

Spektraloptische Messtechnik für Fasergitter-Monitoring-Systeme und Untersuchungen von Mustern und Prototypen für Applikationsuntersuchungen

JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH

07739 Jena

Teilprojektleiter: Jürgen Bauer

Tel.: 03641 65 3602 E-Mail: juergen.bauer@jenoptik.com

Autoren: Elfrun Lembke, Jürgen Bauer

Inhalt

| | | |
|-----|--|------|
| 1 | Einleitung | 3-2 |
| 2 | Aufgaben der JENOPTIK L.O.S. im Verbundprojekt | 3-3 |
| 2.1 | Entwicklung eines einsatzfähigen Messsystems | 3-3 |
| 2.2 | Mechanischer Aufbau | 3-3 |
| 2.3 | Elektronik-Hardware | 3-6 |
| 2.4 | Erhöhung der Messfrequenz | 3-7 |
| 3 | Gerätetests | 3-9 |
| 3.1 | Temperaturverhalten | 3-9 |
| 3.2 | Schwingungs- und Stoßtest | 3-12 |
| 3.3 | StrainTemp-Datenblatt | 3-17 |
| 4 | Applikationen und Marktzugang | 3-19 |
| 4.1 | Vorteile der FGB-Messtechnik | 3-19 |
| 4.2 | Nachteile der FGB-Messtechnik | 3-19 |
| 4.3 | Applikationen | 3-19 |
| 4.4 | Einsatz in Windgeneratoren | 3-22 |
| 5 | Ausblick | 3-24 |

1 Einleitung

Im Rahmen des Verbundprojektes „FAMOS“ bestand die Aufgabe der Jenoptik L.O.S. in der Entwicklung und Testung einer Auswerteeinheit für Faserbraggitter (FBG)-Signale. In Absprache mit den beteiligten Projektpartnern sollte die Auswerteeinheit StrainaTemp folgende Anforderungen erfüllen:

| | |
|--|---------------------------|
| Auflösung der Braggwellenlänge: | 1pm |
| Genauigkeit der detektierten Braggwellenlänge: | <10pm |
| Frequenzbereich 1: | bis 3Hz (quasistatisch) |
| Frequenzbereich 2: | bis 1kHz (quasidynamisch) |
| Anzahl der Messstellen (FaserBraggitter): | >10 |
| Deutliche Kostenreduzierung des Seriengerätes: | < 500€/Messstelle |
| Eignung für den industriellen Einsatz: | IP 50 |

Der Einsatz der FBG Sensoren bei den Projektpartnern erfolgt hauptsächlich in den Anwendungsschwerpunkten Transportsysteme, Energieanlagen, Sprengmesstechnik und Mikrosensorik. Bei der Ausarbeitung der Zielparameter gab es folgende Schnittstellen zu den Projektpartnern:

- alle Partner: Formulierung der Zielparameter für das StrainaTemp (Dynamikbereich, Temperatur, Schnittstellen, Genauigkeit, Auflösung,...)
- JETI: Vorverarbeitung der FBG-Signale im StrainaTemp und Auswertung der Signale (statisch und dynamisch)
- IPHT: Bereitstellen der Fasergitter, Inbetriebnahme und Test des Sensors, Unterstützung bei der Konstruktion (Materialauswahl, Schnittstellen,...)
- Siemens: Testmessungen
- DaimlerChrysler: Testmessungen
- AOS: Gerätetests
- Tetra: neue Applikationen des StrainaTemp in der Mikromechanik
- JENOPTIK L.O.S.: Entwicklung eines einsatzfähigen Messsystems

2 Aufgaben der Jenoptik L.O.S. im Verbundprojekt

2.1 Entwicklung eines einsatzfähigen Messsystems

Die vordringliche Aufgabe der Jenoptik L.O.S. im Verbundprojekt war die beschleunigte Entwicklung einer FBG-Auswerteeinheit StrainaTemp für den Wellenlängenbereich um 820nm. Damit sollten bei den Partnern Untersuchungen zur Applizierung, die Realisierung spezieller Applikationen und Gerätetests durchgeführt werden. Um einen Einsatz in industriellen Applikationen voranzubringen, sollte der Preis pro Gittermessstelle nicht über 500€ liegen. Dabei konnte die Jenoptik L.O.S. auf eigene Erfahrungen mit einem höchstauflösenden abbildenden Gitter und die experimentellen Erfahrungen des IPHT aufbauen. Die Firmen Siemens AG und AOS GmbH stellten Anforderungen an die technischen Parameter und die Kosten.

Aus Kostengründen wurde die Entwicklung eines Messsystems im Wellenlängenbereich von 1,5 μm verzichtet. Da in diesem Wellenlängenbereich vor allem die Detektorkosten (IR-Zeile) sehr hoch sind, konnte mit einer 1,5 μm -Variante der Zielparamester Kosten nicht eingehalten werden.

Der Dynamikbereich des StrainaTemp (Erfassung der Messwerte pro Sekunde) wurde während der Projektlaufzeit erhöht. Während für Temperaturmessungen und bei der Langzeitüberwachung von Bauwerken eine quasistatische Messung (<3Hz) ausreichte, gab es für Dehnungsmessungen auch Applikationen, die einen höheren Dynamikbereich erforderten. Das betraf vor allem Applikationen im Maschinenbau, wo ein Dynamikbereich bis 1kHz erforderlich ist. Bei Windgeneratoren ergaben sich Anforderungen an die Messwernerfassung mit einem Dynamikbereich bis 75Hz. Daher wurde das StrainaTemp auf eine maximale Datenrate von 1kHz ausgelegt.

Bis zu einem Frequenzbereich von 3Hz können alle Spektrenrohdaten vom StrainaTemp zum PC übertragen werden. Dort erfolgt dann die Berechnung der detektierten Braggwellenlänge. In der dynamischen Variante bis 1kHz erfolgt eine geeignete Datenverarbeitung bereits im StrainaTemp, weil die Übertragung aller Rohdaten zum PC über die Schnittstelle nicht mehr möglich ist.

2.2 Mechanischer Aufbau

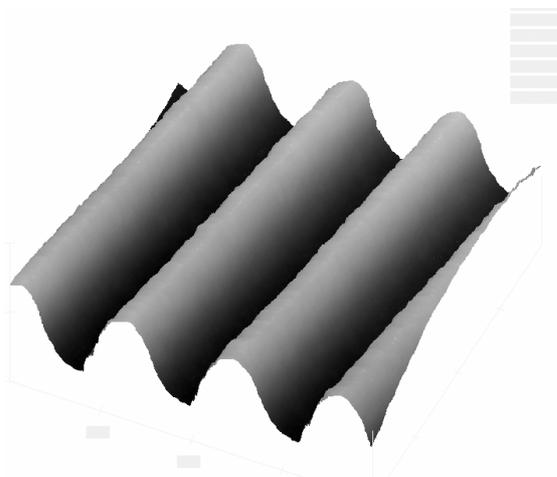


Abb. 1: Aufnahme des hochauflösenden Gitters (Teilbereich)

Das StrainaTemp (siehe Abb.2) befindet sich in einem Metallgehäuse mit den Abmessungen 220 x140 x 50. Die Grundplatte ist über eine Dämmmatte mechanisch von dem Gehäuse getrennt. Auf dieser Grundplatte sind alle für die Funktion des Gerätes wichtigen Bauelemente angebracht.

Hauptkomponente ist dabei das abbildende Gitter (Abb. 1), das sich in einer justierbaren Fassung befindet. Genau ausgerichtet zu diesem Gitter ist die Eingangsfaser, die das vom Bragggitter reflektierte Signal führt. Gespeist wird das StrainaTemp von einer gepigtailten SLD. Das Licht dieser breitbandigen Lichtquelle SLD SL-381-MP1_MiniBUT mit einer Zentralwellenlänge von 823nm und einer Halbwertsbreite von 25nm wird in den Eingang X1 eines X-Faserkopplers eingekoppelt.

An beide Ausgänge Y1 und Y2 des X-Kopplers werden zwei Fasern gespleißt, von denen eine die angeordneten FBGs und die andere ein Referenzgitter oder eine zweite FGB-Anordnung enthält. Die Ausgänge Y1 und Y2 sind über E-2000-Stecker und Kupplungen am StrainaTemp-Gehäuse angebracht. Die E2000-Faserstecker sind lichtdicht und durch eine mechanische Verschlussklappe staubgeschützt.

Die Ferrule an X2 wird in einer Ferrulenjustiervorrichtung so positioniert, dass mittels des abbildenden Gitters der Fasereingang X2 auf eine CCD-Zeile abgebildet wird. Über den Fasereingang X2 wird das Messsignal sowie das Referenzsignal geführt.

Als CCD-Zeile wird die Sony ILX511 mit 2048 Pixeln der Größe 200µm x 14µm eingesetzt. Zur Spektrengebung befindet sich unmittelbar vor der CCD-Zeile eine Zylinderlinse.

Abb. 2 zeigt den schematischen Aufbau des StrainaTemp und Abb. 3 eine fotografische Aufnahme.

Der Aufbau des StrainaTemp wird im wesentlichen von den Abmessungen des Gitters und dessen Objekt- und Bildschnittweite bestimmt. Das StrainaTemp basiert auf einem holographisch hergestellten und anschließend abgeformten, hochauflösenden Gitter der Fa. Carl Zeiss Jena (Abb. 1). Der Einsatz eines höchstauflösenden Gitters mit 1800 Linien mm⁻¹ hat sich nicht bewährt. Zum einen sind die Herstellkosten solcher Gitter deutlich höher, zum anderen ist eine Polarisationsabhängigkeit des höchstauflösenden Gitters von TE/TM 1:1 bei der Gitterfertigung nur schwer einzustellen. Es hat sich gezeigt, dass die Genauigkeitsbegrenzende Komponente nicht das Gitter mit seiner Linienzahl und damit die optische Auflösung ist, sondern die thermischen Belastungen des Gitters und die dadurch entstehenden Temperaturgradienten im StrainaTemp. Ein hochauflösendes Gitter mit 1300 Linien/mm und kleineren Abmessungen erwies sich als die bessere Variante bezüglich thermischer und mechanischer Driften.

Gitterparameter:

Linienzahl: 1300 mm⁻¹

Profil: symmetrisch

Korrektur: für 790nm ... 830nm

Größe: Durchmesser = 30mm, Dicke = 8mm

Schnittweite: ca. 110mm

Bei der Konstruktion und der Montage des StrainaTemp wurde auf die spannungsarme Befestigung der einzelnen Bauelemente Wert gelegt, vor allem auf die spannungsfreie Halterung des hochauflösenden Gitters in einer drehbaren Fassung. Das Aufbringen aller mechanischer Bauelemente auf einer gemeinsamen Grundplatte erfolgt starr und das Einbringen dieser in das kompakte Gehäuse erfolgt über Silikon-

dämmplatten (Deflex Sheet plain) und mechanisch entkoppelte Verschraubungen. Nach den Materialtests, die die Grundplatte und die Halterungselemente betreffen, zeigte sich, dass die Aluminiumausführung einen guten Kompromiss zwischen Temperaturgradienten, Einschwingverhalten, Gewicht, Bearbeitung und Stoßfestigkeit darstellt.

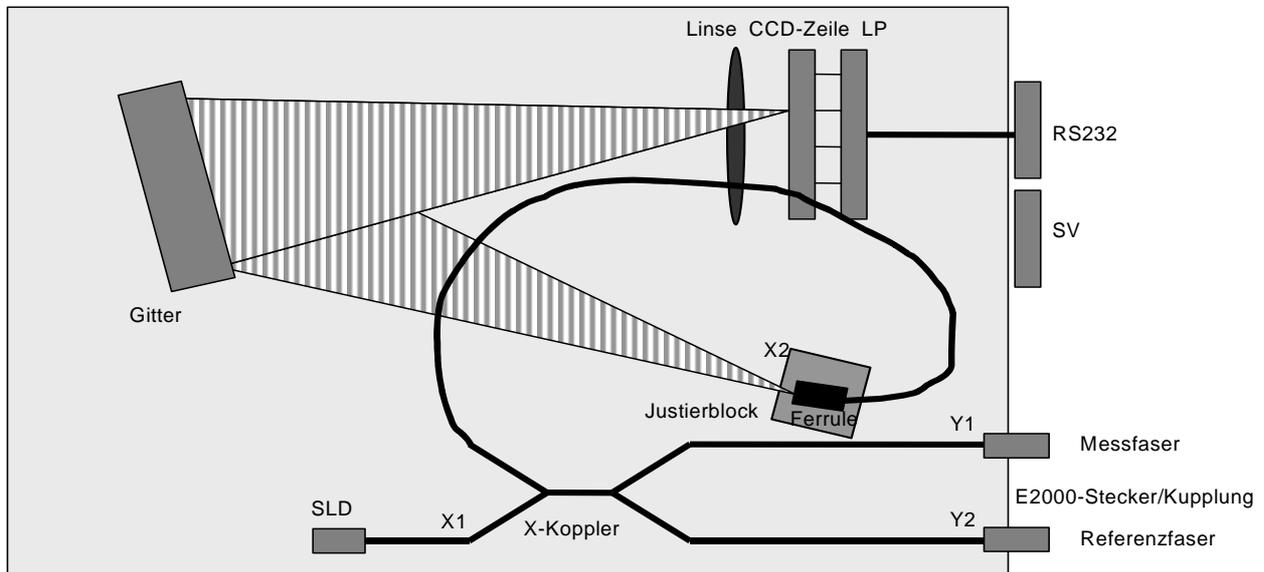


Abb. 2: Schematischer Aufbau des StrainaTemp

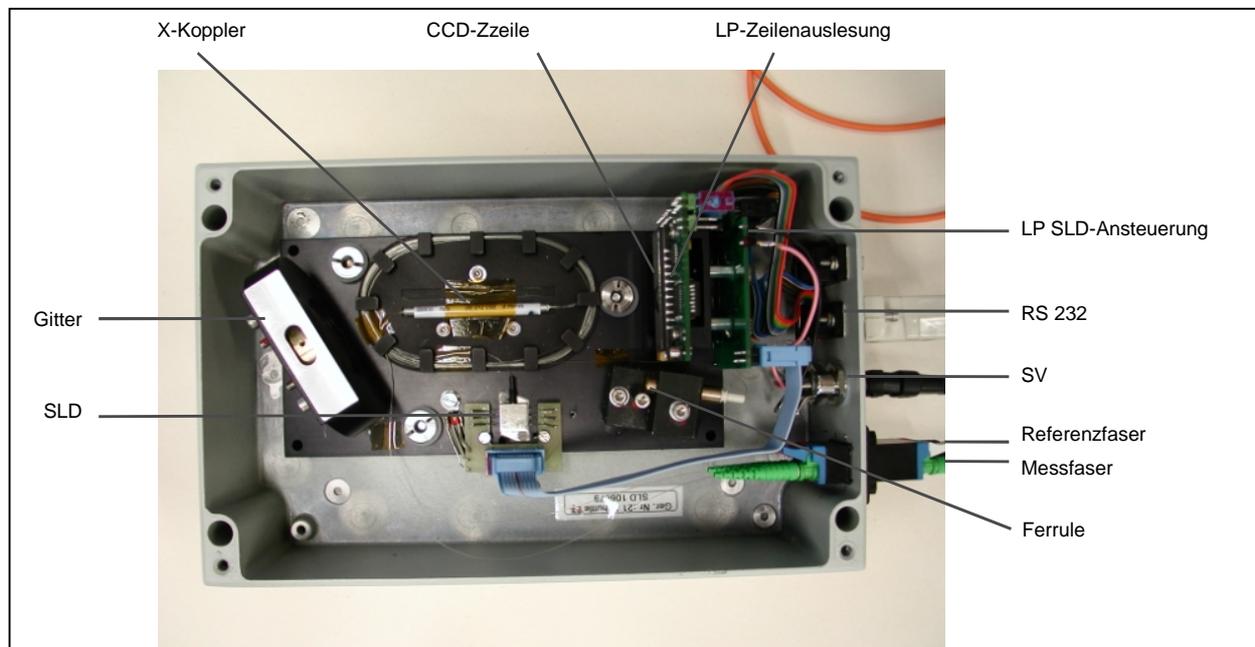


Abb. 3: Aufbau des StrainaTemp im Gehäuse

Nur die stabile Anordnung der Komponenten Faserausgang X2, Gitter und CCD-Zeile im StrainaTemp-Gehäuse gewährleistet eine hohe Messgenauigkeit. Das Auftreten von Temperaturgradienten, verursacht

durch äußere Einflüsse und durch innere Wärmequellen, wird konstruktiv minimiert. Die beschriebenen Komponenten befinden sich auf einer Aluminium-Grundplatte die schwingungsarm in einem Gehäuse angeordnet ist. Schwingungsuntersuchungen haben gezeigt, dass die Dämmplatte Deflex Sheet plain am besten zur akustischen Entkopplung zwischen Gehäuse und Grundplatte geeignet ist.

Aus Abb. 5 geht der konstruktive Aufbau des StrainaTemp hervor.

2.3 Elektronik-Hardware für die quasistatische Version

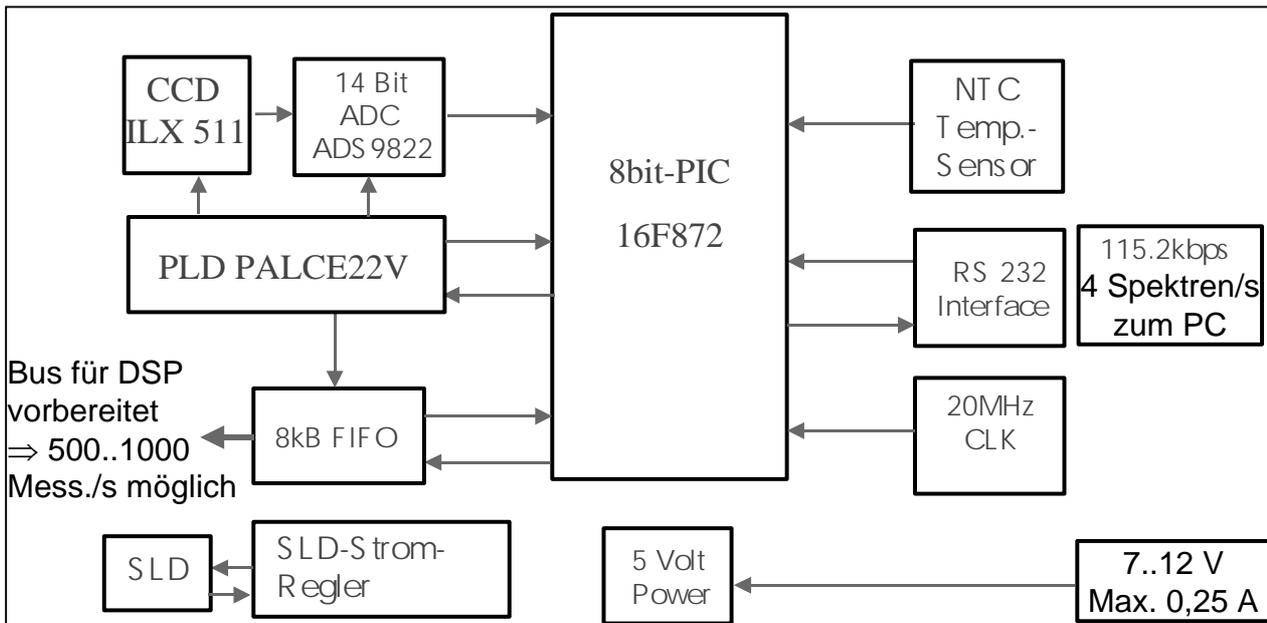


Abb. 4: Elektronik-Hardware Konzept des StrainaTemp

Kernstück der Hardware ist ein 8bit-PIC verbunden mit einem 20MHz CLK. Dieser Rechner steuert das Auslesen der CCD-Zeile, verarbeitet den Temperatureingang des NTC Temperatursensor, bedient die RS232-Schnittstelle und kann optional auch über einen FIFO und einen DSP bereits prozessierte Daten ausgeben.

2.4 Erhöhung der Messfrequenz für einen dynamischen Betrieb

Über die RS232-Schnittstelle können die Messdaten vom StrainaTemp zu einem PC übertragen werden. Dort erfolgen dann die Auswertung und Darstellung der StrainaTemp Messergebnisse. Dabei werden alle Spektren-Rohdaten über die RS232-Schnittstelle geschickt. Durch diesen „Flaschenhals“ können maximal 4 Spektren/s übertragen werden. Der Dynamikbereich ist somit auf einen quasistatischen Betrieb begrenzt. Eine schnellere Datenübertragung erfordert deshalb die Vorverarbeitung der Rohdaten im StrainaTemp und dann erst die Übertragung zu einem externen PC. Je nach dem Grad der Vorverarbeitung kann die Messfrequenz auf 75 Hz oder bis auf 1kHz erhöht werden (je nach Applikation). Eine weitere Erhöhung zur Auflösung sehr schneller Schwingungsprozesse ist mit einer CCD-Zeile nicht mehr möglich. Dazu müßte eine Diodenzeile verwendet werden. Am IPHT/Jena wurde für diese Spezialanwendung ein Muster gefertigt und getestet.

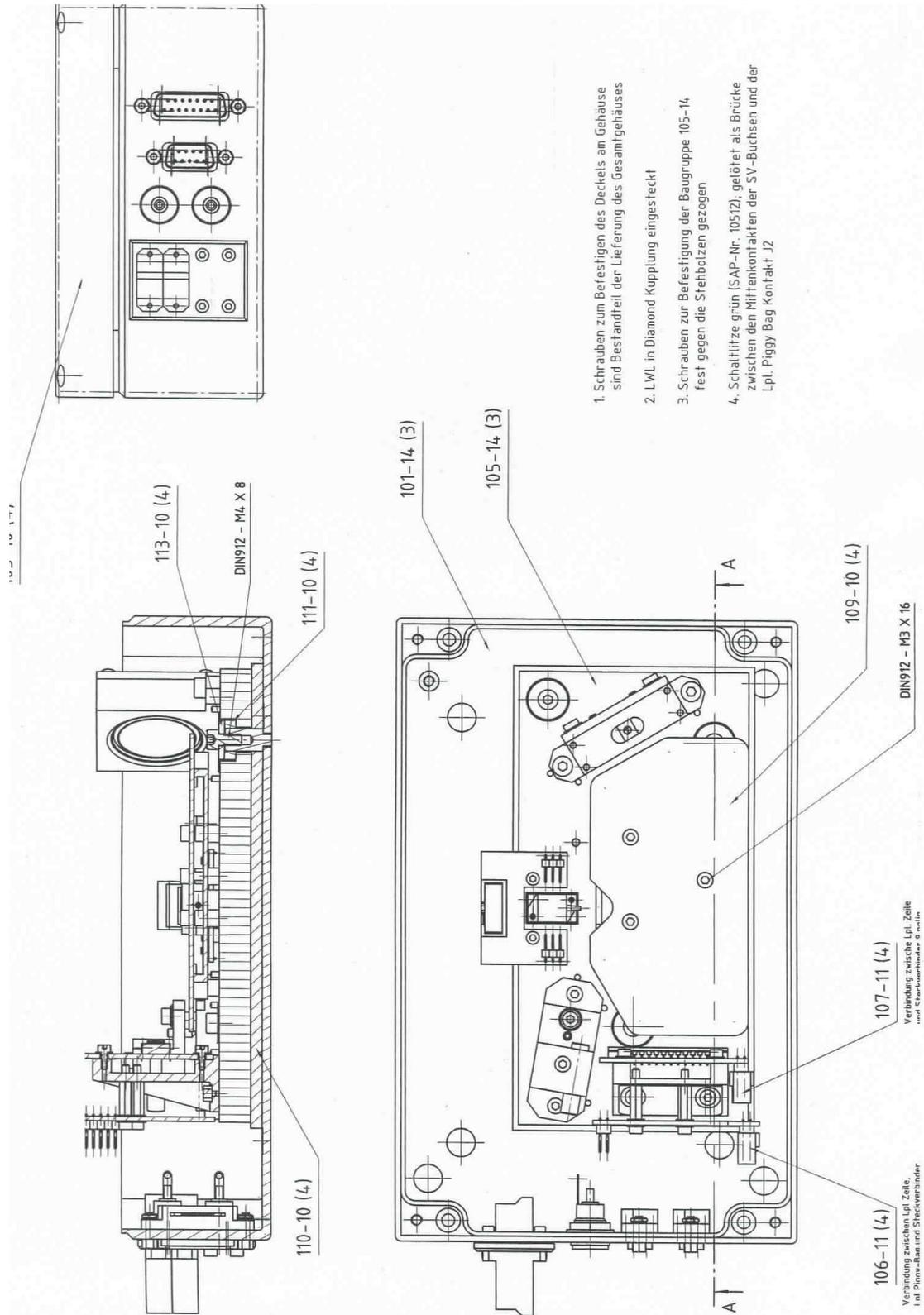


Abb. 5: Konstruktion StrainaTemp

3 Gerätetests

3.1 Temperaturverhalten

Das Temperaturverhalten des StrainaTemp wurde an mehreren Mustern in der Klimakammer getestet. Der interessierende Temperaturbereich lag zwischen 10°C und 50°C. Ziel war die Optimierung von Materialeigenschaften, Kitten und konstruktiven Merkmalen bezüglich der Messgenauigkeit und der Möglichkeit der automatischen Korrektur der Messwerte mittels linearer und quadratischer Temperaturkompensation.

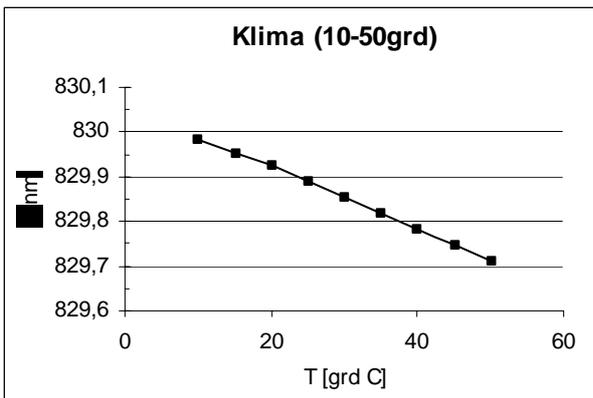


Abb. 6: Klimatest ohne Temperaturkompensation

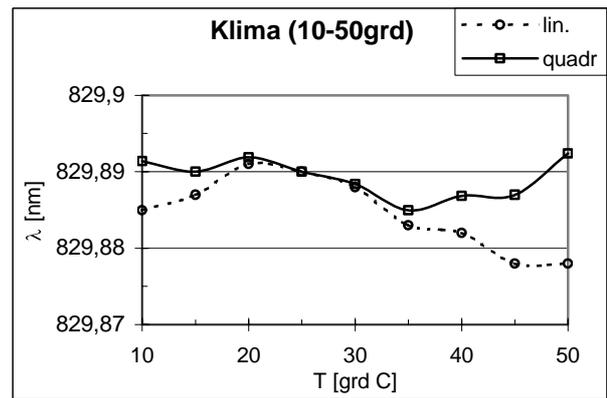


Abb. 7: Klimatest mit linearer und quadratischer Temperaturkompensation

Zum Klimatest wurde das StrainaTemp in die Klimakammer gestellt und die gemessene Braggwellenlänge eines außerhalb der Klimakammer befindlichen temperaturkompensierten FBG vermessen. Der Temperatursensor befand sich direkt am Gitter im StrainaTemp. In Abb.6 und 7 ist die Temperaturabhängigkeit der Braggwellenlänge $\lambda(T)$ zu sehen. Ein linearer Temperatursausgleich mit einer Steigung von 6,65pm/grad reduziert den Messfehler auf <13pm im gesamten Temperaturbereich. Eine zusätzliche quadratische Temperaturkompensation verringert den Messfehler im Messbereich weiter auf kleiner als 7pm. Daraus folgt, dass eine Genauigkeit der Braggwellenlängenmessung von 10pm erreicht wird. Bei der Verwendung eines temperaturstabilisierten FBG als Referenzgitter kann die Messgenauigkeit noch wesentlich erhöht werden. Bei den Klimatests hat sich gezeigt, dass der Einsatz von Aluminium in den mechanischen Bauelementen vorteilhaft ist. Der lineare Ausdehnungskoeffizient $\alpha(\text{Al})$ ist zwar deutlich größer als der von Edelstahl $\alpha(\text{Fe})$, aber die Reduzierung der Masse erhöht die mechanische Stabilität der Aufbauten im StrainaTemp und die größere Wärmeleitfähigkeit von Aluminium beschleunigt den Temperatursausgleich im StrainaTemp und verringert auftretende Temperaturgradienten, besonders nach einem Temperatursprung.

Abb. 8 zeigt das Einschwingverhalten des StrainaTemp nach einem Temperatursprung von 25°C auf 10°C für die StrainaTemp-Ausführung in Stahl und Aluminium. In beiden Ausführungen hat sich erst nach ca. 30Minuten wieder ein Gleichgewichtszustand eingestellt. Die Aluminiumausführung verursacht jedoch geringere thermische und mechanische Spannungen, so dass die Messabweichungen nach dem Temperatursprung deutlich geringer ausfallen. Bei einer Messingausführung kommt neben der großen Masse noch die hohe Wärmekapazität hinzu, so dass sich der Gleichgewichtszustand erst später einstellt.

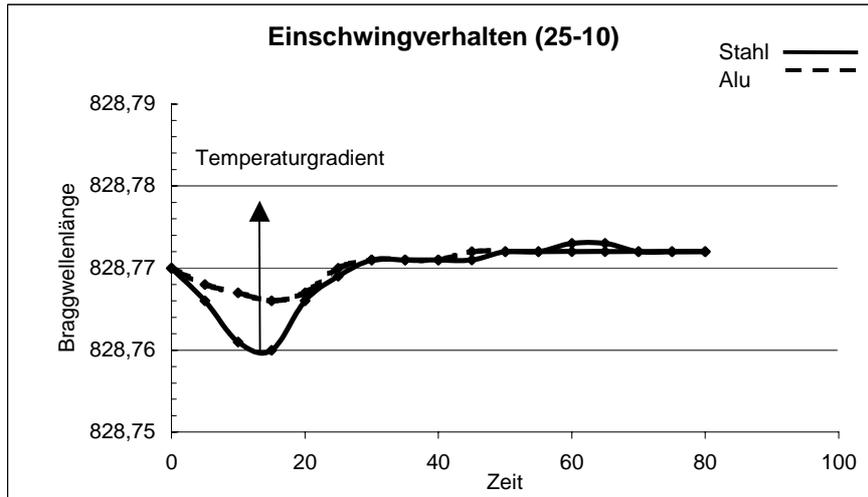


Abb. 8: Einschwingverhalten im temperatur-kompensierten StrainaTemp
 - StrainaTemp1 (Stahlausführung)
 - StrainaTemp2 (Aluminiumausführung)

Aufgrund der internen Wärmequellen erfolgt eine Erwärmung des StrainaTemp (T_{innen}) gegenüber der Außentemperatur ($T_{\text{außen}}$). Die Temperaturdifferenz $T_{\text{innen}} - T_{\text{außen}}$ im Betriebszustand liegt ca. $4,6^{\circ}$ über der Außentemperatur (siehe Abb. 9).

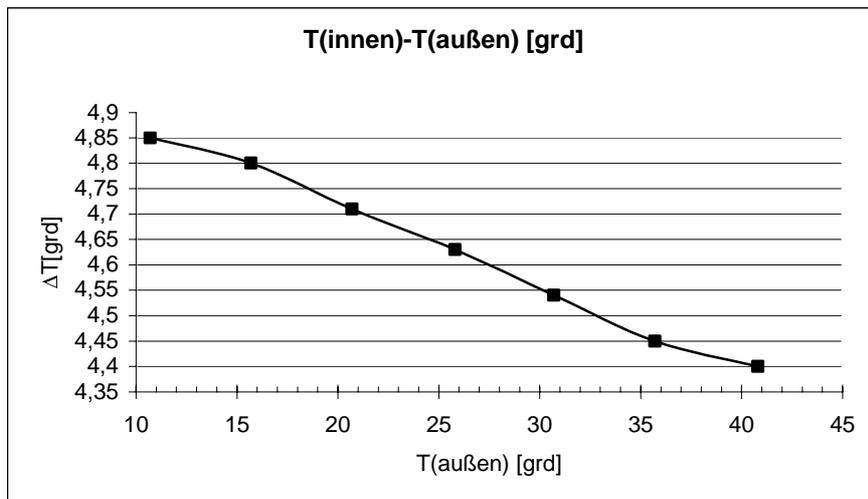


Abb. 9: Temperaturdifferenz $T_{\text{innen}} - T_{\text{außen}}$

Abb.10 zeigt das thermische Einschwingverhalten des StrainaTemp bei einem Sprung der Umgebungstemperatur von 10° auf 25°C . Die Innentemperatur hat erst nach ca. 80min einen Gleichgewichtszustand erreicht. Die Abstrahlung der im Gehäuse erzeugten Wärme (im Betrieb) erfolgt über das Gehäuse.

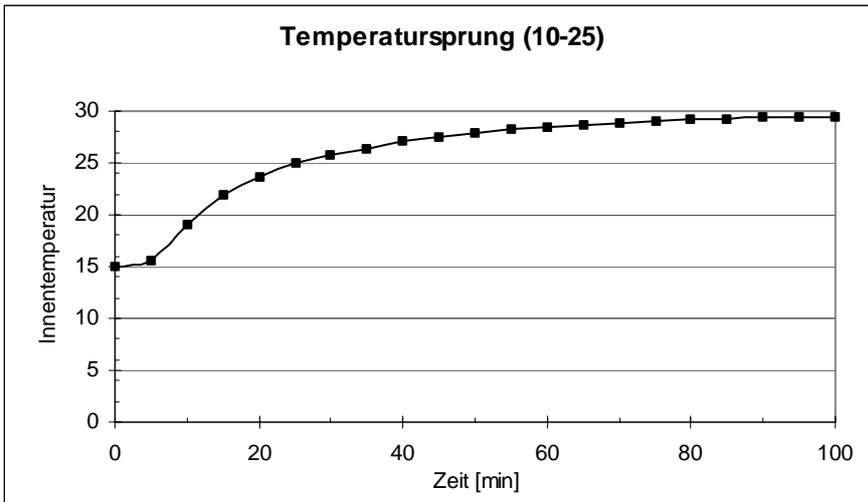


Abb.10: Einschwingverhalten bei Temperatursprung von 10° auf 25°

Abb.11 zeigt die Wellenlängenänderung $\Delta\lambda(T)$ des StrainaTemp im nichtkompensierten und im kompensierten Modus bei einem Temperaturzyklus von 10⁰-25⁰-10⁰.

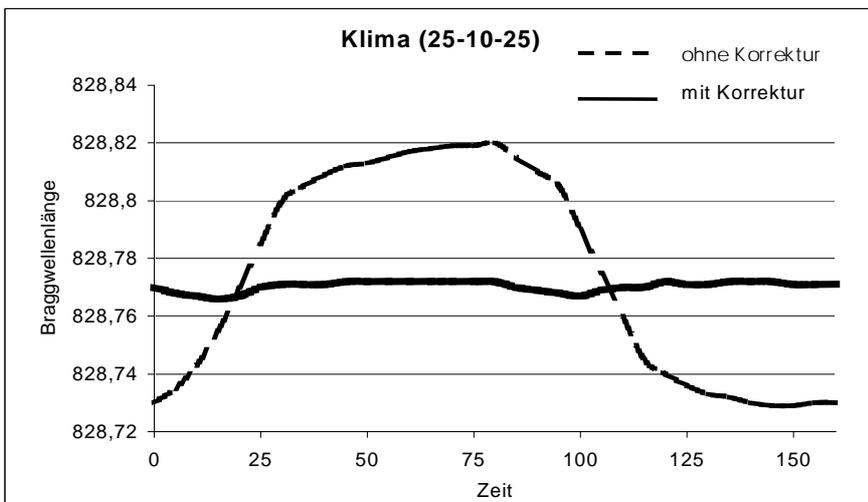


Abb.11: Temperatursprung von 10⁰-25⁰-10⁰

Schlussfolgerungen:

Der mechanische Aufbau des StrainaTemp auf einer Aluminium-Grundplatte mit Justier- und Halterungsbauteilen ebenfalls aus Aluminium stellt einen guten Kompromiss zwischen Gewicht, Kosten und Stabilität dar. Temperatureinflüsse von außen (Sprung von 10⁰C auf 25⁰C) führen infolge auftretender Temperaturgradienten zu Wellenlängenänderungen von maximal 5pm. Das entspricht einer relativen Wellenlängenänderung von $\Delta\lambda/\lambda=6 \cdot 10^{-6}$. Die Erhöhung der Innentemperatur des StrainaTemp ist kleiner als 5⁰ gegenüber der Außentemperatur.

Mit der Verwendung der linearen und quadratischen Temperaturkompensation beträgt die Messgenauigkeit in einem Temperaturbereich von $10^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ etwa 9pm . Das entspricht einer Faserdehnung von $10\mu\text{strain}$.

Wird ein temperaturstabilisiertes FBG als Referenz verwendet, beträgt die Messgenauigkeit 1pm oder $1\mu\text{strain}$.

3.2 Schwingungs- und Stoßtest

Zum Schwingungs- und Stoßtest wurden an das StrainaTemp 4 Beschleunigungssensoren angebracht. Diese befanden sich am Gehäuse außen jeweils für die Richtungen x, y und z sowie am Gitter innen (ein Sensor).

Das StrainaTemp wurde auf einem Schwingtisch über Schwingungsdämpfern befestigt und die Resonanzfrequenzen (siehe Abb.12 bis 15) und Wellenlängenänderungen des temperatur-stabilisierten BRAGG-Gitters ermittelt.

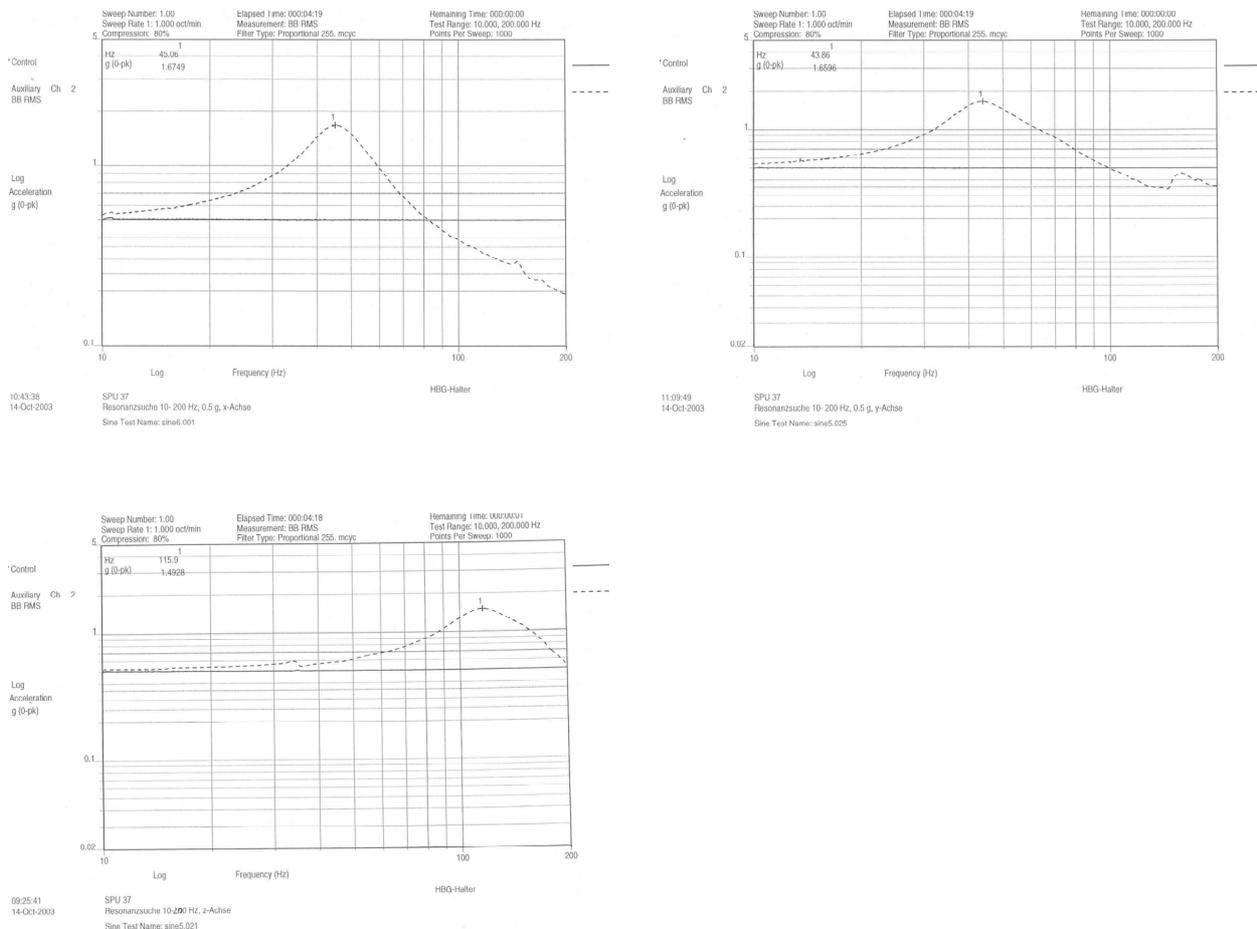


Abb.12: Resonanzfrequenzen am Gitterhalter bei Schwingungen in x-, y-, und z-Richtung

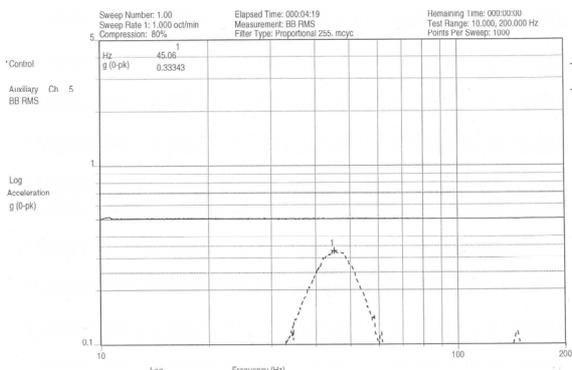
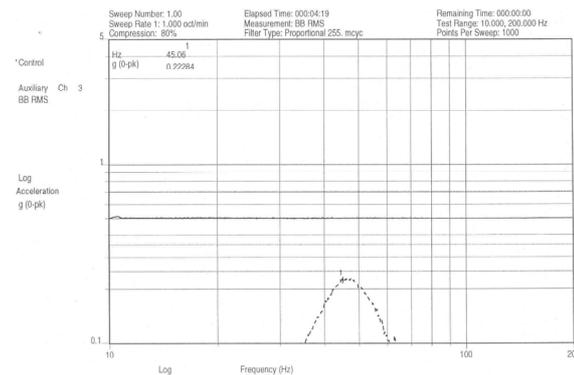
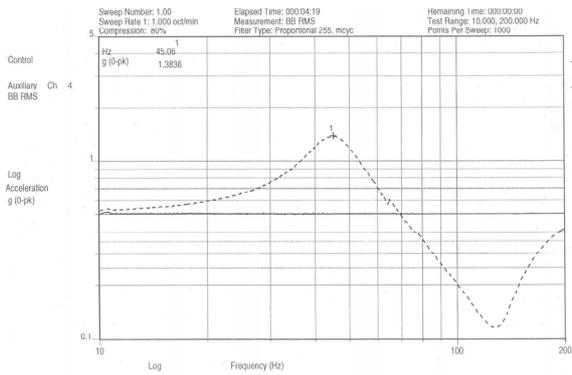


Abb.13: Schwingen in Richtung x-Achse, Resonanzsuche am Gehäuse in x-, y-, z-Richtung

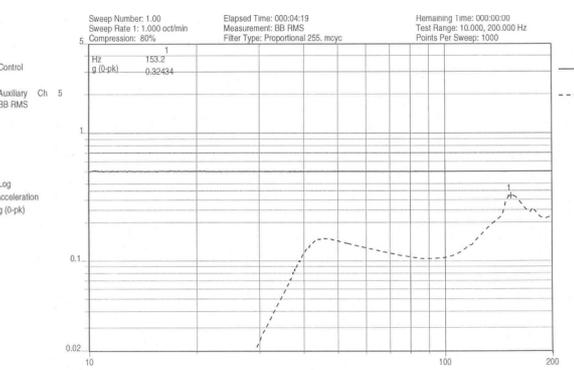
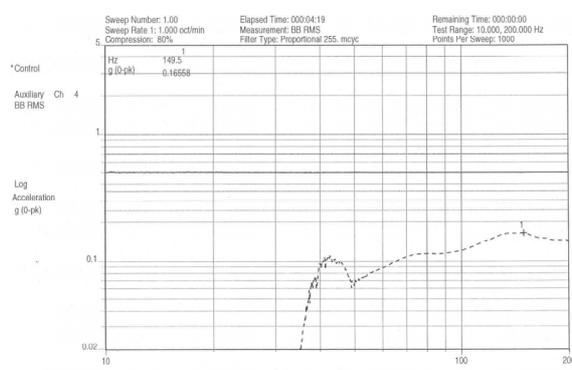
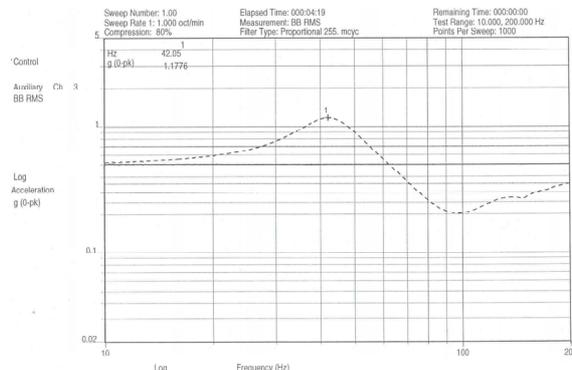


Abb.14: Schwingen in Richtung y-Achse, Resonanzsuche am Gehäuse in x-, y-, z-Richtung



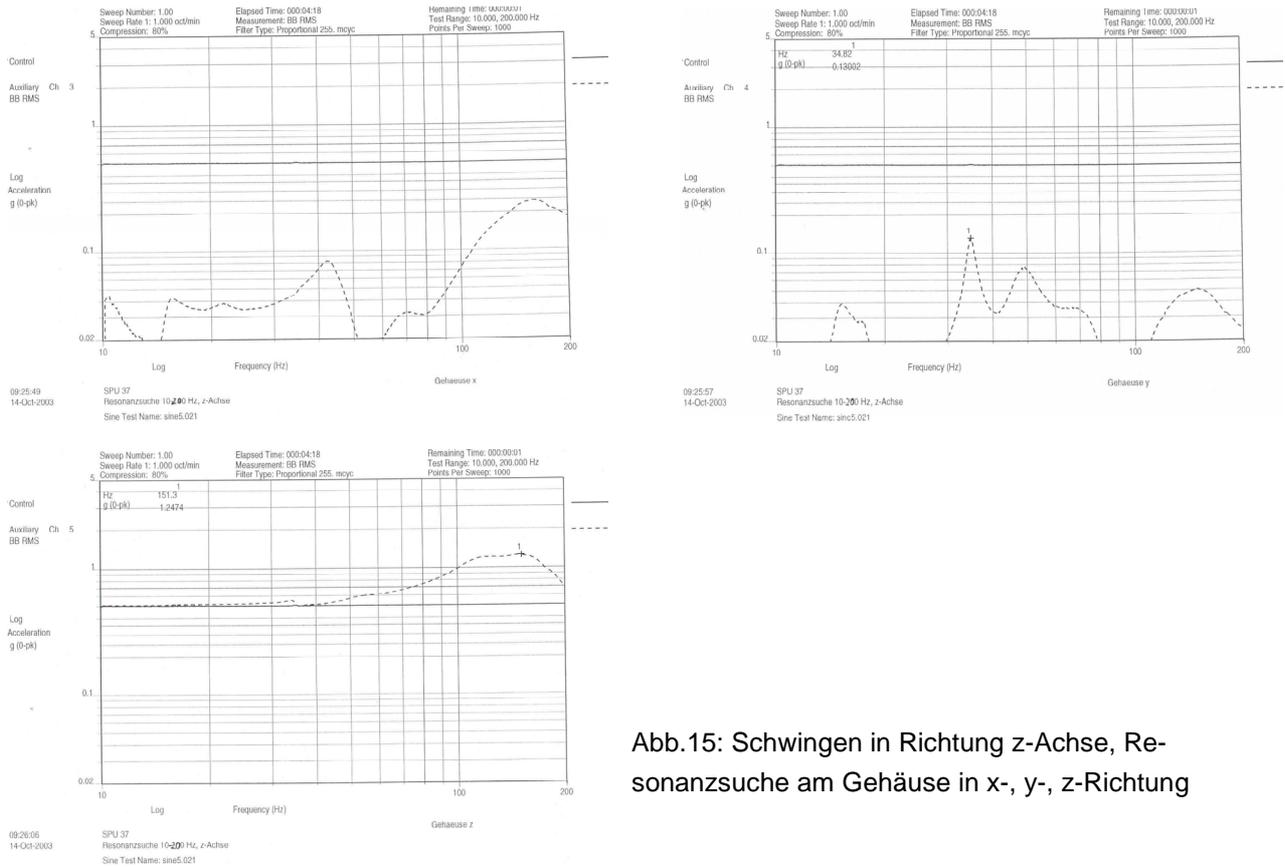


Abb.15: Schwingen in Richtung z-Achse, Resonanzsuche am Gehäuse in x-, y-, z-Richtung

Es entstehen folgende Resonanzfrequenzen am Gehäuse und am Gitter:

Gitterresonanz: x-Richtung: 45Hz y-Richtung: 42Hz z-Richtung: 151Hz

Gehäuseresonanz: x-Richtung: 45Hz y-Richtung: 44Hz z-Richtung: 115Hz

Die Schwingungen werden vom StrainaTemp-Gehäuse auf das Gitter fast 1:1 übertragen. Scherschwingungen wie z.B. eine Anregung des Gehäuses in x-Richtung und Schwingungen des Gitters in y- oder z-Richtung finden praktisch nicht statt. Die Unterdrückung beträgt mehr als 15dB.

Alle angeregten Schwingungen wirken sich nicht auf das Messergebnis (Braggwellenlänge des temperaturstabilisierten Referenzgitters) aus.

Im Anschluss an den Schwingungstest wurde die Stoßverträglichkeit geprüft. Dazu wurden jeweils 10 Stöße mit Beschleunigungen von 20 g und einer Stoßdauer von 6ms jeweils in + /- x-, y- und z-Richtung ausgeführt. Jeder 10. Stoß wurde registriert und dabei die Wellenlängenänderung ermittelt. Die Stoßimpulse für die plus-x-Richtung und für die minus-x-Richtung sind als Beispiel in Abb.16 dargestellt.

Es konnten keine signifikanten Auswirkungen des Stoßens auf die Veränderung der Wellenlänge des Referenzgitters nachgewiesen werden.

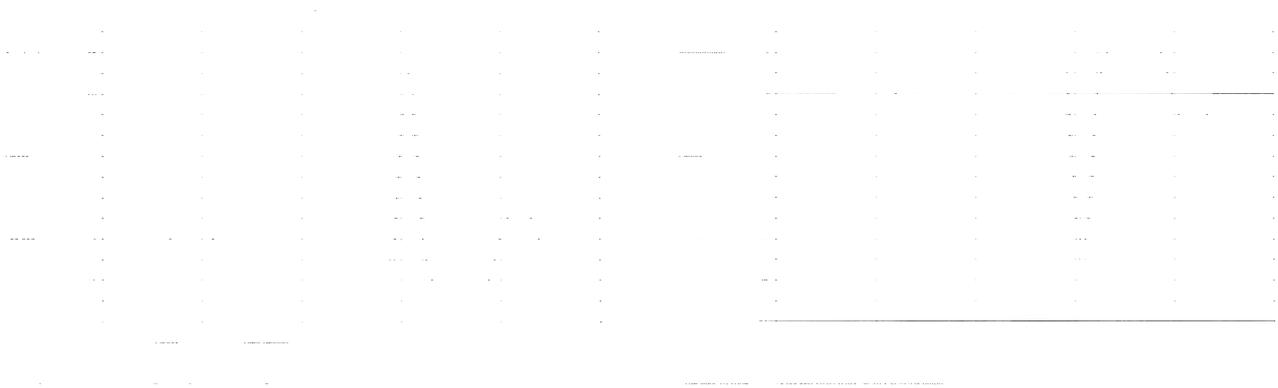


Abb.16: Stoßimpulse für die minus-x-Richtung und plus-x-Richtung, gemessen für die 3 Koordinaten x, und z des Gehäuses

Insgesamt wurden bezüglich Schwingen und Stoßen folgende Ergebnisse erzielt:

z-Achse

- Schwingen mit Beschleunigung von 1g, Frequenz 10...100Hz

Ergebnis: bei ca. 35 Hz trat Wellenlängenverschiebung von ca. 4pm auf.

- Schwingen mit Beschleunigung von 1,5g, Frequenz 10...100Hz

Ergebnis: bei ca. 38 Hz trat Wellenlängenverschiebung von 8pm auf

- Stoßen: 10 Stöße a mit Beschleunigung von 10g , Stoßdauer 6ms, in plus-z-Richtung

Ergebnis: max. Abweichung 5pm

- Stoßen: 10 Stöße a mit Beschleunigung von 10g , Stoßdauer 6ms, in minus-z-Richtung

Ergebnis: max. Abweichung 3pm

- Stoßen: 10 Stöße mit Beschleunigung von 20g , Stoßdauer 6ms, in plus-z-Richtung

Ergebnis: max. Abweichung 7pm

- Stoßen: 10 Stöße mit Beschleunigung von 20g , Stoßdauer 6ms, in minus-z-Richtung

Ergebnis: max. Abweichung 8pm

y-Achse

- Stoßen: 10 Stöße mit Beschleunigung von 20g , Stoßdauer 6ms, in plus-z-Richtung

Ergebnis: max. Abweichung 7pm, kein Rücklauf zum Ausgangswert

- Stoßen: 10 Stöße mit Beschleunigung von 20g , Stoßdauer 6ms, in minus-z-Richtung

Ergebnis: max. Abweichung 3pm, von 7 auf 3pm zurückgelaufen, Ausgangswert nicht erreicht

- Schwingen mit Beschleunigung von 1,5g, Frequenz 10...100Hz

Ergebnis: bei ca. 28 Hz trat Wellenlängenverschiebung von 4pm auf

x-Achse

- Schwingen mit Beschleunigung von 1,5g, Frequenz 10...100Hz

Ergebnis: bei ca. 35 Hz trat Wellenlängenverschiebung von 2pm auf

- Stößen: 10 Stöße mit Beschleunigung von 20g , Stoßdauer 6ms, in plus-z-Richtung

Ergebnis: max. Abweichung 5pm, kein Rücklauf zum Ausgangswert

- Stößen: 10 Stöße mit Beschleunigung von 20g , Stoßdauer 6ms, in minus-z-Richtung

Ergebnis: max. Abweichung 2pm, von 5 auf 2pm zurückgelaufen, Ausgangswert nicht erreicht

Abweichungen von 8pm entsprechen bei der verwendeten Faser

- einer Temperaturänderung von: ca. 0,42grad

- einer Dehnungsänderung von: ca. $9,7 \cdot 10^{-6}$

Schwingungseinflüsse, wie oben beschrieben, führen max. zu einer Fehlmessung bezüglich der Temperatur von 0,42 grad bei Beschleunigungen von 1,5g. Da im Höchstfall mit Beschleunigungen von 0,5g bei den wichtigsten Applikationen zu rechnen ist, wird dieser Fehler mindestens noch halbiert (siehe obige Ergebnisse). Schon bei Beschleunigungen von nur 1g traten max. 4pm Wellenlängenverschiebung auf, was zu einem Temperaturfehler von 0,2grad führt.

Kräftige Stöße auf die Auswerteeinheit, wie oben beschrieben, führten zu Abweichungen von max. 7pm. Hier bewegt sich der Messfehler in der gleichen Größenordnung wie beim Schwingungseinfluss.

Insgesamt kann man feststellen, dass aufgrund der besonderen Konstruktion des StrainaTemp mit einer zwischen dem Gehäuse und der Trägerplatte angebrachten Dämpfungsmatte und der Leichtbauweise aus Aluminiumteilen sich Schwingungen und Stöße auf die Messergebnisse nur geringfügig auswirken.

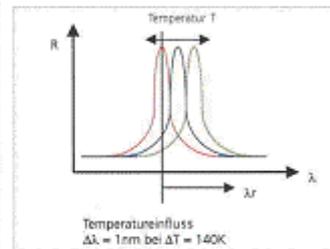
3.3 StrainaTemp Datenblatt

Excellence through light.

StrainaTemp Faser-Bragg-Gitter-Sensorsystem.



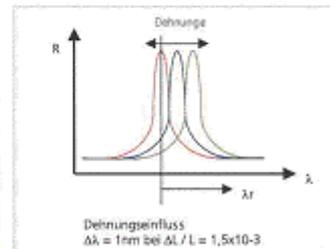
Faseroptische
Dehnungs-, Schwingungs-
und Temperatur-
überwachung technischer
Anlagen und Bauwerke.



Messung der Temperatur an Großgeneratoren.



Messung der Temperatur an Großtransformatoren.



Vorteile:

Ermittlung von Dehnungs-, Schwingungs- und Temperaturänderungen an schwer zugänglichen Messstellen. Geeignet für raue Umgebungen (starke elektromagnetische Felder, Hochspannung, hohe Temperaturen, aggressive und explosive Umgebungen).

Aufbau eines Netzes von mehreren Messstellen durch Multiplexen möglich.

Flexible Installation und Einbettung in Verbundwerkstoffe möglich.

Applikationsfelder:

Energieanlagen (Temperatur- und Dehnungsüberwachung an Generatoren, Windkraftanlagen, Transformatoren).

Luft- und Raumfahrttechnik (Temperatur- und Dehnungsüberwachung an Strukturen von Raumschiffen, Gastemperaturmessung in Ballons).

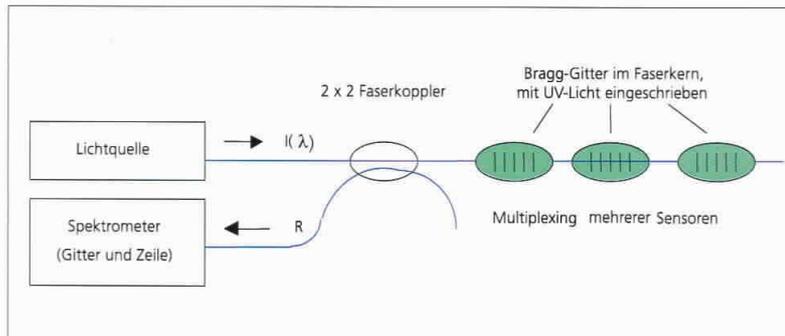
Bauwerksüberwachung (Dehnungsmessung an Brücken, Tunnelanlagen, Staudämmen).

Verkehrstechnik (Temperaturüberwachung an Oberleitungen, Überwachung der Dehnung von Bahngleisen, Dehnungsüberwachung an Tragflächen von Flugzeugen).

Geotechnik (Überwachung der Dehnung von Felsankern).

JENOPTIK-Gruppe.

StrainaTemp Faser-Bragg-Gitter-Sensorsystem.



Technische Daten

Faser:

| | |
|---------------------------------|---|
| Messbereich Temperatur: | -200°C ... +200°C |
| Messbereich Dehnung/Schwingung: | ±3000 µm/m |
| Auflösung Temperatur: | 0,2 K |
| Auflösung Dehnung/Schwingung: | ca. 1 µm/m (relative Längenänderung 1×10^{-6}) |
| Sensornzahl: | max. 15 (abhängig vom Messbereich) |
| Faserlänge: | bis 5 km möglich |
| Abtastrate: | 3 Messungen/sec. (optional 1000 Messungen/sec.) |
| rms-Rauschen: | ca. 0,5 pm (bei Vollaussteuerung des Spektrometers) |

Faseroptischer Stecker: E2108.6/K (E2000™-HRL-Stecker; 8° Schrägschliff)
HPC-S8.66/K (FC/APC-Stecker, 8° Schrägschliff), andere Steckertypen auf Anfrage

Fasertyp: Monomode-Faser, Arbeitswellenlänge 850 nm;
Cutt-Off Wellenlänge 700 ... 800 nm;
Numerische Apertur 0,11 ... 0,14;
Kern-Durchmesser 4,5 ... 5 µm;
Cladding-Durchmesser 125 µm

Standard-Acrylat-Coating Durchmesser 250 µm, vorzugsweise zur Signalübertragung
Sensorspezifische Coatings (hohe Temperaturfestigkeit, hohe mechanische Festigkeit und Härte) auf Anfrage
Photosensitive Fasern zum Fasergitter-Einschreiben, Sensor Fasergitter, anwendungsspezifische Sensornetzwerke auf Anfrage

Das Messprinzip beruht auf der spektralen Auswertung von reflektiertem Licht an N Bragg-Gittern in einer Lichtleitfaser. Das Licht wird im StrainaTemp durch eine breitbandige Superlumineszenzdiode erzeugt und in einen 2 x 2-Faserkoppler eingekoppelt. An diesen Faserkoppler wird eine Messfaser mit N eingeschriebenen Bragg-Gittern angeschlossen. Wird diese Faser in zu untersuchendes Material eingebettet, wirken sich Temperatur- und Dehnungsänderungen des Materials auch auf die Gitterkonstanten der Bragg-Gitter aus. Die Veränderung der Gitterkonstanten führt zu einer spektralen Verschiebung des reflektierten Lichtes. Dieses reflektierte Licht wird im StrainaTemp mittels eines optischen Gitters auf eine Empfängerzeile abgebildet und spektral ausgewertet. Die Datenübertragung an einen externen PC erfolgt über eine RS 232-Schnittstelle. Mit einer PC-Software werden die Temperatur- und Dehnungsänderungen berechnet, visualisiert und gespeichert.

Entwickelt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Physikalische Hochtechnologie (IPHT) e.V. Jena.

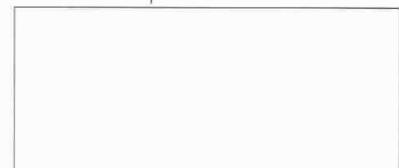
Auswerteeinheit:

| | |
|---|---------------------------|
| Stromversorgung: | 7... 9 V/0,25 A |
| Schnittstelle: | RS 232, DSP-Busausgang |
| Abmessungen der Auswerteeinheit (L x B x H) in mm | 220 x 140 x 60 |
| Betriebstemperatur: | +10°C ... +40°C |
| Lagertemperatur: | -20°C ... +50°C |
| Luftfeuchte: | max. 85% bei 30°C |

Design und Spezifikation unterliegen der ständigen Weiterentwicklung. Änderungen im Sinne des technischen Fortschritts bleiben vorbehalten.

JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH
Geschäftsbereich Sensorsysteme
Göschwitzer Straße 25
07745 Jena
Deutschland
Tel: +49 (3641) 65 33 99
Fax: +49 (3641) 65 36 57
E-Mail: sensor.sales@jenoptik.com
Internet: www.jenoptik-los.de

Unser Vertriebspartner:



4. Applikationen und Marktzugang

4.1 Vorteile gegenüber herkömmlicher Sensortechnologie

Die neue Messtechnik mit den FBG-Sensoren und der Auswerteeinheit StrainaTemp bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber Methoden klassischer Temperatur- und Dehnungsmessung.

- optische Signalübertragung von N (max. 15) Messstellen zum StrainaTemp
- geeignet für rauhe Umgebungen (Temperatur und elektromagnetische Felder)
- punktuelle Messungen sind möglich
- maximale Temperaturen der Faser bis 350⁰ C
- Aufbau eines Netzes von N x M Messstellen durch Multiplexen
- Langzeitstabilität gegenüber faseroptischer Messtechnik, die Intensitäten auswertet
- Kalibrierung durch externe Referenzsignale
- Einsatz an besonders unzugänglichen Stellen möglich, Ersatz von Dehnungsmessstreifen in durch Blitzeinschlag gefährdeten Anlagen (Rotorblätter von Windkraftanlagen)

4.2 Nachteile der FBG-Messtechnik

Den Vorteilen stehen folgende Nachteile gegenüber:

- die Messtechnik ist noch nicht am Markt eingeführt
- konservative Haltung der Kunden
- aufwändige Applizierung der Faser
- die Gesamtkosten (Faser, Applizierung und Auswerteeinheit) sind relativ hoch
- Bruch der Faser ist möglich

4.3 Applikationen

Eine Gegenüberstellung der Punkte 4.1 und 4.2 zeigt die jetzigen Einsatzmöglichkeiten der FBG-Messtechnik. Überall dort, wo Dehnungsmessstreifen und Thermoelemente eingesetzt werden können, besteht keine Chance die FBG-Messtechnik in großen Stückzahlen einzusetzen. Die Strategie der Vermarktung muss es deshalb sein, nach Applikationen zu suchen, in denen die klassische Messtechnik nicht eingesetzt werden kann. Das ist vorrangig dort, wo extreme Temperaturen und elektromagnetische Felder diesen Einsatz nicht zulassen, wo eine Vielzahl von Messstellen installiert werden muss und wo räumliche Vorgaben den Einsatz der klassischen Messtechnik nicht zulassen.

Der Marktzugang kann deshalb nicht über einen Verdrängungswettbewerb erfolgen. Die potentiellen Kunden müssen davon überzeugt werden, dass mit Hilfe der FBG-Sensorik völlig neue Felder erschlossen werden. Diese liegen vor allem im Überwachungs- und Diagnosebereich. Mittels online-Zustandsmonitoring können optimierte Betriebsführungen an Anlagen eingestellt werden, so dass der Treibstoff- und Material-

verbrauch gesenkt und eine Schadensfrüherkennung ermöglicht wird. Haupteinsatzgebiete erwarten wir deshalb in den Bereichen:

- Großgeneratoren und –antriebe (Messung von Temperatur und Vibration)
- Transformatoren (Hot Spot Überwachung bei Überlastbetrieb)
- Kraftwerksturbinen (Temperatur-Überlast-Monitoring)
- Kernreaktoren (Dehnungsüberwachung)
- Offshore-Technik (Anlagenüberwachung)
- Luftfahrt / Raumfahrt (Structure Health Monitoring)
- Dehnungsüberwachung in Bauwerken (z.B. Brücken, Tunnel, Silos, Staudämme)
- Überwachung von Dampfleitungen und Pipelines
- Seismische Tomografie / Untergrundbewegungen
- Sprengmesstechnik
- Temperaturmessung der Oberleitung bei der Bahn (Überlastmonitoring)
- Kraftmessung am Stromabnehmerbügel bei der Bahn (Andruckregelung)

Die Anforderungen an Wirtschaftlichkeit und Sicherheit technischer Systeme nehmen weltweit ständig zu. Der Einsatz photonischer Monitoringsysteme in Anwendungsbereichen, für die aufgrund der Einsatzbedingungen keine geeigneten alternativen technischen Lösungen in Frage kommen, werden ökonomische Nutzeffekte in volkswirtschaftlichen Größenordnungen erwartet.

Im Projekt FAMOS wurden die wissenschaftlich-technischen und technologischen Voraussetzungen für eine industrielle Herstellung und Anwendung von neuartigen komplexen photonischen Monitoringsystemen zur online-Zustandsüberwachung und optimierten Betriebsführung (Erfassung verschiedener Parameter wie Dehnung, Druck, Kraft, Vibration, Temperatur und chemische Messgrößen) auf der Basis faseroptischer Bragg-Gitter-Sensornetzwerke geschaffen.

Nach einer in der JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH angefertigten Marktrecherche beträgt das mittelfristige weltweite Marktpotenzial für 2006 ca. 200 Mio.\$.

Die Vermarktung hängt stark davon ab, ob der Einstieg in einer Branche mit einer genügend hohen Stückzahl gelingt. Die bisherigen Einsätze und Tests erfolgten mit Einzelstücken in vielen Branchen, um die Eignung der Messtechnik nachzuweisen. Dabei mussten auch immer wieder neue Applizierungsmethoden für die Fasern ermittelt werden. Eine Vermarktung wird möglich, wenn es gelingt, in einer Branche mit einer einheitlichen technologischen Linie einzusteigen.

Tests mit dem StrainaTemp erfolgten u.a. in folgenden Branchen:

- Sprengmesstechnik (AOS)
- Windgeneratoren
- Kraftwerksanlagen (Siemens)
- Mikrosysteme (Tetra)

- Raumfahrt (IPHT)

Die Entwicklung des StrainaTemp ist abgeschlossen. Die JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH stellte den Partnern die Auswertetechnik zur Verfügung. Tests bei ausgewählten Kunden wurden erfolgreich durchgeführt.

Der Einsatz von FBGs und zugehörigen Auswertesystemen hat seit etwa 1993 einen kontinuierlichen langsamen Aufschwung erfahren. Ein Einsatz von FBG-Messtechnik ist in folgenden Bereichen zu erwarten:

- Zustandsüberwachung von zivilen Bauwerken (Brücken, Dämme, ...)
- Zustandsüberwachung von industriellen Bauwerken (Kraftwerke, Pipelines, Transformatoren, ...)
- Dehnungs- und Vibrationsmonitoring (Verbundwerkstoffe, Fahrzeuge)
- Vibrationsmonitoring von seismischen Ereignissen
- Temperaturmonitoring von Bauwerken in gefährlicher Umgebung (Kernkraftwerke, Gasturbinen, ...)
- Monitoring von Bauwerken in EM sensibler Umgebung (Windkraftwerke, Antennen, ...)

Einsatzwahrscheinlichkeit und konkurrierende Verfahren:

Etwa 30-40% der Messaufgaben mit Langzeitcharakter der obigen Anwendungsgebiete lassen sich hervorragend mit dem StrainaTemp abdecken. Das StrainaTemp ist konkurrierend zu sehen zu Dehnungsmessstreifen und Schwingseitenaufnehmern. Das häufigste Knock-out-Kriterium ist das schwierige Handling der FBG, die Applizierung, die komplizierte Theorie (allgemeines Verständnis) und der höhere Preis.

In allen Teilmärkten müssen die FBG-Sensoren in bestimmte Materialien eingebettet, sowie kraftschlüssig und temperaturleitend verbunden werden. Unterschiedliche Trägermaterialien erfordern eigene Methoden der Applizierung. Unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten müssen für die Kalibrierung der Messung angesetzt werden. Deshalb ist es für den Start wichtig, eine Branche zu finden, in der mit einer einheitlichen Technologie in genügend großer Stückzahl ein FBG-Messverfahren installiert wird. Damit kann mit einer einheitlichen erprobten FBG-Applizierung und einer für den Hersteller genügend großen Stückzahl der Markteinstieg beginnen.

Bei den bereits am Markt verfügbaren FBG-Sensoren gibt es zwei unterschiedliche Ansätze:

Typ1: Arbeitswellenlänge 1550nm

- billige Sensoren (45 ..150EUR), teure Auswerteeinheit (>20.000€)

Typ2: Arbeitswellenlänge 820/980nm

- teure Sensoren (90..300EUR), billige Auswerteeinheit

Ca. 80% der weltweiten FBG-Messsysteme sind entsprechend Typ1, nur 20% sind Typ2.

Die führenden Anbieter sind:

Typ 1, Marktführer:

- Micron Optics mit 30 ..40 verkauften Geräten im letzten Jahr
- Electro Photonics mit ca. 500 verkauften Geräten in 6 Jahren

Kleinere Anbieter sind:

- Smart Fibres LTD (Umsatz unbekannt)
- A-Tek (Umsatz unbekannt)
- AOS GmbH (ca. 10 Systeme pro Jahr, leicht steigend)

Typ 2:

- Luna Innovations beliefern das amerikanische Militär, deshalb sind keine Zahlen bekannt
- alle anderen Firmen und Organisationen spielen auf dem Markt eine eher geringere Rolle oder nutzen Systeme obiger Anbieter.

Potential:

AOS GmbH rechnet unter Abdeckung aller obigen Potentiale und Hilfe der Partner im Jahr 2006 mit einem Geräteumsatz von ca. 100 Geräten (ca. 800.000 Euro).

Diese Zahlen sind grobe Schätzungen, abgeleitet aus Marktstimmung, Investitionsstimmung und Entwicklung der Anwendungs-Branchen. Konjunkturelle Schwankungen und sich ändernde gesetzliche Vorgaben haben undefinierte Auswirkungen auf diese Schätzungen. Ein Umsatz von merklich mehr als 100 .. 200 Geräten im Jahr kann bei gebündelten Marketingstrategien und guter konjunktureller Lage ab dem Jahre 2007 erreicht werden.

4.4 Einsatz in Windgeneratoren

Eine vielversprechende Applikation ist die Messung der Dehnungsparameter von Rotorblättern in Windturbinen. Dieser Markt hat vor allem in Deutschland eine hohe Wachstumsrate. Ca. 5% der Elektroenergie in Deutschland werden schon mit Windgeneratoren erzeugt, Tendenz steigend. Immer leistungsfähigere Generatoren erfordern Rotorblätter mit größeren Durchmessern. Damit steigen die Anforderungen an die verwendeten Materialien, und neue Werkstoffe müssen auf ihre Belastbarkeit getestet werden. Dabei ist ein Messsystem erforderlich, das die Belastung der Rotorflügel und des Turmes mit dem Fundament in Echtzeit misst. Daraus sollen in der angewandten Materialforschung Erkenntnisse gewonnen werden, welche Werkstoffe zum Einsatz in Windgeneratoren geeignet sind.

Ein wesentlich größeres Potential besteht jedoch in der Ausstattung aller Windgeneratoren mit FBG-Sensoren. Bei der enormen Größe der Windflügel besteht ein großes Sicherheitsproblem. Ab einer bestimmten Windbelastung wird die auftretende Kraft auf die Flügel so groß, dass eine Zerstörung der Flügel und des Turmes auftreten können. Deshalb wird ein Online-Monitoring der Druckverhältnisse an kritischen Punkten des Windgenerators unumgänglich sein. Der Generator soll maximale Windenergie ausnutzen, soll aber auch bei zu hoher Windlast vor einer Zerstörung geschützt werden. Die dafür benötigten Sensoren sind starken elektromagnetischen Feldern ausgesetzt. Deshalb kommen die klassischen Dehnungsmessverfahren hier nicht zum Einsatz.

Windgeneratoren benötigen eine Steuerungstechnik für ertragsoptimierten Anlagenbetrieb bei allen Witterungsverhältnissen und einen abgeregelten Anlagenbetrieb bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten. Mit Hilfe der FBG-Sensorik können die Belastungen der Rotorblätter und des Turmes direkt bestimmt werden. Je nach Windlast erfolgt dann eine adaptive Windnachführung. Dabei werden die Rotorblätter durch ein

aktives Blattverstellungssystem so eingestellt, dass bei einem optimalen Anströmwinkel die Windlast reduziert wird. Außerdem kann durch Messung der Vibration von Turm und Rotorblättern die Windanlage überwacht werden, so dass im Grenzfall die Abschaltung des Systems erfolgt. Für FBG-Sensoren ist das ein ideales Anwendungsgebiet.

Die Vorteile der FBG-Messtechnik aus Punkt 4.1 kommen hier voll zum Tragen. Das Problem der Faserapplizierung in die Rotorblätter kann in Tests untersucht werden und eine darauf basierende Technologie auf alle Windgeneratoren angewandt werden. Die Untersuchungen auf diesem Gebiet dauern noch an. Der Einsatz in diesem Markt kann in großen Stückzahlen erfolgen, so dass sich der Gerätepreis deutlich reduziert. Damit wird dieses Messverfahren auch für Kunden mit anderen Applikationen sehr interessant. In Abb. 17 und 18 sind ein Windgenerator und ein Rotorblatt dargestellt.



Abb. 17: Windgenerator

Der in Abb.19 dargestellte strukturelle Aufbau eines Rotorblattes ist gut geeignet, um die FaserBragg-Gitter an die Innenseite des Blattes zu applizieren. Um den zentralen Kern aus Hartschaum befindet sich eine glasfaserverstärkte Epoxydharzschicht zur Erzielung der Strukturfestigkeit. Die Außenseite ist mit einer Oberflächenschicht aus PUR-Lack als Witterungsschutz versehen. An der Innenseite kann das FaserBragg-Gitter appliziert werden.



Abb. 18: Rotorblatt

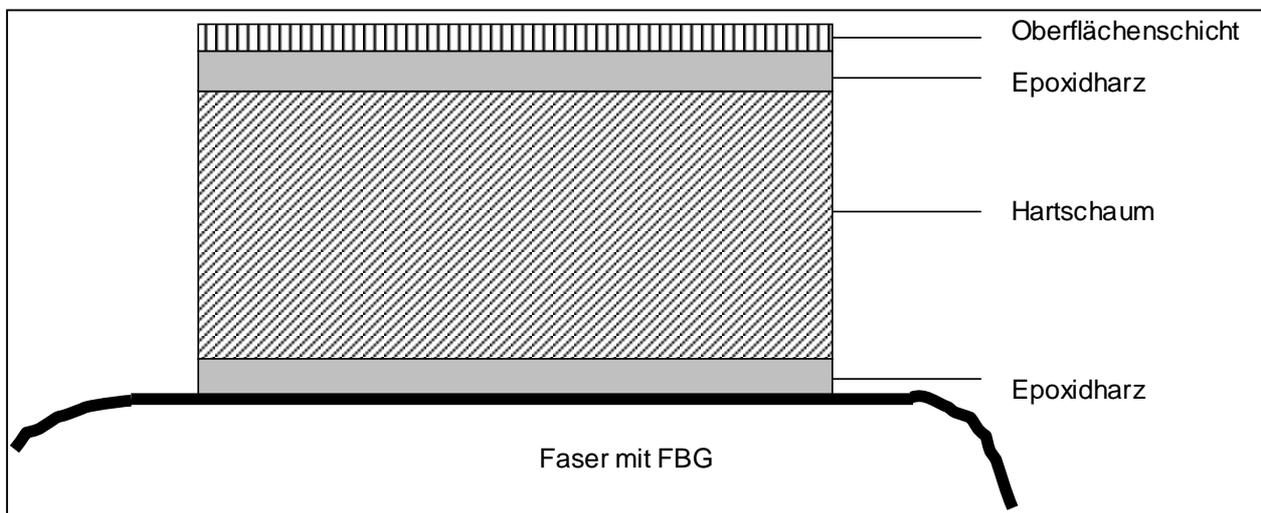


Abb. 19: Struktur des Rotorblattes

5. Ausblick

Im Verbundprojekt FAMOS wurden die Grundlagen für eine Fertigung des StrainTemp in der Jenoptik L.O.S. geschaffen. Mit den erreichten StrainTemp-Parametern (Datenblatt) können ca. 90% der zu erwartenden Messaufgaben gelöst werden. Die quasistatische Version mit einem kleinen Dynamikbereich von 3 Hz ist für fast alle Temperaturmessaufgaben ausreichend, während die dynamische Variante, 75Hz und 1 kHz, den größten Teil der Messaufgaben in der Dehnungsmesstechnik abdeckt. Für Messaufgaben im Frequenzbereich >1kHz wurden vom IPHT Speziallösungen entwickelt. Dabei wurde die CCD-Zeile durch eine Fotodiodenzeile ersetzt. Die Messfrequenz kann dabei bis 1MHz erhöht werden.