

Schlussbericht

zum Forschungsvorhaben

**Mehrkanaliges faseroptisches Messsystem zur dynamischen
und statischen Bauwerksüberwachung und Qualitätssicherung,
insbesondere in der Geotechnik**

Aktenzeichen BAM:	Vh 8145
Förderkennzeichen BMWi:	27/07
Ausfertigung:	TIB Hannover
Fördermittelgeber:	BMWi
Kooperationsvereinbarung vom	30.04.2008
Berichtszeitraum:	01.04.2008 bis 30.04.2012
Bearbeiter	Dipl.-Ing. Constanze Schilder Dipl.-Ing. (FH) Nadine Kusche Dipl.-Ing. Detlef Hofmann M.Sc., Dipl.-Ing. (FH) Harald Kohlhoff Frank Basedau

Dieser Bericht besteht aus 14 Seiten.

Veröffentlichungen von Berichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Prüfungen und Informationen zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfalle der widerruflichen schriftlichen Einwilligung der BAM.

Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich ausschließlich auf den untersuchten Gegenstand. Dieser Bericht liegt auch in elektronischer Form (pdf-File) vor. Maßgeblich sind allein die unterschriebenen Ausfertigungen.

Verteiler:

1. Ausfertigung: BMWi
2. Ausfertigung: BGR, B 4.4, Hannover
3. Ausfertigung: Glötzl Gesellschaft für Baumesstechnik mbH, Rheinstetten
4. Ausfertigung: Centrum Pfähle GmbH, Hamburg
5. Ausfertigung: Bilfinger Berger Spezialtiefbau GmbH, Mannheim
6. Ausfertigung: GSP mbH, Mannheim
7. Ausfertigung: BAM 8.6
8. Ausfertigung: BAM 8.609



Projekt im Förderprogramm MNPQ-Transfer des BMWi**Förderer:**

BMWi Referat VI C 4
Dr. Lorenz Mitschang
Scharnhorststraße 34-37
10115 Berlin

Antragsteller:

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung
Dr.-Ing. Wolfgang Habel
Fachbereich 8.6
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Tel. 030 8104 1916
Fax 030 8104 1919
E-Mail: Wolfgang.Habel@bam.de

Weitere Bundesanstalten:

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Referat B4.4
Dr.-Ing. habil. Ingeborg Göbel
Stilleweg 2
30655 Hannover
Tel. 0511 643 - 2871
Fax 0511 643 - 53 - 2871
E-Mail: i.goebel@bgr.de

Beteiligte Unternehmen:

Glötzl Gesellschaft für Baumeßtechnik mbH
Dipl.-Ing. Joachim Schneider-Glötzl
Forlenweg 11
76287 Rheinstetten
Tel. 0721 51 66 0
Fax 0721 51 66 30
E-Mail: schneider@gloetzl.com

Centrum Pfähle GmbH
Dipl.-Ing. Peter Wardinghus
Friedrich-Ebert-Damm 111
22047 Hamburg
Tel. 040 69 672 - 444
Fax 040 69 672 - 222
E-Mail: wardinghus@centrum.de

Bilfinger Berger Spezialtiefbau GmbH
Technik
Dipl.-Ing. Gerd Dausch
Diféné Str. 14
68169 Mannheim
Tel. 0621 700 14 - 287
Fax 0621 700 14 - 299
E-Mail: Gebhard.Dausch@bilfinger.com

GSP Gesellschaft für
Schwingungsuntersuchungen und
dynamische Prüfmethode mbH
Dr.-Ing. Oswald Klingmüller
Steubenstraße 46
68163 Mannheim
Tel. 0621 331361
Fax 0621 34358
E-Mail: ok@gsp-mannheim.de

Allgemeiner Teil

I.1 Aufgabenstellung

Sicherheitsrelevante Bauteile müssen zunehmend lückenlos kontrolliert werden. Geotechnische Bauwerke, bei denen die Gebrauchstauglichkeit nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit im Vorfeld abschätzbar ist, werden nach DIN 1054 geprüft. Im Projekt „SMARTOMETER“ (Förderkennzeichen VI A 2-16/03) wurde für diese Fälle ein neues Messverfahren auf Basis betonintegrierter faseroptischer Sensoren für die Schallemissionsanalyse entwickelt, das eine effizientere Bauteilbewertung ermöglicht. Die Funktionstauglichkeit des Messverfahrens wurde durch Modellpfehluntersuchungen und Feldversuche nachgewiesen. Um die entwickelte faseroptische Prüfmethodik als Prüfverfahren einer breiten industriellen Anwendung zugänglich zu machen, war Ziel des Projekts, alle Komponenten des Messsystems (Sensor und Messgerät) als Prototyp zu entwickeln. Der konkrete Anwendungsfall der dynamischen Pfehlprüfung war hierbei Schwerpunkt der weiterzuführenden Entwicklungsarbeit. Es hatte sich gezeigt, dass aufbauend auf den im Vorläuferprojekt erreichten Ergebnissen das Einsatzfeld und die Leistungsparameter des Messverfahrens deutlich erweitert werden können.

I.2 Voraussetzungen

Die Aufgabenstellung erforderte eine erneute interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Partnern aus Forschung und Industrie. Es wurde deshalb ein Konsortium mit den notwendigen Kompetenzen zwischen Forschungseinrichtungen (BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin und BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover), kleinen und mittleren Unternehmen (Centrum Pfähle GmbH Hamburg, Glötzl Gesellschaft für Baumesstechnik mbH Rheinstetten, Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfmethoden (GSP) mbH Mannheim und mtronix GmbH Berlin) sowie der Bilfinger Berger Spezialtiefbau GmbH Mannheim gebildet.

Die Mitarbeiter des Fachbereichs „Optische und faseroptische Verfahren“ der **BAM** entwickeln bereits seit Anfang der neunziger Jahre faseroptische Mikrodehnungssensoren für statische und dynamische Messungen. Aus einer Vielzahl von wissenschaftlichen Untersuchungen mit hochauflösenden Sensoren konnten umfangreiche Erfahrungen zur Ermittlung von Werkstoff- und Bauteilverformungen eingebracht werden.

Die **BGR** besitzt umfangreiche Kompetenz in der Geotechnik, Baugrunderdynamik und bei numerischen Simulationsberechnungen von Problemstellungen in diesen Bereichen. Aufgrund dieser besonderen Kenntnisse leistete die BGR wichtige Detailarbeit bei der Formulierung des Anforderungsprofils und der Durchführung von Berechnungen zum Nachweis des Nutzens der entwickelten Messtechnik.

Die **Bilfinger Berger Spezialtiefbau GmbH** ist seit vielen Jahrzehnten ein kompetentes Unternehmen im Spezialtiefbau und insbesondere mit der Herstellung von Großbohrpfählen befasst. Das praktische Know-how, die Kompetenz in der Geomesstechnik durch die firmeneigene FuE- und Messabteilung sowie das alltägliche Lösen von geotechnischen Problemstellungen im internationalen Bereich machen Bilfinger Berger Spezialtiefbau GmbH zu einem wichtigen Partner bezüglich der Anforderungen an die baustellentaugliche Messtechnik sowie die Sensibilisierung späterer Kunden für die neue innovative Messtechnik und deren Vermarktung.

Die **Centrum Pfähle GmbH** ist europaweit überall dort tätig, wo es um Pfahlgründungen geht. Das Unternehmen stellt Fertigteiltramppfähle (Vollverdrängungspfähle nach DIN 12699) her und verfügt über eine optimale Infrastruktur zur effizienten Abwicklung von Baustellen. Die Instrumentierung und Herstellung des im Vergleich zum Großbohrpfahl komplett verschiedenen Pfahlsystems deckt eine große Bandbreite in der Geotechnik vorkommender Anforderungen an das Messsystem ab. Der Einsatz des faseroptischen Messverfahrens in Rammpfählen stellt besondere Anforderungen an die Robustheit der Sensorkonstruktion und kann daher als Prüfstein für die Tauglichkeit der konstruktiven Lösung angesehen werden.

Die **Glözl Gesellschaft für Baumesstechnik mbH** verfügt über langjährige Kompetenz im Bereich geotechnischer Messsysteme. Zwischen BAM und der Glözl GmbH existiert seit vielen Jahren eine gute Zusammenarbeit zur Thematik der Verformungssensorik auf Basis faseroptischer Sensoren, die sich in jüngster Zeit sehr intensiviert und weitere Forschungsfelder für die Anwendung von Fasersensoren in der Geotechnik erschlossen hat.

Die **GSP mbH** ist ein renommiertes Unternehmen im Bereich der zerstörungsfreien Bauwerksanalyse. Insbesondere verfügt das Unternehmen über großes Know-how bei der Qualitätskontrolle von Pfahlgründungen, das in zahlreichen Veröffentlichungen dokumentiert ist. Dr. Klingmüller als Eigner der Firma leitet zudem als Obmann den Unterausschuss "Stoßprüfung von Pfählen" des AK 2.1 NABau 05.07.00, der für die Herausgabe der "Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) verantwortlich ist. Dr. Schallert, ehemals Bearbeiter des Vorläuferprojekts in der BAM, ist umfassend mit den Sensorikdetails der BAM vertraut und daher ein besonderes Bindeglied zwischen FuE und späterer Nutzung.

Die **mtronix GmbH** besitzt Expertise in der Entwicklung elektronischer Messtechnik sowohl im medizinischen Bereich als auch für Fragestellungen in der Dynamik wie z. B. der Erfassung von Teilentladungen in der Hochspannungsmesstechnik. mtronix ist FuE-Partner der BAM in einem Forschungsprojekt zur Schadensfrüherkennung an Hochspannungsanlagen. Die Entwicklung der innovativen Hardware sowie die softwaretechnische Steuerung, Visualisierung und Verarbeitung vieler Messdaten sollten durch mtronix aus einer Hand geliefert werden. Anlässlich aktueller Umstrukturierungen in der Fa. mtronix musste die Zusammenarbeit in diesem Vorhaben beendet werden. Die Entwicklungsleistungen wurden von den Partnern gemeinschaftlich getragen. Insbesondere die Hardware-Entwicklungsaufgaben wurden als Unterauftrag an eine externe Firma gegeben.

Mit den Erfahrungen aller Partner auf verschiedenartigen Gebieten waren die Voraussetzungen für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens gegeben.

I.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Für eine konkrete geotechnische Problemstellung aus dem Spezialbereich der dynamischen Pfahlprüfung wurde im Projekt „SMARTOMETER“ (Förderkennzeichen VI A 2-16/03) ein faseroptisches Mikrodistanzometer auf Basis eines extrinsischen Fabry-Perot-Interferometer-Sensors entwickelt. Dieses Sensorprinzip ist besonders für dynamische Messungen bis in hohe Frequenzbereiche geeignet. Die sensitiven Elemente können sowohl für Ortbetonpfähle beim Einbau unter Baustellenbedingungen als auch für Fertigteiltramppfähle mit direkter Integration in die Pfahlstruktur im Werk verwendet werden.

In diesem Vorläuferprojekt wurden folgende Aspekte untersucht und Lösungen erarbeitet:

- a) zuverlässige Übertragung der Messinformation vom Sensorträger auf das sensitive Element durch Oberflächenapplizierung,
- b) Referenzierung und Validierung von Sensoren in Probekörpern durch Vergleich mit Dehnungsmessstreifen,
- c) Sicherstellung einer zuverlässigen Einbetttechnologie von Sensorkörpern im aggressiven betonchemischen Milieu,
- d) akustische Ankopplung der Sensor-Probekörper an die Betonstruktur und
- e) Charakterisierung von dynamischen und statischen Reaktionen bei Modellpfahl-Prüfungen im Labor.

Als Ergebnis dieser FuE-Leistung liegen Sensor-Funktionsmuster vor, die für Modellpfähle konzipiert wurden und mit denen nachgewiesen wurde, dass das Messverfahren mit den strukturintegrierten Sensoren tauglich ist. Des Weiteren wurden Feldtests durchgeführt, bei denen je acht Aufnehmer in zwei Fertigteilpfähle der Fa. Centrum Pfähle GmbH eingebaut wurden. Die Rammung der beiden Pfähle war erfolgreich; die Sensoren blieben trotz der hohen Rammenergie intakt und konnten sich während statischer sowie dynamischer Pfahlprüfungen beweisen.

Zusätzlich zu den sensorischen Untersuchungen entstand an der BAM ein 6-Kanal-Messgerät für hochauflösende faseroptische Fabry-Perot-Interferometer-Sensoren. Sowohl das Messelement/der Sensorträger als auch das Messgerät haben im Rahmen der bisher durchgeführten FuE-Leistung den Stand von Labor-Funktionsmustern für Modellpfahluntersuchungen erreicht.

I.4 Planung und Ablauf der FuE-Tätigkeiten

Während der Laufzeit des Projekts kam es aus mehreren Gründen zu Verzögerungen bei der Bearbeitung:

- Zwei der befristet eingestellten Mitarbeiter für dieses Projekt haben die BAM im Frühjahr bzw. Sommer 2009 verlassen; die Suche nach geeigneten neuen Mitarbeitern war zeitaufwändig, so dass die Stelle des wissenschaftlichen Mitarbeiters nach sieben Monaten und die des Laboringenieurs nach acht Monaten wiederbesetzt werden konnte.
- Durch Ausscheiden der mtronix GmbH aus dem Konsortium Ende 2009 wurde zur Bereitstellung des Messgeräts als geeignete Alternative eine Kooperation mit der SIOS GmbH Ilmenau gesehen. Diese Firma entwickelt und baute im Unterauftrag das erforderliche Messgerät.
- Das Bauvorhaben und die damit verbundenen Feldversuche beim Projektpartner Centrum Pfähle GmbH haben sich vom September 2011 bis ins Frühjahr 2012 verzögert.

Durch diese Verzögerungen waren kostenneutrale Verlängerungen und Mittelumwidmungen nötig, ohne die die Feldversuche - und damit die Anwendung der Messtechnik unter realen Umgebungsbedingungen - nicht möglich gewesen wären.

Regelmäßig fanden Statusbesprechungen statt. Es wurde ausführlich der aktuelle Stand der Bearbeitung sowie die künftigen Arbeitspakete präsentiert und diskutiert. Alle Mitwirkenden im

Forschungsvorhaben erhielten im Nachgang der Besprechungen Statusprotokolle. Darüber hinaus fanden operativ Besprechungen zwischen BAM und einzelnen Kooperationspartnern statt.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Durch das Ausscheiden der mtronix GmbH aus dem Konsortium wurde die SIOS GmbH mit der Entwicklung des Messgeräts beauftragt.

Die DMT Gründungstechnik GmbH wurde im Unterauftrag mit der dynamischen Probelastung inklusive entsprechendem Gerät beauftragt.

I Eingehende Darstellung

II.1 FuE-Tätigkeiten und erzielte Ergebnisse

Arbeitspaket 1: In diesem Arbeitspaket wurde wie geplant ein konkretisiertes Arbeitsprogramm mit detailliertem Anforderungsprofil für die Sensorik, das Messgerät, die Software und die Auswertung erarbeitet, Teilaufgaben wurden abgestimmt und Besprechungstermine festgelegt. Personelle Umstrukturierung, das neue Sensordesign und die Verzögerungen beim Bauvorhaben von Centrum Pfähle GmbH machten mehrere Verlängerungen nötig.

Arbeitspaket 2: Das Sensordesign wurde wie in Abbildung 1 angepasst. Das Material des Sensorträgers wurde in Neusilber geändert, um die Material- und Bearbeitungskosten zu senken. Um die Empfindlichkeit des Sensors zu erhöhen wurde dem Design ein Festkörpergelenk hinzugefügt und ein flexibles extrinsisches Fabry-Perot-Interferometer (EFPI) an dieser Stelle auf der Außenseite des Sensorträgers in einer Nut appliziert. Dadurch ist es jedoch nicht möglich, weitere Sensortypen, z. B. Faser-Bragg-Gitter (FBG) oder Dehnungsmessstreifen (DMS) auf demselben Sensorträger zu verwenden. Deshalb wurde ein Vergleichsensorträger entwickelt, auf dem zwei DMS, ein FBG und ein festes EFPI appliziert wurden (siehe Abbildung 2).

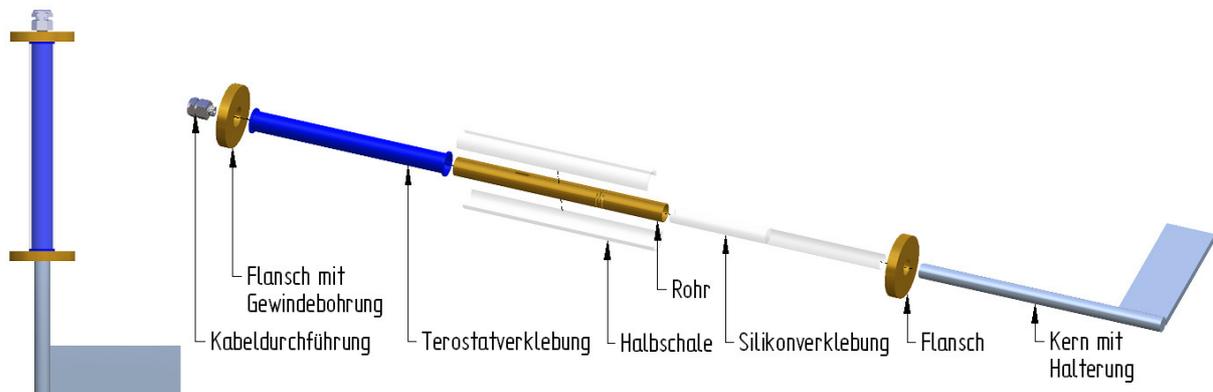


Abbildung 1: Feldtauglicher EFPI-Sensor



Abbildung 2: Vergleichssensor (ohne Messstellenschutz)

Arbeitspaket 3: Es wurden zunächst kleinmaßstäblich sowie nachfolgend maßstäbliche Sensoren und Vergleichssensoren hergestellt. Die kleinmaßstäblichen Sensoren wurden mit Hilfe von Wegaufnehmern und eines Piezo-Stellelements validiert (Abbildung 3, links). Anschließend wurden sie in Betonprismen integriert und einer Druckprüfung unterzogen. Die maßstäblichen Sensoren und Vergleichssensoren wurden in einer Prüfmaschine einer Druckprüfung unterzogen und mit Hilfe von Extensometern validiert (Abbildung 3, rechts). Die so gewonnenen Messwerte wurden als Kalibrierung für den Einsatz bei den Feldversuchen genutzt. Zusätzlich konnten kommerziell erhältliche FBG-Sensoren ohne und mit Temperaturkompensation akquiriert werden. Allerdings zeigte sich bei den Validierungsversuchen, dass die angegebenen Formeln für die Bestimmung der Temperatur aus der Wellenlängenänderung nur zum Teil mit dem Verhalten der Sensoren übereinstimmen, während die Formeln für die Bestimmung der Dehnung nicht im Geringsten dem Verhalten der Sensoren entsprechen und eine zusätzliche Kalibrierung dementsprechend unabdingbar war. Diese Arbeitsschritte mussten zusätzlich in das FuE-Programm aufgenommen werden und haben eine geraume Zeit an Vorbereitung für die Validierung erfordert. Die eigentliche Kalibrierung einschl. Auswertung hat ca. vier Wochen in Anspruch genommen.



Abbildung 3: Links: Validierung der kleinmaßstäblichen Sensoren mittels Wegaufnehmer, rechts: Validierung der maßstäblichen Sensoren mittels Prüfmaschine

Arbeitspaket 4: Die Entwicklung des feldtauglichen Messgeräts für die Sensoren wurde als Unterauftrag an die SIOS GmbH in Ilmenau vergeben. Da die Entwicklungsaufgabe schwieriger war, als ursprünglich angenommen, kam es zu Verzögerungen bei der Entwicklung des Geräts in der Fa. SIOS. Bis Projektende konnte nur ein einkanaliges Labormessgerät (Abbildung 4, links), dessen Software (Abbildung 4, rechts) jedoch die Änderung der Gap-Länge mit Richtungsangabe direkt anzeigen kann, zur Verfügung gestellt werden. Im Labor waren die Messungen erfolgreich und während der Sensorkalibrierung wiesen die Messwerte eine sehr gute Übereinstimmung mit Vergleichsmesswerten des aus dem Vorläuferprojekt entwickelten Messgeräts auf. Da die Bedienung des Geräts kompliziert ist und auf der Baustelle oftmals die nötigen Einsatzbedingungen für die derzeitige Konfiguration des Geräts nur selten gegeben sind, erschwert dies seine Nutzung. Um das Gerät feldtauglich zu gestalten, wäre nach Angaben der

SIOS GmbH noch eine längere Entwicklungszeit nötig, weil grundlegende Änderungen am Ausleseverfahren sowie am elektronischen Aufbau unumgänglich sind. Dabei würde dann auch eine mehrkanalige Lösung realisierbar sein.



Abbildung 4: Links: Messgerät der SIOS GmbH, rechts: zugehörige Software

Als geeignetes Industrieprojekt wurde eine Baustelle beim Partner Centrum Pfähle GmbH bei Varel (in der Nähe von Wilhelmshaven) vorbereitet. Zusätzlich wurde der Einbau der Sensoren auf zwei Testfeldern im BAM Testgelände Technische Sicherheit (TTS) in Horstwalde (südlich von Berlin) in Kooperation mit dem Fachbereich 8.2 vorbereitet. In diesem Feldversuch wurden die mit Bilfinger Berger Spezialtiefbau GmbH begonnenen Aktivitäten für die Instrumentierung von Bohrpfählen umgesetzt, da eine Baustelle der Fa. Bilfinger Berger Spezialtiefbau GmbH in Deutschland bzw. in europäischer Nähe im Feldeinsatz-Zeitraum nicht verfügbar war. Dieser Feldtest in Horstwalde hat den Feldeinsatz der entwickelten Sensoren auch in Bohrpfählen ermöglicht.

Arbeitspaket 5: Für den Einsatz bei den Feldversuchen wurden 30 EFPI-Sensoren und 15 Vergleichssensoren gefertigt. Für weitere 20 EFPI-Sensoren und fünf Vergleichssensoren wurden die Sensorträger vorbereitet.

Der Pfahl im ersten Testfeld in Horstwalde wurde mit neun EFPI-Sensoren, fünf mit DMS ausgestatteten Vergleichssensoren, drei kommerzielle FBG-Sensoren und drei Temperatursensoren instrumentiert.

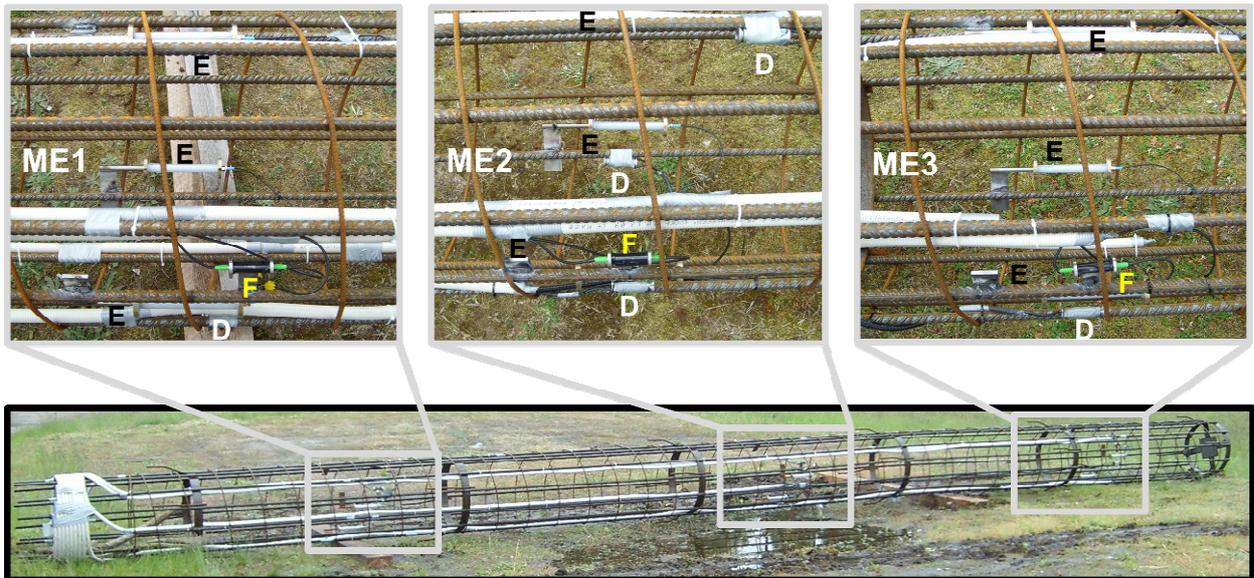


Abbildung 5: Bewehrungskorb des Bohrpfahls im ersten Testfeld in Horstwalde mit montierten EFPI-Sensoren (E), FBG-Sensoren (F) und DMS-Sensoren (D).

Die beiden Pfähle (Abbildung 6, links) für die Baustelle von Centrum Pfähle GmbH wurden mit je vier EFPI-Sensoren, zwei Vergleichssensoren mit DMS und zwei Vergleichssensoren mit je zwei DMS, einem FBG und einem festem EFPI instrumentiert (Abbildung 6, rechts).



Abbildung 6: Links: Pfähle nach dem Rammen, rechts: Messebene mit EFPI-Sensor (oberer Sensor) und Vergleichssensor (unterer Sensor).

Der Pfahl im zweiten Testfeld (Abbildung 7, links) in Horstwalde wurde mit sechs EFPI-Sensoren und drei kommerziellen FBG-Sensoren mit Temperaturkompensation instrumentiert (Abbildung 7, Mitte und rechts).



Abbildung 7: Links: instrumentierter Bohrpfehl im zweiten Testfeld, Mitte: Bewehrungskorb mit zwei EFPI-Sensoren (E) und einem FBG-Sensor (F) pro Messebene, rechts: temperaturkompensierter FBG-Sensor.

Arbeitspaket 6: Am Bohrpfehl im ersten Testfeld in Horstwalde wurden dynamische Low-strain-Messungen durchgeführt (Abbildung 8, links). Für eine statische Belastung mit Gewichten konnte der Pfehl leider bisher auf Grund von Problemen mit der Kraftableitung nicht genutzt werden.

Die beiden Rammpfähle der Centrum Pfähle GmbH wurden direkt während der Rammung gemessen und im Anschluss mit einer Low-strain-Messung geprüft. Die Messdaten sind exemplarisch aus Messebene 1 für einen Rammschlag in Abbildung 8, rechts oben dargestellt. Die Unterschiede in den Messsignalen wurden durch die Einsatzbedingungen auf der Baustelle verursacht. Unter den vorhandenen Bedingungen wird die genaue Höhe der Flanken nur z.T. vom Messgerät der SIOS GmbH erkannt, was sich u.a. in einem Offset zwischen den Start- und Endwerten äußert. Dieser Effekt konnte auch im Labor mit einer entsprechenden Variation der Einsatzbedingungen reproduziert werden. Der Signalverlauf an sich entspricht mit seinen Richtungswechseln aber dennoch dem Verlauf des DMS-Signals. Dieses Problem würde sich mit der vorgesehenen Weiterentwicklung des Messgeräts beheben lassen.

Der Bohrpfehl im zweiten Testfeld in Horstwalde wurde mit einer statischen Probelastung sechs Wochen nach Herstellung geprüft; die Bestimmung des Tragverhaltens ist bis zum Abgabetermin des Berichts noch nicht abgeschlossen. Exemplarisch ist in Abbildung 8, rechts unten die Dehnung während der Probelastung für Messebene 1 dargestellt. Die Maximalbelastung stimmt gut überein, während bei den Lastwechseln durchaus Unterschiede auftreten. Diese Unterschiede können entweder durch die um 120° versetzte Position der Sensoren im Pfehl oder durch Ungenauigkeiten bei der Auswertung auftreten, die sich auf Grund der geringen Messwerte besonders stark auswirken.

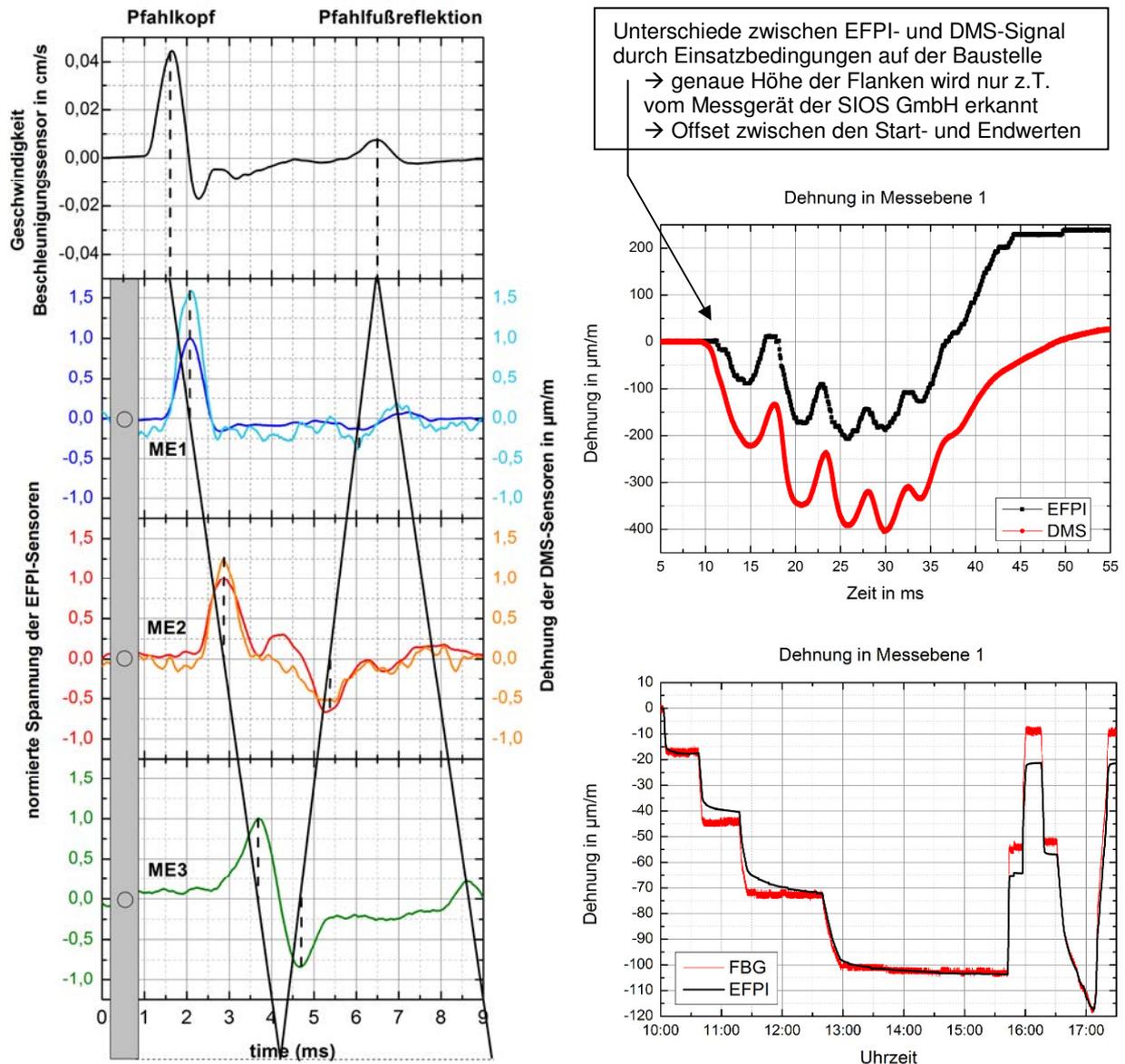


Abbildung 8: Links: Messdaten der Low-strain-Messung vom Bohrpfahl aus dem ersten Testfeld in Horstwalde, rechts oben: Messdaten eines Rammschlags für Messebene 1 (EFPI mit Messgerät der SIOS gemessen), rechts unten: Dehnung während der statischen Probelastung vom Bohrpfahl aus dem zweiten Testfeld (EFPI mit Messgerät aus Vorläuferprojekt gemessen).

Arbeitspaket 7: Auf Grund der noch nicht abgeschlossenen Auswertung der Messdaten ist bisher noch keine Modellierung mit den Messdaten möglich gewesen.

Arbeitspaket 8: Am Pfahl im ersten Testfeld in Horstwalde wurden wiederholt Messungen der FBG-Sensoren über das Jahr hinweg durchgeführt, um eine Langzeitüberwachung realisieren zu können.

Die beiden Pfähle von Centrum Pfähle GmbH wurden noch drei dynamischen High-strain-Wiederholungsmessungen unterzogen. Die Sensoren zeigten untereinander eine gute Übereinstimmung, allerdings steht die Bestimmung des Tragverhaltens noch aus. Die Optimierung des

Messsystems wurde, wie in AP 4 beschrieben, konnte wegen seiner nötigen grundlegenden Änderungen nicht mehr während der Projektlaufzeit begonnen werden.

Arbeitspaket 9: Die Fertigungsunterlagen für den Prototyp-Sensorträger wurden dem Projektpartner Glötzl GmbH übergeben. Die Erarbeitung der Validierungsprotokolle für die einzelnen Sensoren konnte auf Grund der hohen Anzahl der Sensoren noch nicht abgeschlossen werden, werden aber nach termingerechter Vorlage des Schlussberichts der Projektdokumentation hinzugefügt. Teilergebnisse des Projekts wurden bereits auf der Photonics India 2010 in Guwahati, Indien, auf dem VDI/VDE-GMA-Expertenforum „Strukturmonitoring und Zustandsüberwachung 2011“ im Rahmen der Messe „Sensor+Test“ im Juni 2011 in Nürnberg und auf der internationalen Konferenz SHMII-5 2011 in Cancun, Mexiko, vorgestellt. Eine weitere Vorstellung der Projektergebnisse wird im Juli 2012 auf dem 6. European Workshop on SHM (EWSHM) in Dresden stattfinden. Weitere mit den Projektpartnern gemeinsame Veröffentlichungen zu den Messergebnissen aus den Feldtests sind geplant. Ein Informationsblatt über die Ergebnisse des Projekts wird erstellt und verteilt.

II.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens erzielten Ergebnisse bezüglich des Messelements können jetzt als Prototyp eines neuen innovativen Messsystems der Industrie zur Verfügung gestellt werden. Dadurch wird einerseits die Kompetenz der Kooperationspartner in den Bereichen Messen und Qualitätssicherung durch dynamische und statische Prüfungen in der Geotechnik gesteigert, andererseits ist die Einsatzmöglichkeit weit über den geotechnischen Bereich hinaus zum Monitoring sicherheitsrelevanter Bauwerke auch über große Zeiträume gegeben. Den beteiligten Unternehmen wird durch diese Erweiterung der eigenen Produktpalette ein Wettbewerbsvorteil ermöglicht. Dies steigert die den potentiellen Kunden anzubietenden Qualitätssicherungsmöglichkeiten. Die aus den Messungen gewonnenen neuen Erkenntnisse finden in die Optimierung bestehender Berechnungsverfahren und als Erfahrungswerte in die Normung Eingang. Es wird erwartet, dass das Messsystem nun von den Projektpartnern industriell genutzt wird. Durch eine breite auch internationale Vermarktung können erhebliche Einsparereffekte durch Früherkennung und Vermeidung von Bauschäden erreicht werden. Die wird die feldseitige Nutzung durch die Projektpartner vereinfachen.

Bezüglich des Messgeräts besteht noch Entwicklungsbedarf, um dieses feldtauglich zu machen. Auf Einzelheiten wird im Erfolgskontrollbericht eingegangen.

II.3 Fortschritt auf dem Gebiet des Projekts bei anderen Stellen

Wie sich aus Recherchen sowie aus Fachgesprächen ergeben hat, wurden derartige Entwicklungen, die sowohl die statischen wie auch dynamischen Bauteilprüfungen messtechnisch abdecken können, an anderer Stelle nicht betrieben. Es gibt zwar den bereits erwähnten kommerziell erhältlichen und in diesem Projekt als Vergleichssensor eingesetzten Faser-Bragg-Gitter-Sensor (Arbeitspaket 3), allerdings kann dieser nur nach aufwändiger Kalibrierung und Validierung verwendet werden, und auf Grund der hohen Kosten für ein schnelles Auswertegerät sind dynamische Messungen nur bedingt möglich. Es wurden auch Berichte über die direkte Appli-

kation von Faser-Bragg-Gittern auf Bewehrungskörben veröffentlicht (Li, Correia, Chehura, Staines, James, Tatam, Butcher, Fuentes: „Field monitoring of static, dynamic and static pile loading tests using fibre Bragg grating strain sensors“, Proc. of SPIE Vol 7503, 75034O, 2009), allerdings wurden hier für die Auswertung mehrere, z.T. nicht kommerziell erhältliche, Geräte verwendet und die Handhabung der Sensoren ist im Vergleich zu dem in diesem Projekt entwickelten Sensor um ein Vielfaches komplizierter und aufwändiger. Für EFPI-Sensoren gibt es nach wie vor kein kommerziell erhältliches Messgerät, das dynamische und nullpunktreferenzierte Messungen ermöglicht.

II.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Es wurden bisher mehrfach Vorträge auf Fachkonferenzen zu den Projektergebnissen gehalten (s. Arbeitspaket 9) und die schriftliche Beiträge in den entsprechenden Tagungsbänden veröffentlicht (Kopien s. Anlage). Nach Abgabe des Schlussberichts und der Fertigstellung der Feldtestauswertungen werden die Projektergebnisse als gemeinsame Veröffentlichung aller beteiligten Projektpartner in anerkannten Fachzeitschriften (z. B. Geotechnik, Bauingenieur, Bautechnik oder Journal der ISHMII-Gesellschaft, <http://www.ishmii.org>) eingereicht. Zusätzlich soll eine Informationsschrift über die Ergebnisse des Projekts erstellt und verteilt werden.