



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

pecher
DR. PECHER AG

In Zusammenarbeit mit



Abschlussbericht - Kurzfassung

Detektion von Fehleinleitungen in Trennsystemen und Reduktion der resultierenden Gewässerbelastung (DETEK-T)

Projektförderung durch:

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft,
Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



(Förderprogramm "Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW")

Förderbereich 6: Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur Abwasserbeseitigung (ResA-6)

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV)

Postfach 101052, 45610 Recklinghausen

Dezember 2021

IWARU Institut für
Wasser · Ressourcen · Umwelt
Prof. Dr.-Ing. Helmut Grüning
Stegerwaldstraße 39
48565 Steinfurt



IWARU Institut für
Infrastruktur · Wasser ·
Ressourcen · Umwelt

Projektbeteiligte

Wissenschaftliche Leitung und Bearbeitung:	
Prof. Dr.-Ing. Helmut Grüning Thorsten Schmitz M.Eng. Christian Schmidt M.Eng.	Fachhochschule Münster Institut für Infrastruktur · Wasser · Ressourcen · Umwelt Stegerwaldstraße 39 48565 Steinfurt
Wissenschaftliche Bearbeitung:	
Dr.-Ing. Holger Hoppe Daniela Böckmann M.Sc.	Dr. Pecher AG Klinkerweg 5 40699 Erkrath
Kooperierende Kommunen:	
Stadt Wuppertal Dipl.-Ing. Christian Massing Dipl.-Ing. Jens Ante	WSW Energie & Wasser AG Bromberger Straße 39 42281 Wuppertal
Stadt Warendorf Ralf Bücker Berthold Museler M.Eng. Christian Schlingmann M.Sc.	Abwasserbetrieb Warendorf Freckenhorster Straße 43 48231 Warendorf

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	III
1 Veranlassung und Zielsetzung	1
2 Problemstellung und Gewässerbelastung	1
3 Detektionsverfahren	3
3.1 Visuelle Verfahren und Indikatorverfahren	3
3.2 Distributed Temperature Sensing (DTS).....	6
3.2.1 Physikalische Grundlagen	6
3.2.2 Arten und Eigenschaften von Kabeln und Kabelverbindungen.....	8
3.2.3 Eignungsprüfung von Kabeln und Verbindern	9
3.3 Vergleichende Bewertung der unterschiedlichen Verfahren	11
4 Feldmessungen in Warendorf und Wuppertal	13
4.1 Charakteristika der untersuchten Gebiete.....	13
4.2 Ergebnisse der Detektion mit Hilfe der DTS-Messung	14
4.2.1 Exemplarische Detektionsergebnisse in Warendorf	14
4.2.2 Exemplarische Detektionsergebnisse in Wuppertal	16
5 Konzept zur Detektion von Fehlanschlüssen	17
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	18
7 Literatur	20

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Sichtbare Fehleinleitungen in einem Regenwasserkanal.....	2
Abb. 2:	Optisch erkennbare Fehleinleitungen in der Regenwasserkanalisation in Behandlungs- oder Speicherbecken und an Einleitstellen	3
Abb. 3:	Möglichkeiten der Rückstausicherung durch eine Abwasserhebeanlage und durch Rückstauverschluss (Grüning und Pecher, 2020).....	5
Abb. 4:	Ungebleichte Watte (dunkler Bereich) auf mit optischen Aufhellern gewaschenem Kleidungsstück (links) und fluoreszierendes Waschmittelpad unter 365°nm UV-Licht	6
Abb. 5:	Schematische Darstellung der Reflektion des Laserlichts im Glasfaserkabel ...	7
Abb. 6:	Mit DTS-Messung erfasste Temperaturdifferenz durch Zufluss von Abwasser.	8
Abb. 7:	Drei Glasfaserkabel in unterschiedlicher Ausführung zum Einsatz im Rahmen von DTS-Messungen	9
Abb. 8:	Beispiel regelmäßiger Einleitungen durch Drainagepumpen innerhalb des Testgebietes in Warendorf	15
Abb. 9:	Häufig auftretende Einleitung mit hoher Temperatur über einen Zeitraum von bis zu einer Stunde im Testgebiet in Warendorf.....	16
Abb. 10:	Messergebnis (24 Stunden) Testgebiet 2 in Wuppertal vom 11.10.2018.....	17
Abb. 11:	Konzept zur Detektion von Fehlan schlüssen.....	18

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Eigenschaften der verschiedenen Kabeltypen	10
Tab. 2:	Überblick der visuellen Detektionsmethoden.....	11
Tab. 3:	Überblick der Indikatormethoden zur Detektion.....	12

1 Veranlassung und Zielsetzung

Fehlangeschlossene Schmutzwassereinleitungen an Regenwasserkanäle oder Verbindungen der Schmutzwasserkanalisation zur Regenwasserkanalisation, z. B. durch Überläufe in Betriebsschächten, führen zu unmittelbaren Gewässerbelastungen, die bislang nicht näher quantifiziert worden sind. Neben fehlangeschlossenen Grundstücksentwässerungsanlagen (GEA) führen auch Verknüpfungen zwischen den Grundstücksentwässerungsleitungen zu Fehleinleitungen. Informationen zu diesem Thema sind nur eingeschränkt verfügbar, da Kanalnetzbetreiber verständlicherweise das Problem nur ungern öffentlich darstellen. Zur Detektion von Fehleinleitungen sind unterschiedliche Verfahren verfügbar. Häufig werden Benezelungen durchgeführt. Diese gewährleisten jedoch keine sichere Detektion. Bei der DTS-Messung werden Glasfaserkabel temporär in der Kanalisation verlegt. Grundlage der faseroptischen Temperaturmessung (englisch *distributed temperature sensing*) sind optoelektronische Geräte zur Messung der Temperatur. Dabei dienen Glasfasern als lineare Sensoren. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Eignung dieser Technologie untersucht und das Verfahren optimiert, um den Einsatz zu vereinfachen. Darüber hinaus wurden die mit Fehleinleitungen verbundenen Probleme aufgezeigt. Mit der Entwicklung praxisorientierter Lösungsansätze soll Kanalnetzbetreibern ein Maßnahmenkatalog zur Entwicklung von Detektionskonzepten für den eigenen Anwendungsfall zur Verfügung gestellt werden. Das Untersuchungskonzept ist durch folgende Maßnahmen und Teilziele geprägt:

- 1) *Quantifizieren*: Ermittlung der Größenordnungen des Schmutzfrachteintrages durch Trennsysteme unter besonderer Berücksichtigung von Fehleinleitungen.
- 2) *Detektieren*: Untersuchung und Entwicklung von Techniken und Konzepten zur Detektion von Fehleinleitungen.
- 3) *Beseitigen*: Entwicklung von Konzepten zur Beseitigung von Fehleinleitungen unter Berücksichtigung möglicher Hindernisse bei der praktischen Umsetzung.
- 4) *Vermeiden*: Dokumentation in einer Handlungsempfehlung (Leitfaden), die es den Kommunen in Zusammenarbeit mit den Behörden ermöglicht, bestehende Fehleinleitungen sukzessive zu beseitigen und künftig Fehleinleitungen zu vermeiden.

2 Problemstellung und Gewässerbelastung

Ein wesentlicher Vorteil des Trennsystems gegenüber dem Mischsystem ist die separate Ableitung von Schmutz- und Regenwasser, so dass keine unmittelbare Schmutzwassereinleitung in das Gewässer erfolgt. Zudem wird die Kläranlage gleichmäßiger belastet. Ein

Nachteil von Trennsystemen sind mögliche Fehleinleitungen, beispielsweise durch Verwechslungen der Leitungssysteme auf privaten Grundstücken und durch den Anschluss von Schmutzwasserleitungen an den öffentlichen Regenwasserkanal. Zudem sind auch Verbindungen der Schmutzwasserkanalisation zur Regenwasserkanalisation möglich.

Die Gewässerbelastung durch Fehlanlüsse ist bislang nicht näher quantifiziert worden. Neben dem Eintrag an Zehr- und Nährstoffen und ästhetischen Beeinträchtigungen, beispielsweise durch fixierte Hygieneartikel im Uferbereich, ist hierbei insbesondere der Eintrag von Keimen und Mikroschadstoffen sowie der Eintrag von Spurenstoffen (Arzneimittelrückstände, Keime, Chemikalien etc.) zu nennen. Daraus resultieren Probleme, wie beispielsweise hygienische Einschränkungen (Badegewässer), bis zu Belastungen des Trinkwassers. Abb. 1 zeigt exemplarisch deutlich erkennbare Fehleinleitungsindikatoren in Regenwasserkanälen.



Abb. 1: Sichtbare Fehleinleitungen in einem Regenwasserkanal

Ellis und Butler (2015) haben die Ergebnisse von internationalen Untersuchungen zum Anteil der Fehlanlüsse an Regenwasserkanälen zusammengestellt. Der prozentuale Anteil bewegt sich demnach zwischen 1 % und 5 %, mit Extremen von bis hin zu 30 %, wobei sich die Daten aus Europa und den USA zwischen 3 % und 4 % bewegen. Bei einer Fehlanschlussquote zwischen 1 % und 2 % würde in NRW das ungereinigte Schmutzwasser, repräsentiert durch den CSB, von rund 66.750 (1 %) bis 133.500 (2 %) Einwohnern die Gewässer belasten. Bei diesen auf theoretischen Ansätzen basierenden Frachten kommt es zu Einträgen zwischen 2.924 t CSB pro Jahr und 5.847 t CSB pro Jahr.

3 Detektionsverfahren

3.1 Visuelle Verfahren und Indikatorverfahren

Zur Detektion von Fehleinleitungen gibt es unterschiedliche Verfahren. Diese grenzen sich durch den Aufwand und den Detektionserfolg voneinander ab. Neben der hier untersuchten DTS-Messung kann unterschieden werden in:

Visuelle Verfahren

- ▶ Benebelung
- ▶ Optische Inspektion (Kamerabefahrung der Kanalisation)
- ▶ Visuelle Inspektion (Begehung und Beobachtung von Bauwerken und Gewässern)

Indikatorverfahren

- ▶ Tracer (Markierungsstoff)
- ▶ Chemische und biologische Indikatoren (aktive und passive Probenahme)

Bereits die Inspektion von Einleitstellen, an denen Regenwasser aus dem Kanalnetz entweder direkt in ein Gewässer oder in ein Behandlungs- oder Speicherbauwerk (z. B. RRB) eingeleitet wird, kann erste Hinweise auf Fehleinleitungen liefern. Dabei ist auf Indikatoren von Fehleinleitungen, wie beispielsweise Abwassertrübungen, Verfärbungen, Hygieneartikel und Fäkalien, Schaum, Gerüche, Speisereste oder Ölfilme zu achten (Abb. 2).



Abb. 2: Optisch erkennbare Fehleinleitungen in der Regenwasserkanalisation in Behandlungs- oder Speicherbecken und an Einleitstellen

Im Rahmen der Untersuchungen in diesem Projekt wurde die Erfahrung gemacht, dass eine einmalige Begehung dieser Stellen nicht ausreicht, um Fehleinleitungen auszuschließen. Auch eine stichprobenartige Öffnung von Betriebsschächten zur kurzfristigen visuellen Kontrolle, liefert keine hinreichenden Informationen. Nach längeren Trockenzeiten werden Hygieneartikel oder sonstige Schmutzwasserinhalte nicht zwangsläufig bis zur betrachteten Stelle gespült, sondern lagern sich auf der häufig kilometerlangen Kanalstrecke ab. Darüber hinaus ist es möglich, dass bei intensiveren Regenereignissen große Abflüsse entstehen, die abgelagerte Stoffe von Einleitstellen in das Gewässer wegspülen und diese dann nicht mehr zu erkennen sind.

Die optische und visuelle Inspektion mit einer Kamera oder durch eine Begehung ist ein wesentlicher Bestandteil der Überprüfung des Zustands von Kanalisationsstrecken. Aufgrund des in der Regel diskontinuierlichen Auftretens von Fehleinleitungen kann dabei nicht in jedem Fall eine Detektion von Schmutzwasser in der Regenwasserkanalisation gewährleistet werden.

Bei der häufig eingesetzten Benebelung wird Nebel unter geringem Überdruck in den Kanal eingblasen. Dieser Überdruck und die im Kanal bestehende Kaminwirkung lassen den Nebel an sämtlichen Anschlüssen, die nicht mit Geruchsverschlüssen versehen sind, austreten. Diese Methode ist besonders sinnvoll, wenn Regenwasserkanäle an den Schmutzwasserkanal angeschlossen sind, weil dann bei Benebelung des öffentlichen Schmutzwasserkanals der Nebel an Entlüftungen, Dachrinnen, Hofabläufen und Schächten austritt. Bei der Detektion von Schmutzwasseranschlüssen an die Regenwasserkanalisation soll der Nebel über die Dachentlüftung entweichen und so Fehleinleitungen erkennbar sein. Dies Verfahren führt jedoch nur eingeschränkt zum Erfolg. Nicht normgerecht eingebaute Rückschlagklappen in Schmutzwasserleitungen (fäkalienhaltiges Abwasser) sind im Zustand ohne Durchfluss geschlossen. Der Nebel kann dann möglicherweise gar nicht erst in die Gebäude eindringen. Bei Gebäuden, die über Hebeanlagen entwässert werden, kann der Nebel ebenfalls nicht in die Entwässerungsleitungen der Gebäude vordringen (Abb. 3). Dachentlüftungen sind aus dem öffentlichen Raum heraus auch nicht immer gut sichtbar. Bei Entlüftung der Gebäudeentwässerung über Entlüftungsventile ist der Nebel nicht erkennbar.

Darüber hinaus sollten zwar im Normalfall sämtliche Entwässerungsanlagen im Haus mit einem Geruchsverschluss (Siphon) versehen sein. Allerdings kann es speziell bei Anlagen, die nur selten verwendet werden, zur Austrocknung dieser Verschlüsse kommen, was dazu führt, dass der Nebel bei der Detektion direkt in die Wohnräume gelangen könnte.

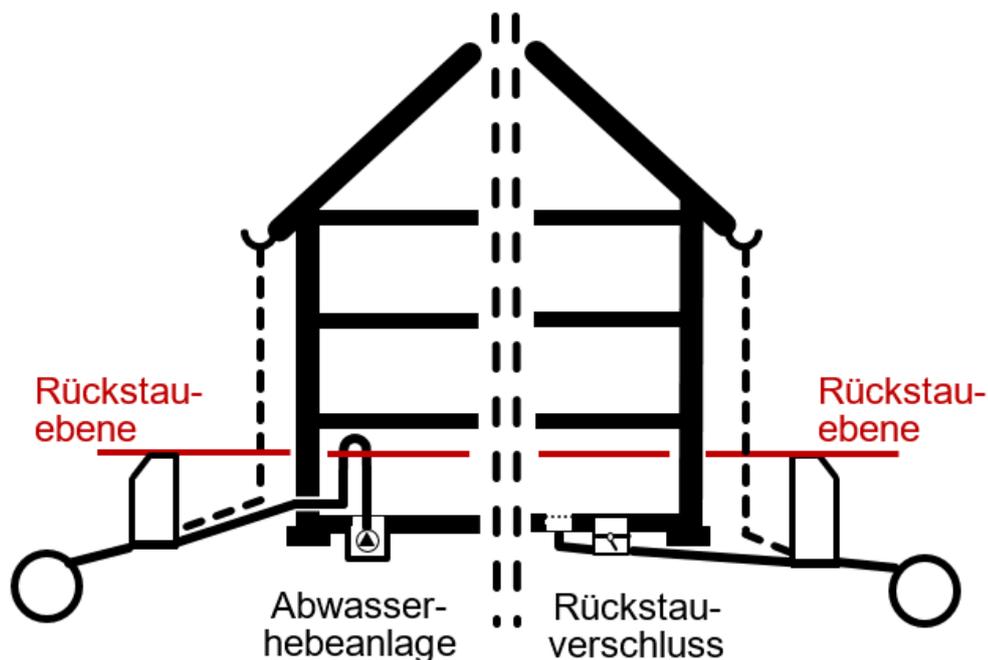


Abb. 3: Möglichkeiten der Rückstausicherung durch eine Abwasserhebeanlage und durch Rückstauverschluss (Grüning und Pecher, 2020)

Mögliche Fehleinleitungen können außerdem durch die Entnahme von Proben mit anschließender Analyse von Indikatorstoffen erfolgen. Die Detektion durch Indikatorparameter ist an bestimmte Voraussetzungen geknüpft. Indikatorparameter eignen sich nach (Brown et al., 2004) in erster Linie dann, wenn ihr Vorkommen in Schmutz- und Regenwasser erhebliche Konzentrationsunterschiede zur Basiskonzentration aufweist und über den Fließweg kein nennenswerter Abbau stattfindet. Im Rahmen der Untersuchungen wurde dieses Verfahren durch ungebleichte Watte als Passivsammler im Abwasserstrom getestet. Die anschließende Analyse basiert dabei auf dem Messprinzip der Lumineszenz optischer Aufheller in Waschmitteln. Kommt die Watte mit den in diversen Waschmitteln enthaltenen Aufhellern in Berührung, luminesziert diese unter UV-Licht mit einer Wellenlänge von 365 nm. Wie auf der linken Seite von Abb. 4 zu sehen ist, luminesziert ein mehrfach gewaschenes Kleidungsstück deutlich. Der auf diesem Kleidungsstück platzierte Bausch aus ungebleichter Watte leuchtete hingegen nicht. Auf der rechten Seite ist die Lumineszenz eines Waschmittelpads unter 365 nm UV-Licht zu sehen.

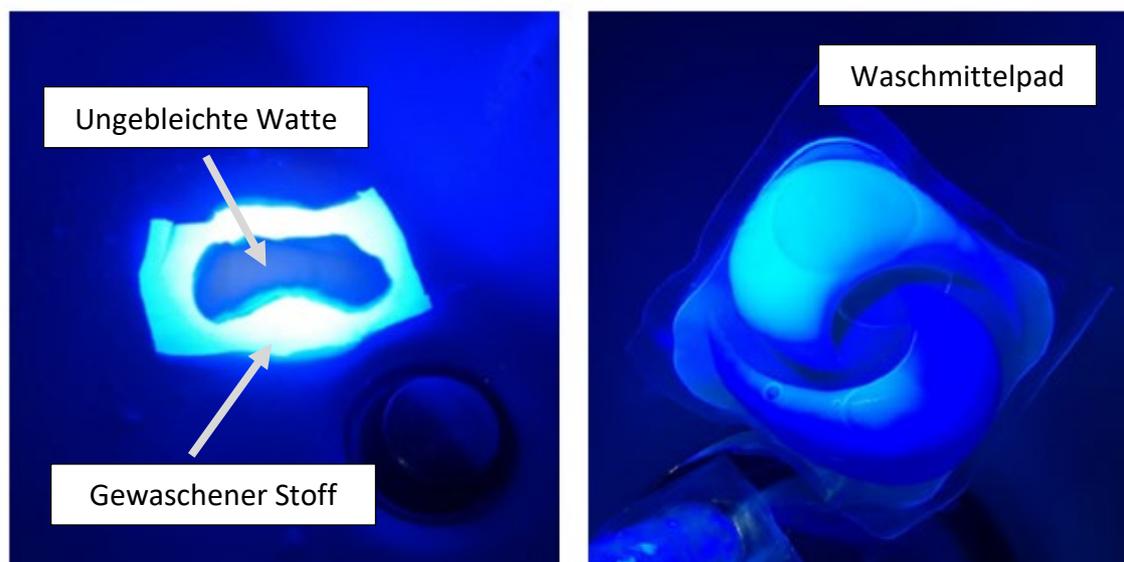


Abb. 4: Ungebleichte Watte (dunkler Bereich) auf mit optischen Aufhellern gewaschenem Kleidungsstück (links) und fluoreszierendes Waschmittelpad unter 365°nm UV-Licht

3.2 Distributed Temperature Sensing (DTS)

3.2.1 Physikalische Grundlagen

Bei der verteilten faseroptischen Temperaturmessung (englisch *distributed temperature sensing*) werden optoelektronische Geräte zur Messung der Temperatur eingesetzt. Dabei dienen Glasfasern als lineare Sensoren. Auf die Glasfaser können physikalische Messgrößen wie die Temperatur einwirken und die Eigenschaften der Lichtleitungen in der Faser lokal ändern. Das Messkonzept basiert auf der Rückstreuung von Licht entlang eines wärme- und strahlungsempfindlichen Lichtwellenleiter-Kabels (LWL-Kabel). Das Prinzip wird als faseroptisches Raman-Rückstreuverfahren bezeichnet (Raman, 1928). In der Rückstreuung finden sich neben dem elastischen Streuteil (Rayleigh-Streuung) auf der gleichen Wellenlänge wie das eingestrahlte Licht auch zusätzliche Komponenten auf anderen Wellenlängen, die mit der Molekülschwingung und somit mit der lokalen Temperatur gekoppelt sind (Raman-Streuung). Das Licht in der Glasfaser streut an mikroskopisch kleinen Dichteschwankungen, die kleiner als die Wellenlänge sind. Das Prinzip der Rückstreuung des eingeleiteten Lichtimpulses in die Faser veranschaulicht Abb. 5. Temperaturänderungen induzieren Gitterschwingungen im Molekülverband des Quarzglas. Fällt Licht auf diese thermisch angeregten Molekülschwingungen, kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen den Lichtteilchen (Photonen) und den Elektronen des Moleküls. Es entsteht im LWL die

temperaturabhängige Lichtstreuung (Raman-Streuung), die gegenüber dem einfallenden Licht spektral um den Betrag der Resonanzfrequenz der Gitterschwingung verschoben ist.

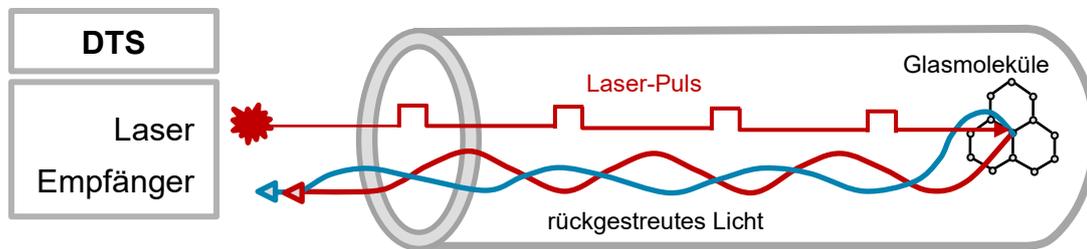


Abb. 5: Schematische Darstellung der Reflexion des Laserlichts im Glasfaserkabel

Die Intensität und spektrale Zusammensetzung des rückgestreuten Lichts ist abhängig von den Molekülen der Faser und deren Schwingungen. Wirken nun Temperaturänderungen auf die Fasern des Lichtwellenleiters, werden Gitterschwingungen in der molekularen Struktur des Quarzglas induziert. Infolge der Dämpfung des Lichtes in den Quarzglasfasern durch Streuung kann der Ort einer äußeren physikalischen Einwirkung festgestellt werden. Dadurch ist der Lichtwellenleiter als linearer Sensor geeignet.

Zur Durchführung der Messung werden ein Auswertegerät mit Frequenzgenerator, Laserquelle, optischem Modul, Empfänger- und Mikroprozessoreinheit (Laser-Computer) sowie ein LWL-Kabel (Lichtwellenleiter) aus Quarzglasfasern als linienförmiger Temperatursensor benötigt. Die Technologie wird beispielsweise zur Detektion von Bränden oder zur Überwachung von Leckagen an Dämmen und Deichen eingesetzt. Mit dem Einsatz zur Detektion von Fehleinleitungen in Abwasserkanälen wurde vor mehr als 10 Jahren in den Niederlanden begonnen (Hoes et al., 2009). Seit einigen Jahren wird die Methode auch in Deutschland erfolgreich zur Lokalisierung von Fehleinleitungen in Schmutz- und Regenwasserkanälen eingesetzt (Hoppe et al., 2013, Schilperoort et al., 2013, Hoppe et al., 2015). Vorteil dieser Methode ist die Detektion von Fehleinleitungen unabhängig von der Kooperationsbereitschaft möglicher Fehleinleiter (z. B. Anwohner oder Gewerbebetriebe). Mit der DTS-Messung ist eine Technologie verfügbar, mit der Fehleinleitungen sicher und in einem adäquaten Kosten- und Nutzenverhältnis zu lokalisieren sind. Im Rahmen des Projektes wurden Anwendungsmöglichkeiten und monetäre Aspekte untersucht.

Zur Ermittlung von Fehleinleitungen wird das Glasfaserkabel möglichst auf der Kanalsole verlegt und verbleibt in der Regel für drei bis vier Wochen im Kanal. Durch die Auswertung eines Lasersignals lassen sich durch die Einleitungen verursachte Temperaturdifferenzen

mit einer hohen zeitlichen (1 Minute bis 30 Sekunden) und räumlichen (1 Meter und weniger) Auflösung exakt bestimmen. In der Regel weisen Fremdwasserzuflüsse und Fehleinleitungen aufgrund der Herkunft des Wassers eine deutlich abweichende Temperatur gegenüber der Umgebungsluft bzw. dem teilweise vorhandenen Basisabfluss auf. Es muss gewährleistet sein, dass zu detektierende Zuflüsse das Kabel erreichen. Einen detektierten Zufluss mit abweichender Temperatur vom Basisabfluss veranschaulicht Abb. 6. Hier wird der wärmere Zufluss im Bereich der Einleitung bei Kabelmeter 30,3 erfasst. Es zeigt sich eine Ausbreitung der Temperaturfahne in Fließrichtung.

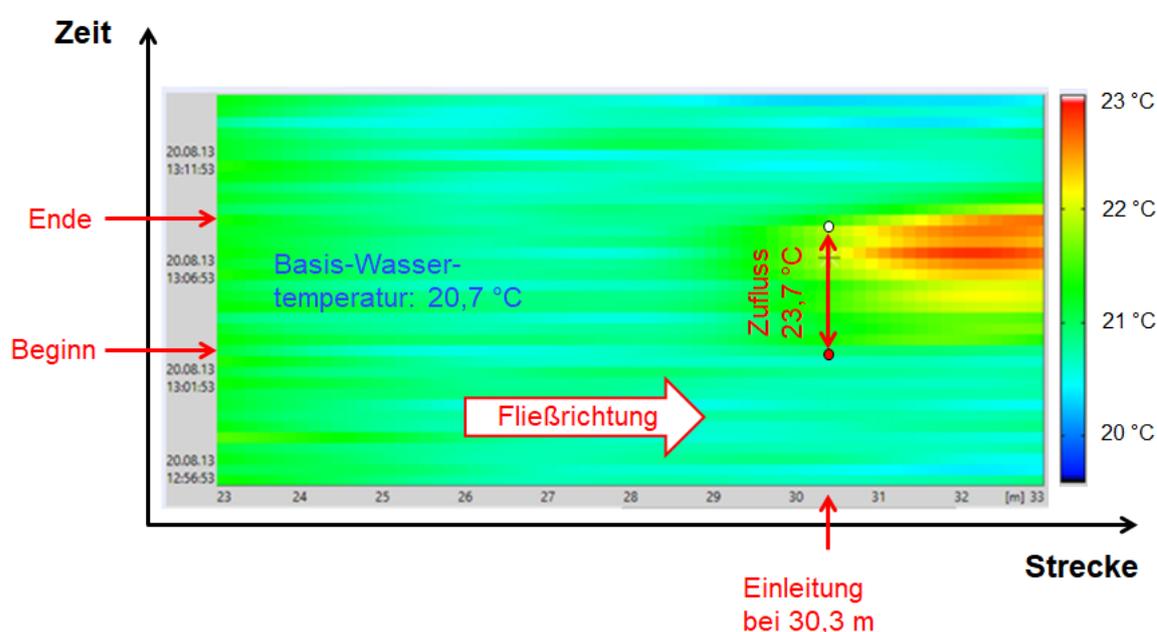


Abb. 6: Mit DTS-Messung erfasste Temperaturdifferenz durch Zufluss von Abwasser

3.2.2 Arten und Eigenschaften von Kabeln und Kabelverbindungen

Da die Kabelpreise bei der Messung einen großen Anteil der Kosten ausmachen, war die Optimierung des Kabeleinsatzes einer der Untersuchungsschwerpunkte des Projektes. Bislang wurden die zur DTS-Messung genutzten Glasfaserkabel in Längen bis zu 2 km verwendet. Kabellängen dieser Größenordnung lassen sich nur schwer ein- und wieder ausbauen. Das liegt an der zunehmenden Reibung zwischen dem Kabel und der Kanalwand, insbesondere an Umlenkungen. Beim Ausbau führen Verzopfungen am Kabel zu einer Zunahme des Gewichtes. Außerdem bleiben die verzopfungen Kabelabschnitte im Kanal hängen. Das Kabel kann dann nur stückweise und nicht zerstörungsfrei ausgebaut werden.

Im Rahmen des Projektes wurden unterschiedliche Arten von Kabeln und die Möglichkeit der Verbindung von kürzeren Kabelsegmenten untersucht. Dadurch war es möglich, die Glasfaserkabel in kleinere Segmente zu unterteilen und diese mit einer Schraubverbindung zu verbinden. Hierdurch wird der Einbau des Glasfaserkabels in das Kanalnetz deutlich vereinfacht. Die Verbindungsstücke werden jeweils so platziert, dass sie auf Schachthöhe liegen und so in der Regel vor Regenwasser geschützt sind. Allerdings erschweren die Verbindungen aufgrund der Dämpfung und ggf. Störsignalen die Auswertung.

Drei verschiedene Kabeltypen zeigt Abb. 7. Die hier exemplarisch dargestellten Kabel unterscheiden sich deutlich voneinander. Kabeltyp 1 ist äußerst robust und vergleichsweise dick. Die Glasfaser ist dreifach ummantelt (Außenmantel, Stahlwellmantel und Innenmantel). Kabeltyp 2 besteht aus einem Außenmantel und einer Schicht aus Glasrovings als Schutz gegen Nagetierverbisse. Kabeltyp 3 verfügt unter dem Außenmantel über dünne Drähte als Armierung. Die Glasfasern selbst liegen in einem dünnen Stahlmantel.

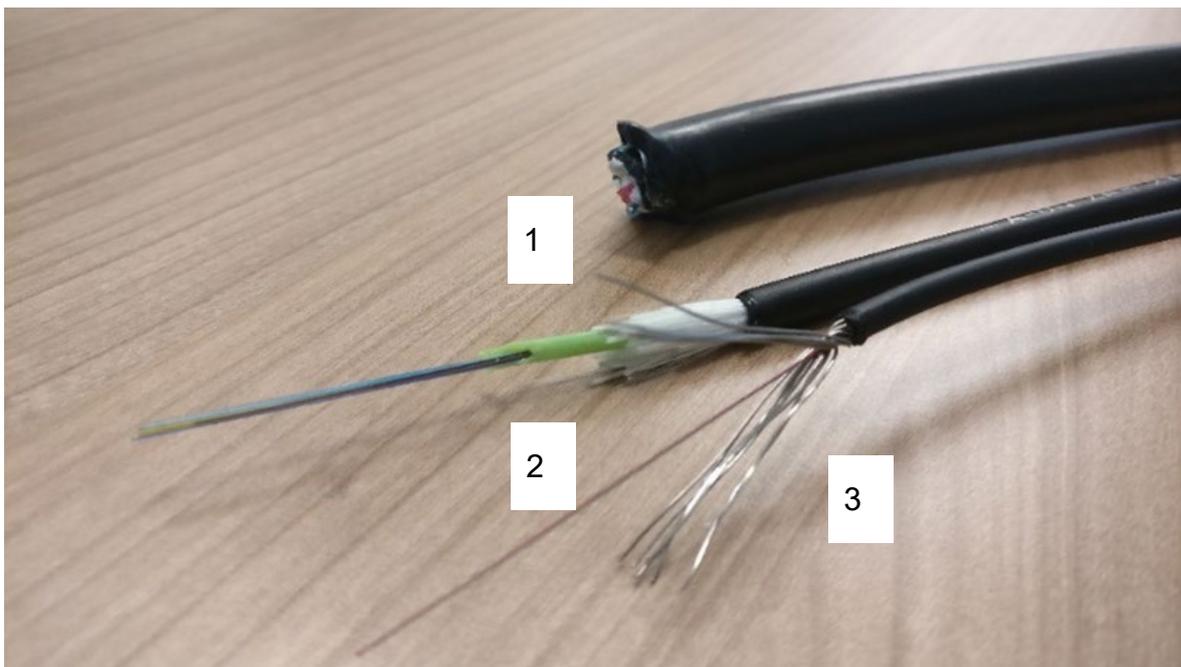


Abb. 7: Drei Glasfaserkabel in unterschiedlicher Ausführung zum Einsatz im Rahmen von DTS-Messungen

3.2.3 Eignungsprüfung von Kabeln und Verbindern

Die Wahl des Kabels hat erheblichen Einfluss auf die Durchführung der Messung und die Qualität der Messdaten. Kabel sind für die jeweiligen Zwecke von unterschiedlichen Anbietern erhältlich. Konkret müssen bei der Wahl des Sensors folgende Punkte gegeneinander abgewogen werden:

- ▶ Messgenauigkeit und Ansprechverhalten
- ▶ Stabilität/Resistenz
- ▶ Flexibilität
- ▶ Kosten

Die jeweiligen Eigenschaften konkurrieren teilweise miteinander. So ist ein dickeres Kabel tendenziell robuster, aber gleichzeitig auch unflexibel und damit schwieriger zu verlegen. Außerdem weisen dickere Kabel ein verzögertes Messverhalten auf, da die höhere Wärmekapazität zu einer langsameren Erwärmung führt. Ein dünneres Kabel zeigt ein tendenziell besseres Ansprechverhalten, ist aber gleichzeitig weniger haltbar.

Im Technikum für Hydraulik und Stadthydrologie der FH Münster wurden exemplarisch drei unterschiedliche Kabeltypen untersucht. Bestandteil der Untersuchungen war der Einfluss mechanischer Beanspruchungen (Biegung, Zug und Torsion) auf die Messqualität. Die Eigenschaften der drei Kabeltypen sind in Tab. 1 vergleichend gegenübergestellt. Die jeweiligen Kabeltypen weisen abhängig vom Aufbau und Material unterschiedliche Vor- und Nachteile auf.

Tab. 1: Eigenschaften der verschiedenen Kabeltypen

Typ	Ansprechverhalten	Messverhalten	Stabilität	Flexibilität	Kosten
1	-	o	++	--	o
2	+	+	o	++	-
3	++	++	+	+	++

-- sehr gering/schlecht o durchschnittlich ++ sehr hoch/gut

Basierend auf dem Vergleich der unterschiedlichen Kabeltypen wurde für das Projekt ein Kabel mit Glasrovings als Armierung (Kabeltyp 2) gewählt. Dieser Kabeltyp zeichnet sich durch ein gutes Messverhalten bei durchschnittlicher Stabilität und verhältnismäßig geringen Kosten aus. Die hohe Flexibilität begünstigt außerdem den mehrmaligen Einbau, da es sich leichter verlegen und auf- und abrollen lässt.

Weiterhin wurde untersucht, wie hoch eingeleitete Volumenströme und Temperaturdifferenzen sein müssen, um eine sichere Detektion zu gewährleisten. Insgesamt zeigen die Untersuchungsergebnisse eine gute Detektierbarkeit geringer Zuflüsse, die beispielsweise durch Toilettenspülungen verursacht werden. Voraussetzung ist jedoch, dass die resultierende Temperaturerhöhung durch die Einleitung über der Schwankungsbreite der Messung

(etwa 0,2 °C) liegt. Für typische Einleitszenarien wird dies in der Regel der Fall sein. Lediglich Einleitungen, die nur aus einer Kaltwasserquelle stammen oder eine entsprechend lange Fließstrecke durchlaufen, würden möglicherweise nicht detektiert werden.

3.3 Vergleichende Bewertung der unterschiedlichen Verfahren

Die unterschiedlichen Verfahren zur Detektion von Fehlschlüssen weisen systembedingte Vor- und Nachteile auf. Im Regelfall wird eine Kombination unterschiedlicher Verfahren im Rahmen einer Inspektionsstrategie zur erfolgreichen Detektion führen. Einen Überblick über unterschiedliche Verfahren liefern Tab. 2 und Tab. 3.

Der Vorteil der DTS-Messung gegenüber den anderen Detektionsmethoden ist die kontinuierliche Messung und die dabei vorhandene örtliche Auflösung, die es ermöglicht, auftretende Einleitungen auf den Hausanschluss genau zuzuweisen. Aufgrund des meist diskontinuierlichen Auftretens der Fehleinleitungen wird durch die lange Einbauzeit des Kabels sichergestellt, dass alle in dem Gebiet auftretenden Einleitungen erfasst werden, selbst wenn Anwohner über einige Zeit nicht anwesend sind (Ferienzeiten, Nutzung von Sanitäreinrichtungen in Partyräumen etc.).

Tab. 2: Überblick der visuellen Detektionsmethoden

Methode	Vorteile/Einsatzmöglichkeiten	Nachteile/Grenzen	Hinweise zu Kosten
Inspektion von Einleitstellen und Bauwerken (ggf. temporärer Einbau von Fixiervorrichtungen)	<ul style="list-style-type: none"> • relativ kostengünstig • mit Wartungsaufgaben kombinierbar • keine speziellen Geräte nötig • Hinweise auf Fehleinleitungen können entdeckt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Zuverlässigkeit stark eingeschränkt (z. B. bei geringen Zuflüssen) • das Vorhandensein von Fehleinleitungen kann nicht ausgeschlossen werden • bestimmte Indikatoren notwendig (Hygieneartikel, Geruch etc.) 	<p>sowohl Geräte- als auch Personalkosten relativ gering und gem. Selbstüberwachungsverordnung z. B. SÜwVO NRW ohnehin erforderlich</p>
Benebelung	<ul style="list-style-type: none"> • etablierte Methode zur Detektion von RW-Einleitungen in die SW-Kanalisation • moderater Zeitaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Rauch wird ggf. durch Rückstauverschluss oder Entlüftungsventile zurückgehalten • bei ausgetrocknetem Siphon kann Rauch in Wohnraum eindringen • zur Detektion von SW-Einleitungen in die RW-Kanalisation nicht zuverlässig geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten für das Nebelfluid: ca. 20 € pro Liter • Zeitaufwand: 10 bis 15 Hausanschlüsse pro Stunde
Optische Inspektion (Kamerabefahrung und Kanalbegehung)	<ul style="list-style-type: none"> • Kombination mit regelmäßig erforderlichen Zustandsuntersuchungen • mögliche Erkennung von FE und weitere Informationen zum Zustand 	<ul style="list-style-type: none"> • Schmutzwassereinleitungen erfolgen diskontinuierlich, somit Detektion unzuverlässig bzw. zufällig • hoher Zeit- und Kostenaufwand bei Untersuchung größerer Netze • bei vorheriger Kanalspülung können Hinweise auf FE weggespült werden 	<ul style="list-style-type: none"> • abhängig davon, ob Systeme zur Ausstattung gehören • hoher Zeit- u. Personalaufwand

Tab. 3: Überblick der Indikatormethoden zur Detektion

Methoden	Vorteile/Einsatzmöglichkeiten	Nachteile/Grenzen	Kosten
Tracer	<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung vergleichsweise einfach • keine speziellen Geräte nötig 	<ul style="list-style-type: none"> • Zugang zu Privatgrundstücken erforderlich (Revisionschächte nicht auf jedem Grundstück vorhanden) • Manipulation möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • in erster Linie personeller Aufwand
Chemische Indikatoren (aktive/passive Probenahme) (z. B. Ammoniak, Leitfähigkeit, Verhältnis Ammoniak/Kalium, Koffein, Carbamazepin)	<ul style="list-style-type: none"> • Detektion von Indikatoren aus menschlichen Ausscheidungen und Abfällen mit relativ hoher Genauigkeit • Analyse teilweise relativ kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> • kostengünstige Untersuchungen (NH₃ und Leitfähigkeit) problematisch, da sowohl in SW als auch in RW vorhanden • zur Analyse von Koffein ist Gaschromatographie notwendig • örtliche Schwankungen der Parameter setzen Voruntersuchungen voraus, um Grenzwerte festzulegen 	<ul style="list-style-type: none"> • gering bis sehr hoch je nach Parameter und Umfang der Beprobung und Analyse
Mikrobiologische Indikatoren (aktive/passive Probenahme) (Indikatorbakterien, Microbial Source Tracking, DNA Fingerprinting)	<ul style="list-style-type: none"> • je nach Methode mögliche Unterscheidung zwischen menschlicher und tierischer Herkunft der Mikroorganismen 	<ul style="list-style-type: none"> • tlw. langwierig und hohe Analysekosten • teilweise kurze Überlebenszeit der Indikatororganismen 	<ul style="list-style-type: none"> • Analytik zur Unterscheidung der jeweiligen Organismen ist teuer
DTS-Messung	<ul style="list-style-type: none"> • hohe zeitliche und räumliche Auflösung (einzelne Hausanschlüsse können direkt zuverlässig detektiert werden) • Arbeitsaufwand nach Einbau gering • keine Manipulation (lange Messdauer) 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeit- und Personalaufwand bei Einbau • Erfahrung bei Konzeption und Dateninterpretation erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> • abhängig von der Gebietsgröße und -struktur • mit zunehmender Messstrecke und größerer Anzahl von Hausanschlüssen sinken die relativen Kosten

4 Feldmessungen in Warendorf und Wuppertal

4.1 Charakteristika der untersuchten Gebiete

In ausgewählten Bereichen der Regenwasserkanalisation der Städte Warendorf und Wuppertal wurden Möglichkeiten der Detektion von Fehleinleitungen mit der DTS-Messung untersucht. Die beiden Kommunen wurden aufgrund ihrer Struktur sowie Erfahrungen im Umgang mit Fehleinleitungen ausgewählt. Während Warendorf hauptsächlich durch ländliche Strukturen mit 38.059 Einwohnern (Stand 2015) auf 177 km² Fläche geprägt ist (warendorf.de, 2018), charakterisiert Wuppertal mit 361.264 Einwohnern (Stand 31.12.2018) auf 168 km² die Struktur einer Großstadt (wuppertal.de, 2018).

In Warendorf durchfließt die Ems das Stadtgebiet von Ost nach West. Das Kanalnetz der Stadt Warendorf weist eine Gesamtlänge von 248 km auf. Davon sind rund 39 % als Trennsystem ausgeführt. Dem Abwasserbetrieb sind einschließlich der Einleitungen aus Straßentwässerungen im bebauten Bereich 113 Einleitungen bekannt, wovon 69 vom Abwasserbetrieb verwaltet werden. 46 dieser Einleitungen stammen aus Wohn- und Gewerbegebieten. Systematische Untersuchungen von Fehleinleitungen erfolgten vor Beginn des Projektes DETEK-T in Warendorf nicht, da keine Auffälligkeiten im Rahmen der Routineuntersuchungen beobachtet wurden (Selbstüberwachung).

In Wuppertal durchfließt die Wupper das Stadtgebiet, wobei zahlreiche, teilweise kanalisierte, Bäche in die Wupper einleiten. Wuppertal wird zu rund 86 % im Trennsystem entwässert. Im gesamten Wuppertaler Stadtgebiet sind 724 öffentliche Regenwassereinleitstellen dokumentiert. Die Untersuchung der Fehleinleitungen zählt zu den ständigen Aufgaben des Kanalbetriebs in Wuppertal. Die bisherigen Zahlen belegen eine Fehlanschlussquote von fast 9 % der untersuchten Anschlüsse und über 1 % der gesamten Anschlüsse. Eine genaue Differenzierung, ob dabei Schmutzwasserleitungen an die Regenwasserkanalisation oder Regenwasserleitungen an die Schmutzwasserkanalisation angeschlossen wurde, liegt allerdings nicht vor.

Aus diesem Grund waren in der gesamten Stadt bereits Gebiete mit vorhandenen Fehleinleitungen bekannt. Da es in Wuppertal 724 Einleitstellen von Regenwasserkanälen in Gewässer gibt und eine einmalige Inaugenscheinnahme keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte, konnten im Rahmen dieses Projektes nicht alle Einleitstellen in Wuppertal geprüft werden. An das öffentliche Kanalnetz in Wuppertal sind 61 100 Gebäude angeschlossen.

Bei den Messungen in den Testgebieten in Warendorf und Wuppertal sollte neben der Lokalisierung von Fehleinleitungen der Einsatz der durch Steckverbinder verbundenen Kabelsegmente unter Praxisbedingungen getestet werden. Kriterien für den Einbau von kürzeren Kabeln waren:

- ▶ Erleichterung der Handhabung beim Ein- und Ausbau
- ▶ Häufigkeit der Wiederverwendbarkeit der Kabel
- ▶ Untersuchung möglicher Störeinflüsse durch die Verbindungen
- ▶ Ermittlung möglicher Unterschiede der Messdaten zwischen den einzelnen Teilstücken
- ▶ Untersuchungen von Einflüssen auf Temperaturempfindlichkeit

Bei bisherigen Messungen wurden nur durchgehende Kabel eingesetzt. Dabei führten Kabellängen von ca. 2.000 m beim Einbau zu Problemen. Bei Kabellängen von mehreren Hundert Metern nehmen die Reibungskräfte beim Einbau deutlich zu, so dass der manuelle Einzug immer schwieriger wird und zudem hohe Zugkräfte das Kabel beanspruchen. Beim Ausbau müssen diese langen Kabelstrecken häufig zerschnitten werden, um das Kabel aus dem Kanal zu entfernen. Bei kürzeren Kabelstrecken wird der Ein- und Ausbau deutlich vereinfacht und zudem ist eine Mehrfachverwendung und damit eine Reduktion der Kosten möglich. Im Rahmen des Projektes wurden geeignete Kabel-Stecker-Kombination untersucht, um die eingesetzten Glasfaserkabel in kürzere Teilstücke unterteilen zu können. Da durch die Verbinder eine Beeinflussung der Messergebnisse möglich ist, wurde der Einfluss von Verbindungselementen untersucht. Die Verbinder ermöglichen den wiederholten Einsatz kürzerer Kabelabschnitte. Vor diesem Hintergrund wurde das Kabel in vier Segmente mit einer Länge von jeweils 300 m unterteilt. Mit Hilfe von Steckverbindern wurden die jeweiligen Segmente zu einem Kabelstrang mit einer Gesamtlänge von 1.200 m verbunden.

4.2 Ergebnisse der Detektion mit Hilfe der DTS-Messung

4.2.1 Exemplarische Detektionsergebnisse in Warendorf

In Warendorf wurden insgesamt 2.791 m Kanal mit 396 Hausanschlüssen und 1.420 angeschlossenen Anwohnern untersucht. In dem fast fünfmonatigen Messzeitraum konnten in beiden Teilgebieten insgesamt 58 Stellen registriert werden, an denen bei Trockenwetter nicht näher zu definierende Einleitungen in die Regenwasserkanalisation erfolgten. An 13 Stellen wurden Einleitungen regelmäßig in Abständen von fünfzehn Minuten bis zu acht Stunden registriert. Abb. 8 zeigt den entsprechenden Temperaturverlauf für eine Stelle, an

der ca. alle eineinhalb Stunden eine Einleitung stattgefunden hat. Diese regelmäßigen Einleitungen sind ein Indiz für angeschlossene Drainagewassereinleitungen mit festem Pumpenzyklus. Diese Situation wurde in Warendorf häufig festgestellt. Die Temperaturunterschiede des eingeleiteten Drainagewassers sind nur relativ gering, konnten aber sehr gut detektiert werden.

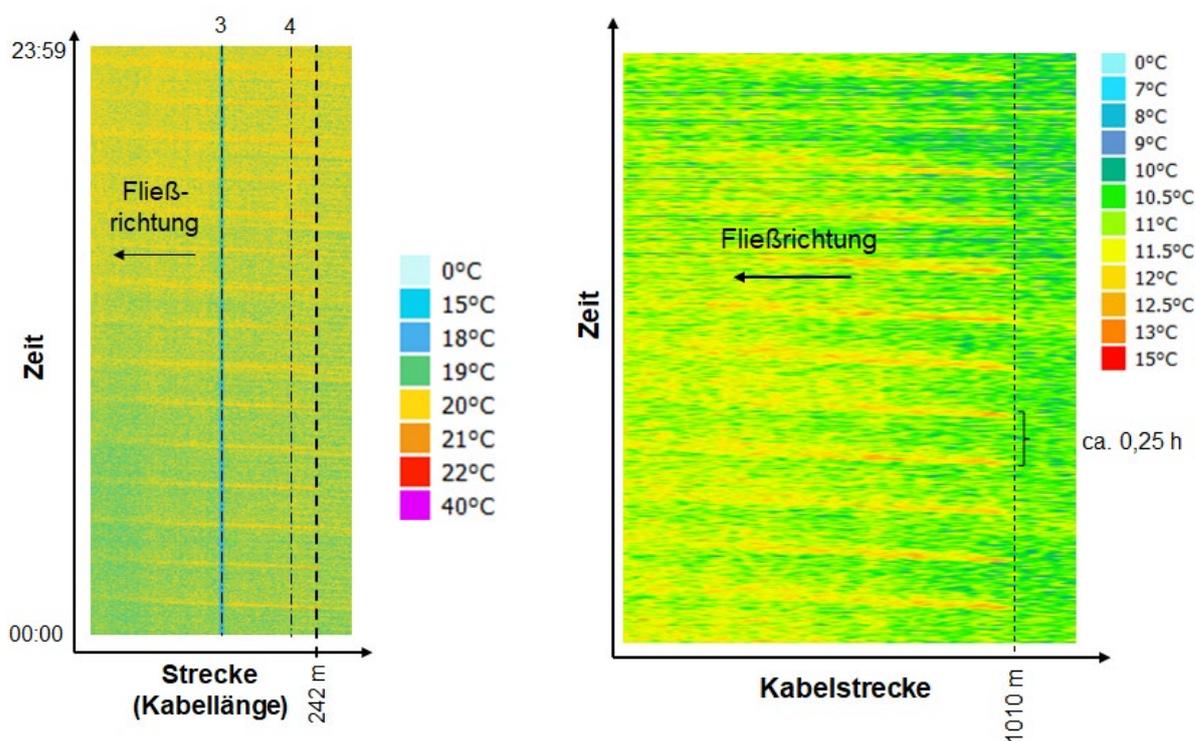


Abb. 8: Beispiel regelmäßiger Einleitungen durch Drainagepumpen innerhalb des Testgebietes in Warendorf

Die in Abb. 9 dargestellte Einleitung mit hoher Temperatur fand fast täglich, vor allem abends, statt und erstreckte sich häufig über ca. eine Stunde. Zum Teil erfolgten auch mehrere dieser Einleitungen hintereinander. Ursache war ein fehlengeschlossenes Einfamilienhaus mit mehreren Anwohnern. Der Grundstückseigentümer wurde informiert und beraten. Die Beseitigung der Fehleinleitung wurde kurzfristig durchgeführt.

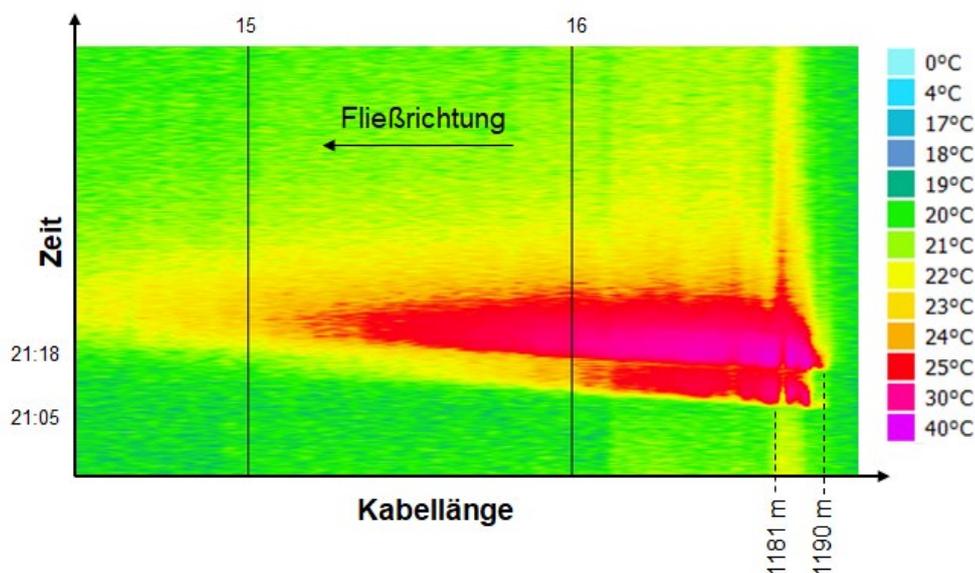


Abb. 9: Häufig auftretende Einleitung mit hoher Temperatur über einen Zeitraum von bis zu einer Stunde im Testgebiet in Warendorf

4.2.2 Exemplarische Detektionsergebnisse in Wuppertal

Die Auswahl der Testgebiete in Wuppertal erfolgte in Abstimmung mit dem Kanalbetrieb der WSW Energie & Wasser AG. Durch kontinuierliche Untersuchungen im Rahmen der betrieblichen Maßnahmen waren bereits problematische Gebiete bekannt. Die genaue Herkunft der Fehleinleitungen war in unterschiedlichen Bereichen durch bisher eingesetzte Detektionsmethoden jedoch nicht zu ermitteln. Hier exemplarisch dargestellt sind Messungen mit verbundenen Kabelteilstücken. Abb. 10 zeigt das Ergebnis der DTS-Messung für einen kompletten Tag auf der gesamten Kabellänge von 600 m (zwei Teilstücke von jeweils 300 m). Die dargestellten Messergebnisse weisen auf unterschiedlich temperierte Bereiche entlang des Kabels und im Tagesverlauf hin. Im Bereich vor Schacht 1 waren rund 91 m des Kabels unter dem Schachtdeckel auf einer Kabeltrommel aufgerollt. In diesem Bereich ist der Tagesverlauf der Temperatur an der Oberfläche erkennbar. In Schacht 2 war das Kabel ebenfalls über rund 44 m auf einer Kabeltrommel aufgerollt und unter dem Schachtdeckel befestigt. In Schacht 3 befand sich das Ende des zweiten Kabels, das wie in den vorherigen Schächten auf einer Kabeltrommel unter der Abdeckung befestigt wurde. Diese Bereiche wurden von der Auswertung ausgenommen, da sich das Kabel an diesen Stellen nicht auf der Kanalsohle befand. Der Einfluss der Steckverbindungen hat auf die Detektion von Fehleinleitungen keinen maßgeblichen Einfluss. Systembedingte Temperaturänderungen sind eindeutig lokalisiert und damit interpretierbar.

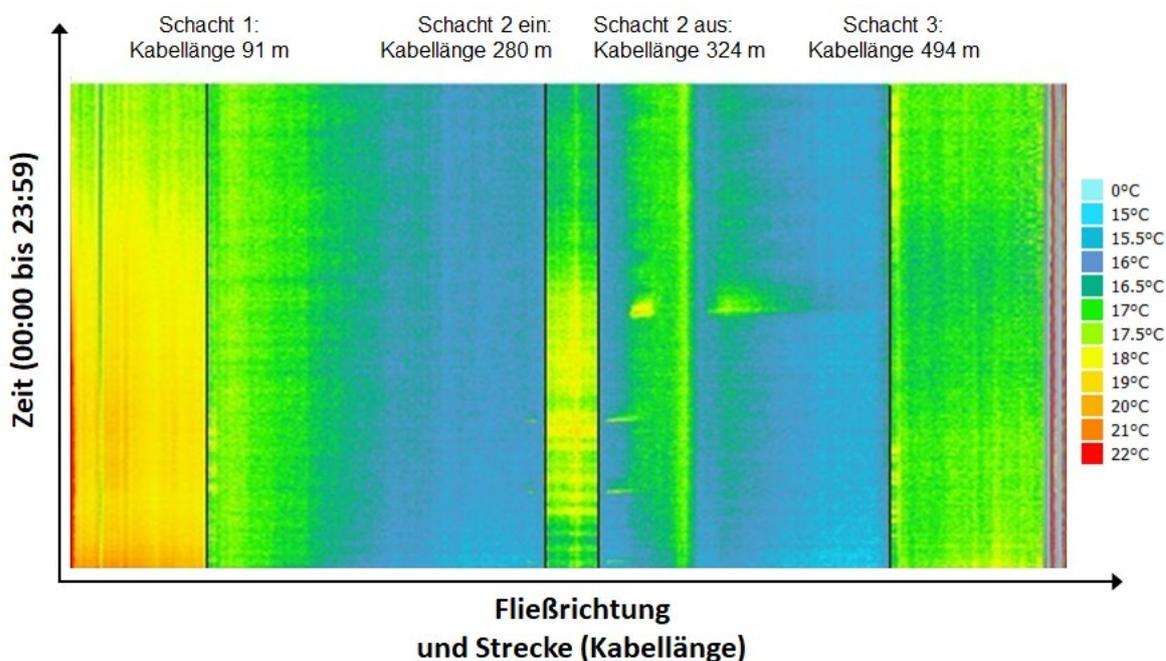


Abb. 10: Messergebnis (24 Stunden) Testgebiet 2 in Wuppertal vom 11.10.2018

5 Konzept zur Detektion von Fehlschlüssen

Ein Konzept zur Detektion von Fehleinleitungen veranschaulicht Abb. 11. Im Rahmen des Projektes wurde ein Leitfaden zur Vermeidung und Beseitigung von Fehleinleitungen erstellt, in dem das empfohlene Vorgehen genauer beschrieben wird. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass zumindest größere Netzbereiche mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht fehleinleitungsfrei sind.

Um Fehleinleitungen auszuschließen, ist eine konsequente Abnahme der Anschlussleitungen erforderlich. Das Risiko des Fehlschlusses durch Qualitätsvorgaben bei der Bauausführung kann deutlich vermindert werden. Eine fachgerechte Ausführung der Anschlüsse an den öffentlichen Kanal verhindert zudem bauliche Schäden und damit häufig verknüpfte hydraulische Einschränkungen.

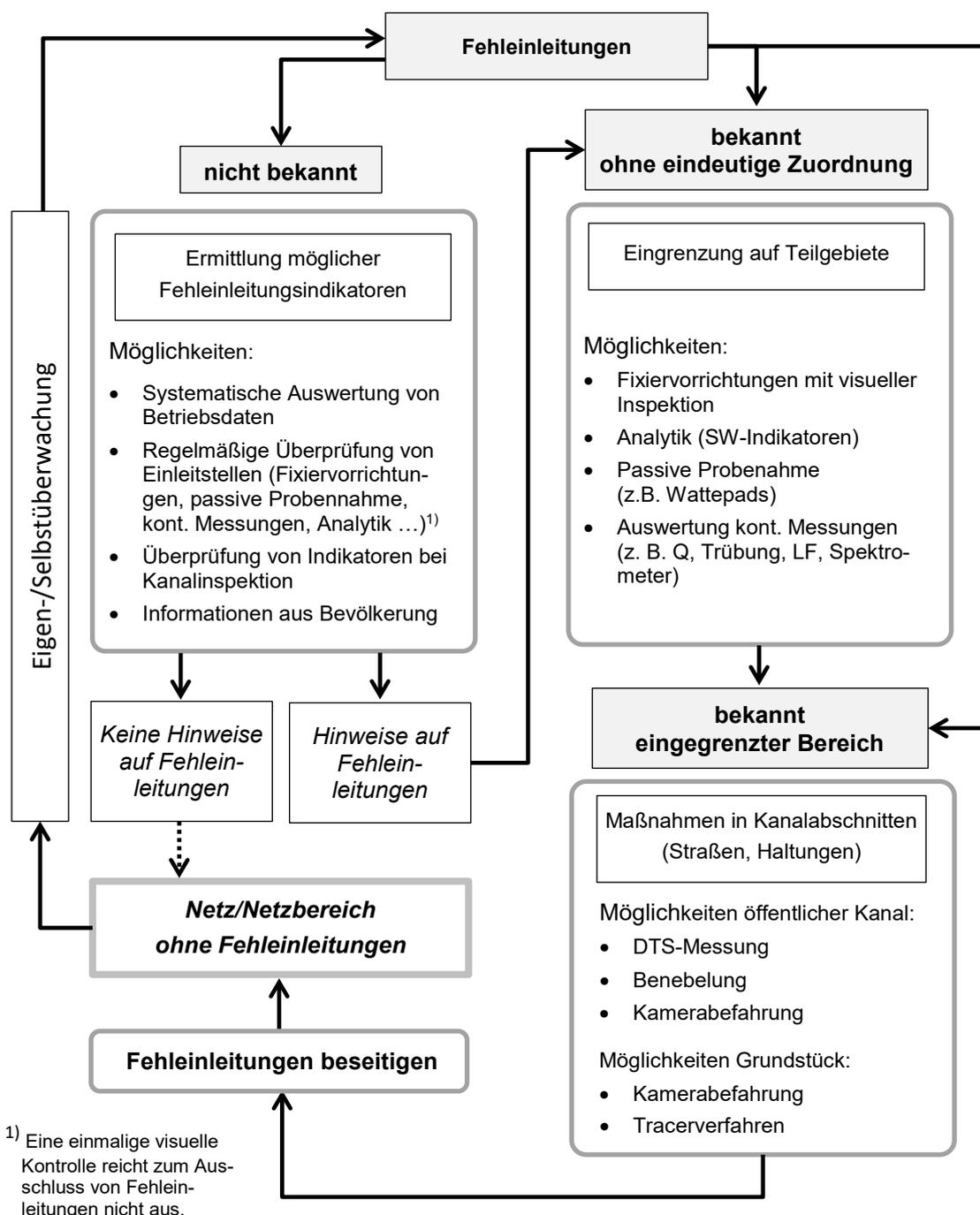


Abb. 11: Konzept zur Detektion von Fehlan schlüssen

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Detektion von fehlgeschlossenen Schmutzwasserleitungen an die Regenwasserkanalisation ist ein unangenehmes Thema. Gründe dafür sind:

- ▶ Der vergleichsweise hohe Aufwand, um Fehlan schlüsse sicher zu detektieren.

- ▶ Betroffene Grundstückseigentümer werden mit einem unerwarteten Aufwand konfrontiert, der möglicherweise nennenswerte Kosten verursacht.
- ▶ Vor allem bei eingeschränkter Kooperationsbereitschaft der betroffenen Verantwortlichen für den Hausanschluss ist der Verwaltungsaufwand für Kanalnetzbetreiber und Ordnungsbehörden vergleichsweise hoch.
- ▶ Fehlan schlüsse sind grundsätzlich auf individuelle Fehler bei der Planung, Genehmigung oder Ausführung zurückzuführen, deren Aufklärung mit Unannehmlichkeiten verbunden ist.

Die ökologische Belastung der Gewässer durch Fehleinleitungen ist unstrittig. Das aktuelle Ausmaß der Belastungen ist mit derzeitigem Stand der Erkenntnisse nur eingeschränkt quantifizierbar. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Zur Weiterentwicklung der DTS-Messtechnik zur Detektion von Fehleinleitungen durch Erfassung von Temperaturdifferenzen im Abfluss erfolgten exemplarische Untersuchungen in der Kanalisation der Städte Warendorf und Wuppertal. Die beiden Städte zeichnen sich durch unterschiedliche Rahmenbedingungen aus. Die Großstadt Wuppertal mit über 355 000 Einwohnern ist durch hohe topografische Unterschiede gekennzeichnet. In Wuppertal werden ca. 90 % des Stadtgebietes im Trennverfahren entwässert. An über 700 Stellen erfolgen Einleitungen aus der Regenwasserkanalisation in ein Gewässer. Die Stadt Warendorf im östlichen Münsterland hat eine ländlich geprägte Struktur. In Warendorf leben über 37 000 Menschen. Vergleichsweise häufig werden Grundstücke durch Drainagepumpen entwässert. Probleme mit Fehleinleitungen waren in Warendorf zu Beginn des Projektes weitgehend unbekannt. In Wuppertal dagegen wird bereits seit Jahren systematisch nach Fehleinleitungen gesucht.

Die Untersuchungen des Projektes DETEK-T haben gezeigt, dass die DTS-Messung ein genaues Verfahren zur exakten Detektion von Temperatureauffälligkeiten ist, die ein sicheres Indiz für Fehleinleitungen sind. Auch die in Warendorf zahlreichen Drainageeinleitungen mit vergleichsweise geringen Temperaturunterschieden wurden sicher detektiert, stellten aber keine Fehleinleitung dar. In erster Linie deuten Temperaturdifferenz von mindestens 2 °C auf Fehleinleitungen in den Regenwasserkanal hin.

Ein maßgebliches Ergebnis der Untersuchungen in Warendorf und Wuppertal war die Reduktion des Aufwandes und der Kosten bei der DTS-Messung. Durch Segmentierung der Kabelabschnitte mit Kabelverbindern (Connectoren) ist eine deutliche Reduktion des Aufwands beim Ein- und Ausbau möglich. Durch damit verbundene Mehrfachnutzung der Kabelsegmente können die Kosten für das Glasfaserkabel reduziert werden.

Ein weiteres Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen sind ein Überblick und die Bewertung unterschiedlicher Detektionsmethoden. Die bisher in den meisten Fällen durchgeführte Benebelung eignet sich zwar für die Detektion von Regenwasserleitungen an die Schmutzwasserkanalisation, für die sichere Detektion von Schmutzwasserleitungen an die Regenwasserkanalisation eignet sich dieses Verfahren nur eingeschränkt. Ursache dafür sind beispielsweise unterschiedliche Arten der Entlüftung der Hausinstallation oder die Verwendung einer Abwasserhebeanlage.

Eine landesweite Umfrage hat gezeigt, dass etwa ein Drittel der Kommunen systematisch nach Fehleinleitungen sucht. Dabei werden zumeist Benebelungen durchgeführt. Die Mehrheit der befragten Kommunen sehen Fehleinleitungen nicht als maßgebliches Problem. Dies zeigt, dass zur Vermeidung der Belastung der Gewässer mit unbehandelten Schmutzwasserabflüssen noch erheblicher Aufklärungsbedarf besteht.

Um Fehleinleitungen auszuschließen, ist eine konsequente Abnahme der Anschlussleitungen erforderlich. Darüber hinaus kann das Risiko des Fehlschlusses durch Qualitätsvorgaben bei der Bauausführung deutlich vermindert werden. Die Maßnahme sollte durch qualifiziertes Personal des Kanalnetzbetreibers oder Fachunternehmen durchgeführt werden. Eine fachgerechte Ausführung der Anschlüsse an den öffentlichen Kanal verhindert zudem bauliche Schäden und damit verknüpfte hydraulische Einschränkungen.

7 Literatur

Brown E., Caraco D. and Pitt R. (2004): Illicit Discharge Detection and Elimination - A Guidance Manual for Program Development and Technical Assessments. Center for Watershed Protection, Maryland, Alabama.

Ellis J.B. and Butler D. (2015): Surface water sewer misconnections in England and Wales: Pollution sources and impacts. *Science of the Total Environment* 526: 98–109.

Grüning H. und Pecher K.-H. (2020) Kanalnetzplanung und Überflutungsvorsorge. 1. Auflage 2020, ISBN: 978-3-8356-7383-0 (Print) und 978-3-8356-7384-7 (eBook), Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Hoes O.A.C., Schilperoort R.P.S., Luxemburg W.M.J., Clemens F.H.L.R. und van de Giesen N.C. (2009): Locating illicit connections in storm water sewers using fiber-optic distributed temperature sensing. *Water Research* Vol 43 No 20 pp 5187-5197

Hoppe H., Pecher K.H., Laschet U., Schilperoort R. (2013): Exakte Lokalisierung von Einleitungen in Entwässerungssysteme mittels verteilter Temperaturmessungen (DTS) – Grundlagenermittlung zur effizienten Sanierungsplanung. KA – Korrespondenz Abwasser, Abfall: 428 – 434

Hoppe H., Fricke K. und Rottmann T. (2015): Trennsysteme oder sanierungsbedürftige Mischsysteme? Ermittlung von Fehleinleitungen mittels DTS. 10. Fachtagung Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen – Konzepte, Erfahrungen, Trends in Kassel

Raman C.V. (1928): A new radiation. Indian Journal of Physics 1928: 387–398.

Schilperoort R., Hoppe H., de Haan C. und Langeveld J. (2013): Searching for storm water inflows in foul sewers using fibre-optic distributed temperature sensing. Water Science & Technology: 1723–1730.

Warendorf (2018): Zahlen, Daten & Fakten. <https://www.warendorf.de/leben-in-warendorf/stadtportrait/zahlen-daten-fakten.html> (12.03.2019).

wuppertal.de (2018): Daten und Fakten. https://www.wuppertal.de/wirtschaft-stadtentwicklung/daten_fakten/index.php (12.03.2019).

