

DGZfP-Berichtsband BB 69-CD
Vortrag M4

Neuartige faseroptische Feuchtesensoren zur zerstörungsfreien Langzeitüberwachung von Betonbauwerken

S. Wiese, W. Kowalsky, J. Wichern, W. Grahn, TU Braunschweig

Kurzfassung

Zur Messung der Feuchte in Beton wurde ein neuartiges, kostengünstiges Überwachungssystem entwickelt. Als Meßwertaufnehmer dienen faseroptische Sensoren, die bei der Errichtung eines Betonbauwerks appliziert werden und so während der gesamten Lebensdauer in-situ Messungen ermöglichen. Um den harten Bedingungen, denen die Sensoren im Beton ausgesetzt sind, auf Dauer standzuhalten, wurde bei deren Entwicklung das Hauptaugenmerk neben der Sensitivität auf die Langzeitstabilität sowie auf die für den Vorgang des Betonierens notwendige mechanische Stabilität gelegt.

Als Indikator wird der organische solvatochrome Farbstoff Pyridinium-*N*-Phenolat-Betain (Reichardts Farbstoff) verwendet. Dieser wird in eine Polymermatrix eingebettet. Das in den Sensor eindiffundierende Wasser verändert die Polarität in der Umgebung des Farbstoffs. Dies führt zu einer kontinuierlichen hypsochromen Verschiebung der Absorption in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Die Auswertung des Sensors erfolgt faseroptisch durch Reflexionsmessungen mit Hilfe eines Mikrospektrometers. Das Verhalten des Sensors ist vollständig reversibel, so daß Austrocknungs- und Durchfeuchtungsprozesse an einem Betonquader überwacht werden konnten.

Einleitung

Der Feuchtegehalt von Beton hat einen maßgeblichen Einfluß auf die Lebensdauer und damit auf den Gebrauchswert eines Bauwerks. Eine Reihe an Schädigungsprozessen, die ein Versagen eines Bauteils zur Folge haben, sind bedingt durch den Wassergehalt im Porengefüge des Betons. Beim Abbinden kann ein zu schnelles Austrocknen des Betons zu einer ungenügenden Aushärtung mit einer erhöhten Porosität und damit zu einer verminderten Stabilität des Bauteils führen. Thermische Schäden wie Frostschäden oder Betonabplatzungen im Brandfall bewirken eine direkte Zerstörung des Gebäudes. Chemische Angriffe, wie die Karbonatisierung oder andere säureinduzierte Reaktionen, laufen bevorzugt in wäßriger Phase ab. Im Verlauf dieser schleichenden Prozesse wird der Beton zersetzt und die Bewehrung ist durch den Verlust ihrer natürlichen Passivierung anfällig für Korrosion. Die Geschwindigkeit der Entstehung und das Ausmaß von Korrosionsschäden stehen oftmals in direktem Zusammenhang mit der Durchfeuchtung von Bauwerksstrukturen. Die zerstörungsfreie meßtechnische Erfassung des Feuchtegehalts von Bauwerksbeton ist somit von weitreichender Bedeutung für die Bauwerksüberwachung [1].

Faseroptische Sensoren

Das Prinzip der faseroptischen Sensoren (Optoden) ist gut untersucht. Sie sind seit über 20 Jahren Gegenstand der Forschung [2-5]. Prinzipiell enthält eine Optode einen Indikator, dessen optische Materialeigenschaften, wie Polarisierbarkeit, Fluoreszenz oder Absorption, durch die Meßgröße verändert wird. Dadurch wird das Licht in seiner Intensität, Phase oder Polarität beeinflusst, so daß sich ein für den zu messenden Wert charakteristisches Spektrum ergibt.

Man unterscheidet faseroptische Sensoren nach intrinsischen bzw. extrinsischen Sensoren. Intrinsische Sensoren sind dadurch charakterisiert, daß die Faser selbst den Sensor bildet, wohingegen die extrinsischen Sensoren die Faser lediglich als Lichtwellenleiter nutzen. Zum Auslesen der Sensoren bedient man sich zweier Meßverfahren. Bei einem Transmissions-Sensor wird der Indikator vom Licht durchstrahlt. Das resultierende Licht wird in einer zweiten Faser aufgefangen und der Meßeinheit zugeführt. Integriert man in geeigneter Weise einen hochreflektierenden Spiegel in die Optode, so wird das Meßsignal in die ursprüngliche Faser zurückreflektiert. Durch den Aufbau als Reflexions-Sensor kann auf die zusätzliche Faser verzichtet werden.

Faseroptische Sensoren weisen gegenüber anderen Sensorformen eine Reihe von Vorteilen auf:

- keine Beeinflussung durch äußere elektromagnetische Felder,
- keine elektrischen Felder innerhalb des Sensorkopfes,
- keine galvanische Verbindung zwischen Sensor und Auswerteeinheit,
- hohe Widerstandsfähigkeit gegen extreme Umwelteinflüsse,
- korrosionsunempfindliche Fasern arbeiten auch in chemisch aggressiver Umgebung,
- niedrige Faserdämpfung ermöglichen Messungen über große Entfernungen,
- geringe Kosten.

Insbesondere die große Flexibilität, die hohe Störfestigkeit und die Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen sprechen für den Einsatz eines faseroptischen Sensors zur zerstörungsfreien kontinuierlichen Langzeitüberwachung von Feuchte in Betonbauteilen.

Meßsystem

Das Prinzip des verwendeten Meßaufbaus ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Licht einer breitbandigen Lichtquelle wird in die Zuleitungsfaser eines Y-Kopplers eingekoppelt. Das Licht wird in einem Kunststofflichtwellenleiter (KLWL) dem Sensor zugeführt und durch den in dem Sensor integrierten Spiegel wieder in die selbe Faser zurück reflektiert. Das Spektrum des reflektierten Lichts wird mit einem Mikrospektrometer gemessen und anschließend in einem Steuerrechner ausgewertet.

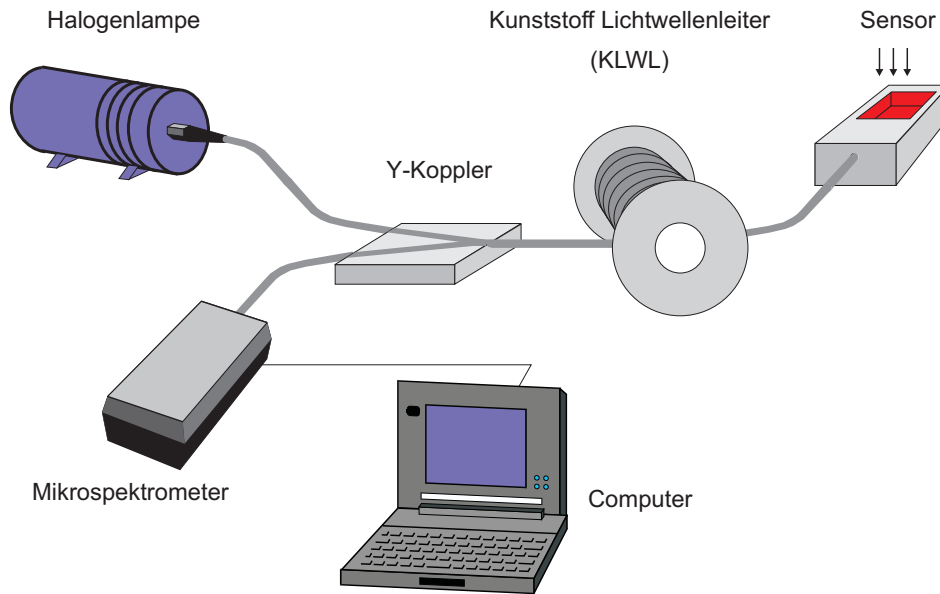


Abb.1: Meßaufbau.

Sensor

Per Definition ist Feuchte der Anteil an Wasser, der einem Stoff ohne dessen strukturelle Veränderung entnommen werden kann [6], d.h. es ist im wesentlichen der Anteil des im Material frei beweglichen Wassers. Um die Menge des frei beweglichen, nicht chemisch gebundenen Wassers im Beton zu bestimmen, ist es notwendig, ein Feuchteäquivalent in dem Sensor zu erzeugen. Um dies zu erreichen, besteht der Sensorkopf aus einer quellbaren Polymer-Matrix. Durch Diffusion stellt sich ein Gleichgewicht ein. Die verwendeten Polymere besitzen sehr kleine Diffusionszeitkonstanten. Unsere Untersuchungen haben gezeigt, daß die Sensoren ihren gesamten Meßbereich dennoch innerhalb weniger Minuten durchlaufen. Da sich die Änderungen der Feuchte im Beton im Bereich von Stunden bis Tagen vollziehen, wird eine zuverlässige Überwachung in Echtzeit gewährleistet ist.

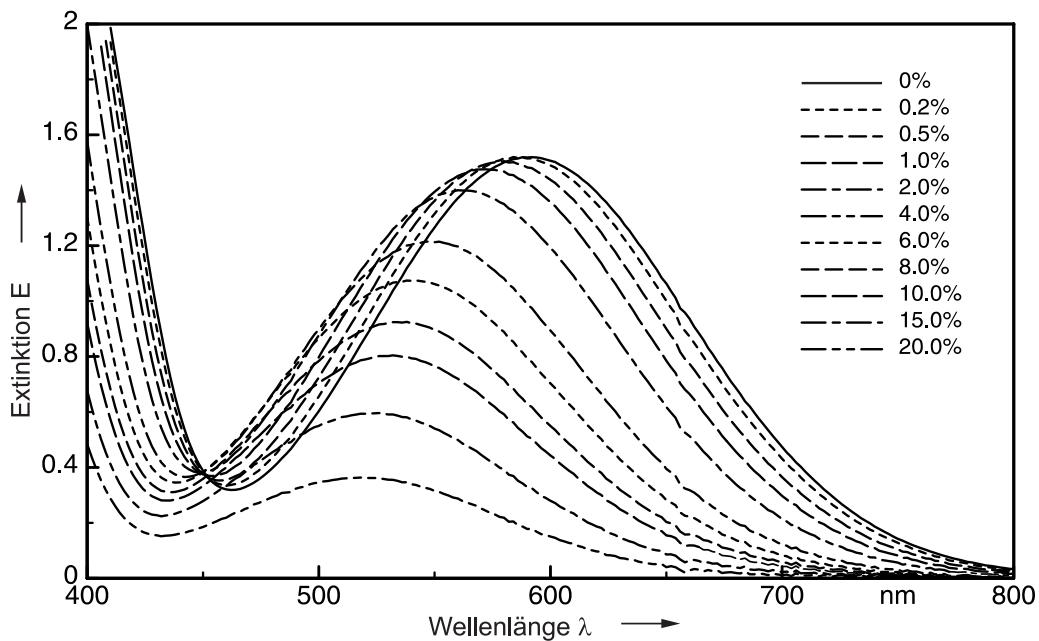


Abb 2: Absorptionsspektren des Pyridinium-N-Phenolat-Betains in Acetonitril bei verschiedenen Wasserkonzentrationen.

Der Wassergehalt der Polymer-Matrix wird mit Hilfe eines solvatochromen Pyridinium Phenolat Betains bestimmt. Die Absorptionsspektren zeigt Abbildung 2 [7,8]. Für die Messung wurde der Indikatorfarbstoff in dem relativ unpolaren Lösungsmittel Acetonitril gelöst. Man beobachtet bei einer Erhöhung des Wasseranteils in der Lösung eine hypsochrome Verschiebung des Absorptionsspektrums. Unterschiedliche Wasserkonzentration zeigen definierte Spektren, so daß aus der Wellenlänge maximaler Absorption auf den Wassergehalt zurückgeschlossen werden kann.

Unter den zahlreichen solvatochromen Farbstoffen besitzt Pyridinium-*N*-Phenolat-Betain den bei weitem größten Solvatochromiebereich: 450-800 nm, d.h. er umfaßt nahezu den gesamten sichtbaren Spektralbereich. Der elektronische Grundzustand zeigt eine hochpolare zwitterionische Struktur mit einem Dipolmoment von ca. 15 D. Anregung in den ladungsverschobenen (charge-transfer-) Zustand verringert das Ausmaß der Ladungstrennung und somit das Dipolmoment auf etwa 6 D. Die Erhöhung der Matrixpolarität, z.B. durch Wasseraufnahme, führt zu einer Absenkung des Grund- und zu einer Destabilisierung des CT-Zustandes und damit zur Hypsochromie (negativer Solvatochromie) [7].

Der Polymermatrix kommt bei dem Sensoraufbau eine besondere Bedeutung zu. Sie bestimmt ganz wesentlich die zentralen Eigenschaften des Sensors, wie Empfindlichkeit, Dynamik, Stabilität, Drift oder Reproduzierbarkeit. Die Polymermatrix eines Feuchtesensors muß eine moderate Hydrophilie besitzen, um nur eine begrenzte Menge an Wasser aufzunehmen. Eine besondere Beachtung muß der Polarität des Polymers geschenkt werden, da sich die Matrix nicht in wässriger Umgebung auflösen darf. Die Anwesenheit von Wasser muß aber auch zu einer Erhöhung der resultierenden Polarität führen, um eine ausreichende solvatochrome Verschiebung des Indikators zu bewirken. Das Polymer muß in einem gängigen ungefährlichen organischen Lösungsmitteln mit niedrigem Siedepunkt gut löslich sein. Für optische Messungen muß nach dem Aushärten der Matrix letztlich eine hohe Transparenz (Homogenität) erzielt werden. Unsere Untersuchungen haben gezeigt, daß sich Poly-methacrylnitril (PMAN) sehr gut als Matrix für einen Feuchtesensor eignet.

Um die Sensoren zu kalibrieren wurden Klimakammern mit unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten eingesetzt. Der Farbstoff und das Polymer wurden gemeinsam in DMSO gelöst und auf ein dünnes Glassubstrat aufgebracht. Nachdem das Lösungsmittel bei 70°C abgedampft wurde, wurden die Proben in die Kammern eingebracht, wo sie so lange verblieben, bis keine Änderungen der Absorptionsspektren mehr beobachtet wurden. Die Wellenlänge maximaler Absorption wurde mit Hilfe einer Gauss-Approximation ermittelt. Die Sorptionsisotherme wurde durch ein Wägevorgang bestimmt. Die Kalibrationskurve von PMAN zeigt Abbildung 3. Im trockenen Zustand liegt das Absorptionsmaximum bei einer Wellenlänge von 602 nm. Die Wellenlänge verschiebt sich um etwa 40 nm auf 562 nm bei maximaler Wasserkonzentration in der Polymermatrix (28 wt%).

Der Sensorkopf wurde als extrinsische Optode in Reflexionsanordnung ausgeführt. Er besteht aus einem Edelstahlrumpf mit einer Faserführung, der Sensormatrix und einem Reflektor aus poliertem Edelstahl, in dem exzentrisch ein aktives Fenster angeordnet ist, durch das sich die Matrix mit dem umgebenden Beton direkt in Kontakt befindet. Das gute Reflexionsvermögen des polierten Stahls ermöglicht eine effiziente Rückkopplung in die Faser.

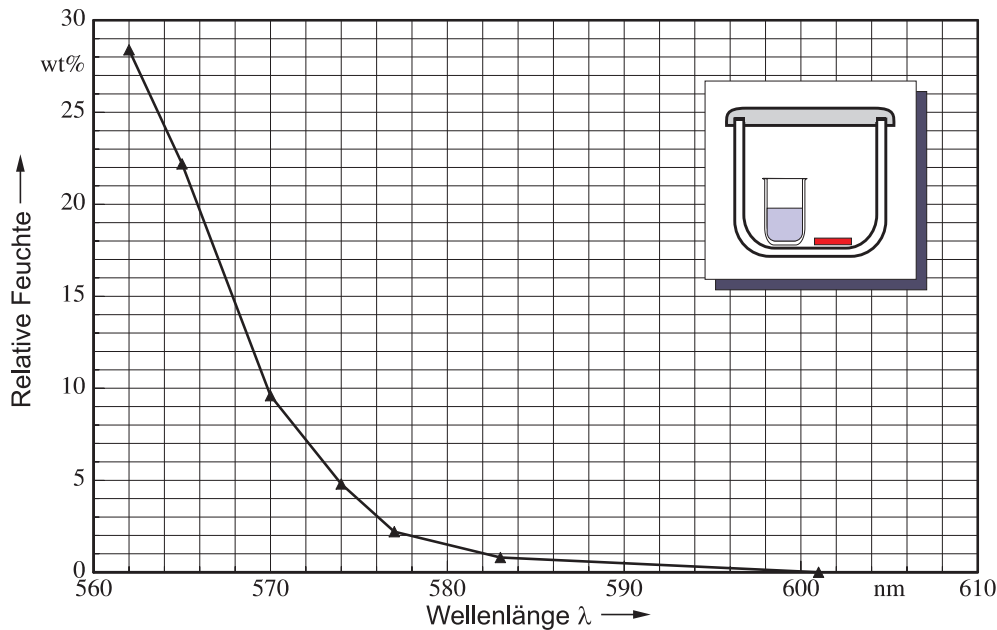


Abb. 3: Kalibrationskurve von PMAN.

Auswerteeinheit

Im folgenden werden einige Details des Meßsystems, wie es in Abbildung 1 gezeigt ist, erläutert. Als Lichtquelle wird eine Halogenlampe verwendet. Sie besitzt ein kontinuierliches Spektrum im sichtbaren spektralbereich. In der Lampe ist ein Linsensystem integriert, mit dessen Hilfe das Licht auf die Faserendfläche abgebildet wird. Alternativ kann auch eine neuartige Weißlicht-LED verwendet werden. Die Strahlcharakteristik weist einen geringen Öffnungswinkel von 17° auf, so daß das Licht auch ohne aufwendiges Linsensystem effizient in die Faser eingekoppelt wird.

Als Lichtwellenleiter wird eine Kunststofffaser (KLWL) verwendet. Sie besteht aus einem PMMA-Kern mit einem Kerndurchmesser von $980 \mu\text{m}$ und einem $20 \mu\text{m}$ Fluordotierten PMMA-Mantel. Der Vorteil dieser KLWLs gegenüber herkömmlichen Glasfasern für den Einsatz im Beton lassen sich wie folgt zusammenfassen [9-11]:

- Eine große Numerische Apertur ($NA=0.5$) und ein großer Kerndurchmesser ermöglichen eine hohe Lichtausbeute,
- eine große Flexibilität und hohe Biegsamkeit, sowie eine gute mechanische Stabilität gewährleisten eine einfache Handhabung,
- ein hoher Widerstand gegen anorganische chemische Belastung erlaubt den Einsatz in Beton,
- geringe Kosten.

Die meßtechnische Analyse der Absorptionsspektren erfolgt rechnergestützt mit einem Mikrospektrometer. Das Licht wird an einem Gitter in seine Spektralkomponenten zerlegt und gleichzeitig auf eine CCD-Zeile (Charge Coupled Device) fokussiert. Jedes Pixel der Diodenzeile repräsentiert einen Wellenlängenbereich von etwa 3 nm . Durch dieses Meßprinzip entfällt ein zeitaufwändiger Wellenlängenscan zugunsten kurzer Meßzeiten.



Abb. 4: Feuchtemessung an einem Ersatzbauwerk.

Abbildung 4 zeigt das Meßsystem im Einsatz an einem Ersatzbauwerk.

Ergebnisse

Es wurden eine Reihe unterschiedlicher Sensoren gefertigt und in Zementmörtel unter Laborbedingungen getestet. Zunächst wurde die Drift und die Reproduzierbarkeit der Optoden untersucht. Alle Sensoren zeigen reproduzierbare Spektren mit vernachlässigbaren Abweichungen.

Um die Langzeitstabilität dieser Sensoren zu überprüfen, wurden sie in einen Quader mit den Abmaßen 30 x 30 x 60 cm einbetoniert. Der Feuchtegehalt wird mittlerweile über einen Zeitraum von 7 Monaten überwacht. Die Auswertung der laufenden Messungen erfolgt weiter. Der Farbstoff wurde bisher nicht aus dem Sensor ausgewaschen, da keine Abnahme des Absorptionsvermögens zu beobachten ist. Um eine Langzeitstabilität über mehrere Jahrzehnte zu gewährleisten, soll der Farbstoff zukünftig durch Co-Polymerisation oder einer der Polymerisation ähnlichen Reaktion immobilisiert werden. Dafür wurden bereits funktionalisierte Derivate des Farbstoffs synthetisiert und werden in einem nächsten Schritt mit dem Polymer kombiniert.

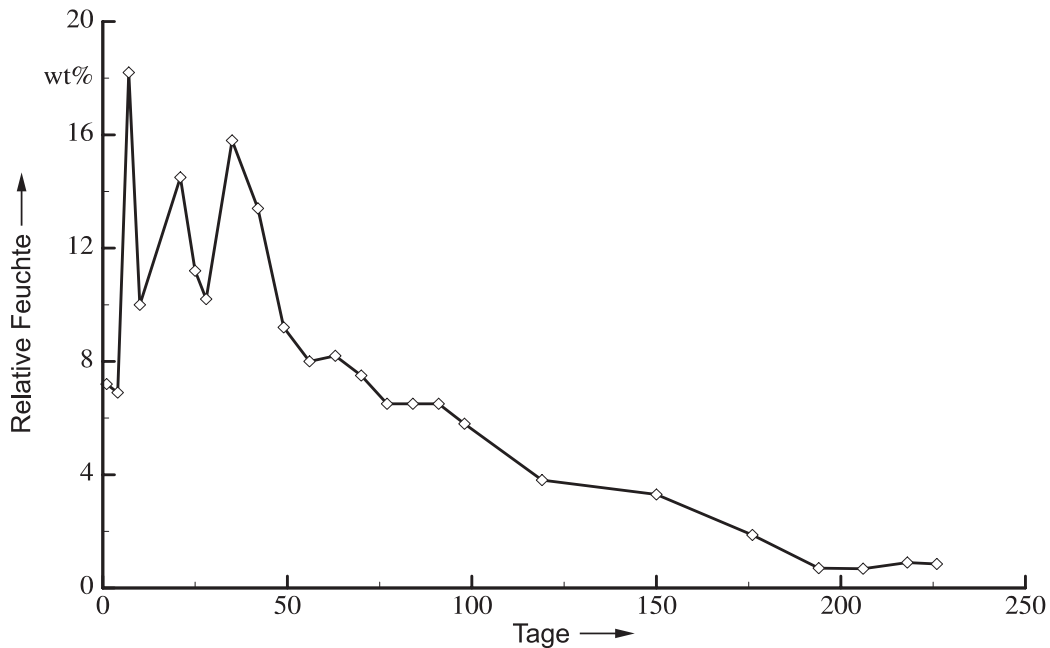


Abb. 5: Trocknungsprozess eines Betonquaders.

Die aktuellen Ergebnisse der Langzeitüberwachung des Betonquaders sind in Abbildung 5 dargestellt. Aus dem Diagramm läßt sich ablesen, daß nach etwa 40 Tagen ein kontinuierlicher Trocknungsprozess eingesetzt hat. Die Oszillationen innerhalb des ersten Monats sind bislang noch nicht eindeutig geklärt. An der Ordinate ist die relative Wasserkonzentration innerhalb des Polymers aufgetragen. Die Messung spiegelt damit zwar ein qualitatives Ergebnis wieder, um jedoch zu einer quantitativen Aussage über die Feuchte im Beton zu kommen, ist es notwendig, die Sorptionisotherme des Betons zu bestimmen.

Zusammenfassung

Ein neuartiges Konzept zur Bestimmung der Feuchte in Beton unter Verwendung faseroptischer Sensoren wurde vorgestellt. Das Meßsystem, bestehend aus einem KLWL-Netzwerk, einer Lichtquelle und einem Mikrospektrometer, gestattet einfache und zuverlässige Messungen mit einer hohen Auflösung.

Die Sensoren wurden als extrinsische Reflexions-Sensoren mit einer sensitiven Polymer/Farbstoff-Matrix ausgeführt. Sie zeigen ein hervorragendes Verhalten in Bezug auf Drift und Reproduzierbarkeit. Es konnten Durchfeuchtungs- und Trocknungsprozesse überwacht werden.

Literatur

1. Schmidt-Döhl, F. 1996. Ein Modell zur Berechnung von kombinierten chemischen Reaktions- und Transportprozessen und seine Anwendung auf die Korrosion mineralischer Baustoffe. Diss. Braunschweig: Schmidt Buchbinderei & Druckerei.
2. Udd, E. 1991. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. New York: Wiley.

3. Soloman, S. 1998. Sensors Handbook. New York: McGraw-Hill.
4. Bludau, W. 1998. Lichtwellenleiter in Sensorik und optischer Nachrichtentechnik. VDI: Springer, pp. 191-227.
5. Dakin, J. and B. Culshaw. 1988. Optical Fiber Sensors: Principals and components. Vol.I Boston: Artech.
6. Scholz, G. 1997. "Metrologische Aspekte der Feuchtemessung in festen Stoffen," vorgestellt auf dem 9. Feuchtetag, September 17-18, 1997.
7. Reichardt, C. 1992. "Solvatochromism, Thermochromism, Piezochromism, Halochromism, and Chiro-Solvatochromism of Pyridinium N-Phenoxide Betain dyes," Chem. Soc. Rev., 21:147-153.
8. Sadaoka, Y., M. Matsuguchi, Y. Sakai and Y. Murata. 1992. "Optical Humidity Sensor using Reichardts Betain Dye-Polymer Composites." Chem. Letters, 53-56.
9. Hornak, L. A. 1992. Polymers for lightwave and integrated optics. New York: Marcel Dekker, Inc.
10. Weinert, A. 1998 Kunststofflichtwellenleiter. München: PPublicis-MCD-Verl.
11. Koike, Y. 1998. "POF-From the past to the future," vorgestellt auf der 7th International Plastic Optical Fibres Conference, October 5-8, 1998.