Wellenlängenbereich von bis zu $\pm 6,5$ nm, dies ist bei der Definition der Grundwellenlänge für ein Sensornetzwerk zu beachten.

Bei einer Belastung senkrecht zur Orientierung der Sensorfaser wird grundsätzlich auch ein linearer Zusammenhang zwischen Einwirkung und Wellenlängenverschiebung bestätigt. Bei flächig ausgeprägten Mischlaminaten mit Sensorfaser ohne Coating kann in Laminebene eine Dehnungen von bis zu $5,0 \cdot 10^{-3}$ zuverlässig ausgewertet werden, der quantitative Zusammenhang entspricht sehr gut der rechnerischen Vorhersage. Senkrecht zur Laminebene sind nur Dehnungen von $0,8 \cdot 10^{-3}$ auswertbar, da das Reflexionsspektrum zu sehr verzerrt wird. Bei den unidirektional verstärkten Pultrudaten waren Querdehnungen bis $1,7 \cdot 10^{-3}$ gut auswertbar.

In den Temperaturversuchen weichen die Messwerte bis zu 20% von den rechnerischen Vorhersagen ab. Die dominierende Einflussgröße ist dabei die effektive Wärmeausdehnung des Laminats in Orientierung der Sensorfaser. Da der gemittelte Wärmeausdehnungskoeffizient des Laminats temperaturabhängig ist, wird der Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz und der Wellenlängenverschiebung in der Regel nicht-linear. Bei der Verwendung von Sensorfasern ohne Coating in einem Mischlaminat werden oszillierende Sprünge der aufgezeichneten Wellenlänge festgestellt, deren Ursache könnte in einer Verzerrung des Reflexionsspektrums liegen, was jedoch nicht abschließend geklärt werden konnte.

D 4 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Analyse und Versuchen

In Tabelle D-9 werden ausgewählte Berechnungswerte der mikromechanischen Analyse (Kapitel D 2) den Ergebnissen der Bauteilversuche (Kapitel D 3) gegenübergestellt. Die vollständigen Ergebnisse der mikromechanischen Analyse werden in Anhang 8 (Seite 214) aufgelistet, die Resultate der Versuche wurden bei deren Diskussion im vorhergehenden Abschnitt dargestellt.

Tabelle D-9: Vergleich ausgewählter Proportionalitätskoeffizienten aus Berechnungs- und Versuchsergebnissen (Mittelwerte); bei Doppelbrechung wird lediglich die mittlere Wellenlängenverschiebung betrachtet

Sensorfaser mit Coating		... ohne Coating	
		unidirektionales Laminat, Serien B+G		Mischlaminat, Serie C	
Eigenschaften		Faservolumengehalt 40%, System 151a	Faservolumengehalt 60%, System 151b	Faservolumengehalt 38% (UD-Schicht) bzw. 22% (Wirrfaserschicht), System 356	
Orientierung Sensor		Längsrichtung (0°)	Längsrichtung (0°)	Längsrichtung (0°)	diagonal (45°)
Belastung längs zur Sensorfaser [$\text{nm}/10^{-3}$]	Analyse (FEM)	1,228	1,227	1,239	---
	Versuch	1,16 (f = -5%)		1,31 (f = +6%)	1,62
Belastung quer zur Sensorfaser [$\text{nm}/10^{-3}$]	Laminat-ebene x_2 Analyse (FEM)	---	---	-0,315	---
	Versuch	---	---	-0,33 (f = +5%)	---
Sensorfaser Dickenrichtung x_3 [$\text{nm}/10^{-3}$]	Analyse (FEM)	-0,111	-0,130	-0,189	---
	Versuch	-0,111 (f = 0%)	-0,092 (f = -29%)	-0,240 (f = +27%)	---
Temperaturdifferenz [nm/K]	Analyse (FEM)	0,0221	0,0206	0,024	---
	Versuch	0,0176 (f = -20%)	0,0179 (f = -13%)	0,027 (f = +12%)	0,040

f: relativer Fehler des Versuchsergebnisses gegenüber der Vorhersage aus der Berechnung

Es ist erkennbar, dass der relative Fehler „f“ für Belastung längs zur Faser stets unter 6% ist. Man kann daher von einer zuverlässigen Messung ausgehen, unabhängig davon, ob die Sensorfaser mit einem Coating beschichtet ist und in welchem Laminat diese eingebettet wird.

Dem hingegen treten bei der Belastung quer zur Sensorfaser zum Teil erhebliche Abweichungen zwischen Berechnung und Versuch auf. Dieser Lastfall kann also nur unzuverlässig mit einer integrierten Sensorfaser gemessen werden. Auch bei identisch gefertigten Bauteilen traten sehr unterschiedliche Proportionalitätskoeffizienten auf.

Zuletzt halten sich die Fehler bei einer Temperaturmessung in relativ engen Grenzen. Aufgrund des nichtlinearen Werkstoffverhaltens des Laminats bei Temperaturänderung war eine genauere Entsprechung ohnehin nicht zu erwarten. Hierfür wären eingehende nichtlineare Untersuchungen notwendig, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt werden konnten. Identisch gefertigte Bauteile zeigen durchweg vergleichbare Proportionalitätskoeffizienten, die Empfindlichkeit gegenüber lokalen Unregelmäßigkeiten ist also wesentlich geringer als bei der Belastung quer zur Sensorfaser.

E.

Sensornetzwerk und Herstellung

E 1 Entwurf des Sensornetzwerks

Die in der vorliegenden Arbeit betrachteten pultrudierten Faserverbundwerkstoffe sind Halbzeuge, die für unterschiedliche konstruktive Bauteile zur Anwendung kommen können. Sie sind daher je nach Anwendung gänzlich abweichenden Belastungsbildern unterworfen. Der Gegensatz zwischen universaler Fertigung und individuellem Einsatz erschwert freilich die Konzeption des zu integrierenden Sensornetzwerks. Dabei sind zwei Szenarien denkbar, nämlich einerseits die bedarfsgerechte Ausrüstung einzelner Bauteile mit individuell platzierten optischen Fasern oder eine serienmäßige Sensorintegration, bei der nur die jeweils relevanten Sensoren angekoppelt und ausgelesen werden.

E 1.1 Aufzunehmende Einwirkungen

Als Ergebnis der Untersuchungen in Kapitel D 2 kann festgehalten werden, dass nur die Dehnung in Längsrichtung der Sensorfaser sowie die Temperaturdifferenz als zuverlässige Messgrößen dienen können. Dehnungen senkrecht zur Sensorfaser sind quantitativ nur sehr ungenau zu bestimmen. Deren Auswirkung auf das Messergebnis sollte daher möglichst über die Auswahl der Faserbeschichtung (Coating) und über die Auswertung der Messergebnisse eliminiert werden. Daraus ergibt sich für die Platzierung der Sensoren eine Anordnung, die an jedem relevanten Messpunkt zwei linear unabhängige Sensoren platziert, um den flächigen Dehnungszustand im Laminat wiedergeben zu können.

Abbildung E-1 zeigt exemplarisch ein Hohlprofil unter verschiedenen Belastungszuständen und eine mögliche Platzierung der Sensoren. Bei lokalen Einwirkungen wird eine erhöhte Anzahl an Sensoren notwendig, zum Beispiel, wenn lokale Laminatbiegung von Interesse ist.

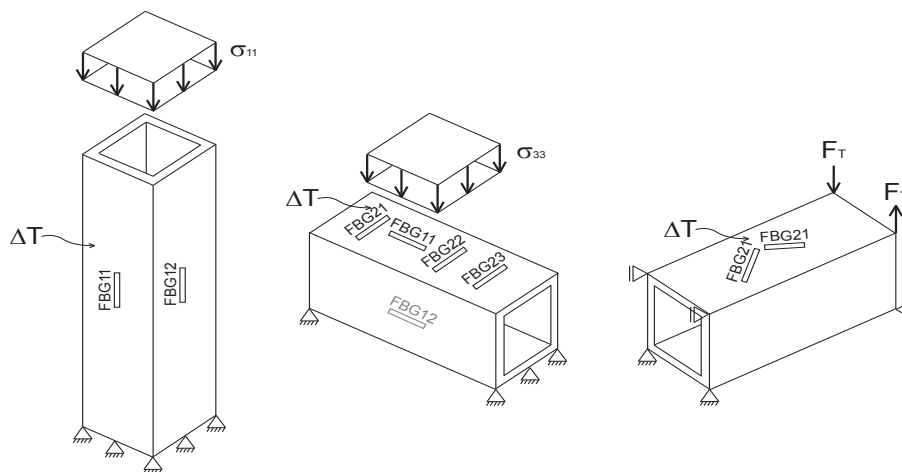


Abbildung E-1: Exemplarische Anordnung von Sensoren auf einem Rechteckhohlprofil unter verschiedenen Lastszenarien; von links: globale Normalkraft + Temperatur; lokale Biegung + Temperatur; Torsion + Temperatur

Grundsätzlich sollten Faserverbundwerkstoffe so dimensioniert werden, dass keine lokale Biegung im Laminat entsteht. Ist dies der Fall, kann die Sensorfaser in der Mitte des Laminats platziert werden. Wird jedoch von einer Biegebeanspruchung ausgegangen, sind die Sensoren exzentrisch anzubringen (Abbildung E-2). Da bei Faserverbundwerkstoffen die Bernoulli-Hypothese nicht anwendbar ist, ist die Rückrechnung auf die maximale Randspannung jedoch nicht ohne weiteres möglich (vgl. Messwerte ‚Biegekreichen‘ D 3.2.3, S.129ff.).

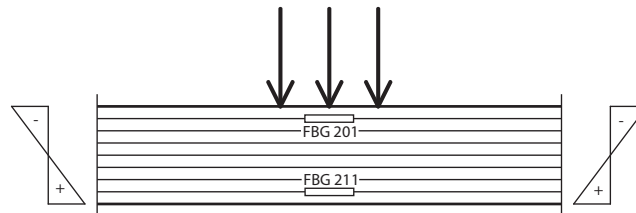


Abbildung E-2: Mögliche Anordnung von Sensoren an einem lokal auf Biegung belasteten Laminat

E 1.2 Applikation auf Textil

Eine Anordnung in einem geneigten Winkel zur Pultrusionsrichtung ist nur dann möglich, wenn die Sensorfaser vorab auf ein Textil appliziert wird, welches dann in den Querschnitt eingebaut wird. Die Verwendung eines „Sensortextils“ hat außerdem den Vorteil, dass die Sensorfaser geometrisch definiert im Pultrusionsquerschnitt liegt. Das unmittelbare Einlaufen der Sensorfaser bei der Pultrusion kann hingegen zu einer undefinierten Lage und unzureichenden Anbindung an die Matrix führen (E 2.2.2, S. 162f.).

Die Anordnung der Sensorfaser auf dem Textil kann beispielsweise alternierend in $\pm 45^\circ$ -Richtung erfolgen (Abbildung E-3, rechts). Der Vorteil dabei ist, dass die Dehnung längs zur Bauteilrichtung stets den gleichen Einfluss auf den Sensor hat, unabhängig, auf welchen Ast sich dieser befindet. Querdehnung und Torsion (Schub) haben zumindest betragsmäßig den gleichen Einfluss. Lediglich an den notwendigen Ausrundungen entspricht der Messwert nicht den Erwartungswerten. Über eine Gegenüberstellung mit einem linear verlegten Sensorstrang können die einzelnen Dehnungsanteile rechnerisch getrennt werden.

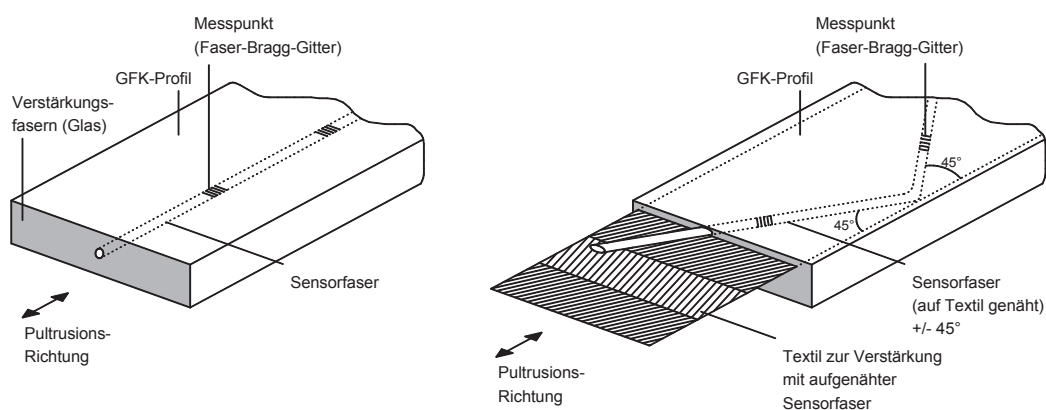


Abbildung E-3: Vorgeschlagene Verlegung der Sensorfaser in einem pultrudierten Profil
links: direkter Einbau der Sensorfaser bei der Pultrusion, nur in 0° -Richtung möglich
rechts: Sensorfaser vorab in $\pm 45^\circ$ -Richtung auf ein Textil appliziert

Theoretisch können die einzelnen Faser-Bragg-Gitter so platziert werden, dass sie sich nicht an der Ausrundung befinden. Praktisch ist dies infolge unvermeidbarer Gleichlaufschwankungen bei der Produktion jedoch nicht auszuschließen. Aus diesem Grund muss im Rahmen der Auswertung der Messwerte eine Möglichkeit gefunden werden, die an der Ausrundung platzierten Faser-Bragg-Gitter zu identifizieren und entsprechend das Messergebnis richtig zu interpretieren.

E 1.3 Beispielhafte Entwicklung an einem Prototyp

Die Entwicklung eines Sensornetzwerks wird anhand eines Prototyps exemplarisch aufgezeigt. Dieser dient der Umsetzung und Präsentation der Ergebnisse des begleitenden Entwicklungsprojekts. In dem konkreten Fall wird ein pultrudiertes GFK-Hohlprofil mit einer Breite von 0,4 m untersucht, welches als Einfeldträger über 2 m spannt (Abbildung E-4). Im Untergurt des Hohlprofils ist mittig ein Gelege eingebaut, auf das vorab drei Sensorfasern mit je drei Faser-Bragg-Gittern appliziert wurden. Die Sensorfasern werden nach der Herstellung an ein Messgerät angeschlossen, damit das Bauteil während der Nutzung online überwacht werden kann. Der verwendete Querschnitt entspricht einem typischen pultrudierten Profil für Fußgängerstege mit einer Wandungsstärke von 3 mm (Anhang 10, S. 216).

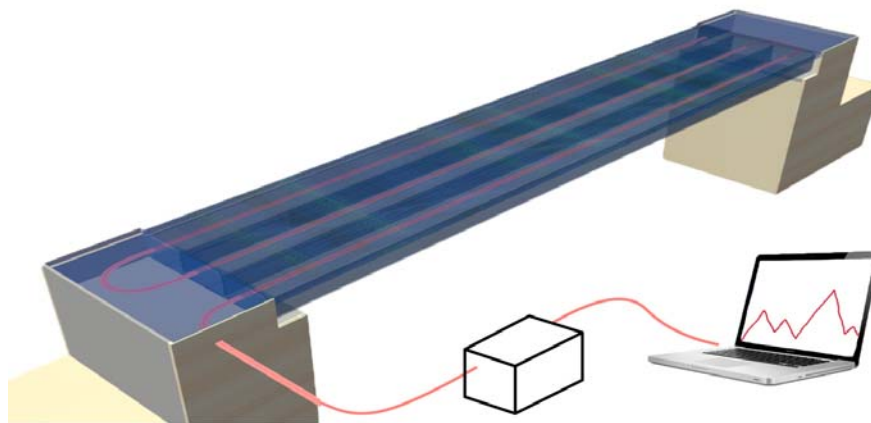


Abbildung E-4: Schemaskizze des Prototyps mit drei strukturintegrierten Sensorfasern, welche nachträglich zu einem durchgehenden Strang verbunden und an ein Messgerät angeschlossen werden

Der Demonstrator wird über eine frei auf der Oberfläche angeordnete Punktlast beansprucht, dies entspricht einer Person, die auf dem Demonstrator steht. Als konkrete Messaufgabe stehen hier die Größe der einwirkenden Last sowie deren Position auf der Brücke im Blickfeld. Es ist also nicht nur relevant, die maximale Beanspruchung innerhalb des Bauteils zu ermitteln, sondern Informationen über Lage und Größe der Einwirkung zu erhalten.

Die Untersuchungen in Kapitel D haben gezeigt, dass die Relation zwischen lokaler Dehnung und der resultierenden Wellenlängenverschiebung einer gewissen Streuung unterliegt, welche durch die exakte Ausrichtung des Sensors und Irregularitäten des Laminataufbaus verursacht wird. Aus diesem Grund wurde ein doppelt symmetrischer Sensoraufbau gewählt, um eine Redundanz der Ergebnisse zu erzielen (Abbildung E-5). Die neun Sensoren sind entlang der Längsachse des Bauteils orientiert, eine vorab durchgeführte FEM-Berechnung zeigt, dass Dehnungen in Querrichtung auch bei asymmetrischer Last von untergeordneter Größe sind und deren Aufzeichnung daher nicht zielführend ist. Außerdem spielt lokale Biegebelastung der Laminate in Längsrichtung keine Rolle, während in Querrichtung bei unsymmetrischer Last nicht unerhebliche

Biegebeanspruchungen auftreten. Daher variieren die Dehnungen senkrecht zur Längsachse wesentlich stärker als längs dazu, eine geringe Lageabweichung der Sensoren würde das Messergebnis also maßgeblich beeinflussen.

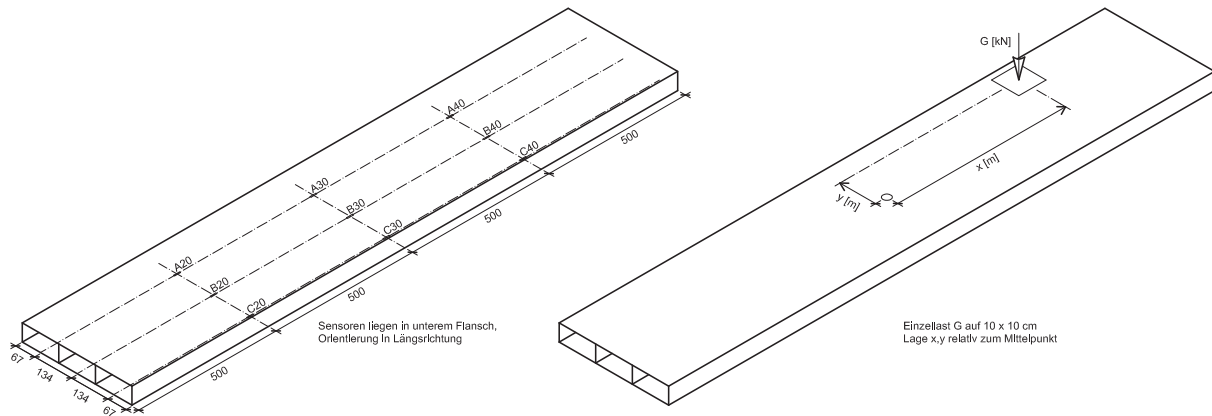


Abbildung E-5: Die Platzierung der Sensoren erfolgt doppelt symmetrisch (links), um ein redundantes Sensornetzwerk zu erhalten; als Einwirkung wird eine Punktlast angenommen, deren Größe und Lage bestimmt werden soll (rechts)

Zusammenfassend unterliegt der Entwurf des Sensorlayouts also folgenden Anforderungen:

- Platzierung der Sensoren an den Punkten mit der größten Einflussgröße (hier: Dehnungsmaxima) und außerdem den für die Identifizierung des Lastbilds notwendigen Punkten
- redundante Platzierung der Sensoren, wegen Ausfallsicherheit und der Möglichkeit lokaler Abweichungen
- Orientierung der Sensoren entlang der zu erwartenden Hauptmembrandehnungen, außerdem möglichst in die Richtung geringer Laminatbiegung

In den folgenden Abschnitten werden die weiteren Arbeitsschritte hin zur Auswertung von Messwerten anhand des vorgestellten Prototyps exemplarisch aufgezeigt.

E 2 Herstellung und Kontaktierung

Die Herstellung von Faserverbundbauteilen mit integrierten Sensorfasern war einerseits für die durchgeführten Bauteilversuche in Abschnitt D 3 erforderlich. Andererseits diente die vorliegende Arbeit auch der Entwicklung einer industriellen Herstellung solcher Bauteile. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse des gemeinschaftlichen Projektes zusammengefasst, zunächst werden unterschiedliche Technologien zum Einbau der Sensorfaser in das Laminat beschrieben. Im eingebauten Zustand wurde an einzelnen Bauteilen eine nicht zufriedenstellende Anbindung zwischen Sensor und Matrix detektiert, welche im Folgenden diskutiert wird. Abschließend werden unterschiedliche Methoden vorgestellt, die eingebaute Sensorfaser freizulegen und an das Messgerät anzukoppeln.

E 2.1 Einbau der Sensorfasern

Bei den Untersuchungen wurden industriell verfügbare Bragg-Gitter-Sensoren verwendet. Die Reflexionsgitter können bei der Herstellung der Sensorfaser eingeschrieben wurden („Ziehturm-gitter“) oder nachträglich („recoating“). Es konnten jedoch keine Auswirkungen des Herstellungsprozesses auf die Leistungsfähigkeit festgestellt werden.

Bei einigen optischen Fasern ist an der Stelle des Reflexionsgitters das Coating entfernt worden, diese werden als Sensorfasern „ohne Coating“ bezeichnet. Bei den anderen optischen Fasern wird ein zweischichtiges Hochtemperaturacrylat (HTAC) verwendet, vgl. Abschnitt D 2.1.2, S. 74. Abweichende Beschichtungen führten zu keinen signifikanten Änderungen bei der Fertigung und Sensor-Matrix-Haftung, weshalb hier nicht näher auf diese eingegangen wird. Wegen der mechanischen Belastung bei der Herstellung wurden bei den maschinellen Verfahren ausschließlich Sensoren mit dem weichen HTAC eingesetzt.

Zunächst wurden Sensoren ohne Coating manuell in ein Handlaminat integriert. Anschließend erfolgte der Einbau von Sensoren mit Coating in den automatisierten Pultrusionsprozess und letztlich die Vorfertigung und Integration von Sensortextilien.

E 2.1.1 Manuell integrierte Sensoren

Bei den Probekörpern der Serie C (Handlamine) werden die faseroptischen Sensoren manuell auf eine Textillage fixiert und diese dann einlaminiert. Dabei sind die optischen Fasern sowohl längs zur hauptsächlichen Verstärkungsrichtung als auch $\pm 45^\circ$ dazu angeordnet, es ergibt sich eine sogenannte Rosette zur Ermittlung eines flächigen Dehnungszustands. Es werden industriell verfügbare Bragg-Gitter-Sensoren verwendet⁶⁶, welche an der Position des Bragg-Gitters auf einer Länge von ca. 20 mm kein Coating haben (Abbildung E-6). Die Sensorfasern haben an jeweils beiden Enden vorkonfektionierte Stecker. Diese Methode dient lediglich der Fertigung der ersten Probekörper und wird für die weitere Entwicklung nicht mehr angewendet.

⁶⁶ Faser-Bragg-Gitter der Firma Fibersensing, Maia (Portugal) - Acrylatcoating, beide Enden mit 1 m Zuleitung, vorkonfektionierte FC-APC-Stecker (Schrägschliff), an der Sensorstelle ohne Coating

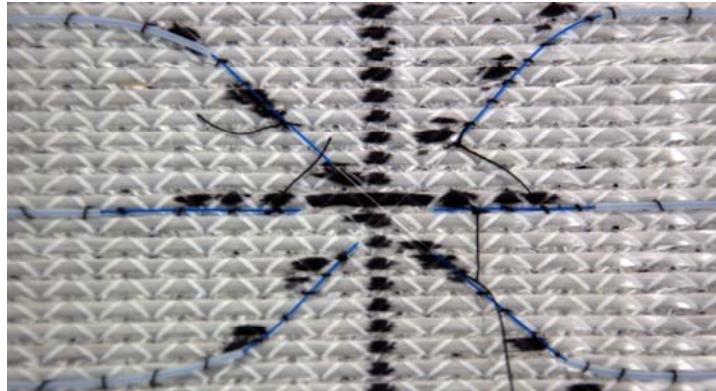


Abbildung E-6: Applikation der Sensorfasern auf das Gelege, welches anschließend in das Handlaminat eingebaut wird, Anordnung als Rosette 0° , $+45^\circ$, -45° , Faserbeschichtung (blau) im Bereich des Reflexionsgitters entfernt

E 2.1.2 Maschinell integrierte Sensoren

Bei der maschinellen Integration werden zwei Verfahren untersucht. Einerseits der **unmittelbare** Einbau der Sensorfaser bei der Pultrusion, andererseits der Einbau eines vorkonfektionierten **Sensortextils**, also ein Textil (hier: Gelege) mit vorab applizierter Sensorfaser. Diese Verfahren haben je nach gewünschter Positionierung und betrachteten Pultrusionsquerschnitt spezifische Vor- und Nachteile in der Qualität und den entstehenden Aufwendungen. Beide Verfahren können auch in einem Bauteil kombiniert werden (Abbildung E-7).

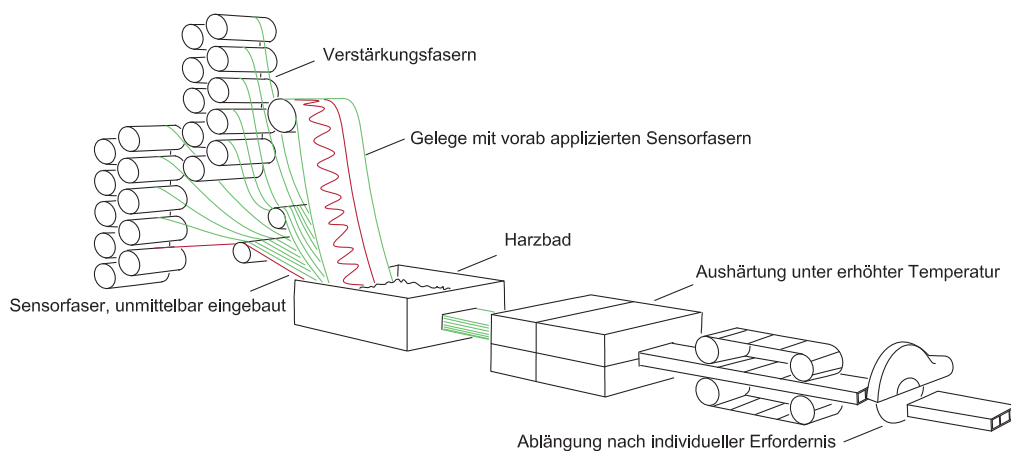


Abbildung E-7: Systemskizze zur maschinellen Integration von Sensorfasern bei der Pultrusion, Einbau entweder unmittelbar bei der Herstellung oder mittels eine vorab gefertigten Sensortextils (hier: Gelege)

Beim unmittelbaren Einbau werden die optischen Fasern⁶⁷ bei der Pultrusion von einer Spule abgewickelt und zusammen mit den Verstärkungsfasern in die Form eingezogen. Trotz der Verwendung eines Richtbretts zur Anordnung der Fasern beim Einlauf ergeben sich Verwerfungen der Rovingstränge und damit eine undefinierte Lage des Sensors im Querschnitt, was im Folgenden optimiert wird. Für den Verbund mit dem Laminat ist es vorteilhaft, die Sensorfaser zusammen mit den Verstärkungsfasern durch das Harzbad zu ziehen, dies ist jedoch mit hohen mechanischen Beanspruchungen verbunden (Abbildung E-8).

⁶⁷ Standard – Singlemode-Fasern mit zweischichtigem Hochtemperaturacrylat-Coating (HTAC)

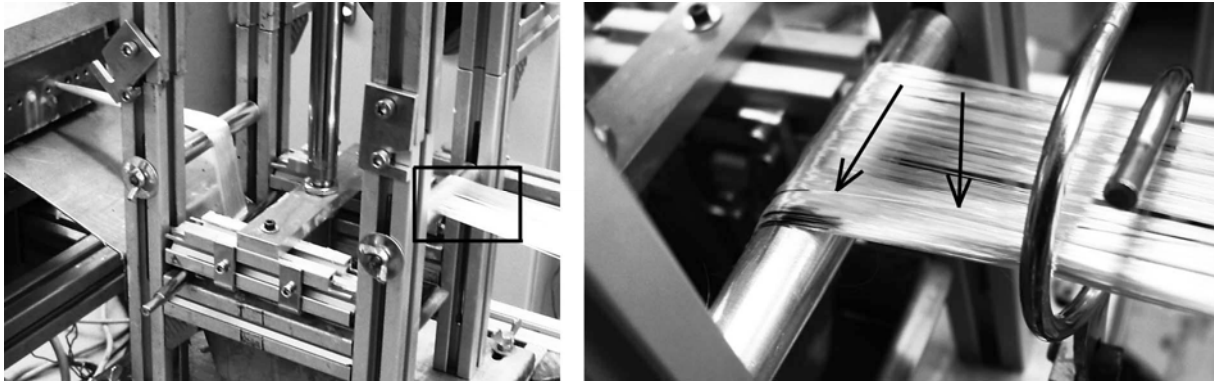


Abbildung E-8: Unmittelbarer Einbau einer Sensorfaser während der Pultrusion (ohne Führung), die Sensorfaser kann zwar mit Harz benetzt werden, die Lage im Querschnitt ist jedoch nicht exakt definierbar [Projekt, ITV]

Insbesondere bei großen Querschnitten hat sich im Projekt gezeigt, dass eine zusätzliche Führung der Sensorfaser erforderlich wird, um deren geometrische Lage exakt zu definieren. Bei anderen Forschungsarbeiten wurde die optische Faser über Führungsrollen gelenkt [Fra01], was jedoch nur für kleinformatische Stäbe zielführend ist. Letztlich lieferte die Positionierung über eine möglichst dünne Kanüle die besten Ergebnisse. Ein etwas größeres Röhrchen führte hingegen zu einer Verdrängung des Harzes beim Einlauf und damit eher zu Fehlstellen. Die Sensorfaser kann zwar bei einer Führung mit Kanüle nicht mit Harz benetzt werden, jedoch ist die Lage im Querschnitt wesentlich präziser einstellbar. Außerdem wird die mechanische Belastung der optischen Faser minimiert, da diese nicht über die Umlenkrollen geführt werden muss (Abbildung E-9).

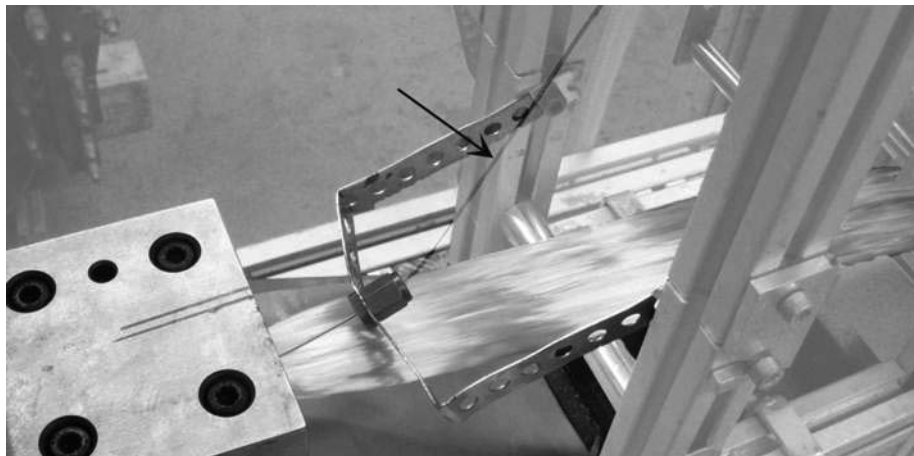


Abbildung E-9: Einbau einer Sensorfaser mittels Kanüle, die Sensorfaser wird ohne Harzbenetzung eingezo-gen, die Lage im Querschnitt ist präzise einstellbar [Projekt, ITV]

Alternativ oder ergänzend zum unmittelbaren Einbau der Sensorfaser wird die Verwendung vorkonfektionierter Sensortextilien bei der Pultrusion untersucht. Diese erlauben eine exakte geometrische Definition der Sensorlage und außerdem eine Orientierung der optischen Faser in einem von der Fertigungsrichtung abweichenden Winkel. Bei der Verwendung eines Sensortextils werden kritische Arbeitsschritte vom Pultrusionsprozess weg zur saubereren Textilfertigung hin verlagert, was grundsätzlich positiv zu bewerten ist.

E 2.1.3 Herstellung des Sensortextils

Im Folgenden wird als Textil ein zweilagiges Gelege untersucht, welches für die Verstärkung großformatiger Pultrusionsquerschnitte gebräuchlich ist (Kapitel D 1.4.1, S. 69). Bei diesem sind parallele Faserbündel mit einer Wirrfaserschicht zu einer komplexen Matte vernäht. Im Gegensatz zu Geweben haben die Fasern hier nur eine geringe Krümmung, was im Verbundsystem bessere mechanische Eigenschaften liefert. Außerdem kann die Orientierung der hauptsächlichen Verstärkungsrichtung besser an die bauteilspezifischen Anforderungen angepasst werden. Im Projekt wurden zwei Applikationsverfahren entwickelt, die Fixierung kann entweder über das Aufschweißen eines thermoplastischen Vlieses erfolgen („Kaschieren“) oder über ein robotergesteuertes Tuften⁶⁸ (Abbildung E-10).

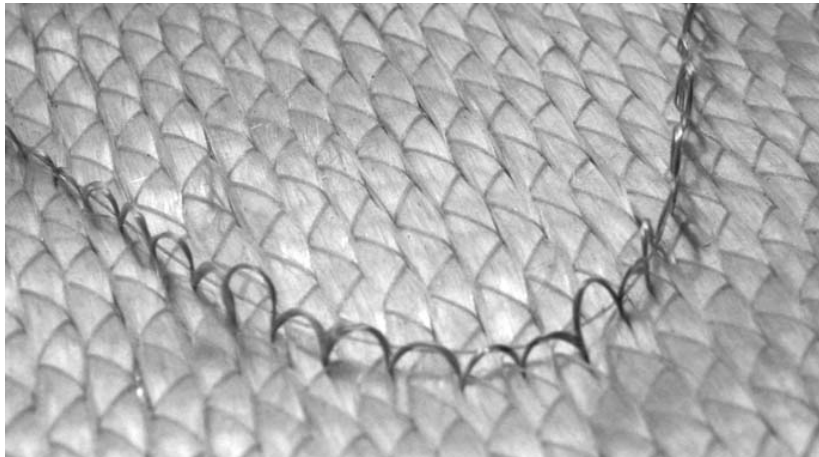


Abbildung E-10: Sensorfaser mittels Roboter auf ein Glasfasergelege verlegt und gleichzeitig mit einem Polyesterfaden getuftet [Projekt, ITV]

Das Kaschieren lässt sich problemlos in den Fertigungsablauf integrieren, die Verlegung (Vorlage) erfolgt manuell oder maschinell, zur Fixierung wird ein thermoplastisches Vlies aufgeschweißt. Diese Methode eignet sich für weniger komplexe Sensorkonfigurationen, z.B. für den in E 1.3 beschriebenen Prototypen. Das Tuften hat hingegen eine geringere Prozessgeschwindigkeit, dafür ist die geometrische Anordnung frei steuerbar. Dieses Verfahren bietet sich für komplexe Sensornetzwerke und individuelle Konfigurationen an. Beide Varianten haben jedoch das Problem, das Fremdstoffe in das Laminat eingebracht werden, entweder die angeschmolzenen Polyesterfäden des Vlieses oder der Nähfaden beim Tuften. Letzterer kann zwar auch durch eine Glasfaser ersetzt werden, dieser tendiert jedoch dazu, aus dem Gelege zu rutschen.

E 2.2 Schadhafte Grenzflächen

Im Rahmen von mikroskopischen Untersuchungen von maschinell gefertigten Probekörpern wurden Lufteinschlüsse im Bereich der Sensorfaser detektiert. Eine geometrische Analyse der Schnittbilder von zwei Probekörpern zeigt, dass die Sensorfaser und das Coating geometrisch zwar unverändert bleiben, an der Grenzfläche Coating-Matrix jedoch ein sichelförmiger Lufteinschluss mit einer Breite von 23 bzw. 30 μm erkennbar ist (Abbildung E-11). Der scheinbare Ring zwischen Quarzglasfaser und Coating hingegen ist auf optische Effekte bei der Mikroskopie zurückzuführen [Projekt, BAM].

⁶⁸ Beim Tuften ist im Gegensatz zum Nähen kein Unterfaden vorhanden, der Tuftfaden ist lediglich über Schlaufen auf der werkzeugabgewandten Seite fixiert. Ein Polyesterfaden liefert bessere Ergebnisse, da die Reibung mit dem Textil größer ist als bei einem Glasfaserfaden.

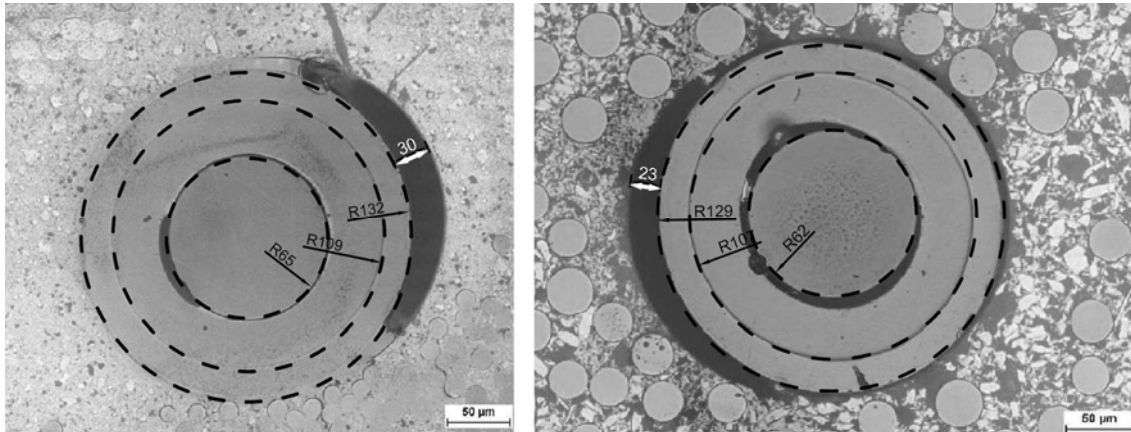


Abbildung E-11: Geometrie der Lufteinschlüsse bei maschinell gefertigten Probekörpern [Maße in μm] links: Probekörper N-101, Verstärkungsfasern mit einem Durchmesser von ca. $16 \mu\text{m}$ rechts: Probekörper M-101, Verstärkungsfasern mit einem Durchmesser von ca. $30 \mu\text{m}$ [mikroskopische Aufnahme: Projekt, BAM]

Es soll zunächst in einer rechnerischen Abschätzung geklärt werden, ob die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien den Lufteinschluss verursachen. Anschließend werden die Herstellungsparameter mit den auftretenden Fehlstellen verglichen, um Hinweise auf ein fertigungsbedingtes Phänomen zu beurteilen. Chemisches Schwinden der Matrix kommt als Ursache nicht in Frage, da dieses einer Hohlstellenbildung entgegenwirken würde. Bei ungesättigtem Polyesterharz ohne mineralische Füllstoffe beträgt das Schwindmaß $\varepsilon_s = -5\%$, es bewirkt jedoch eine Druckspannung zwischen Glasfasern und Matrix, da sich die Matrix infolge der Härtung zusammenzieht und um die Fasern schmiegt.

Eine orientierende Messung mit einem faseroptischen Sensor während der Pultrusion konnte keinen Beitrag zur Analyse der Fertigungstemperatur liefern, das Ergebnis ist in Anhang 9 (S. 215) dargestellt.

E 2.2.1 Rechnerische Abschätzung Temperaturdehnung

Die Härtungsreaktion bei der industriellen Pultrusion mit UP- oder VE-Harz findet bei ungefähr $120 \text{ }^\circ\text{C}$ statt, dabei erhärtet das Gefüge und kühlt anschließend kontinuierlich auf Raumtemperatur ab. Dabei ist der Wärmeausdehnungskoeffizient des Coatings mit $\alpha_T = 80 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ ungefähr doppelt so groß wie der des UD-Laminats in Querrichtung (Tabelle D-6, S. 75), worin der beschriebene Lufteinschluss begründet sein könnte. Für die betrachtete Sensorfaser ist es dabei unerheblich, wie groß das betrachtete Laminat ist bzw. wo sich die Sensorfaser im Querschnitt befindet⁶⁹.

Die rechnerische Abschätzung orientiert sich an die mikromechanische Analyse in Kapitel D 2. Dabei wird das Laminat als homogenes Gefüge angesehen, da die Verstärkungsfasern im Vergleich zur Sensorfaser (inkl. Beschichtung) einen sehr geringen Durchmesser haben (ca. 6 bis 12%). Die mechanischen Kennzahlen des Laminats werden gemäß der Klassischen Laminattheorie aus den Werten von Verstärkungsfasern und Harz ermittelt. Bei der Berechnung wird im Gegensatz zu denen in D 2 beschriebenen Rechenmodellen die Grenzschicht zwischen Laminat und Coating als „gerissen“ betrachtet, d.h.: dort können keine Kontaktkräfte

⁶⁹ Bei der chemischen und thermischen Stauchung bewegt sich jeder Punkt in Richtung des Schwerpunkts des Querschnitts. Befindet sich das betrachtete lokale System nicht im Schwerpunkt, kann die Verschiebung jedes einzelnen Punktes als Summe der Translation des lokalen Nullpunkts und der auf diesen Punkt bezogenen zentrischen Streckung beschrieben werden.

übertragen werden. Damit wird ein mangelnder Verbund zwischen der Coating und dem Laminat abgebildet. Die chemische Schwindung der Matrix wirkt sich hier positiv aus und wird daher auf der sicheren Seite liegend nicht angesetzt. Für die rechnerische Abschätzung werden mangels verfügbarer Materialwerte isotherme Kennwerte angesetzt. Die Berechnung zeigt einen kreisrunden Spalt, der sich aufgrund der Abkühlung von $\Delta T = 100 \text{ K}$ um das Coating herum bildet (Abbildung E-12).

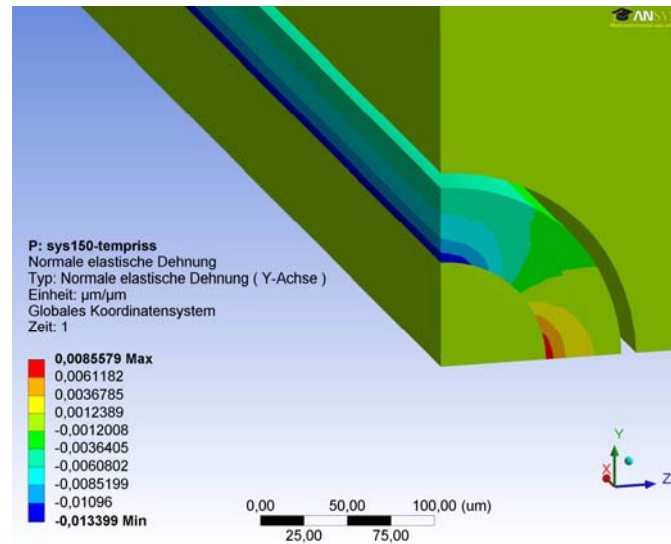


Abbildung E-12: Dehnungen entlang der x_2 - bzw. y -Achse bei gleichmäßiger Abkühlung des Systems um $\Delta T = -100 \text{ K}$ ohne Kontakt zwischen dem Coating und dem Laminat (System 150_riss-t)

Bei der Aufsummierung der Verschiebungen relativ zum Mittelpunkt der Quarzglasfaser ergibt sich ein Spalt von $0,5 \mu\text{m}$ zwischen Coating und Matrix (Abbildung E-13). Dieser Wert liegt wesentlich unter der vorher beschriebenen Größenordnung der Luftporen. Daher fällt die ungleichmäßige Temperatursausdehnung als Fehlerursache aus.

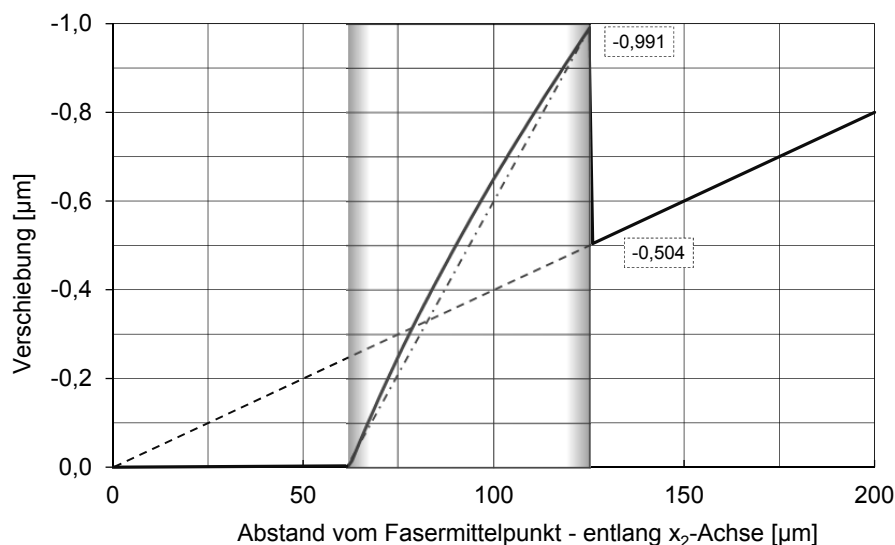


Abbildung E-13: Verschiebungen bei Abkühlung von $\Delta T = -100 \text{ K}$, vom Fasermittelpunkt aus (System 150_riss-ty)

Für eine weitergehende Analyse des Systemverhaltens während der Herstellung wären zunächst weitere Ausgangswerte notwendig. Vor allem die temperaturabhängigen E-Moduln, Querdehnzahlen und Wärmeausdehnungskoeffizienten von Coating und Harz beeinflussen den eingepprägten Dehnungszustand im Laminat. Außerdem müsste das inhomogene Gefüge des Laminats in der Berechnung abgebildet werden, um Spannungsspitzen und Kontaktspannungen detailliert zu ermitteln⁷⁰.

E 2.2.2 Analyse der Fertigungsparameter

Eine andere Ursache der beschriebenen Fehlstellen könnte die hohe Eigensteifigkeit der Sensorfasern sein. Beim Einlaufen der Verstärkungsfasern in die Pultrusionsform verdrillen sich diese gegenseitig. Wird die Sensorfaser nicht ausreichend geführt, ist auch diese in Bewegung. Aufgrund des großen Durchmessers könnten die Bewegungen jedoch auch bis in den Bereich übertragen werden, indem das Harz bereits geliert, aber noch nicht erhärtet ist. Dabei würde das Harz lokal verdrängt, könnte aber infolge der bereits stark reduzierten Fließfähigkeit die entstehenden Hohlräume nicht mehr schließen⁷¹.

Die Biegesteifigkeit einer Verstärkungsfasern mit einem Durchmesser von $16 \mu\text{m} \dots 30 \mu\text{m}$ (Abbildung E-11) und einem Elastizitätsmodul von $E = 73.000 \text{ N/mm}^2$ variiert zwischen $EI = 0,24 \dots 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ Nmm}^2$. Für die Sensorfaser aus der Quarzglasfaser mit einem Durchmesser von $125 \mu\text{m}$ und dem Coating mit einem Außendurchmesser von $250 \mu\text{m}$ ergibt sich bei den Werten aus Tabelle D-6, S. 75 eine Steifigkeit von $EI = 1,23 \text{ Nmm}^2$. Damit variiert das Steifigkeitsverhältnis zwischen Sensorfaser mit Coating und den Verstärkungsfasern im Bereich von 420 bis 5200.

Die stichprobenartige Auswertung der Fehlstellen gibt einen Hinweis darauf, dass die Größe der Fehlstellen mit der Führung der Sensorfaser beim Einlauf zusammenhängen könnte (Tabelle E-1). Hierzu müsste der Verlauf der Fehlstellen über die Länge des Pultrudats untersucht werden. Außerdem wäre zu erwarten, dass vorab auf ein Textil applizierte Sensorfasern einen geringeren Bewegungsspielraum und damit kleinere Fehlstellen haben.

Die Qualität der Führung kann wie folgt abgestuft werden:

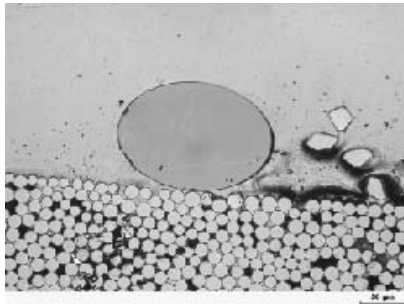
- +++: Handlaminat, Harzinfusion (keine Bewegung)
- ++: Kanüle (sehr geringe Bewegung)
- +: Röhrchen (geringe Bewegung)
- : keine Führung (hohe Bewegung)

Jedoch kann ein Röhrchen oder eine Kanüle eine Benetzung der Sensorfaser mit Harz behindern, wenn sie zu tief in die Form hineinragen.

⁷⁰ Da beispielsweise das Harz stets einen höheren Wärmeausdehnungskoeffizient hat als die Verstärkungsfasern, schmiegt sich die Matrix infolge der Abkühlung nach der Härtung an die Fasern an und verbessert damit den Verbund.

⁷¹ Untersuchungen an pultrudierten Profilen im Rahmen des begleitenden Entwicklungsprojekts haben gezeigt, dass sich die Rovingbündel trotz Führung und konstanter Zugspannung gegenseitig am Werkzeugeingang verdrillen.

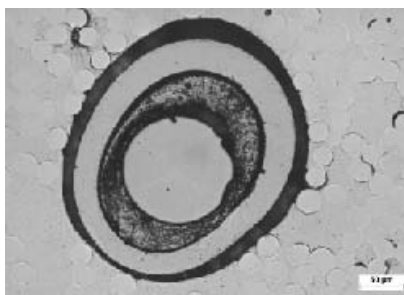
Tabelle E-1: Gegenüberstellung stichprobenartiger mikroskopischer Aufnahmen und der jeweiligen Führung der Sensorfaser beim Einlaufen in das Formwerkzeug [mikroskopische Aufnahme: Projekt, BAM]



Handlaminat SENS-C-102

Rechteckstab 50 mm x 7 mm, UP-Harz Nr. 1, im Labor gefertigt, Verstärkung: Gelege, Vol.-% var.

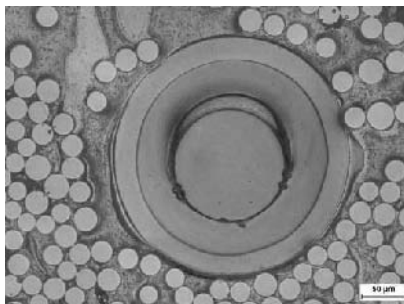
- keine Bewegung während Aushärtung
 - keine bzw. sehr geringfügige Fehlstellen
- [Sensor unter 45° verlegt, daher scheinb. deformiert]



Pultrudat SENS-G-41

Rechteckstab 21 mm x 5 mm, VE-Harz Nr. 1, im Labor gefertigt, Verstärkung: Rovings, 60 Vol.-%

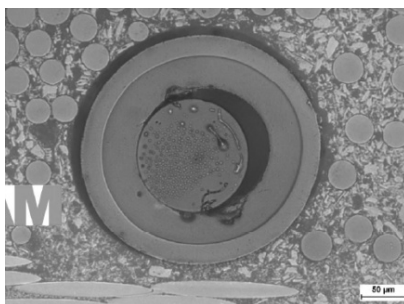
- Führung durch Kanüle (sehr geringe Bewegung)
- ringförmiger Lufteinschluss, möglicherweise aufgrund der Verdrängung durch die Kanüle



Pultrudat SENS-K-001

Rechteckstab 21 mm x 5 mm, VE-Harz Nr. 2 (Arop.), im Labor gefertigt, Verstärkung: Rovings, 60 Vol.-%

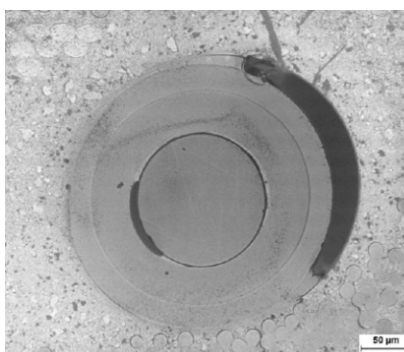
- Führung über Röhrchen (geringe Bewegung)
- guter Verbund mit Matrix, Fehlstellen nur an Grenzfläche Quarzglasfaser - Coating



Pultrudat SENS-M-001

Platte 400 mm x 2 mm, Acrylharz m. min. Füllst., industriell gefertigt, Verstärkung: Matten, Rovings

- keine Führung der Sensorfaser
 - sichelförmiger Lufteinschluss
- [scheinb. Fehlstelle Quarzglasfaser-Coat. optisch bed.]



Pultrudat SENS-N-101

Rechteckhohlprofil 35 mm x 30 mm x 3 mm, UP-Harz Nr. 2 m. min. Füllst., industriell gefertigt, Verstärkung: Matten, Gelege

- keine Führung der Sensorfaser
- erhebliche Fehlstellen

E 2.3 Ankopplung

E 2.3.1 Lose Sensorfasern

Bei schichtweisen Herstellungsverfahren wie Handlaminieren oder Harzinfusion kann eine Sensorfaser mit vorkonfektioniertem Stecker verwendet und dieser lose aus dem Bauteil herausgeführt werden. In diesem Fall ist lediglich auf einen Knickschutz der Faser beim Austritt aus dem Laminat zu achten. Im Rahmen des begleitenden Entwicklungsprojekts ist jedoch eine Lösung zu finden, welche die Ankopplung kontinuierlich integrierter Sensorfasern ermöglicht. Dabei werden zunächst pultrudierte Stäbe über die Regelung der Harzzufuhr so gefertigt, dass die Sensorfaser frei zugänglich, also am Ende frei von Harz ist. Erst in einem späteren Entwicklungsschritt wird dann eine vollständig kontinuierliche Produktion und nachträgliche Ankopplung durchgeführt.

Ist das Ende der Sensorfaser frei von Harz, kann diese aus dem Faserbündel wegen der höheren Biegesteifigkeit gut ausfindig gemacht und ein Stecker appliziert oder die Faser mit einem Kabel „verspleißt“ werden. Der lichtleitende Kern der optischen Faser hat im Fall der hier betrachteten Singlemode-Fasern einen Durchmesser von 9 ... 10 μm . Beim Spleißen werden zwei senkrecht gekappte Faserenden über eine spezielle Vorrichtung zusammengeführt, exakt linear zueinander ausgerichtet und verschweißt. Diese Technik liefert sehr gute Ergebnisse, die dafür erforderlichen Geräte sind jedoch für nicht-industrielle Anwendungen unwirtschaftlich. Alternativ können Stecker an die losen Faserenden angebracht werden, auch wenn dies grundsätzlich mit einem Leitungsverlust (Dämpfung) verbunden ist. Es stehen unterschiedliche Systeme zur Verfügung, je nach Art der Faser und der spezifischen Anwendung. Für optische Sensoren mit Singlemode-Fasern haben sich FC-APC⁷² Stecker bewährt, bei diesen ist die Stirnseite um 8° zur Faserachse geneigt.



Abbildung E-14: Arbeitsschritte für die Kontaktierung einer losen Sensorfaser, von links nach rechts

⁷² Diese Stecker haben meist eine metallische Hülse und ein Gewinde zur Arretierung. Im Gegensatz zu den fast baugleichen FC-PC Steckern mit einer senkrechten Stirnfläche, haben die hier verwendeten FC-APC Stecker eine grüne Kragenhülse, welche als Erkennungsmerkmal dient.

Im Folgenden wird die Kontaktierung von losen Fasern erläutert, wie sie durch den Autor für die ersten Probekörper aus der Pultrusion durchgeführt wurde, dabei war das Ende der Sensorfaser frei von Harz (vgl. Abbildung E-14, von links nach rechts):

1. Freilegen der optischen Faser, kann aus dem Faserbündel wegen höherer Biegesteifigkeit gegenüber Verstärkungsfasern gut identifiziert werden
2. Ablängen der optischen Faser auf erforderlichen Überstand, restliche Verstärkungsfasern können entfernt werden
3. Entfernen der Faserbeschichtung (Entcoaten) auf eine Länge von 15 mm mittels Spezialzange
4. Ende der Faserbeschichtung ist erkennbar
5. Vorbereiten des Steckers mit integrierter keramischer Ferrule $\varnothing_i = 125 \mu\text{m}$, sowie Spritze und Kanüle für die spätere Klebstoffinjektion
6. Injizieren des Klebstoffs (zweikomponentiger Epoxidklebstoff) von hinten in den Stecker und damit in die Ferrule, bis auf Vorderseite etwas Klebstoff herausdringt
7. Einführen der optischen Faser von hinten in den Stecker bis ein kurzes Stück vorne an der Ferrule übersteht, temporäres Fixieren zum Aushärten des Klebstoffs innerhalb 24 Stunden
8. Kappen der optischen Faser an der Stirnseite der Ferrule mit Keramik Klinge
9. Ankoppeln an die Polierschiebe, welche einen Neigungswinkel von 8° zur Faserachse hat (so genannter „APC-Schrägschliff“)
10. Polieren der Stirnseite der Ferrule mit der Faser, nass auf Schleifpapier mit unterschiedlichen Rauigkeiten, Kontrolle im Mikroskop (Dauer bei manueller Bearbeitung ca. 1 h)
11. Reinigen der Schleiffläche mit Alkohollösung
12. Anbringen von Spannungsentlastung und Knickschutz, Kopplung mit Zuleitungskabel

Die Kontaktierung, vor allem das Polieren der Stirnflächen, nimmt mehrere Stunden Arbeitszeit in Anspruch. Daher ist das beschriebene Verfahren für eine industrielle Verwendung nicht ökonomisch. Außerdem sind bei der industriellen Pultrusion keine freien Fasern kontaktierbar, weshalb dort eine abweichende Vorgehensweise zum Einsatz entwickelt werden muss.

E 2.3.2 Strukturintegrierte Sensorfasern

Vorkonfektionierter Stecker bzw. Hülse

Pultrudierte Profile werden endlos gefertigt und entsprechend den Anforderungen unmittelbar nach der Herstellung abgelängt. Ist die Stelle der späteren Kontaktierung bekannt, kann eine Sensorfaser mit vorkonfektioniertem Stecker verwendet werden (Abbildung E-15). Alternativ ist es möglich an der späteren Schnittkante eine Hülse über die Sensorfaser anzuordnen, welche dann ohne Beschädigung der Sensorfaser freigelegt wird, die lose Sensorfaser kann anschließend wie oben beschrieben kontaktiert werden.



Abbildung E-15 Im Fertigungsprozess eines Rundstabs mit 22 mm Durchmesser eingebetteter vorkonfektionierter Stecker [Fra01]

Der Nachteil beider Lösungen ist jedoch, dass mögliche Gleichlaufschwankungen in der Fertigung zu einer sich addierenden Lageabweichung des Steckers führen. Außerdem stellen sowohl Hülse als auch Stecker eine Störung im Werkstoffgefüge dar. Bei einem kompakten Rundstab mit 22 mm Durchmesser wird beispielsweise der Querschnitt durch einen Stecker nur um 7% verringert, die Fasern können noch recht gut um die Gefügestörung herumgeführt werden [Fra01]. Jedoch wird der Einbau vorkonfektionierter Stecker bei dünneren Laminaten zunehmend problematisch.

Nachträgliches Freilegen

Im Rahmen des Projekts wird ein Verfahren entwickelt, mit dem eine Sensorfaser ohne Stecker oder Hülse eingebettet und das Pultrudat an einer beliebigen Stelle abgelängt werden kann. Da beide Stirnseiten planar gekappt werden, kann die ungefähre Position der Sensorfaser lokalisiert werden, indem auf einer Seite eine Lichtquelle angelegt und der entstehende Lichtpunkt auf der gegenüberliegenden Seite markiert wird. Die unmittelbare Kontaktierung über Polieren des Faseraustritts und einer optischen Kopplung hat sich im Rahmen anderer Forschungsarbeiten als nicht praktikabel erwiesen [Fra01]⁷³. In dem neuen Verfahren wird daher die optische Faser über einen Hohlbohrer grob freigelegt und anschließend das Harz sowie das Coating der Sensorfaser abgebrannt. Das chemische Entfernen des Harzes ist nicht ohne weiteres möglich, da hierfür im Laminat spezielle Harze zur Anwendung kommen müssten, welche jedoch im Widerspruch zu der gewünschten chemischen Resistenz des Bauteils stehen.

Auf die freigelegte Sensorfaser wird eine Keramik-Ferrule gesteckt und verklebt (Abbildung E-16, links). Das überstehende Ende der Sensorfaser wird im nächsten Arbeitsschritt mit einem Lichtbogen (Plasma) erhitzt, so dass ein kugelförmiges Ende entsteht (Abbildung E-16, rechts).

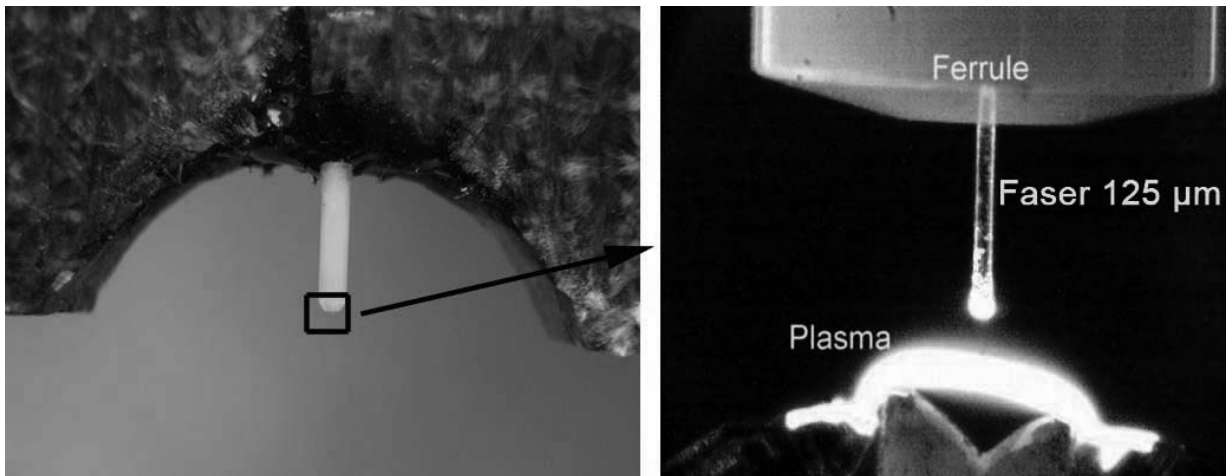


Abbildung E-16: Nachträgliche Applikation eines Steckers mit dem im Projekt neu entwickelten Verfahren, links: auf zunächst mechanisch und über Abbrennen freigelegte Sensorfaser wird eine Ferrule gesteckt und verklebt, rechts: überstehende Sensorfaser wird abgebrannt, es entsteht ein kugelförmiger Abschluss, auf den später ein identisches Gegenstück aufgesteckt wird [Projekt, Fiberware]

⁷³ Dabei muss zunächst die exakte Position des Faserkerns über eine Rastersuche gefunden werden, was aufgrund des geringen Durchmessers schwierig ist. Am Übergang zwischen der optischen Faser und einer von außen angebrachten Linse kann ein dem Brechungsindex angepasster Klebstoff verwendet werden.

An das so präparierte Ende kann ein identisches Gegenstück angelegt werden. Dazu werden zwei Ferrulen über eine metallische Hülse zentriert und mit geringem Anpressdruck gegeneinander gepresst (Abbildung E-17). Durch den Kontakt der beiden kugelförmigen Enden wird der Lichtstrahl gerade durchgeleitet. Abschließend kann eine Fixierung der Ankopplung mit einem schrumpffreien Klebstoff erfolgen, z.B. Epoxidharz. Das entwickelte Verfahren ist flexibel anwendbar und hat sich als praxistauglich erwiesen, es wurde beispielsweise für die Kontaktierung des Prototyps (E 1.3, S. 154) eingesetzt.

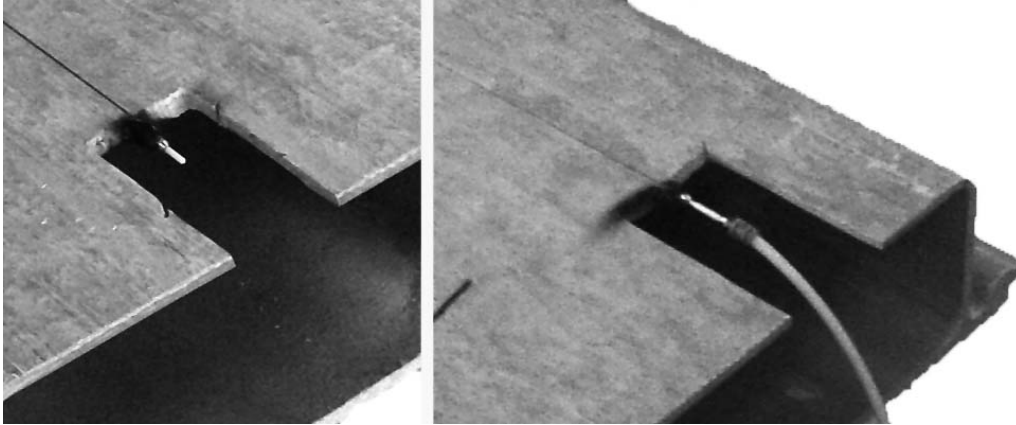


Abbildung E-17: Ankopplung eines fertigen Steckers an die vorbereitete Ferrule:
links: fertig bearbeitete und über Klebstoff stabilisierte Ferrule,
rechts: Ankopplung mit identischem Gegenstück, beide Ferrulen über Metallhülse zentriert
und nachträglich mit Klebstoff fixiert, angeschlossenes Kabel führt zum Messgerät

E 3 Signalverarbeitung

E 3.1 Grundsätzliche Überlegungen

Bei einer Vielzahl von Sensoren und einer kontinuierlichen oder zumindest wiederholten Messung ist die Aufbereitung der Messwerte integraler Bestandteil des Überwachungskonzepts. Die Messwerte sollten einer automatisierten Auswertung unterworfen werden, die es erlaubt, relevante Ereignisse aus der Datenmenge herauszufiltern. Dies kann das Überschreiten eines definierten Beanspruchungsniveaus sein oder das Erkennen einer qualitativen Einwirkungskombination sein. Wie in der biologischen Reizerfassung können dabei die gemessenen Zustände mit vordefinierten Abbildern abgeglichen und entsprechend einsortiert werden (vgl. E 4.3, S. 180), dieser Ansatz wird in der Nebenbetrachtung zu neuronalen Netzen verfolgt. Das geeignete Sensornetzwerk ergibt sich also aus dem bedarfsgerechten Layout der Sensoren und dem Wissen um die zu erwartenden Einwirkungsgrößen bzw. der gestellten Messaufgabe.

E 3.1.1 Messwerterfassung

Auf dem Bereich des „Structural Health Monitoring (SHM)“ wurden in den letzten Jahren dank verbesserter Sensoren, Datenübermittlung und leistungsfähiger Auslesesoftware wichtige Fortschritte gemacht. Eine Messaufgabe mit mehreren Dutzend oder hunderten Sensoren erfordert das Multiplexing der Messkanäle, die Sensoren müssen also nacheinander abgefragt werden, da das Messgerät nicht alle Kanäle gleichzeitig abfragen kann. Neben dem nicht unerheblichen Geräteaufwand ist der Zeitversatz bei dynamischen Einwirkungen nicht unerheblich. Dieser addiert sich zu den Effekten aufgrund unterschiedlicher Leitungslänge, Intensitätsverlust durch Dämpfung sowie Phasenverschiebung. Diese Fehlerquellen können durch entsprechende Manipulatoren ausgeschaltet werden. Es wird jedoch grundsätzlich eine höhere Sensoranzahl erforderlich als für statische Belastungen [Kre08].

Faseroptische Sensoren erlauben zwar die Reihenschaltung mehrerer Sensoren (Faser-Bragg-Gitter) in einer optischen Faser, dabei werden jedoch die einzelnen Reflexionsspektren gleichzeitig angezeigt. Wird für die gemessene Dehnung ein Bereich der von $\Delta\epsilon = \pm 5,0 \cdot 10^{-3}$ zu Grunde gelegt, entspricht dies für jeden Sensor einem Wellenlängenbereich von ca. $\Delta\lambda = \pm 6,5 \text{ nm}$ (D 3.2.1, S. 120). Bei gebräuchlichen Messgeräten ist ein Wellenlängenbereich von $\lambda = 1515 \dots 1585 \text{ nm}$ auswertbar, weshalb maximal 5 Sensoren in einer Sensorfaser platziert werden können, um unter Last eine Überlappung der Reflexionsspektren zu verhindern. Deshalb werden für größere Bauteile mehrere Sensorfasern erforderlich, welche über Multiplexing, also nacheinander ausgelesen werden müssen.

E 3.1.2 Ortsabhängigkeit der Messgröße

Es hat eine beträchtliche Auswirkung auf die Entwicklung des Sensornetzwerks, in welchem Maß die Messgröße über das Bauteil variiert. So haben Dehnungen infolge von Rissen nur einen sehr begrenzten, lokalen Einflussradius, während die Dehnungen infolge der Haupttragwirkung oder Temperatur eine großflächige Beeinflussung verursachen, also lokal vergleichsweise homogen sind.

Häufig werden strukturintegrierte faseroptische Sensoren als Netzwerk eingesetzt, um lokale Schädigung infolge Stoßbeanspruchung aufzuzeichnen [Ama07] [Cha07]. Dabei werden die einzelnen Faserstränge bzw. Messpunkte nacheinander abgefragt und so der Ort der Schädigung bestimmt. Der Einfluss der Delamination beträgt nur wenige Millimeter, wenn eine Dehnungsmessung durchgeführt wird. In diesem Fall ist also ein dichtes Netzwerk unerlässlich und es wird in der Regel nur 1 Sensor beeinflusst. Anders verhält es sich jedoch bei der Bestimmung

von Schädigungen über induzierte Schallwellen, da so auch weiter entfernt liegende Sensoren die Gefügestörung durch einen Riss wahrnehmen können. Damit wird eine sehr gute Aussage über Ort und Quantität der Schlagbeanspruchung möglich [Wat02][Wat07].

E 3.2 Testmessungen am Prototyp

Mit dem in E 1.3 (S. 154f.) beschriebenen Prototypen wurde ein Präsentationsstand zur Demonstration strukturintegrierter Sensorik entwickelt. Bei dem gewählten Aufbau ist es möglich, die Wellenlängenverschiebungen der integrierten Sensoren unmittelbar während der Belastung auszulesen (Abbildung E-18). Die Sensorfasern wurden zunächst auf ein Verstärkungstextil mittel „Kaschieren“ appliziert, dieses wurde dann bei der Pultrusion in den Untergurt des Hohlprofils eingebaut. Die drei parallel liegenden Sensorfasern mit jeweils drei Reflexionsgittern an den Viertelpunkten wurden nachträglich an den Stirnflächen angekoppelt, vgl. E 2.3.2 (S. 165ff.).



Abbildung E-18: Prototyp mit integrierten faseroptischen Sensoren, im Hintergrund: Messgerät mit Laptop zur Echtzeitmessung der Wellenlängenverschiebungen während der Belastung [Projekt]

Eine Testmessung fand beim (mittigen) Überschreiten des Prototyps statt. Dabei wurde vereinfachend nur die mittig angebrachte Sensorfaser mit drei integrierten Reflexionsgittern ausgelesen (Abbildung E-19). Aufgrund der dynamischen Beanspruchung sind die Messwerte gewissen Schwankungen unterworfen. Zur besseren Lesbarkeit wurden im Diagramm daher die unter idealer Punktlast rechnerisch zu erwartenden Werte als Geraden eingetragen.

Die Messung erlaubt einen guten Rückschluss auf die Lastgröße und deren Position. Da in diesem Modell die zwei Variablen Ort x und Gewicht G den drei eingebauten Sensoren gegenüberstehen, lassen sich die Beziehungen zwischen den Messwerten und den gewünschten Ausgabewerten x, G analytisch über einfache mechanische Zusammenhänge herleiten. Darauf soll hier jedoch nicht näher eingegangen werden.

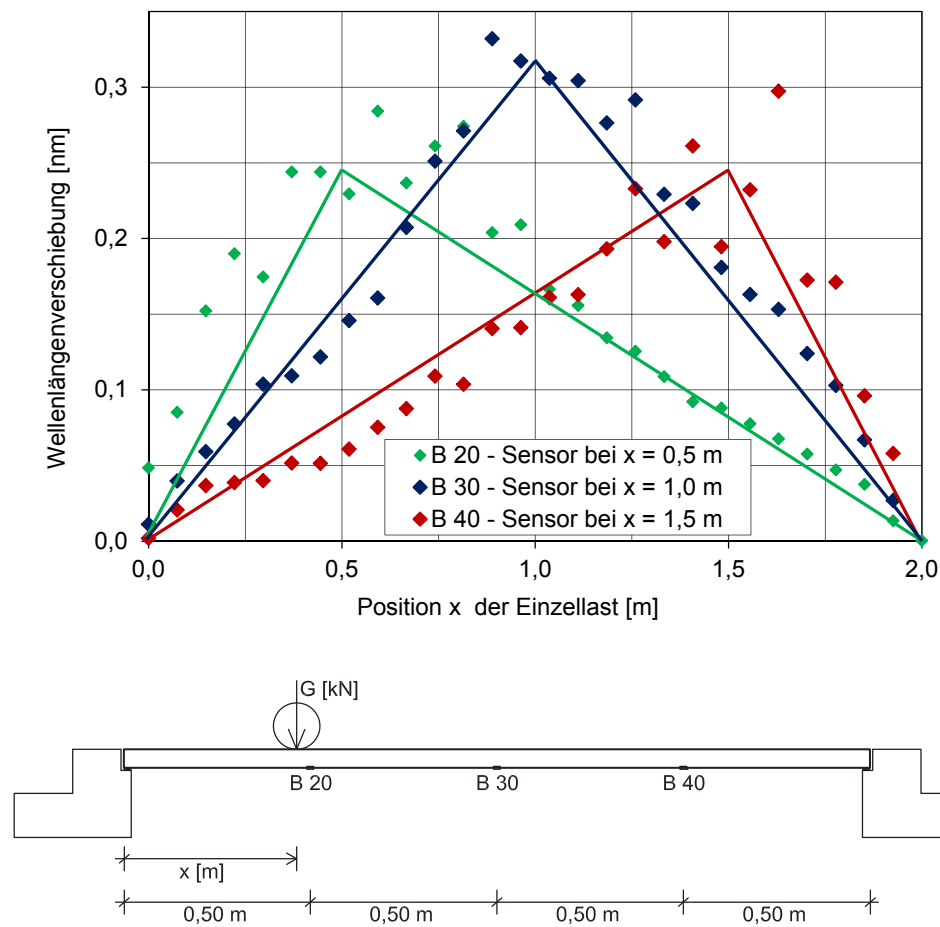


Abbildung E-19: Testmessung am Prototypen durch Überschreiten ($G = 0,82 \text{ kN}$), Gegenüberstellung der Messwerte der 3 strukturintegrierten Sensoren in der mittleren optischen Faser (Punkte) zur rechnerischen Vorhersage für eine ideale Punktlast (Geraden)

Die maximale Wellenlängenverschiebung von $\Delta\lambda = 0,31 \text{ nm}$ entspricht gemäß des Proportionalitätsfaktors $1/K = 1,243 \text{ nm}/10^{-3}$ (Abbildung D-50, S. 108, System 355) einer relativen Dehnung von $\varepsilon_1 = 0,25 \cdot 10^{-3}$. Bei einem mittleren E-Modul des betrachteten Pultrudats von $E_1 = 25.000 \text{ N/mm}^2$ bedeutet dies eine Spannung in Längsrichtung von ungefähr $\sigma_1 = 6,25 \text{ N/mm}^2$.

E 3.3 Künstliche neuronale Netze

E 3.3.1 Motivation

Wie oben gezeigt, erfolgt die Interpretation der Berechnungsergebnisse in der Regel über analytische Rückrechnung. Dies ist jedoch nicht für alle Anwendungen möglich, insbesondere bei:

- hoher Anzahl von Sensoren mit linear unabhängiger Anordnung
- Variation in der Platzierung und Orientierung der Sensoren, z.B. Winkelabweichung
- komplexen Lastfallüberlagerungen
- Fehlerquellen, z.B. Belastung quer zur Faser, defekte Grenzflächen

In diesen Fällen ist die Signalverarbeitung über „künstliche neuronale Netze“ wesentlich effizienter. Zwar erfordert die Generierung eines entsprechenden Algorithmus einen gewissen Mehraufwand, außerdem können neuronale Netze stets nur Approximationen liefern. Auf der anderen Seite hat diese Vorgehensweise den entscheidenden Vorteil, dass die oben genannten Unwägbarkeiten durch das neuronale Netz ausgeglichen und komplexe Lastfallüberlagerungen besser unterschieden werden können.

E 3.3.2 Grundlagen

Das Prinzip der künstlichen neuronalen Netze wurde von der Reizverarbeitung von biologischen Nervenzellen abgeleitet, vgl. E 4.3, S. 180. Neuronale Netze werden in der Datenverarbeitung immer dann eingesetzt, wenn nicht der einzelne Quellwert (hier: Messwert eines Sensors) von Interesse ist, sondern vielmehr das Zusammenspiel einer Vielzahl von Eingangswerten. Der entscheidende Vorteil dieser Methode ist, dass der Einfluss der Quellwerte auf das Gesamtergebnis nicht analytisch hergeleitet werden muss, sondern am System entsprechend „trainiert“ werden kann. Dabei werden die Rezeptoren (hier: Sensoren) mehreren definierten Einwirkungszenarien unterworfen, für welche die angestrebten Auswertungsergebnisse bekannt sind. Durch die Gegenüberstellung wird ein Algorithmus gefunden, der die Eingangswerte mit den Ausgangswerten entsprechend dem Training optimal koppelt. Insbesondere ist es dabei nicht notwendig, die einzelnen Beziehungen jedes Eingangswerts mit dem Ergebnis nachvollziehen zu können, es wird vielmehr ein Systemverhalten untersucht.

Grundsätzlich kann unterschieden werden in neuronale Netze, die diskrete Ausgabewerte liefern (Mustererkennung, Kategorisierung) und solche mit stetiger Ausgabefunktion, welche hier von Interesse sind. Um ein neuronales Netz mit einer stetigen Ausgabe zu erhalten, müssen die Messwerte mehrerer Sensoren miteinander korrelieren. Liefert nur ein einziger Sensor einen Wert, während alle anderen unverändert bleiben, kann nicht interpretiert werden, ob es sich um ein Ereignis oder einen Fehler handelt. Die den neuronalen Netzen innewohnende Redundanz ist dabei nicht gegeben. Mittlerweile ist die Verwendung neuronaler Netze in den Ingenieurwissenschaften weit verbreitet, zahlreiche Anwendungen sind zum Beispiel die Bild- und Spracherkennung oder die Bauteilüberwachung [Rig94].

E 3.3.3 Modellgenerierung

Ein künstliches neuronales Netzwerk ist in drei Ebenen gegliedert, der Eingangsebene (Input), den versteckten Ebenen für die Verarbeitung der Daten und der Ausgangsebene (Output), in der die gewünschte Auswertung angezeigt wird (Abbildung E-20). Grundsätzlich wird jeder Zwischenwert (Neuron) mit unterschiedlicher Gewichtung über die Verbindung zum nächsten Neuron weitergegeben. Dabei kann ein vorgelagertes Neuron den Wert des betrachteten Neurons verstärken, verringern oder neutral beeinflussen.

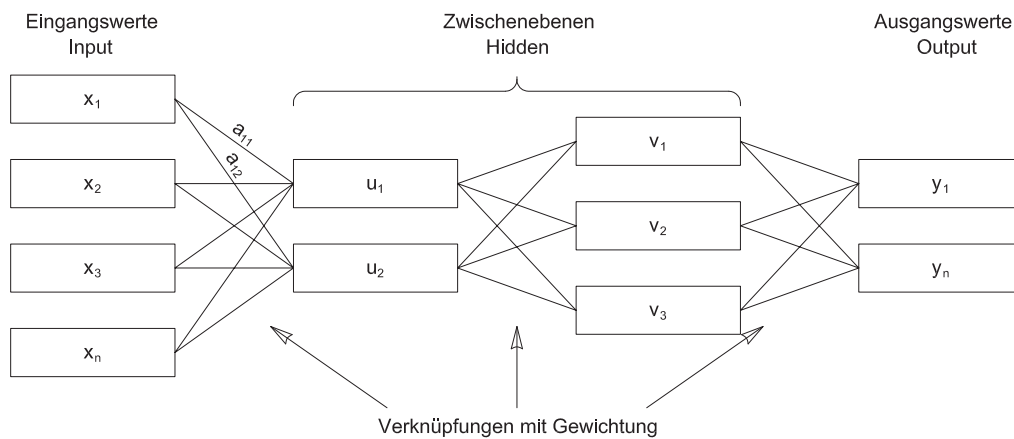


Abbildung E-20: Systemdarstellung eines künstlichen neuronalen Netzes, die Anzahl der Neuronen in der Zwischenebene und die Gewichtungen werden von einer Software über Training gefunden

Der Aufbau eines geeigneten neuronalen Netzwerks beruht auf Erfahrungswerten und ist nicht trivial, daher wird hier auf spezielle Software zurückgegriffen. Die Gewichtung der einzelnen Signalübergänge erfolgt dann durch das Training mit vorgegebenen Datensätzen, also der Gegenüberstellung von paarweisen Input-Werten mit dazugehörigen Output-Werten. Durch Variation der Gewichtung der Verknüpfungen nähert die Software die Vorhersage an die gegebenen Antworten an. Nach erfolgreichem Training kann ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangswerten wiedergegeben werden, der dann für die Verarbeitung zukünftiger Eingangswerte herangezogen wird.

E 3.3.4 Übertragung auf faseroptische Sensoren

Bisher sind Forschungsarbeiten in der Faseroptik bestrebt, durch die Entwicklung komplexer Sensoren an einem Punkt die 4 Variablen aus dreidimensionaler Dehnung und der Temperaturänderung zu unterscheiden und damit die Anzahl der notwendigen Sensoren zu minimieren (C 2.3, S. 53). Bei der Anwendung neuronaler Netze geht die Optimierung jedoch genau in die umgekehrten Richtung: jedem Punkt wird nur ein Ergebnis zugeordnet, dafür werden aber wesentlich mehr Sensoren erforderlich. Der Vorteil ist dabei, dass es für den einzelnen Sensor unerheblich ist, welche der Variablen die festgestellte Wellenlängenverschiebung hervorruft, da die Trennung der Einwirkungen erst durch die Analyse des gesamten Sensornetzwerks, also dem Vergleich aller simultanen Messwerte erfolgt.

Die Ergebnisse aus Kapitel D haben außerdem gezeigt, dass der Proportionalitätskoeffizient der Sensoren vor allem für Querdruck zu stark variiert und außerdem die Orientierung der Sensoren im Laminat nicht immer nachvollziehbar ist. Zum Beispiel kann bei Sensortextilien mit einer im „Zick-Zack“-Muster orientierten Sensorfaser nicht ausgeschlossen werden, dass das Faser-Bragg-Gitter gerade in der Ausrundung liegt (Abbildung E-3, S. 153). Dadurch, dass bei der Umsetzung eines neuronalen Netzes das einzelne Bauteil ohnehin „trainiert“ wird, werden diese Abweichungen unmittelbar berücksichtigt.

E 3.3.5 Erprobung am Prototyp

Ermittlung der Eingangswerte

Im Untergurt des Prototyps sind drei optische Fasern mit je drei Messstellen integriert, welche alle in Bauteillängsrichtung orientiert sind (Abbildung E-5, S. 155). Der Zusammenhang zwischen der einwirkenden Last und den resultierenden Messwerten sollte grundsätzlich durch praktische Belastungstests am Bauteil ermittelt werden. Das bedeutet, dass die faseroptischen Sensoren angekoppelt und deren Wellenlängenverschiebung aufgezeichnet wird, während das Bauteil unterschiedlichen Lastfällen unterworfen wird. Ziel ist es, das neuronale Netz so zu trainieren, dass nach erfolgreicher Programmierung für jede beliebige Belastung aufgrund der Messwerte der neun integrierten Sensoren (Input) auf die Einwirkung (Output) zurückgeschlossen werden kann. Die Einwirkung kann im konkreten Fall über die drei Variablen Lastangriff x , y und Kraft G beschrieben werden.

Da aus technischen Gründen keine praktischen Versuche durchgeführt werden können, werden die Belastungstests über eine FEM-Berechnung simuliert. Es werden 1.000 zufallsverteilte Lastfälle generiert und berechnet (Abbildung E-12). Die Variablen liegen dabei in folgenden Intervallen:

- Position der Last in Bauteillängsrichtung: $-1,0 \text{ m} \leq x \leq 1,0 \text{ m}$ (Bauteillänge: 2,0 m)
- Position der Last in Bauteilquerrichtung: $-0,2 \text{ m} \leq y \leq 0,2 \text{ m}$ (Bauteilbreite: 0,4 m)
- Gewichtskraft: $0,0015 \text{ kN} \leq G \leq 1,5 \text{ kN}$ (max. Einzellast: 1,5 kN)

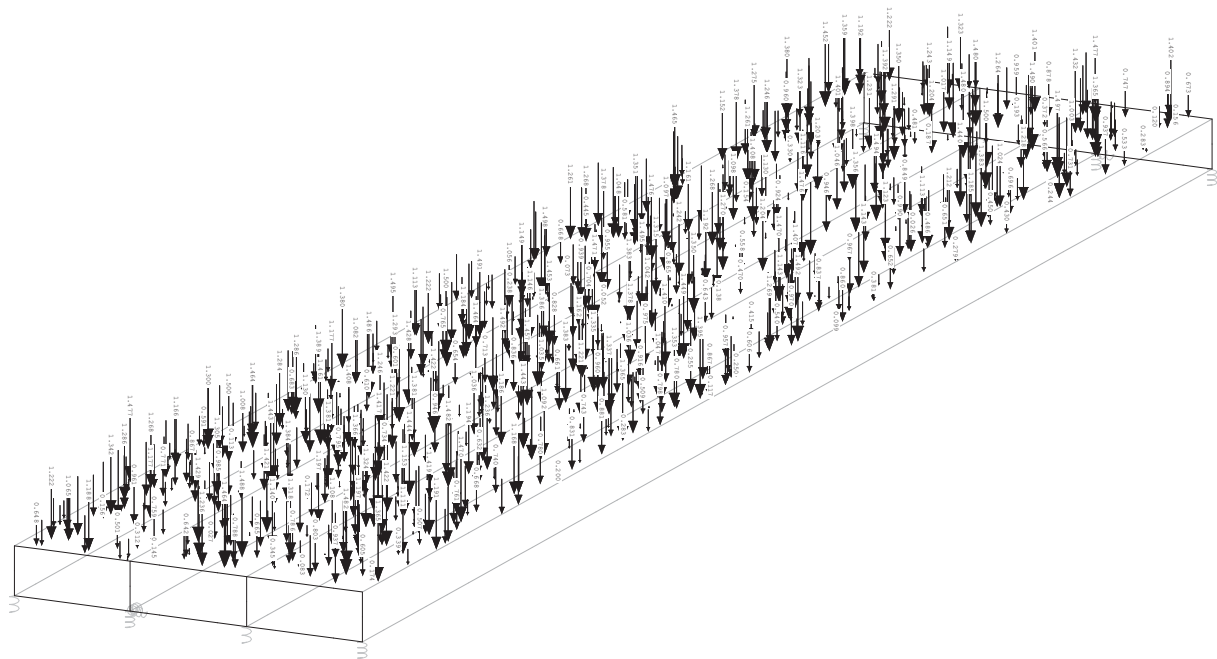


Abbildung E-21: FEM-Simulation mit 1.000 innerhalb der gesetzten Grenzen zufällig generierten Lastfällen

Die FEM-Berechnung liefert die Dehnungen des Faserverbundwerkstoffs an den Positionen der Sensoren. Mit einem pauschal abgeschätzten Proportionalitätsfaktor $1/K = 1,230 \text{ nm}/10^{-3}$ lassen sich die zugehörigen Wellenlängenverschiebungen der Bragg-Gitter ermitteln. Es ergeben sich damit 1.000 Datensätze aus je 9 Messwerten der Sensoren (Input) und je 3 Variablen, welche die angesetzte Einwirkung beschreiben (Output). Auch wenn beim praktischen Vorgehen die Generierung der Einwirkung an erster Stelle steht, wird diese als „Output“ bezeichnet, da nach der Entwicklung des neuronalen Netzes - basierend auf den Messwerten - die

Position und Größe der einwirkenden Last prognostiziert werden soll. In Tabelle E-2 sind exemplarisch einige Datensätze aufgelistet, die beschriebenen Eingangs-Datensätze entsprechen dort dem Bereich „Trainingsdaten“.

Tabelle E-2: Exemplarische Datensätze (für das optimierte neuronale Netz ohne Randbereiche⁷⁴), Trainingsdaten: bereitgestellte Werte zur Programmierung des neuronalen Netzes
Prognose: Ergebnisse nach erfolgreicher Programmierung neuronalen Netzes

Datensatz		1	2	3	4	5	6	7	8	...	1.000	
Trainingsdaten	Input R Messwerte der Sensoren ($\Delta\lambda$)	A20 [nm]	0,024	0,214	0,067	0,059	0,058	0,084	0,096	0,008	...	0,109
		B20 [nm]	0,058	0,174	0,232	0,046	0,061	0,148	0,102	0,015	...	0,187
		C20 [nm]	0,096	0,145	0,498	0,034	0,068	0,218	0,075	0,022	...	0,267
		A30 [nm]	0,034	0,397	0,156	0,108	0,120	0,138	0,063	0,009	...	0,166
		B30 [nm]	0,040	0,349	0,209	0,092	0,123	0,198	0,060	0,010	...	0,217
		C30 [nm]	0,045	0,245	0,252	0,078	0,133	0,267	0,062	0,011	...	0,269
		A40 [nm]	0,013	0,218	0,056	0,185	0,117	0,069	0,032	0,004	...	0,080
		B40 [nm]	0,020	0,177	0,104	0,122	0,187	0,100	0,030	0,005	...	0,107
		C40 [nm]	0,027	0,147	0,148	0,056	0,201	0,131	0,030	0,006	...	0,138
	Output S (Training)	Einwirkung	x [m]	-0,64	0,01	-0,48	0,49	0,50	-0,20	-0,60	-0,74	...
y [m]			0,13	-0,07	0,18	-0,12	0,04	0,14	-0,02	0,10	...	0,12
G [kN]			0,29	0,94	1,05	0,47	0,66	0,66	0,41	0,10	...	0,78
Output S* (Prognose)	Einwirkung	x [m]	-0,66	0,01	-0,48	0,49	0,51	-0,20	-0,63	-0,73	...	-0,27
		y [m]	0,13	-0,08	0,18	-0,12	0,05	0,14	-0,02	0,10	...	0,11
		G [kN]	0,30	0,94	1,06	0,48	0,64	0,65	0,42	0,09	...	0,77

Programmierung des neuronalen Netzes

Für die Programmierung des neuronalen Netzes wird die „Neural Network Toolbox“ des Programms Matlab eingesetzt. Hier wird das „Fitting Tool“ gewählt, welches sich für stetige Regressionen optimal eignet. Das entsprechende Netz besteht aus nur einer Zwischenebene, für die zu Grunde gelegte Datenbasis liefern dabei 24 Neuronen die besten Ergebnisse, was über Vergleich ermittelt wurde. Das Programm verwendet 75% der Datensätze zum Training des neuronalen Netzes, 15% zur Validation und 10% zur Bewertung der Güte der Abschätzung (Test). Die Gewichtungen der Neuronen werden in mehreren Iterationsschritten optimiert, durch die Testdaten wird beurteilt, wann eine ausreichend genaue Approximation vorliegt (Abbildung E-22).

Es zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen Prognose und realem Wert trotz 133 Iterationsschritten mit einem mittleren quadrierten Fehler $mse = 4,42\%$ zunächst noch nicht zufriedenstellend ist. Der Vergleich der Prognose (Output) zu den Trainingswerten (Target) zeigt zwar einen klaren Zusammenhang, dennoch ist ein nicht unerheblicher Anteil von „Ausreißern“ erkennbar. Bei genauerer Analyse stellt sich heraus, dass vor allem geringe Werte der Lastgröße G und Einwirkungen in Auflagernähe zu schlechter Regression führen, vgl. Anhang 6 (S. 211). Bei diesen Datensätzen ist die Relation zwischen Belastung und Messwerten zu schwach, um vom Programm interpretiert werden zu können. Aus diesem Grund werden in einem nächsten Schritt die Eingangswerte so optimiert, dass eine bessere Regression stattfinden kann.

⁷⁴ Der Optimierungsschritt „ohne Randbereiche“ wird im Folgenden noch beschrieben.

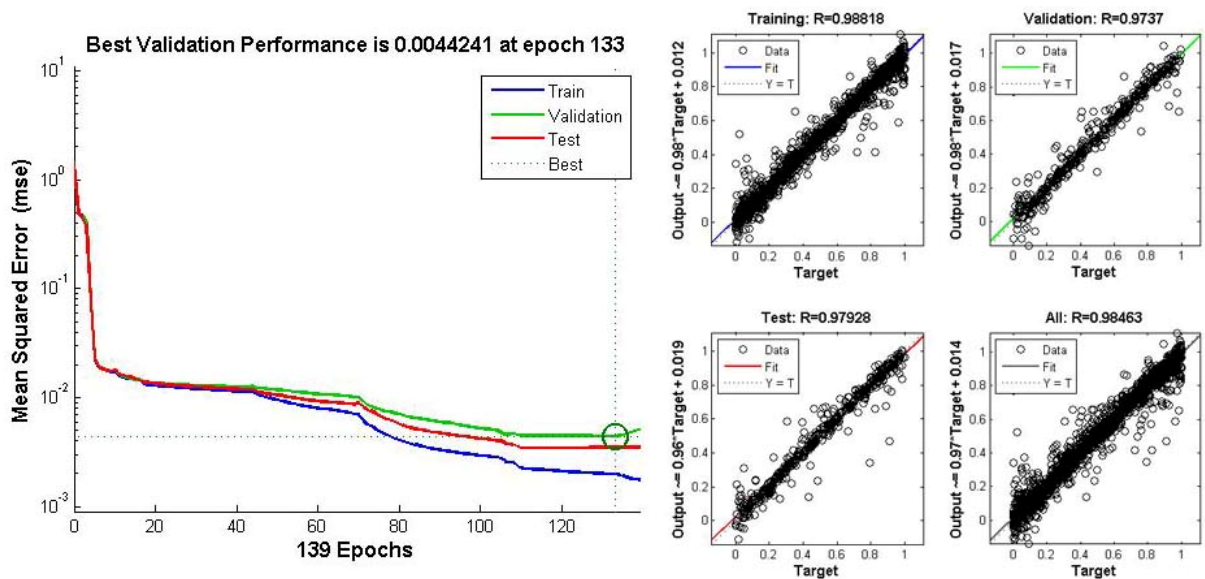


Abbildung E-22: Fehlerentwicklung und Regression für das neuronale Netz (mit Randbereichen), links: Entwicklung des mittleren quadrierten Fehlers über die Iterationsschritte rechts: Gegenüberstellung zwischen Prognose (Output) zu Trainingsdaten (Target)

Zur Verbesserung der Approximation werden nun die kritischen Randbereiche der Eingangswerte abgeschnitten:

- Position der Last in Bauteillängsrichtung: $-0,75 \text{ m} \leq x \leq 0,75 \text{ m}$ (Bauteillänge: 2,0 m)
- Position der Last in Bauteilquerrichtung: $-0,18 \text{ m} \leq y \leq 0,18 \text{ m}$ (Bauteilbreite: 0,4 m)
- Gewichtskraft: $0,1 \text{ kN} \leq G \leq 1,5 \text{ kN}$ (max. Einzellast: 1,5 kN)

Nach der Anpassung der Eingangs-Datensätze läuft die Ermittlung des neuronalen Netzes wesentlich besser. Die Iteration nun bereits nach 99 Schritten einen mittleren quadrierten Fehler $\text{mse} = 0,19\%$, also um den Faktor 22 geringer (Abbildung E-23). Die Ausgabewerte nach der Anpassung sind auch in Tabelle E-2 unter „Output (Prognose)“ gelistet. Es ist erkennbar, dass nun kaum Abweichungen zu den Sollwerten auftreten.

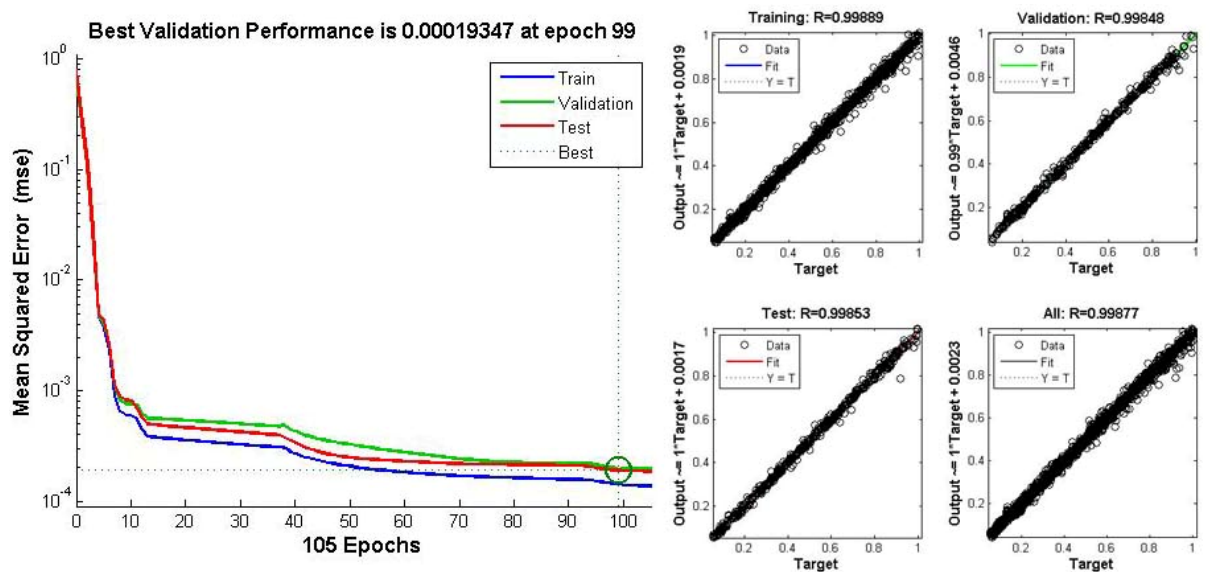


Abbildung E-23: Fehlerentwicklung und Regression für das neuronale Netz (ohne Randbereiche), links: Entwicklung des mittleren quadrierten Fehlers über die Iterationsschritte rechts: Gegenüberstellung zwischen Prognose (Output) zu Trainingsdaten (Target)

Resümee

Es zeigt sich, dass die Qualität der Eingangs-Datensätze für die erfolgreiche Programmierung eines neuronalen Netzes entscheidend ist. Dabei muss sichergestellt werden, dass eine echte Relation zwischen Input- und Output-Werten besteht. Sind die Lasten beispielsweise in Auflagernähe positioniert, entstehen nur sehr geringe Dehnungen im Bauteil, daher ist aus der Analyse der Messwerte die Lage der Last nicht klar zuzuordnen. In einem Zwischenschritt sollte also geprüft werden, bei welchen Datensätzen keine ausreichende Relation gegeben ist, diese müssen dann gegebenenfalls entfernt werden. Alternativ kann es auch auftreten, dass die Menge der Trainingsdaten zu gering ist oder dass eben keine Interpretation möglich ist, weil die Menge und Orientierung der Sensoren keinen Rückschluss auf die Belastung zulässt.

Das entwickelte Netz liefert für das Anwendungsbeispiel eine sehr gute Prognose der einwirkenden Last basierend auf den gemessenen Wellenlängenverschiebungen. Die Regression kann nun als separates Programm kompiliert werden und bei entsprechender Einbindung die gemessenen Daten in Echtzeit interpretieren. In einem weiteren Schritt kann als vierte Einwirkung auch eine konstante Temperaturveränderung eingegeben und entsprechend trainiert werden. Das neuronale Netz kann dann die beiden Lastfälle Punktlast und Temperatur unterscheiden und die jeweiligen Anteile unmittelbar zuordnen.

E 4 Bionischer Ansatz

Im abschließenden Kapitel werden einige Grundsätze zur Sinneswahrnehmung und –verarbeitung in der Biologie betrachtet. Diese sollen einen Ausblick über mögliche Weiterentwicklung von Sensornetzwerken mit bionischen Ansätzen ermöglichen. Was die Signalverarbeitung betrifft, wurde bereits in der Verwendung eines künstlichen neuronalen Netzes eine erfolgreiche Übertragung biologischer Vorbilder aufgezeigt. Daneben ist vor allem der Unterschied bemerkenswert, dass in der Technik bislang wenige, mehrdimensionale⁷⁵ Sensoren eingesetzt werden, die natürliche Reizerfassung jedoch auf vielen, aber eindimensionalen Rezeptoren beruht.

Bei den im Folgenden beschriebenen biologischen Grundsätze handelt es sich um gesicherte Forschungsergebnisse, weshalb auf etablierte Lehrbücher zurückgegriffen werden kann, u.a. ist der Sammelband „Neuro- und Sinnesphysiologie“ [Sch06] von besonderem Interesse.

E 4.1 Rezeptor (Sensor)

E 4.1.1 Bauarten

In der Biologie werden Sensoren als Rezeptoren oder Sinnesorgane bezeichnet, deren Vielfalt ist beinahe unbegrenzt. Zusammenfassend können vier grundsätzliche Typen unterschieden werden [Sch06]:

- Dehnungssensoren (Druck, Schmerz)
- Temperatursensoren
- Lichtsensoren (Einwirkung von Photonen)
- chemische Sensoren (Geschmacks- oder Geruchswahrnehmung, Erkennung von Botenstoffen)

Rezeptoren sind grundsätzlich sehr spezifisch ausgeprägt, d.h.: es kann nur *eine* Reizart und dabei nur ein begrenzter Wertebereiche wahrgenommen werden. Die hoch spezialisierten Sensoren verfügen dabei über eine erstaunliche Empfindlichkeit gegenüber ihren adäquaten bzw. entsprechenden Reiz. Im Regelfall kann ein Sensor nur die Intensität, jedoch nicht die Qualität der einwirkenden Reize wiedergeben.

Die Entwicklung neuer Sensoren auf bionischer Basis steht nicht in der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit. Die Mechanismen, mit denen natürliche Rezeptoren die unterschiedlichsten Reize verarbeiten, eignen sich jedoch häufig sehr gut für die Übertragung auf technische Messaufgaben [Bar03].

E 4.1.2 Reizentstehung

Wirkt ein Reiz auf den Rezeptor, ändert sich in dessen Zellmembran die Durchlässigkeit für Ionen (Na^+). Durch den sich einstellenden Ladungstransport ergibt sich eine Potentialänderung im Rezeptor, also ein elektrisches Signal, welches dann weitergegeben wird. Die Potentialänderung tritt aber erst ab einem definierten Mindestwert des Reizes statt, die sogenannte Reizschwelle bzw. das Reizlimen. Andererseits gibt es einen Maximalwert des Sensorpotentials, den Plateauwert (Abbildung E-24). Die Auflösungsgrenze, also die Differenz von zwei Reizniveaus, die gerade noch unterscheiden werden können, wird dabei als Differenzlimen bezeichnet. Beim Menschen beträgt dieser Wert in der Regel 7 ... 12% Reizänderung ($\Delta R/R$) [Han06].

⁷⁵ In diesem Zusammenhang bedeutet „mehrdimensional“, dass die Sensoren mehrere Einflussgrößen gleichzeitig wahrnehmen können, zum Beispiel Temperatur und Längsdehnung.

Neben der Intensität des Reizes können einige Sensoren auch den zeitlichen Verlauf abbilden, also die Reizänderung pro Zeit (dR/dt). Wiederum findet in Einzelfällen eine Adaption gegenüber einem konstant einwirkenden Reiz statt: trotz gleichbleibender Reizstärke nimmt das Sensorpotential kontinuierlich ab. Das heißt: der Rezeptor „gewöhnt“ sich an einen einwirkenden Reiz. Es ist also in der Regel nicht möglich, Absolutwerte wahrzunehmen, sondern vielmehr relative Werte oder Muster zu detektieren.

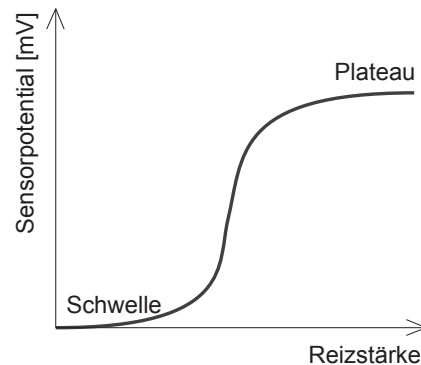


Abbildung E-24: Zusammenhang zwischen Reizstärke und resultierendem Sensorpotential [Han06]

E 4.1.3 Reizverarbeitung

Rezeptoren sind können zwar gegenüber unterschiedlichen Reizen empfindlich sein, aufgrund ihrer Einbettung in das Nervensystem wird nur die ihrer Aufgabe entsprechende Empfindung verursacht. Zum Beispiel führt eine Druckbelastung der Rezeptoren in der Netzhaut (Massieren der geschlossenen Augen) zur Wahrnehmung farblicher Ringe. Die Stäbchen und Zapfen werden durch den Druck angeregt, da sie jedoch mit der Wahrnehmung des Sehens gekoppelt sind, werden die ankommenden Signale als Bild wahrgenommen.

In technischen Messaufgaben besteht häufig die identische Problematik, so sind zum Beispiel Faser-Bragg-Gitter gegenüber Längsdehnung, Querdehnung und Temperatur empfindlich, leiten jedoch nur eine summierte Wellenlängenverschiebung an die Messwerterfassung weiter. So wie die biologischen Rezeptoren erst durch die Weiterverarbeitung der Signale im Nervensystem ein verwertbares Ergebnis liefern (neuronales Netz), so müssen auch die Messergebnisse der technischen Anwendung aufbereitet werden. Dazu ist jedoch ein Sensorlayout mit einer erforderlichen Mindestmenge voneinander unabhängiger Sensoren erforderlich⁷⁶.

Subjektive Wahrnehmung

Zahlreiche Sinneswahrnehmungen wie Licht oder Schall werden dabei in einem logarithmischen Maßstab empfunden. D.h. eine Differenz des physikalischen Reizsignals führt zu einer unterproportionalen Veränderung der empfundenen Reizstärke. Aus diesem Grund wird beispielsweise der Schallpegel auch als logarithmischer Wert des Schalldrucks beschrieben, da dieser das subjektive Empfinden besser widerspiegelt. Der

⁷⁶ Die Sensoren müssen linear unabhängige Ergebnisse liefern, also an unterschiedlichen Orten und mit unterschiedlicher Orientierung eingebaut sein. Das Wissen um die tatsächliche Orientierung eines bestimmten Sensors ist dabei jedoch für die Auswertung unerheblich.

Zusammenhang zwischen physikalischer Größe und der Wahrnehmung wird über konkurrierende Ansätze beschrieben [Sch06]:

$$E = k \cdot \log_n \left(\frac{R}{R_0} \right) \quad \text{nach Fechner}$$

$$E = k \cdot (R - R_0)^n \quad \text{nach Stevens}$$

E: subjektive Empfindung

R: physikalische Reizstärke

R₀: Reizschwelle

Die Gegenüberstellung der Ansätze zeigt jedoch, dass beide auf nahezu das gleiche Ergebnis kommen (Abbildung E-25). Diese logarithmische Verarbeitung der Reizstärke hat den Vorteil, dass auch bei einem nach oben offenen Wertebereich des physikalischen Reizes, noch geringe Einwirkungen wahrnehmbar ist. Ist jedoch der in Frage kommende Bereich der Einwirkung von vorneherein begrenzt und stehen gerade die Werte im Bereich des Maximums im Interesse, ist die logarithmische Bewertung jedoch nicht sinnvoll. Dies kann zum Beispiel die Dehnungskontrolle eines Bauteils sein, da hier der Bereich um die Bruchgrenze von besonders hohem Interesse ist, während geringe Dehnungen vernachlässigbar sind.

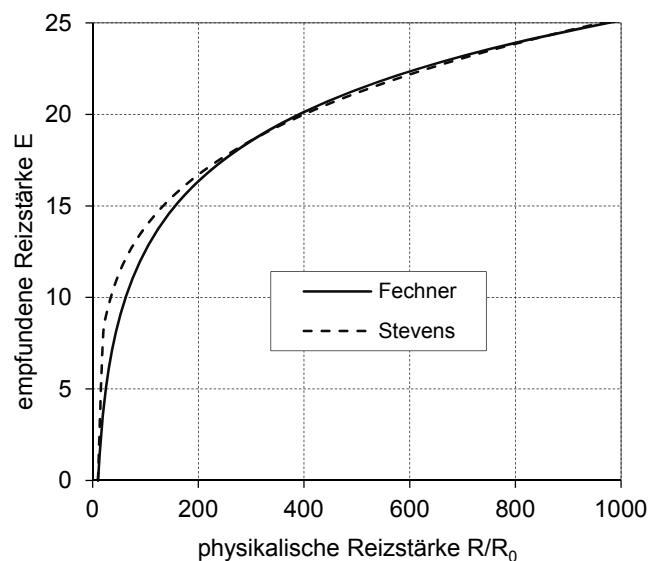


Abbildung E-25: (abb-097*) Logarithmisches Verhältnis nach Fechner bzw. Stevens [Sch06]

E 4.2 Sensorlayout

Biologische Rezeptoren sind ausnahmslos als Sensorfeld zu verstehen. Nur die Wahrnehmung eines Reizes über viele Sensoren führt zu einer Wahrnehmung der Einwirkung, dadurch können u.a. lokale Fehlinterpretationen ausgeschlossen werden. Beim menschlichen Auge bedarf es zum Beispiel einer großen Menge an Sinneszellen (Stäbchen und Zapfen) auf der Netzhaut, um ein Bild wahrnehmen zu können, ein einzelner Sensor könnte nur die durchschnittliche Helligkeit und Farbverteilung bestimmen. Die Orientierung der Rezeptoren spielt in der Regel keine bedeutende Rolle, da keine vektoriellen Reize ermittelt und weitergegeben können, eine Interpretation von Richtungen und Mustern erfolgt erst im Rahmen der Datenverarbeitung.

Die Dichte der Rezeptoren variiert in Abhängigkeit der erforderlichen Ortsauflösung, bei der menschlichen Haut kann beispielsweise die Verteilung der Drucksensoren über die simultane Raumschwelle beschrieben werden (Abbildung E-26). Sie kann ermittelt werden, indem die Haut gleichzeitig mit zwei nebeneinander liegenden Druckpunkten belastet wird. Die Raumschwelle entspricht dann dem Abstand, bei dem die zwei Punkte haben müssen um getrennt wahrgenommen werden zu können. Liegen die Einwirkungen näher zusammen, wird nur ein Druckpunkt wahrgenommen [Han06]. Bereiche, bei denen das Fühlen und Erasten eine wichtige Rolle spielt wie Finger, Zunge und Lippen haben eine entsprechend niedrige simultane Raumschwelle bzw. eine hohe Rezeptordichte. Übertragen auf die technische Messaufgabe bedeutet dies, dass nicht der Bereich der maximalen Einwirkung eine hohe Sensordichte benötigt, sondern vielmehr Bereiche mit starken zu erwartenden Unterschieden.

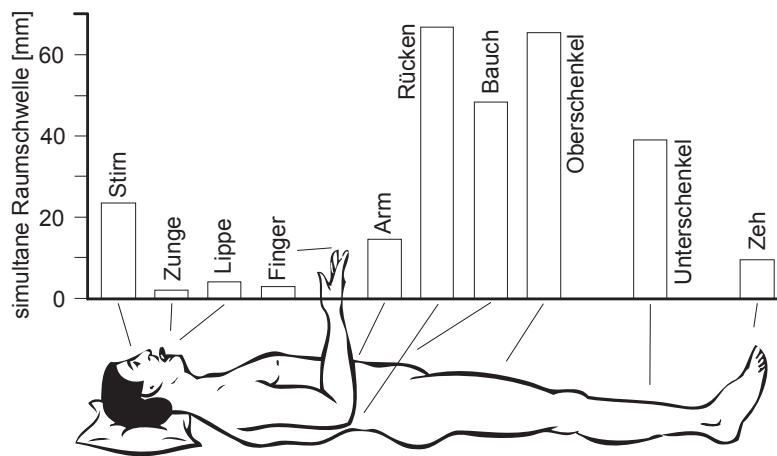


Abbildung E-26: Simultane Raumschwelle der Drucksensoren in der menschlichen Haut, nach [Han06]

E 4.3 Neuronales Netz

Die Signale eines Rezeptor werden nicht linear dem Nervensystem zugeleitet, vielmehr findet eine mehrfache Verzweigung der Signale vieler Rezeptoren statt. Damit bündelt eine afferente⁷⁷ Nervenfaser die Informationen mehrerer Rezeptoren, außerdem wird die Information eines Rezeptors verzweigt (Divergenz). Damit können durch einen einwirkenden Reiz mehrere Hirnareale gleichzeitig angesprochen werden. Durch die Kopplung mehrerer einwirkenden Reize hingegen kann die Messsicherheit erhöht werden und „Ausreißer“ werden ignoriert. Das Zusammenspiel von Konvergenz und Divergenz bildet ein vielfach verzweigtes Maschennetz an Nervenbahnen, das sogenannte „Neuronale Netz“.

Die Weiterleitung der Signale im neuronalen Netz erfolgt nicht durch eine einfache Signaladdition, sondern durch die Kopplung von Erregung und Hemmung. So kann ein einwirkender Reiz bei *einem* Neuron zu einer Erregung (positive Gewichtung), bei einem weiteren jedoch zu einer Hemmung (negative Gewichtung) des Signals führen. Durch eine Anpassung der Gewichtungen findet ein Lernprozess im Organismus statt, nicht relevante Informationen können abgeschaltet oder relevante Informationen verstärkt werden [Sch06]. Bei der natürlichen Signalverarbeitung geht es weniger um quantitative Auswertung, sondern es steht das Erlernen und Wiedererkennen bestimmter Muster, der „images“ im Mittelpunkt [Die04].

⁷⁷ Afferent: dem zentralen Nervensystem (ZNS) zuleitend

Das heißt für die technische Anwendung, dass stets zwei sich entsprechende Muster gegenübergestellt werden, dabei erkennt das neuronale Netz Entsprechungen und ordnet diese zu. Die „images“ können vordefinierte Belastungs- und Schädigungsszenarien sein, die detektiert werden sollen. Die wesentlichen Vorzüge gegenüber einem analytischen Ansatz sind:

- eine aufwendige analytische Herleitung zwischen Ursache und Wirkung entfällt
- die Lage und Orientierung der Sensoren ist beliebig und darf insbesondere von der Planung abweichen, insofern alle relevanten Bereiche von Sensoren abgedeckt sind und die Sensoren linear unabhängig und ausreichend zahlreich sind
- ein Ausfall von Sensoren kann kompensiert werden, die Änderung der Empfindlichkeit eines Sensors während dem Betrieb kann durch ein neues Anlernen ausgeglichen werden

Für das Anlernen des Netzwerks wird jedoch ein nicht unerheblicher Zeitaufwand notwendig. Die dafür erforderlichen Wertepaare aus Eingangs- und Ausgabewerten können zwar auch über eine FEM-Rechnung abgeschätzt werden, in diesem Fall müssen aber nicht nur die Materialkennwerte, sondern auch die Lage und Orientierung der Sensoren präzise bekannt sein. Zu bevorzugen ist daher ein individuelles Einlernen jedes Bauteils über Versuche, wobei der grundsätzliche Aufbau des jeweiligen neuronalen Netzwerks für eine größere Serie pauschal entwickelt werden kann.

E 4.4 Reaktion und Steuerung

E 4.4.1 Vordefinierte und bewusste Aktion

Sensoren dienen grundsätzlich der Beurteilung eines Zustandes, damit können sie als Basis für entsprechende Reaktionen herangezogen werden. Die Reaktion kann dann bei dem Überschreiten von Grenzwerten oder der Wiedererkennung zuvor definierter Muster entsprechende Maßnahmen ergreifen.

Die Biologie unterscheidet man bezüglich der reizbestimmten Handlung zwei Arten von Nervensystemen:

- vegetatives, autonomes Nervensystem (bestimmte Reizmuster bedingen vordefinierte Handlungen, die Reaktion findet ohne bewusste Beeinflussung statt)
- somatisches, animalische Nervensystem (sowohl Reizwahrnehmung als auch Aktion werden bewusst und getrennt voneinander gesteuert)

Eine vordefinierte Aktion (Trigger) hat den Vorteil, dass eine beinahe gleichzeitige Reaktion auf ein Ereignis stattfinden kann, andererseits muss dabei ausgeschlossen werden, dass unerwünschte Aktionen auftreten. Eine autonome Steuerung bedeutet in der Praxis, dass Daten lediglich gesammelt werden, aber keinen vordefinierten Aktionen zuzuordnen sind. Im Gegensatz zur vordefinierten („vegetativen“) Steuerung muss hier eine Speicherung der Daten erfolgen, welche eine spätere Bewertung zulässt.

E 4.4.2 Zentrale und dezentrale Steuerung

Ein vegetatives Nervensystem wird zwar auch über das zentrale Nervensystem gesteuert, kann jedoch auch dezentral wirken. Das hat den Vorteil, dass lokal erforderliche Aktionen unmittelbar und ohne Verfälschung durch das Bewusstsein stattfinden können. Übertragen auf die technische Anwendung kann eine Sensoren-Aktor-Interaktion ebenso dezentral oder zentral gesteuert werden, wobei nicht von vorneherein einer der Lösungsansätze als zielführender eingestuft werden kann. Eine dezentrale Steuerung ist grundsätzlich robuster und erfordert geringere Übertragungswege der Daten. Bei einer zentralen Steuerung können jedoch komplexere Muster der gesamten Sensoren erkannt und entsprechend einer globalen Anforderung gehandelt werden.

Zum Beispiel würden eine adaptive Verschattung einer Gebäudefassade bei einer dezentralen Steuerung je nach einstrahlender Lichtmenge ihre Transmissivität variieren (z.B. photochromes Glas). Dies hat jedoch den Nachteil, dass die Fassade auch an einem sonnigen Wintertag verschattet, obwohl in diesem Fall ein Energieeintrag wünschenswert wäre. Hier ist also eine zentrale Steuerung vorteilhaft, wo die gesamten Messdaten zunächst zentral verarbeitet werden und anschließend die entsprechende Aktion gestartet wird. Am Beispiel der Fassade würden die Scheiben noch so lange transparent bleiben, bis die Obergrenze der gewünschten Innenraumtemperatur erreicht ist und erst dann abdunkeln.

F.

Zusammenfassung und Ausblick

Funktionsintegrierte Faserverbundwerkstoffe

Die mechanischen und bauphysikalischen Funktionen von Faserverbundwerkstoffen lassen sich durch die Zugabe von Nanopartikeln oder Latentwärmespeicher sehr gut steuern. Dabei werden bekannte Einschränkungen des Werkstoffs wie die interlaminare Scherfestigkeit, das spröde Bruchverhalten oder die für das Gesamtbauteil vergleichsweise geringe Wärmespeicherkapazität positiv beeinflusst.

Auf der anderen Seite erlauben aktiv steuerbare Bauteilen oder integrierte Sensoren zahlreiche Zusatzfunktionen, deren Anwendungen in der Architektur jedoch noch zu definieren sind. Die Schwingungskontrolle dynamisch beanspruchter Bauteile wird in der Luft- und Raumfahrt bereits eingesetzt, hat aber im Bauwesen nur sehr eingeschränkt Verwendung, da hier eher niederfrequente Schwingungen auftreten. Aus diesem Grund sind insbesondere Drähte aus Formgedächtnis-Legierung von Interesse, welche auch statisch geschaltet werden können. Durch Stromleitung und der damit verbundenen Erwärmung ändern die Drähte ihre Länge, dadurch lässt sich eine Formveränderung im Laminat hervorrufen, insbesondere, wenn die Aktion senkrecht zur vorwiegenden Orientierung der Faserverstärkung platziert wird. Diese Funktionserweiterung ist unter derzeitigen Rahmenbedingungen wirtschaftlich durchaus konkurrenzfähig.

Strukturintegrierte Sensoren können neben der Erhöhung der Ausfallsicherheit auch für ganz unterschiedliche andere Anwendungen eingesetzt werden. Zum Beispiel ermöglichen die Sensoren, bereits den Produktionsprozess zu überwachen, da der Temperaturverlauf während der Aushärtung des Kunstharzes aufgezeichnet werden kann [Par10] [Wen05].

Sensor-Bauteil-Interaktion

Der Zusammenhang zwischen dem dreidimensionalen Dehnungszustand in der optischen Faser und dem im peripheren Laminat wird erheblich durch die Faserarchitektur und die Schutzbeschichtung der optischen Faser (Coating) beeinflusst. Während Temperatur und Dehnung längs der Faserorientierung in guter Näherung 1:1 übertragen werden, entspricht die Querdehnung in der optischen Faser nur 1/6 bis 1/3 des Werts des peripheren Laminats, auch dann, wenn kein Coating vorhanden ist. Die Sensorfaser entzieht sich sozusagen den Querdehnungen, wobei der genaue Zahlenwert aufgrund der unvermeidlichen Streuung der Faserarchitektur schwer vorherzusagen ist. Bis zu einer Längsdehnung von $5,0 \cdot 10^{-3}$ ist die Messung zuverlässig und wird auch von Wechsel- und Kriechbeanspruchung nicht negativ beeinflusst. Bei Temperatureinfluss hängt der Messwert erwartungsgemäß mit dem effektiven Wärmeausdehnungskoeffizienten des Bauteils zusammen, außerdem vom verwendeten Coating. Quantitativ sind diese Einflüsse jedoch vergleichsweise gering, es ist daher eine gute rechnerische Vorhersage zu treffen.

Basierend auf diesen Ergebnissen wird empfohlen, die Querdehnungen als unerwünscht einzustufen und deren Einfluss durch ein weiches Coating zu minimieren, ein E-Modul von 500 N/mm^2 hat sich als guter Kompromiss bezüglich der unterschiedlichen Anforderungen herausgestellt. Die in der Literatur vorgeschlagene planmäßige Auswertung von Querdehnungen über erweiterte Messverfahren wie polarisationserhaltender Fasern (C 2.3.4, S. 55) hat sich bei Betrachtung des Gesamtsystems als nicht praktikabel erwiesen. Die Differenzierung von Längsdehnung und Temperaturdifferenz über die erwähnten erweiterten Messverfahren ist ebenfalls nicht praktikabel, vielmehr wird die Differenzierung über die Gestaltung des Sensornetzwerks empfohlen.

Sensornetzwerk und Herstellung

Es hat sich gezeigt, dass der vollautomatische Einbau der Sensoren mit Fehlstellen verbunden ist, welche mutmaßlich von der Bewegung der vergleichsweise steifen Sensorfaser während der Härtung des Pultrusionsprofils rühren. Bei den Versuchen konnten jedoch keine Einflüsse der Fehlstellen festgestellt werden. Je genauer die Führung der Sensorfaser beim Einbau, desto geringer waren die festgestellten Lufteinschlüsse. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, die optische Faser zunächst auf einem Textil zu fixieren, welches dann im Anschluss in das Bauteil eingebettet wird.

Aus dem vorhergehenden Abschnitt war bekannt, dass die Verwendung von Sensoren, die in einem Punkt den dreidimensionalen Dehnungszustand ermitteln, nicht umsetzbar ist. Außerdem ist eine analytische Rückrechnung des Dehnungszustands aus der Messergebnisse infolge der Laminatvariationen nicht unbedingt empfehlenswert.

Aus diesem Grund wird unter Bezugnahme auf bionische Vorbilder empfohlen, jedem Messpunkt nur einen Messwert zuzuordnen, jedoch eine ausreichende Anzahl der Messpunkte anzuordnen, welche in unterschiedliche Richtungen orientiert, also zueinander linear unabhängig sind. Die Auswertung erfolgt über die Verwendung eines künstlichen neuronalen Netzes, dabei können lokale Abweichungen oder Diskontinuitäten vollständig kompensiert werden. Die Zuordnung eines ankommenden Messsignals zu einem örtlich bestimmten Messpunkt ist nicht notwendig, die Kontaktierung kann beliebig erfolgen. Für die Auswertung ist jedoch ist das Training des Netzwerks unumgänglich, es müssen also unterschiedliche Einwirkungsszenarien auf das betrachtete Bauteil aufgebracht und mit den Messwerten verglichen werden.

Beitrag zum Stand der Forschung

Im Gegensatz zu vorliegenden Forschungsarbeiten wurden dreidimensionale Modelle betrachtet, welche insbesondere räumliche Querdehneffekte vollumfänglich abbilden. Außerdem erlaubt erstmals die Variation der Geometrie die quantitative Bestimmung der Auswirkung von Herstellungsfehlern auf die Geometrie. Die Überprüfung der Vorhersagen mittels Bauteilversuchen geht wesentlich über bisherige Ansätze hinaus und erlaubt erstmals eine Beurteilung der praktischen Handhabbarkeit. Aus diesen Gründen konnten bisher wissenschaftlich akzeptierte Ansätze zur Differenzierung der mehrdimensionalen Einflussgrößen widerlegt werden. Die Verwendung neuronaler Netzwerke zur Trennung von Dehnungs- und Temperatureffekten ist eine logische Folge dieser Erkenntnisse und zugleich ein neuer Ansatz für die Verwendung strukturintegrierter Sensoren.

Ausblick

Die Qualität der Einbindung der Sensorfaser in das Laminat ist noch eingehender zu untersuchen. Dabei wäre einerseits die Ursache der beschriebenen Fehlstellen neben der Sensorfaser zu klären, andererseits sollte die Robustheit der strukturintegrierten Faser über langzeitige Kriech-, Wechsellast-, und Temperaturversuche eingehend erforscht werden.

Die mikromechanischen Berechnungen konnten nur ausgewählte Sonderfälle abdecken. Es ist zu empfehlen, zunächst die temperaturabhängigen mechanischen Kennwerte $E(T)$, $\alpha_T(T)$, $\nu(T)$ der einzelnen Werkstoffe zu bestimmen und das Berechnungsmodell entsprechend zu spezifizieren. Außerdem wäre die Untersuchung weiterer Laminat von Interesse, unter anderem die Orientierung der Sensorfaser in einem abweichenden Winkel zur vorwiegenden Faserverstärkung.

Literatur

- [Aiz05] Aizenberg, J.; Weaver, J. C.; Thanawala, M. S.; Sundar, V. C.; Morse, D. E.; Fratzl, P.: Skeleton of *Euplectella* sp.: Structural Hierarchy from the Nanoscale to the Macroscale. In: *Science* 309 (2005), S. 275-278
- [Ala07] Alam, M. S.; Youssef, M. A.; Nehdi, M.: Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review. In: *Canadian Journal of Civil Engineering* 34 (2007), S. 1075–1086
- [Ama07] Amano, M.; Okabe, Y.; Takeda, N.; Ozaki, T.: Structural Health Monitoring of an Advanced Grid Structures with Embedded Fiber Bragg Grating Sensors. In: *Structural Health Monitoring* 6 (2007), Nr. 4, S. 309–324
- [Ara08] de Araújo, C. J.; Rodrigues, L. F. A.; Coutinho Neto, J. F.; Reis, R. P. B.: Fabrication and static characterization of carbon-fiber-reinforced polymers with embedded NiTi shape memory wire actuators. In: *Smart Materials and Structures* 17 (2008), paper 065004
- [Bar04] Bar-Cohen, Y.: Electroactive Polymers (EAP). In: *Electrochemistry Encyclopedia* (<http://electrochem.cwru.edu/encycl/>), Beitrag (2004), zuletzt geprüft am 10.08.2011
- [Bar03] Bart, F. G.; Humphrey, J. A. C.; Secomb, T. W. (Hrsg.): *Sensors and Sensing in Biology and Engineering*. Springer, Wien, New York, 2003
- [Bas07] Bastianini, F.; Matta, F.; Rizzo, A.; Galati, N.; Nanni, A.: Overview of Recent Bridge Monitoring Applications using Distributed Brillouin Fiber Optic Sensors. In: *Journal of Nondestructive Testing* 12 (2007), Nr. 9, S. 269–276
- [Bau09] Bauhofer, W.; Kovacs, J. Z.: A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites. In: *Composites Science and Technology* 69 (2009), S. 1486–1498
- [Bau07] Baur, E.; Brinkmann, S.; Osswald, T. A.; Schmachtenberg, E.: *Saechtling Kunststoff Taschenbuch - 30. Ausgabe*. Carl Hanser, München, 2007
- [Ben95] Bent, A. A.; Hagood, N. W.; Rodgers, J. P.: Anisotropic Actuation with Piezoelectric Fiber Composites. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 6 (1995), S. 338-349
- [Ber88] Bertholds, A.; Dändliker, R.: Determination of the Individual Strain-optic coefficient in single-mode optical fibres. In: *Journal of lightwave technology* 6 (1988), Nr. 1, S. 17-20
- [Bet04] Betz, D.: *Application of Optical Fibre Sensors for Structural Health and Usage Monitoring*. University Sheffield, Mechanical Engineering Department, Dissertation, 2004
- [Bie02] Biercuk, M. J.; Llaguno, M. C.; Radosavljevic, M.; Hyun, J. K.; Johnson, A. T.: Carbon nanotube composites for thermal management. In: *Applied Physics Letter* 80 (2002), Nr. 15, S. 2767-2769
- [Bos03] Bosia, F.; Giaccari, P.; Botsis, J.; Facchini, M.; Limberger, H. G.; Salathé, R. P.: Characterization of the response of fibre Bragg grating sensors subjected to a two-dimensional strain field. In: *Smart Materials and Structures* 12 (2003), S. 925–934
- [Bra02] Braunstein, J.; Ruchala, J.; Hodac, B.: Smart Structures: Fiber-Optic Deformation and Displacement Monitoring. In: *IABMAS Conference, Barcelona, 2002*

- [Bre04] Brei, D.; Cannon, B. J.: Piezoceramic hollow fiber active composites. In: *Composites Science and Technology* 64 (2004), S. 245–261
- [Bue01] Buestrich, R.; Kahlenberg, F.; Popall, M.: ORMOCERs for Optical Interconnection Technology. In: *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 20 (2001), S. 181–186
- [But08] Butz, C.; Heinemeyer, C.; Keil, A.; Schlaich, M.; Goldack, A.; Trometer, S.; Lukić, M.; Chabrolin, B.; Lemaire, A.; Martin, P.; Cunha, Á.; Caetano, E.: Leitfaden für die Bemessung von Fußgängerbrücken: Forschungsprojekt RFS-CR-03019 'Advanced Load Models for Synchronous Pedestrian Excitation and Optimised Design Guidelines for Steel Footbridges' (SYNPEX). Forschungsbericht RFS2-CT-2007-00033, 2008
- [Car08] Caruso, M. M.; Blaiszik, B. J.; White, S. R.; Sottos, N. R.; Moore, J. S.: Full Recovery of Fracture Toughness Using a Nontoxic Solvent-Based Self-Healing System. In: *Advanced Functional Materials* 18 (2008), S. 1898-1904
- [Cas10] de Castro, J.; Keller, T.: Design of robust and ductile FRP structures incorporating ductile adhesive joints. In: *Composites Part B* 41 (2010), S. 148–156
- [Cha07] Chambers, A. R.; Mowlem, M. C.; Dokos, L.: Evaluating impact damage in CFRP using fibre optic sensors. In: *Composites Science and Technology* 67 (2007), S. 1235–1242
- [Che05] Cheng, C.; Lo, Y.; Pun, B. S.; Chang, Y. M.; Li, W.Y.: An Investigation of Bonding-Layer Characteristics of Substrate-Bonded Fiber Bragg Grating. In: *Journal of lightwave technology* 23 (2005), Nr. 11, S. 3907–3915
- [Cho06] Cho, J.; Joshi, M. S.; Sun, C.T.: Effect of inclusion size on mechanical properties of polymeric composites with micro and nano particles. In: *Composite Science and Technology* 66 (2006), S. 1941-1952
- [Dan08] Dandridge, A.: Fiber Optic Sensors Based on the Mach-Zehnder and Michelson Interferometers. In: Yin, S.; Ruffin, P. B.; Yu, F. T.S. (Hrsg.): *Fiber optic sensors*. CRC Press, Boca Raton, 2008
- [Die04] Dietrich, D.; Kastner, W.; Schweinzer, H.: Wahrnehmungsbewusstsein in der Automation - ein neuer "bionischer" Denkansatz. In: *Automatisierungstechnik* 52 (2004), S. 107–116
- [Eat95] Eaton, N. C.; Drew, R. C.; Geiger, H.: Finite element stress and strain analysis in composites with embedded optical fiber sensors. In: *Smart Materials and Structures* 4 (1995), S. 113–117
- [Eku06] eku Kabel & Systeme: *Strukturierte Verkabelungs-Systeme: Lichtwellenleiter*. eku Kabel & Systeme GmbH & Co. KG, Informationsbroschüre, 2006
- [Ems07] Emslie, C.: Polarization Maintaining Fibers. In: Méndez, A.; Morse, T. F. (Hrsg.): *Specialty optical fibers handbook*. Elsevier, Oxford, 2007
- [Etc11] Etches, J. A.; Bond, I. P.: Development of a self-actuating fibre reinforced ionic epoxy gel polymer composite. In: *Smart Materials and Structures* 20 (2011), paper 045020
- [Fra01] Frank, A.: *Dehnungs- und Temperaturmessung in Verbundwerkstoffen mit eingebetteten faseroptischen Bragg-Gitter-Sensoren*. ETH Zürich, Dissertation, 2001
- [Fuc07] Fuchs, A.; Zhang, Q.; Elkins, J.; Gordaninejad, F.; Evrense, C.: Development and Characterization of Magnetorheological Elastomers. In: *Journal of Applied Polymer Science* 105 (2007), S. 2497–2508

- [Gaf00] Gafsi, R.; El-Sherif, M.: Analysis of Induced-Birefringence Effects on Fiber Bragg Gratings. In: *Optical Fiber Technology* 6 (2000), S. 299–323
- [Gan08] Ganguli, S.; Roy, A. K.; Anderson, D. P.: Improved thermal conductivity for chemically functionalized exfoliated graphite/epoxy composites. In: *Carbon* 46 (2008), S. 806–817
- [Gar08] Garcia, E. J.; Wardle, B. L.; Hart, A. J.; Yamamoto, N.: Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown in situ. In: *Composite Science and Technology* 68 (2008), S. 2034–2041
- [Geb05] Gebremichael, Y. M.; Li, W.; Boyle, W. J. O.; Meggitt, B. T.; Grattan, K. T. V.; McKinley, B.; Fernando, G. F.; Kister, G.; Winter, D.; Canning, L.; Luke, S.: Integration and assessment of fibre Bragg grating sensors in an all-fibre reinforced polymer composite road bridge. In: *Sensors and Actuators A* 118 (2005), S. 78–85
- [Gib10] Gibson, R. F.: *A review of recent research on mechanics of multifunctional materials and structures*. Reno, Forschungsbericht, 2010
- [Gro00] Grohmann, B. A.; Wallmersperger, T.; Kröplin, B.: Adaptive Strukturen und gekoppelte Mehrfeldprobleme. In: *Stahlbau* 69 (2000), Nr. 6, S. 446–454
- [Gue02] Guemes, J. A.; Menéndez, J. M.: Response of Bragg grating fiber-optic sensors when embedded in composite laminates. In: *Composites Science and Technology* 62 (2002), S. 959–966
- [Han06] Handwerker, H. O.: *Allgemeine Sinnesphysiologie, Somatosensorik*. In: Schmidt, R. F.; Schaible, H.; Birbaumer, N. (Hrsg.): *Neuro- und Sinnesphysiologie: Mit 12 Tabellen*. Springer Medizin, Heidelberg, 2006
- [Har10] Hartl, D. J.; Mooney, J. T.; Lagoudas, D. C.; Calkins, F. T.; Mabe, J. H.: Use of a Ni60Ti shape memory alloy for active jet engine chevron application : I. Thermomechanical characterization II. Experimentally validated numerical analysis. In: *Smart Materials and Structures* 19 (2010), paper 015020
- [Hil78] Hill, K. O.; Fujii, Y.; Johnson, D. C.; Kawasaki, B. S.: Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. In: *Applied Physics Letters* 32 (1978), Nr. 10, S. 647–649
- [Hum09] van Humbeeck, J.: *Shape Memory Alloys*. In: Schwartz, M. (Hrsg.): *Smart Materials*. Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2009
- [Jan05] Janke, L.; Czaderski, C.; Motavalli, M.; Ruth, J.: Applications of shape memory alloys in civil engineering structures - Overview, limits and new ideas. In: *Materials and Structures* 38 (2005), Nr. 279, S. 578–592
- [Jan04] Janocha, H.: *Unconventional Actuators*. In: Janocha, H. (Hrsg.): *Actuators – Basics and Applications*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004
- [Jia10] Jiang, G.; Dawood, M.; Peters, K.; Rizkalla, S.: Global and Local Fiber Optic Sensors for Health Monitoring of Civil Engineering Infrastructure Retrofit with FRP Materials. In: *Structural Health Monitoring* 9 (2010), Nr. 4, S. 309–322
- [Jor10] Jordi, C.; Michel, S.; Fink, E.: Fish-like propulsion of an airship with planar membrane dielectric elastomer actuators. In: *Bioinspiration & Biomimetics* 5 (2010), paper 026007

- [Jus01] Just, E.: Entwicklung eines Formgedächtnis-Mikrogreifers. Universität Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2001
- [Kal00-1] Kalamkarov, A. L.; Fitzgerald, S. B.; MacDonald, D. O.; Georgiades, A. V.: The mechanical performance of pultruded composite rods with embedded fibre-optic sensors. In: *Composites Science and Technology* 60 (2000), S. 1161–1169
- [Kal00-2] Kalamkarov, A. L.; MacDonald, D. O.; Fitzgerald, S. B.; Georgiades, A. V.: Reliability assessment of pultruded FRP reinforcements with embedded fiber optic sensors. In: *Composite Structures* 50 (2000), S. 69–78
- [Kan10] Kannebley, G. (Hrsg.): *Handbuch Faserverbundkunststoffe : Grundlagen Verarbeitung Anwendungen*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010
- [Kat07] Kato, H.: *Nano-SMA fiber Composites Development and Applications*. Hokkaido University, Forschungsbericht, 2007
- [Keh01] Kehlenbach, M.; Horoschenkoff, A.; Trutzel, M. N.; Betz, D.: Performance of Fiber-Optic Bragg Grating Sensors in CFRP Structures. In: *SPIE Conference Smart Structures and Materials*, Vol. 4328, San Diego, 2001
- [Kel10] Keller, T.; Vassilopoulos, A. P.; Manshadi, B. D.: Thermomechanical Behavior of Multifunctional GFRP Sandwich Structures with Encapsulated Photovoltaic Cells. In: *Journal of Composites for Construction* 14 (2010), Nr. 4, S. 470-478
- [Kik03] Kikuta, M. T.: *Mechanical Properties of Candidate Materials for Morphing Wings*. Virginia Polytechnic Institute, Masterarbeit, 2003
- [Kim93] Kim, K.; Kollár, L.; Springer, G. S.: A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Temperature and Strain Sensors. In: *Journal of Composite Materials* 27 (1993), Nr. 17, S. 1618-1662
- [Kni07] Knippers, J.; Gabler, M.: *Faserverbundstoffe im Bauwesen*. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): *Stahlbau-Kalender 2007*. Ernst & Sohn, Berlin, 2007
- [Kni10] Knippers, J.; Pelke, E.; Gabler, M.; Berger, D.: Bridges with Glass Fibre-Reinforced Polymer Decks: The Road Bridge in Friedberg, Germany. In: *Structural Engineering International* 4/2010, S. 400-404
- [Kol98] Kollár, L. P.; van Steenkiste, R. J.: Calculation of the Stresses and Strains in Embedded Fiber Optic Sensors. In: *Journal of Composite Materials* 32 (1998), S. 1647-1667
- [Kor05] Koratkar, N. A.; Suhr, J.; Joshi, A.; Kane, R. S.; Schadler, L. S.; Ajayan, P. M.; Bartolucci, S.: Characterizing energy dissipation in single-walled carbon nanotube polycarbonate composites. In: *Applied Physics Letters* 87 (2005), paper 063102
- [Kov07] Kovalovs, A.; Barkanov, E.; Gluhihs, S.: Active Twist of Model Rotor Blades with D-Spar Design. In: *Transport* 22 (2007), Nr. 1, S. 38–44
- [Kre01] Krebber, K.: *Ortsauflösende Lichtleitfaser-Sensorik für die Temperatur und Dehnung unter Nutzung der stimulierten Brillouin-Streuung basierend auf der Frequenzbereichsanalyse*. Universität Bochum, Dissertation, 2001

- [Kre08] Kreuder, A.: Dynamische Dehnungsmessung mit Faser-Bragg-Gittern: Optische Sensornetzwerke für die Belastungserfassung - Topologische Untersuchungen, Entwurf, Verifikation und wirtschaftliche Realisierung. Universität Duisburg, Fakultät Elektrotechnik, Dissertation, 2001
ebenso: Vdm Verlag Dr. Müller, 2008
- [Lau02] Lau, K.; Zhou, L.; Tao, X.: Control of natural frequencies of a clamped-clamped composite beam with embedded shape memory alloy wires. In: *Composite Structures* 58 (2002), S. 39–47
- [Leb04] Lebid, S.: Störungen in der Charakteristik von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren durch lokale thermische und mechanische Einflüsse. TU Dresden, Dissertation, 2004
- [Len02] Lendlein, A.; Kelch, S.: Shape-Memory Polymers. In: *Angewandte Chemie (international)* 41 (2002), S. 2034–2057
- [Lev01] Levin, K.: Durability of Embedded Fibre Optic Sensors in Composites. Royal Institute of Technology Stockholm, Department of Aeronautics, Dissertation, 2001
- [Lie08] Liehr, S.; Lenke, P.; Kriebler, K.; Seeger, M.; Thiele, E.; Metschies, H.; Gebreselassie, B.; Münich, J. C.; Stempniewski, L.: Distributed strain measurement with polymer optical fibers integrated into multifunctional geotextiles. In: *SPIE Conference Smart Structures and Materials*, Vol. 7003, San Diego, 2008
- [Lin02] Lin, M.; Chang, F.: The manufacture of composite structures with a built-in network of piezoceramics. In: *Composites Science and Technology* 62 (2002), S. 919–939
- [Lin09] Lin, Y.; Sodano, H. A.: Fabrication and Electromechanical Characterization of a Piezoelectric Structural Fiber for Multifunctional Composites. In: *Advanced Functional Materials* 19 (2009), S. 592–598
- [Lin07] Lingle, R. Jr.; Peckham, D. W.; McCurdy, A.; Kim, J.: *Light-Guiding Fundamentals and Fiber Design*. In: Méndez, A.; Morse, T. F. (Hrsg.): *Specialty optical fibers handbook*. Elsevier, Oxford, 2007
- [Loc08-1] Lochmatter, P.; Kovacs, G.: Design and characterization of an active hinge segment based on soft dielectric EAPs. In: *Sensors and Actuators A* 141 (2008), S. 577–587
- [Loc08-2] Lochmatter, P.; Kovacs, G.: Design and characterization of an actively deformable shell structure composed of interlinked active hinge segments driven by soft dielectric EAPs. In: *Sensors and Actuators A* 141 (2008), 588-597
- [Luy10] Luyckx, G.; Voet, E.; de Waele, W.; Degrieck, J.: Multi-axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor : I. Parametric study. In: *Smart Materials and Structures* 19 (2010), paper 105017
- [Luy08] Luyckx, G.; Voet, E.; de Waele, W.; van Paepegem, W.; Degrieck, J.; Vlekken, J.: Strain monitoring of FRP elements using an embedded fibre optic sensor. In: *Advances in Science and Technology* 56 (2008), S. 435–440
- [Man09] Manjunatha, C. M.; Taylor, A. C.; Kinloch, A. J.; Sprenger, S.: The Tensile Fatigue Behavior of a GFRP Composite with Rubber Particle Modified Epoxy Matrix. In: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 29 (2010), S. 2170-2183
- [Mat07] Matini, M. R.: *Biegsame Konstruktionen in der Architektur auf der Basis bionischer Prinzipien*. Universität Stuttgart, Fakultät Architektur und Stadtplanung, Dissertation, 2007

- [Mat08] Matta, F.; Bastianini, F.; Galati, N.; Casadei, P.; Nanni, A.: Distributed Strain Measurement in Steel Bridge with Fiber Optic Sensors : Validation through Diagnostic Load Test. In: Journal of Performance of Constructed Facilities (2008), S. 264–273
- [Mau10] Maung, K. J.; Hahn, H. T.; Ju, Y.S.: Multifunctional integration of thin-film silicon solar cells on carbon-fiber-reinforced epoxy composites. In: Solar Energy 84 (2010), S. 450–458
- [Maw08] Mawatari, T.; Nelson, D.: A multi-parameter Bragg grating fiber optic sensor and triaxial strain measurement. In: Smart Materials and Structures 17 (2008), paper 035033
- [Mit08] Mitchell, G. L.: Intensity-Based and Fabry-Perot Interferometer Sensors. In: Yin, S.; Ruffin, P. B.; Yu, F. T. S. (Hrsg.): Fiber optic sensors. CRC Press, Boca Raton, 2008
- [Nol08] Nolan, D. A.; Blaszyk, P. E.: Optical Fibers. In: Yin, S.; Ruffin, P. B.; Yu, F. T. S. (Hrsg.): Fiber optic sensors. CRC Press, Boca Raton, 2008
- [Ots98] Otsuka, K.; Wayman, C. M. (Hrsg.): Shape Memory Materials. Cambridge University Press, Sammelband, 1998
- [Oza08] Ozaki, T.; Takeya, A.; Kume, M.; Sekine, K.: Multifunctional Composite Structures for Space Satellites. In: SAMPE Journal 44 (2008), Nr. 2, S. 6–11
- [Par08] Park, G.; Rosing, T.; Todd, M. D.; Farrar, C. R.; Hodgkiss, W.: Energy Harvesting for Structural Health Monitoring Sensor Networks. In: Journal of Infrastructure Systems 14 (2008), Nr. 1, S. 64–79
- [Par10] Parlevliet, P. P.; Bersee, H. E. N.; Beukers, A.: Measurement of (post-) curing strain development with fibre Bragg gratings. In: Polymer Testing 29 (2010), S. 291–301
- [Pas11] Paschotta, R.: Brillouin Scattering. In: Encyclopedia of Laser Physics and Technology (www.rp-photonics.com/brillouin_scattering.html), zuletzt geprüft am 07.12.2011
- [Per09] Pereira, T.; Guo, Z.; Nieh, S.; Arias, J.; Hahn, T.: Energy Storage Structural Composites: a Review. In: Journal of Composite Materials 43 (2009), S. 549–560
- [Pet06] Peters, S.: Kleben von GFK und Glas für baukonstruktive Anwendungen. Universität Stuttgart, Fakultät Architektur und Stadtplanung, Dissertation, 2006
- [Poc1889] Pockels, F.: Ueber den Einfluss elastischer Deformationen, speciell einseitigen Druckes, auf das optische Verhalten krystallinischer Körper. In: Annalen der Physik 273 (1889), Nr. 5, S. 144–172
- [Pra05] Prabhugoud, M.; Peters, K.: Birefringence and transverse strain sensitivity in Bragg grating Sensors. In: Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring (2005), S. 433–442
- [Pri09] Priya, S.; Inman, D. J. (Hrsg.): Energy Harvesting Technologies. Springer Science + Business, New York, 2009
- [Puc96] Puck, A.: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten : Modelle für die Praxis. Hanser, München, Wien, 1996
- [Rai09] Rai, K. N.; Singh, D.: Impact Resistance Behavior of Polymer Nanocomposite Transparent Panels. In: Journal of Composite Materials 43 (2009), S. 139–151
- [Raj05] Rajoria, H.; Jalili, N.: Passive vibration damping enhancement using carbon nanotube-epoxy reinforced composites. In: Composite Science and Technology 65 (2005), S. 2079–2093

- [Rat08] Ratna, D.; Karger-Kocsis, J.: Recent advances in shape memory polymers and composites: a review. In: *Journal of Materials Science* 43 (2008), S. 254–269
- [Rig94] Rigoll, G.: *Neuronale Netze: Eine Einführung für Ingenieure, Informatiker und Naturwissenschaftler*. Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994
- [Rot08] Roths, J.; Kratzer, P.: Vergleich zwischen optischen Faser-Bragg-Gitter-Dehnungssensoren und elektrischen Dehnungsmessstreifen. In: *Technisches Messen* 75 (2008), Nr. 12, S. 647–654
- [Ruo09] Ruotsalainen, P.; Kroneld, P.; Nevala, K.; Brander, T.; Lindroos, T.; Sippola, M.: Shape Control of a FRP Airfoil Structure Using SMA-actuators and Optical Fiber Sensors. In: *Solid State Phenomena* 144 (2009), S. 196–201
- [Sch10] Schlüter, V. G.: *Entwicklung eines experimentell gestützten Bewertungsverfahrens zur Optimierung und Charakterisierung der Dehnungsübertragung oberflächenapplizierter Faser-Bragg-Gitter-Sensoren*. TU Berlin, Dissertation, 2010
- [Sch06] Schmidt, R.; Schaible, H.; Birbaumer, N. (Hrsg.): *Neuro- und Sinnesphysiologie: mit 12 Tabellen*. Springer Medizin, Heidelberg, 2006
- [Sha05] Shahinpoor, M.; Kim, K. J.: Ionic polymer–metal composites: IV. Industrial and medical applications. In: *Smart Materials and Structures* 14 (2005), S. 197–214
- [Shi11] Shi, X.; von dem Bussche, A.; Hurt, R. H.; Kane, A. B.; Gao, H.: Cell entry of one-dimensional nanomaterials occurs by tip recognition and rotation. In: *Nature Nanotechnology* 6 (2011), S. 714–719
- [Shi81] Shibata, N.; Shibata, S.; Eda, H.: Refractive Index Dispersion of Lightguide Glasses at high Temperature. In: *Electronic Letters* 17 (1981), Nr. 11, S. 310–311
- [Sri01] Srinivasan, A. V.; Mc Farland, D. M.: *Smart Structures: Analysis and Design*. Cambridge University Press, Cambridge, 2001
- [Ste97] van Steenkiste, R. J.; Springer, G. S.: *Strain and temperature measurement with fiber optic sensors*. Technomic Pub. Co., Lancaster, 1997
- [Ste10] Stempniewski, L.; Haag, B.: *Baudynamik-Praxis*. Bauwerk, Berlin, 2010
- [Tao00] Tao, X.; Tang, L.; Du, W.; Choy, C.: Internal strain measurement by fiber Bragg grating sensors in textile composites. In: *Composites Science and Technology* 60 (2000), S. 657–669
- [Teu04] Teuffel, P.: *Entwerfen adaptiver Strukturen*. Universität Stuttgart, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Dissertation, 2004
- [Thi08] Thill, C.; Etches, J.; Bond, I.; Potter, K.; Weaver, P.: Morphing skins. In: *The Aeronautical Journal* (2008), paper 3216
- [Udd08] Udd, E.: The Emergence of Fiber Optic Sensor Technology. In: Yin, S.; Ruffin, P. B.; Yu, F. T. S. (Hrsg.): *Fiber optic sensors*. CRC Press, Boca Raton, 2008
- [Udd96] Udd, E.; Nelson, D. V.; Lawrence, C. M.; Ferguson, B. A.: Three-axis strain and temperature fiber optic grating sensor. In: *SPIE Conference Smart Structures and Materials*, Vol. 2718, San Diego, 1996
- [Val04] Vallée, T.: *Adhesively bonded lap joints of pultruded GFRP shapes*. EPFL Lausanne, Composite Construction Laboratory, Dissertation, 2004

- [Voh08] Vohrer, U.; Zschoerper, N. P.; Moller, B. P.: Carbon Nanotubes - a Material rising like a Phoenix. In: *Vakuum in Forschung und Praxis VIP 20* (2008), Nr. 1 (Zusatzausgabe), S. 38-46
- [Wae02] de Waele, W.: Structural monitoring of composite elements using optical fibres with Bragg-sensors. Ghent University, Faculty of Engineering, Dissertation, 2002
- [Wal08] Wallmersperger, T.; Akle, B. J.; Leo, D. J.; Kröplin, B.: Electrochemical response in ionic polymer transducers: An experimental and theoretical study. In: *Composites Science and Technology* 68 (2008), S. 1173–1180
- [Wan09] Wang, B.; Teng, J. G.; de Lorenzis, L.; Zhou, L.; Ou, J.; Jin, W.; Lau, K. T.: Strain monitoring of RC members strengthened with smart NSM FRP bars. In: *Construction and Building Materials* 23 (2009), S. 1698–1711
- [Wat02] Watkins, S. E.; Sanders, G. W.; Akhavan, F.; Chandrashekhara, K.: Modal analysis using fibre optic sensors and neural networks for prediction of composite beam delamination. In: *Smart Materials and Structures* 11 (2002), S. 489–495
- [Wat07] Watkins, S. E.; Akhavan, F.; Dua, R.; Chandrashekhara, K.; Wunsch, D. C.: Impact-induced damage characterization of composite plates using neural networks. In: *Smart Materials and Structures* 16 (2007), S. 515–524
- [Web06] Weber, A.; Schweinfurth, J.; Jütte, B.: Newly developed GFRP rebar in diaphragm walls of large tunneling projects. In: *Tunneling Underground Space Technology* 21 (2006), S. 437-442
- [Wei08] Weis, M.: Beitrag zur Gestaltung von Sensorsystemen für die strukturintegrierte Zustandsüberwachung bei Luftfahrtanwendungen. RWTH Aachen, Dissertation, 2008
- [Wen05] Wenzel, M.: Spannungsbildung und Relaxationsverhalten bei der Aushärtung von Epoxidharzen. Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Physik, Dissertation, 2005
- [Whi01] White, S. R.; Sottos, N. R.; Geubelle, P. H.; Moore, J. S.; Kessler, M. R.; Sriram, S. R.; Brown, E. N.; Viswanathan, S.: Autonomic healing of polymer composites. In: *Nature* 409 (2001), S. 794-797
- [Wie10] Wierschem, N.; Andrawes, B.: Superelastic SMA-FRP composite reinforcement for concrete structures. In: *Smart Materials and Structures* 19 (2010), paper 025011
- [Wil02] Williams, R. B.; Park, G.; Inman, D. J.; Wilkie, K. K.: An Overview of Composite Actuators with Piezoceramic Fibers. In: *IMAC Conference & Exposition, Los Angeles*, 2002
- [Wir09] Wirtz, R.; Zhao, T.; Jiang, Y.: Thermal and Mechanical Characteristics of a Multifunctional Thermal Energy Storage Structure. In: *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 32 (2009), Nr. 1, S. 53–62
- [Wu08] Wu, D. Y.; Meure, S.; Solomon, D.: Self-healing polymeric materials: A review of recent developments. In: *Progress in Polymer Science* 33 (2008), S. 479-522
- [Yao09] Yao, K. D.; Yao, F. L.; Li, J. J.; Yin, Y. J.: Chitosan-Based Gels and Hydrogels. In: Schwartz, M. (Hrsg.): *Smart Materials*. Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2009
- [Zie07] Ziemann, O.; Krauser, J.; Zamzow, P. E.; Daum, W.: *POF-Handbuch – Optische Kurzstrecken-Übertragungssysteme*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007

-
- [Zsc05] Zschunke, F.: Aktoren auf Basis des magnetorheologischen Effekts. Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Dissertation, 2005
- [Zür04] Zürner, J.: Piezo-Faser-Composite zur Schwingungsbeeinflussung von Faser-Verbund-Kunststoffen. Universität Stuttgart, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Dissertation, 2004

Softwareverzeichnis

- ANSYS: Finite Element Programm, Workbench 2.0, (c) SAS IP, Inc.
(für die mikromechanischen Berechnungen)
- Compositor: Berechnungsalgorithmen in Excel-Format RWTH Aachen
(für die Ermittlung der mechanischen Kennwerte von faserverstärkten Kunststoffen)
- Excel: Microsoft Excel, Version 14, 2010
(Analyse der Berechnungs- und Versuchsergebnisse)
- Matlab Programmierbasis, Matlab R2011b (7.13.0.564), Neural Network Toolbar, MathWorks
(für die Programmierung neuronaler Netze)
- Rhino: Zeichenprogramm für dreidimensionale Volumenkörper, Rhinoceros WIP 5.0
(für Geometriegenerierung für die Berechnung mit ANSYS)
- Sofistik: Finite-Element-Programm, Sofistik AG
(für die rechnerische Analyse einzelner Versuche)

Normen- und Richtlinienverzeichnis

- [DIN 18820] DIN 18820: 1991-03: Lamine aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA); Teil 1: Aufbau, Herstellung und Eigenschaften; Teil 2: Physikalische Kennwerte der Regellamine; Teil 3: Schutzmaßnahmen für das tragende Laminat; Teil 4: Prüfung und Güteüberwachung
- [DIN EN 13706] DIN EN 13706: 2003-02: Verstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe - Spezifikationen für pultrudierte Profile; Teil 1: Bezeichnung; Teil 2: Prüfverfahren und allgemeine Anforderungen; Teil 3: Besondere Anforderungen
- [DIN EN ISO 527] DIN EN ISO 527: 2003 bis 2010: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften; Teil 1: Allgemeine Grundsätze; Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen; Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln; Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe; Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe
- [DIN EN ISO 14125] DIN EN ISO 14125: 1998-06: Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften; Berichtigung 1: 2003-06
- [DIN EN ISO 14126] DIN EN ISO 14126: 2000-12: Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Druckeigenschaften in der Laminebene; Berichtigung 1: 2003-06
- [DIN EN ISO 14129] DIN EN ISO 14129: 1998-02: Faserverstärkte Kunststoffe - Zugversuch an 45°-Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs/Schubverformungs-Kurve des Schubmoduls in der Lagenebene
- [DIN EN ISO 14130] DIN EN ISO 14130: 1998-02: Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken
- [VDI 2014] VDI-Richtlinie, 2014-3: Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund, Blatt 1: Grundlagen (07/89); Blatt 2 :Konzeption und Gestaltung (09/93); Blatt 3: Berechnung (09/06). VDI (Verein Deutscher Ingenieure)
- [BÜV TKB] BÜV-Empfehlung TKB: 2010-08: Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen (TKB); Download über: www.bvpi.de/shared/pdf-dokumente/Kunststoff_Empf.pdf
- [Eurocomp] Structural Design of Polymer Composites : EUROCOMP Design Code and Handbook. Veröffentlichung: Clarke, J. (Hrsg.): *idem*. E&FN SPON, London, 1996

Anhang

- Anhang 1: Herleitung der Wellenlängenänderung (FBG)
- Anhang 2: Übersicht der Probekörper im Verbundprojekt
- Anhang 3: Querschnitt des Grundsystems – Hohlprofil 280 x 240 x 18
- Anhang 4: Versuchsaufbau für Kriechversuch
- Anhang 5: Temperaturgang von Dehnungsmessstreifen
- Anhang 6: Fehleranalyse beim neuronalen Netz
- Anhang 7: Laminatwerte weiterer untersuchter Profile
- Anhang 8: Tabellarische Berechnungsergebnisse aus Kapitel D 2.3
- Anhang 9: Faseroptische Messung während Pultrusion
- Anhang 10: Querschnitt des Demonstrators in Kapitel E 1.3
- Anhang 11: Überblick der untersuchten Probekörper in Kapitel D 3

Anhang 1: Herleitung der Wellenlängenänderung (FBG)

Herleitung der Zusammenhänge von S. 47.

Partielle Differentiation

Die Wellenlänge des Faser-Bragg-Gitters ist abhängig vom Gitterabstand und dem Brechungsindex des Faserkerns. Die Formel (C.5) auf S. 47 beschreibt diesen Zusammenhang:

$$\lambda(\varepsilon_i, T) = 2 \cdot n(\varepsilon_i, T) \cdot \Lambda(\varepsilon_i, T)$$

Die partielle Differentiation getrennt nach den vier Einflussgrößen ε_1 , ε_2 , ε_3 und ΔT ergibt folgende Abhängigkeit:

$$\Delta\lambda = 2 \cdot \left(\Lambda_0 \frac{\partial n}{\partial \varepsilon_1} + n_0 \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon_1} \right) \Delta\varepsilon_1 + 2 \cdot \left(\Lambda_0 \frac{\partial n}{\partial \varepsilon_2} + n_0 \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon_2} \right) \Delta\varepsilon_2 + 2 \cdot \left(\Lambda_0 \frac{\partial n}{\partial \varepsilon_3} + n_0 \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon_3} \right) \Delta\varepsilon_3 + 2 \cdot \left(\Lambda_0 \frac{\partial n}{\partial T} + n_0 \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T$$

Das Ergebnis der partiellen Differentiation wird durch den Grundwert der Wellenlänge $\lambda_0 = n_0 \cdot \Lambda_0$ geteilt. Da der Gitterabstand Λ nicht durch Querdehnung ε_2 , ε_3 beeinflusst wird, können die entsprechenden Terme entfallen:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\partial n}{\partial \varepsilon_1} \cdot \frac{1}{n_0} \cdot \Delta\varepsilon_1 + \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon_1} \cdot \frac{1}{\Lambda_0} \cdot \Delta\varepsilon_1 + \frac{\partial n}{\partial \varepsilon_2} \cdot \frac{1}{n_0} \cdot \Delta\varepsilon_2 + 0 + \frac{\partial n}{\partial \varepsilon_3} \cdot \frac{1}{n_0} \cdot \Delta\varepsilon_3 + 0 + \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \frac{1}{n_0} \cdot \Delta T + \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \cdot \frac{1}{\Lambda_0} \Delta T$$

Wird die Abhängigkeit nach den Auswirkungen auf Gitterabstand Λ und Brechungsindex n gruppiert, ergibt sich:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{1}{\Lambda_0} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon_1} \cdot \Delta\varepsilon_1 + \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \cdot \Delta T \right) + \frac{1}{n_0} \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial \varepsilon_1} \cdot \Delta\varepsilon_1 + \frac{\partial n}{\partial \varepsilon_2} \cdot \Delta\varepsilon_2 + \frac{\partial n}{\partial \varepsilon_3} \cdot \Delta\varepsilon_3 \right) + \frac{1}{n_0} \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial T} \cdot \Delta T \right)$$

Es wird angenommen, dass die Gradienten im betrachteten Bereich konstant sind, also die Funktionen des Gitterabstands Λ und des Brechungsindex n linear verlaufen. Damit ergibt folgender Zusammenhang, welcher der Formel (C.6) auf S. 47 entspricht:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta\Lambda(\varepsilon_1, T)}{\Lambda_0} + \frac{\Delta n(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)}{n_0} + \frac{\Delta n(T)}{n_0}$$

Einsetzen der Temperaturabhängigkeit

Im Gegensatz zur Vorgehensweise in dieser Arbeit wird in der Literatur teilweise bei der Herleitung der optomechanischen Beziehungen in Glas die spannungslose Temperaturdehnung nicht in die Formeln eingerechnet. Daher wird dann im Gegensatz zu Formel (C.9) auf S. 48 folgender Zusammenhang für die Veränderung des Brechungsindex in Abhängigkeit der Temperatur angegeben [Kim93]:

$$\frac{\Delta n(T)}{n_0} = \left[\alpha_n + n_0^2 \cdot \left(p_{12} + \frac{p_{11}}{2} \right) \cdot \alpha_T \right] \cdot \Delta T$$

In diesem Fall muss dann bei einer Temperaturdifferenz berücksichtigt werden, dass die Dehnungen ebenfalls temperaturabhängig sind:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \alpha_T \cdot \Delta T$$

Diese Dehnungen sind dann in die Dehnungsabhängigkeit des Brechungsindex entsprechend Formel (C.8) auf S. 48 einzusetzen:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta n(\varepsilon_i)}{n_0} &= -\frac{n_0^2}{2} \cdot \left[p_{12} \cdot \varepsilon_1 + \left(\frac{p_{11} + p_{12}}{2} \right) \cdot (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \pm \frac{p_{11} - p_{12}}{2} (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) \right] = -\frac{n_0^2}{2} \cdot \left[p_{12} \cdot \alpha_T \cdot \Delta T + \left(\frac{p_{11} + p_{12}}{2} \right) \cdot 2\alpha_T \cdot \Delta T \right] = \\ &= -n_0^2 \cdot \left(p_{12} + \frac{p_{11}}{2} \right) \cdot \alpha_T \cdot \Delta T \end{aligned}$$

Werden beide Formeln addiert, fällt die Abhängigkeit aus der thermischen Wärmeausdehnung heraus und es ergibt sich die Formel (C.9) auf S. 48:

$$\frac{\Delta n(T)}{n_0} = \frac{\partial n_0}{\partial T} \cdot \frac{1}{n_0} \cdot \Delta T =: \alpha_n \cdot \Delta T$$

Anhang 2: Übersicht der Probekörper im Verbundprojekt

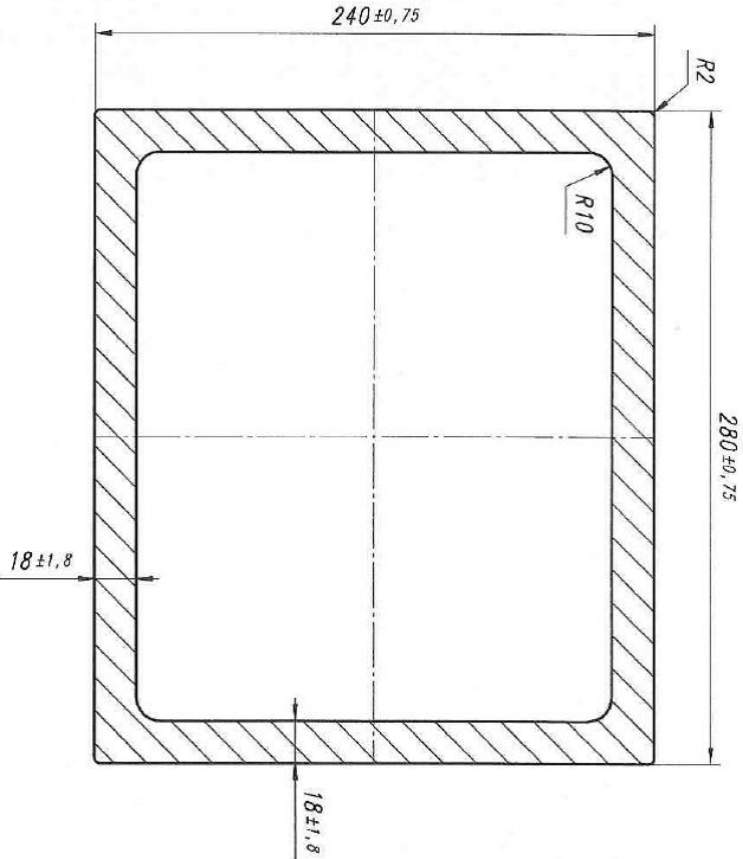
Bezeichnung	GFK-Querschnitt	Sensorfaser	Anmerkung
SENS-A-0xx	-diverse-	-keine-	Vorversuche
SENS-B-0xx	GFK-Rundstab, pultrudiert, unidirektional verstärkt, Ø 3mm, Faservolumengehalt 60%, Epoxy-Vinylesterharz, Aushärtetemperatur (Einstellung): 90°C	BAM, Acrylatbeschichtung, 1 Sensor (0°-Orientierung)	erste Pultrusionsversuche, Lage der Sensorfaser noch unbestimmt im Querschnitt, Harzzufuhr ein- und ausschaltbar zur einfacheren Ankopplung
SENS-B-1xx		BAM, Polyimidbeschichtung, 1 Sensor (0°-Orientierung)	
SENS-B-2xx		Fibersensing, Acrylatbeschichtung, 1 Sensor (0°-Orientierung)	
SENS-C-0xx	GFK-Rechteckprofil, handlaminiert (ITKE), 3 Lagen Gelege, 1 Lage Wirrfasermatte, 3 Lagen Gelege, 50 x 7 mm ² , Faservolumengehalt ca. 40%, ungesättigtes Polyesterharz	Fibersensing, Acrylatbeschichtung, 2 Sensoren (0° / + 45° - Orientierung)	Handlamine, Bauteil mit ähnlichem Faseraufbau wie pultrudiertes Hohlprofil von Röchling (280 x 240 x 18 mm)
SENS-C-1xx		Fibersensing, Acrylatbeschichtung, 3 Sensoren (0° / + 45° / -45° - Orientierung)	
SENS-C-2xx		Fibersensing, Acrylatbeschichtung, 4 Sensoren (0° / + 45° Orientierung), jeweils an Ober- und Unterseite (Biegung)	
SENS-D-0xx	GFK-Rechteckprofil, pultrudiert (ITV), unidirektional verstärkt, 21 x 5 mm ² , Faservolumengehalt 60%, Epoxy-Vinylesterharz, Aushärtetemperatur (Einstellung): 125°C	Fiberware, kein Sensor, SM9 (Acrylatbeschichtung)	reine Faserversuche zur Untersuchung der Coatings Herstellung: 20.10.2010
SENS-D-1xx		Fiberware, kein Sensor, G50 (Polyimidbeschichtung)	
SENS-E-0xx SENS-E-1xx	Komplexes Gelege, ohne Kunststoff		Applikationsversuche bei der Gelegeherstellung ohne Einbau in der Pultrusion
SENS-F-0xx	GFK-Rechteckprofil, pultrudiert (ITV), unidirektional verstärkt, 21 x 5 mm ² , Faservolumengehalt 60%, Harzsystem: Aropol FS 8963, Aushärtetemperatur (Einstellung): 125°C	Fiberware, kein Sensor, SM9 (Acrylatbeschichtung)	reine Harzversuche zur Untersuchung einer besseren Verbindung mit dem Coating Herstellung: 20.10.2010
SENS-G-11-51	GFK-Rechteckprofil, pultrudiert (ITV), unidirektional verstärkt, 21 x 5 mm ² , Faservolumengehalt 60%, Vinylesterharz, Aushärtetemperatur (Einstellung): 125°C	Fiberware, kein Sensor, G50 (Polyimidbeschichtung) SENS-G-11: 1547 (an ITKE) SENS-G-21: 1561 (an BAM) SENS-G-31: 1532 (an BAM) SENS-G-41: 1525 (an BAM) SENS-G-51: 1530 (an BAM)	Proben mit Gitter : L = ca. 400mm; Proben ohne Gitter: L = ca. 1000mm Bei allen Varianten Herstellung: 19.10.2010

Bezeichnung	GFK-Querschnitt	Sensorfaser	Anmerkung
SENS-G-61-71	GFK-Rechteckprofil, pultrudiert (ITV), unidirektional verstärkt, 21 x 5 mm ² , Faservolumengehalt 40%, Vinylesterharz, Aushärtetemperatur (Einstellung): 125°C	SENS-G-61: 1540 (an BAM) SENS-G-71: 1535 (an ITKE)	Proben mit Gitter : L = ca. 400mm; Proben ohne Gitter: L = ca. 1000mm (nur bei Variante 61) Herstellung: 18.10.2010
SENS-H-01 bis SENS-H-0	GFK-Rechteckprofil, pultrudiert (ITV), unidirektional verstärkt, 21 x 5 mm ² , Faservolumengehalt 60%, Harzsystem: Aropol FS 8963, Aushärtetemperatur (Einstellung): 125°C	Kein Sensor Faser: SM1310/125AC SENS-H-01 (rote Schrift): SENS-H-02 (rote Schrift): SENS-H-03 (rote Schrift): SENS-H-04 (rote Schrift): SENS-H-05 (rote Schrift): SENS-H-06 (blaue Schrift): SENS-H-07 (blaue Schrift): SENS-H-08 (blaue Schrift): SENS-H-09 (blaue Schrift):	L = ca. 400mm; Abzugsgeschwindigkeit und Tropfzeit (TZ): 0,3 m/min ; TZ<30 min 0,3 m/min ; TZ<30 min 0,2 m/min ; TZ<30 min 0,2 m/min ; TZ<30 min 0,1 m/min ; TZ<30 min 0,1 m/min ; TZ>30 min 0,1 m/min ; TZ>30 min 0,1 m/min ; TZ>30 min 0,1 m/min ; TZ>30 min
SENS-I-01 bis SENS-I-0	GFK-Rechteckprofil, pultrudiert (ITV), unidirektional verstärkt, 21 x 5 mm, Faservolumengehalt 60%, Harzsystem: Aropol FS 8933, Aushärtetemperatur (Einstellung): 125°C	Kein Sensor Faser: SM1310/125AC SENS-I-010 (rote Schrift): SENS-I-011 (rote Schrift): SENS-I-012 (rote Schrift): SENS-I-013 (blaue Schrift):	L = ca. 400mm; Abzugsgeschwindigkeit und Tropfzeit (TZ): 0,1 m/min ; TZ<30 min 0,1 m/min ; TZ<30 min 0,1 m/min ; TZ<30 min 0,1 m/min ; TZ>30 min
SENS-K-001 SENS-K-002	GFK-Rechteckprofil, pultrudiert (ITV), unidirektional verstärkt, 21 x 5 mm, Faservolumengehalt 60%, Harzsystem: Aropol FS 8963	Kein Sensor Faser mit HTAC-Coating	Versuche zur Verbindung zwischen Harz und Coating Herstellung: 03.02.2011
SENS-K-103		Temp-FBG $\lambda=1552\text{nm}$ FBG $\lambda=1558\text{nm}$ Pt100 Faser mit HTAC-Coating	Messungen während der Pultrusion Herstellung: 03.02.2011
SENS-K-004 SENS-K-005		Kein Sensor Keine Faser	Einbettversuch Herstellung: 03.02.2011
SENS-L-101	GFK-Rechteckprofil, pultrudiert (ITV), unidirektional verstärkt, 21 x 5 mm, Faservolumengehalt 60%, Harzsystem: Aropol DT3-LV	FBG $\lambda=1558\text{nm}$ Faser mit Standardacrylat-Coating Faser mit HTAC-Coating	Versuche zur Verbindung zwischen Harz und Coating Herstellung: 03.02.2011
SENS-L-002 bis SENS-L-004		Fasern mit Standardacrylat-Coating Faser mit HTAC-Coating	
SENS-M-001	Platte pultrudiert (RÖCH) (b= ca. 400 mm, t= ca. 2mm) mit seitlicher Aufkantung; Acrylharz mit Füllstoffen, Rezeptur Nr. 633, Matten + Rovings, Fasern nass eingezogen	Sensor an der Oberfläche, ohne FBG, mit 2-lagigem HTAC Coating	= Profil „633 oben“
SENS-M-101		Sensor in Mittellage ohne FBG, mit 2-lagigem HTAC Coating	= Profil „633 Mitte“

Bezeichnung	GFK-Querschnitt	Sensorfaser	Anmerkung
SENS-N-001	Rechteckrohr pultrudiert (RÖCH) 35 x 30, t= ca. 3mm, ungesättigtes Polyesterharz mit Füllstoffen, Rezeptur Nr. 85, Matten+Gelege, Fasern trocken eingezogen	Sensor an der Oberfläche, ohne FBG, mit 2-lagigem HTAC Coating	= Profil „85 oben“
SENS-N-101		Sensor in Mittellage, ohne FBG, mit 2-lagigem HTAC Coating	= Profil „85 Mitte“
SENS-P-001	massives Formteil pultrudiert (RÖCH) (ca. 50 x 20mm), Vinylesterharz ohne Füllstoffe, Rezeptur Nr. 573, Rovings, Fasern nass	Sensor an der Oberfläche, ohne FBG, mit 2-lagigem HTAC Coating	= Profil 573 oben“
SENS-P-101		Sensor in Mittellage, ohne FBG, mit 2-lagigem HTAC Coating	= Profil 573 Mitte“
SENS-Q-101	Massives Formteil pultrudiert (RÖCH), 25 x 19 mm, Vinylesterharz ohne Füllstoffe, Rezeptur Nr. 482, Rovings („Profil 1“)	2 Sensorfasern (SF1 und SF3), 2-lagiges HTAC Coating, mit je einem FBG, parallel eingebettet, $\lambda=1525\text{nm}$; SF1 (FBG1): Ziehturmfaser „Einzel DGT, PR2011_05/26_02“, SF3 (FBG3): Recoating-Faser	Zuschnitt max. 400 mm lang, für Untersuchungen BAM (+ evtl. ITKE)
SENS-Q-002	Herstellung: 08.06.2011	Profilabschnitt ohne FBG, aber mit Patchkabel und Spleißschutz der beiden Sensorfasern	für Ankopplungsversuche Fiberware
SENS-Q-003		Profilabschnitt ohne FBG, aber mit den beiden Sensorfasern	für Mikroskop. Untersuchungen BAM
SENS-Q-204	Massives Formteil pultrudiert (RÖCH), 25 x 19 mm, Vinylesterharz ohne Füllstoffe, Rezeptur Nr. 482, nur Rovings („Profil 2“)	2 Sensorfasern (SF2 und SF4), 2-lagiges HTAC Coating, mit je einem FBG, parallel eingebettet, $\lambda=1530\text{nm}$; SF2 (FBG2): Ziehturmfaser „Einzel DGT, PR2011_05/26_03“; SF4 (FBG4): Recoating-Faser	Längerer Zuschnitt für Untersuchungen ITKE
SENS-Q-005	Herstellung: 08.06.2011	Profilabschnitt ohne FBG, aber mit Patchkabel und Spleißschutz der beiden Sensorfasern	für Ankopplungsversuche Fiberware
SENS-Q-006		Profilabschnitt ohne FBG, aber mit den beiden Sensorfasern	für mikroskop. Untersuchungen BAM
SENS-R-101	U-Profil 72 x 240 x 72 mm, 8 mm Wandstärke,	V1: 2 Sensorfasern gerade auf Gelege kaschiert (SAERTEX), V104736-..., D. 14267/01	Zuschnitt von 650 mm Länge für Temperatur- und Zugversuche (ITKE)
SENS-R-002	Mischaufbau: Verstärkung durch Matten (CFM), Gelege und Rovings,	Sensorfasern zwischen 1. und 2. Gelegelage; Ziehturm-Sensorfasern: PR2011_05 / 26_04 und 26_05	Abschnitt vor FBG-Bereich für mikroskop. Untersuchungen (BAM)
SENS-R-003	Vinylesterharz (in diesem Fall schwarz eingefärbt), Rezeptur Nr. 400		Abschnitt hinter FBG-Bereich für mikroskop. Untersuchungen (BAM)
SENS-R-204	Herstellung: 27.06.2011	V2: 2 Sensorfasern gerade auf Gelege kaschiert (SAERTEX), V104737-..., D. 14268/01	Zuschnitt von 650 mm Länge für späteren Temperatur- (BAM) und Zugversuche (ITKE)
SENS-R-005		Sensorfasern zwischen 1. und 2. Gelegelage; Recoating-Sensorfasern BG04 und BG05	Abschnitt vor FBG-Bereich für mikroskop. Untersuchungen (BAM)

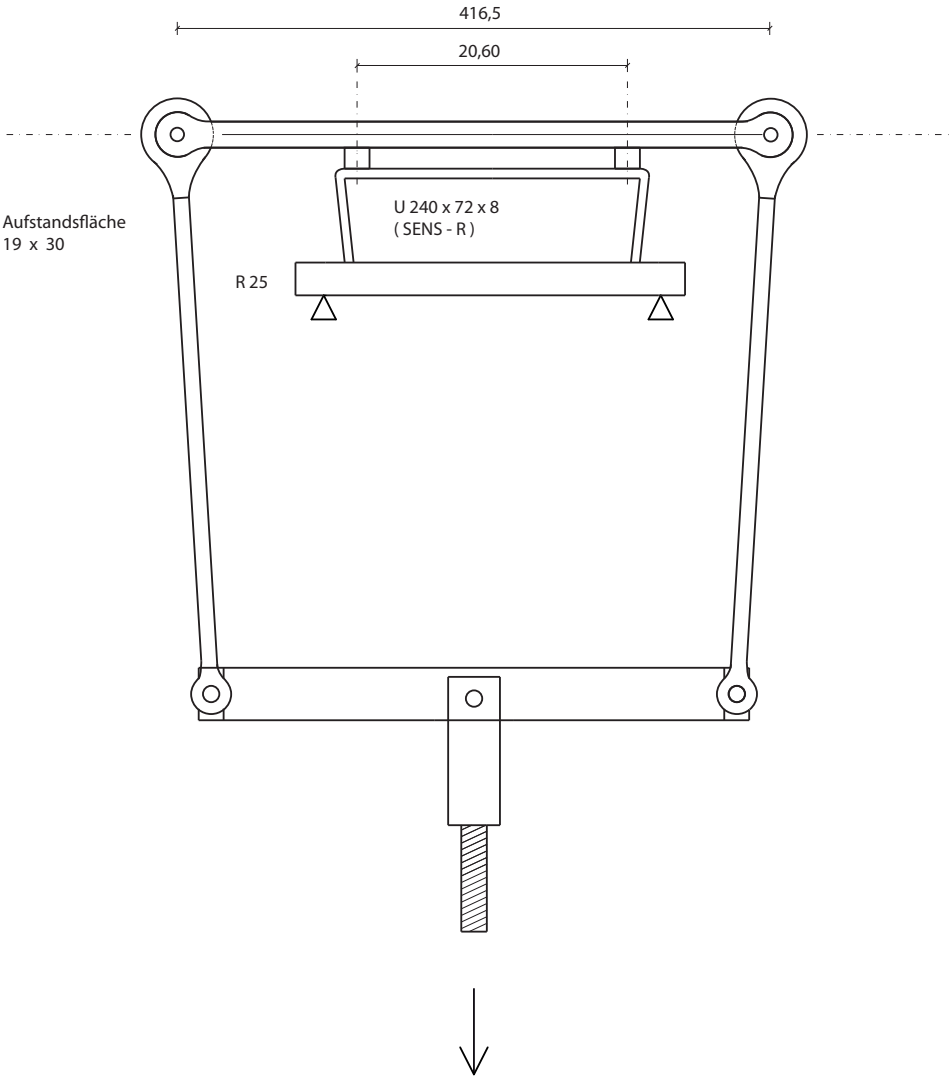
Bezeichnung	GFK-Querschnitt	Sensorfaser	Anmerkung
SENS-R-006			Abschnitt hinter FBG-Bereich für mikroskop. Untersuchungen (BAM)
SENS-R-007		Sensorfaser ohne FBG „Zick-Zack“ auf Gelege getuftet (ITV), Sensorfaser zwischen 1. und 2. Gelegelage	Tufting- „Probe 1“
SENS-R-008			Tufting- „Probe 2“
SENS-S-101	Winkelprofil 100 x 60 mm, 3 mm Wandstärke,		„Array 1“
SENS-S-201	ungesättigtes Polyesterharz mit Füllstoffen, Rezeptur Nr. 168, Herstellung: 18.10.2011	Sensorfaser mit jeweils 5 FBG wurde im „Zick-Zack“-Muster auf Gelege getuftet (ITV); im Profil liegt die Sensorfaser zwischen der 1. und 2. Gelegelage	„Array 2“; Profilabriss zwischen Ende S-101 und anfang S-201; Sensorfaser wurde dabei evtl. beschädigt
SENS-T-001	Ovales Profil, EP-Harz, nur Rovings; Herstellung 5.7.2011	Sensorfaser ohne FBG, mit 2-lagigem HTAC Coating	Zur Untersuchung der Anbindung Fasercoating – Harzsystem (BAM)
SENS-U-001	GFK-Rundstab, pultrudiert, unidirektional verstärkt, Ø 6mm, Faservolumengehalt 60%, Aropol FS 8933, Aushärtetemperatur (Einstellung): 125°C Tempem: 2h30 bei 130°C	Kein Sensor Faser: SM1310/125AC	Harz war bei Verlassen des Werkzeugs nicht richtig ausgehärtet --> Abzug wurde für 60-120s gestoppt, während die getränkten Fasern sich im Werkzeugbefanden.
SENS-U-002	GFK-Rundstab, pultrudiert, unidirektional verstärkt, Ø 6mm, Faservolumengehalt 60%, Aropol FS 8933, Aushärtetemperatur (Einstellung): 125°C	Kein Sensor Faser: SM1310/125AC	Trotzdem waren die Proben noch etwas weich, so dass sie in der Raupe Druckstellen bekommen haben.
SENS-U-003	GFK-Rundstab, pultrudiert, unidirektional verstärkt, Ø 6mm, Faservolumengehalt 50%, Aropol FS 8933, Aushärtetemperatur (Einstellung): 125°C Tempem: 2h30 bei 130°C	Kein Sensor Faser: SM1310/125AC	Die getemperten Proben haben sich beim Tempem gelblich verfärbt.
SENS-U-004	GFK-Rundstab, pultrudiert, unidirektional verstärkt, Ø 6mm, Faservolumengehalt 50%, Aropol FS 8933, Aushärtetemperatur (Einstellung): 125°C	Kein Sensor Faser: SM1310/125AC	Beide Probleme sind möglicherweise auf eine Alterung des Harzes zurück zu führen.
SENS-U-005	Wie oben, jedoch 20%, Aropol FS 8933, Aushärtetemperatur (Einstellung): 125°C Tempem: 2h30 bei 130°C	Kein Sensor Faser: SM1310/125AC	
SENS-U-006	GFK-Rundstab, pultrudiert, unidirektional verstärkt, Ø 6mm, Faservolumengehalt 20%, Aropol FS 8933, Aushärtetemperatur (Einstellung): 125°C	Kein Sensor Faser: SM1310/125AC	

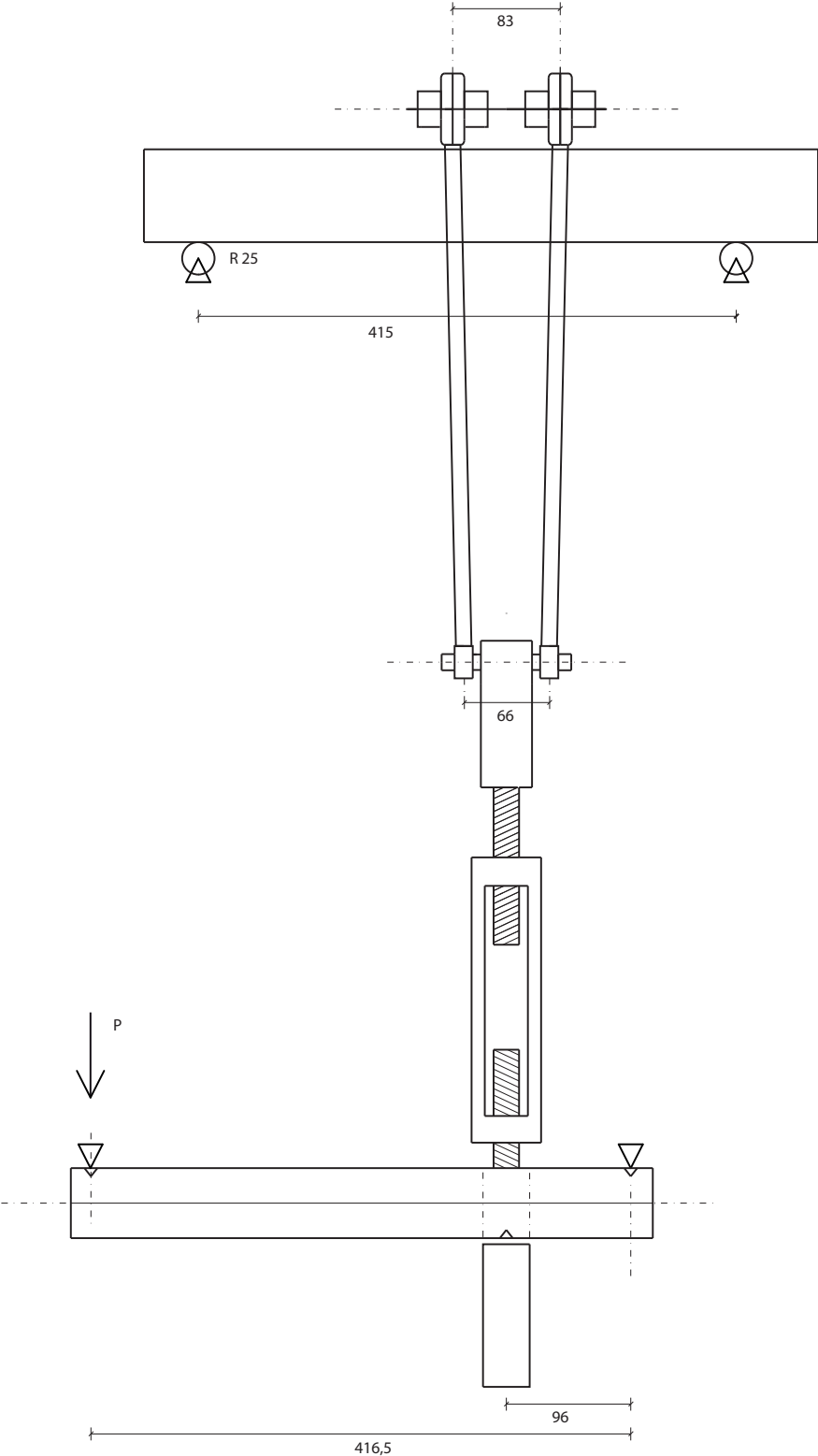
Anhang 3: Querschnitt des Grundsystems – Hohlprofil 280 x 240 x 18



Anhang 4: Versuchsaufbau für Kriechversuch

Versuchsaufbau entwickelt für Biegekriechversuch an Probekörper R, nicht durchgeführt





Anhang 5: Temperaturgang von Dehnungsmessstreifen

Wird ein elektronischer Dehnungsmessstreifen einer Temperaturänderung unterworfen, ergibt sich laut Herstellerangabe eine scheinbare Dehnung von:

$$\varepsilon_s(T[^\circ\text{C}]) = 7,5 + 0,49 \cdot T - 5,09 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 2,36 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 \pm 0,3 \mu\text{m/m}$$

Der verwendete DMS hat einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $16,0 \cdot 10^{-6}/\text{K}$, der Wärmeausdehnungskoeffizient des Laminats ist jedoch abweichend, weshalb eine Überlagerung beider Effekte stattfindet. Bei einem Versuch an einem Handlaminat wurde ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem Messergebnis des DMS und der Temperaturdifferenz festgestellt (Abbildung A5-1). Der Effekt könnte jedoch auch aus Nachhärtung des Laminats verursacht werden.

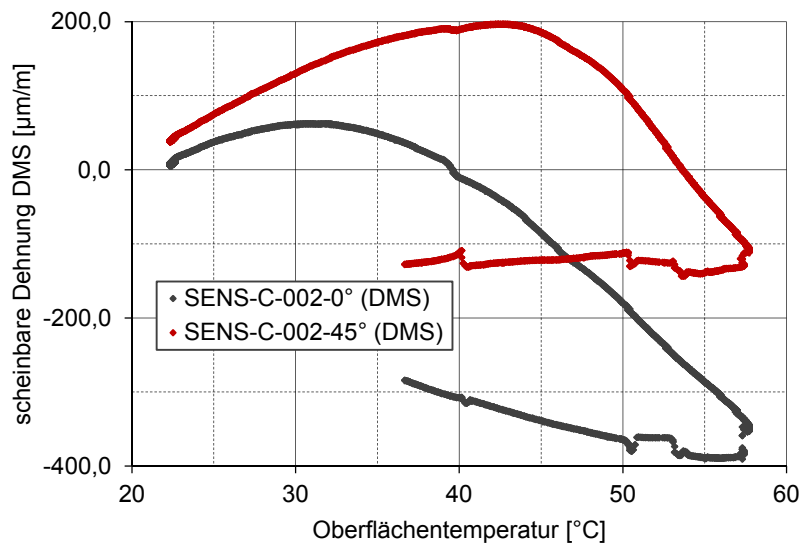


Abbildung A5-1: Scheinbare Dehnung infolge Temperaturdifferenz für das Handlaminat C-002, Start bei 22,6 °C

Bei einem Pultrudat wurde hingegen ein linearer Temperaturgang des oberflächlich angebrachten DMS aufgezeichnet (Abbildung A5-2). Dies gilt jedoch erst nach dem Durchfahren des ersten Temperaturzyklus, scheinbar findet hier im ersten Zyklus ebenfalls Nachhärtung statt.

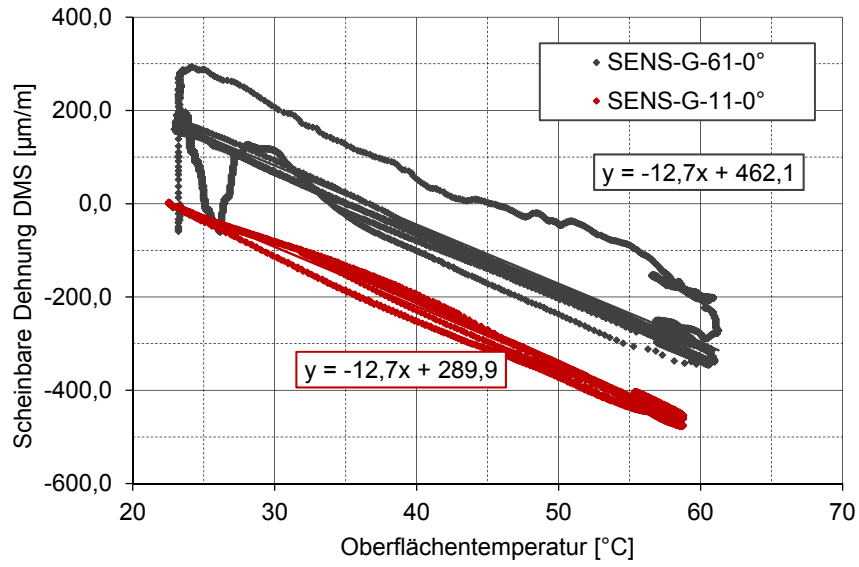


Abbildung A5-2: Scheinbare Dehnung bei Temperaturveränderung, bei den unidirektional verstärkten Pultrudaten der Serie G, die unregelmäßigen Kurven von G-61 entsprechen dem ersten Temperaturzyklus

Anhang 6: Fehleranalyse beim neuronalen Netz

Zur Optimierung der Eingangsdaten für das neuronale Netz wird eine Fehleranalyse durchgeführt. Basierend auf der ersten Programmierung wird verglichen, wie weit die prognostizierten Output-Werte von den Sollwerten, also den Eingangsdaten, abweichen. Abbildung A6-1 zeigt für die drei Output-Variablen x , y , G die Summenhäufigkeit des relativen Fehlers bezüglich der Intervallbreite I , dabei ist $I(x) = 2,0$ m, $I(y) = 0,4$ m, $I(G) = 1,5$ kN. Die gewählte Abstufung liegt bei 0,01, also 1%.

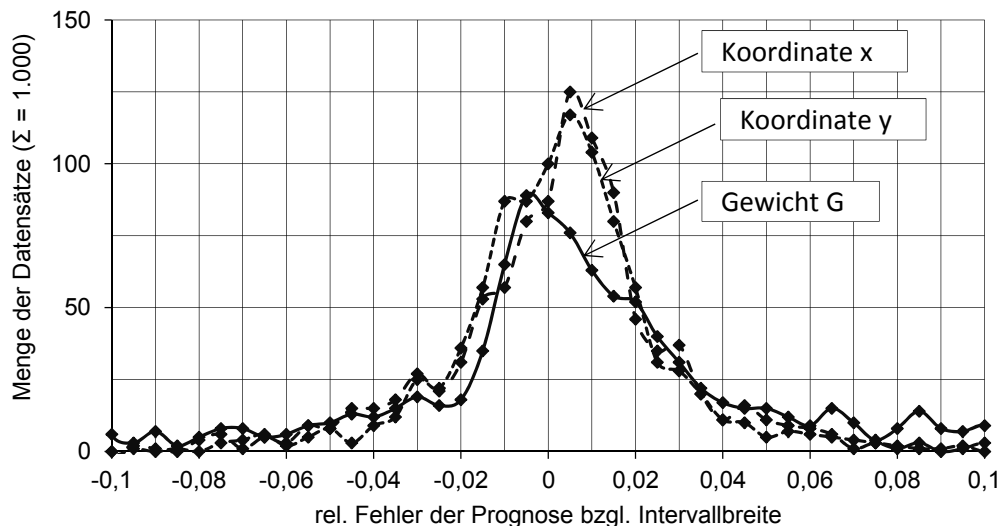


Abbildung A6-1: Relativer Fehler der Prognose mit Randbereichen

Die Analyse zeigt, dass hohe Abweichungen dann auftreten, wenn die Belastung in Auflagernähe aufgebracht wird oder wenn eine geringe Lastgröße angesetzt wird. Die Intervalle werden dementsprechend angepasst und das neuronale Netz neu trainiert. Es ergibt sich eine wesentlich bessere Prognose (Abbildung A6-2). Zur besseren Vergleichbarkeit ist der relative Fehler wiederum auf die ursprüngliche Intervallbreite bezogen, s.o.

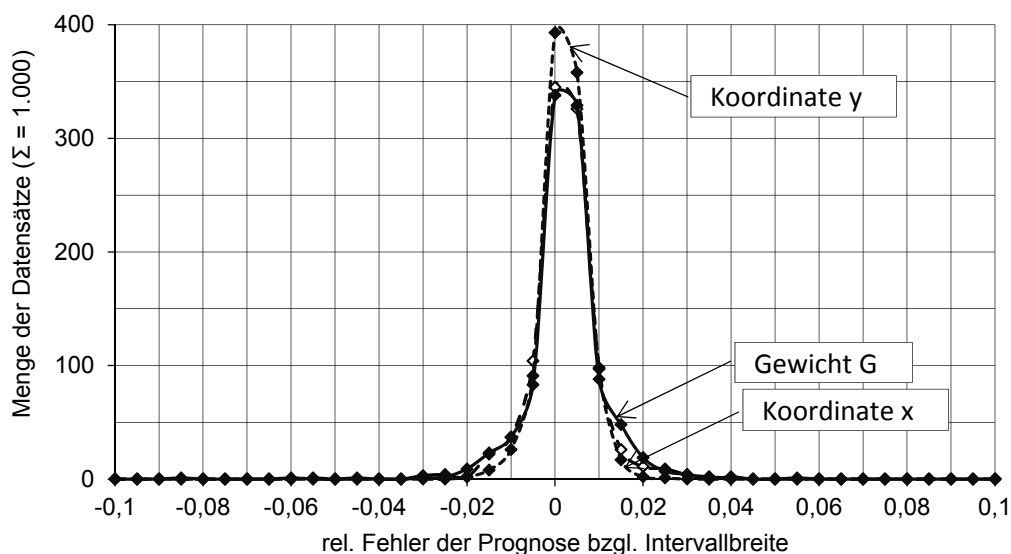


Abbildung A6-2: Relativer Fehler der Prognose ohne Randbereiche

Anhang 7: Laminatwerte weiterer untersuchter Profile

Die beschriebenen Probekörper wurden im Rahmen des begleitenden Entwicklungsprojekts produziert, konnten jedoch aus technischen Gründen nicht für die Bauteilversuche der vorliegenden Arbeit herangezogen werden.

Probekörper Serie R

Bei dem großformatigen U-Profil (240 x 72 8) besteht die Faserverstärkung zu 64% aus unidirektionaler Lage in Bauteillängsrichtung. Das Profil ist überwiegend aus Direktrovings aufgebaut mit flankierenden Wirrfasermatten an den Oberflächen. Auf der Außenseite des Profils wurde hier jedoch eine Wirrfasermatte durch ein Gelege ersetzt (Tabelle A7-1). Auf das Gelege werden vorab die Sensorfasern appliziert. Da der Faseraufbau von dem Standardaufbau abweicht, ergibt sich eine nicht unerhebliche geometrische Imperfektion.

Tabelle A7-1: Laminataufbau der Probekörper SENS-R⁷⁸

No. k	Bez.	Dicke t [mm]	G.-Masse g [g/m ²]	VoL-% [%]	Orient. φ [°]	Dichte ρ [g/cm ³]	Mechanische Kennwerte					
							E ₁ [N/mm ²]	E ₂ [N/mm ²]	G ₂₁ [N/mm ²]	ν_{21} [-]	$\alpha_{T,1}$ [10 ⁻⁶ /K]	$\alpha_{T,2}$ [10 ⁻⁶ /K]
1	G-M	0,75	500	27	-	1,56	9125	9125	2902	0,57	19,3	19,3
2	G-UD	0,3	360	48	0	1,85	35236	9367	3643	0,29	7,1	38,5
3	M	0,7	450	27	-	1,56	9125	9125	2902	0,57	19,3	19,3
4	M	0,7	450	27	-	1,56	9125	9125	2902	0,57	19,3	19,3
5	UD	3,45	4600	53	0	1,85	36704	9367	3643	0,29	7,4	38,5
6	M	0,7	450	27	-	1,56	9125	9125	2902	0,57	19,3	19,3
7	M	0,7	450	27	-	1,56	9125	9125	2902	0,57	19,3	19,3
8	M	0,7	450	27	-	1,56	9125	9125	2902	0,57	19,3	19,3
Gesamt		8,0	7710	39	div	1,70	22221	10506	3249	0,46	9,5	29,8
							13274	10086	<-- Biegung			

Harz: Vinylesterharz mit Farbpigmenten; Welligkeit der Gelege: 0,96

Auf das Gelege sind zwei Sensoren in Längsrichtung appliziert. Die Sensorfasern liegen auf der UD-Seite des Gewebes, also im eingebauten Zustand zwischen der 2. und 3. Einzelschicht. Betrachtet man den Querschnitt, liegen beide Sensorfasern ca. 1mm von der Außenseite, einmal in der Schwerachse und einmal ca. 20 mm vom Ende des kurzen Schenkels entfernt. Der Aufbau ist für die Aufzeichnung der Biegebeanspruchung entlang der schwachen Achse entworfen. Ein Probekörper ist mit Ziehturmgittern bestückt (R-101), während ein weiterer mit recoateten Gittern versehen ist (R-204). Dabei soll unter anderem ermittelt werden, ob die Art der Einschreibung des Brechungsgitters einen Einfluss auf die Messergebnisse hat.

⁷⁸ Aufgrund der behinderten Querdehnung wird der effektive E-Modul in Querrichtung E₂ größer als alle Einzelwerte der Einzelschichten. Die Wirrfaserschichten haben mit 0,57 eine sehr hohe Querdehnzahl, die Querdehnung wird aber bei Belastung in y-Richtung durch die hohe Steifigkeit der UD-Fasern in x-Richtung behindert.

Probekörper Serie S

Das zu untersuchende L-Profil 100 x 60 hat einen unsymmetrischen Faseraufbau mit 3 aufeinander geschichteten Gelegen bei einer Gesamtstärke von ca. 3 mm. Aufgrund des unsymmetrischen Querschnitts ist auch der unsymmetrische Faseraufbau vertretbar, da das Profil ohnehin nur sehr bedingt unter Normalkraftbeanspruchung eingesetzt werden kann. Die Laminateneigenschaften in Längs- und Querrichtung sind weniger divergierend als bei dem zuvor betrachteten U-Profil.

Tabelle A7-2: Laminataufbau der Probekörper SENS-S⁷⁹

No. k	Bez.	Dicke t [mm]	G.-Masse g [g/m ²]	Vol-%	Orient. φ [°]	Dichte ρ [g/cm ³]	Mechanische Kennwerte					
							E ₁ [N/mm ²]	E ₂ [N/mm ²]	G ₂₁ [N/mm ²]	ν ₂₁ [-]	α _{T,1} [10 ⁻⁶ /K]	α _{T,2} [10 ⁻⁶ /K]
1	G-M	0,75	500	27	-	1,56	10219	10219	3270	0,56	27,4	27,4
2	G-UD	0,3	360	48	0	1,85	35635	11837	4414	0,30	8,6	50,1
3	G-M	0,75	500	27	-	1,56	10219	10219	3270	0,56	27,4	27,4
4	G-UD	0,3	360	48	0	1,85	35635	11837	4414	0,30	8,6	50,1
5	G-M	0,75	500	27	-	1,56	10219	10219	3270	0,56	27,4	27,4
6	G-UD	0,3	360	48	0	1,85	35635	11837	4414	0,30	8,6	50,1
Gesamt		3,2	2580	33	div	1,63	17658	11811	3597	0,50	15,9	37,3
							18159	11863	<-- Biegung			

Harz: Ungesättigtes Polyesterharz mit Kreide; Welligkeit der Gelege: 0,96

Aufgrund des gleichmäßigen Faseraufbaus der beiden Schenkel, können der Schwerpunkt und Schubmittelpunkt in guter Näherung aus rein geometrischen Überlegungen ermittelt werden. Damit kann der Schubmittelpunkt am Schnittpunkt der beiden Achsen angenommen werden.

Die Sensoren werden ebenfalls vorab auf eines der eingesetzten Gelege appliziert. In diesem Fall erfolgt die Verlegung nicht Fertigungsrichtung, sondern alternierend in +/- 45° Richtung dazu. Diese Anordnung dient dazu, neben Dehnungen in Bauteilrichtung auch Dehnungen aus Torsion aufzeichnen zu können.

⁷⁹ vgl. 78

Anhang 8: Tabellarische Berechnungsergebnisse aus Kapitel D 2.3

Last	System		ϵ_{11}	ϵ_{22}	ϵ_{33}	Proportionalitätsfaktor ¹⁾	
			[10 ⁻³]	[10 ⁻³]	[10 ⁻³]	[nm/10 ⁻³] bzw. [nm/K]	
Längsdruck 11	0	blank	-1,000	0,160	0,160	1,228	
	100	ohne Coating	-1,000	0,174	0,174	1,236	
	150	Grundsystem	-1,000	0,159	0,159	1,227	
	151a	150, VE, 40%-F.vol.	-1,000	0,160	0,160	1,228	
	151b	150, VE, 60%-F.vol.	-1,000	0,159	0,159	1,227	
	200	Harztasche	-1,000	0,156	0,162	1,227	± 0,001
	305	Zwischenschicht	-0,999	0,178	0,152	1,230	± 0,003
	355	o.Coat., Zwischens.	-1,000	0,213	0,157	1,243	± 0,006
	356	355, red. Faser-%	-1,000	0,200	0,159	1,239	± 0,005
	405	ovales Coating	-0,999	0,157	0,160	1,226	
500	sternförmiges C.	-1,000	0,159	0,159	1,227		
Querdruck 22	0	blank	0,160	-1,000	0,160	-0,437	± 0,135
	100	ohne Coating	0,110	-0,318	0,059	-0,203	± 0,044
	150	Grundsystem	0,110	-0,151	0,010	-0,167	± 0,019
	151a	150, VE, 40%-F.vol.	0,073	-0,108	0,013	-0,111	± 0,014
	151b	150, VE, 60%-F.vol.	0,082	-0,137	0,014	-0,130	± 0,018
	200	Harztasche	0,110	-0,106	0,007	-0,154	± 0,013
	305	Zwischenschicht	0,221	-0,167	-0,010	-0,304	± 0,018
	355	o.Coat., Zwischens.	0,220	-0,327	0,031	-0,339	± 0,042
	356	355, red. Faser-%	0,216	-0,244	0,012	-0,315	± 0,030
	405	ovales Coating	0,110	-0,130	0,018	-0,158	± 0,017
Querdruck 23	500	sternförmiges C.	0,110	-0,073	-0,073	-0,169	± 0,000
Querdruck 33	0	blank	0,160	0,160	-1,000	-0,437	± 0,135
	100	ohne Coating	0,110	0,059	-0,318	-0,203	± 0,044
	150	Grundsystem	0,110	0,010	-0,151	-0,167	± 0,019
	151a	150, VE, 40%-F.vol.	0,073	0,013	-0,108	-0,111	± 0,014
	151b	150, VE, 60%-F.vol.	0,082	0,014	-0,137	-0,130	± 0,018
	200	Harztasche	0,109	-0,040	-0,185	-0,192	± 0,017
	305	Zwischenschicht	0,124	0,010	-0,121	-0,174	± 0,015
	355	o.Coat., Zwischens.	0,124	0,005	-0,231	-0,209	± 0,027
	356	355, red. Faser-%	0,124	0,032	-0,192	-0,189	± 0,026
	405	ovales Coating	0,110	0,007	-0,184	-0,178	± 0,022
500	sternförmiges C.	0,109	-0,012	-0,135	-0,168	± 0,014	
Temperaturdifferenz	0	blank	0,000	0,000	0,000	0,0123	
	100	ohne Coating	0,665	0,358	0,358	0,0176	
	150	Grundsystem	0,666	-0,234	-0,234	0,0212	
	151a	150, VE, 40%-F.vol.	0,779	-0,172	-0,172	0,0221	
	151b	150, VE, 60%-F.vol.	0,600	-0,253	-0,253	0,0206	
	200	Harztasche	0,681	-0,386	-0,022	0,0212	± 0,0004
	305	Zwischenschicht	0,961	-0,328	-0,236	0,0248	± 0,0001
	355	o.Coat., Zwischens.	0,954	0,208	0,315	0,0215	± 0,0001
	356	355, red. Faser-%	1,137	0,106	0,274	0,0240	± 0,0002
	405	ovales Coating	0,667	-0,296	-0,153	0,0212	± 0,0002
500	sternförmiges C.	0,666	-0,218	-0,218	0,0211		

1) bei Doppelbrechung sind zwei Werte angegeben, Mittelwert und Streuung

2) die spannungslosen Dehnungen der Quarzglasfaser sind in der zu Grunde gelegten Formel eingerechnet

Anhang 9: Faseroptische Messung während Pultrusion

Ein erster Orientierungsversuch bei der Herstellung des Probekörpers B-000, einem rein unidirektional verstärktem Rundstab mit Durchmesser 3 mm, zeigt eine Wellenlängenverschiebung von 0,8 nm (Abbildung A9-1). Dies entspricht einer Dehnung von $0,65 \cdot 10^{-3}$ oder einer Temperaturveränderung von $65 \text{ }^\circ\text{C}$ – dabei wird von einer blanken Faser ausgegangen. Die Einstellung der Reaktionstemperatur lag bei ca. $80 \text{ }^\circ\text{C}$, bei ca. $20 \text{ }^\circ\text{C}$ Raumtemperatur.

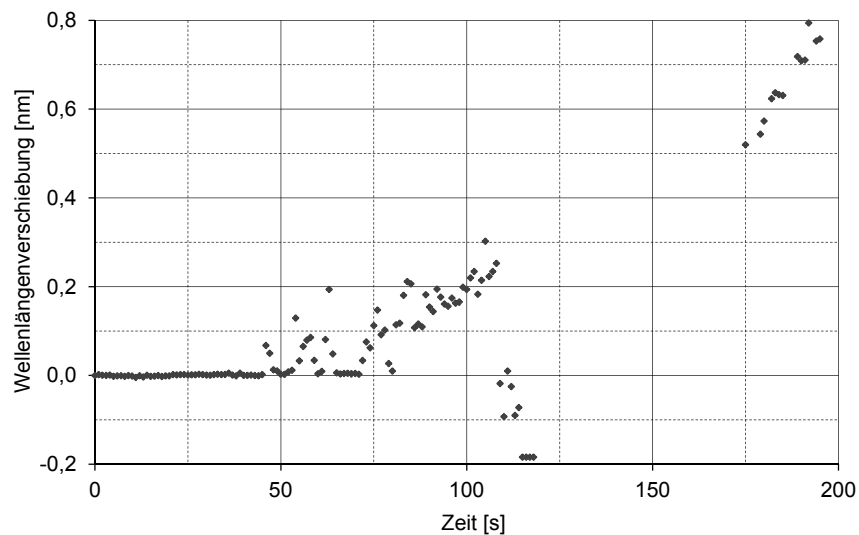


Abbildung A9-1: Veränderung der Wellenlänge eines Sensors während des Einbaus bei der Pultrusion, Probekörper B-000

Es ist erkennbar, dass bereits kleine Dehnungen das Messergebnis deutlich beeinflussen. Außerdem geht das Signal vorübergehend verloren, da die Faser über eine Rolle geleitet wird, deren Durchmesser geringer ist als der optisch zulässige Biegeradius. Die zunächst festgestellte Verringerung der Wellenlänge könnte aus einer Abkühlung bei Durchlaufen des kühleren Harzbades verursacht sein.

Anhang 10: Querschnitt des Demonstrators in Kapitel E 1.3

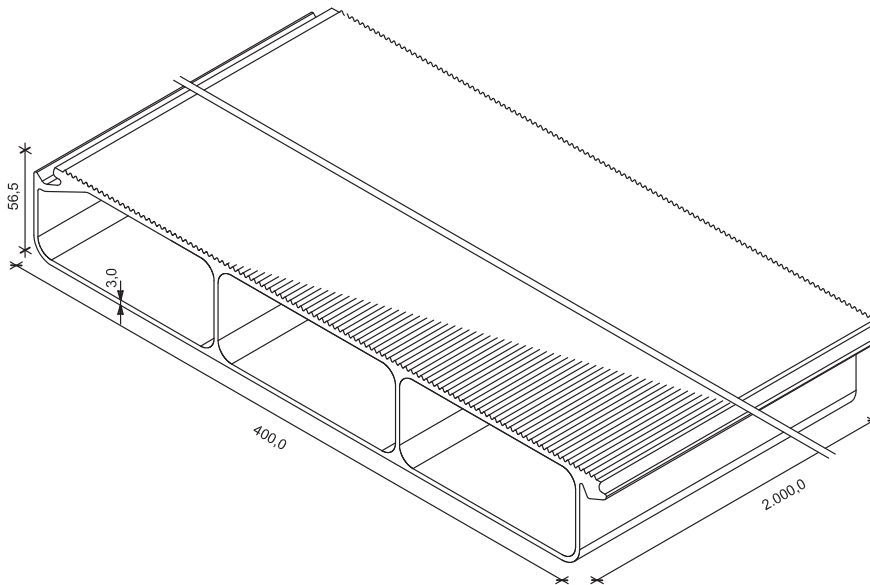


Abbildung A10-1: Querschnitt des betrachteten pultrudierten Profils, im Untergurt sind zwei Wirrfasermatten und das Sensortextil platziert, auf welches vorab die optischen Fasern fixiert wurden

Anhang 11: Überblick der untersuchten Probekörper in Kapitel D 3

Typ	Laminat	Sensoren	Querschnittsgeometrie	DMS	FOS	Versuch
Sensorfaser ohne Coating	C-0xx, C-1xx (Mischlaminat)	mittig, 0° und 45°		C-001, C-002, C-101	C-002, C-102	D 3.2.1 Zugversuch D 3.2.2 Schweißlast D 3.2.3 Kriechen D 3.3.1 Quer Lam. D 3.3.2 Quer Dick. D 3.4 Temperatur
	C-2xx (Mischlaminat)	oben und unten, 0°		---	C-201 C-202	C-001, C-002, C-101 C-002, C-102 C-002 C-101, C-102 C-101 C-002, C-101, C-102
Sensorfaser mit Coating	B (unidirektional)	zentrisch, 0°		B-001	---	---
	G (unidirektional)	zentrisch, 0°		G-11, G-61	G-11 G-61	G-11, G-61 G-11, G-61

Lebenslauf

Markus Gabler

- | | |
|-------------|---|
| 1977 | Geboren in Gunzenhausen (Franken) |
| 1997 | Allgemeine Hochschulreife in Roth b. Nürnberg |
| 1997 – 2003 | Studium Bauingenieurwesen an der Universität Stuttgart (Diplom)
Konstruktiver Ingenieurbau, Abschlussnote: „Mit Auszeichnung bestanden“ |
| 2003-2007 | Mitarbeit bei Knippers Helbig Ingenieure, Stuttgart - New York
Projektleiter für Glas-Stahl-Konstruktionen und Bauwerke des Hochbaus |
| seit 2007 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers |
| seit 2009 | Freiwilliges Mitglied der Ingenieurkammer Baden-Württemberg |
| seit 2009 | Mitglied des Bauüberwachungsvereins (BÜV)
Arbeitsgruppe „Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen“ |
| seit 2010 | Mitglied im DIN-Normenausschuss zu faserverstärkten Kunststoffen im Bauwesen |
| seit 2011 | Mitglied der „International Association for Bridge and Structural Engineers“ (IABSE) |

