



IKT – Institut für  
Unterirdische Infrastruktur

## Abschlussbericht

### Qualitätssicherung beim Rohrvortrieb durch kontinuierliche Fugenvermessung

**Auftragnehmer:**



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur  
Exterbruch 1  
45886 Gelsenkirchen

**Fördermittelgeber:**



DBU Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
An der Bornau 2  
49090 Osnabrück

Wissenschaftliche Leitung:

Dr.-Ing. Bert Bosseler

Bearbeitung:

Dipl.-Ing. M. Liebscher

Dipl.-Ing. A. Redmann

Dipl.-Ing. (FH) F. Bersuck

Dr. rer. oec. L. Rometsch

## Inhaltsverzeichnis

1	VERANLASSUNG UND PROBLEMSTELLUNG .....	3
2	ZIELSTELLUNG UND VORGEHENSWEISE .....	5
3	DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN .....	7
3.1	AUSGEWÄHLTE BAUMAßNAHME .....	7
3.2	VERFORMUNGSMESSDOSEN UND FUNKÜBERTRAGUNGSSYSTEM .....	7
3.3	VORTRIEBSBEGLEITENDE FUGENSPALTMESSUNGEN .....	10
3.4	MODIFIKATION DER MESSDOSEN .....	15
3.5	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNGEN .....	17
4	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....	21
5	PUBLIKATIONEN UND VERBREITUNG DER ERGEBNISSE .....	22
6	LITERATUR .....	22

## 1 Veranlassung und Problemstellung

Ein intaktes Ver- und Entsorgungsnetz ist heutzutage eine unentbehrliche Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit und den Erhalt der modernen Zivilisation. Aufgrund ihrer aufwändigen und kostspieligen Herstellungsweise ist es erforderlich, die Leitungssysteme möglichst lange nutzen zu können, wobei bei möglichen Schädigungen die Kanalrohre in der Regel nur unter großem Aufwand instand gesetzt werden können. Deshalb sollten Haltbarkeit und mögliche Schadensursachen bereits in der Planungsphase der Bauausführung berücksichtigt werden.

Gegenüber der Neuverlegung von Kanalrohren in offener Bauweise, die wegen ihres Eingriffs in die Geländeoberfläche gerade in innerstädtischen Gebieten zu erheblichen Behinderungen führt, bieten Verfahren der geschlossenen Bauweise erhebliche Vorteile. Der Eingriff in Fahrbahnen und Gehwege wird durch den grabenlosen Leitungsbau auf ein Minimum reduziert. Beim unterirdischen Rohrvortrieb werden Rohre von einer Startbaugrube (vgl. Bild 1) aus mittels hydraulischer Pressen durch den Baugrund bis in die Zielbaugrube vorgetrieben. Hiermit lassen sich schützenswerte Bereiche, wie beispielsweise Gebäude oder Naturschutzgebiete, ohne Einflussnahme auf die Oberfläche unterfahren.



*Bild 1 Startbaugrube eines Rohrvortriebs*

Hierbei werden die für den Vortrieb notwendigen Kräfte von Rohr zu Rohr übertragen. Zur Optimierung der Lastübertragung und Ermöglichung von Steuerkorrekturen bzw. planmäßigen Kurvenfahrten werden beispielsweise bei Stahlbetonrohren die Rohrverbindungen gelenkig ausgebildet, indem zwischen den Rohrspiegeln so genannte Druckübertragungsmittel eingesetzt werden (Bild 2).

Diese sollten eine möglichst große Lasteinleitungsfläche zur Übertragung der Vorpresskräfte zur Verfügung stellen und durch ihr Verformungsverhalten Verwinklungen erlauben.

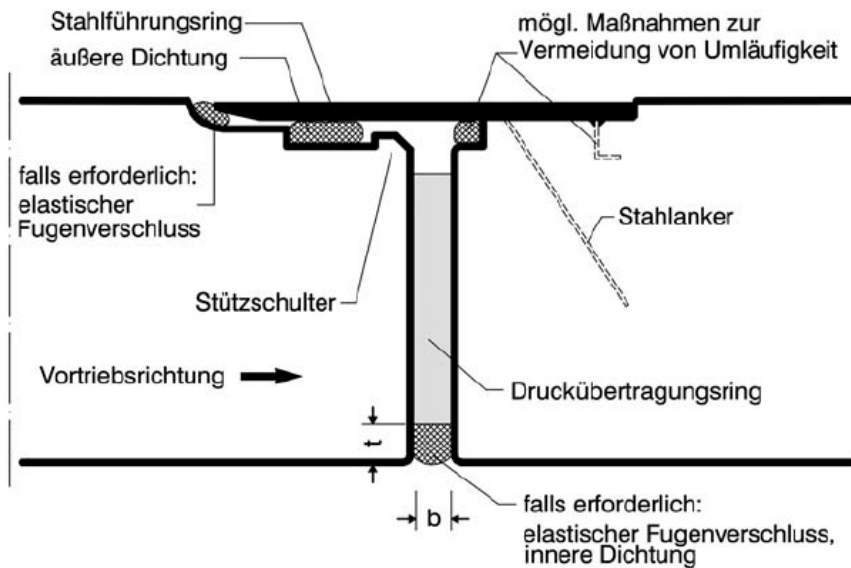


Bild 2 Verbindung eines Stahlbeton-Vortriebsrohres nach DWA-A 125 [1]

Trotz des Einsatzes modernster Maschinen- und Steuertechnik und normengerechter Bemessung der Rohre kommt es beim Einbau immer wieder zu Schäden, die sich bei Stahlbetonrohren in Form von Rissen oder Abplatzungen an der Betonoberfläche (Bild 3) ausbilden. Bereits hier ist die Funktionsfähigkeit und Dichtheit der Rohre zu hinterfragen und es kann sogar zum Verlust der Standsicherheit kommen. Dies kann einen weiteren Vortrieb unmöglich machen und das Erstellen einer Notbaugrube mit erheblichen Eingriffen an der Oberfläche erfordern.

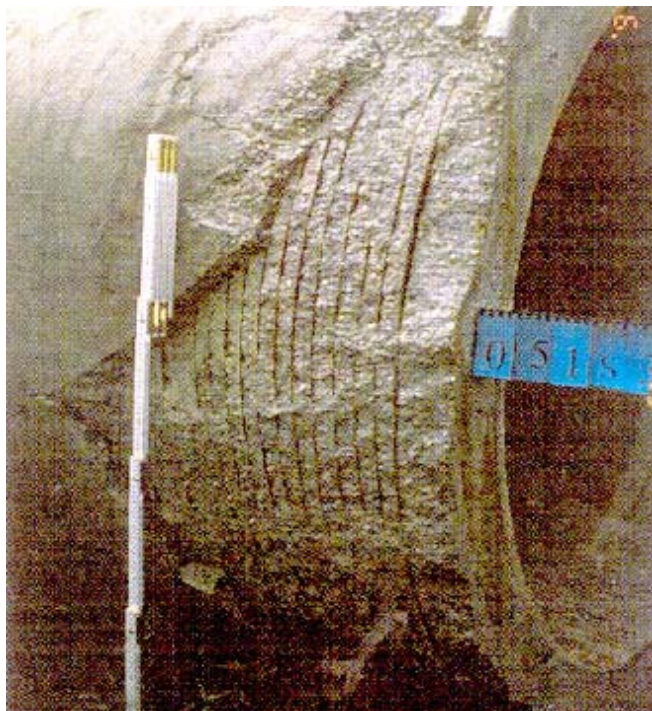


Bild 3 Abplatzung an der Außenseite eines Vortriebsrohres

Die Ursache für solche Schäden sind häufig Überbelastungen der Vortriebsrohre durch ungleichmäßige Kräfteinleitung über die Druckübertragungsrings infolge von Steuerbewegungen. Hieraus ergeben sich oftmals zu große Abwinkelungen der Rohre unterein-



ander, welche eine Verringerung der Lasteinleitungsfläche und somit Spannungskonzentrationen an der Stirnfläche der Stahlbetonrohre zur Folge haben können. Nicht selten übersteigen diese Spannungen die zulässigen Festigkeiten der Rohrmaterialien und verursachen Schäden, die nur sehr mühsam oder gar nicht zu beheben sind. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit der Kenntnis der Verformung des Druckübertragungsmittels während des Vortriebs, weil hierüber auf die Belastung der Rohre geschlossen und Schäden vermieden werden können.

Die **kontinuierliche Messung der Fugenspaltweite** ermöglicht hier die Überwachung der Verformung des Druckübertragungsmittels über die gesamte Beanspruchungszeit. Drohende Überbeanspruchungen der Vortriebsrohre können frühzeitig erkannt und Gegenmaßnahmen, z.B. eine Bentonitschmierung des Rohrstranges zur Verringerung der Mantelreibung und Reduzierung der Vorpresskräfte, eingeleitet werden.

## 2 Zielstellung und Vorgehensweise

Derzeit verfügbare Systeme zur kontinuierlichen Vermessung der Fugenspaltweiten werden an der Rohrinneinnenseite montiert und engen somit wesentlich den lichten Querschnitt bzw. den Arbeitsraum ein. Zudem werden bei diesen Systemen die Messwerte via Kabel „über Tage“ befördert (vgl. Bild 4). Dies führt durch das erforderliche Ab- und Ankoppeln zu Verzögerungen beim Einbau der Vortriebsrohre in der Startbaugrube. Auch ist die Montage der Wegaufnehmer mit Bohren und Verdübeln recht aufwändig, die Bohrlöcher schädigen die Rohrwand und es sind Vorrichtungen anzubringen, welche ein gegenseitiges Verrollen der Rohre verhindern.

Prinzipiell ist die Vermessung der Rohrfugen jedoch durchaus geeignet, das Schadensrisiko bei Rohrvortrieben deutlich zu verringern (vgl. [2]).



**Bild 4** Vortriebsrohr mit eingebauter Messtechnik und Verkabelung [2]

Hier setzte die Entwicklung des im Rahmen des Forschungsprojektes zu erprobenden Messsystems an. Die Messung der Fugenspaltweiten mit diesem System reduziert den lichten Querschnitt des Vortriebsrohres nur minimal und die Messdaten werden zudem per Funk aus dem Rohr und der Startbaugrube heraus übertragen. Der entwickelte Prototyp einer Messdose wird in eine Aussparung des Druckübertragungsmittels, also auf der Rohrstirnseite, montiert und wurde bereits im Rahmen eines Forschungsprojektes unter Laborbedingungen eingesetzt. Voraussetzung für den Einbau der Messdosen ist der statische Nachweis der verringerten Druckübertragungsfläche.

Ziel dieses Projektes war die Entwicklung eines Systems, welches die Verformungen des Druckübertragungsmittels und somit die Belastung der Rohre bei minimaler Beeinflussung des Bauablaufs erfasst, entsprechende Daten speichert und diese gegebenenfalls zur Weiterverarbeitung an ein Berechnungsprogramm übergibt. Zudem sollen die Kosten für eine derartige Überwachung durch eine Reduktion des Aufwandes beim Einbau der Messdosen und durch geringeren Folgeaufwand beim Rohrwechsel reduziert werden. Im Ergebnis ist dann mit einer deutlichen Reduzierung der Bauschäden an Vortriebsrohren mit ihren Konsequenzen für die Umwelt (z. B. Abwasserexfiltration) zu rechnen.

Hierfür wurden die bereits entwickelten Prototypen an die Praxisbedingungen vor Ort angepasst und das Gesamtsystem inklusive Funkübertragung der Messdaten im Rahmen eines realen Rohrvortriebes erprobt.

In Rahmen des Projektes wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Analyse der ausgewählten Baumaßnahme
- Anpassung des gesamten Messsystems auf die Gegebenheiten der ausgewählten Baumaßnahme
- Durchführen und Auswerten von vortriebsbegleitenden Fugenspaltmessungen
- Analyse der Messungen und bei Bedarf Modifikation der Messdosen
- Vergleichende Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der Messdosen im Vergleich zur klassischen Variante mit Wegaufnehmern

### 3 Durchgeführte Untersuchungen

#### 3.1 Ausgewählte Baumaßnahme

Die gewählte Vortriebstrasse in Gelsenkirchen hat eine Länge von 480 m mit 149 Rohrfugen. Insgesamt 350 m dieser Trasse wurden als gerader Vortrieb und 130 m als Plankurve mit einem Radius von 300 m aufgeföhren. Die Nennweite der Vortriebsrohre betrug DN 1800. Im Bild 5 ist die Vortriebstrasse mit eingezeichnetem Start- und Zielschacht zu sehen.

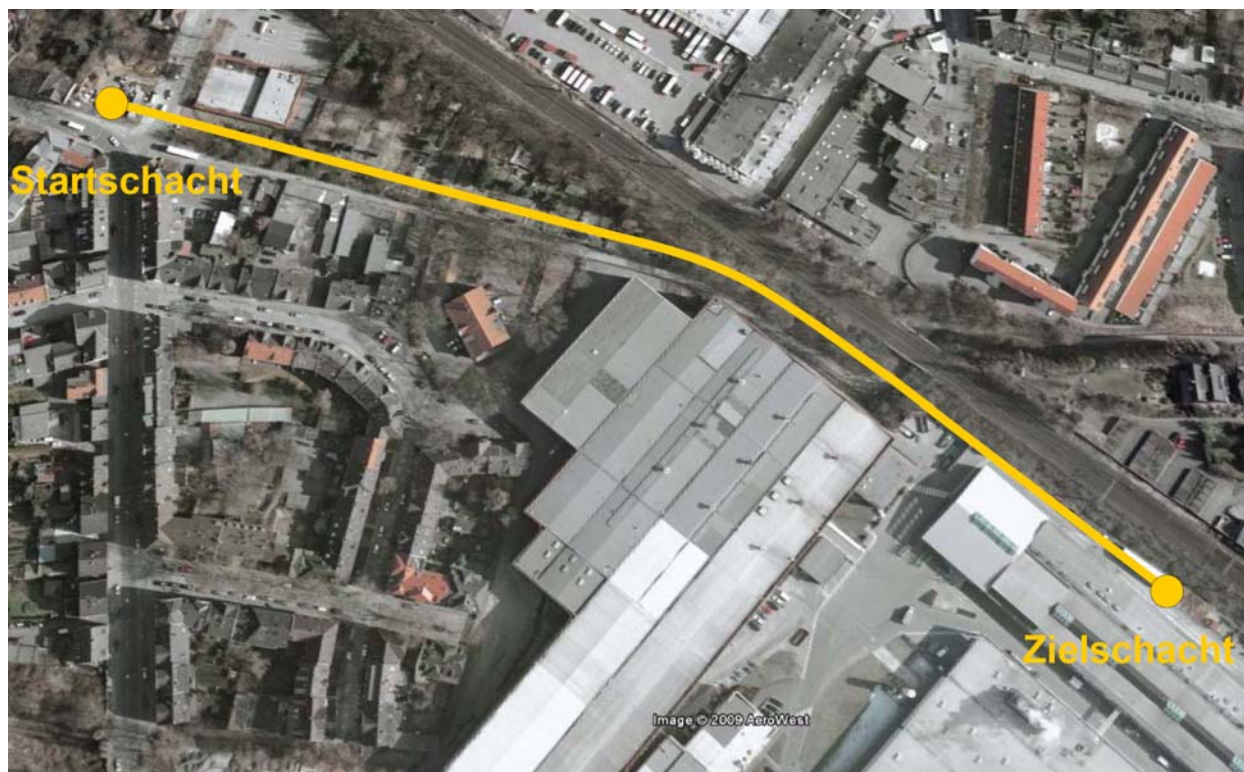
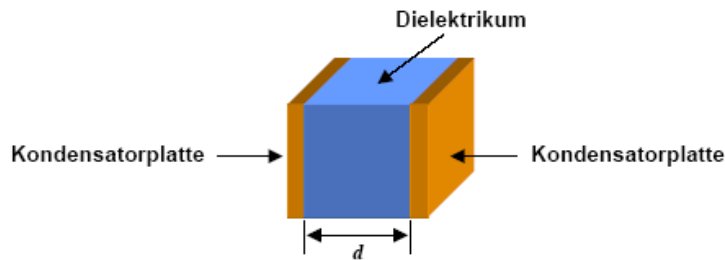


Bild 5: Untersuchte Vortriebstrasse

#### 3.2 Verformungsmessdosen und Funkübertragungssystem

Die Verformungsmessdose ist prinzipiell aufgebaut wie ein Zweiplattenkondensator. Sie besteht aus zwei ungleich geladenen, parallel angeordneten Platten mit einem bestimmten Abstand voneinander. Gemessen wird eine als Kapazität bezeichnete physikalische Größe bzw. quantitativ bestimmbare Eigenschaft des Kondensators. Die sogenannte Kapazität des Zweiplattenkondensators, d.h. die Fähigkeit zur Speicherung einer elektrischen Ladung, hängt hier von der Größe der Platten, ihrem Abstand und dem Material zwischen den Platten (dem Dielektrikum, Bild 6) ab.





**Bild 6** Funktionsprinzip der Verformungsmessdose

Als elektrische Kapazität wird dabei das Verhältnis einer zugeführten elektrischen Ladungsmenge zur entstandenen Spannung verstanden. Bei einer definierten Plattengröße und einem gleichbleibenden Dielektrikum ist die Kapazität proportional zum Abstand zwischen den Platten. Verringert sich der Abstand zwischen den Platten erhöht sich die Kapazität.

Elektronisch gesteuert werden die Kondensatorplatten zuerst entladen und anschließend wird über einen Widerstand eine Eingangsspannung angelegt. Die Verformungsmessung wird erst durch den Einsatz eines speziellen Analog-Digital-Wandlers möglich. Es wird die Zeit gemessen, bis an den zuvor entladenen Kondensatorplatten die Eingangsspannung erreicht ist. Um eine Auflösung von 24 bit zu erreichen, wiederholt sich dieser Vorgang kontinuierlich mit einer Abtastfrequenz von 8 Hz. Die Kapazität wird so in einem Messbereich von  $\pm 4 \cdot 10^{-12}$  Farad bestimmt. Höhere Abtastfrequenzen bis 100 Hz sind möglich, würden aber die Auflösung und damit die Messgenauigkeit verringern. Die Messgenauigkeit der aus der gemessenen Kapazitätsänderung abgeleiteten Verformung liegt bei  $\pm 0,1$  mm und ist für den vorliegenden Anwendungsfall mehr als ausreichend. Das Messfeld liegt in der Mitte der Kondensatorplatte. Um das Messfeld liegt ein sogenanntes Gleichfeld zur Störunterdrückung. Bild 7 zeigt den bereits entwickelten Prototypen der Verformungsmessdose. Dieser musste für den Baustelleneinsatz optimiert und angepasst werden.



**Bild 7** Messdose – Prototyp [3]

Zunächst wurden die Messdosen in Geometrie und Ausführung an Nennweite und Wanddicke des Rohrvortriebs angepasst. So wurden die Prototypen dahingehend modifiziert, dass die Grundplatten vergrößert wurden und somit zum einen der Messbereich besser geschützt und zum anderen die Elektronik teilweise mit in die Dose integriert werden konnte. Durch die Vergrößerung der Grundplatten konnte ein zusätzlicher Schutzmantel aus Folie um die Messdose angebracht werden. Außerhalb der Messdose ist jetzt nur noch das Funkmodul mit Stromversorgung untergebracht.

Die verwendeten Funkmodule arbeiten mit der integrierten „Easy-Radio“ Technologie [4] und sind damit einfach anwendbare Hochleistungs-Funkmodule, die nach Herstellerangaben digitale Daten bis zu einer Entfernung von 250 m bei Sichtverbindung übertragen können. Die „Easy-Radio“ Technologie erlaubt es, die Frequenz, Datenrate und Sendeleistung einzustellen und die Module damit für die Anwendung zu optimieren. Die verwendeten Module arbeiten im Frequenzbereich 868/869MHz. Jede der Messdosen wurde mit einem Funkmodul ausgestattet. Der dazugehörige „Master“ sammelt die Messdaten der Messdosen und speichert diese auf einer handelsüblichen SD-Speicherkarte zur Datensicherung.

Zudem sendet dieser Master die Daten an einen „Repeater“, welcher zur Vergrößerung der Reichweite des Systems dient und eine Übertragung bis in die Startbaugrube ermöglichen soll. Die „Easy-Radio“ Technologie ermöglicht nur die Implementierung eines „Repeaters“. Im Praxiseinsatz musste sich zeigen, ob dies zur Datenübertragung im gesamten Rohrstrang ausreicht. Am Messrechner werden die Daten über ein Empfangsmodul abgespeichert.

Insgesamt wurden so neun Messdosen zur Überwachung von drei Rohrfugen hergestellt und das Gesamtsystem für die drahtlose Übertragung und Speicherung der Messdaten konfiguriert und erprobt. Die modifizierten Messdosen sind im Bild 8 dargestellt.



**Bild 8**      *Modifizierte Messdose ohne äußeren und inneren Schutzmantel*

### 3.3 Vortriebsbegleitende Fugenspaltmessungen

Als Messfugen für den Einsatz der Messdosen im Rohrvortrieb wurden drei Fugen in Vorpressrichtung hinter der ersten Zwischenpressstation ausgewählt. Diese Rohrverbindungsgebiete wurden zu Beginn des Vortriebs durch die Hauptpressstation beansprucht. Im weiteren Vortriebsfortschritt wurde bei Erreichen der Grenzlast die Zwischenpressstation eingebaut und schließlich aktiviert, so dass die betrachteten Rohrfugen weiterhin kontrolliert mit den zulässigen Maximalkräften belastet werden. Nach Abschluss des Vortriebs waren die Messfugen etwa 380m von der Startbaugrube entfernt. Bild 9 zeigt einen Blick in den Rohrstrang und die Anordnung der Messdosen im Rohrscheitel und den beiden Kämpfern.

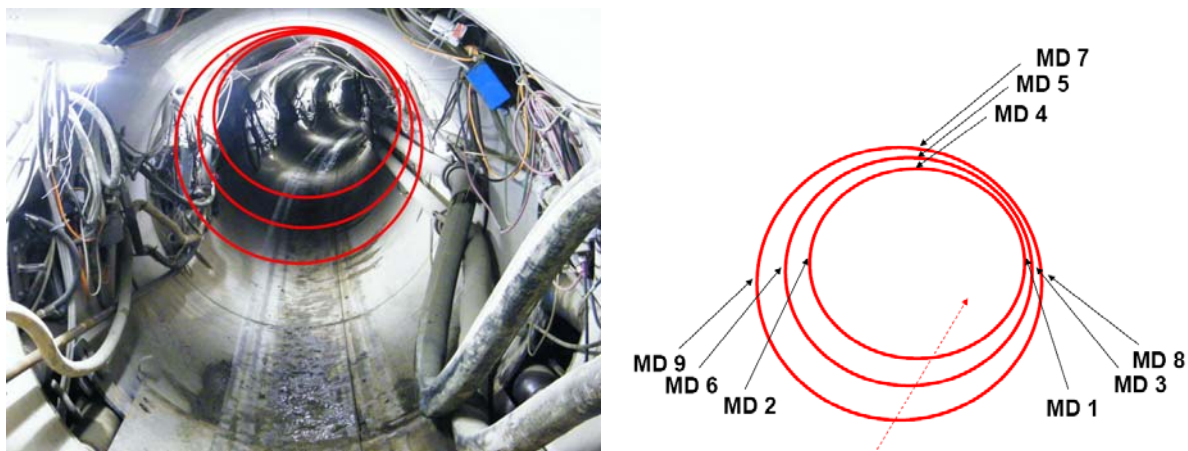


Bild 9: Messfugen (Bezeichnung in Vortriebsrichtung)

Es wurden insgesamt 9 kapazitive Verformungsmessdosen zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Verformungen des Druckübertragungsmittels in drei aufeinanderfolgende Rohrverbindungen eingebaut. Die Messdosen wurden jeweils in den Rohrkämpfern und dem Rohrscheitel angeordnet. Die erforderlichen Aussparungen im Druckübertragungsmittel wurden bei der Berechnung der zulässigen Vorpresskräfte berücksichtigt. Bild 10 zeigt den Einbau einer Messdose.



Bild 10: Einbau der kapazitiven Verformungsmessdosen



Der Master auf Microcontrollerbasis und die integrierte Messelektronik dienen der Aufzeichnung und Abfrage der Messwerte. Die Messdaten wurden drahtlos von den einzelnen Messdosen an den Master weitergeleitet und dort auf einer Speicherkarte gesichert (Bild 11).



**Bild 11:** Master auf Microcontrollerbasis zur Steuerung, Abfrage, Visualisierung und Speicherung der Messwerte

Zwischenzeitlich konnten für zwei Wochen keine Messwerte aufgenommen werden, da das Mastermodul durch Unachtsamkeit bei der Bauausführung zerstört wurde (Bild 12) und zunächst ein Ersatzgerät gefertigt werden musste.



**Bild 12:** Zerstörter Master auf Microcontrollerbasis

Neben der Verformung des Druckübertragungsmittels werden zusätzlich die Lageänderungen der Messdosen mit Hilfe eines XYZ-Beschleunigungssensors gemessen (Bezugswert Erdbeschleunigung). Die Messwerte des Sensors um die Y- und Z-Achse werden in Drehwinkel umgerechnet. Hiermit kann die Verrollung und der Kippwinkel in der Rohrverbindung ermittelt werden. Der X-Wert wird bei dieser Anwendung nicht verwendet. Außerdem wurden die Temperatur und die Versorgungsspannung kontinuierlich aufgezeichnet.

Bild 13 zeigt exemplarisch die aufgezeichneten Messwerte der Dose MD 5.

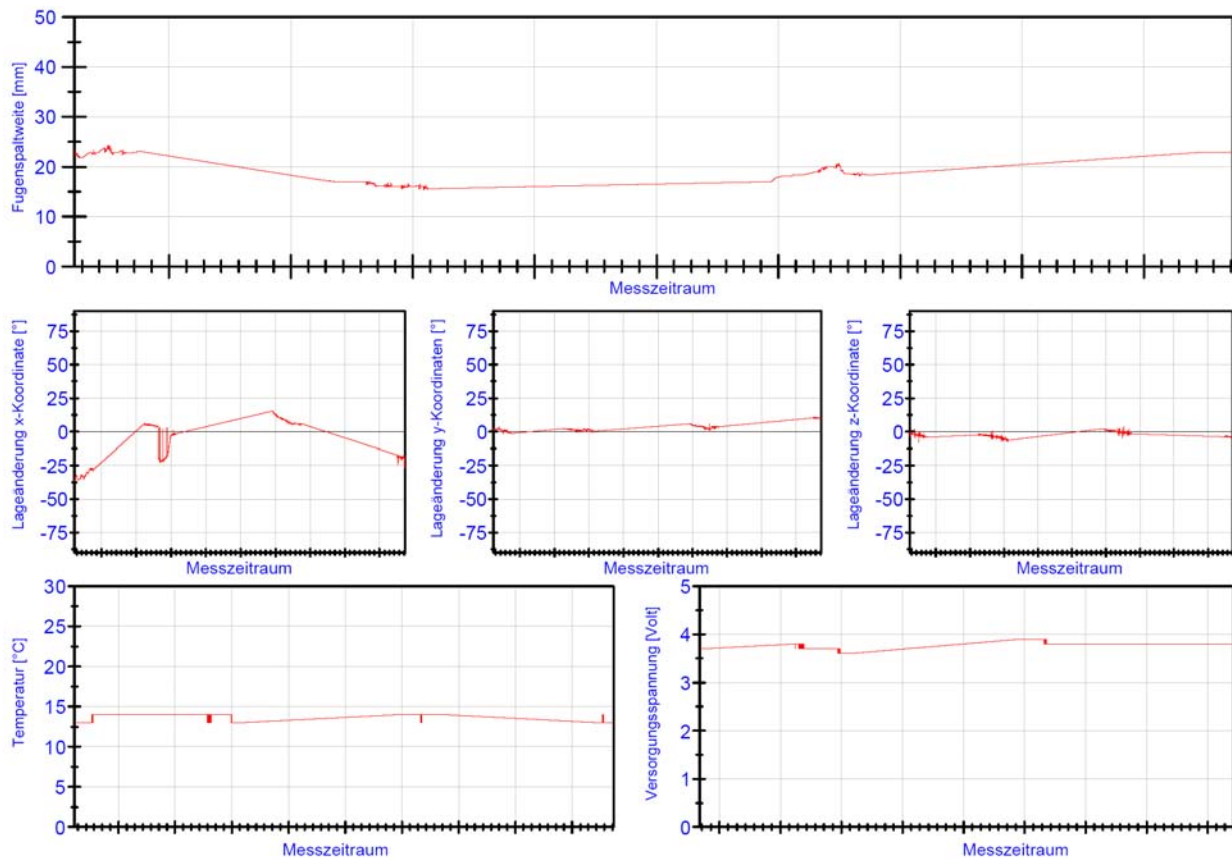
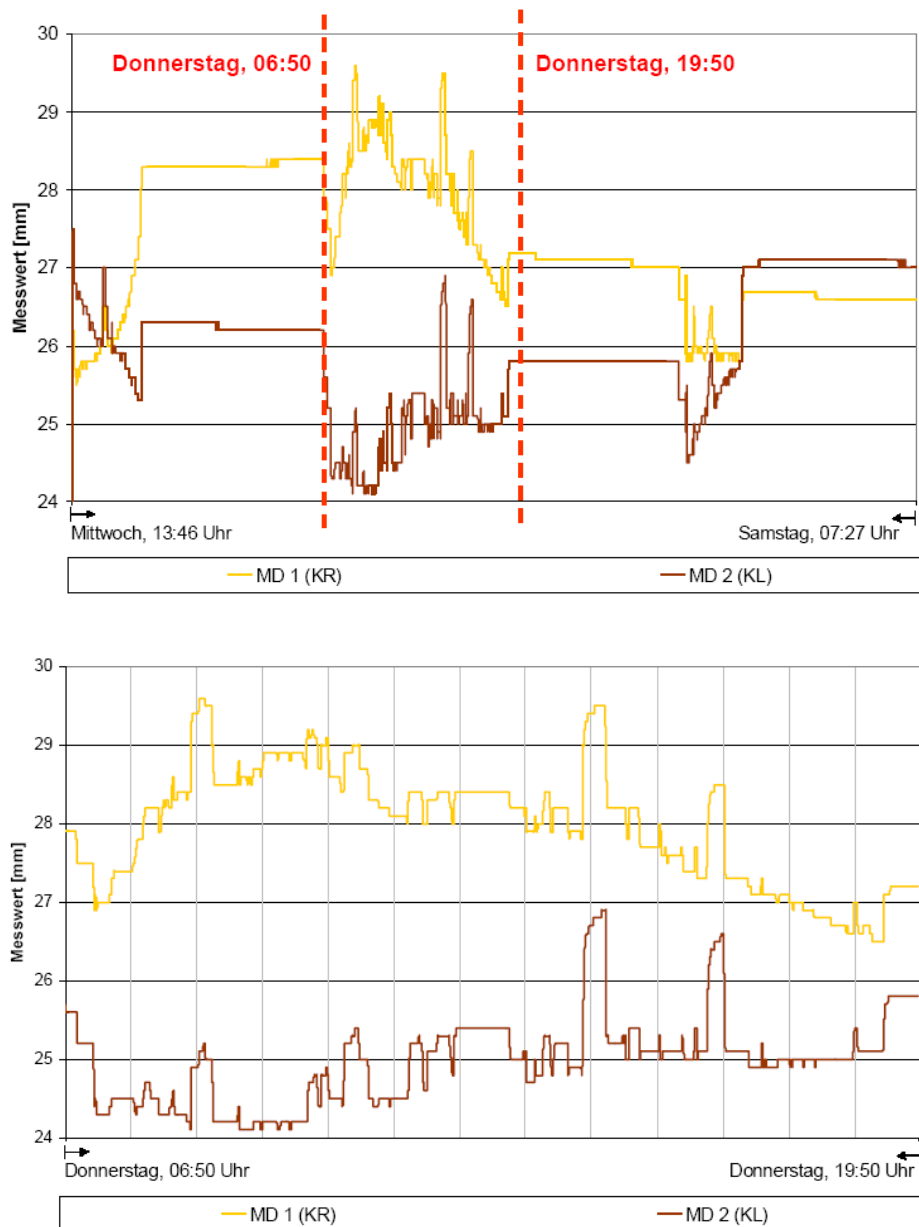


Bild 13: Messwerte der Verformungsmessdose MD 5

Bild 14 zeigt beispielhaft die gemessenen Fugenspaltweiten in den Kämpfern einer Rohrverbindung in einem geraden Trassenabschnitt. Es ist zu erkennen, dass die Messwerte eine gegenläufige Tendenz zeigen. Die geraden Abschnitte entsprechen den Stillstandszeiten in den Nachtstunden. Die lokalen Maxima kennzeichnen Zeiten, in denen der Rohrstrang z.B. für einen Rohrwechsel entlastet wurde.





**Bild 14:** Beispielhafte Auswertung der Ergebnisse der Messdosen MD 1 und MD 2

Insgesamt wurden zu 9 Zeitpunkten jeweils sämtliche Fugenspalte der Rohrverbindungen entsprechend dem jeweiligen Baufortschritt von Hand vermessen. Das Spaltmaß wurde in jeder Fuge in den Rohrkämpfern und dem Rohrscheitel mit einem speziellen elektronischen Innentaster aufgenommen (Bild 15). Die Messungen wurden jeweils am Freitag nach Arbeitsende der ausführenden Baufirma durchgeführt. Die Vermessung der Endlage (vgl. Bild 16, Messung 9) erfolgte nach dem Ausbau der Zwischenpresstationen.



Bild 15: Fugenspaltmessung mit elektronischem Innentaster

Bild 16 zeigt die Auswertung der Fugenspaltmessungen. Dargestellt sind die aus den gemessenen Fugenspaltweiten berechneten Winkel zwischen den einzelnen Rohren. Neben diesen berechneten Winkeln sind auch die entsprechend der Trassenplanung bzw. Rohrstatik vorgegebenen Winkel dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Rohre dem durch die Vortriebsmaschine vorgegebenen Trassenverlauf folgen. Ein sogenanntes „Einschleifen“ der Trasse ist nicht zu erkennen.

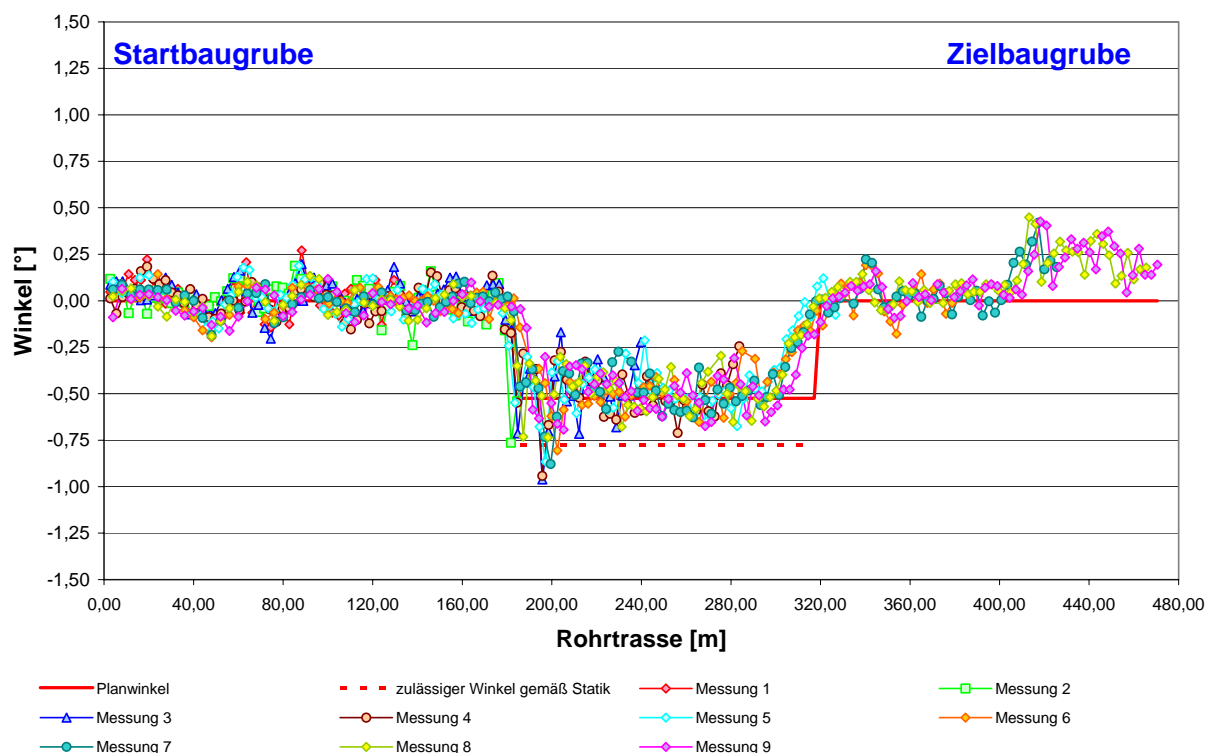


Bild 16: Auswertung aufeinanderfolgender Fugenspaltmessungen

Auf Basis dieser Handmessungen konnte festgestellt werden, dass die Messdaten der Messdosen keine verlässlichen Messwerte lieferten. Die Ursache für diese Abweichungen vom Istwert waren jedoch zunächst unklar. Zur Ermittlung der Ursache wurden ei-

nige Messdosen ausgebaut und im Labor getestet. Es konnte festgestellt werden, dass die hohe Luftfeuchtigkeit innerhalb des Rohrstranges für diese Abweichungen verantwortlich war. Bild 17 zeigt das Kondensat innerhalb des Rohrstranges, welches infolge der sehr hohen Luftfeuchtigkeit auftrat.



*Bild 17: Kondensat innerhalb des Rohrstranges*

Demzufolge konnten die Messwerte der Verformungsmessdosen nicht für die Auswertung der Fugenspaltmaße verwendet werden. Für die erforderliche Qualitätssicherung des Vortriebs wurden stattdessen weitere Einzelmessungen aller Fugenspaltmaße durchgeführt. Zudem stellte sich bei fortgeschrittenem Vortrieb heraus, dass ein einzelner „Repeater“ zum Datentransport in die Startbaugrube nicht ausreichte.

Als Ergebnis des Praxiseinsatzes blieb also festzuhalten, dass eine Modifikation der Messdosen bezüglich des Einflusses der Luftfeuchtigkeit und weitere Überlegungen bezüglich der Funkübertragung im Rohrstrang notwendig waren.

### **3.4 Modifikation der Messdosen**

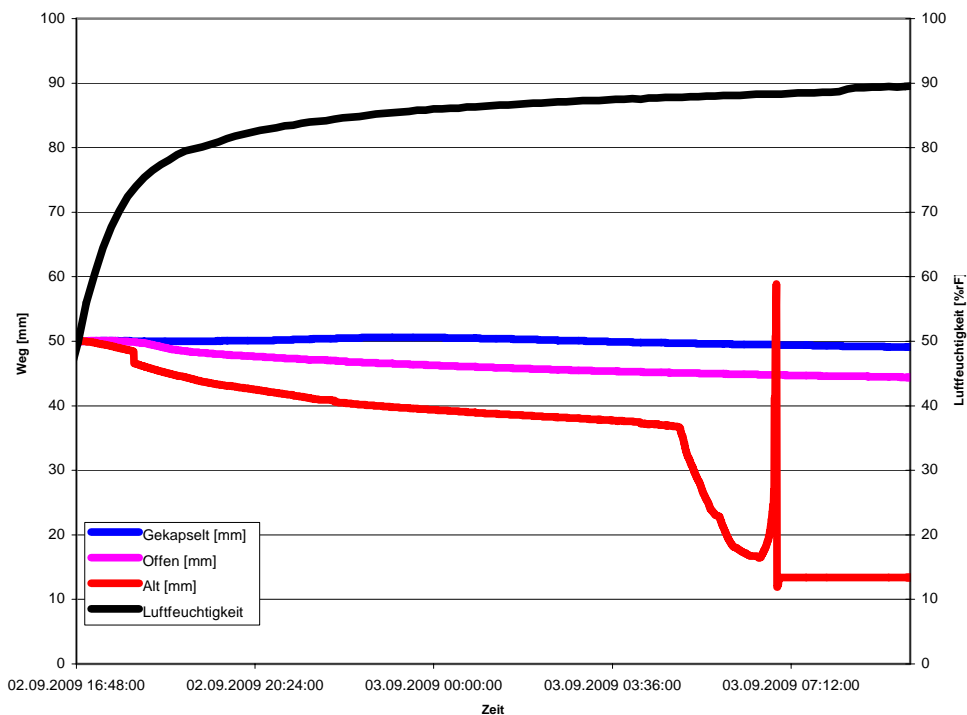
#### Luftfeuchtigkeit

Nachdem feststand, dass die Luftfeuchtigkeit im Rohrstrang zu erheblichen Abweichungen bei den Messwerten führte, wurde zunächst eine der verwendeten Messdosen einer definierten Luftfeuchtigkeit ausgesetzt, um auf dieser Basis Kalibrierwerte zu erhalten. Es zeigte sich, dass bei dieser Bauart keine Beziehung zwischen Luftfeuchtigkeit und Messwert abzuleiten war. Es kam zu Unregelmäßigkeiten bei den Messwerten, welche nicht nachvollziehbar waren. Daraufhin wurden zwei modifizierte Messdosen angefertigt. Zum einen eine komplett gekapselte Version, welche den Austausch des Messraumes mit der Außenluft unmöglich machte und zum anderen eine offene Version, welche für eine gute Belüftung des Messraumes sorgte. Zudem wurde die Elektronik zusätzlich mit einem Feuchtesensor ausgestattet, um erforderlichenfalls über diese Werte eine Kalibrierung der gemessenen Fugenspaltweite vorzunehmen. Bild 18 zeigt die unterschiedlichen Prototypen.



**Bild 18** Darstellung der unterschiedlichen Prototypen: Ursprungsversion (links), Gekapselte Version (mitte) und Offene Version (rechts)

Durchgeführte Messungen ergaben, dass erwartungsgemäß die Ursprungsversion keine Korrelation zwischen Messwert und Luftfeuchtigkeit erkennen ließ. Die komplett gekapselte Variante dagegen zeigt keinen Einfluss durch die sich ändernde Umgebungsbedingung. Die offene Variante zeigt bis zu einer Luftfeuchtigkeit von 90% eine quantifizierbare Abhängigkeit, so dass hier eine Kalibrierung über Korrekturfaktoren möglich erscheint. Ein Beispiel für diese Untersuchungsergebnisse ist im Bild 19 dargestellt.



**Bild 19** Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Messwerte unterschiedlicher Messdosen bei einem Sollwert von 50mm

Es bleibt also festzuhalten, dass die preisgünstig herzustellende offene Version der Messdose bis zu einer Luftfeuchtigkeit von ca. 90% zuverlässige Messdaten liefern kann. Über 90% muss die sehr aufwändig herzustellende geschlossene Version zur Anwendung kommen.

### Reichweite

Da das ursprünglich gewählte Funkübertragungssystem lediglich den Einsatz eines einzigen Repeaters zur Vergrößerung der Reichweite zuließ, wurde für die Modifikation

des Systems auf „ZigBit“-Module [5] zurückgegriffen. Diese Module basieren auf einem IEEE 802.15.4/ZigBee Funkmodul mit integriertem Verstärker. Diese Modullösung bietet eine optimale Kombination zwischen einer hohen Reichweite in Verbindung mit einer geringen Stromaufnahme für lange Batteriestandzeiten. Das „ZigBit“-Modul erlaubt die Verwendung von beliebig vielen Repeatern, was den Einsatz bei nahezu beliebig langen Rohrvortrieben möglich macht. Der Test eines solchen Systems im Rohrstrang erforderte bei 300m Funkstrecke gerade mal einen Repeater. Im ungünstigsten Fall mit mehreren Kurven und verschiedenen Einbauten im Rohrstrang ist mit einer Reichweite von etwa 100m zu rechnen.

### Elektronik

Die eingesetzte Elektronik wurde durch den Einsatz neuartiger Funkmodule und die Erweiterung des Messprogramms um die Feuchtigkeitsmessung modifiziert. Zudem konnten neuartige Bauteile verwendet werden, welche eine erhebliche Verkleinerung der Platine ermöglichten. Rechts im Bild 20 ist die auf der Rückseite des Messfeldes untergebrachte, modifizierte Elektronik der Messdose zu sehen.



*Bild 20 Elektronik im Vergleich:  
Prototyp (links) und platzsparende Modifikation (rechts)*

## **3.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen**

### Grundlagen

Eine Maßnahme, die geeignet ist, ein vorgegebenes Ziel mit minimalem Aufwand zu erreichen, ist wirtschaftlich. Mithin sind im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sowohl Leistungen (Zielbeiträge) als auch Kosten alternativer Maßnahmen zu berücksichtigen. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Systeme zur Qualitätssicherung beim Rohrvortrieb beginnt mit einem Abgleich der Leistungsfähigkeit. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Kosten. Eine zusammenfassende Gesamtaussage zur Wirtschaftlichkeit wird dann abschließend getroffen.

### Leistung

Beim Rohrvortrieb können in Abhängigkeit von der Krafteinleitung Schäden an Vortriebsrohren auftreten. Bauschäden können Undichtigkeiten oder ein komplettes Versa-



gen der Vortriebsrohre nach sich ziehen. Die in diesen Fällen erforderlichen Maßnahmen zur Wiederherstellung nehmen in hohem Maße Zeit und Kosten in Anspruch.

Zur Qualitätssicherung werden die auf Vortriebsrohre wirkenden Kräfte indirekt durch eine kontinuierliche Vermessung der Fugenspaltweiten überwacht. Hierfür stehen unterschiedliche Systeme zur Auswahl, die sich im Hinblick auf die eingesetzte Technik zur Datengewinnung und des Datentransfers unterscheiden: Wegaufnehmer und Datenkabel einerseits sowie Verformungsmessdose und Funkübertragung andererseits.

Die vom IKT begleiteten Fugenspaltmessungen im Rahmen einer Rohrvortriebsmaßnahme haben gezeigt, dass ein Messdosen-Funkübertragungssystem ebenso wie ein System aus Wegaufnehmern und Datenkabeln geeignet ist, die Verformungen des Druckübertragungsmittels direkt und somit indirekt die auf die Vortriebsrohre einwirkenden Kräfte zuverlässig zu messen und den Vortrieb entsprechend zu steuern. Das Ziel, Bauschäden und die mitunter gravierenden Kosten und Umweltschäden zu vermeiden, kann durch beide Systeme in annähernd gleicher Weise erreicht werden.

Allerdings werden bei der Qualitätssicherung mittels Wegaufnehmer und Datenkabel "Nebenwirkungen" in Kauf genommen, die bei Messdosen in Verbindung mit Funkübertragung weitgehend entfallen:

- Die Montage der Wegaufnehmer führt zu einer kontrollierten Schädigung der Rohre.
- Wegaufnehmer führen zu einer Einengung des lichten Querschnittes bzw. des Arbeitsraumes.
- Die Montage der Wegaufnehmern ist zeitintensiv.
- Das An- und Abkoppeln der Verkabelung bei jedem Rohrwechsel ist fehleranfällig und führt zu Verzögerungen auf der Baustelle.
- Die Demontage der Wegaufnehmer und der Verkabelung sind zeitintensiv.

### Kosten

Wie die vorliegende Untersuchung zeigt, lässt sich das Qualitätssicherungsziel beim Rohrvortrieb durch die Kombination von Messdose und Funkübertragung in gleicher Weise erreichen wie durch Wegaufnehmer und Datenkabel. Darüber hinaus lassen sich die Nachteile der bislang vorherrschenden Systeme durch den Einsatz von Messdosen in Verbindung mit Funkübertragung nahezu vollständig vermeiden. Nachfolgend werden die Kosten der beiden Systeme vergleichend dargestellt.

Berücksichtigt werden Anschaffungs- und Herstellungskosten für die jeweiligen messtechnischen Systeme sowie die Kosten für die Montage, den Betrieb und die Demontage der Systeme. Ausgestattet mit Messtechnik werden 3 Rohrfugen mit jeweils 3 Messpunkten. Die Entfernung der Messfugen zur Startbaugrube beträgt maximal 380m, die Vortriebslänge insgesamt beträgt 480m. Tabelle 1 gibt Auskunft über die berücksichtigten Kostenpositionen.

**Tabelle 1 Kostenpositionen der unterschiedlichen Messsysteme**

<b>Kostenpositionen</b>	<b>Messdose mit Funkübertragung</b>	<b>Wegaufnehmer mit Datenkabel</b>
Messtechnik (Anschaffungs- und Herstellungskosten)	9 Messdosen mit Funkmodul 1 Master zur Messwerterfassung 3 Repeater zur Reichweitenvergrößerung 1 Übergabemodul an PC Montage und Konfiguration (100h Techniker)	9 Seilwegaufnehmer Montagematerial 400m Messkabel 1 Datenrekorder 38 Steckverbinder für Messkabel 3 Vorrichtungen zum Verrollungsschutz Montage und Konfiguration (24h Techniker)
Montage, Betrieb, Demontage	Einbau (8h Elektroingenieur) Ausbau (2h Elektroingenieur) Einbau der Repeater (3h Elektroingenieur)	Einbau (16h Techniker) Ausbau, Verschließen der Bohrlöcher (8h Techniker) Herstellen und lösen von 130 Steckverbindungen (22h Techniker)

Die Anschaffungs- und Herstellungskosten für die Alternative "Messdose mit Funkübertragung" liegen im hier betrachteten Beispiel um etwa 12% unter den Anschaffungs- und Herstellungskosten für Wegaufnehmer mit Datenkabel.

Noch deutlicher sind die Kostenunterschiede für Montage, Betrieb und Demontage: Hier liegt der Kostenvorteil der Messdose mit Funkübertragung bei rund 53 % gegenüber dem System Wegaufnehmern mit Datenkabel. Dabei wurde berücksichtigt, dass Ein- und Ausbau der Messdosen von Elektroingenieuren vorgenommen werden, bei den Wegaufnehmern kommen hingegen Techniker zum Einsatz. Dem Kostenvergleich liegt ein Tagessatz für Elektroingenieure zugrunde, der um 65 % über dem Tagessatz für Techniker liegt.

Da die Anschaffungs- und Herstellungskosten über den Zeitraum der erwarteten Nutzungsdauer in Form von Abschreibungen in den Kostenrechnungen Niederschlag finden, sind die Standzeiten der Messsysteme (hier: Anzahl der erwarteten Einsätze) in die Betrachtung einzubeziehen.

Zwar liegen Erfahrungswerte für die Standzeiten des Systems Messdose und Funkübertragung noch nicht vor, jedoch lässt bereits der Kostenvergleich in Abhängigkeit von der Anzahl der Einsätze der Systeme eine eindeutige Aussage zur Wirtschaftlichkeit zu.

Bild 21 weist die normierten Kosten je Messeinsatz für alternative Standzeiten aus. Jeder Punkt auf der Kurve weist den Messsystemen für alternative Standzeiten die zugehörigen normierten Kosten zu. Bei lediglich 1 Einsatz betragen die normierten Kosten der Alternative "Wegaufnehmer mit Datenkabel" 100, die normierten Kosten für Messdose mit Funkübertragung liegen hier bereits unter 80.

Die Kostenkurven weisen bei zunehmender Standzeit einen fallenden Verlauf auf, weil sich die anteiligen Abschreibungen auf eine größere Anzahl von Einsätzen verteilen. Deutlich sichtbar ist die höhere Kostenintensität der Wegaufnehmer mit Datenkabel.

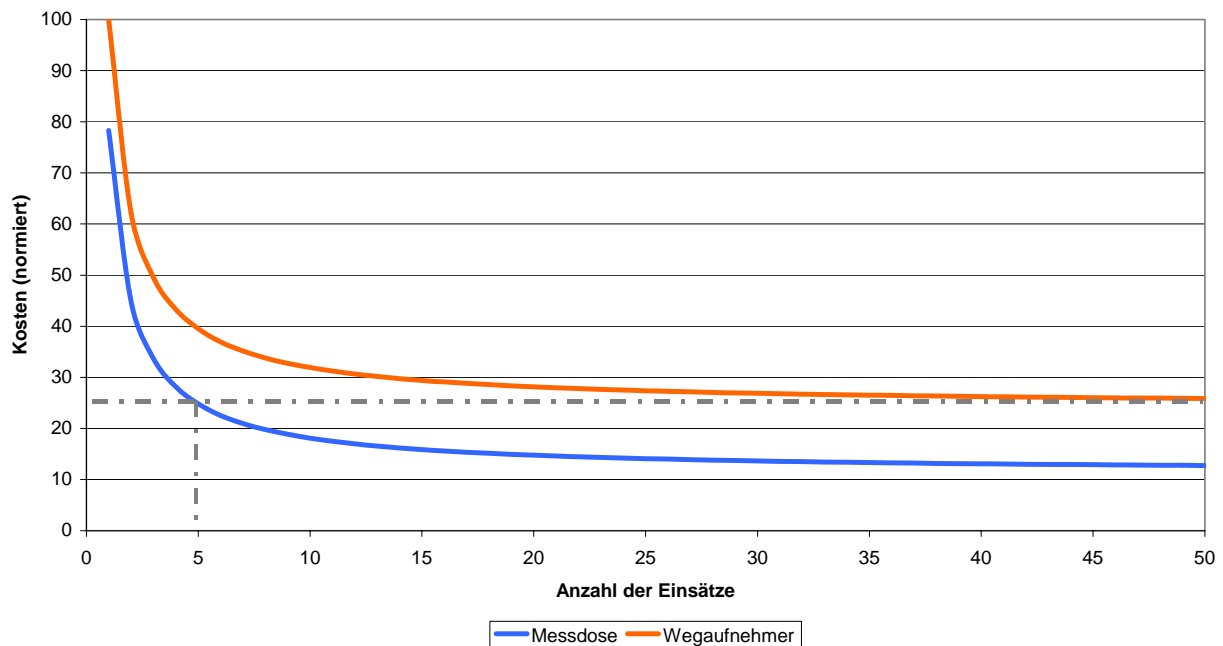


Bild 21 Messdosen vs. Wegaufnehmer - Kostenvergleich in Abhängigkeit der Anzahl der Einsätze (Standzeit)

Bild 21 zeigt ferner parallel zur Abszisse eine gepunktete Linie. Diese verdeutlicht die Kosten je Messung, die bei Wegaufnehmern mit Datenkabel bei einer Standzeit mit 5 Messeinsätzen zu erwarten sind – eine weitere Erhöhung der Standzeiten ist nur noch mit einer marginalen Verminderung der Kosten verbunden. Nun lässt sich aus der Grafik ablesen, dass die Alternative Messdose mit Funkübertragung diese minimalen Kosten der Alternative "Wegaufnehmer mit Datenkabel" bereits bei 5 Messeinsätzen unterschreitet. Damit ist das Kostenrisiko, das in Abhängigkeit von Standzeiten auftreten kann, ausgesprochen gering, zumal es keine Anhaltspunkte dafür gibt, dass Messdosen geringere Standzeiten aufweisen als Wegaufnehmer.

Vielmehr ist die Messung mittels Wegaufnehmer und Datenkabel risikobehaftet, wenn Stillstand und Ausfallzeiten aufgrund der Fehleranfälligkeit dieser Technik berücksichtigt werden.

Fazit

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Einsatzes von Messdosen in Verbindung mit Funkübertragung im Vergleich zur derzeit noch herkömmlichen Technik der Wegaufnehmer mit Datenkabeln lässt für den vorliegenden Fall ein eindeutiges Fazit zu: Messdosen mit Funkübertragung eignen sich zur kontinuierlichen Fugenvermessung zur Qualitätssicherung im Rohrvortrieb. Der Einsatz von Messdosen mit Funkübertragung hat zudem deutlich geringeren Einfluss auf die Vortriebsarbeiten. Schlussendlich kann insgesamt konstatiert werden, dass in dem hier betrachteten Fall Messdosen aufgrund der vergleichsweise geringeren Kosten wirtschaftlich zur Qualitätssicherung eingesetzt werden können. Überschlägig ist zu erwarten, dass sich die Kosten für die Qualitätssicherung durch den Einsatz von Messdosen mit Funkübertragung in etwa halbieren lassen.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenüber der Neuverlegung von Kanalrohren in offener Bauweise, die wegen ihres Eingriffs in die Geländeoberfläche gerade in innerstädtischen Gebieten zu erheblichen Behinderungen führt, bieten Verfahren der geschlossenen Bauweise erhebliche Vorteile. Vornehmlich kommen im begehbaren Nennweitenbereich Stahlbetonrohre zum Einsatz. Trotz des Einsatzes modernster Maschinen- und Steuertechnik und normenge-rechter Bemessung der Rohre kommt es beim Einbau immer wieder zu Schäden, die sich bei Stahlbetonrohren in Form von Rissen oder Abplatzungen an der Betonoberflä- che ausbilden. Die Ursache für solche Schäden sind häufig Überbelastungen der Vor- tribsrohre durch ungleichmäßige Krafteinleitung über die Druckübertragungsringe in- folge von Steuerbewegungen. Nicht selten übersteigen diese Spannungen die zulässig- en Festigkeiten der Rohrmaterialien und verursachen Schäden, die nur sehr mühsam oder gar nicht zu beheben sind. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit der Kenntnis der Ver- formung des Druckübertragungsmittels während des Vortriebs, weil hierüber auf die Belastung der Rohre geschlossen und Schäden vermieden werden können.

Derzeit verfügbare Systeme zur kontinuierlichen Vermessung der Fugenspaltweiten werden an der Rohrinneenseite montiert und engen somit wesentlich den lichten Quer- schnitt bzw. den Arbeitsraum ein. Zudem werden bei diesen Systemen die Messwerte via Kabel „über Tage“ befördert. Dies führt durch das erforderliche Ab- und Ankoppeln zu Verzögerungen beim Einbau der Vortriebsrohre in der Startbaugrube. Auch ist die Montage der Wegaufnehmer mit Bohren und Verdübeln recht aufwändig, die Bohrlöcher schädigen die Rohrwand und es sind Vorrichtungen anzubringen, welche ein gegensei- tiges Verrollen der Rohre verhindern.

Ziel dieses Projektes war die Entwicklung eines Systems, welches die Verformungen des Druckübertragungsmittels und somit die Belastung der Rohre bei minimaler Beein- flussung des Bauablaufs erfasst, entsprechende Daten speichert und diese gegebenen- falls zur Weiterverarbeitung an ein Berechnungsprogramm übergibt. Zudem sollen die Kosten für eine derartige Überwachung durch eine Reduktion des Aufwandes beim Ein- bau der Messdosen und durch geringeren Folgeaufwand beim Rohrwechsel reduziert werden.

Hierfür wurden bereits entwickelte Prototypen an die Praxisbedingungen vor Ort ange- passt und das Gesamtsystem inklusive Funkübertragung der Messdaten im Rahmen eines realen Vortriebs von Stahlbetonrohren der Nennweite DN 1800 erprobt.

Der Praxiseinsatz zeigte, dass das verwendete Messsystem bezüglich des Einflusses der Luftfeuchtigkeit im Rohrstrang und hinsichtlich der Reichweite der Funkübertragung modifiziert werden musste. Erste Modifikationen wurden im Rahmen des Projektes be- reits umgesetzt und zwei Varianten der Messdosen im Labormaßstab erprobt. Somit liegt nun ein Messsystem vor, welches zur kontinuierlichen Fugenvermessung bei Rohrvortrieben einsetzbar erscheint.

Offen ist lediglich, welche der beiden entwickelten Alternativen im Einzelfall besser für die Messaufgabe im Vortriebsrohr geeignet ist. Dies sollte künftig im Rahmen weiterer

Pilotbaumaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung der Feuchtigkeitsverhältnisse geklärt werden. Hier sollten dann mehrere Fugen mit den unterschiedlichen Messdosen bestückt und die Messdatensicherheit unter den vorliegenden Randbedingungen im Vortriebsrohr bewertet werden.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Einsatzes von Messdosen in Verbindung mit Funkübertragung im Vergleich zur derzeit noch herkömmlichen Technik der Wegaufnahme mit Datenkabeln zeigt, dass in dem hier betrachteten Fall Messdosen aufgrund der vergleichsweise geringeren Kosten wirtschaftlich zur Qualitätssicherung eingesetzt werden können. Überschlägig ist zu erwarten, dass sich die Kosten für Fugenvermessungen im Rahmen der Qualitätssicherung durch den Einsatz von Messdosen mit Funkübertragung in etwa halbieren lassen.

## 5 Publikationen und Verbreitung der Ergebnisse

Eine Verbreitung der gewonnenen Ergebnisse ist folgendermaßen möglich:

- Mit der Zeitschrift „3R - International“ wurde bereits abgestimmt, dass die vorliegenden Ergebnisse dort Ende 2009 veröffentlicht werden können. Die Ausarbeitung dieses Artikels erfolgt, sobald eine Freigabe dieses Abschlussberichts durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt vorliegt.
- Der IKT-eNewsletter informiert monatlich über Aktivitäten und Forschungsergebnisse des IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen und wird an etwa 14.500 Netzbetreiber und Ingenieurbüros in ganz Deutschland versendet. Hier kann noch in diesem Jahr eine entsprechende Veröffentlichung der Ergebnisse geschaltet werden. Die Ausarbeitung dieses Beitrags erfolgt, sobald eine Freigabe dieses Abschlussberichts durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt vorliegt.

## 6 Literatur

- [1] Arbeitsblatt A 125: Rohrvortrieb und verwandte Verfahren, Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Entwurf, Februar 2007.
- [2] Diedrich, A.; Bohle, U.: Vortriebsbegleitenden Pressenkraftüberwachung – Aktuelle Praxiserfahrungen. Bi UmweltBau 6/07.
- [3] Liebscher, M.; Redmann, A.; Bersuck, F.: Qualitätssicherung beim Rohrvortrieb. Bi UmweltBau 4/08.
- [4] „Easy-Radio“ Technologie. Low Power Radio Solutions Ltd. Informationen unter: [www.lprs.co.uk](http://www.lprs.co.uk)
- [5] Weitere Informationen der „ZigBee-Alliance“ unter: [www.zigbee.org](http://www.zigbee.org)