

# Optimierte Glasfaserkabel zur Leckageortung und Filtergeschwindigkeitsmessung

## Optimized Fibreoptic Cables for Leakage Detection and Flow Velocity Measurements

M. Goltz, S. Perzmaier, M. Aufleger, V. Schramm

### Abstract

The functional efficiency of the sealing element is crucial for the stability of water retaining structures. Therefore leakage detection plays an important role in today's dam monitoring. The distributed measurement of seepage velocity using distributed fibre optic temperature measurements in combination with the heat-pulse method allows for leakage detection and quantification. In particular this method appears to be suited for the evaluation of risk of internal erosion, since the decisive parameter of particle transport, the seepage velocity, can be measured. The presented optimisation of the heat-up cables improves significantly the applicability and the accuracy of this method.

### Zusammenfassung

Die Funktionalität von Dichtungselementen ist entscheidend für die Standsicherheit von Stauanlagen. Daher nimmt die Leckageortung einen großen Stellenwert bei der Stauanlagenüberwachung ein. Mit der verteilten Filtergeschwindigkeitsmessung mittels Aufheizmethode und verteilter faseroptischer Temperaturmessungen können Leckagen lokalisiert und quantifiziert werden. Besonders wertvoll erscheint die Methode für die Bewertung der Gefahr der inneren Erosion, da mit der Filtergeschwindigkeit, der maßgebende Parameter für den Partikeltransport gemessen werden kann. Die vorgestellte Optimierung der Aufheizkabel verbessert Anwendungsmöglichkeiten und Messgenauigkeit der Methode deutlich.

## 1 Einleitung

Seit einigen Jahren haben sich verteilte faseroptische Temperaturmessungen als leistungsfähiges Werkzeug zum Erkennen und Lokalisieren von Durchsickerungen in Dämmen etabliert [1]. Die Glasfasern dienen dabei als Sensor und Lichtleiter. Die Temperaturverteilung entlang des Glasfaserkabels und deren zeitliche Entwicklung wird mit Hilfe von DTS Geräten aufgezeichnet, welche aus einem Laser und einer optischen Auswerteeinheit bestehen. Das zusätzliche Aufheizen der Kabel durch Anlegen einer Spannung an im Kabel integrierter Kupferadern erlaubt die Unterscheidung restfeuchter, gesättigter und durchströmter Kabelumgebungen. Diese Methode wird seit mehreren Jahren im In- und Ausland erfolgreich zur Überwachung der Funktionalität von Oberflächendichtungen eingesetzt [2], [3]. Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München ist die so genannte Aufheizmethode stetig weiterentwickelt worden. Dadurch kann heute sowohl Sättigungsgrad als auch Filtergeschwindigkeit mit guter Genauigkeit verteilt

gemessen werden, was neue Anwendungen z. B. bei der Bewertung des Gefahrenpotentials der inneren Erosion ermöglicht [4].

## 2 Verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung

### 2.1 Funktionsweise der Aufheizmethode

Bei der Aufheizmethode werden die Glasfaserkabel durch Anlegen einer elektrischen Spannung an im Kabel integrierter Kupferadern über etwa eine Stunde erwärmt, um eine Temperaturdifferenz  $dT_i$  zwischen dem Kabelinneren und der Umgebung zu erzeugen. Diese Temperaturdifferenz setzt sich aus einer heizleistungsabhängigen Temperaturdifferenz  $dT_K$  zwischen Kabelinnerem und Kabelwand, sowie aus einer geschwindigkeitsabhängigen Temperaturdifferenz  $dT_U$  zwischen Kabelwand und Umgebung zusammen. Die entsprechenden Kalibrierfunktionen können entweder auf analytischem Weg, unter Berücksichtigung der erzwungenen Konvektion am Heizzylinder in einem durchströmten porösen Medium oder durch eine Vielzahl von Aufheizversuchen bei unterschiedlichen Filtergeschwindigkeiten bestimmt werden. Der Messbereich der Geschwindigkeit liegt in dem für wasserbauliche Fragestellungen relevanten Bereich zwischen  $10^{-5}$  m/s und  $10^{-3}$  m/s. Die Messgenauigkeit hängt davon ab wie groß die Spanne der Temperaturdifferenz, also der Unterschied der Temperaturdifferenz zwischen langsamen und schnellen Geschwindigkeiten, gegenüber der Messgenauigkeit der verteilten Temperaturdifferenzmessung ist (vgl. **Bild 3**). Die Spanne der Temperaturdifferenz kann durch Verwendung künstlicher Kabelummantelungen mit geringer Wärmeleitfähigkeit und hoher Porosität, durch Erhöhung der Heizleistung oder durch eine Reduktion des Kabeldurchmessers vergrößert werden.

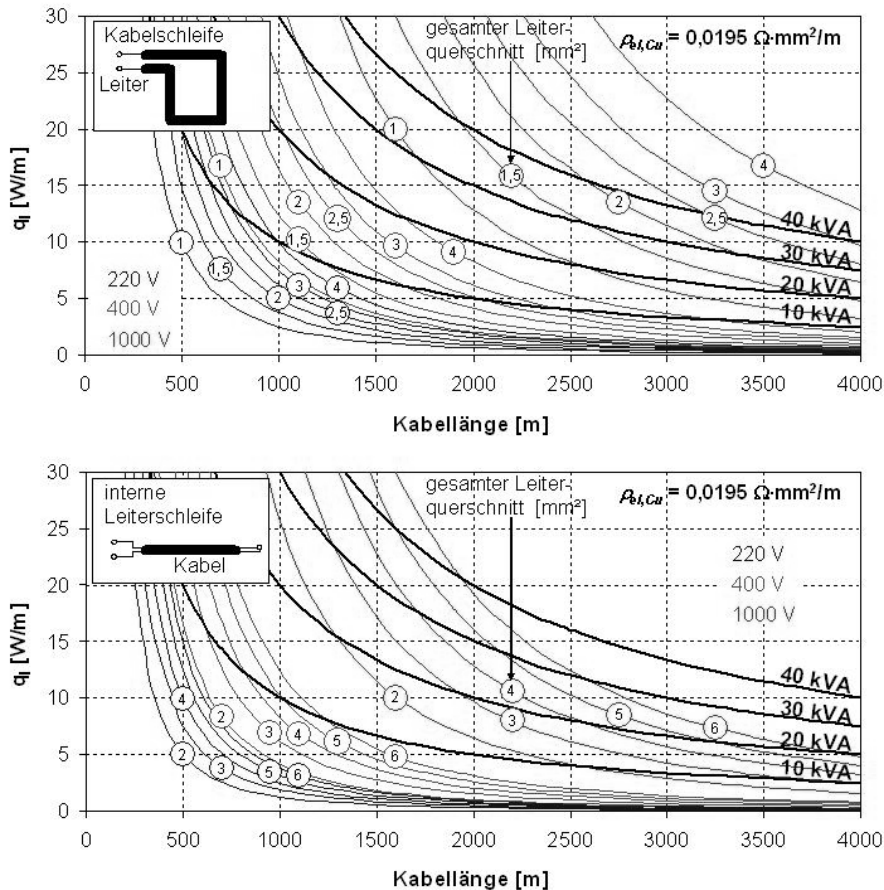
### 2.2 Einfluss der Heizleistung auf die Messgenauigkeit

Durch Anlegen einer Spannung  $U$  an einen Leiter mit dem elektrischen Widerstand  $R_{el}$  wird im Leiter ein Strom  $I$  erzeugt. Der Leiter verhält sich dabei wie ein Ohmscher Verbraucher und erwärmt sich. Der erzeugte konstante Wärmestrom entspricht der Leistung der Stromquelle und ist das Produkt aus Spannung und Stromstärke. Der auf die Leiterlänge  $L$  bezogene Wärmestrom wird als Heizleistung  $q_l$  bezeichnet.

$$q_l = \frac{q}{L} = \frac{U \cdot I}{L} = \frac{U^2}{R_{el} \cdot L} \quad (1)$$

Die Heizleistung geht linear in die Spanne der Temperaturdifferenz und somit in die Messgenauigkeit ein. Für die ausschließliche Leckageortung reichen Heizleistungen zwischen 3 und 5 W/m aus. Die verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung benötigt bei der Verwendung von Standardhybridkabeln (Durchmesser ca. 10 mm) Heizleistungen von mindestens 10 W/m.

Wird das Aufheizkabel in einer Schleife verlegt können beide Enden an die Stromquelle angeschlossen werden (Kabelschleife). Kann nur ein Ende des Kabels an die Stromquelle angeschlossen werden, muss es mindestens zwei Leiteradern enthalten, die dann am Kabelende zu einer internen Leiterschleife verbunden werden. In **Bild 1** ist der Zusammenhang zwischen Kabellänge, Heizleistung, Leiterquerschnitt und Heizspannung für Kabelschleifen und interne Leiterschleifen dargestellt. Die Kabelschleifen benötigen bei gleicher Kabellänge und Heizspannung nur ein Viertel der Kupferquerschnittsfläche wie die internen Leiterschleifen.



**Bild 1:** Heizleistung über die Kabellänge für unterschiedliche Leiterquerschnitte bei Kabelschleifen und Leiterschleifen nach [4]

### 2.3 Einfluss des Kabeldurchmessers und künstlicher Kabelumgebungen auf die Messgenauigkeit

Bei keiner oder sehr langsamer Umströmung nimmt die Temperaturdifferenz zwischen Kabelwand und Umgebung  $dT_U$  mit abnehmendem Kabeldurchmesser zu. Der Grund dafür ist die abnehmende Oberfläche die für den Wärmeaustausch zur Verfügung steht, unabhängig davon ob freie Konvektion oder Wärmeleitung wirkt. Außerdem nimmt  $dT_U$  bei keiner oder sehr langsamer Umströmung mit abnehmender Wärmeleitfähigkeit der Umgebung zu. Da  $dT_U$  unabhängig von Kabeldurchmesser und Wärmeleitfähigkeit der Umgebung bei schnellen Geschwindigkeiten gegen Null strebt, nehmen folglich auch die Spanne der Temperaturdifferenz und die Messgenauigkeit mit abnehmendem Kabeldurchmesser und abnehmender Wärmeleitfähigkeit der Umgebung zu. Dem Kabeldurchmesser sind nach unten Grenzen gesetzt, da das Kabel neben den Glasfasern auch die erforderlichen Kupferquerschnitte aufnehmen muss, die über die Heizleistung mit der möglichen Kabellänge und der Messgenauigkeit in Verbindung stehen. Als künstliche Kabelumgebungen haben sich mechanisch vernadelte Vliesstoffe mit mehreren Millimetern Dicke bewährt, wie sie zum Drainieren und Filtern in der Geotechnik verwendet werden [4].

### 3 Optimierung der Aufheizkabel

#### 3.1 Motivation

Handelsübliche Standardhybridkabel entsprechen nicht uneingeschränkt den Anforderungen an ein optimales Aufheizkabel, welche lauten: möglichst dünn, möglichst viel Kupfer und idealer Weise kostengünstig mit einer Vliesstoffumwicklung ab Werk

#### 3.2 Kabelentwurf und Herstellung

Die Entwicklung der optimierten Aufheizkabel im Rahmen des von der Bayrischen Forschungsstiftung geförderten Projektes erfolgte nach dem Grundsatz der Minimierung aller Kabelkomponenten außer dem elektrischen Leiter. Bei dem Entwurf der Kabel wurde neben den messtechnischen Erfordernissen besondere Rücksicht auf die Wirtschaftlichkeit der industriellen Kabelfertigung genommen. Der Aufbau der Kabel wurde mit der LEONI Fiber Optics GmbH so abgestimmt, dass die Herstellung der Kabel und das Aufbringen der Vliesstoffumwicklung auf herkömmlichen Produktionsstraßen mit einem vertretbaren Zeit- und Materialaufwand erfolgen kann.

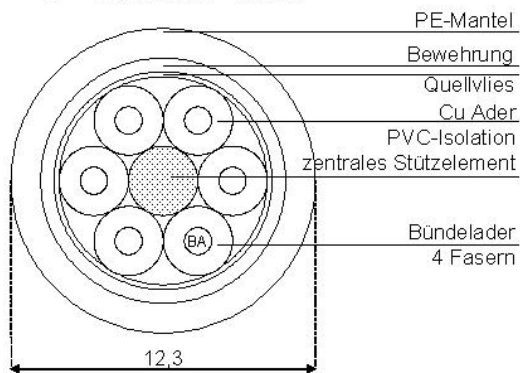
Nach der Herstellung wurden die Kabel im Werk der LEONI Fiber Optics GmbH den Standardtests für Kabel unterzogen, die sicherstellen, dass die Kabel den allgemeinen Anforderungen für die Verlegung und den Betrieb genügen. Alle Kabel sind für eine Spannung bis 1000 Volt ausgelegt.

In **Bild 2** sind ein herkömmliches Standardhybridkabel a) sowie die optimierten Aufheizkabel b) bis d) dargestellt. Für Kabel b) konnten bei einem ähnlichen Aufbau wie beim Standardhybridkabel unter Verzicht auf das Stützelement und Minimierung der Isolation eine Reduktion des Durchmesser von 12,3 mm auf 8,4 mm erreicht werden. Die Abnahme des Kupferquerschnittes von 5 mm<sup>2</sup> auf 3 mm<sup>2</sup> ist nur bei großen Kabellängen ein Nachteil. Das Kabel c) verzichtet bei den Kupferadern auf die Isolierung und ist dadurch weniger als halb so dick wie das Standardhybridkabel. Allerdings ist es nur für die Anwendung in Kabelschleifen geeignet. Kabel d) hat einen ähnlichen Durchmesser wie das Kabel b) ermöglicht jedoch aufgrund des größeren Kupferquerschnittes von 8 mm<sup>2</sup> wesentlich größere Kabellängen. Für alle optimierten Kabel wurden die dünneren und stabileren HDPE Mäntel anstelle der üblichen PE Mäntel gewählt.

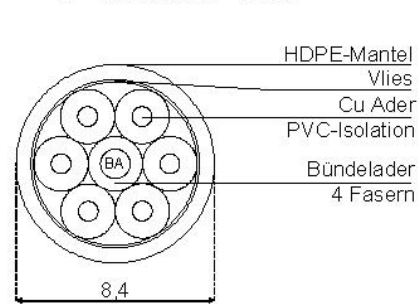
#### 3.3 Versuche

Um die positiven Einflüsse der Kabeloptimierung auf die Spanne der Temperaturdifferenz messtechnisch belegen zu können, wurden die Aufheizkabel an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München untersucht. Für jedes Kabel wurden Aufheizversuche bei verschiedenen Filtergeschwindigkeiten in verdichtetem Sand mit und ohne Vliesstoffummantelung durchgeführt.

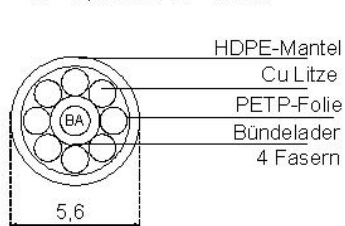
a) **Herkömmliches Standardhybridkabel**  
 $D = 12,3 \text{ mm} / A = 5 \text{ mm}^2$



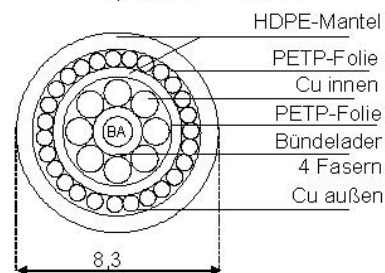
b) **herkömmlich durchmesseroptimiert**  
 $D = 8,4 \text{ mm} / A = 3 \text{ mm}^2$



c) **Blanke Ader, Kabelschleife**  
 $D = 5,6 \text{ mm} / A = 4 \text{ mm}^2$



d) **Blanke Ader, Leiterschleife**  
 $D = 8,3 \text{ mm} / A = 8 \text{ mm}^2$



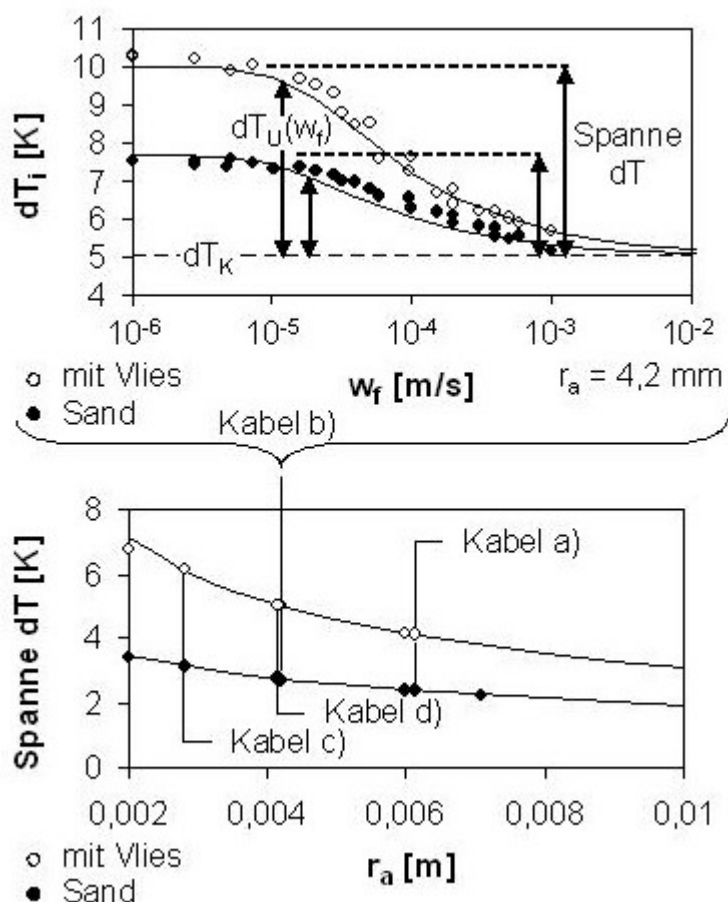
**Bild 2:** Aufbau der untersuchten Kabeltypen

Der Versuchsstand besteht aus einer Druckzelle mit 6 m Länge, in der mit einer Druckhöhe von 5 m und einem Schieber am Auslass, Filtergeschwindigkeiten bis  $2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  eingestellt werden können. Die Erwärmung der Aufheizkabel durch eine konstante Heizleistung erfolgte mittels eines Stelltransformators bei kontinuierlicher Überwachung und Nachregulierung der Stromstärke und Spannung.

Ein Aufheizversuch setzt sich jeweils aus Nullmessungen, Aufheizmessungen und Abkühlmessungen zusammen. Die Filtergeschwindigkeit in der Druckzelle wird über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten. Ausgewertet werden jeweils die Differenz zwischen den Nullmessungen und den Aufheizmessungen nach ca. einer Stunde Heizzeit. Um eine detaillierte Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Filtergeschwindigkeit und Temperaturdifferenz zu erhalten, wurden für jedes Kabel ca. dreißig Messpunkte erstellt.

### 3.4 Ergebnisse

Die Messungen bestätigen den beschriebenen theoretischen Zusammenhang zwischen Temperaturdifferenz und Filtergeschwindigkeit, wie exemplarisch an den Ergebnissen der Versuche mit dem Kabel b) in **Bild 3** oben gezeigt wird. Die jeweiligen Spannen der Temperaturdifferenz für die optimierten und herkömmlichen Aufheizkabel sind in **Bild 3** unten dargestellt.



**Bild 3:** Gemessene (Punkte) und gerechnete (Linien) Temperaturdifferenzen bzw. daraus resultierende Spannen der Temperaturdifferenz der untersuchten Kabel

Aus den gemessenen Spannen der Temperaturdifferenzen lassen sich die Anwendungsgrenzen der untersuchten Kabel ermitteln. Des Weiteren geben sie Aufschluss über die Vorteile der optimierten Aufheizkabel gegenüber den herkömmlichen Standardhybridkabeln. Die Verringerung des Kabeldurchmessers von 12,3 mm auf 8,3 bzw. 5,6 mm bedeutet eine Erhöhung der Spanne  $dT$  bei Kabeln mit Vliesstoffummantelung von 4,11 K auf 5,07 bzw. 6,15 K. Für die verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung werden für ein Standardkabel wie Kabel a) mit Vliesstoffummantelung ca. 10 W/m Heizleistung benötigt. Damit könnten mit einer internen Leiterschleife und einer Spannung von 1000 V Kabellängen bis 2,5 km realisiert werden. Das Kabel d) erreicht die gleiche Messgenauigkeit bei einer Heizleistung von 8,1 W/m und ermöglicht bei einer Spannung von 1000 V Kabellängen von 3,6 km bzw. würde für eine Kabellänge von 2,5 km nur eine Spannung von rund 700 V benötigen. Im Bezug auf die Messgenauigkeit könnte diese bei einer Spannung von 1000 V und einer Länge von 2,5 km um 60% gesteigert werden.

Die Vliesstoffummantelung erzielt annähernd eine Verdoppelung der Messgenauigkeit gegenüber der einfachen Verlegung des Kabels in Sand, was bereits bei mehreren praktischen Anwendungen ausgenutzt wurde [5]. Die Kabel mit Vliesstoffummantelung ab Werk sind fertig gestellt und werden derzeit getestet.

## Literatur

- [1] Aufleger, M.; Conrad, M.; Perzлмаier, S.; Porras, P.: Improving a Fiber Optics Tool for Monitoring Leakage. HRW, Sept. 2005, Volume 13, Number 4, S. 18 – 23.
- [2] Schäfer, P.; Perzлмаier, S.; Conrad, M.; Strobl, Th.; Aufleger, M.: Rehabilitation of Dam Facings Monitored by an Advanced Technology for Leakage Detection. Proceedings of the 21<sup>st</sup> Congress of the International Commission on Large Dams (ICOLD), Montréal, Canada, 2003, S. 139 – 154.
- [3] Aufleger, M.; Perzлмаier, S.; Dornstädter, J.; Schewe, L.: A Leakage Detection System for Concrete Faced Rockfill Dams. Proceedings of Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams, Yichang, China Sept. 2005, S. 255 – 264.
- [4] Perzлмаier, S.: Verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung in Staudämmen. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, Heft 109, 2007.
- [5] Strobl, Th.; Perzлмаier, S.; Matthes, H.: Zur Sicherheitsphilosophie bei der Sanierung von Kraftwerkskanälen in Bayern. Tagungsband Wasserbausymposium Stauhaltungen und Speicher, von der Tradition zur Moderne, Graz 27-30 Sept. 2006.

## Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. Matthias Goltz und Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Aufleger  
 Arbeitsbereich Wasserbau  
 Leopold-Franzens-Universität Innsbruck  
 Technikerstraße 13  
 A-6020 Innsbruck, Österreich  
 matthias.goltz@uibk.ac.at  
 markus.aufleger@uibk.ac.at

Dr.-Ing. Sebastian Perzлмаier  
 TIWAG – Tiroler Wasserkraft AG  
 Bereich Engineering Services  
 Eduard-Wallnöfer-Platz 2  
 A-6020 Innsbruck, Österreich  
 sebastian.perzлмаier@tiwag.at

Dip.-Ing. Volker Schramm  
 LEONI Fiber Optics GmbH  
 Stieberstraße 5  
 D-91154 Roth  
 volker.schramm@leoni.com