



**FASE1+2, Entwicklung faseroptischer Sensoren**

Prof. Dr. Martin Löffler-Mang

**Inhaltsverzeichnis**

1. Zusammenfassung .....	2
2. Einleitung .....	2
3. Ziele des Projekts .....	3
4. Dämpfungsmessung an Faserschleifen .....	4
5. Fasern unter Druck .....	5
6. Biegesensoren .....	6
7. Ausblick .....	9
8. Autoren .....	9
9. Literaturverzeichnis .....	10



## FASE1+2, Entwicklung faseroptischer Sensoren

Prof. Dr. Martin Löffler-Mang

### 1. Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung kostengünstiger, universell einsetzbarer faseroptischer Sensoren auf der Basis von handelsüblichen Lichtwellenleitern zur Messung mechanischer Größen wie z.B. Zug, Druck, Biegung und Torsion an unterschiedlichen Objekten. Besondere Beachtung findet hierbei die umfassende Überwachung der Objekte von der Feststellung des aktuellen Zustandes bis zu einer permanenten Langzeitüberwachung.

Als erstes wurden in 2002 grundlegende Versuche mit Lichtwellenleitern durchgeführt, um die für sensorische Anwendungen nutzbaren Eigenschaften systematisch zu erfassen. Im zweiten Schritt werden in 2003 für zwei konkrete Fälle (Dehnungsmessung an einem Gaskessel, Brückenüberwachung) Prototypen entwickelt und gebaut, die schließlich im dritten Schritt in der praktischen Anwendung getestet und verbessert werden sollen.

### 2. Einleitung

Die Glasfaser als modernes Medium der Datenübertragung ist heute in der stark expandierenden IT-Welt nicht mehr wegzudenken. Dies ist in den technischen Vorteilen und in den weit gesunkenen Herstellungskosten der Glasfaser begründet.

Die Lichtführung in einer Faser erfolgt durch Totalreflexion an einer Grenzfläche zwischen Kern- und Mantelmaterial. In der Datentechnik werden möglichst stabile und von äußeren Einflüssen unabhängige Übertragungseigenschaften gefordert. Fast täglich kommen neue Faserarten auf den Markt, die für ganz spezielle Anwendungen der Datentechnik angepaßt sind. Dabei nimmt man in Kauf, dass sich die Faser in anderen Bereichen eher negativ verhält.

Genau dies ist der Ansatzpunkt für Glasfasersensoren. Beeinflussungen des Lichtweges und einzelner Parameter sind erwünscht, können gemessen und ausgewertet werden. Damit sind Umgebungseinflüsse auf die Übertragungsgröße Licht erfassbar.

Jede Glasfaser reagiert grundsätzlich auf Biegung, Zug, Druck und Torsion, wobei die Reaktionsstärke auch von der optischen Anregung abhängt. Es stehen verschiedene optophysikalischen Phänomene zur Verfügung, die ausgenutzt werden können: Änderung der Transmissionseigenschaften (Dämpfung), Änderung der Lichtwellenlänge (Farbe), Laufzeiteffekte (Reflektometer), Wechselwirkung zwischen verschiedenen Ausbreitungsmoden (Interferometer), Änderung der Polarisation. Während die Dämpfungsmessung relativ einfach durchzuführen ist, ist zur Erfassung der anderen Parameter teilweise eine aufwendige Messtechnik notwendig.

Der Projektleiter möchte an dieser Stelle danken zum einen der HTW für die freundliche finanzielle Unterstützung des Projektes FASE1+2. Zum anderen aber und vor allem möchte er den Studierenden danken, die neben ihrem Studium in regelmäßiger Arbeit an FASE1+2 mitgearbeitet haben. Dies waren in alphabetischer Reihenfolge: P. Frey, T. Philippi und M. Schmidt.



## FASE1+2, Entwicklung faseroptischer Sensoren

Prof. Dr. Martin Löffler-Mang

### 3. Ziele des Projekts

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung kostengünstiger, universell einsetzbarer faseroptischer Sensoren auf der Basis von handelsüblichen Lichtwellenleitern zur Messung mechanischer Größen wie z.B. Zug, Druck, Biegung und Torsion an unterschiedlichen Objekten. Besondere Beachtung findet hierbei die umfassende Überwachung der Objekte von der Feststellung des aktuellen Zustandes bis zu einer permanenten Langzeitüberwachung.

Als erstes sind grundlegende Versuche mit Lichtwellenleitern geplant, um die für sensorische Anwendungen nutzbaren Eigenschaften systematisch zu erfassen. Im zweiten Schritt werden für zwei konkrete Fälle (Dehnungsmessung an einem Gaskessel, Brückenüberwachung) Prototypen entwickelt und gebaut, die schließlich im dritten Schritt in der praktischen Anwendung getestet und verbessert werden sollen.

Zunächst muss ein Messaufbau für die Grundlagenversuche erstellt werden, der auch nach dem Wechsel der Prüflinge (Fasersensoren) reproduzierbare Ergebnisse liefert. Dazu sind einerseits mechanische Aufbauten notwendig, andererseits eine Grundausstattung an verschiedenen Fasern und Kopplern. Zentraler Punkt beim Aufbau ist die Beschaffung der notwendigen Messtechnik. Generell besteht der Messaufbau aus einem optischen Sender, dem Prüfling, einem optischen Empfänger und einem Leistungsmessgerät. Es gibt dafür kommerzielle Produkte, die durch ihren modularen Aufbau geeignet gekoppelt werden können. Geplant zur Beschaffung sind drei verschiedene Lasermodule als Sender, ein hochempfindlicher Empfänger, ein Präzisionsinstrument zur Leistungsmessung und ein schnelles Oszilloskop.

Im zweiten und dritten Schritt des Projektes werden systematische Versuche mit verschiedenen Prüflingen durchgeführt, und zwar als reine Dämpfungsmessungen (integral). Ziel dieses Abschnittes ist die Erstellung einer Datenbank, in welcher die Eigenschaften bzw. das Verhalten von Lichtwellenleitern katalogisiert ist. Dabei muss untersucht werden, welchen Einfluss der Krümmungsradius einer Faserschleife auf die Dämpfung hat, wie sich der Druck auf eine Faser zwischen zwei Platten auswirkt, ob die Oberflächen der Platten eine Rolle spielen (glatt, rau, hart, weich), wie sich Druck auf Faserkreuzungen auswirkt und das jeweils für verschiedene Fasertypen, Wellenlängen und Temperaturen.

## FASE1+2, Entwicklung faseroptischer Sensoren

Prof. Dr. Martin Löffler-Mang

### 4. Dämpfungsmessung an Faserschleifen

Die ersten Grundlagenversuche wurden an einfachen Faserschleifen durchgeführt. Zur Verfügung standen drei verschiedene Monomodefasern und Laserlicht mit zwei verschiedenen Wellenlängen, 1310 nm und 1550 nm. Die Testfasern wurden mit Standard-Steckern ausgerüstet, so dass das Licht einfach ein- und wieder ausgekoppelt werden konnte. Die Abschwächung des Signals konnte auf 0,1 dB genau gemessen werden, interpretiert wurden aber erst Unterschiede ab 1 dB.

Die Faserschleifen wurden zunächst einfach auf Millimeterpapier ausgelegt und der jeweilige Durchmesser der Schlaufe zum entsprechenden Dämpfungswert abgeschätzt. Im weiteren Verlauf wurde das Verfahren automatisiert. Mit einem Motor wurde ein Schlitten gleichmäßig bewegt und dabei die Schleife einer eingespannten Faser enger gezogen bzw. weiter geschoben. Der Verfahrensweg wurde als lineare Größe elektronisch erfasst. Diese Anordnung ist in Abbildung 1 und 2 dargestellt.

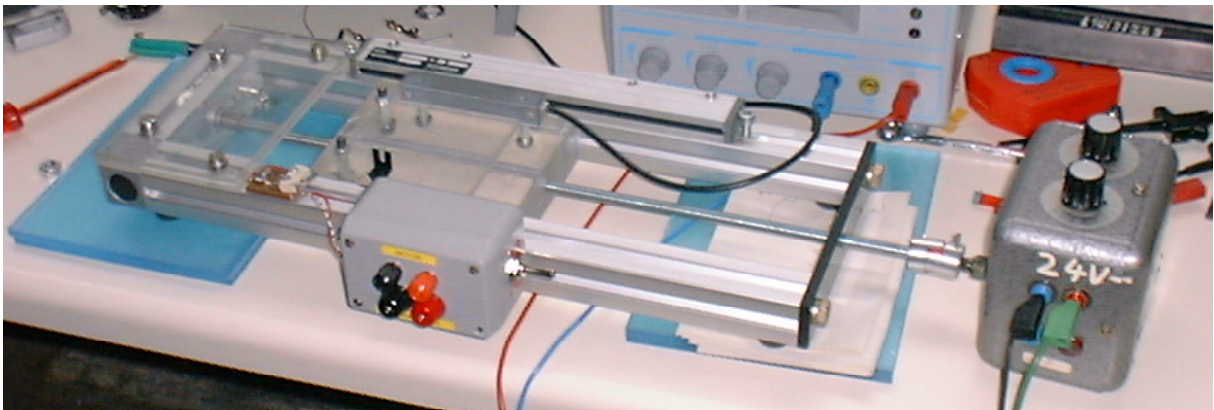


Abb. 1: Versuchseinrichtung zur automatischen Schleifenvariation

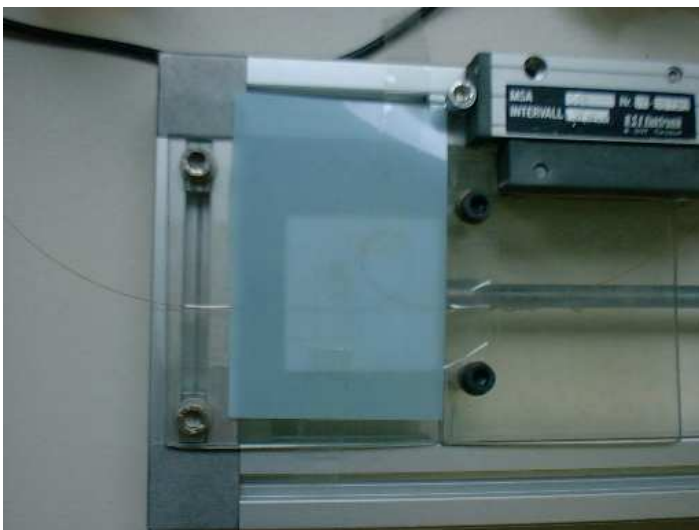


Abb. 2: Faserschleife zwischen Führungsfolie

Mit dieser Anordnung konnten reproduzierbare Ergebnisse gemessen werden. Ein Beispiel einer Messreihe ist in Abbildung 3 dargestellt. Es handelt sich um die Daten einer Messreihe, bei der eine Schleife zweimal zusammengezogen und anschließend wieder aufgeschoben

## FASE1+2, Entwicklung faseroptischer Sensoren

Prof. Dr. Martin Löffler-Mang

wurde. Zu erkennen ist, dass die Ergebnisse gut aufeinander fallen, die Dämpfung ist also im wesentlichen eine Funktion des Schleifendurchmessers. Außerdem ist der Zusammenhang recht gut linear, und das über einen Bereich von fast 30 dB.

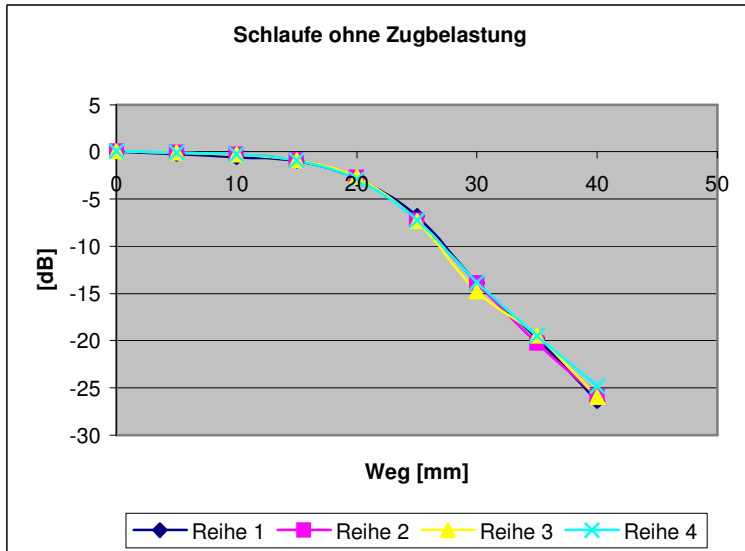


Abb. 3: Dämpfungsmessungen an Schleife

Auf der Basis dieser Messungen erscheint eine Ableitung eines Sensorprototypen zur Messung von Ausdehnungen im weiteren Verlauf des Projektes sinnvoll machbar.

### 5. Fasern unter Druck

Für die Druckversuche wurde eine weitere Vorrichtung hergestellt. Diese ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Fasern konnten zwischen zwei Platten unterschiedlichen Materials mit unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten (hart, weich, rau, glatt) eingelegt werden. Sowohl für gerade und mäandernde Fasern ohne Kreuzung, als auch für Faserschleifen mit Kreuzungen konnten auf die Apparatur definiert Gewicht aufgelegt werden, bei Bedarf auch eng lokal begrenzt.



Abb. 4: Vorrichtung für Druckversuche mit Fasern

## FASE1+2, Entwicklung faseroptischer Sensoren

Prof. Dr. Martin Löffler-Mang

Die Ergebnisse sämtlicher Messreihen mit Fasern unter Druck zeigten allerdings einen nur geringen Einfluß der Dämpfung vom aufgebrachten Gewicht (kleiner als 2 dB) für Fasern ohne Kreuzung. Im Gegensatz dazu waren Schleifen mit Kreuzungen sehr druckempfindlich und bei praktisch allen Versuch „zerschnitten“ sich die Fasern schon bei recht geringen Gewichten an der Kreuzungsstelle.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass aus den hier gewonnenen Erkenntnissen die weitere Anwendung der Methode von Fasern unter Druck im laufenden Projekt höchstwahrscheinlich nicht zum Einsatz in einem Sensorprototyp kommen wird.

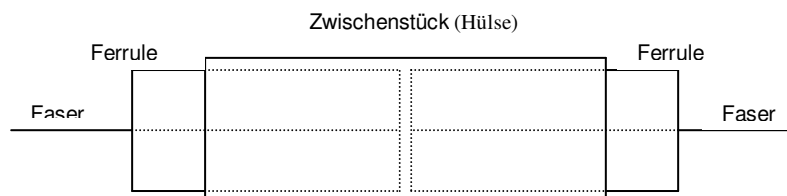
### 6. Biegesensoren

Ein großer Bereich der Grundlagenversuche wurde der Entwicklung eines Prototyps für einen Biegesensor vorbehalten.

Um einen Fasersensor zu konstruieren, der die Verbiegung zwischen zwei Faserenden detektiert, muss zuerst einmal klar werden, welche Effekte an der Verbindungsstelle zwischen zwei Glasfasern auftreten und wie groß deren Auswirkung auf das spätere Messsignal, die Dämpfung, ist. Die Übertragungsdämpfung zwischen zwei Fasern ist von drei Faktoren abhängig:

- Abstand zwischen den Fasern
- lateraler Achsversatz
- Kippwinkel

An Hand von Diagrammen des Online Lexikons der Firma Siemens wurde untersucht, wie stark sich diese drei Faktoren auf eine Verbindung zweier Fasern auswirken. Aus den Überlegungen ging hervor, dass es realisierbar ist, mit Hilfe einer Steckerverbindung eine Verbiegung mit einer sehr guten Auflösung zu messen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass neben dem Kippwinkel auch die beiden anderen Effekte zur Dämpfung beitragen. Es ist wichtig, dies zu verhindern bzw. zu minimieren. Das im folgenden beschriebene System Stift-Hülse-Stift bietet sich an, um es als Grundlage für einen Sensoraufbau zu verwenden, denn das präzise Zwischenstück (Hülse) und die hochgenauen Ferrulen (Steckerinnenteile) sind dafür ausgelegt, gerade solche Effekte zu eliminieren. Abbildung 5 veranschaulicht das Prinzip Stift-Hülse-Stift.



**Abb. 5:** Prinzipaufbau des Sensors

Zur Weiterführung der Versuche wurde eine Vorrichtung konstruiert, die folgendes leistet:

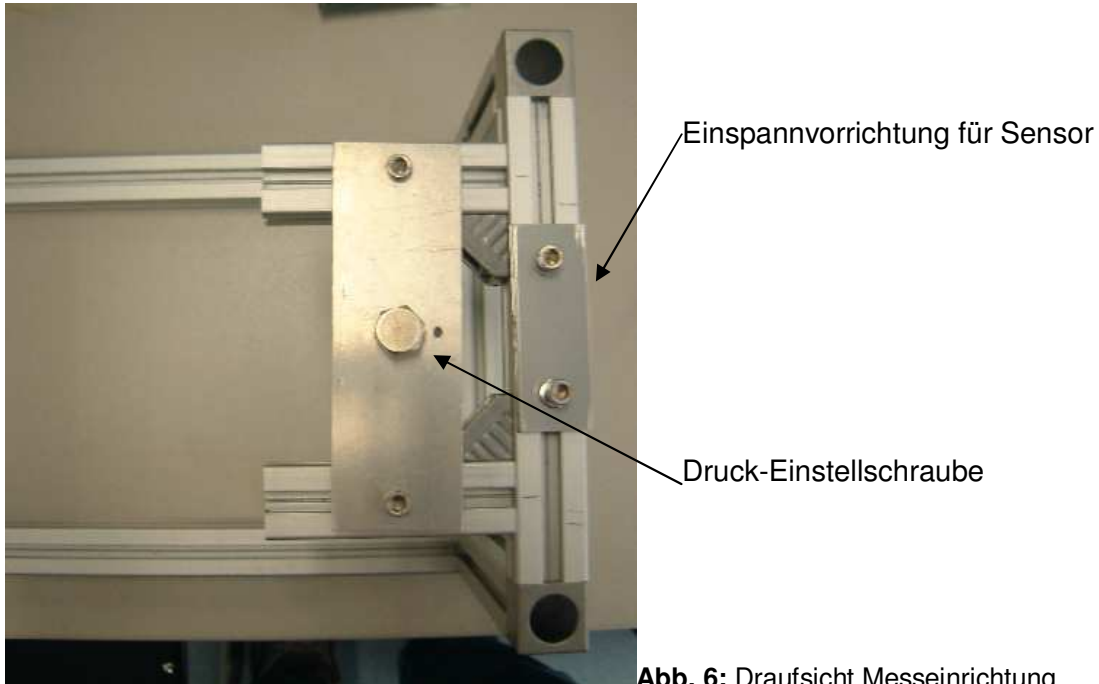
- präzise mechanische Druckbeaufschlagung auf die Steckverbindung auch über einen längeren Zeitraum;
- seitliches Ausweichen des Steckers soll vermieden werden;
- schneller Auf- und Umbau soll möglich sein.

Die Messeinrichtung verfügt über eine Einspannvorrichtung, die es erlaubt einen Teil des Sensors fest einzuspannen, sowie über ein Teil, das es ermöglicht, Druck über einen langen Zeitraum auf den Sensor auszuwirken (Draufsicht in Abbildung 6). Zur Einspannung dienen zwei Aluminiumplatten, die jeweils mit einer Nut versehen sind. Zwei Schrauben ermöglichen es, die

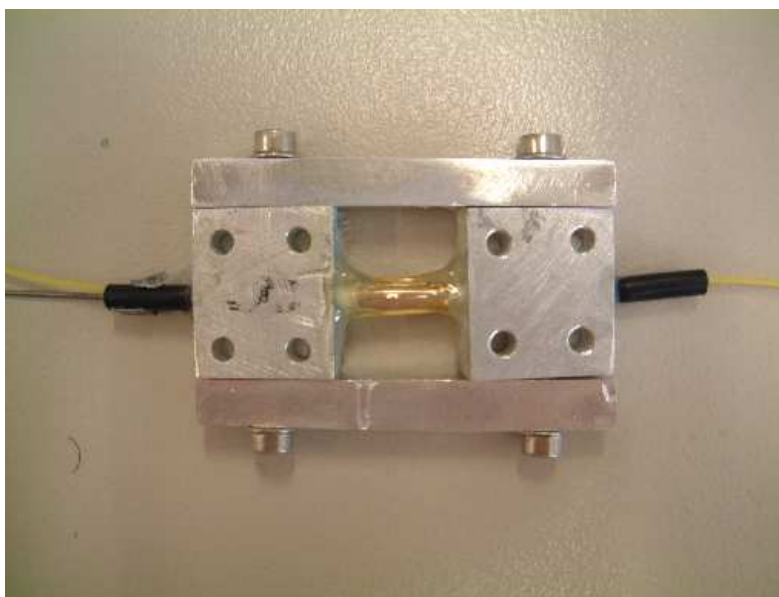
## FASE1+2, Entwicklung faseroptischer Sensoren

Prof. Dr. Martin Löffler-Mang

beiden Platten gegeneinander zu spannen, damit der Sensor fest eingespannt wird. Der Druck wird mittels einer Schraube auf das nichteingespannte Ende des Sensors ausgeübt.



In dieser Messeinrichtung wurden verschiedene Vorprodukte und auch der schließlich hergestellte Sensorprototyp (Abbildung 7) eingespannt und definiert die Dämpfung in Abhängigkeit vom Biegewinkel bestimmt.



Neben den Einzelmessungen der Dämpfung wurden auch Dauerversuche mit statischer und dynamischer Last durchgeführt. Auch nach mehreren hundert Verbiegungen waren die gemessenen Dämpfungen immer noch reproduzierbar und zeigten keine nennenswerte Drift. Außerdem wurden die Umwelteinflüsse Temperatur und Feuchtigkeit untersucht. Im Temperaturbe-

## FASE1+2, Entwicklung faseroptischer Sensoren

Prof. Dr. Martin Löffler-Mang

reich von 20° bis 70° C zeigte sich keine Abhängigkeit der aufgenommenen Dämpfungswerte und selbst unter Wasser blieb der Sensorprototyp unbeeinträchtigt. In allen Fällen war die Abhängigkeit im wesentlichen, wie in Abbildung 8 dargestellt.

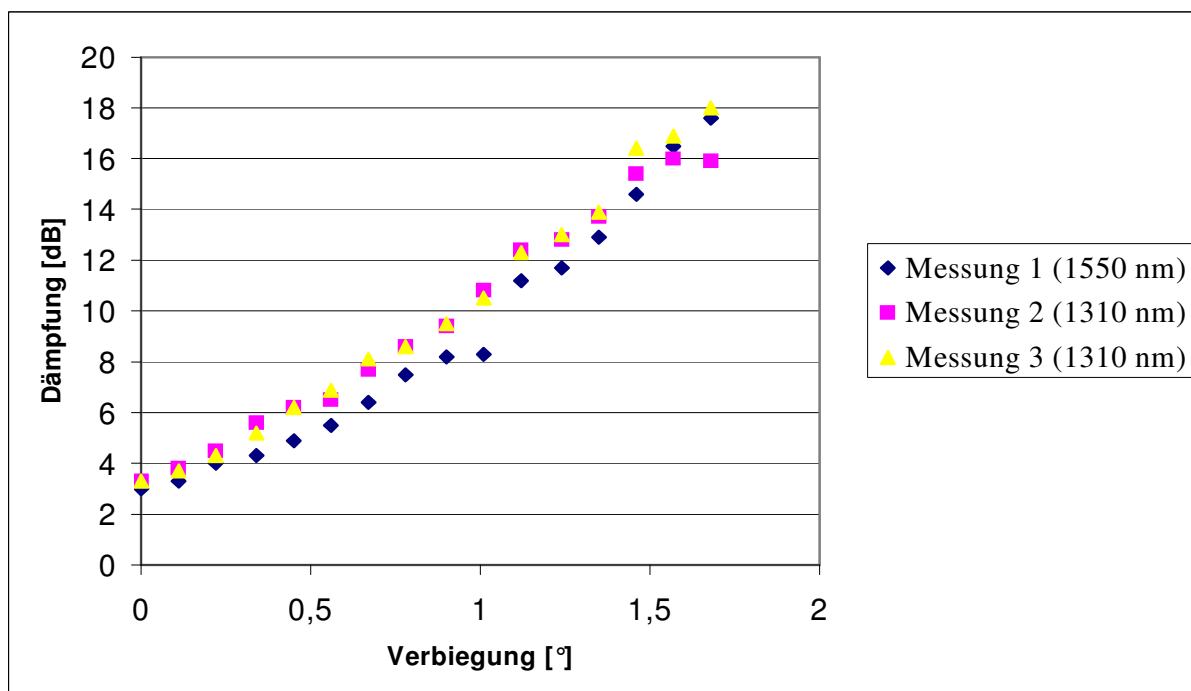


Abb. 8: Dämpfungsmessung als Funktion des Biegewinkels am Sensorprototyp

Der Anstieg der Messwerte ist annähernd linear. Die Empfindlichkeit beträgt etwa 6 dB für das erste Grad. Im Bereich der „größeren“ Winkel sind die Messwerte zwar nicht mehr so linear, aber ebenfalls noch gut verwertbar. Die Dämpfung bei 1550 nm Wellenlänge des einfallenden Lichts ist etwas geringer als bei 1310 nm.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass es möglich ist, aus Standardkomponenten der LWL-Technik Sensoren zu konstruieren. Es zeigte sich, dass diese Sensoren über eine sehr gute Auflösung verfügen können. Die Auflösung und die Linearität hängen insbesondere von der Qualität der Faserstirnfläche ab. Das ergab sich aus den Versuchen mit Stirnflächen, die von Hand poliert wurden, im Vergleich zu denjenigen, die industriell gefertigt worden waren.

Der Aufbau von Vierfach-Kombiferrulen zur weiteren Steigerung der Empfindlichkeit scheiterte an der mangelnden Handhabbarkeit der kleinen Teile. Insbesondere das kurze Stück reiner Faserkern ist äußerst schwierig zu montieren und anschließend zu polieren. Schon kleinste mechanische Einwirkungen führten zum Zerbrechen des dünnen Glases.

Der letztendlich konstruierte Sensorprototyp dient als gute Basis, auf der weitere Verbesserungen möglich sind. Er verfügt über einen annähernd linearen Messbereich von 0° – 1,5° bei einer Empfindlichkeit von etwa 6 dB pro Grad. Als auffallend positiv ist festzuhalten, dass äußere Einflüsse, wie Temperatur, Feuchtigkeit, Schmutz etc., kaum eine Auswirkung auf das Messsignal haben. Die geringe Temperaturdrift wird sich bei den späteren Sensoren leicht kompensieren lassen.



## FASE1+2, Entwicklung faseroptischer Sensoren

Prof. Dr. Martin Löffler-Mang

### 7. Ausblick

Aus den Ergebnissen der vorangegangenen Versuche sollen in den laufenden Projektschritten die Fasereigenschaften und Parameter ausgewählt werden, die für die geplanten Anwendungen am besten geeignet sind. Die Anregung zur ersten Anwendung stammt vom TÜV Saarland, die genauen Anforderungen bei der Überwachung der Ausdehnung von Gaskesseln müssen noch festgelegt werden. Um das zu überwachende Objekt im Labor simulieren zu können, muss zunächst ein Dummy entwickelt und gebaut werden, z.B. ein mit Druckluft aufblasbarer Kunststoffbehälter oder ein dehnbarer Metallring. Außerdem wird die Entwicklung und der Bau eines Sensor-Prototyps in Angriff genommen. Hierbei handelt es sich im wesentlichen um die äußere Umhüllung der Glasfaser und um geschickte mechanische Verbindungen zum Prüfobjekt. Nach den Vorversuchen im Labor soll der Sensor-Prototyp schließlich im Feldversuch an realen Kesseln eingesetzt und optimiert werden.

Analog wird die zweite Anwendung angegangen, die Überwachung von Brückenbauwerken in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Straßenwesen des Saarlandes. Wie die Belastung auf diese Sensoren im Labor simuliert werden kann, ist derzeit noch nicht ganz klar. In diesem Fall wird dem Feldversuch mit der Erprobung und Optimierung der Sensor-Prototypen eine noch größere Bedeutung zukommen. Das Straßenamt hat bereits vorgeschädigte Bauwerke zur Installation von Sensoren vorgeschlagen und auch die Bereitschaft signalisiert, bei einem Neubau entsprechende Einbauten zu ermöglichen.

### 8. Autoren

#### Projektleiter

Prof. Dr. Martin Löffler-Mang  
Labor: Optische Mess- und Lasertechnik  
Fachbereich: GIS  
E-Mail: loeffler-mang@htw-saarland.de  
Homepage: <http://www.htw-saarland.de/fb/gis/sft>  
Tel. 049-681-5867-247  
Fax 049-681-5867-414

#### Studierende

P. Frey, T. Philippi und M. Schmidt

#### Kooperationspartner

Dipl.-Ing. R. Blinn  
FCS GmbH, Bexbach



## FASE1+2, Entwicklung faseroptischer Sensoren

Prof. Dr. Martin Löffler-Mang

### 9. Literaturverzeichnis

Blinn und Wilhelm:  
LWL-Verbindungstechnik.  
Ausarbeitung Nr. 414/98 (1998), Gesellschaft für Hochfrequenzmesstechnik mbH, Bexbach

Bludau:  
Lichtwellenleiter in Sensorik und optischer Nachrichtentechnik.  
Springer Verlag (1998), 340 S.

Donges und Noll:  
Lasermesstechnik.  
Hüthig Verlag (1993), 318 S.

Löffler-Mang:  
Schwingungen und Wellen.  
Skript zur Vorlesung an der HTW (2001)

Löffler-Mang:  
Geometrische Optik.  
Skript zur Vorlesung an der HTW (2002)

Löffler-Mang:  
Sensortechnik II (Optische Sensoren).  
Skript zur Vorlesung an der HTW (2002)

Mohr:  
Fasern und Sensorik.  
in Litfin: Technische Optik in der Praxis, Springer Verlag (1997), 296 S.

Sensfelder:  
Entwicklung und Charakterisierung eines faseroptischen Messsystems zur Erkennung und Ortung von Leckagen in chemikalienhaltigen Anlagen. Dissertation (1997), Universität Karlsruhe

Siemens:  
Halbleiter. Siemens (1990), München

Siemens:  
Online Lexikon (2002)  
[http://w3.siemens.de/solutionprovider/\\_online\\_lexikon/3/12007243.htm](http://w3.siemens.de/solutionprovider/_online_lexikon/3/12007243.htm)

Stöcker:  
Taschenbuch Physik (2002).  
<http://cdroms.digibib-nrw.de/stoecker/>

Young:  
Optik, Laser, Wellenleiter.  
Springer Verlag (1997), 484 S.