

Ortsverteilte Detektion von Kohlenwasserstoff-Leckagen mit faseroptischer Impulsreflektometrie

J. Bürck, K. Krämer, S. Roth, H. Mathieu, IFIA

Einleitung

Kohlenwasserstoffe (KW) sind heute ein unverzichtbarer Bestandteil des täglichen Lebens. Ihre intensive Nutzung in vielen Bereichen ist jedoch mit Risiken verbunden, da die Herstellung und Anwendung vieler KWs nicht nur für die menschliche Gesundheit, sondern auch für die Umwelt ein Gefahrenpotenzial darstellt. Gelangen diese Stoffe in die Umwelt, verteilen Sie sich dort und können Wasser, Boden und Luft nachhaltig kontaminieren, weshalb ihr Eintrag möglichst zu vermeiden ist. Damit befasst sich eine Vielzahl von Gesetzen, z.B. das Wasserhaushaltsgesetz [1], sowie verschiedene Vorschriften und länderspezifische Verordnungen zum Umgang mit Wasser gefährdenden Stoffen [2,3]. In vielen Bereichen der Industrie ge-

winnt daher die kontinuierliche, schnelle Erkennung und Lokalisierung von Leckageereignissen in räumlich weit ausgedehnten Objekten, wie z.B. Rohrleitungen, Tanks, Chemieranlagen oder Deponien mit KW-haltigen Flüssigkeiten zunehmend an Bedeutung, da hierdurch eine KW-Emission in die Umwelt und damit verbundene Folgeschäden minimierbar sind. Das schnelle Auffinden einer Leckagestelle, etwa in einer Rohrleitung, ist jedoch mitunter ein schwieriges Unterfangen, da Leitungen oft unterirdisch geführt werden oder schwer zugänglich sind. Um eine möglichst lückenlose und kontinuierliche Kontrolle derartiger Objekte gewährleisten zu können, sind örtlich verteilte Sensorsysteme erforderlich („distributed sensing“).

Messprinzip und Beschreibung des Sensorsystems

In diesem Artikel wird ein neuartiges auf optischen Impulsrückstreumessungen in chemisch sensitiven Lichtleitern basierendes faseroptisches Sensorsystem vorgestellt, welches zur KW-Leckageerkennung und -ortung geeignet ist [4]. Das Messprinzip ist in Abb. 1 illustriert. Hierbei werden Lichtimpulse einer 850-nm-Laserdiode mit Pulsbreiten von wenigen ns über einen optischen Richtungskoppler in eine Glasfaser eingekoppelt. Das in der Faser durch Totalreflexion geführte Licht wird aufgrund von Brechzahlchwankungen im Quarzglas innerhalb des Fasermaterials gestreut bzw. an den Koppelstücken (Glas-Luft-Übergang) am Anfang und Ende der

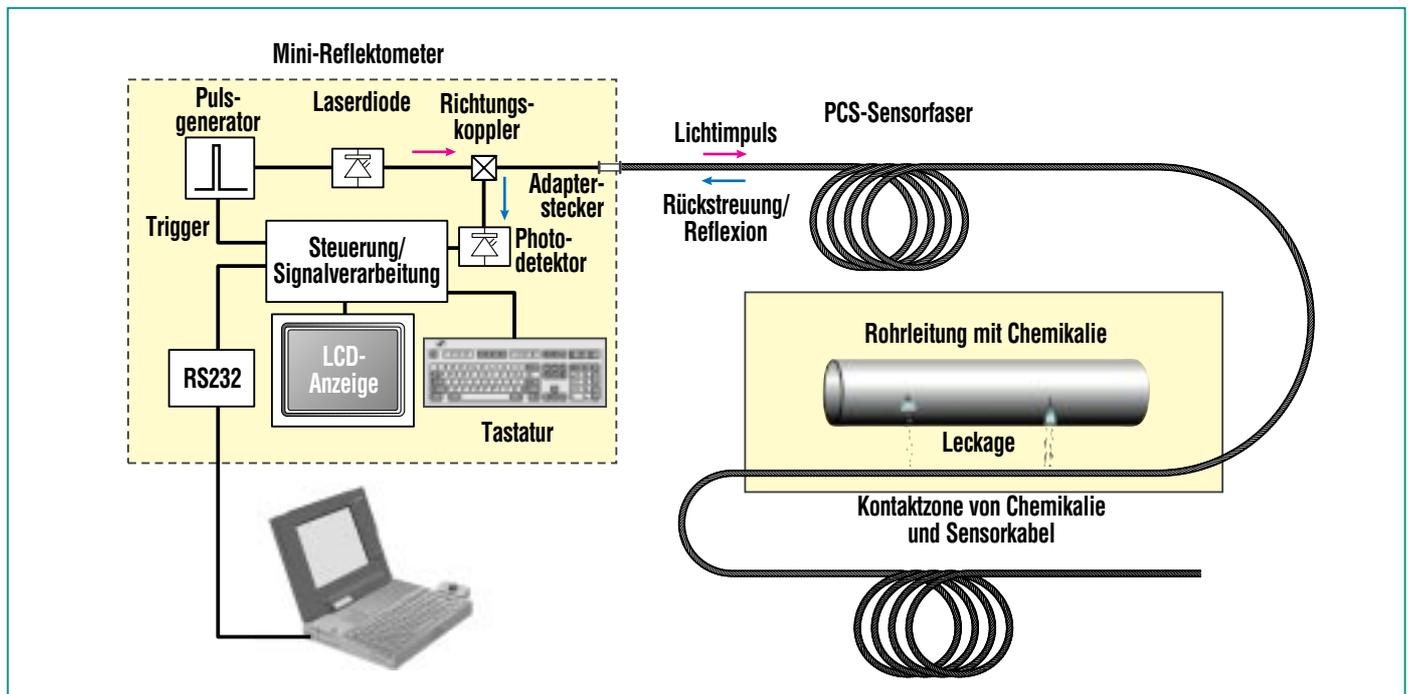


Abb. 1: Schematische Darstellung des Messsystems zur ortsaufgelösten Detektion chemischer Substanzen basierend auf optischer Impulsrückstreureflektometrie.

Faser reflektiert. Ein Teil dieser gestreuten bzw. reflektierten Lichtimpulse wird zum Faseranfang zurückgeführt und über den optischen Richtungskoppler auf einen schnellen Photodetektor geleitet, opto-elektronisch gewandelt und mittels einer schnellen elektronischen Signalverarbeitung in ihrer Reihenfolge aufgezeichnet. Ein Mikroprozessor berechnet die zeitliche Verzögerung der Rückstreusignale gegenüber dem Anregungslichtimpuls und die gemessene Signalintensität wird als Funktion der Laufzeit / bzw. des Ortes registriert und graphisch dargestellt. Rückstremessungen werden in der Telekommunikation zur Bestimmung der Dämpfung von Lichtleiterkabeln oder zur Ortung von Spleißen oder Bruchstellen in Glasfasernetzwerken eingesetzt [4]. Diese „Störstellen“ zeigen

sich als Stufen oder Peaks im ansonsten stetig mit zunehmender Distanz vom Faseranfang in seiner Intensität abfallenden Rückstreusignal. Das in Abb. 1 schematisch dargestellte Mini-Reflektometer aus der Telekommunikationstechnik kann prinzipiell auch zur Ortung von „Störstellen“ verwendet werden, die durch Chemikalienkontakt mit einer speziellen Lichtleiterfaser als solche identifiziert werden können. Hierbei wird ein Lichtleiter mit hydrophobem Polymermantel („polymer clad silica“, PCS) eingesetzt, in welchen apolare KWs eindiffundieren und die lichtführenden Eigenschaften der Faser beeinflussen können. Der Aufbau des Kabels und die Wirkung von KWs auf die lichtführenden Eigenschaften der PCS-Faser ist in Abb. 2 illustriert. Als Schutz gegen

spruchung ist der fragile Lichtleiter in einen spiralförmigen Metallschutzschlauch und eine Edelstahlumflechtung eingezogen, welche beide für Flüssigkeiten permeabel sind. Die PCS-Faser als sensibles Element hat einen Quarzglasfaserkern (Brechzahl $n_1 = 1,456$ bei 633 nm und 20°C, $\varnothing 100 \mu\text{m}$) und einen Silikonpolymermantel mit kleinerer Brechzahl ($n_2 = 1,436$ bei 633 nm und 20°C, $\varnothing 200 \mu\text{m}$). Aus der Totalreflexion der im Lichtleiter propagierenden Moden (geführte Lichtwellen) an der Grenzfläche Kern / Mantel resultieren stehende Wellen, deren evaneszentes (quergedämpftes) Lichtfeld über eine kurze Distanz in den Fasermantel eindringt, wo es mit den dort vorhandenen Substanzen wechselwirken kann [4]. Die Anreicherung eines flüssigen KW im Polymermantel einer PCS-Sensorfaser bewirkt eine lokale Änderung seiner Brechzahl n_2 . Hat der angereicherte KW eine höhere Brechzahl als das unbeeinflusste Polymer, so kommt es in Abhängigkeit von der resultierenden lokalen Brechzahländerung zu einer teilweisen oder vollständigen Auskopplung von Lichtintensität an der Kontaktstelle. Neben dem Anregungslichtimpuls, wird auch das in Richtung Faseranfang zurückgeführte Streulicht aus Faserzonen hinter der Kontaktstelle beim Passieren der Kontaktstelle geschwächt und in der Rückstreusignalform ergibt sich eine Signalstufe [4], welche vom Überwachungsinstrument automatisch registriert und dokumentiert wird [5]. Hierdurch ist die Position einer Kontaktstelle mit einer flüssigen apolaren Substanz detek-

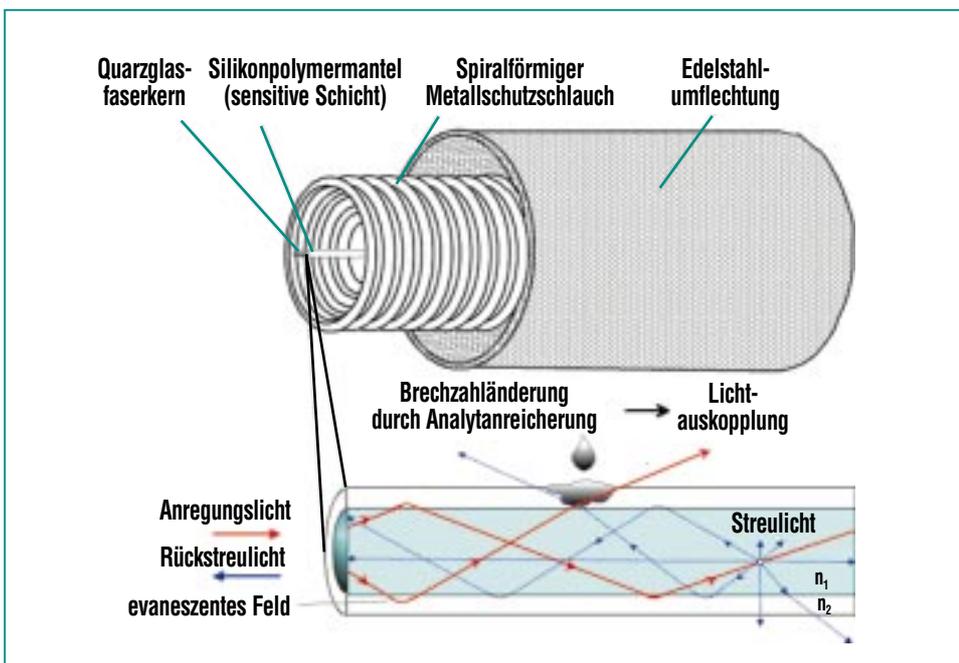


Abb. 2: Aufbau des chemisch sensitiven Sensorkabels und Illustration des Messprinzips (Rückstremessungen unter Nutzung des evaneszenten Lichtfeldes in einer mit Polymer ummantelten Quarzglasfaser).

tierbar, wenn das Sensorkabel z.B. entlang einer Rohrleitung mit umweltgefährdenden KWs unterhalb der Leitung verlegt wird (vgl. Abb. 1) [6]. Die örtliche Auflösung, d.h. die Möglichkeit mit dem Reflektometer z.B. zwei Stufensignale in unmittelbarer örtlicher Nachbarschaft zu unterscheiden, liegt bei 1 – 5 m. Sie ist durch die Pulsbreite des Lichtimpulses und die Bandbreite des Detektionssystems vorgegeben. Abb. 3 zeigt eine Fotografie des faseroptischen Überwachungssystems: es besteht aus dem Mini-Reflektometer, welches an das Sensorkabel und einen PC, der als Steuer-, Auswerte- und Dokumentationseinheit dient, angeschlossen ist.

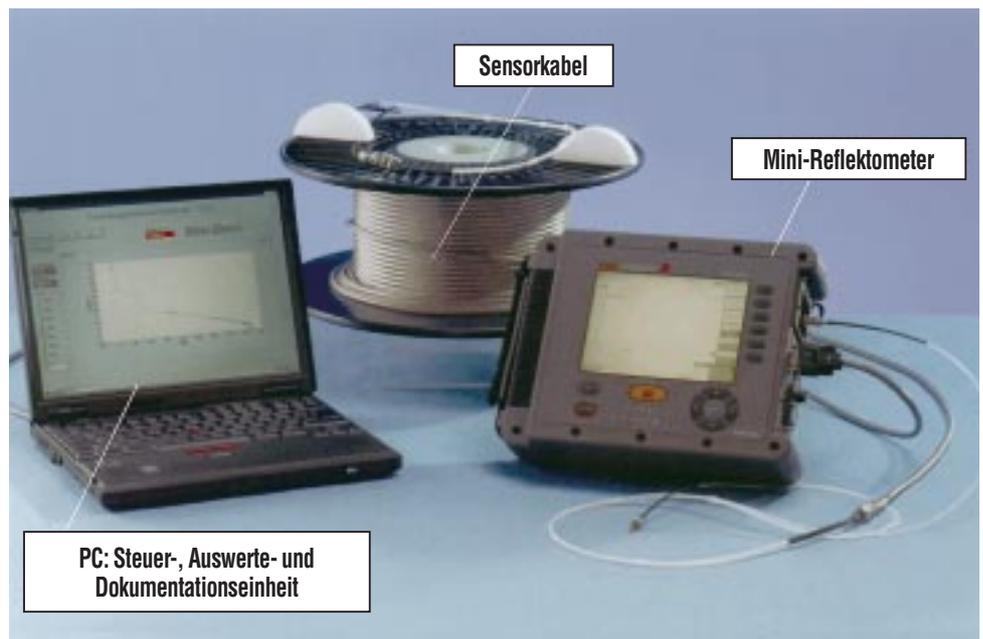


Abb. 3: Faseroptisches Sensorsystem zur kontinuierlichen Überwachung und Ortung von Kohlenwasserstoff-Leckagen.

Rückstreusignalförmigkeiten

Abb. 4 illustriert typische mit dem Überwachungssystem gemessene Signalförmigkeiten. In allen Kurven zeigt sich jeweils ein deutlicher Peak am Anfang und Ende der Faser aufgrund der Reflexionen des Anregungslichtimpulses am Stecker (Übergang Luft-Glas) und eine mit zunehmender Faserlänge kontinuierlich abnehmende Signalintensität, welche durch Lichtstreuung und -absorption im Fasermaterial hervorgerufen wird. Hierdurch ist die maximale Faserlänge auf ca. 1,5 km begrenzt, da die Signale bei größeren Längen im Bereich des Rauschens des opto-elektronischen Detektionssystems liegen. Aufgrund der starken Einkoppelreflexion ist die Photodiode kurzfristig in Sättigung und es ergibt sich eine „Totzone“ von etwa 20 m Länge am Faseranfang.

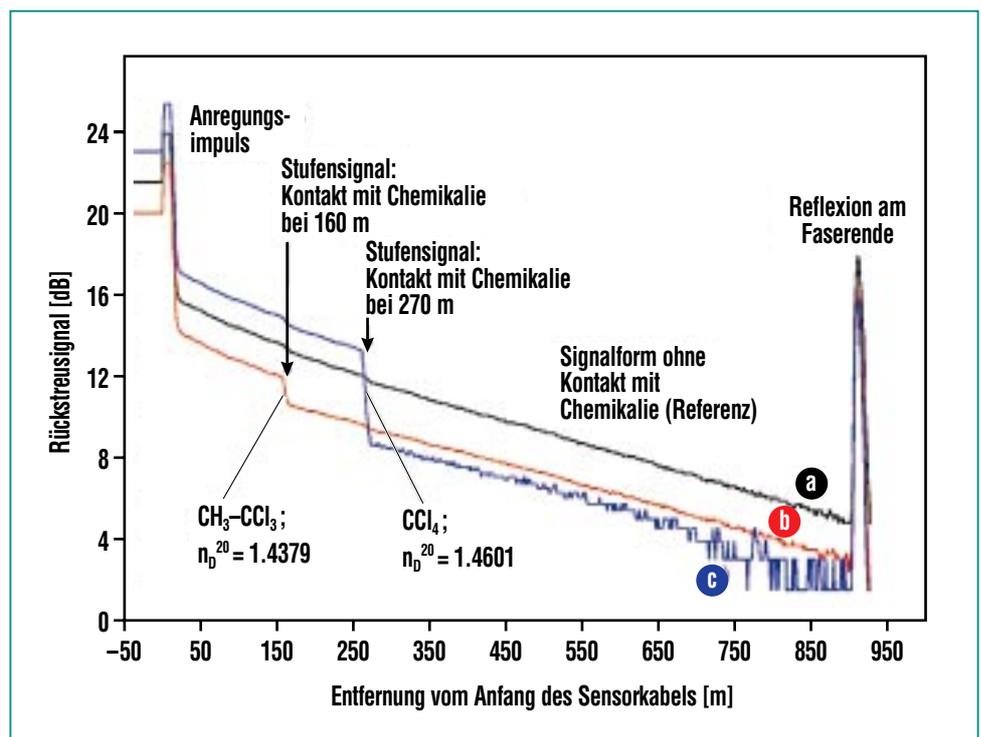


Abb. 4: Rückstreusignalförmigkeiten aus einer 934 m langen Sensorfaser bei Kontakt mit Luft (a), 1,1,1-Trichlorethan (b) und Tetrachlorkohlenstoff (c), die Signalförmigkeiten (b) und (c) sind zur übersichtlicheren Darstellung um $-1,5$ dB bzw. $+1,5$ dB auf der Ordinatenachse parallel verschoben.

Kurve a zeigt das Rückstreusignal aus einer Faser, welche über ihre ganze Länge lediglich mit der Umgebungsluft in Kontakt stand. Diese Referenz-Signalform wird vom System abgespeichert und dient als Vergleichszustand gegenüber den später erfolgenden kontinuierlichen Messungen. Bei Kontakt der Faser entlang einer Strecke von 2 m in einer Entfernung von 160 m vom Faseranfang mit dem chlorierten KW 1,1,1-Trichlorethan (Abb. 4, Kurve b), welcher eine leicht höhere Brechzahl als der Fasermantel hat, tritt eine 1-dB-Stufe bei der entsprechenden Faserposition auf. Für Tetrachlorkohlenstoff, welches eine deutlich höhere Brechzahl besitzt und eine entsprechend höhere „Mischungsbrechzahl“ im Fasermantel herbeiführt, wird eine Stufe mit einer Höhe von ca. 4-dB-Faser erhalten (Abb. 4, Kurve c, Kontakt bei 270 m). Außer im Bereich der 20-m-Totzone am Faseranfang sind apolare KWs an jedem Punkt entlang des Kabels lückenlos erfassbar. Bei KWs mit hoher Brechzahl und starker Anreicherung im Fasermantel wird die Brechzahl lokal derart erhöht, dass das gesamte Rückstreulich ausgekoppelt wird und daher nur diese Kontaktzone detektierbar ist; ansonsten können auch mehrere hintereinander liegende Kontaktzonen erfasst werden [4]. Weiterhin ist die Höhe und Breite der Rückstreusignalstufen linear mit der Länge der Faserzone korreliert [4], welche mit Flüssigkeit kontaktiert ist, so dass für einen gegebenen KW aus der Höhe und Breite des Stufensignals auch eine Aussage über die Ausdehnung der Anreicherungsstelle möglich ist.

Anwendungsspektrum des faseroptischen Sensorsystems

Tab. 1 zeigt exemplarisch die gemessenen Stufensignalthöhen für verschiedene reine KWs, sowie für praxisrelevante KW-Gemische aus großen Tanklagern der

Mineralölindustrie. Generell lässt sich feststellen, dass die Stufensignalthöhe mit zunehmender Brechzahl und abnehmender Polarität des KW's ansteigt. Für die KW-Reinsubstanzen ist in Tab. 1 zusätzlich zur Brechzahl, die jeweilige Polarität als E_T^N -Wert angegeben [7]. Die E_T^N -Polaritäts-

KW-Reinsubstanzen			
	Stufensignalthöhe [dB]	n_D^{20}	E_T^N -Wert [7]
Dichlormethan	0.00	1.4242	0.3086
Chloroform	1.53	1.4459	0.2593
Cyclohexanon	0.39	1.4507	0.2809
1-Methyl-2-Pyrrolidon	0.03	1.4684	0.3549
Trichlorethen	8.30	1.4773	0.1605
Toluol	8.33	1.4961	0.0988
Tetrachlorethen	8.52	1.5053	0.0432
Pyridin	0.81	1.5095	0.3025
1,2-Dibrompropan	3.00	1.5201	0.2593
Anilin	0.10	1.5863	0.4198
KW-Gemische aus Tanklagern			
	Stufensignalthöhe [dB]	n_D^{20}	
Heizöl	0.63	1.4665	–
Diesel	0.39	1.4609	–
Superbenzin	0.31	1.4390	–
Superbenzin 98	0.27	1.4389	–
Normalbenzin	0.09	1.4446	–
JET A1, Kerosin	0.87	1.4422	–
Rohöl	0.19	n.b.	–
Brunnenteer	0.46	n.b.	–

Tab.1: Stufensignalthöhen für verschiedene KW-Reinsubstanzen und praxisrelevante KW-Gemische aus Tanklagern; Werte gelten für Kontakt der flüssigen Substanz mit einer 2-m-Zone entlang der Sensorfaser.

werte sind normiert und liegen auf einer Skala von 0 (Tetramethylsilan) bis 1 (Wasser), d.h. je polarer eine Substanz ist, desto näher liegt ihr E_T^N -Wert bei 1 und desto geringer reichert sie sich im Fasermantel an. Bei Auftragung der auf den Maximalwert des Stufensignals (= vollständige Lichtauskopplung) normierten Signale von gemessenen reinen KWs als Funktion des Quotienten aus Brechzahl und E_T^N -Wert, resultiert ein S-förmiger Kurvenverlauf, der durch eine sigmoide Funktion mathematisch beschreibbar ist [6]. Mit der ermittelten Modellfunktion lässt sich die Stufensignalhöhe für reine KWs, deren Brechzahl und E_T^N -Wert bekannt ist, in erster Näherung vorhersagen.

Bei allen detektierbaren KW-Reinsubstanzen und praxisrelevanten KW-Gemischen, war eine erste Signaländerung bereits nach 15 – 30 Sek. nachweisbar, während der Gleichgewichtszustand (konstante Stufenhöhe) abhängig vom KW zwischen ca. 3 – 15 Min. erreicht wurde. Flüchtige KWs dampfen aus dem Fa-

sermantel wieder vollständig aus, d.h. das Ansprechverhalten des Sensorsystems ist hier vollständig reversibel. Auch bei KWs mit geringer Flüchtigkeit konnte die Sensorfaser in vielen Fällen durch Spülen mit Aceton oder Petroleumether sauber gespült und weiterverwendet werden [4]. Das entwickelte faseroptische Sensorsystem zur ortsaufgelösten Detektion von flüssigen KWs existiert momentan lediglich als Prototypinstrument. Zur Zeit wird es im Rahmen eines TT-Projektes mit einem industriellen Partner weiter optimiert, um es bei der praktischen KW-Leckageortung einsetzen zu können.

Zusammenfassung

In vielen Bereichen der Industrie gewinnt die schnelle Erkennung und Lokalisierung von Leckageereignissen in räumlich weit ausgedehnten Objekten, wie z.B. Rohrleitungen, Tanks, Chemieanlagen oder Deponien mit umweltgefährdenden Flüssigkeiten zunehmend an Bedeutung, da hierdurch die Emission gefährlicher Substanzen in die Umwelt

und damit verbundene Folgeschäden minimierbar sind. Zur lückenlosen und kontinuierlichen Kontrolle derartiger Objekte sind örtlich verteilte Sensorsysteme erforderlich. Im Beitrag wird ein neuartiges, auf optischen Impulsrückstreuungsmessungen in chemisch sensitiven Lichtleitern basierendes, faseroptisches Sensorsystem vorgestellt, welches zur schnellen Detektion und Lokalisierung von Kohlenwasserstoff-Leckagen geeignet ist. Die minimale Ortsauflösung liegt abhängig von der verwendeten Lichtimpulsbreite bei 1 – 5 m, während die minimalen Ansprechzeiten zwischen 15 – 30 Sek. liegen. Bei geeigneter Anordnung des Sensorkabels in einer Anlage ist das System aufgrund des schnellen Ansprechverhaltens und des zusätzlichen Informationsgehaltes über Ort und Ausdehnung der KW-Leckage eine Ergänzung oder Alternative zu herkömmlichen Leckanzeigergeräten.

Literatur

- [1] Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (WHG) in der Fassung vom 12. November 1996, BGBl. I S. 1696.
- [2] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen (VwVwS) vom 17. Mai 1999, Bundesanzeiger Nr. 98a.
- [3] Verordnung des Umweltministeriums über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe (Anlagenverordnung) vom 29. November 1995, Gesetzblatt Baden-Württemberg 33, S. 816.
- [4] E. Sensfelder, J. Bürck, H.-J. Ache, *Appl. Spectrosc.* 52 (1998) 1283-1298.
- [5] M. Schwörer, *Mess-, Bedien- und Auswerteprogramm für ein faseroptisches Sensorsystem. Diplomarbeit, Fachhochschule Karlsruhe, 2003.*
- [6] J. Bürck, K. Krämer, S. Roth, *Technische Überwachung* 41 (2001) 18-22.
- [7] Ch. Reichardt, *Chem. Rev.* 94 (1994) 2319-2358.