

Ausführende Stelle:

Lehrstuhl für Baubetrieb und Projektmanagement ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb Univ.- Professor Dr.- Ing. Rainard Osebold

# Abschlussbericht

Thema:	Erfassung, Analyse und Vermeidung
	von geometrischen Imperfektionen
	bei Vortriebsrohren

**RWTH Aachen** 

Lehrstuhl für Baubetrieb und Projektmanagement ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb Mies-van-der-Rohe-Straße 1 52074 Aachen

Auftraggeber:Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft<br/>und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen<br/>Schwannstraße 3<br/>40476 Düsseldorf

Aachen, im September 2008

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainard Osebold

# INHALT

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Gliederung des Berichtes	5
2	Grundlagen der Qualitätssicherung und Stand der Technik	7
3	Messtechniken zur Untersuchung geometrischer Imperfektionen	11
3.1	3D-Laser-Scanner	11
3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.1.6 3.1.7	DeltaSphere Faro Konica - Minolta Leica Riegl Trimble Zoller + Fröhlich	11 12 12 13 13 13 14
3.2	Laser-Tracker	14
3.2.1 3.2.2 3.2.3	API Faro Leica Geosystems	15 16 16
4	Untersuchungen in-situ	19
4.1.1 4.1.2	3D-Laser-Scanner Laser-Tracker	19 24
4.2	Resumé	29
5	Entwicklung einer eigenen Messtechnik	30
5.1	Zielsetzung der Entwicklung	30
5.2	Beschreibung der entwickelten Messtechnik	30
5.3	Praxiserprobung	35
5.3.1 5.3.2 5.3.3	Auswertung der Imperfektionen Überprüfung der Vermessungsergebnisse Vermeidung von Imperfektionen bei der Rohrherstellung	36 37 40
5.3.4	Auswirkungen auf die Kontaktflächen der Rohre	41

Optimierter "Rohrverlegeplan"	42
Option 1: Drehung der Rohre um die Längsachse	42
Option 2: Änderung der Reihenfolge der Rohre.	42
Option 3: Drehung der Rohre und Änderung der Reihenfolge möglich	43
Beispiel-Optimierung	43
Zusammenfassung und Ausblick	45
Zusammenfassung	45
Ausblick	46
irverzeichnis	47
	49
	Optimierter "Rohrverlegeplan" Option 1: Drehung der Rohre um die Längsachse Option 2: Änderung der Reihenfolge der Rohre Option 3: Drehung der Rohre und Änderung der Reihenfolge möglich Beispiel-Optimierung Zusammenfassung und Ausblick Ausblick

## 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Verlegung von Abwasserkanälen ist auch in Zukunft eine wesentliche Aufgabe der Netzbetreiber in Kommunen und der Abwasserverbände. Abwasserkanäle werden heute statt in offener Bauweise immer häufiger unterirdisch verlegt.

Da die Gebühren der Abwasserbeseitigung zum großen Teil aus den Kosten für die Abwasserableitung, d.h. der Abschreibung und Verzinsung des Kanalnetzes, resultieren, kommt einer langen Lebensdauer der Kanalrohre eine hohe Bedeutung zu. Es werden daher vielfältige Anstrengungen unternommen, die Qualität der Vortriebsrohre bei der Herstellung und beim Einbau sicherzustellen.

Trotz normenkonformer Dimensionierung der Vortriebsrohre treten zuweilen Schäden in Form von Abplatzungen an den Rohrspiegeln oder Rissen in Rohrlängsrichtung auf. Schon geringe Abplatzungen im Bereich der Dichtung an der Außenkante der Rohrspiegel, den Stirnflächen der Rohre, können die Dichtwirkung beeinträchtigen. Größere Abplatzungen auf der Außenseite der Vortriebsrohre können dazu führen, dass die Bewehrung freiliegt und nicht mehr durch eine Betonüberdeckung vor Korrosion geschützt ist. Dies hat zur Folge, dass sobald zum Beispiel die Rohrschäden durch eintretendes Grundwasser erkannt werden, diese saniert werden müssen. Sollte dies nicht geschehen, kommt es zu einem vorzeitigen statischen Versagen der betroffenen Rohre. Da diese Schäden nach Abschluss der Vortriebsarbeiten nicht ohne weiteres feststellbar sind, kommen auf den Betreiber in der Nutzungsphase vorzeitig hohe Kosten zu.

Zumeist sind diese Schäden Folge einer Überbelastung der Rohre, die seltener durch eine Überschreitung der zulässigen Vorpresskraft, sondern durch eine partielle Überbeanspruchung hervorgerufen wird. Ursächlich hierfür kann eine zu starke Verwinkelung der Vortriebsrohre sein. Der Grund kann aber auch in Unebenheiten innerhalb des Rohrspiegels und in einer Abweichung von der Rechtwinkligkeit des Rohrspiegels liegen. Diese Ursachen werden im Weiteren als geometrische Imperfektionen oder kurz Imperfektionen bezeichnet.

Die Rohrspiegel sind von besonderer Bedeutung für die Übertragung der Vortriebskräfte. Ein zwischen den Rohrspiegeln angebrachter Druckübertragungsring (Fugenzwischenlage) hat die Aufgabe, kleinere Imperfektionen in den Rohrspiegeln auszugleichen und somit eine möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung zu ermöglichen. Weiterhin soll bei einer Verwinkelung der Rohre durch ein Verformen des Druckübertragungsringes eine möglichst große Druckübertragungsfläche erhalten bleiben, um Spannungskonzentrationen zu vermeiden. Die Fähigkeit des Druckübertragungsringes, durch Verformungen die zuvor erläuterten Aufgaben zu übernehmen, nimmt über die Vortriebsstrecke ab, da mit zunehmender Belastung eine Verfestigung der Fugenzwischenlage eintritt. Die Druckübertragungsringe müssen daher so gewählt werden, dass ihre Funktionsfähigkeit über die gesamte Vortriebsstrecke gewährleistet ist. Als Einflussparameter werden dabei neben der Vortriebslänge der Trassenverlauf, die Vorpresskraft und die Wandstärke der Vortriebsrohre berücksichtigt. Imperfektionen des Rohrspiegels werden nur insofern einbezogen, dass sie normativ auf einen Maximalwert begrenzt sind.

Voruntersuchungen des "ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb" an Vortriebsrohren DN 2500 haben gezeigt, dass vor allem an den Spitzenden teilweise deutliche Imperfektionen auftraten (Abbildung 1).



Abbildung 1: Imperfektionen an Rohrspiegeln DN 2500

Liegen die Hochpunkte solcher Imperfektionen im Innenradius einer planmäßig oder durch Korrektursteuerung unplanmäßig gekrümmten Rohrtrasse, können sie zu einer lokalen Extrembelastung der Rohrspiegelflächen führen. In diesem Fall ist mit Schäden an den Rohren zu rechnen, auch wenn die zulässige Vorpresskraft und Verwinkelung nicht überschritten werden.

Um die Auswirkungen geometrischer Imperfektionen zu verdeutlichen, wurden beispielhaft FE-Berechnungen durchgeführt. Hierbei wurde ein Betonvortriebsrohr DN 2500 mit einem Außendurchmesser von 3000 mm zu Grunde gelegt. Als Belastung wurde eine Vorpresskraft von 11.000 kN gewählt. Dieser Wert entspricht der maximal zulässigen Vorpresskraft in einem vom "ibb" begleiteten Rohrvortrieb, in dem auch die für die Berechnung angenommenen Rohre verwendet wurden. Weiterhin wird bei allen folgenden Berechnungen eine Verwinkelung von 0,2° der Rohre zueinander angenommen, wie sie in der Praxis häufig auftritt. Der Innenradius der Verwinkelung liegt bei allen Berechnungsbeispielen in der Rohrsohle. In der

folgenden Tabelle sind die angenommenen Eingangsgrößen für die drei Berechnungsbeispiele mit der Finite-Elemente-Methode kurz dargestellt.

	Berechnungsbeispiel 1	Berechnungsbeispiel 2	Berechnungsbeispiel 3
Rohr	Beton DN 2500	Beton DN 2500	Beton DN 2500
	d <sub>a</sub> 3000	d <sub>a</sub> 3000	d <sub>a</sub> 3000
Geometrische		Dollo im Boroich dor Soblo	Delle im Bereich des
Imperfektion	Keine	(Sebernal)	linken Kämpfers
		(Schemar)	(Schema 2)
Verwinkelung	0,2°,	0,2°,	0,2°,
	Innenradius in der Sohle	Innenradius in der Sohle	Innenradius in der Sohle
Vorpresskraft	11.000 kN	11.000 kN	11.000 kN

Tabelle 1: Eingangswerte für die FE-Simulation



Abbildung 2: Anordnung der Imperfektionen

Abbildung 3 zeigt die auftretenden Druckspannungen bei einem idealen Rohrspiegel, also ohne jegliche geometrische Imperfektionen. Deutlich zu erkennen ist die klaffende Fuge im Bereich des Scheitels. Die maximal auftretende Druckspannung beträgt 30 N/mm<sup>2</sup> und liegt in der Sohle.

Für das zweite Berechnungsbeispiel wurde eine nach außen gewölbte Delle mit einer maximalen Höhe von 8 mm in ihrer Mitte angenommen (Variante 1). Diese Abweichungen vom Ideal-Rohrspiegel liegen für die hier berechneten Vortriebsrohre DN 2500 noch innerhalb der nach ATV-A 125<sup>1</sup> zulässigen Toleranzen. Die Lage der Imperfektionen ist so gewählt worden, dass ihr Maximum mit dem Innenradius der Verwinkelung zusammenfällt und damit die ungünstigste Konstellation berechnet wird.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., ATV-A 125, 1996.



Abbildung 3 Druckspannungsverteilung bei idealem Rohrspiegel

Die Ergebnisse der Druckspannungsverteilung aus dem zweiten Berechnungsbeispiel sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Druckübertragende Fläche ist deutlich kleiner als im ersten Berechnungsbeispiel und die maximale Druckspannung ist mit 58 N/mm<sup>2</sup> nahezu doppelt so groß.



Abbildung 4: Druckspannungsverteilung bei einer Delle (8mm) in der Sohle

Um aufzuzeigen, welche Vorteile die Kenntnis über das Ausmaß und die Lage der Imperfektionen im Rohrspiegel mit sich bringt, ist die dritte Berechnung mit der gleichen Delle wie bei der zweiten Berechnung, jedoch um 90° verdreht, durchgeführt worden. Dadurch ergibt sich die größte Druckübertragende Fläche von allen drei Berechnungen und entsprechend mit 26 N/mm<sup>2</sup> auch der kleinste Werte für die maximale Druckspannung (vgl. Abbildung 5). Dieses Ergebnis zeigt, dass nicht nur der Betrag der Imperfektionen beim Rohrvortrieb zu berücksichtigen ist, sondern insbesondere ihre Lage zur voraussichtlichen Verwinkelung.



Abbildung 5: Druckspannungsverteilung bei einer Delle (8mm) im Bereich des linken Kämpfers

Bei Kenntnis des Betrages sowie der Lage der geometrischen Imperfektionen des Rohrspiegels könnten durch entsprechende Drehungen der Vortriebsrohre zumindest extrem ungünstige Überlagerungen der Imperfektionen mit dem Innenradius einer planmäßig gekrümmten Rohrtrasse vermieden werden.

### 1.2 Gliederung des Berichtes

Gegenstand dieses Forschungsvorhabens ist zunächst die genaue Erfassung von Imperfektionen der Stirnflächen von Vortriebsrohren. Hierzu werden am Markt bestehende Messtechniken hinsichtlich ihrer Messgenauigkeit untersucht und zeitlicher Aufwand sowie Kosten ermittelt. Aufgrund erster begleiteter Baustelleneinsätze lässt sich erkennen, dass die besonders aussichtsreichen Mess-Systeme entweder keine ausreichende Messgenauigkeit bieten oder ihre Handhabung ein schnelles praxisgerechtes Vorgehen ausschließen. Daher wird eine eigene Messtechnik entwickelt, die aufgrund ihrer Spezialisierung die Anforderungen an eine hohe Messgenauigkeit bei geringen Investitionskosten mit einander vereint. Mit ihr wurden Vermessungen bei zwei Rohrherstellern durchgeführt. Aus den Untersuchungen werden Vorschläge zur Vermeidung von Imperfektionen abgeleitet. Zusätzlich wird eine Software zur Erstellung "optimierter Rohrverlegepläne" entwickelt. Hierbei wird beispielsweise die Rohr-Reihenfolge so bestimmt, dass ungünstige Überlagerungen der Imperfektionen von vorlaufenden und nachlaufenden Rohren vermieden werden.

Ziel ist es, künftig Schäden an Vortriebsrohren zu vermeiden und die Wirtschaftlichkeit von Rohrvortrieben weiter zu steigern.

## 2 Grundlagen der Qualitätssicherung und Stand der Technik

Im Arbeitsblatt ATV-A 125 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA, vormals ATV bzw. ATV-DVWK) werden die Imperfektionen als Abweichung von der Rechtwinkligkeit bezeichnet, die "als Summe aus der Abweichung des gesamten Spitzendes von der Rechtwinkligkeit (gegenüberliegende Mantellinien) und der Abweichung von der Rechtwinkligkeit innerhalb der Wanddicke s<sup>«1, 2</sup> definiert ist. Dabei wird gemäß Abbildung 6 die Abweichung von der Rechtwinkligkeit der Stirnflächen an jedem Rohrende definiert als  $\Delta a = max a - min a$ . Als Referenzebene für die Messung ist eine feste Wand zu wählen, die im rechten Winkel zur Rohrachse steht.



Abbildung 6: Rechtwinkligkeit der Stirnflächen<sup>3</sup>

Für den Fall, dass keine eindeutig rechtwinklig zur Rohrachse stehende Referenzebene zur Verfügung steht, ist auch ein anderes Verfahren zur Bestimmung von  $\Delta a$  erlaubt. So kann  $\Delta a$  durch eine zweifache Messung des um 180° zu drehenden Rohres gegen eine beliebig geneigte Fläche ermittelt werden. Weiterhin werden in Anlage 2 des Arbeitsblattes zwei für die Baustelle geeignete Messverfahren zur Bestimmung der Abweichung von der Rechtwinkligkeit beschrieben.

Es handelt sich bei der ersten Variante um das Messverfahren nach DIN EN 295-7<sup>4</sup>. Bei diesem Verfahren wird mit einem auf das Rohr aufgesetzten schwenkbaren Messarm und einer Messlehre die Abweichung von der Rechtwinkligkeit ermittelt (vgl. Abbildung 7). Das Rohr ist hierbei auf eine möglichst waagerechte Unterlage zu

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., ATV-A 125, 1999, S. 12.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V., FBS-Qualitätsrichtlinie – Teil 1, 2000, S 5.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., ATV-A 125, 1996, S. 12.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 295-7, 1995.

legen und der Abstand zwischen dem Messarm und den Rohrenden in Abständen von etwa 90° zu messen. Ein Nachteil des beschriebe nen Messverfahrens ist, dass nur in den Viertelspunkten des Rohres die Abstände bestimmt werden. Damit kann nicht davon ausgegangen werden, dass das ermittelte  $\Delta a$  dem maximalen  $\Delta a$  entspricht.



Abbildung 7: Messgerät zu Bestimmung der Rechtwinkligkeit nach DIN EN 295-7<sup>1</sup>

Nach prEN 1916<sup>2</sup> wird die Abweichung der Rechtwinkligkeit durch das Messen zweier innerer Mantellinien (s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub>) und der zugehörigen Diagonalen (r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>), wie in Abbildung 8 dargestellt, ermittelt. Bei diesem Verfahren ist zuerst an einem Rohrende der Innendurchmesser anzureißen, über den gemessen werden soll. Von den Markierungen (1) und (2) ausgehend sind dann durch "hin- und herpendeln" des Messgerätes die kleinsten Längen für s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub> und die größten Längen für r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub> zu

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 295-7, 1995, S. 12.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Deutsches Institut für Normung e.V., prEN 1916, 1995.

bestimmen. Mit diesen Werten wird dann die Abweichung von der Rechtwinkligkeit des Spitzendes  $e_s$  und der Muffe  $e_m$  entsprechend der folgenden Formeln berechnet:

$$e_{s} = (s_{1}^{2} + r_{1}^{2} - s_{2}^{2} - r_{2}^{2}) / [2 \times (s_{1} + s_{2})]$$
  

$$e_{m} = (s_{1}^{2} - r_{1}^{2} - s_{2}^{2} + r_{2}^{2}) / [2 \times (s_{1} + s_{2})].$$

Die sich aus den Berechnungen ergebenden Vorzeichen für  $e_s$  und  $e_m$  geben die Richtung der Abweichung von der Rechtwinkligkeit bezogen auf die Messpunkte (1) und (2) an.



Abbildung 8: Messstrecken entsprechend prEN 1916<sup>1</sup>

Entsprechend dem Messverfahren nach prEN 1916 ist die Abweichung von der Rechtwinkligkeit - zusätzlich zu der bereits beschriebenen Vorgehensweise - auch über die Rohrwanddicke zu überprüfen. Dies ist an beiden Rohrenden mit einer geraden Messlatte, die an drei gleichmäßig über den Umfang verteilten Stellen im Durchmesser quer über das Rohr gelegt wird, durchzuführen.

Bei dieser Art der Vermessung ist nicht sichergestellt, dass die maximalen Abweichungen von der Rechtwinkligkeit ermittelt werden. Es ist vielmehr Zufall und hängt zudem entscheidend vom Vermessenden ab, ob das maximale  $\Delta$ a mit den drei Messungen über den Umfang bestimmt wird.

Die beiden in Anlage 2 des Arbeitsblattes ATV-A 125 aufgeführten "baustellengeeigneten" Verfahren zur Bestimmung der Abweichung von der Rechtwinkligkeit sind kaum geeignet, verlässliche Kriterien zur Beurteilung der Qualität von Vortriebsrohren zu liefern, da beide Verfahren nur einzelne Punkte berücksichtigen.

Bei der in Kapitel 4.3.1.3.2 des Arbeitsblattes ATV-A 125 vorgestellten Vorgehensweise zur Vermessung von Vortriebsrohren wird zwar davon ausgegangen, dass max a und min a bestimmt werden, eine Systematik, wie dies

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Deutsches Institut für Normung e.V., prEN 1916, 1995, S. 43.

geschehen soll, ist aber nicht angegeben. In der Praxis ist es also dem Vermessenden überlassen, den Abstand vom Rohrspiegel zu der Referenzfläche dort zu messen, wo er die maximalen bzw. minimalen Werte vermutet. Sichergestellt wird dadurch allerdings keineswegs, dass  $\Delta a$  richtig bestimmt wird.

Des Weiteren setzt die Vorgabe, dass die Messung gegen eine feste Wand erfolgen soll, die in einem rechten Winkel zur Rohrachse steht, voraus, dass die exakte Lage der Rohrachse bekannt ist. Diese gedachte Linie zu bestimmen, ist mit einigem Aufwand verbunden, so dass in der Praxis - wie bei den übrigen hier aufgeführten Messverfahren auch - in der Regel davon ausgegangen wird, dass die Rohrachse parallel zu den Mantellinien des Rohres verläuft. Aufgrund der zulässigen Maßtoleranzen muss dies jedoch nicht immer der Fall sein.

Darüber hinaus sind beide Messverfahren relativ aufwändig, so dass sie auch aus diesem Grund zur Vermessung einer größeren Anzahl von Vortriebsrohren ungeeignet sind.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass mit den derzeit zur Bestimmung der geometrischen Imperfektionen vorgesehenen Messverfahren nicht sichergestellt werden kann, dass das ermittelte Δa auch tatsächlich die maximale Differenz zwischen dem höchsten und tiefsten Punkt auf dem Rohrspiegel – rechtwinklig zur Rohrachse – wiedergibt. Ferner bleibt bei allen Messverfahren unberücksichtigt, wie die Extrema zueinander liegen. Für den Rohrvortrieb sind aber dicht beieinander liegende Extrema deutlich kritischer zu beurteilen, da hier lokale Spannungsspitzen auftreten können. Insbesondere gilt dies, wenn durch eine Verwinkelung der Vortriebsrohre zueinander die druckübertragende Fläche reduziert wird und sich die Extrema innerhalb dieser Fläche befinden. In solchen Fällen können selbst die nach ATV-A 125 zulässigen Abweichungen von der Rechtwinkligkeit kritisch werden.

## 3 Messtechniken zur Untersuchung geometrischer Imperfektionen

Nachdem im vorherigen Kapitel der Stand der Technik bei der Qualitätsüberprüfung von Vortriebsrohren dargestellt wurde, werden nun neuere Messtechniken, mit denen sich grundsätzlich geometrische Imperfektionen von Vortriebsrohren untersuchen lassen, vorgestellt. Diese neueren Techniken sind:

- 3D-Laser-Scanner
- Laser-Tracker

Hierzu wurde eine Markt-Recherche durchgeführt, um die unterschiedlichen Produkte, ihre Leistungsdaten aber auch die mit Ihnen verbundenen Investitionskosten zu ermitteln. Für beide Gerätetechniken werden nachfolgend die Produkte der verschiedenen Hersteller einschließlich ihrer Messgenauigkeit und Investitionskosten angegeben.

## 3.1 3D-Laser-Scanner

Nachfolgend werden nur die Produkte von Herstellern untersucht, die im Inland mit einem Händlernetz vertreten sind. Diese Beschränkung wird vorgenommen, da ein einfacher Service vor Ort möglich sein muss. Darüber hinaus werden Systeme mit Mess-Arm für die stationäre Industrie nicht betrachtet, da sie ortsfest als "Inhaus-Systeme" installiert werden und für den geplanten Anwendungsfall im Rohrwerk oder auf der Baustelle zu empfindlich sind. Unter diesen Randbedingungen werden 3D-Laser-Scanner derzeit von folgenden Herstellern angeboten:

- Deltasphere
- Faro
- Konica Minolta
- Leica
- Riegl
- Trimble
- Zoller + Fröhlich

## 3.1.1 DeltaSphere

Das Produkt "DeltaSphere-3000" weist die folgenden technischen Daten auf:<sup>1</sup>

- Reichweite: 15 m
  Scanrate: 24.000 Pixel/s (typisch: 15.000 Pixel/s)
  Linearitätsfehler: < 7 mm</li>
  Sichtfeld: vertikal: 290° horizontal: 360°
- Winkelauflösung: 0,015°

Der Linearitätsfehler von bis zu 7 mm ist als zu hoch einzustufen.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> vgl. o.V., Produktinformationen der Firma DeltaSphere, 2007.

#### 3.1.2 Faro

Angeboten werden drei verschiedene 3D-Laser-Scanner. Das Modell LS 840 ist ausschließlich für den Gebrauch in Innenräumen geeignet. Die zwei verbleibenden Modelle LS 880 und LS 420 weisen folgende Merkmale auf:

Tabelle 2:	Technische	Daten der	Laserscanner	von Faro

Merkmal	LS 420	LS 880
Reichweite	20m	80m
Messrate	120.000 Pkte/s	120.000 Pkte/s
systematischer Distanzmeßfehler bei 25m	3mm	3mm
Vertikales Sichtfeld	320°	320°
Horizontales Sichtfeld	360°	360°

Kosten:Kleinstes Gerät:ca. 80.000 ,- €Software:ca. 10.000 ,- € zuzüglich Schulungskosten

Der systematische Distanzmessfehler von 3mm wird als problematisch angesehen. Er besagt, dass der wahre Messwert eines gescannten Punktes innerhalb einer Kugel mit einem Radius von 3 mm liegt. Das heißt, dass Aussagen zu Imperfektionen nur mit einer Toleranz von  $\pm$  3 mm möglich sind.<sup>1</sup>

### 3.1.3 Konica - Minolta

Die Firma Konica-Minolta bietet das Produkt: "Minolta Vi-9i" mit 50.000,- € für das Grundgerät an.

Aufgrund der geringen Ausschnittsgrößen wird ein Photogrammetrie-System benötigt. Die Ausschnittsgrößen betragen:

- Teleobjektiv: DIN A4
- Mittleres Objektiv: DIN A2
- Weitwinkel: 1 m<sup>2</sup>

Die Auflösung von 640 x 480 Pixeln pro Ausschnitt bestimmt die Genauigkeit. Eine Angabe der erzielbaren Genauigkeit beim Aneinandersetzen der Bilder ist nicht möglich.

Nach Rücksprache mit dem Hersteller wird von einem Einsatz des Gerätes für die geplante Messaufgabe abgeraten.<sup>2</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> vgl. o.V., Produktinformationen der Firma Faro zu 3D-Laser-Scannern, 2007.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> vgl. o.V., Produktinformation Minolta Vi-9i, 2007.

#### 3.1.4 Leica

Die nachfolgende Tabelle zeigt die technischen Daten des Laser-Scanners der Firma Leica.

Tabelle 3: Technische Daten der Leica	Scan Station <sup>1</sup>
---------------------------------------	---------------------------

Merkmal	Leica Scan Station
Genauigkeit einer Einzelmessung	
Position	6mm
Distanz	4mm
Winkel	60µrad
Scanrate	4000Pkte/s
Sichtfeld horizontal	360°
Sichtfeld vertikal	270°
Enthaltenes Zubehör	Transportbehälter, Dreifuss, Stativ, Cyclone Scan Software

Die vorhandene Messgenauigkeit von 4 mm kann für die geplante Vermessungsaufgabe als nicht ausreichend angesehen werden.

#### 3.1.5 Riegl

Die vorhandene Messgenauigkeit des Systems der Firma Riegl von 6 mm - 15 mm ist vor dem Hintergrund der Messaufgabe als nicht ausreichend zu bewerten.<sup>2</sup>

#### 3.1.6 Trimble

Die vorhandene Messgenauigkeit von 10 mm der "VX Spatial Station" von Trimble ist nicht ausreichend zur hochgenauen Erfassung von Imperfektionen im Bereich der Rohrspiegel.

Tabelle 4: Technische Daten de	r VX Spatial Station von Trimble <sup>3</sup>
--------------------------------	---

Merkamle	VX Spatial Station
Reichweite	>150m
Standardabweichung auf <150m	3mm
Genauigkeit Einzelpunktaufnahme <150m	10mm
Winkelgenauigkeit	0,3mgon
Datenübertragung	USB, seriell, Bluetooth

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> vgl. o.V., Produktinformationen der Firma Leica Geosystems zu 3D-Laser-Scannern, 2007.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> vgl. o.V., Produktinformationen der Firma Riegl, 2007.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> vgl. o.V., Produktinformation VX Spatial Station, 2007.

### 3.1.7 Zoller + Fröhlich

Die nachfolgende Tabelle zeigt die technischen Daten des Imager 5006 von Zoller + Fröhlich.

#### Tabelle 5: Technische Daten des Imager 5006<sup>1</sup>

Merkmal	Imager5006
Reichweite	79m
Scannrate (typisch)	<500000Pixel/s
Linearitätsfehler (50m)	(+/-) 1mm
Sichtfeld vertikal	310°
Sichtfeld horizontal	360°
Winkelauflösung horizontal	
Winkelauflösung vertikal	
Winkelgenauigkeit	0,007°ms
Connectivity	Ethernet, USB 2.0

Die Messgenauigkeit wird vom Hersteller nach Rücksprache mit ca.  $\pm$  1 mm angegeben. Sie ist eine Funktion der Intensität des reflektierten Laserlichtes und hängt von den folgenden Parametern ab:

- Oberfläche
- Auftreffwinkel
- Entfernung zum Objekt

Die Kosten des Systems betragen:

- Imager 5006: 87.500,- €
- Software (geomagic): 12.500,- € (Schulung enthalten)

## 3.2 Laser-Tracker

Ein Laser-Tracker ist ein Messgerät, das durch eine Kombination aus Winkelmessung und interferometrischer Laser-Distanzmessung (in den nachfolgenden Aufstellungen mit IFM bezeichnet) die 3D-Punktkoordinaten eines Objektes erfasst. Alternativ können moderne Laser-Tracker auch absolute Distanzen messen (Bezeichnung ADM). Es gibt zur Zeit drei Hersteller von Laser-Trackern:

- API
- Faro
- Leica Geosystems

Zunächst werden die technischen Daten der verschiedenen Geräte dargestellt. Gegen Ende des Abschnittes wird auf die Kosten der Systeme eingegangen.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> vgl. o.V., Produktinformationen der Firma Zoller + Fröhlich, 2007.

#### 3.2.1 API

**Tracker 3** Messbereich horizontal: Messbereich vertikal: Messvolumen (IFM/ADM): Winkelauflösung: 3D-Messleistung: Auflösung: Wiederholpräzision: Absolute Genauigkeit der 3D-Koordinate: statisch:

dynamisch:

ADM Auflösung: ADM Genauigkeit:

#### **Omnitrack (tragbar)**

Messbereich horizontal:	640°(±320°)
Messbereich vertikal:	+ 80°bis - 60°
Genauigkeit der 3D-Koordinate:	Auflösung: 1 µm

#### Smart Track (handgeführter Tracker)

Reichweite:	40 m	
Nickwinkel:	± 55°	
Rollwinkel:	± 30°	
Gierwinkel:	± 140°	
Winkelauflösung Sensor:	± 3 Bogensekunden	

#### I-Scan (handgeführter Scanner)

Punktrate:	9030 Punkte/s
Maximale Arbeitsdistanz:	140-190 mm
Scanbreite innerhalb der Arbeitsdistanz:	75 mm ± 25 mm
Messgenauigkeit innerhalb der Arbeitsdistanz:	0,1 mm <sup>1</sup>

640°(± 320°) + 80° bis - 60° bis zu 120 m ± 0,0176 Bogensekunden 1 µm 2,5 ppm (2σ)

± 5 ppm (2σ) 0,001" (25 μm) auf 5 m  $\pm$  10 ppm (2 $\sigma$ ) 0,002" (50  $\mu$ m) bei 5 m 1 µm ± 15 µm oder 1,0 ppm (jeweils der bessere Wert) ± 0,0006" (15 µm) bei 5 m ± 0,0008" (20 µm) bei 20 m

Genauigkeit: 1 ppm

40 m
± 55°
± 30°
± 140°
± 3 Bogensekunden

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> vgl. o.V., Produktinformationen der Firma API, 2007.

#### 3.2.2 Faro

#### Laser Tracker X V2

Maximaler Messabstand:	70 m
Punkterfassungsrate:	10000 Pkte/s
Horizontaler Schwenkbereich:	270°
Vertikaler Schwenkbereich:	+ 75°bis - 50°
Winkelgenauigkeit:	18 µm + 3 µm/m*
Längengenauigkeit:	10 µm + 0,4 µm/m*
	(XADM=XtremeAbsoluteDistanzMessung)

#### Laser Tracker Xi V2 (mit Interferometer)

Maximaler Messabstand:	70m
Punkterfassungsrate:	10000 Pkte/s
Horizontaler Schwenkbereich:	270°
Vertikaler Schwenkbereich:	+ 75°bis - 50°
Winkelgenauigkeit:	18 µm + 3 µm/m*
Längengenauigkeit:	10 μm +0,4 μm/m*
	(XADM=XtremeAbsoluteDistanzMessung)
	2 µm+ 0,4 µm/m*

(IFM=Interferometer)<sup>1</sup>

± 25 µm

## 3.2.3 Leica Geosystems

Leica LT640 (Präzisionsindustrie)	
Reichweite:	40 m
Kein ADM	
horizontal:	360°
vertikal:	± 45°
Messrate:	3000 Pkte/s
Winkelgenauigkeit in einem	
Messvolumen von 2,5x5x10 m:	± 10 μm + 5 μm/m
Entfernungsgenauigkeit über ganzen Bereich:	± 25 μm
LeicaLTD640	
Reichweite:	40m
Sichtbereich horizontal:	360°
Sichtbereich vertikal:	± 45°
Messrate:	3000 Pkte/s
ADM-Bereich:	1,5 m - 40 m
Winkelgenauigkeit in einem	
Messvolumen von 2,5x5x10 m:	±10 μm + 5 μm/m

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> vgl. o.V., Produktinformationen der Firma Faro zu Laser-Trackern, 2007.

Entfernungsgenauigkeit über ganzen Bereich:

\_\_\_\_\_

LeicaLTD706 (tragbar konzipiert)	
Reichweite:	6 m
Sichtbereich horizontal:	360°
Sichtbereich vertikal:	± 45°
Messrate:	3000 Pkte/s
ADM-Bereich:	1,5 m - 6 m
Winkelgenauigkeit in einem	
Messvolumen von 2,5x5x10 m:	± 10 μm + 6,5 μm/m
Entfernungsgenauigkeit über ganzen Bereich:	± 25 μm
LeicaLTD709 (für Kundenanforderungen aus	s der Automobilindustrie, tragbar)
Reichweite:	25 m
Sichtbereich horizontal:	360°
Sichtbereich vertikal:	± 45°
Messrate:	3000 Pkte/s
ADM-Bereich:	1,5 m - 9 m
Winkelgenauigkeit in einem	
Messvolumen von 2,5x5x10 m:	± 10 μm + 5 μm/m
Entfernungsgenauigkeit über ganzen Bereich:	± 25 μm
LeicaLTD840 (Luftfahrtindustrie)	
Reichweite:	40 m
Sichtbereich horizontal:	360°
Sichtbereich vertikal:	± 45°
Messrate:	3000 Pkte/s
ADM-Bereich:	1,5 m - 40 m
Winkelgenauigkeit in einem	
Messvolumen von 2,5x5x10 m:	± 10 μm + 5 μm/m
Entfernungsgenauigkeit über ganzen Bereich:	± 25 μm
Leica T-Scan (handgeführter Scanner)	
Min/Max Arbeitsdistanz:	41-119 mm
Sichtbereich horizontal:	360°
Sichtbereich vertikal:	± 45°
Nickwinkel:	± 45°
Spannwinkel:	± 45°
Rollwinkel:	360°
Messbereich:	75 mm
Mittlere Scannbreite:	90 mm <sup>1</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> vgl. o.V., Produktinformationen der Firma Leica Geosystems zu Laser-Trackern, 2007.

Die Messgenauigkeiten der Laser-Tracker sind alle sehr hoch und damit für die Vermessung von Rohrspiegeln geeignet.

Bei den Laser-Tracker-Systemen liegen die Investitionskosten zwischen 100.000 € und 200.000 €. Daher erscheint ein Einsatz von Laser-Trackern zur Qualitätssicherung ausschließlich als Dienstleistung, die von Ingenieurbüros angeboten wird, sinnvoll.

#### Resumé

Im Rahmen von Baustelleneinsätzen werden die aussichtsreichsten 3D-Laser-Scanner der Firmen Faro und Zoller + Fröhlich sowie ein Laser-Tracker der Firma Leica getestet.

## 4 Untersuchungen in-situ

Im Rahmen von Untersuchungen in-situ konnten Vermessungen bei einer Baumaßnahme mit Stahlbetonvortriebsrohren DN 3400 begleitet werden. Aufgrund detektierter Schäden wurden ausgewählte Vortriebsrohre und der Pressring, mit dem die Rohre in den Boden gedrückt werden, vermessen. Hierbei kamen die zuvor ausgewählten Mess-Systeme 3D-Laser-Scanner (Faro sowie Zoller + Fröhlich) und Laser-Tracker (Leica) zum Einsatz.



Abbildung 9: Stahlbetonvortriebsrohre DN 3400

#### 4.1.1 3D-Laser-Scanner

Nachfolgend werden der Einsatz sowie die Vorgehensweise bei den Vermessungen der verschiedenen Systeme gezeigt und die Messergebnisse dargestellt und beurteilt. Das Messprinzip des 3D-Laser-Scannings wird exemplarisch für den Scanner von Faro erläutert.

#### Gerätetechnik der Firma Faro

Ein Laserstrahl trifft auf einen rotierenden Spiegel und wird von dort aus in den Raum reflektiert. Der Laser-Scanner selbst rotiert ebenfalls um die eigene Achse. Auf diese Weise überstreicht der infrarote Lichtstrahl die Umgebung des Scanners. Aus der Phasenverschiebung des reflektierten Signals wird die Entfernung zum reflektierenden Objekt berechnet. Zusammen mit der Stellung des Laserkopfes ergibt sich für jeden reflektierten Punkt seine Lage im Raum in kartesischen Koordinaten (x,y,z). Nach Beendigung der "Aufnahme", die im Fachjargon Scan genannt wird, liegt eine 3D-Abbildung vor, durch die eine freie Bewegung auf dem Bildschirm möglich ist (im Unterschied zu einem Zoom in ein 2D-Bild). Ein in den Scanner eingebauter PC stellt den autonomen Betrieb (ohne externen PC) während eines Scans sicher.

Beim Scanner der Firma Faro wird die Phasenverschiebung der reflektierten Lichtwelle zur Ermittlung der Entfernung herangezogen (im Unterschied zur Laufzeitmessung eines Einzelimpulses).

Der Faro-Laser-Scanner "LS" splittet den Laserstrahl in drei Teilstrahlen auf, die wiederum unterschiedlich mit 1,2 m, 9,6 m bzw. 76 m Wellenlänge moduliert werden. Um eindeutig die Entfernung des reflektierten Strahls festlegen zu können, werden die Phasenverschiebungen in den einzelnen Teilstrahlen herangezogen. Die maximale Modulationswellenlänge bestimmt die größte Entfernung (76m beim Faro-Scanner), die eindeutig gemessen werden kann.<sup>1</sup>



Abbildung 10: Faro Laser-Scanner, Referenzkugel im Hintergrund

Im Hintergrund von Abbildung 10 ist eine Referenzkugel zu erkennen. Es werden mehrere Referenzkugeln so um die zu vermessenden Rohre angeordnet, dass durch Anpeilen und Einmessen der Kugeln ein übergeordnetes Koordinaten-System aufgebaut werden kann. Dieser Arbeitsschritt ist erforderlich, da zur vollständigen Erfassung eines Rohres "Scans" von mehreren Positionen aus durchgeführt werden müssen.

Für die Aufnahme beider Spiegelflächen reichen zwei Standorte aus. Soll hingegen das gesamte Rohr einschließlich der Mantelflächen erfasst werden sind mindestens vier Aufstellungspunkte erforderlich.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> vgl. o.V., Produktinformationen der Firma Faro zu 3D-Laser-Scannern, 2007.

#### Zeitbedarf

Liegen die Rohre wie in Abbildung 9 dargestellt nebeneinander, können von einer Position aus zwei bis drei Spiegelflächen benachbarter Rohre gescannt werden. Der Zeitbedarf für die Vermessung von zwei bis drei Rohren (Stirnflächen ohne Mantel) beträgt etwa einen halben Tag. An einem Messtag können damit vier bis sechs Rohre gescannt werden.

Nach dem Scannen liegen die Vermessungsergebnisse in Form einer Punktwolke mit mehreren Millionen Datenpunkten vor. Im Zuge der Nachbearbeitung werden die Messpunkte der Umgebung eliminiert und darüber hinaus Reflektionen zum Beispiel durch den Stahlführungsring der Muffenseite entfernt. Im Nächsten Schritt müssen die Mittelpunkte der Rohrenden berechnet werden. Durch die beiden Mittelpunkte wird danach die ideelle Rohrachse gelegt. Bei eingearbeitetem Handlungsablauf sind zwei komplette Rohr pro Tag auswertbar.

#### <u>Ergebnisse</u>

Die Vermessung mit dem 3D-Laser-Scanner der Firma Faro, Modell LS 420, lieferte Ergebnisse, die zur Auswertung der Imperfektionen des Rohrspiegels nicht herangezogen werden konnten. Es bleibt offen, ob die vorhandene Auflösung von ± 3 mm nicht ausreicht, um Unebenheiten im Rohrspiegelbereich korrekt darstellen zu können oder ob die Ursache in der Vorgehensweise bei der Auswertung bzw. Nachbearbeitung der Daten begründet ist. Von einer graphischen Darstellung der Ergebnisse wird daher abgesehen.

#### Gerätetechnik der Firma Zoller + Fröhlich

Abbildung 11 zeigt den Imager 5006 von Zoller + Fröhlich (Z+F). Wie auch beim Scanner von Faro wird ein übergeordnetes Koordinaten-System erzeugt. Hierzu werden in der Umgebung so genannte "Zielmarken" geklebt und diese dann angepeilt und vermessen.



Abbildung 11: Imager 5006 von Z+F, Zielmarke im Hintergrund

#### Zeitbedarf

Der Zeitbedarf entspricht näherungsweise dem des Systems Faro.

#### **Ergebnisse**

In den beiden nachfolgenden Abbildungen sind die Imperfektionen der beiden Stirnflächen gegenüber den Ausgleichsebenen dargestellt, die mit dem "Imager 5006" aufgenommen wurden.



Abbildung 12: Imperfektionen der händisch abgezogenen Seite



Abbildung 13: Imperfektionen der auf der Stahlschalung stehend hergestellten Seite

Es fällt auf, dass die händisch abgezogene Seite nur geringe Unebenheiten aufweist während die auf der Stahlschalung stehend hergestellte Seite in Umfangsrichtung einem "sinusförmigen" Verlauf folgt.

### 4.1.2 Laser-Tracker

Beim Laser-Tracking wird von der Station ein Laserstrahl zu der in Abbildung 14 (oben rechts) dargestellten Reflektor-Kugel ausgesandt. Über das Prinzip der Laufzeitmessung wird die Entfernung zwischen Sender und Empfänger bestimmt (Laser-Interferometer; IFM). Der Radius der Reflektorkugel wird anschließend auf die Messwerte addiert. Die Sendeeinheit der Station folgt der Reflektor-Kugel automatisch, solange der Strahl nicht durch Hindernisse unterbrochen wird. Daher ist der Reflektor sorgfältig ohne ein Wegdrehen der Kugel an dem zu vermessenden Objekt entlang zu führen. Andernfalls muss der Laser-Strahl an der Station zunächst wieder "eingefangen" werden, bevor die Vermessungen fortgesetzt werden können.

Um absolute Distanzen messen zu können (ADM) ist auch beim Laser-Tracking ein übergeordnetes Koordinaten-System aufzubauen.

Wird die Reflektor-Kugel über die Stirnfläche des Rohres bewegt, werden die gemessenen Distanzen mit einer zuvor angegebenen Messrate gespeichert.



Abbildung 14: Laser-Tracker von Leica

#### Ergebnisse der Vermessung des Pressrings

Die Ergebnisse werden im Anschluss als abgewickelte Darstellungen angegeben. Im Anhang sind zusätzlich die aus den Tracker-Daten erstellten CAD-Pläne enthalten. Aus den Plänen wird die Messabfolge deutlich.

Abbildung 15 zeigt die Abwicklung der Unebenheiten des Pressrings. Auf der Abszisse sind die radial angelegten Messquerschnitte dargestellt. Auf der Ordinate sind die Unebenheiten für drei Spuren in Umfangsrichtung aufgetragen. Diese Spuren würden auf dem Druckübertragungsring (Holzring) außen, mittig und innen liegen. Markante Punkte (Maxima und Minima) sind mit dem Maß ihrer Unebenheit in Millimetern hervorgehoben. Positive Werte liegen vor der "Idealebene", negative Werte dahinter.



Abbildung 15: Vermessung des Pressrings mittels Laser-Tracker

Es lässt sich festhalten, dass der Pressring eine Trichterung in radialer Richtung von außen nach innen aufweist. Darüber hinaus besitzt er je zwei Hoch- und zwei Tiefpunkte in Umfangsrichtung. Die Hochpunkte liegen auf der Höhe des rechten und linken Kämpfers, während sich die Tiefpunkte im Bereich des Scheitels und Sohle befinden.

### Ergebnisse der Vermessung der Vortriebsrohre

Exemplarisch werden die Unebenheiten eines Vortriebsrohres dargestellt. Die Ergebnisse der übrigen Vortriebsrohre befinden sich als CAD-Pläne im Anhang.



Abbildung 16: Vermessung des Spitzendes



Abbildung 17: Vermessung der Muffenseite

Die Ergebnisse decken sich mit denen des 3D-Laser-Scannings der Firma Zoller + Fröhlich. Während die händisch abgezogene Seite unsystematische Unebenheiten

aufweist, ist der makroskopische, sinusförmige Verlauf der Unebenheiten auf der Muffenseite deutlich zu erkennen.

In Abbildung 18 ist das Spaltmaß, das entsteht, wenn der Pressring gegen das Vortriebsrohr gedrückt wird, für die Spur "Holzring außen", dargestellt.



Abbildung 18: Spaltmaß zwischen Pressring und Vortriebsrohr in "Normallage"

In weiten Bereichen liegen relativ große Spaltmaße von 8 bis 10 mm vor. Lediglich auf Höhe der beiden Kämpferpunkte besitzt das Spaltmaß den Wert Null. Die Spaltmaße müssen im Zuge des Pressvorgangs durch eine Verformung der Fugenzwischenlage kompensiert werden. Dennoch entstehen in den Kämpferbereichen Lastspitzen, da dort zunächst der überwiegende Teil der Vortriebskraft übertragen wird bis die Fugenzwischenlage entsprechend große Verformungen erfahren hat.

Abbildung 20 zeigt den entstehenden Spalt für den Fall, dass das Vortriebsrohr gegenüber seiner Ausgangslage um ca. 110° gegen den Uhrzeigersinn gedreht wird. Die Ausgangslage liegt vor, wenn das Rohr vom Kran auf den Pressschlitten abgesetzt wird. Die Befestigungspunkte zum Anschlagen des Rohres an die Transportvorrichtung sind hierbei horizontal ausgerichtet (vgl. Abbildung 19)



Abbildung 19: Definition der "Normal-Lage"



Abbildung 20: Spaltmaß zwischen Pressring und Vortriebsrohr bei "optimierter Lage"

Es wird deutlich, dass durch die Drehung des Rohres in eine optimierte Lage das Spaltmaß erheblich reduziert werden kann. Nur an einer Stelle im Bereich des linken Kämpfers übersteigt das Spaltmaß noch den Wert von 6 mm.

## 4.2 Resumé

Die Vermessungsergebnisse mit dem 3D-Laser-Scanner der Firma Faro ließen sich nicht eindeutig interpretieren. Ob die Ursache in der Geräte-Messgenauigkeit oder der Vorgehensweise bei der Auswertung bzw. Nachbearbeitung begründet ist, konnte nicht abschließend geklärt werden.

Der 3D-Laser-Scanner von Zoller + Fröhlich stellte die Oberfläche des gescannten Rohres qualitativ und quantitativ korrekt dar. Dies ist wohl in erster Linie auf die hohe Auflösung von  $\pm 1$  mm des verwendeten 3D-Laser-Scanners zurückzuführen.

Die Ergebnisse der Tracker-Vermessung können aufgrund der sehr hohen Messgenauigkeit als Referenzmaße angesehen werden.

Als erste Erkenntnisse aus den durchgeführten Messungen ist festzuhalten, dass entgegen den Erwartungen die händisch abgezogene Seite die höhere Maßhaltigkeit aufwies. Die auf der Stahlschalung stehend hergestellte Rohrseite war zwar relativ glatt, dafür besaß sie jedoch eine große Welligkeit in Umfangsrichtung. Dieses Phänomen ist auf Imperfektionen der Stahlschalung zurückzuführen, die dem Rohrspiegel der Muffenseite ihren Abdruck verleihen.

Es ist erkennbar, dass sich durch eine Drehung der Rohre um ihre Längsachse die Auswirkungen ungünstiger Überlagerungen von Imperfektionen des Pressrings und der Rohre, die zu lokalen Lastspitzen führen können, reduzieren lassen.

## 5 Entwicklung einer eigenen Messtechnik

Aufgrund der Erfahrungen, die im Rahmen der Baustelleneinsätze gesammelt werden konnten, wurde entschieden, am "ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb" eine eigene Messtechnik zu entwickeln, die speziell für die Imperfektionsmessung von großen Vortriebsrohren konzipiert ist.

## 5.1 Zielsetzung der Entwicklung

Als Entwicklungsziele lassen sich die folgenden Aspekte anführen:

- Hohe Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse
- Kurze Rüstzeiten im Werk oder auf der Baustelle
- Einfache praxistaugliche Handhabung bei der Vermessung
- Geringer Aufwand zur Nachbearbeitung der gemessenen Daten
- Eindeutige Interpretierbarkeit der Messergebnisse

## 5.2 Beschreibung der entwickelten Messtechnik

Das Mess-System besteht aus einer mechanischen Grundkonstruktion sowie der zugehörigen Hardware und einer Steuerungs- und Auswertungssoftware.



#### Abbildung 21

Die Grundkonstruktion wird in zwei Ebenen über vier Arme im Rohr verspannt. An der starren Achse des Systems ist ein Ausleger spielfrei angebracht. Der Ausleger trägt in Summe sieben Laser-Wegaufnehmer, zwei zur Vermessung der Außenkontur des Rohres und fünf weitere Laser-Sensoren zur Erfassung von Unebenheiten der

Rohrspiegel. Die Auflösung der Laser beträgt 0,06 mm. Der Messbereich liegt zwischen 30 und 130 mm.



Abbildung 22: Schrittmotor mit Inkremental-Drehwinkelgeber (links) und Anordnung der Laser-Sensoren (rechts)

Angetrieben wird der Ausleger über einen getakteten Schrittmotor. Die zugehörigen Winkel werden über einen Inkremental-Drehwinkelgeber gemessen.

Die zentrische Einrichtung der Grundkonstruktion im Rohr erfolgt ebenfalls mittels Laser. Hierbei werden über einen Laserdistanzmesser die Entfernungen der Achse zu den inneren Mantelflächen gemessen und über die höhenverstellbaren Arme sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung exakt ausgerichtet. Zusätzlich werden die Neigung der Achse und die Neigung der Sohle des Rohres mit Hilfe einer elektronischen Wasserwaage auf Parallelität hin überprüft.

Damit Schwingungen des Auslegers die Messungen nicht nachteilig beeinflussen, wurde eine Abspannung des Auslegers in zwei Ebenen vorgenommen. Darüber hinaus wird der Motor nach Erreichen des Sollwinkels angehalten und die Messung erst nach einer Ausschwingzeit von 10 Sekunden ausgelöst. Die erforderliche Ausschwingzeit wurde durch umfangreiche Tests ermittelt. Nach durchgeführter Messung wird mit dem Motor das nächste Winkelinkrement angefahren und die nächste Messung durchgeführt.

Mit der Vermessung wird ein Netz von Rasterpunkten über die Stirnfläche des Rohres gelegt. In jedem Rasterpunkt wird die gemessene Distanz angetragen, so dass sich ein dreidimensionales Profil der Stirnfläche ergibt. Abbildung 23 zeigt das entstehende Messpunktraster.



Abbildung 23: Messpunktraster auf dem Rohrspiegel

Mit Hilfe einer Ausgleichsrechnung nach dem Gauß-Newton-Verfahren<sup>1</sup> wird eine Ebene in die gemessenen Distanzen zur Stirnfläche eingerechnet. Die Ebene selbst liefert das Maß der Rechtwinkligkeit zur Achse. Die Unebenheiten werden auf diese Ausgleichsebene bezogen.



Abbildung 24: Ausgleichsebenen durch die Stirnflächen

Eine Ebene im Raum lässt sich allgemein in folgender Form angeben:

 $E: \quad a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z = d$ 

Umstellen der Ebenengleichung nach z und Einführung der Modellparameter  $\beta_i$  liefert:

 $z=\beta_1\cdot x+\beta_2\cdot y+\beta_3$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> vgl. Benning, W., Statistik, 2002, S. 140 ff.

Die Koordinate z stellt die Höhe über der x-y-Ebene dar, die den ideal zur Rohrachse senkrecht stehenden Rohrspiegel repräsentiert.



#### Abbildung 25: Modellvorstellung zur Ermittlung der Ausgleichsebene

Nach der Entwicklung als Totales Differential kann die Parameterschätzung im linearen Modell erfolgen:

$$\Delta Z_i^{(0)} = \frac{\partial Z_i^{(0)}}{\partial \beta_1} \cdot \Delta \beta_1^{(0)} + \frac{\partial Z_i^{(0)}}{\partial \beta_2} \cdot \Delta \beta_2^{(0)} + \frac{\partial Z_i^{(0)}}{\partial \beta_3} \cdot \Delta \beta_3^{(0)}$$

Die "gekürzten Beobachtungswerte"  $\Delta Z_i^{(0)}$  werden durch Subtraktion der Schätzwerte  $Z_i^{(0)}$  von den Beobachtungswerten  $z_i$  ermittelt:

$$\Delta Z_i^{(0)} = z_i - Z_i^{(0)}$$

mit:

$$\Delta Z_{i}^{(0)} = ,,gek \ddot{u}rzte Beobachtungswerte"$$

$$z_{i} = Beobachtungswerte (gemessene Laserdistanzen)$$

$$Z_{i}^{(0)} = Sch \ddot{a}tzwerte$$

$$= Z_{i}^{(0)} = \beta_{1}^{(0)} \cdot x_{i} + \beta_{2}^{(0)} \cdot y_{i} + \beta_{3}^{(0)}$$

Die Schätzwerte  $Z_i^{(0)}$  werden durch Einsetzen der gemessenen Werte  $x_i$  und  $y_i$  in den Ansatz bestimmt. Aus den Differenzen  $\Delta Z_i^{(0)} = z_i - Z_i^{(0)}$  wird der gekürzte Beobachtungsvektor aufgebaut.

Die Elemente der Koeffizientenmatrix **X** ergeben sich aus den partiellen Ableitungen der Schätzfunktion nach den unbekannten Parametern. Sie ergeben sich zu:

$$\frac{\partial Z_i^{(0)}}{\partial \beta_1^{(0)}} = \mathbf{x}_i, \qquad \qquad \frac{\partial Z_i^{(0)}}{\partial \beta_2^{(0)}} = \mathbf{y}_i, \qquad \qquad \frac{\partial Z_i^{(0)}}{\partial \beta_3^{(0)}} = \mathbf{1}$$

Die partiellen Ableitungen werden anschließend in der Koeffizientenmatrix **X** spaltenweise zusammengefasst.

Für die unbekannten Parameter  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  und  $\beta_3$  ist für die Startlösung der ersten Iteration eine Schätzung erforderlich. Sie werden in dem Vektor **\beta** zusammengefasst:

$$\boldsymbol{\beta^{(0)}} = \begin{pmatrix} \beta_1^{(0)} \\ \beta_2^{(0)} \\ \beta_3^{(0)} \end{pmatrix}$$
Im Anschluss werden die folgenden Rechenschritte ausgeführt:

- Berechnung der transponierten Koeffizientenmatrix X'
- Bestimmen der Normalgleichungsmatrix  $\mathbf{N} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})$
- Berechnung der Inversen der Normalgleichungsmatrix  $N^{-1} = (X'X)^{-1}$

Die Verbesserungen der Parameterschätzwerte nach der ersten Iteration ergeben sich durch das folgende Matrizenprodukt:

$$\Delta B^{(0)} = N^{-1}X'y = (X'X)^{-1}X'y$$

Die Verbesserungen der Parameterschätzwerte werden anschließend auf ihre Startwerte addiert.

$$\mathbf{\hat{S}^{(1)}} = \mathbf{\hat{\beta}^{(0)}} + \Delta \mathbf{\hat{S}^{(0)}}$$

Die Schätzfunktion nach der ersten Iteration für die zweite Iteration lautet damit:

$$Z_i^{(1)} = \beta_1^{(1)} \cdot x_i + \beta_2^{(1)} \cdot y_i + \beta_3^{(1)}$$

Die Ausgleichsrechnung liefert nach Abschluss der Iteration (bei Unterschreiten einer vorgegebenen Fehlerschranke) die Gleichung der Ebene durch die Imperfektionen des Rohrspiegels.

Die Abweichung von der Rechtwinkligkeit einer Stirnfläche zur Rohrachse wird im Anschluss wie folgt berechnet:

$$\sin \delta = \frac{\left| \vec{a} \cdot \vec{n} \right|}{\vec{a} \cdot \vec{n}}$$

mit:

ā = Richtungsvektor der Rohrachse





Abbildung 26: Mathematische Formulierung der Abweichung von der Rechtwinkligkeit

## 5.3 Praxiserprobung

Die entwickelte Messtechnik wurde bei zwei Herstellern von Vortriebsrohren erprobt. In Rohrwerk A wurden 15 Vortriebsrohre DN 2600 mit einer Wandstärke von 350 mm und einem Außendurchmesser von 3300 mm vermessen. Bei Hersteller B wurden 7 Vortriebsrohre DN 3000 mit einem Außendurchmesser von 3600 mm untersucht.

Nachfolgend werden zunächst einige Bilder der Messtechnik im praktischen Einsatz und im Anschluss daran ausgewählte Vermessungsergebnisse dargestellt.



Abbildung 27: eingerichtete Messtechnik in einem Vortriebsrohr DN 2600



Abbildung 28: Detail: Anordnung der Laser-Wegaufnehmer (links) sowie Steuerungslaptop und Schaltkasten (rechts)

## Zeitbedarf

Der Zeitbedarf für die Vermessung eines Rohres liegt bei ca. 2 Stunden. Ein Nachbearbeiten der Messdaten ist nicht erforderlich, da fertige Auswerteroutinen standardisierte Ausgabeprotokolle liefern.

## 5.3.1 Auswertung der Imperfektionen

Die nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch die Imperfektionen des Spitzend-Rohrspiegels von Rohr Nr. 7. Die Imperfektionen setzen sich aus der Abweichung von der Rechtwinkligkeit und überlagerten Unebenheiten zusammen. Die Abweichung von der Rechtwinkligkeit beträgt  $\alpha_A = 0,16^\circ$ .



Abbildung 29: Imperfektionen (links) und Unebenheiten (rechts)

In Abbildung 30 sind die Unebenheiten der Muffenseite von Rohr Nr. 5 dargestellt. Aus der Darstellung lässt sich Folgendes erkennen:

- 2 Hochpunkte (Scheitel und Sohle)
- 2 Tiefpunkte (Kämpfer rechts und Kämpfer links)
- Trichterung des Rohrspiegels von außen nach innen



Abbildung 30: Unebenheiten von Rohr Nr. 5 (Muffe)

Die maximale Unebenheit in Umfangsrichtung beträgt 5,61 mm. Über die Wanddicke ergibt sie sich zu 3,85 mm.

#### 5.3.2 Überprüfung der Vermessungsergebnisse

Zur Überprüfung wurde eine Vermessung von zwei Rohren mit dem in Kapitel 4 bereits eingesetzten Laser-Tracker durchgeführt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Vergleich der mit beiden Messtechniken ermittelten Imperfektionen.

Der in Abbildung 31 dargestellte Verlauf der Imperfektionen des Rohrspiegels mit zwei Hoch- und zwei Tiefpunkten wird von beiden Systemen erkannt. Die größeren Abweichungen bei der Spur "Holzring außen" resultieren aus leicht versetzten Auswertungs-Spuren beider Systeme. Da festgestellt wurde, dass die Spiegelflächen häufig eine Trichterung aufweisen, machen sich unterschiedliche Mess-Spuren direkt bemerkbar.



Abbildung 31: Vergleich der gemessenen Imperfektionen von Rohr 12, Muffenseite

Abbildung 32 zeigt den Vergleich der Imperfektionen für das Spitzende von Rohr 12. Wie schon bei den Untersuchungen in-situ ist kein makroskopischer, übergeordneter Trend erkennbar. Die Imperfektionen verlaufen relativ willkürlich, da es sich um die händisch abgezogene Seite handelt. Auch hier liegt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse vor.



Abbildung 32: Vergleich der gemessenen Imperfektionen Rohr 12, Spitzende



Abbildung 33: Vergleich der gemessenen Imperfektionen Rohr 14, Muffenseite

Die Messergebnisse von Rohr 14 Seite A sind nahezu identisch (vgl. Abbildung 33).

Zwischen 150° und 210° liegen keine Tracker-Daten v or, da die Tracker-Kugel nicht weit genug außen angesetzt wurde.

In Abbildung 34 sind die Imperfektionen des Spitzendes von Rohr 14 dargestellt. Der generelle Verlauf der Unebenheiten wird von beiden Systemen in gleicher Weise erkannt. Bei der inneren Spur weichen die Ergebnisse jedoch stärker von einander ab. Bei 240° deutet sich eine Vertiefung im Rohrspi egel bei der äußeren und der mittleren Spur – gemessen von beiden Systemen – an. Bei der inneren Spur setzt sich dieser Verlauf bei den Tracker-Daten im Unterschied zu den Ergebnissen der entwickelten Messtechnik nicht fort. Möglicherweise sind auch hier abweichende Spuren verantwortlich für die unterschiedlichen Ergebnisse.



Abbildung 34: Vergleich der gemessenen Imperfektionen Rohr 14, Spitzende

Insgesamt lässt sich eine gute Übereinstimmung der Tracker-Daten mit den Ergebnissen der Laser-Messtechnik feststellen.

#### 5.3.3 Vermeidung von Imperfektionen bei der Rohrherstellung

Durch eine Vermessung bereits produzierter Rohre im Werk lassen sich systematische Maßabweichungen erkennen. Stahlschalungen, die zu systematischen Imperfektionen führen (z. B. makroskopischer sinusförmiger Verlauf), können identifiziert und korrigiert werden.

Des Weiteren wird vorgeschlagen, neue Schalungen mit hoch genauer Messtechnik zu vermessen, bevor diese in Betrieb genommen werden. Hierzu bieten sich vor allem die zuvor beschrieben Laser-Tracker an. Imperfektionen auf der Muffenseite der Rohre können so künftig vermieden werden.

Eine Vermessung der produzierten Rohre liefert darüber hinaus die Informationen über lokale Imperfektionen auf der händisch abgezogenen Seite, so dass durch eine Nachbearbeitung der Rohre kritische Stellen (z. B. Hochpunkte) eliminiert werden können.

In der Zukunft sollten zudem Techniken entwickelt werden, die bislang händisch abgezogene Seite (Spitzende) maschinell abzuziehen. Die so abgezogene Oberfläche müsste anschließend mit einer geeigneten Methode auf verbliebene Imperfektionen überprüft werden.

## 5.3.4 Auswirkungen auf die Kontaktflächen der Rohre

Die Imperfektionen des vorlaufenden und des nachfolgenden Rohres bestimmen maßgeblich die Kraftübertragung im Rohrspiegelbereich. In den beiden nächsten Abbildungen ist das entstehende Spaltmaß in der Rohrfuge unter der Annahme, dass die Rohre gerade ohne zusätzlich Verwinkelung vorgetrieben werden, dargestellt.

Die in Abbildung 35 gezeigte Spaltmaß-Verteilung besagt, dass die rot eingefärbten Flächen unmittelbaren Kontakt besitzen. Nach einer Stauchung der Fugenzwischenlage um ca. 10 mm ist mit Ausnahme eines Sektors oberhalb des linken Kämpfers der gesamte Querschnitt belastet. Erst nach einer Verformung des Druckübertragungsringes von 16,8 mm wird die gesamte Spiegelfläche ausgenutzt.



Abbildung 35: Kontaktfläche bzw. Spaltmaß zwischen Rohr Nr. 1 und Rohr Nr. 2

Abbildung 36 stellt zwei weitere Kontaktflächen exemplarisch dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Vortriebskräfte zunächst über den Rohrscheitel sowie die Rohrschle übertragen werden. Diese Spannungskonzentrationen können beispielsweise zu Abplatzungen auf der Rohraußenseite führen.



Abbildung 36: Spaltmaß in der Rohrfuge zwischen Rohr Nr. 7 und 8 (links) sowie 9 und 1 (rechts)

# 6 Optimierter "Rohrverlegeplan"

Wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt wurde, entsteht aufgrund der Überlagerung der unterschiedlichen Abweichungen von der Rechtwinkligkeit und den lokalen Unebenheiten der Rohrspiegel ein so genanntes "Spaltmaß", dass sich über den Rohrumfang ändert. Dieses "Spaltmaß" wird als Optimierungskriterium herangezogen. Als Optimierung sind drei Varianten vorgesehen:

- Drehung der Rohre um die Längsachse
- Anderung der Reihenfolge der Rohre
- Anderung der Reihenfolge und Drehung der Rohre um die Längsachse

Die unterschiedlichen Optionen werden nachfolgend erläutert. Zur Lösung der Optimierungsaufgabe wurde eine separate Software entwickelt, die es erlaubt zwischen den Varianten zu wählen und optimierte Rohrverlegepläne als einfache baustellengerechte Listen auszugeben.

## 6.1 Option 1: Drehung der Rohre um die Längsachse

Bei dieser Optimierungsvariante ist zur Reduzierung des Spaltmaßes zwischen zwei Rohren eine Drehung der Rohre um die Längsachse möglich. Die Reihenfolge der Rohre ist fest vorgegeben. Es wird die Verdrehung des nachlaufenden Rohres gegenüber dem vorlaufenden Rohr gesucht, bei der die Summe der Spaltmaße (an den gemessenen 72 Winkelpositionen) minimal ist.



Abbildung 37: Kontaktfläche Rohrfuge 5-6 ohne (links) und mit Optimierung (rechts)

# 6.2 Option 2: Änderung der Reihenfolge der Rohre.

Die Rohre können bei dieser Optimierungsvariante nicht gedreht werden. Lediglich die Reihenfolge der Rohre ist variabel. Es wird die Reihenfolge der Vortriebsrohre gesucht, für die sich ein minimales Spaltmaß ergibt.

# 6.3 Option 3: Drehung der Rohre und Änderung der Reihenfolge möglich

In der Optimierungsvariante 3 sind die beiden ersten Varianten enthalten. Die Rohre können sowohl um ihre Längsachse gedreht als auch in ihrer Reihenfolge getauscht werden.

## 6.4 Beispiel-Optimierung

Die bei Rohrhersteller A gemessenen 15 Rohre werden den unterschiedlichen Optimierungsvarianten unterzogen. Als Ergebnis wird ein "optimierter Rohrverlegeplan" erstellt. Dieser gibt je nach gewählter Option die Reihenfolge und die Drehung der Rohre gegenüber der "Null-Lage" an. Abbildung 36 zeigt die graphische Oberfläche der Optimierungssoftware.

s	Spiegel Optimieru	ng	STOP			Optimieru	ng ?		 Auswahl Stim
	Auswahl Daten Imperfektionen (Überlagerung) Abweichung von der Rechtwinkligkeit Unebenheit	Optimierungsmethode Reihenfolge und Drehun Drehung Reihenfolge keine Optimierung	¢ o 1	Verksnummer XXXXXX		Auswahi (	ibernehmen		(Überlagerur Abweichung der Rechtwink Unebenhe Drehen ?
Übersch <mark>Optimi</mark>	hrift Word Document Ierter Rohrverlegeplan	Word erzeu	l Document Igen ?			Neue Aus	wahl ?		Auswahl Las Laser 1A OF Laser 2A OF
Roh	rrr. Drehung	Dateiname	Werksnr.	Seite A Abw.	Seite A Hochp.	Seite B Abw.	Seite B Hochp.	Fuç A	Laser 3A OF Laser 4A OF Laser 5A OF Laser 1B OF Laser 2B OF Laser 3B OF Laser 4B OF Laser 4B OF Laser 5B OF Nullwert 8 OF

Abbildung 38: Optimierungssoftware

Wie in Abbildung 38 dargestellt, ist nicht nur die Optimierungsmethode (Reihenfolgenänderung / Drehung) wählbar, sondern auch welche Basis-Daten optimiert werden sollen. Es kann sowohl für die Abweichung von der Rechtwinkligkeit (Schiefstellung) als auch für die Unebenheit oder die Überlagerung aus den beiden genannten Aspekten optimiert werden.

Grundsätzlich ist zu empfehlen, eine Optimierung für die Überlagerung aus Abweichungen von der Rechtwinkligkeit und Unebenheiten vorzunehmen, da schließlich beide Imperfektionsarten real vorhanden sind. Im vorliegenden Fall ergibt sich für einen nicht optimierten Rohrverlegeplan ein Gesamtspaltmaß (Summe der 360 gemessenen Spaltmaße je Kontaktfläche für alle Rohre) von 56927 mm (vorhandenes Spaltmaß = 100 %).

Wird demgegenüber eine Änderung der Rohr-Reihenfolge zugelassen, so reduziert sich das Gesamtspaltmaß auf 50021 mm (Restspaltmaß = 87,9 %).

Falls nur eine Drehung der Rohr um ihre Längsachse möglich ist, ergibt sich ein Gesamtspaltmaß von 45289 mm (Restspaltmaß = 79,6 %).

Die besten Ergebnisse lassen sich bei kombinierter Änderung der Reihenfolge und Drehung der Rohre mit einem Gesamtspaltmaß von 43150 mm erzielen. Das entspricht einem Restspaltmaß von 75,8 %.

# 7 Zusammenfassung und Ausblick

## 7.1 Zusammenfassung

Imperfektionen im Bereich der Rohrspiegel können in Kombination mit Verwinkelungen in den Rohrfugen durch z. B. planmäßig gekrümmte Vortriebsstrecken und infolge von Steuerkorrekturen trotz normenkonformer Bemessung zu einer Überlastung der Rohre führen.

Ausgangspunkt der Untersuchungen war daher der Stand der Technik zur Ermittlung dieser Imperfektionen. Die in den Regelwerken bekannten Vorgehensweisen reichen jedoch nicht aus, um eine zuverlässige und vollständige Information über die Beschaffenheit der Spiegelflächen zu erhalten. Deshalb wurde im ersten Schritt eine Marktrecherche zu modernen Vermessungs-Systemen durchgeführt. In die nähere Betrachtung wurden 3D-Laser-Scanner und Laser-Tracker aufgenommen. Hierbei zeigte sich, dass die meisten 3D-Laser-Scanner über keine ausreichende Messgenauigkeit verfügen. Die Systeme mit den höchsten Genauigkeitsangaben waren die Scanner der Firmen Faro sowie Zoller+Fröhlich. Bei den Laser-Trackern liegen die erzielbaren Messgenauigkeiten weit über den Anforderungen, die Investitionskosten für diese Systeme betragen jedoch zwischen 100.000,- € und 200.000,- €.

Bei Untersuchungen in-situ wurden die drei aussichtsreichsten Systeme erprobt. Dabei stellte sich heraus, dass der 3D-Laser-Scanner von Zoller+Fröhlich sowie der eingesetzte Laser-Tracker von Leica besonders geeignet waren. Als nachteilig sind jedoch die relativ hohen Investitionskosten sowie der hohe Nachbearbeitungsaufwand der Messdaten zu bewerten.

Es wurde daher entschieden eine eigene Messtechnik, die auf die Vermessung von großen Vortriebsrohren spezialisiert ist, zu entwickeln. Neben einer hohen Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse waren kurze Rüstzeiten, ein einfaches Handling, ein geringer Nachbearbeitungsaufwand und eine eindeutige Interpretierbarkeit der Ergebnisse die wesentlichen Entwicklungsziele. Mit dieser Technik wurden in zwei Rohrwerken insgesamt 15 Vortriebsrohre DN 2600 und 7 Vortriebsrohre DN 3000 vermessen.

Um die entwickelte Messtechnik zu überprüfen, wurde eine Vergleichsmessung mittels Laser-Tracker an zwei Rohren durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung.

Es wurde festgestellt, dass entgegen den Erwartungen häufig die händisch abgezogene Rohrspiegelseite die geringeren Unebenheiten aufweist. Im Unterschied dazu wurden vermehrt systematische Imperfektionen (makroskopischer, sinusförmiger Verlauf) bei den auf der Stahlschalung stehenden Rohrspiegeln gefunden (Muffenseite). Darüber hinaus besaß eine große Anzahl der untersuchten Rohre eine ausgeprägte Trichterung der Spiegelflächen (von außen nach innen). Aber nicht nur die Rohre selbst können Imperfektionen aufweisen. Auch der Pressring, mit dem die Rohre in den Boden gedrückt werden, kann – wie bei den Untersuchungen in-situ festgestellt – erhebliche Imperfektionen besitzen.

Beim Zusammenführen zweier Rohre entsteht in der Fuge ein so genanntes "Spaltmaß". An den Stellen wo sich das Spaltmaß zu Null ergibt, stellt sich der erste Kontakt und damit eine direkte Kraftübertragung ein. Die weiteren Flächen im Spiegel werden entsprechend der Verformung der Fugenzwischenlage um die nächsten relativ kleinen Spaltmaße zur Kraftübertragung herangezogen. Daher wurde eine Software entwickelt, mit der ein optimierter Rohrverlegeplan erstellt werden kann. Hierbei wird unter Berücksichtigung der gefundenen Imperfektionen eine optimierte Reihenfolge und/oder eine Drehung der Rohre berechnet, so dass sich das minimale Gesamtspaltmaß eines Vortriebs ergibt.

## 7.2 Ausblick

Über eine Vermessung der bereits produzierten Rohre im Werk können die Stahlschalungen, die zu systematischen Maßabweichungen führen, identifiziert werden. Für die vorhandenen Vortriebsrohre besteht die Möglichkeit, optimierte Rohrverlegepläne zu erstellen. Dabei ist je nach Umsetzbarkeit auf der Baustelle eine reine Änderung der Reihenfolge als auch eine zusätzliche Drehung der Rohre um ihre Längsachse möglich. Zur Drehung der Rohre wäre ein an den Press-Schlitten angebrachter "Rollbock" erforderlich.

Wesentliche Grundlage zur Herstellung maßhaltiger Rohre ist der Einsatz ebenso maßhaltiger Stahlschalungen. Es wird daher vorgeschlagen, die Schalung mit hoch genauer Messtechnik zu vermessen, bevor diese in Betrieb genommen wird. Hierzu bieten sich vor allem die zuvor beschrieben Laser-Tracker an. Dadurch können künftig Imperfektionen auf der Muffenseite der Rohre vermieden werden.

Der Nachweis eingehaltener Herstelltoleranzen führt zu transparenter und konsequenter Qualitätssicherung. Imperfektionen als Summe aus einer Abweichung von der Rechtwinkligkeit und überlagerten Unebenheiten werden reduziert und Spannungskonzentrationen vermieden.

## Literaturverzeichnis

#### Benning, W. [Statistik, 2002]:

Statistik in Geodäsie, Geoinformation und Bauwesen, Heidelberg: Wichmann, 2002

**Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.** [ATV-A 125, 1996]: ATV-A 125, Rohrvortrieb, September 1996

## Deutsches Institut für Normung e.V. [DIN EN 295-7, 1995]:

DIN EN 295, Steinzeugrohre und Formstücke sowie Rohrverbindungen für Abwasserleitungen und -kanäle – Teil 7: Anforderungen an Steinzeugrohre und Verbindungen beim Rohrvortrieb, Dezember 1995

## Deutsches Institut für Normung e.V. [prEN1916, 1995]:

prEN 1916, Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton, August 1995

**Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V.** [FBS-Qualitätsrichtlinie – Teil 1, 2000]: FBS-Qualitätsrichtlinie – Betonrohre, Stahlbetonrohre, Vortriebsrohre und Schachtbauteile in FBS-Qualität für erdverlegte Abwasserkanäle und Leitungen, Ausführungen, Anforderungen und Prüfungen, Teil 1, August 2000

**o.V.** [Produktinformationen der Firma API, 2007]: http://www.apisensor.de/?gclid=CNPQosfYv40CFRYOZgodjhSGKQ (17.07.2007, 14:16 MEZ)

**o.V.** [Produktinformation der Firma DeltaSphere, 2007]: http://www.deltasphere.com/images/DeltaSphereSceneVisionApril07.pdf (15.07.2007, 08:43 MEZ) **o.V.** [Produktinformation der Firma Faro zu 3D-Laser-Scannern, 2007]: http://www.faro.com/FaroIP/Files/File/Techsheets%20Download/de\_LASER\_SCANN ER\_LS.pdf.PDF (12.07.2007, 15:50 MEZ)

**o.V.** [Produktinformation der Firma Faro zu Laser-Trackern, 2007]: http://www.faro.com/content.aspx?ct=ge&content=pro&item=3 (12.07.2007, 18:51 MEZ)

**o.V.** [Produktinformationen der Firma Leica Geosystems zu 3D-Laser-Scannern, 2007]: http://www.leica-geosystems.com/hds/en/lgs\_5570.htm (19.07.2007, 10:07 MEZ)

**o.V.** [Produktinformationen der Firma Leica Geosystems zu Laser-Trackern, 2007]: http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/products/laser\_tracker/lgs\_35317.htm (19.07.2007, 16:57)

**o.V.** [Produktinformationen der Firma Riegl, 2007]: http://www.riegl.com/terrestrial\_scanners/terrestrial\_scanner\_overview\_/terr\_scanner \_menu\_all.htm (24.07.2007, 13:26 MEZ)

**o.V.** [Produktinformationen der Firma Zoller + Fröhlich, 2007]: http://www.zf-laser.com/Z+F\_IMAGER5006\_D.pdf (22.07.2007, 09:24 MEZ)

**o.V.** [Produktinformation Minolta Vi-9i, 2007]: http://www.punktwolke.com/vi9i-main.php (20.07.2007, 11:32 MEZ)

**o.V.** [Produktinformation VX Spatial Station, 2007]: http://www.vermessungstechnik.de/produkte/download/TrimbleVX\_Deutsch.pdf (14.07.2007, 17:56 MEZ)

# Anhang

- 1. Ergebnisse der Tracker-Vermessungen bei den Untersuchungen in-situ
- 2. Ergebnisse der Vergleichsmessungen zur Überprüfung der entwickelten Messtechnik
- 3. Vermessungsergebnisse der untersuchten Rohre mit der entwickelten Messtechnik





= gegen Vortriebsrichtung				
59				
30				
31				
33				
34				
Kämpfer links 35				
36				
37				
38				
39				
40				
41				
	DATUM: INDEX	: ÄNDERUNG:		
Abweichungen von der Best-Fit-Ebene:				
■ +4 mm	Z I I I I I	z Meschke	VERMESSUNG         BAUABRECHNUNG REB	
+3 mm		URVERMESSUNGEN	3-D LASER SCANNEN	
→2 mm +2 mm +1 mm	НüGHELNER 52249 Esc Tel.: 0240:	STR. 22 Hweiler 3 / 88302-0 Fax: -26	EMAIL: HEINZ.MESCHKE@T-ONLINE.DE HTTP://www.vERMESSUNG-MESCHKE.DE	
-+0 mm	AUSFÜHRUNG:	WTH - AACHEN,		
-1 mm -2 mm	Le Projekt:	EHRSTUHL FÜR BAUBETRI	EB UND PROJEKTMANAGEMENT	
-3 mm	DARSTELLUNG:	15MAGG DFG 000005	3 - Сонтасние (1 дего-Толикео)	
-4 mm		ARSTELLUNG DER ABWEIC	HUNGEN ZUR BEST-FIT-EBENE ASSSTAB: ZEICHNUNG-NR.:	
	BEARBEITET: 03.08. GEPRÜFT:	2007 SCHOLTEN	1:10 ROHR_58_SE_TRACKER	



|--|



en Vortriebsrichtung	
31 32	
33	
34 Kämpfer links 35	
36	
38 38	
39	
	DATUM: INDEX: ÄNDERUNG:
Abweichungen von der Best-Fit-Ebene: +4 mm +3 mm	HEINZ MESCHKE          INGENIEURVERMESSUNGEN         INGENIEURVERMESSUNGEN
	HÜCHELNER STR. 22 52249 ESCHWEILER Tel.: 02403 / 88302-0 Fax: -26 HTTP://www.vermessung-meschke.de
mm -1 mm	ausführung: RWTH - Aachen, Lehrstuhl für Baubetrieb und Projektmanagement Projekt:
-3 mm -4 mm	DARSTELLUNG: AUFMASS DES ROHRES #76 - SPITZSEITE [LASER-TRACKER],
	DARSTELLUNG DER ABWEICHUNGEN ZUR BEST-FIT-EBENE       DATUM:     NAME:       BEARBEITET:     06.08.2007       ScHULZ     1:10



		I VERMESSUNG VERMESSUNG VERMESSUNG BAUABRECHNUNG REB BAUABRECHNUNG REB 3-D LASER SCANNEN BAUABRECHNUNG REB 3-D LASER SCANNEN BAUL: HEINZ.MESCHKE@T-ONLINE.DE HITP://www.VERMESSUNG-MESCHKE.DE HITP://WWW-MESCHKE.DE HITP://www.VERMESSUNG-MESCHKE.DE HITP://WWW-MESCHKE.DE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.BE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKE.EE HITP://WWW-MESCHKERE
		DATUM:     INDEX:     ÄNDERUNG:       ADTUM:     INDEX     ÄNDERUNG:       HOHEUR     ADERUNG:     ADERUNGEN         HOHEUR     ERCHKESSUNGEN         HOHELUR     ADERUNG:         HOHELUR     ADERUNG:         HOHELUR     ADERUNG:         HOHELUR     ADERUNG:         AUSFÜHRUN:     ADERUNG:         AUSFÜHRUN:     RWTH - AACHEN,         AUSFÜHRUNS:     AUSTUNL FÜR BAUBETRIEB UN         AUSSTELLUNG:     AUSTUNL FÜR BAUBETRIEB UN         PROJEKT:     AUSTUNL FÜR BAUBETRIEB UN         AUSSTELLUNG:     AUSTUNL FÜR BAUBETRIEB UN
iebsrichtung	19 18 Kämpfer rechts 17	weichungen von der Best-Fit-Ebene: +5 mm +3 mm +2 mm +1 mm -1 mm -1 mm -3 mm -4 mm



en Vortriebsrichtung	
3	
32 33	
34 Kämpfer links 35	
36 37	
39 38 39	
	DATUM: INDEX: ÄNDERUNG:
Abweichungen von der Best-Fit-Ebene: +4 mm +3 mm	HEINZ MESCHKE <ul> <li>Vermessung</li> <li>Vermessung</li> <li>Indeneurvermessungen</li> <li>Indistrictemesting</li> </ul>
+2 mm +1 mm	HÜCHELNER STR. 22 52249 Eschweiler Tel.: 02403 / 88302-0 Fax: -26 HTTP://www.vermessung-meschke.de
0 mm -1 mm -2 mm	Ausführung: RWTH - Aachen, Lehrstuhl für Baubetrieb und Projektmanagement Projekt:
-3 mm -4 mm	DARSTELLUNG: AUFMASS DES ROHRES #168 - SPITZSEITE [LASER-TRACKER], DARSTELLUNG DER ABWEICHUNGEN ZUR BEST-FIT-EBENE
	BEARBEITET: 06.08.2007 SCHULZ 1:10 ROHR_168_SE_TRACKER GEPRÜFT: 06.08.2007 SCHULZ 1:10 ROHR_168_SE_TRACKER



uffenseite = Vortriebsrichtung	
Kämpfer rechts	
Abweichungen von der Best-Fit-Ebene:	
+4 mm	
+3 mm +2 mm	DATUM: INDEX: ÄNDERUNG:
+1 mm +-0 mm	
-1 mm	HEINZ MESCHKE   VERMESSUNG
-2 mm -3 mm	INGENIEURVERMESSUNGEN 3-D LASER SCANNEN INDUSTRIEVERMESSUNG HÜCHELNER STR. 22
-4 mm 7 mm	52249 ESCHWEILER Tel.: 02403 / 88302-0 Fax: -26 Http://www.vermessung-meschke.de
	AUSFÜHRUNG: RWTH - AACHEN,
-7 mm	LEHRSTUHL FÜR BAUBETRIEB UND PROJEKTMANAGEMENT Projekt:
-9 mm -10 mm	DARSTELLUNG: AUFMASS DES ROHRES #4215 - MUFFENSEITE [LASER-TRACKER], DARSTELLUNG DER ABWEICHUNGEN ZUR BEST-FIT-EBENE
	DATUM:     NAME:     MASSSTAB:     ZEICHNUNG-NR.:       BEARBEITET:     02.07.2008     SCHOLTEN     1:10     4215_MS.DWG
	GEPRUFT:



bweich	ungen von der Best-Fit-Ebene:					
+	-4 mm					
+	-3 mm					
+	-2 mm	DATUM:	INDEX: ÄNDER	RUNG:		
+	-1 mm					
+	-0 mm					
_	1 mm	]			U VERMESSUNG	
_	2 mm			L F U C T 7 F RMESSUNGEN	BAUABRECHNL    3-D LASER SC	NG REB Annen
ſ	3 mm					JESSUNG
ī	4 mm	н л Н Л Н 22 Н	HELNER STR. 22 49 Eschweiler • 17413 / 883		EMAIL: HEINZ.MESCHKE@T-( HTTP://www.vfrmfssilng-mi	INLINE. DE
Ť	5 mm	-				
т —	6 mm	АИЗҒЁНКИМ	а: RWTH -	AACHEN,		
_	7 mm		LEHRSTI	JHL FÜR BAUBETRIEI	B UND PROJEKTMANAGEMENT	
- T	8 mm	PROJEKT:				
	9 mm	DARSTELLUN	16: AUFMAS:	s des Rohres #42	215 - Spitzende [Laser-Tr∂	CKER],
_	10 mm		DARSTEI	LUNG DER ABWEICH	IUNGEN ZUR BEST-FIT-EBENE	
			DATUM:	NAME: MA	SSSTAB: ZEICHNUNG-NR.:	
		BEARBEITET:	02.07.2008	SCHOLTEN ].	:10 4215_SE.DWG	
		GEPRÜFT:				

2, Spitzeno	de	
:htung = ge	egen Vortriebsrichtung	
~		
0	Kämpfer links	
0		
0		
Abw	veichungen von der Best-Fit-Ebene:	
1	+4 mm	
-	+3 mm	Ĺ
	+2 mm +1 mm	
ľ	+-0 mm	
•	-1 mm	
1	-2 mm	
• •	-3 mm -4 mm	
1	-5 mm	
1	-6 mm	AL
•	-7 mm	
•	-8 mm	
• •	-0 mm	
•		
		6



					DATUM: INDEX: ÄNDERUNG:			HEINZ MESCHKE [BAUABRECHNUNG REB	INGENIEURVERMESSUNGEN	HÜCHELNER STR. 22 52249 ESCHWEILER T-1 - 02204 - 02004 - 02004 - 02004 - 0100000000000000000000000000000000	TEL.: 02403 / 88302-0 FAX: -26 HTTP://www.vERMESSUNG-MESCHKE.D	аизгёнrung: RWTH - ААСНЕN, I гнрстини гёр Вашргтріер шир Ррп.іектманадемент			DARSTELLUNG: AUFMASS DES ROHRES #4216 - MUFFENSEITE [LASER-TRACKEF DARSTELLUNG DER ABWEICHUNGEN ZUR BEST-FIT-EBENE	DATUM: NAME: MASSSTAB: ZEICHNUNG-NR.: 2215 NS DWB	BEARBEITET: 02.07.2008   SCHOLTEN   1:1U   44.10_M3.Uwu GEPRÜFT:   1:1U   44.10_M3.Uwu
ffenseite = Vortriebsrichtung	Kämpfer rechts	Abweichungen von der Best-Fit-Ebene:	+4 mm	+3 mm	+2 mm	+1 mm	+-0 mm	-1 mm	-2 mm -3 mm	-4 mm	-5 mm	-6 mm	-7 mm	-8 mm	-9 mm	- IO MM	



					DATUM: INDEX: ÄNDERUNG:			HEINZ MESCHKE	INGENIEURVERMESSUNGEN	HÜCHELNER STR. 22 52249 Eschweiler 52249 Eschweiler	TEL.: 02403 / 88302-0 FAX: -26 HTTP://www.vermessung-meschke.de	AUSFÜHRUNG: RWTH - AACHEN,	LEHRSTUHL FÜR BAUBETRIEB UND PROJEKTMANAGEMENT Projekt:		DARSTELLUNG: AUFMASS DES ROHRES #4216 - SPITZENDE [LASER-TRACKER], DAPSTELLING DEP ARWEICHINGEN ZUD REST-FIT-FRENF	DATUM:     NAME:     MASSSTAB:     ZEICHNUNG-NR.:       BEARBEITET:     D2.07.2008     SCHOLTEN     1:10     4216_SE.DWG       GEPRÜFT:      1:10     4216_SE.DWG	
izende = gegen Vortriebsrichtung	Kämpfer links	Abweichungen von der Best-Fit-Ebene:	+4 mm	+3 mm	+2 mm	+1 mm	+-0 mm	-1 mm	-2 mm -3 mm	-4 mm	-5 mm	-6 mm	-7 mm	-8 mm	mm 6-	-10 mm	







# Rohr 2:







# Rohr 4:







# Rohr 6:







# Rohr 8:







# Rohr 10:







## Rohr 12:







## Rohr 14:







## Rohr 16:







# Rohr 18:






Rohr 20:



Rohr 21:



## Rohr 22:

