

## **Temperaturmessung im Wasserbau – Sichere Überwachung von Dämmen und Deichen seit mehr als 60 Jahren**

Jürgen Dornstädter

Temperaturmessungen finden in vielen Bereichen des Wasserbaus und der Geotechnik Anwendung. Erste systematische Temperaturmessungen zur Ortung von Leckagen an Dämmen des Dortmund-Ems-Kanales wurden bereits 1953 durchgeführt. Hierbei wurde die Temperatur des Gewässers als Tracer genutzt. Nach Damnbrüchen am Elbeseitenkanal und am Main-Donau-Kanal wurde die Messtechnik Ende der 1980er Jahre derart verbessert um einen Einsatz unter ökonomisch vertretbarem Aufwand zu ermöglichen. Das dabei entwickelte Temperatursondierverfahren ermöglicht die Aufnahme von Temperaturtiefenprofilen in Lockergesteinen bis in ca. 35m Tiefe. Mit diesem Verfahren wurden europaweit mehr als 500km Dämme und Deiche auf Durch- bzw. Unterströmungen untersucht. Sickerwasserfließbewegungen können damit 2-dimensional bzw. 3-dimensional erkundet werden. Aufgrund der zeitlichen Variationen der Temperatur von Oberflächengewässern wird das Verfahren auch dazu genutzt um Strömungsgeschwindigkeiten in situ zu bestimmen. Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten kann daraus gefolgert werden, ob Erosion/Suffusion oder Kolmation stattfindet, da es dabei zu einer Zunahme bzw. Abnahme der Geschwindigkeiten kommt. Porengeschwindigkeiten zwischen 10<sup>-7</sup> und 10<sup>-2</sup> m/s können bestimmt werden. Das Verfahren bietet große Vorteile, da die Heterogenität des Dammes/Baugrundes - im Gegensatz zu Labormessungen - berücksichtigt wird. Durch eine Integration der gemessenen einzelnen Sickerwassergeschwindigkeiten über die Fläche kann die Gesamtsickerwassermenge abgeschätzt werden

Besteht keine Temperaturdifferenz zwischen der nachzuweisenden Sickerwasserströmung und dem Baugrund, so kommen die Heat Pulse Methode oder die Frost Pulse Methode zum Einsatz. Dabei wird der Baugrund künstlich erwärmt bzw. gekühlt und die zeitliche Temperaturentwicklung registriert. Hieraus wird die effektive Wärmeleitfähigkeit bestimmt, die sich aus konduktivem - Gitterschwingungen der Materie - und advektivem Wärmetransport - Strömung - zusammensetzt. Daraus kann wiederum auf die Strömungsverhältnisse im Baugrund geschlossen werden.

Als Messsensoren werden seit 1953 Kappelmeyer (1955) elektrische und seit 1994 auch faseroptische Temperaturmesssysteme – mehr als 100 Dämme wurden bereits mit faseroptischer Sensorik ausgestattet - genutzt, Beispiele aus der Anwendung beider Verfahren werden vorgestellt.

Stichworte: Temperatursondierverfahren, faseroptische Temperaturmessung, Leckageortung

## 1 In-situ Temperaturmessverfahren

Das Temperatursondierversfahren wurde 1990 entwickelt, um in bestehenden Erddämmen die Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen in-situ messen zu können *Dornstädter (1997)*. Messtiefen bis zu 45 m Tiefe, je nach Aufbau des Dammes bzw. des Baugrundes, wurden damit bereits realisiert.

Die verteilte faseroptische Temperaturmessung, im Englischen kurz DTS für ‚distributed temperature sensing‘ genannt, wird seit 1994 bevorzugt beim Neubau oder bei umfangreichen Sanierungsarbeiten an Dämmen in die Bauwerke integriert, um an vielen Messpunkten zeitgleich die Temperaturen zu erfassen.

Aufgrund technischer Weiterentwicklungen war es im Jahr 2014 erstmals möglich eine Kombination der beiden Verfahren in einem Staudamm zu installieren.

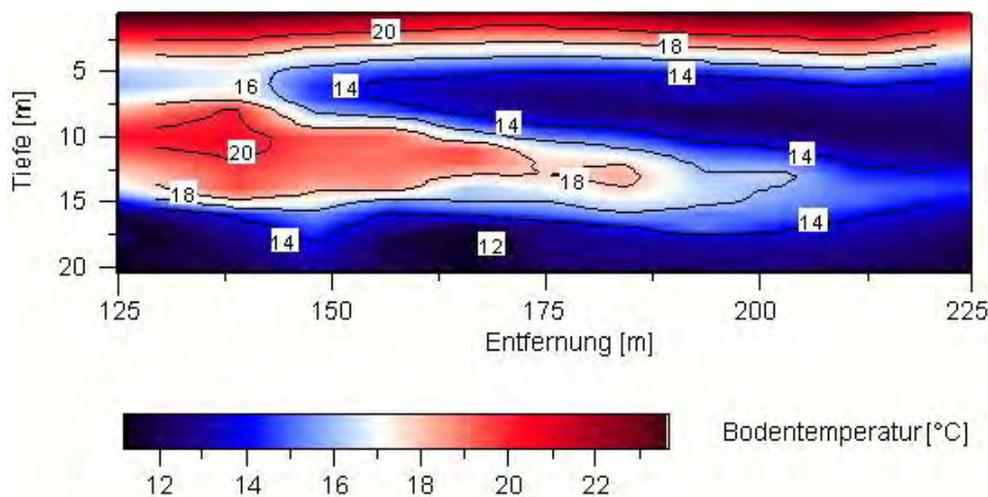
### 1.1 Temperatursondierversfahren

Zum Einbringen der Meßsensoren in den Boden wird ein verschraubbares Hohlgestänge mit nur 22 mm Durchmesser bis in die gewünschte Endtiefe gerammt (Abb. 1). Nach dem Rammvorgang wird eine Meßkette in das Hohlgestänge eingebracht, diese besteht aus einer elektrischen Zuleitung und mehreren Temperatursensoren. Die Sensoren sind zum Schutz vor Beschädigungen in Metallgehäuse eingegossen. Die eigentliche Messung erfolgt mit einem Präzisionstemperaturmessgerät, die Daten können über einen Datenlogger automatisch aufgezeichnet werden.



**Abbildung 1:** Einrammen der Temperaturmessgestänge

Geländeuntersuchungen und Modellrechnungen haben gezeigt, dass bei der verwendeten Messanordnung zur Messung der Bodentemperatur - bei einer Absolutgenauigkeit von  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  (relativ  $\pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ ) - nach dem Einrammen der Sondiergestänge eine thermische Angleichzeit des Messsystems von mindestens 15-20 Minuten benötigt wird. In der Praxis kommen daher mehrere kompatible Messketten und Sondiergestänge gleichzeitig zum Einsatz, so dass während der thermischen Angleichzeit für den Messtrupp keine Wartezeiten entstehen. Da eine Messkette aus mehreren Einzelsensoren in bestimmten Abständen – Maximalabstand ein Meter - besteht, können nach Abschluss einer Messreihe Bodentemperaturprofile bzw. -karten für verschiedene Tiefenniveaus erstellt werden. Neben diesen Darstellungsweisen, anhand derer die laterale Begrenzung von Leckagen sehr deutlich wird, ermöglicht eine zusätzliche Temperatur-Tiefen-Darstellung eine Aussage über die Tiefenlage eines Dichtungsschadens.



**Abbildung 2:** Gemessene Temperaturverteilung in und unterhalb eines Staudammes

Die Abbildung 2 zeigt die Temperaturverteilung längs eines 100m langen Dammabschnittes von 1 m bis 20 m Tiefe, der Dichtungskern reicht bis in 7m Tiefe, eine Schmalwand bis in 12m Tiefe soll eine Unterströmung des Dammes verhindern. Die Messungen wurden Ende des Sommers durchgeführt, die Gewässertemperatur betrug  $20,5^\circ\text{C}$ . Oberflächennah ist der Damm klimatisch bedingt erwärmt. Unterhalb von 7m bis ca. 15m Tiefe wird im Bereich von 125m bis ca. 200m eine zusätzliche Erwärmung des Baugrundes deutlich, dies wird durch einen verstärkten Sickerwasseraustritt aus dem Gewässer hervorgerufen. Die Leckage betrifft sowohl den Bereich der Schmalwand, als auch eine Unterströmung der Wand.

Zur Messung der Bodentemperaturen kann eine Temperatursensorkette auch in Grundwassermessstellen eingebracht werden. Bei diesen Messungen ist jedoch

zu beachten, dass durch freie Konvektion in der Messstelle meist fehlerhafte Messungen auftreten. D.h. die innerhalb der Messstelle gemessene Temperatur entspricht nicht der Bodentemperatur außerhalb der Messstelle. Freie Konvektion tritt meist in Messstellen mit großem Durchmesser bzw. im luftgefüllten Teil einer Messstelle und bei hohen Temperaturgradienten ein. Durch den Herstellungsvorgang (Bohren) für Grundwassermessstellen (oft als Pegel bezeichnet) entstehen in der Regel vertikale Wasserwegigkeiten außerhalb des Messstellenausbaus die zusätzlich zu einer Verfälschung der Messdaten führen und eine Tiefenzuordnung von Leckagen nahezu unmöglich machen.

## 1.2 Verteilte faseroptische Temperaturmessungen

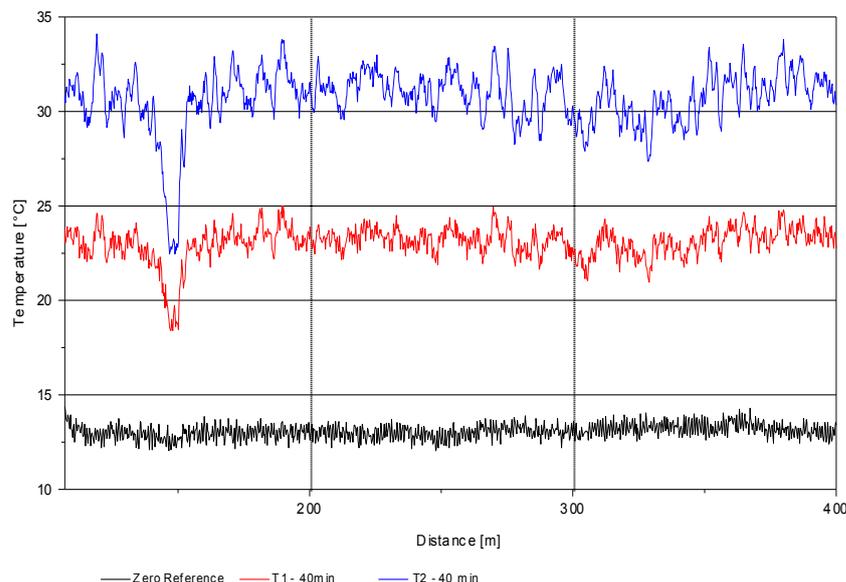
Mittels faseroptischer Messtechnik ist es möglich die Temperaturverteilung entlang einer Glasfaserleitung unter Verwendung eines Lasers zu bestimmen. Dabei dienen die optischen Fasern im Kabel als Sensoren. Die optischen Eigenschaften der Glasfaser sind unter anderem von der lokalen Umgebungstemperatur abhängig. Eine hochentwickelte Messtechnik, die bisher insbesondere im Bereich der Verfahrenstechnik Anwendung gefunden hat, ermöglicht die Analyse und Auswertung der Veränderungen dieser Eigenschaften und so die zuverlässige Bestimmung der Temperaturverteilung entlang des Lichtwellenleiters.

Ein energiereicher Laser sendet ein definiertes optisches Signal in eine Glasfaser, das dann entlang seiner gesamten Lauflänge reflektiert wird. Die zurückgestreuten Signale besitzen eine sehr geringe Intensität, können jedoch hinsichtlich ihrer Frequenzverteilung analysiert werden. Diese lässt sich in einen „Raleigh“- und in einen „Raman“-Anteil unterscheiden. Die beiden Komponenten des „Raman“-Anteils, das „Stokes-Licht“ und das „Anti-Stokes-Licht“ sind hinsichtlich ihres Frequenzspektrums abhängig von der Temperatur am Ort der Reflexion in der Glasfaser. Eine Frequenzanalyse ermöglicht eine vergleichsweise genaue Bestimmung der Temperatur am Ort der Reflexion. Die Lagebestimmung wird durch eine sehr exakte Messung der Reflexionszeiten, unter Berücksichtigung der Lichtgeschwindigkeit in der Glasfaser, durchgeführt.

Die Methode der verteilten faseroptischen Temperaturmessung wird im Bereich des Wasserbaus und der Geotechnik, mit ihren hohen Anforderungen an die Bauwerksüberwachung und Baugrunderkundung, seit 1994 eingesetzt (*Aufleger et al., 1998*). So werden faseroptische Temperaturmessungen sowohl zur Lokalisierung von bevorzugten Sickerwegen in Staudämmen und im Baugrund allgemein, als auch zur Ermittlung der Temperaturverteilung im Massenbeton eingesetzt.

Die für die Anwendungen geeigneten Glasfaserleitungen bestehen in der Regel aus einer Zentralader zur Zugentlastung, mindestens einer Glasfaser und mindestens einem elektrischen Leiter (sogenannte Hybridkabel). Somit kann neben der reinen Temperaturmessung auch das Aufheizverfahren, international auch als ‚Heat Pulse Method‘ oder ‚active Method‘ bezeichnet, angewendet werden. Die äußere Ummantelung wird entsprechend den gestellten Anforderungen an den mechanischen Schutz gewählt, und kann aus unterschiedlichen Stahl- und Kunststoffschichten aufgebaut sein. Diese Leitungen sind auch unter Baustellenbedingungen äußerst robust und widerstandsfähig gegenüber mechanischen Beanspruchungen. Zur Durchführung von Temperaturmessungen werden die optischen Fasern mittels Steckverbindungen an den Laser angeschlossen. Die Messungen können sowohl quasi-kontinuierlich, als auch in beliebig festzulegenden Zeitintervallen durchgeführt werden.

Das Aufheizverfahren wird wie folgt durchgeführt: Durch Anlegen einer Heizspannung an die elektrischen Leiter im Hybridkabel wird eine definierte Heizleistung in den Untergrund eingebracht und gleichzeitig die dadurch erzeugte Temperaturänderung entlang der Glasfasern mit Hilfe der faseroptischen Messtechnik aufgezeichnet. Unter Zugrundelegung der Linien- bzw. Zylinderquellentheorie (*Carshaw et al., 1959*) kann die Verteilung der thermischen Materialparameter entlang des Glasfaserkabels bestimmt werden (*Heidinger et al. 2004*). Die Eindringtiefe der durch das Anlegen der Heizspannung erzeugten Wärme-front ist eine Funktion der Heizdauer. Die thermischen Materialparameter ermöglichen dann einen Rückschluss auf Sickerwasseraustritte, da die effektive Wärmeleitfähigkeit im Bereich einer Leckage deutlich erhöht ist. Die Abbildung 3 zeigt ein Beispiel der Anwendung des Verfahrens in einem Damm. Durch eine Pécletzahlanalyse kann auch die in-situ Strömungsgeschwindigkeit und deren eventuelle zeitlich Änderung bestimmt werden.

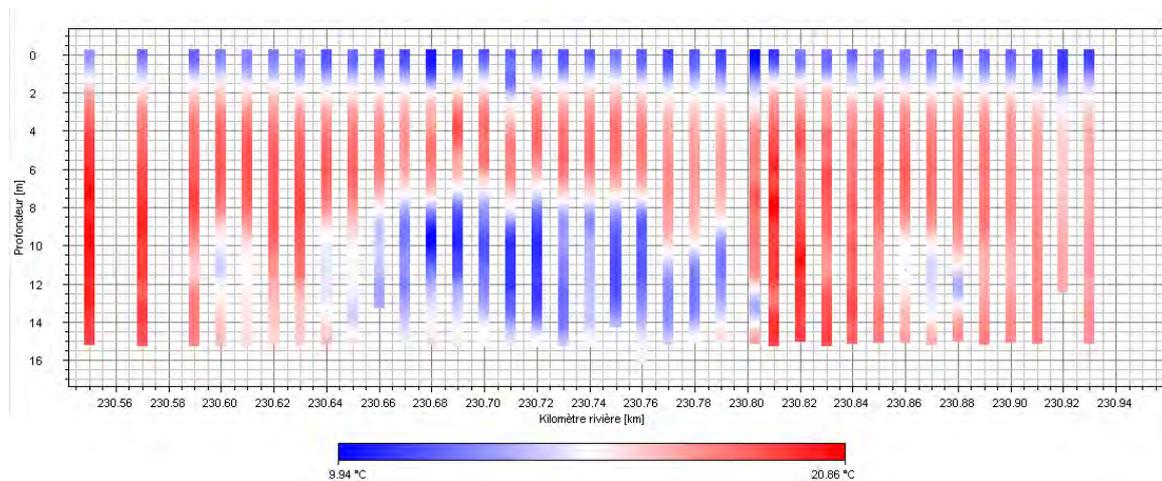


**Abbildung 3:** Faseroptisch gemessene Temperaturverteilung und der Temperaturanstieg T1 nach 20 und T2 nach 40 Minuten des Aufheizens unmittelbar unterhalb einer Oberflächendichtung eines 400m langen Staudammes. Bei ca. 100m steigt die Temperatur deutlich schwächer an aufgrund eines Sickerwasseraustrittes.

Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten im Wasserbau werden bei *Aufleger et al. 2007* zusammenfassend vorgestellt. Weit mehr als 100 Staudämmen sind bereits mit dieser Messtechnik zur Leckageortung beim Neubau bzw. bei umfangreichen Sanierungsmaßnahmen ausgestattet worden.

### 1.3 Kombination aus Temperatursondierung und verteilter faseroptischer Temperaturmessung

Durch die Weiterentwicklung der Glasfasern stehen seit einiger Zeit ‚biegeoptimierte‘ Glasfasern zur Verfügung. Dadurch können sehr kleine Biegeradien realisiert werden. Dies ermöglicht den schleifenförmigen Einbau von Glasfasern in kostengünstig zu erstellenden Temperatursondierungen. Die Temperaturmessgestänge werden wie unter 1.1 beschrieben längs des Erddammes, unmittelbar hinter dem Dichtungselement in den Damm und in den darunterliegenden Baugrund gerammt und in die Gestänge werden die vorkonfektionierten Glasfaserkabel eingeschoben. An der Geländeoberfläche verbindet ein Glasfaserkabel die einzelnen Messstellen und damit wird eine zusammenhängende Messstrecke gebildet.



**Abbildung 4:** Gemessene Temperaturverteilung in und unterhalb eines Staudammes durch den schleifenförmigen Einbau von Glasfaserkabeln in 37 Temperatursondierungen bis maximal 16m Tiefe.

Die Abbildung 4 zeigt die faseroptisch gemessene Temperaturverteilung in einem 380m langen Staudammabschnitt. Deutlich ist oberflächennah die Auskühlung des Bodens durch die winterliche Kälte an der Geländeoberfläche zu erkennen. Im Damm und im Baugrund zeichnet sich ein stark ausgekühlter Bereich ab, der durch einen verstärkten Sickerwasseraustritt aus dem Gewässer hervorgerufen wird. Die Messungen erfolgen permanent und online. Aktuell soll die Leckage durch den Bau einer 16m tiefen Schlitzwand abgedichtet werden. Die Baumaßnahme und der Erfolg der Abdichtungsmaßnahme werden durch die Temperaturmessung überwacht.

## 2 Grenzen des Anwendung

Die gezeigten Beispiele geben einen Überblick über die technischen Möglichkeiten zur Erkennung und Bewertung von Leckagen mittels Temperaturmessungen im Bauwerk. Temperaturmessungen können jedoch nur angewendet werden, sofern durch die Sickerwasserfließbewegungen der Wärmetransport deutlich größer ist, als die reine Wärmeleitung der vorhandenen Baumaterialien. D.h. der an die Strömung gekoppelte advective Wärmetransport muss deutlich stärker sein, als die reine Wärmeleitung (Gitterschwingungen der Materie). In der Praxis bedeutet dies, Sickerwasserfließgeschwindigkeiten größer als  $10^{-7}$  m/s können nachgewiesen werden. Sofern eine ausreichende Temperaturdifferenz zwischen dem nicht durchströmten Bauwerk und dem Gewässer besteht - die langjährige praktische Erfahrung zeigt, dass hier bereits Temperaturunterschiede von wenigen Graden ausreichen - können absolute Temperaturmessungen zur Ortung und Bewertung von Leckagen genutzt werden (Gradientenmethode oder

auch ‚passive Method‘ genannt). Bei sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten ab  $10^{-2}$  m/s kann zwar der Bereich der Leckage als Temperaturanomalie erkannt werden, aber die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit ist durch Tracer-Analysen nicht mehr möglich, da Temperaturschwankungen in Gewässern nur mit ‚niedrigen Frequenzen‘ auftreten.

Bei sehr geringen Temperaturunterschieden kann die Gewässertemperatur nicht als Tracer genutzt werden, hier muss die effektive Wärmeleitfähigkeit durch ‚künstliches‘ Aufheizen oder Abkühlen gemessen werden und so ein Rückschluss auf die Art des Wärmetransportes gezogen werden. Der Nachteil dieses Verfahrens besteht in der begrenzten Eindringtiefe. Durch das Aufheizen können auch bei mehrtägigen Heizphasen nur wenige Dezimeter bis Meter der Umgebung der Messstelle analysiert werden.

### **3 Zusammenfassung**

Seit der erstmaligen Anwendung von Temperaturmessungen zur Eingrenzung von Leckagen an Erddämmen im Jahr 1953 wurde durch die Weiterentwicklung der Temperaturmesstechnik eine vielfältige Anwendungsmöglichkeit zur Überwachung von Wasserbauwerken geschaffen.

Das Temperatursondiervorgehen hat sich bei der Überprüfung von Erddämmen als anerkanntes Verfahren etabliert, mehr als 500 km Dämme und Deiche wurden in den letzten 25 Jahren bereits damit untersucht. Auch die Überprüfung des Erfolges von Dichtungssanierungen mit diesem Verfahren ist bereits europaweit Standard.

Die faseroptische Temperaturmesstechnik findet seit einigen Jahren weltweit Anerkennung. Weit mehr als 100 Staudämme wurden bereits damit ausgestattet, in vielen Ländern mit hoher Dammbauaktivität gehört die faseroptische Leckortung zur ‚Grundausrüstung‘ im Staudammbau. In Deutschland beschränkt sich der Einbau von Glasfaserkabeln aufgrund der wenigen Neubauten auf umfangreiche Sanierungsmassnahmen.

Durch die Neuentwicklung der Kombination von Temperatursondierung und faseroptischer Messtechnik bietet sich nun auch für bestehende Dämme eine kostengünstige und zuverlässige dauerhafte Dichtungsüberwachung.

Neben der reinen Leckageortung ermöglicht die Temperaturmessung auch eine in-situ Beurteilung von Erosions- und Kollmationsprozessen, da Änderungen der Sickerwasserflussgeschwindigkeiten zeitnah erkannt werden können.

## 4 Literatur

- Aufleger, M., Dornstädter, J., Fabritius, A., Strobl, Th. (1998). Fibre optic temperature measurements for leakage detection - applications in the reconstruction of dams. 66th ICOLD annual meeting, New Delhi, pp. 181-189, International Commission on Large Dams, Paris.
- Aufleger, M., Dornstädter, J., Strobl, Th., Conrad, M., Perzlmaier, S., Goltz, M. (2007). 10 Jahre verteilte faseroptische Temperatur-messungen im Wasserbau. 14. Deutsches Talsperrensymposium/ 7th ICOLD European Club Dam Symposium, pp. 8-14, Freising.
- Carslaw H.S., Jaeger I.C. (1959): Conduction of heat in solids. Oxford University Press, London, 2nd edition.
- Dornstädter, J. (1997). Detection of internal erosion in embankment dams. ICOLD, Florence.Q.73R.7. 2: 87-101, International Commission on Large Dams, Paris.
- Heidinger P., Fabritius A, Heinemann B., Dornstädter J. (2004): EGRT – Enhanced Geothermal Response Tests, in: Die neue Rolle der Geothermie, Tagungsband GTV, 5. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, Landau
- Kappelmeyer, O. (1957). The use of near surface temperature measurements for discovering anomalies due to causes at depth. Geophysical Prospecting, The Hague, Vol. 3, pp. 239-258.

Autor:

Dipl.-Geophys. Jürgen Dornstädter  
GTC Kappelmeyer GmbH  
Heinrich-Wittmann-Straße 7a  
D-76131 Karlsruhe  
Tel.: +49 721 60008  
Fax: +49 721 60009  
E-Mail: [dornstaedter@gtc-info.de](mailto:dornstaedter@gtc-info.de)