

F.I.T. Messtechnik GmbH

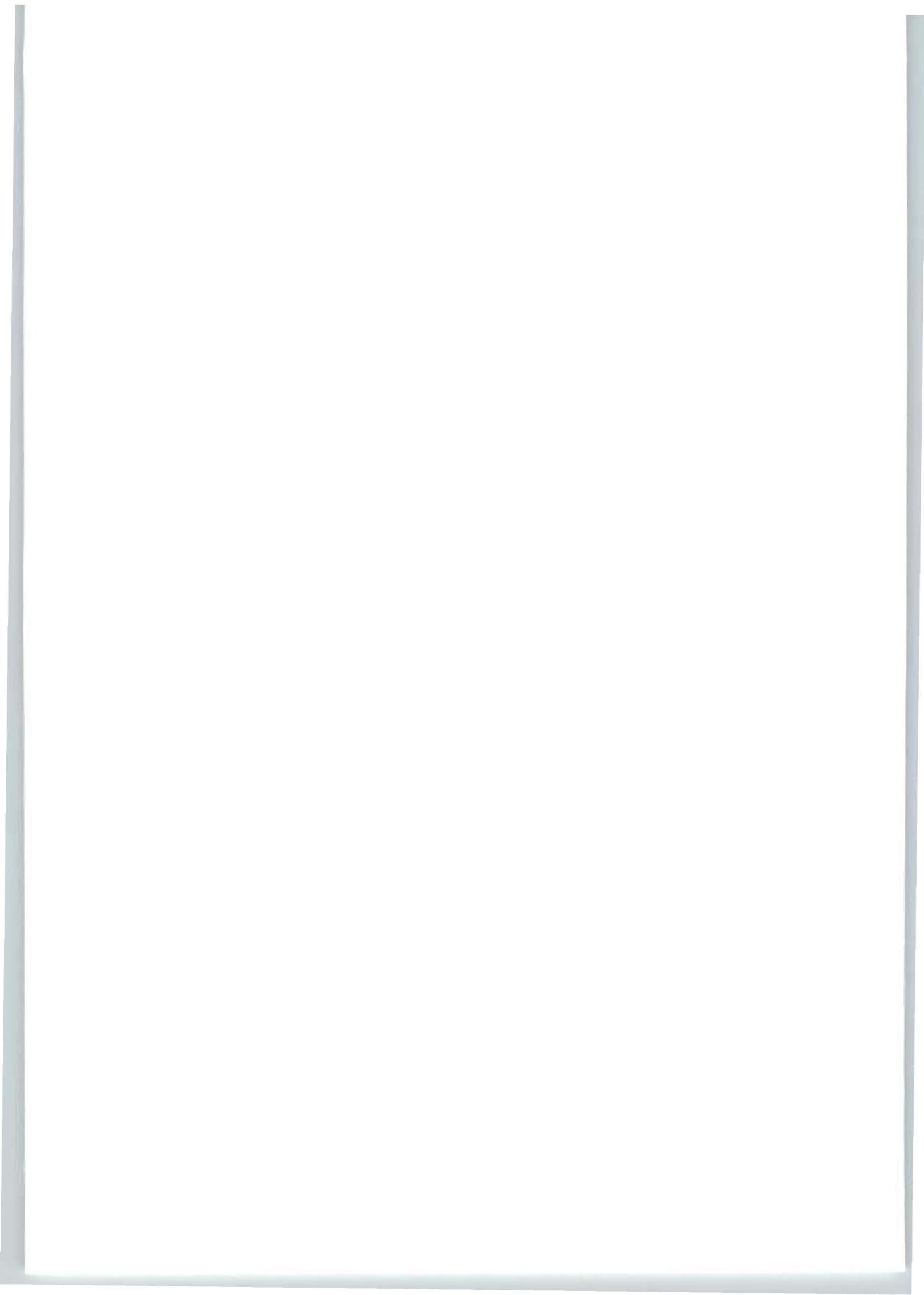
Entwicklung eines Meßsystems für Wanddickenverluste an Pipelines

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 15845 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Johann H. Hinken, Dr. Guenadi Krivoi
und Dipl.-Ing. J. Peter Kallmeyer

Bad Salzdetfurth, September 2000



11/95

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | | |
|----|-------|---------|------|-------------|---------------|
| Az | 15845 | Referat | 21/0 | Fördersumme | 155.000,00 DM |
|----|-------|---------|------|-------------|---------------|

Antragstitel Entwicklung eines Meßsystems für Wanddickenverluste an Pipelines

Stichworte Verfahren; Meßsystem; Sensor; Öl

| | | | |
|-----------------|----------------------|--------------------|------------------------|
| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) |
| 14 Monate | 05/99 | 07/2000 | keine |

Zwischenberichte: alle 6 Monate Kurzbericht

Bewilligungsempfänger F.I.T. Messtechnik GmbH
Postfach 11 47
31158 Bad Salzdetfurth

Tel 05063/89580

Fax 5063/89666

Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Hinken

Bearbeiter

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Es gibt weltweit mehr als 10.000 km erdverlegter Öl- und Gas-Pipelines, die nicht molchbar sind. Sie korrodieren leicht, weil bei der Gewinnung von Öl und Gas erhebliche Mengen von salzhaltigem Wasser mit gefördert werden. Dies führt allein in Rußland zu ca. 26.000 Leitungsbrüchen mit Leckagen pro Jahr, verbunden mit erheblicher Umweltverschmutzung und Produktionsausfall.

Solche erdverlegten Rohre können bisher von der Erdoberfläche aus nicht auf Wanddickenverminderungen hin geprüft werden. Wegen des starken internationalen Bedarfs an einer solchen Prüfung hat die F.I.T. Messtechnik GmbH das Konzept eines entsprechenden Prüfverfahrens entwickelt, in einer labormäßigen Machbarkeitsstudie für einen Sonderfall erprobt und es hochgerechnet für unterschiedliche Verlegeparameter. Auf dieser Basis wurde das Interesse bei einigen in- und ausländischen Ölfeldbetreibern hinterfragt. Die Resonanz war überwiegend positiv.

In diesem Fördervorhaben soll der Prototyp eines solchen Meß- und Prüfsystems entwickelt werden und anschließend der ölfördernden Industrie im Feldeinsatz vorgestellt werden. Bei positivem Ausgang will die F.I.T. Messtechnik GmbH eine Geschäftstätigkeit auf diesem Gebiet aufnehmen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

1. Entwicklung des Prototyp I

Zunächst geht es um die Entwicklung und den Aufbau des Prototyp I, mit dem die Funktion des Verfahrens unter einsatznahen Bedingungen nachgewiesen werden soll. Alle grundsätzlichen Funktionen sollen hier schon realisiert und untersucht werden. Schutzmaßnahmen zum Unfall- und Personenschutz müssen schon beim Prototyp I realisiert werden.

Der Prototyp I wird in allen anderen Punkten nur in einer Minimalkonfiguration aufgebaut werden, damit das finanzielle Risiko, bis die Entscheidung zur Fortführung getroffen werden kann, so gering wie möglich gehalten wird. Der Prototyp I hat daher nur eine einzige Sensorzeile. Die Optimierung der Meßzeit hat bei der Entwicklung des Prototyp I nicht die oberste Priorität. Dieser Punkt wird erst in der Weiterentwicklung zum Prototyp II in aller Tiefe berücksichtigt.

Die Ausführung des Prototyp I ist noch nicht wettergeschützt nach den Vorgaben des harten Feldeinsatz. Eine bedienerfreundlichen Softwareoberfläche oder der fertigungsgerechte Aufbau wird berücksichtigt, kann aber nicht bei allen Komponenten realisiert werden. Die Entwicklung des Prototyp I endet mit der Charakterisierung der Systemdaten in der FITM.

Die Entwicklung des Prototyp I wird 6 Monate dauern.

2. Testmessungen

Der Prototyp I muss mit all seinen Funktionen getestet werden. Die Grenzen des Prüfverfahrens sind auszuloten. Dies soll anhand von vergrabenen Rohren mit unterschiedlichsten Fehlern geschehen. Die Testmessungen dienen auch dazu, Möglichkeiten zur Optimierung aufzuzeigen. Hierbei sollen Verbesserungen im Verfahren und der Bedienersoftware erkannt werden. Eine Umsetzung kann während der Testmessungen nicht geschehen. Es ist daher neben dem Feldtest ein Katalog von Optimierungsmöglichkeiten zu erstellen, der bei der Entscheidung zur Fortführung vorliegen soll. Die Testmessungen sollen das Potential des Prüfverfahrens voll aufzeigen.

Für die Testmessungen ist ein Zeitraum von 2 Monaten vorgesehen.

Anhand der Ergebnisse aus den Testmessungen und anhand des Optimierungskataloges soll im Anschluss die Entscheidung zur Fortführung getroffen werden. Dieser Meilenstein dient zur Minderung des finanziellen Risikos.

3. Entwicklung des Prototyp II

Erst beim Prototyp II wird der für den harten Feldeinsatz nötige Wetterschutz für alle Komponenten umgesetzt. Weiter ist der Prototyp II um drei Sensorzeilen und ein GPS-Modul zu ergänzen und für größere Prüflängen auszulegen. Neben diesen Punkten sind Möglichkeiten zur Optimierung im Prototyp II umzusetzen.

Für das Feldaufnehmermodul ist ein Funktionsdisplay zur Vereinfachung der Bedienung zu entwickeln und aufzubauen. Dies kann erst zu diesem Zeitpunkt geschehen, da erst nach einem Feldtest klar erkennbar ist, in welcher Form das Bedienungselement (Funktionsgriff) und die Fehleranzeige ausgeführt werden kann.

Der fertigungsgerechte Aufbau ist jetzt auch in allen Komponenten umzusetzen.

Die Entwicklung des Prototyp II endet mit weiteren Feldtests und der Dokumentation aller Einzelmodule. Die Feldtests werden an Pipelines zusammen mit den Pipelinebetreibern durchgeführt.

Die Entwicklung des Prototyp II aus dem Prototyp I wird insgesamt 6 Monate dauern.

Ergebnisse und Diskussion

Es ist ein Messsystem entwickelt worden, mit dem man Wanddickenverluste an Pipelines von oberhalb des Erdbodens erkennen kann. Voraussetzung hierzu ist, dass die Rohre nahtlos gezogen sind.

Das System besteht aus einem Stromquellenmodul und einem Feldaufnehmermodul.

Das Stromquellenmodul wird mittels zweier Verbindungsleitungen mit der Rohrleitung verbunden. Die Rohrleitung wird zwischen den beiden Kontaktstellen mit dem Feldaufnehmermodul untersucht. Dies geschieht durch schrittweises Abtasten mit dem Feldaufnehmermodul. Beim Abtasten wird „On Line“ der Versatz der Stromfäden bestimmt und grafisch dargestellt.

An Stellen mit einem Wandabtrag ergibt sich ein Versatz zwischen den Stromfäden.

Mit dem vorhandenen System können Wandabträge in der Größenordnung von etwa 50 cm³ bei einem 3“-Rohr in einer Tiefe von ca. 1,0 m noch erkannt werden. Der Versatz der Stromfäden liegt bei mehr als 1,3 mm.

Bodeneinflüsse sind sichtbar, spielen aber eine untergeordnete Rolle. Zu den Bodeneinflüssen gehören die Änderung der Suszeptibilität und die Bodenleitfähigkeit. Beide Einflüsse verändern die Horizontalkomponente des Magnetfeldes um weniger als 1/1000 und damit den Versatz der Stromfäden um weniger als 0,5 mm.

Bei den Untersuchungen zu dem Messsystem sind Erkenntnisse zur Weiterentwicklung gewonnen worden, mit denen der Wandabtrag auch qualitativ bestimmt werden kann.

Mit solch einer Auswertung hat man die Möglichkeit, bei einem Leitungstest dem Kunden mitzuteilen, dass die Wand an dieser markanten Stelle zu z.B. 60% abgetragen ist und dass es einen Handlungsbedarf zur Reparatur gibt.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Als ökonomische Bilanz und zum Thema Verbreitung der Vorhabensergebnisse ist folgendes festzustellen: Am 3. Mai 2000 wurde das System in seiner damaligen Entwicklungsphase einem eingeladenen internationalen Fachpublikum präsentiert. Die Vertreter von Ölnetzbetreibern bekundeten großes und aktuelles Interesse an kommerziellen Tests sobald Seriengeräte einsetzbar sind. Besonderes Interesse gab es aus Europa und dem mittleren Osten. Ab Anfang 2000 sind kommerzielle Tests geplant. Bei der Präsentation wurde auf die finanzielle Förderung durch die Stiftung Umwelt mit Dank hingewiesen.

Fazit

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein fortgeschrittener Entwicklungsstand für ein neues Pipelineprüfsystem erreicht. Die an die Entwicklungsarbeiten gestellten Erwartungen wurden bestätigt. Mit dem System sind zukünftig vorzugsweise Feldeleitungen zu prüfen, die von Tiefbohrstationen bis zur ersten Separationsstation führen. Diese haben Leitungsdurchmesser von ca. 3" bis 8". Nach wie vor gibt es für diese Prüfaufgaben kaum konkurrierende Verfahren. Daher ist zu erwarten, dass mit dem neuen System einem großen Teil von solchen Pipelinebrüchen vorgebeugt werden kann, die bisher zu

erheblichen Umweltbelastungen und -verschmutzungen mit Öl geführt haben.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt ● An der Bornau 2 ● 49090 Osnabrück ● Tel 0541/9633-0 ●
Fax 0541/9633-190

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|--|--------------|
| 1. Zusammenfassung | 6 |
| 2. Einleitung | 7 |
| 3. Das Arbeitsprinzip | 8 |
| 4. Entwicklung des Prototyp I | 9 |
| 4.1 Stromquellenmodul | 10 |
| 4.2 Feldaufnehmermodul | 10 |
| 5. Testmessungen | 11 |
| 5.1 Messrohr | 11 |
| 6. Entwicklung des Prototyp II | 12 |
| 6.1 Stromquellenmodul | 12 |
| 6.2 Feldaufnehmer | 12 |
| 6.3 Software des Prototyp II | 13 |
| 7 Feldtests | 14 |
| 7.1 Meßrohr mit Innenabtrag | 14 |
| 7.2 Rohr mit Aussenabtrag im Feld | 12 |
| 7.3 Fehlerrohr für die Präsentation des Systems | 15 |
| 8 Fazit | 16 |
| 9. Literaturverzeichnis | 18 |
| 10. Anhänge | 19 |

Bearbeiter: Ka / 21.07.2000

Verteiler: Bundesumweltstiftung, Hi, Ka

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Bild 1: Stromdurchflossener dünner Leiter und stromdurchflossene Rohrleitung im Vergleich

Bild 2: Rohr mit unterschiedlichen Wanddicken

Bild 3: Lage der Stromfäden für ein ungestörtes Rohr und ein Rohr mit Wandabtrag

Bild 4: Prinzipschaltung für den Aufbau des Prototyp I

Bild 5: Foto des Prototyp I

Bild 6: Angezeigte Daten während der Untersuchung

Bild 7: Messrohr, 3“-Rohr mit eingeschweißtem Innendefekt

Bild 8: Messergebnis des Messrohrs

Bild 9: Seitenversatz der Sensorzeile

Bild 10: Abstand zwischen Rohr und Sensorzeile

Bild 11: Blockschaltbild des Prototyp II

Bild 12: Foto des Prototyp II

Bild 13: Bedienoberfläche des Meßprogramms

Bild 14: Messdaten des Messrohrs gemessen mit dem Prototyp II

Bild 15: Messdaten ohne Fehlstelle

Bild 16: Foto des Rohrs mit Außenabtrag.

Bild 17: Messdaten mit Fehlstelle

Bild 18: Messdaten mit Fehlstelle eingegraben

Bild 19: Fehlerrohr für die Präsentation

Bild 20: Fehlerrohr vor den Eingraben

Bild 21: Betrag des Stromfadenversatzes

Bild 22: Tiefen- und Seitenversatz des Stromfadens

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Rohrtiefe:

Mit der Rohrtiefe ist der Abstand zwischen der Erdoberfläche (Lage der Magnetfeldsensoren) und der geometrischen Mitte der Rohrleitung bezeichnet.

Relativer Wandabtrag:

Hiermit wird die Reduktion der Wanddicke einer Rohrleitung bezeichnet. Sie wird in Prozent angegeben und ist bezogen auf die Sollwanddicke der Rohrleitung.

Skineffekt:

Der Ohmsche Widerstand eines Leiters ist bei hochfrequenten Strömen stark erhöht gegenüber dem Gleichstromwiderstand. Der wirksame Stromquerschnitt wird vermindert, da die Ströme fast ausschließlich in einer dünne Oberflächenschicht verlaufen. Die Stromlinien im Inneren werden durch Induktionswirkung an die Oberfläche abgedrängt. Dieser Effekt tritt bei Stahlrohren schon bei relativ niedrigen Frequenzen von z.B. 1,5 kHz auf.

1. Zusammenfassung

Im Rahmen des Förderprojekts ist ein Messsystem für Wanddickenverluste an Pipelines entwickelt und erprobt worden.

Das Messsystem dient zur Untersuchung von nicht molchbaren Feldesleitungen, wie sie z. B. als Verbindungsleitung zwischen Tiefpumpe und erstem Abscheider in Erdölfeldern verlegt werden.

Weltweit sind etwa 100 000 km nicht molchbarer Feldesleitungen verlegt. Jährlich gibt es hier bis zu 10 000 Schadensfälle, bei dem austretendes Erdöl die Umwelt in großem Maße schädigt. Das Messsystem soll hier vorbeugend zum Einsatz kommen, um frühzeitig erkennen zu können, ob an solchen Feldesleitungen schon signifikanter Wandabtrag vorliegt.

Mit dem Messsystem sollen diese Feldesleitungen auf mögliche Wandabträge hin untersucht werden. Hierzu ist die Feldesleitung an zwei Stellen zu kontaktieren. Es wird dann ein entsprechender Strom, der im Stromquellenmodul erzeugt wird, auf die Rohrleitung gegeben. Mit einem zweiten Modul, dem Feldaufnehmer, geht man die Rohrleitung zwischen den Kontaktstellen ab und mißt schrittweise das magnetische Feld der Rohrleitung. An Stellen mit Wandabträgen gibt es eine Störung des Stromflusses, die eine Störung im Magnetfeld nach sich zieht. Diese Störung im Magnetfeld wird mit dem Feldaufnehmer erkannt. Ist die Störung oberhalb eines bestimmten Niveaus, so kann man von einem Wandabtrag ausgehen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass man mit dem System Wandabträge mit einem Abtragsvolumen von 40 cm³ bei 3"-Rohren noch sicher erkennen kann. Das Rohr lag dabei in einer Tiefe von 1,0 m.

Bei den Untersuchungen hat sich für zukünftige Weiterentwicklungen auch eine Möglichkeit herauskristallisiert, den prozentualen Wandabtrag an einer möglichen Defektstelle zu bestimmen. Somit wäre es möglich, Defektstellen, ohne sie aufzugraben, zu bewerten. Diese Möglichkeit stellt eine sinnvolle Ergänzung des Messsystems dar. Eine Weiterentwicklung würden die Akzeptanz des Messsystems wesentlich steigern.

2. Einleitung

Das Entwicklungsvorhaben sollte in zwei Schritten durchgeführt werden. Zunächst geht es um die Entwicklung und den Aufbau des Prototyp I (6 Monate), mit dem die Funktion des Verfahrens unter einsatznahen Bedingungen nachgewiesen werden soll. Alle grundsätzlichen Funktionen sollen hier schon realisiert und untersucht werden. Schutzmaßnahmen zum Unfall- und Personenschutz müssen schon beim Prototyp I realisiert werden.

Der Prototyp I wird in allen anderen Punkten nur in einer Minimalkonfiguration aufgebaut werden. Das finanzielle Risiko, bis die Entscheidung zur Fortführung getroffen werden kann, soll so gering wie möglich gehalten werden. Der Prototyp I hat daher nur eine Sensorzeile. Die Optimierung der Messzeit hat bei der Entwicklung des Prototyp I nicht die oberste Priorität. Dieser Punkt wird erst in der Weiterentwicklung zum Prototyp II in aller Tiefe berücksichtigt.

Die Ausführung des Prototyp I ist noch nicht wettergeschützt nach den Vorgaben des harten Feldeinsatzes. Eine bedienerfreundliche Softwareoberfläche oder der fertigungsgerechte Aufbau wird berücksichtigt, kann aber nicht bei allen Details realisiert werden. Die Entwicklung des Prototyp I endet mit der Charakterisierung der Systemdaten in der F.I.T. Messtechnik GmbH (FITM).

Der Prototyp I muss mit all seinen Funktionen getestet werden. Die Grenzen des Prüfverfahrens sind auszuloten. Dies soll anhand von vergrabenen Rohren mit unterschiedlichsten Fehlern geschehen. Die Testmessungen dienen auch dazu, Möglichkeiten zur Optimierung aufzuzeigen. Hierbei sollen Verbesserungen im Verfahren und der Bedienersoftware erkannt werden. Eine Umsetzung kann während der Testmessungen (2 Monate) nicht geschehen. Es ist daher neben dem Feldtest ein Katalog von möglichen Verbesserungen zu erstellen, der bei der Entscheidung zur Fortführung vorliegen soll. Die Testmessungen sollen das Potential des Prüfverfahrens voll aufzeigen.

Erst beim Prototyp II wird der für den harten Feldeinsatz nötige Wetterschutz für alle Komponenten umgesetzt. Weiter ist der Prototyp II um zwei Sensorzeilen und für größere Prüflängen auszulegen. Neben diesen Punkten sind Möglichkeiten zur Optimierung im Prototyp II umzusetzen.

Für das Feldaufnehmermodul ist ein Funktionsdisplay zur Vereinfachung der Bedienung zu entwickeln und aufzubauen. Dies kann erst zu diesem Zeitpunkt geschehen, da erst nach einem Feldtest klar erkennbar ist, in welcher Form das Bedienungselement (Funktionsgriff) und die Fehleranzeige ausgeführt werden kann.

Der fertigungsgerechte Aufbau ist jetzt auch in allen Komponenten umzusetzen.

Die Entwicklung des Prototyp II endet mit weiteren Feldtests. Die Feldtests werden an Pipelines zusammen mit den Pipelinebetreibern durchgeführt.

Die Entwicklung des Prototyp II aus dem Prototyp I wird insgesamt 6 Monate dauern.

3. Das Arbeitsprinzip

Eine stromdurchflossener Leiter baut um sich herum ein Magnetfeld auf. Die Stärke des Magnetfeldes ist abhängig von der Stromstärke und dem Abstand, in dem das Magnetfeld gemessen wird. Ein stromdurchflossener dünner linearer Leiter erzeugt ein zylinderförmiges Magnetfeld. Bestimmt man nun an mehreren Aufpunkten die Stärke des Magnetfeldes, so kann man unter entsprechenden Randbedingungen den Abstand der Aufpunkte zum stromdurchflossenen Leiter bestimmen.

Nimmt man statt eines dünnen linearen Leiters ein Stahlrohr und läßt einen gleich großen Strom durch das Rohr fließen, so entsteht ebenfalls ein Magnetfeld, wie es auch ein dünner linearer Leiter erzeugt hätte. Oder anders ausgedrückt, ein Stromfaden im geometrischen Zentrum der Rohrleitung erzeugt das gleiche Magnetfeld wie der Strom durch die Rohrleitung.

Bild 1 zeigt den stromdurchflossenen dünnen Leiter und das Rohr im Vergleich

Was passiert, wenn nun der Strom durch ein unendlich langes Rohr mit einer Wanddicke wie sie in Bild 2 dargestellt, ist fließt? Es kommt zu einer Verschiebung des Stromfadens zu der Seite mit der dickeren Wandung. Würde man unter gleichen Randbedingungen wie oben den Abstand zwischen den Aufpunkten und den Stromfäden bestimmen, erhält man einen um ΔZ_m anderen Abstand. Die Änderung des Abstandes kann bei Rohren mit einem Durchmesser von ca. 100 mm und einem Wandabtrag von 50 % in der 12:00-Uhr-Position einige mm betragen.

Wüsste man die Tiefe H der vergrabenen Rohrleitung exakt, könnte man aus der Stärke des oberirdischen Magnetfeldes den Versatz des Stromfadens bestimmen und auf diese Weise ein Rohrleitungsprüfgerät aufbauen.

Leider ist die Lage einer Rohrleitung nicht so präzise bekannt. Hinzu kommt, dass die Geländeunebenheiten im Bereich von einigen 10 cm je Meter liegen.

Man muss sich mit geeigneten Mitteln eine Information über die Lage der Rohrleitung verschaffen. Dies geht durch geschickte Nutzung des Skin-Effekts¹.

Die stromdurchflossene Wandung einer Rohrleitung zeigt für Ströme unterschiedlicher Frequenz folgendes Verhalten: Bei sehr tiefen Frequenzen, nahe dem Gleichstrom, fließt ein Strom mit gleichmäßiger Stromdichte in der gesamten Wandung. Bei hohen Frequenzen fließt der Strom nur noch an der Außenwand des Rohres. Dieser Effekt wird in der Literatur¹ als Skin-Effekt beschrieben.

Für Stahlrohre tritt dieser Effekt schon bei Frequenzen um 1,5 kHz auf.

Denkt man sich nun einen Wandabtrag auf der Innenseite eines Rohres, wie er in Bild 3 dargestellt ist, und gibt auf dieses Rohr einen sehr niederfrequenten Wechselstrom bei z.B. 7 Hz und einen hochfrequenten Wechselstrom bei z.B. 1500 Hz passiert folgendes:

a. Der hochfrequente Wechselstrom fließt auf der Außenwand. Führt man die Rückrechnung für den hochfrequenten Stromfaden für die in Bild 3 dargestellte Anordnung durch, erhält man exakt den Abstand zum Stromfaden im Zentrum des Rohres. Dieser ist hier mit einem Kreis gekennzeichnet.

b. Führt man die Berechnung für den niederfrequenten Stromfaden durch, bekommt man eine Verschiebung des Stromfadens aus dem geometrischen Zentrum der Rohrleitung. In Bild 3 ist die Verschiebung mit einem Quadrat gekennzeichnet.

Vereinfacht ausgedrückt heißt das: Der Wandabtrag auf der Innenwand führt zu einer Differenz in der Position des hochfrequenten und des niederfrequenten Stromfadens. Hierdurch sind die Magnetfelder, die durch sie erzeugt werden, ebenfalls geringfügig verschoben. Bestimmt man das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Rohrleitung an der Erdoberfläche mit geeigneten Mitteln, kann man mit diesem Verfahren einen Wandabtrag in der Rohrleitung bestimmen. Eine Differenz im Ort der Stromfäden ergibt sich an Stellen mit einem Wandabtrag.

Durch die Nutzung des hochfrequenten Wechselstroms hat man sich das notwendige Bezugssystem für die Untersuchung einer vergrabenen Rohrleitung geschaffen.

Dies funktioniert in ähnlicher Weise auch für Außenabträge, allerdings sind die Zusammenhänge für die Verschiebung der einzelnen Stromfäden komplizierter.

Das Messsystem für Wanddickenverluste an Pipelines funktioniert nach diesem Arbeitsprinzip.

4. Entwicklung des Prototyp I

Die Entwicklung des Prototyp I enthält zwei Arbeitspakete. Zunächst ist eine Stromquelle zu bauen, die in der Lage ist, Ströme von bis zu 20 A für die beiden benötigten Arbeitsfrequenzen herzustellen.

Parallel hierzu ist ein Magnetfeldaufnehmer mit 6 Magnetfeldsensoren, die in Zeilenform angeordnet sind, herzustellen. Aus den Signalen der Magnetfeldsensoren kann dann die Rückrechnung auf die Verschiebung der Stromfäden vorgenommen werden.

In Bild 4 ist die Prinzipschaltung für den Aufbau für des Prototyp I dargestellt. Bild 5 zeigt ein Foto des fertig aufgebauten Prototyp I, wie er für die Testmessungen eingesetzt wurde.

Beim Prototyp I ist schon ein Funkmodem vorgesehen, welches die Verbindung zwischen Stromquelle und Feldaufnehmer herstellt.

4.1 Stromquellenmodul

In einem 19"-Gehäuse sind ein PC mit Soundkarte und A/D-Wandlerkarte, eine unterbrechungsfreie Stromversorgung, ein Audioverstärker, und ein Messwiderstand untergebracht. Die Stromversorgung übernimmt ein benzinbetriebener Generator. Über die Soundkarte werden die beiden Signalfrequenzen erzeugt und im nachgeschalteten Audioverstärker verstärkt. In die Kabelzuführungen zur Rohrleitung ist ein Messwiderstand geschaltet, der zur Strommessung benötigt wird. An den Messwiderstand angeschlossen ist die A/D-Wandlerkarte, die während der Untersuchung den aktuellen Rohrleitungsstrom misst. Die Stromstärke wird dann über das Funkmodem zum Feldaufnehmer geschickt.

Der Stromquellenrechner wird im Slavemode betrieben. Alle Aktionen werden vom Feldaufnehmerrechner gesteuert. Hierzu gehört das Ein- und Ausschalten des Stromes, die Strommessung mit der Übertragung der aktuellen Stromdaten und die Stromkonstantregelung der beiden Ströme.

4.2 Feldaufnehmermodul

Kernelement des Feldaufnehmers ist die Sensorzeile mit 6 Magnetfeldsensoren vom Typ Fluxgate. Mit dieser Sensorzeile wird die Horizontalkomponente des Magnetfeldes der Rohrleitung an 6 Positionen bestimmt und über die A/D-Wandlerkarte zur Weiterbearbeitung in das Laptop eingelesen. Bild 4 zeigt das Prinzip des Feldaufnehmers. In einem Tragegestell sind Akkumulator, die Ausleseelektronik für die Fluxgates, das Funkmodem und das Laptop untergebracht.

Zur Untersuchung einer Pipeline geht man nun schrittweise (mit ca. 25 cm Abstand) mit der Sensorzeile über die Rohrleitung. Bei jedem Messschritt wird das Magnetfeld der Rohrleitung gemessen. Aus den 6 Magnetfelddaten wird der Abstand des Stromfadens des hochfrequenten und des niederfrequenten Stromes zur Sensorzeile berechnet. Um die Berechnung sehr präzise durchzuführen, ist die aktuelle Stromstärke nötig. Diese wird nach der Aufnahme der Magnetfelddaten von dem Feldaufnehmer über das Funkmodem von der Stromquelle abgefragt.

Nach erfolgter Berechnung wird die Differenz der Stromfäden

-hochfrequente Stromfadenposition minus niederfrequente Stromfadenposition-

gespeichert und parallel zur Anzeige gebracht.

Die Anzeige geschieht in Form eines Seitenversatzes und Tiefenversatzes. Bild 6 zeigt den Ausdruck der Anzeige, die während des Pipelinetests kontinuierlich um weitere Meßpunkte ergänzt wird.

5. Testmessungen

Unmittelbar zu einem wichtiger Meilenstein bei der Entwicklung führen die Testmessungen, die mit dem Prototyp I durchgeführt werden sollen. Von den Ergebnissen der Testmessungen ist die Fortführung des Projektes mit der Entwicklung des Prototyp II abhängig.

Ziel der Testmessungen ist es, die Anwendbarkeit des Verfahrens an Rohrleitungen zu prüfen und die technischen Grenzen des Verfahrens auszuloten. Von besonderer Bedeutung ist es, den Einfluss des Bodens, das Rauschverhalten der Magnetfeldsensoren, die magnetischen Störungen der Umgebung und die Einflüsse von nahtlos gezogenen Rohren festzustellen. Die Ansprechschwelle des Verfahrens soll festgestellt werden.

Nur bei positivem Ausgang der Testmessungen soll mit der Entwicklung und dem Bau des Prototyp II begonnen werden.

5.1 Messrohr

In ein 8 m langes 3"-Rohr mit einer Wanddicke von 6,2 mm ist ein Innendefekt mit 50 % Wanddickenreduktion auf einer Länge von 0,5 m mit einem Winkelbereich von 180° eingebracht worden. Der Defekt ist durch Einschweißen eines zweiten Rohrstückes hergestellt worden. Bild 7 zeigt das „Messrohr“ und die Lage des Defektes.

Durch schrittweises Abgehen mit einem Abstand von 25 cm wird das Rohr abgetastet. Der Defekt zeigt nach oben, was nach unserer Orientierung der 12:00-Uhr-Position entspricht.

Der Abstand zwischen Rohr und Sensorzeile schwankt zwischen 50 cm und 60 cm. Die Schwankungen liegen an der Bodenunebenheit.

Bild 8 zeigt ein typische Messergebnis für das Messrohr. Man erkennt deutlich die Differenz der Stromfadenpositionen in Bereich des Defekts. Den deutlichsten Versatz hat der Delta-Zm-Wert. Die Richtung des Stromversatzes entspricht der Vorüberlegung. Der Versatz zeigt in die negative z-Richtung. Die große Welligkeit des Verlaufs zu Beginn und am Ende des Rohres liegt an der punktförmigen Stromeinkopplung. Der Strom benötigt eine Strecke von etwa 1 m, bis er sich gleichmäßig über den gesamten Querschnitt der Rohrwandung verteilt hat.

Bild 9 zeigt den Seitenversatz, den die Sensorzeile zum Meßrohr hat, und in Bild 10 ist der Abstand zwischen Rohr und Sensorzeile dargestellt. Hier sind Schwankungen im Bereich von bis zu 10 cm erkennbar, die auf den Versatz der Stromfäden keinen Einfluss haben. Das System ist weitestgehend unempfindlich gegen diese Versätze.

Mehrere Messdurchläufe an dem Messrohr haben gezeigt, dass mit dem Prototyp I eine Reproduzierbarkeit in der Größenordnung von ± 0.8 mm erzielt werden kann.

Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass die Grenze der Reproduzierbarkeit zum großen Teil auf Temperaturschwankungen zurückzuführen ist. Als Ursache seien an dieser Stelle die Fluxgate-Sensoren genannt, bei denen die Ausgangssignale geringfügig von der Umgebungstemperatur abhängig sind.

6. Entwicklung des Prototyp II

Die Funktion des Messprinzips konnte anhand des Prototyp I mit großem Erfolg nachgewiesen werden. Bei der Entwicklung des Prototyp II geht es nun darum, die Erkenntnisse aus dem Prototyp I einfließen zu lassen und ein System zu entwickeln, das unter realen Einsatzbedingungen zu arbeiten in der Lage ist. Die Messgeschwindigkeit, die Anpassung der Programmoberfläche und die Handhabung im Gelände ist dabei von großer Bedeutung.

In Bild 11 ist das Blockdiagramm des Prototyp II dargestellt.

Bild 12 zeigt den fertig aufgebauten Prototypen, wie er für die weiteren Untersuchungen und bei der Präsentation eingesetzt wurde.

6.1 Stromquellenmodul

Beim Stromquellenmodul beschränken sich die Änderungen auf das Anbringen einer Ladestation für die Akkumulatoren, das Anbringen eines Wetterschutzes in Form einer Tür und eines klappbaren Deckels und Verbesserungen im Programm.

6.2 Feldaufnehmer

Die größten Änderungen hat es beim Feldaufnehmer gegeben. So ist ein wettergeschützter Rucksack entstanden, in dem auch das Laptop eingebaut worden ist. Als Stromversorgung für den Rucksack kommen NiCd-Akkumulatoren mit einer Kapazität von 5 Ah zum Einsatz.

Die Sensorzeile ist durch ein Sensorarray mit 6 Sensoren in 4 Zeilen ersetzt worden. Jeder der Magnetfeldsensoren sitzt in einer kardanischen Aufhängung. Die Sensorelektronik ist auf 8 Eingänge vergrößert worden.

Die vergrößerte Sensorelektronik ist ebenfalls im Rucksack untergebracht worden.

Der Rucksack ist um ein Funktionsdisplay ergänzt worden. Hiermit können die Meßdaten „On Line“ beobachtet werden. Gleichzeitig können die Messfunktionen über einfache Tastenfunktionen gesteuert werden. Das Funktionsdisplay ist rechts am Rucksack an einem Auslegerarm angebracht.

Bild 12 vermittelt einen Eindruck der Änderungen des Prototyp II gegenüber dem Prototyp I.

Besonderen Wert wurde auf das Gewicht des Arrays und des Rucksacks gelegt. Für den Rucksack gilt, dass die 20-kg-Grenze nicht überschritten werden darf.

Das Sensorarray ist mit seinen Abmessungen bei gleichzeitig hohem Gewicht sehr unhandlich. Mit 75 cm Länge, einer Breite von 120 cm und einem Gewicht von unter 10 kg ist hier bezüglich Handlichkeit ein tragbarer Kompromiß geschaffen worden. Bei der Herstellung des Sensorarrays dürfen nur unmagnetische Materialien verwendet werden. Als Werkstoff für die Herstellung ist Holz zum Einsatz gekommen. Der Rahmen und auch der Tragegriff bestehen aus Holz. Die Kleinteile, wie die Wetterschutzgehäuse der Magnetfeldsensoren und die kardanischen Aufhängungen, bestehen aus Kunststoff.

6.3 Software des Prototyp II

Ein weiterer Unterschied zwischen Prototyp I und II liegt in der Software. Die Softwareoberfläche für den Prototyp I ist für die ersten sehr wissenschaftlichen Untersuchungen angepasst gewesen. Viele zusätzliche Informationen standen hier während der Untersuchung gleichzeitig zur Verfügung. Diese Fülle an Daten muss während der Rohrleitungsinspektion nicht zur Verfügung stehen. Sie würde nur zur Verwirrung führen. Auch das Auslösen einer Messung ist zu vereinfachen. Der Start einer Messung muss mit nur einer Tastenfunktion möglich werden. Die Softwareoberfläche muss den Gegebenheiten während der Inspektion angepaßt und dementsprechend vereinfacht werden.

Mit der Bedienoberfläche, wie sie in Bild 13 dargestellt ist, sind alle Steuer- und Anzeigefunktionen für die Rohrleitungsuntersuchung auf einer Bildschirmdarstellung zusammengefasst.

Wichtiges Element ist der „Pipelocator“, der die Positionierung des Arrays oberhalb einer vergrabenen Pipeline erst ermöglicht. Hier wird „on line“ der Seitenversatz des Array, die Pipelinetiefe und ein möglicher Fehlwinkel dargestellt. Der „Pipelineinspektor“ hat so die Möglichkeit, die Position des Arrays vor dem Auslösen der Messdatenaufnahme zu korrigieren.

Die Signalamplituden aller Magnetfeldsensoren werden in Form von roten (hochfrequenten Magnetfeld) und grünen Balken (niederfrequenten Magnetfeld) angezeigt. Hiermit ist man in der Lage, mit einem Blick die Funktion aller Magnetfeldsensoren zu überblicken.

Die wichtigen Funktionen können über die untere Menüleiste sowie über die Tastenkombinationen oder die Mausfunktion erreicht werden.

Für den „Pipelineinspektor“ gibt es eine vereinfachte Anzeige für die Lage der Stromfäden. In dieser Anzeige wird nur der Betrag des Stromfadenversatzes der letzten 20 Messwerte angezeigt. Sie kann bis zur halben Bildschirmgröße vergrößert werden, um ein besseres Ablesen bei schlechten Verhältnissen zu gewährleisten.

Als Hilfe beim Erkennen von Fehlern ist ein „Threshold Level“ eingeblendet. Signalamplituden oberhalb dieses Pegels sind kritisch bezüglich eines Wandabtrags und sollen während des Abgehens der Rohrleitung mit einem Holzpflöck gekennzeichnet werden. An diesen Stellen ist eine spätere Untersuchung mit einem Ultraschallmessgerät nötig.

Das Programm speichert nach jedem einzelnen Messschritt die Messdaten auf der Festplatte. Dies stellt sicher, dass bei möglichem Ausfall des Akkumulators kein Verlust der Messdaten auftritt. Vor Beginn einer Untersuchung ist ein Datenfile zu erstellen. Die gespeicherten Messdaten können im Anschluss an eine Messung in einem Anzeigeprogramm dargestellt und ausgedruckt werden. Alle Untersuchungsergebnisse dieses Abschlussberichtes sind in dieser Form dargestellt.

7. Feldtests

7.1 Messrohr mit Innenabtrag

Mit dem 4-zeiligen System sind an dem Messrohr wie es in Bild 7 dargestellt ist, Untersuchungen durchgeführt worden. Das Rohr ist nicht eingegraben. Ziel dieser Untersuchung ist, festzustellen, ob mit dem Prototyp II das gleiche Ergebnis erzielt wird.

Bild 14 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung. Im Vergleich, mit der Untersuchung wie sie zu Beginn der Entwicklung durchgeführt wurde (siehe hierzu Bild 8), zeigen sich nur geringe Abweichungen bei den Messergebnissen. Diese stammen z. B. aus dem Umgebungsrauschen und dem Systemrauschen.

Bemerkenswert ist die Messzeit für einen Schritt mit dem Prototyp II. Derzeit gelingt es, einen Meter Rohrlänge in ca. 10 sec. zu untersuchen. Hierbei werden die Magnetfelddaten von 24 Magnetfeldsensoren ausgewertet und der Stromfadenversatz für vier Messpunkte bestimmt. Die Messpunkte liegen 25 cm auseinander. Die Messzeit konnte um ca. 15 sec. reduziert werden. Gleichzeitig wird in der verkürzten Messzeit 1 m Rohrlänge untersucht.

7.2 Rohr mit Außenabtrag im Feld

Es ist eine Feldeleitung, die seit ca. 10 Jahren nicht mehr genutzt wird, mit dem System untersucht worden. Ein Erdölproduzent in der Heide, Nähe Gifhorn, hat der FITM diese Leitung freundlicher Weise zu Testzwecken zur Verfügung gestellt. Die Rohrleitung hat einen Durchmesser von 3" und eine Wanddicke von 6,3 mm.

Die Rohrleitung ist zunächst abgetastet worden und es wurden keine Fehler gefunden. Bild 15 zeigt die Messdaten der Leitung ohne Fehler.

In Absprache mit dem Erdölproduzenten ist an einer Stelle definiert Material abgetragen worden. In Bild 16 ist ein Rohr mit Außenabtrag dargestellt. Der Aussenabtrag beträgt 25 % auf einer Länge von 0,5 m und einem Winkel von 90°. Der Fehler liegt also auf der 12:00-Uhr-Position. Der Fehlerort ist zwischen 20,25 m

und 20,75 m. Nachdem der Fehler einggebracht wurde, ist die Rohrleitung erneut abgetastet worden. Bild 17 zeigt das Ergebnis der Rohrleitung mit Fehler. Man erkennt deutlich die Veränderung des ΔZ_m - Wertes am Ort des Fehlers.

Im Anschluß an diese Untersuchung ist der Bereich des Fehlers wieder zugegraben worden. Bild 18 zeigt das Ergebniss nach dem Zugraben. Auch hier ist der Anstieg des ΔZ_m - Wertes wieder deutlich sichtbar. Man erkennt aber auch geringfügige Unterschiede der Verläufe der Kurven vor und nach den Zugraben. Diese können aus einem Bodeneinfluß stammen.

7.3 Fehlerrohr für die Präsentation des Systems

Zur Präsentation des Systems vor einem geladenen Fachpublikum ist ein Stück Rohrleitung hergestellt worden, das mehrere Fehler beinhaltet. Das Rohr besteht aus zusammengeschweißten 6 m langen Stücken eines nahtlos gezogenen 3"- Rohres mit einer Wanddicke von 6 mm. Jedes der 6-m-Stücke hat einen Fehler eingeschweißt. Bild 19 zeigt die Anordnung der Fehler. Folgende Fehler befinden sich in dem zu untersuchenden Rohrstrang:

| Fehlerposition / m | Fehlertyp |
|--------------------|---|
| 9 | 25 % Wandabtrag von innen auf der 12:00-Position, Länge 50 cm, $w = 90^\circ$ |
| 12 | Schlechte Schweißstelle |
| 15 | 50% Wandabtrag von innen auf der 3:00-Position, Länge 50 cm, $w = 90^\circ$ |

Bild 20 zeigt das Fehlerrohr von dem Eingraben. Das Fehlerrohr ist in einer Kiesgrube in 0,5 m bis 0,8 m Tiefe eingegraben worden.

Nach den Vergraben wird durch Abgehen des Rohres der Versatz der Stromfäden aufgenommen und dargestellt. Hier zeigt sich deutlich, wie hilfreich der Pipelocator beim Abgehen eines Vergrabenen Rohres ist.

Bild 21 zeigt den Betrag des Stromfadenversatzes, wie er während der Untersuchung dem „Pipelineinspektor“ angezeigt wird. Man erkennt die Fehlstellen des Rohres.

In Bild 22 ist der Tiefen- und der Seitenversatz, wie er in einem Postprocessing dargestellt werden kann, zu sehen. Hier erkennt man das unterschiedliche Verhalten der Fehler. Die erste Fehlstelle auf der 12:00-Uhr-Position hat ein deutlichen Signalhub im ΔZ_m - Wert. Die letzte Fehlstelle auf der 3:00-Uhr-Position hat das deutlichste Signal in Δd -Richtung.

8. Fazit

Es ist ein Messsystem entwickelt worden, mit dem man Wanddickenverluste an Pipelines von oberhalb des Erdbodens erkennen kann. Voraussetzung hierzu ist, dass die Rohre nahtlos gezogen sind.

Das System besteht aus einem Stromquellenmodul und einem Feldaufnehmermodul.

Das Stromquellenmodul wird mittels zweier Verbindungsleitungen mit der Rohrleitung verbunden. Die Rohrleitung wird zwischen den beiden Kontaktstellen mit dem Feldaufnehmermodul untersucht. Dies geschieht durch schrittweises Abtasten mit dem Feldaufnehmermodul. Beim Abtasten wird „On Line“ der Versatz der Stromfäden bestimmt und grafisch dargestellt.

An Stellen mit einem Wandabtrag ergibt sich ein Versatz zwischen den Stromfäden.

Mit dem vorhandenen System können Wandabträge in der Größenordnung von etwa 50 cm³ bei einem 3“-Rohr in einer Tiefe von ca. 1,0 m noch erkannt werden. Der Versatz der Stromfäden liegt bei mehr als 1,3 mm.

Bodeneinflüsse sind sichtbar, spielen aber eine untergeordnete Rolle. Zu den Bodeneinflüssen gehören die Änderung der Suszeptibilität und die Bodenleitfähigkeit. Beide Einflüsse verändern die Horizontalkomponente des Magnetfeldes um weniger als 1/1000 und damit den Versatz der Stromfäden um weniger als 0,5 mm.

Bei den Untersuchungen zu dem Messsystem sind Erkenntnisse zur Weiterentwicklung gewonnen worden, mit denen der Wandabtrag auch qualitativ bestimmt werden kann.

Mit solch einer Auswertung hat man die Möglichkeit, bei einem Leitungstest dem Kunden mitzuteilen, dass die Wand an dieser markanten Stelle zu z.B. 60% abgetragen ist und dass es einen Handlungsbedarf zur Reparatur gibt.

Als ökologische Bilanz ist folgendes festzustellen: Im Rahmen dieses Projektes wurde ein fortgeschrittener Entwicklungsstand für ein neues Pipelineprüfsystem erreicht. Die an die Entwicklungsarbeiten gestellten Erwartungen wurden bestätigt. Mit dem System sind zukünftig vorzugsweise Feldesleitungen zu prüfen, die von Tiefbohrstationen bis zur ersten Separationsstation führen. Diese haben Leitungsdurchmesser von ca. 3” bis 8”. Nach wie vor gibt es für diese Prüfaufgaben kaum konkurrierende Verfahren. Daher ist zu erwarten, dass mit dem neuen System einem großen Teil von solchen Pipelinebrüchen vorgebeugt werden kann, die bisher zu erheblichen Umweltbelastungen und -verschmutzungen mit Öl geführt haben.

Als ökonomische Bilanz und zum Thema Verbreitung der Vorhabensergebnisse ist folgendes festzustellen: Am 3. Mai 2000 wurde das System in seiner damaligen Entwicklungsphase einem eingeladenen internationalen Fachpublikum präsentiert.

Die Vertreter von Ölnetzbetreibern bekundeten großes und aktuelles Interesse an kommerziellen Tests sobald Seriengeräte einsetzbar sind. Besonderes Interesse gab es aus Europa und dem mittleren Osten. Ab Anfang 2000 sind kommerzielle Tests geplant. Bei der Präsentation wurde auf die finanzielle Förderung durch die Stiftung Umwelt mit Dank hingewiesen.

9. Literaturverzeichnis

- 1 Meinke Gundlach: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik.
Berlin Heidelberg New York Tokyo: Springer-Verlag 1986; Seite B 13

10. Anhänge

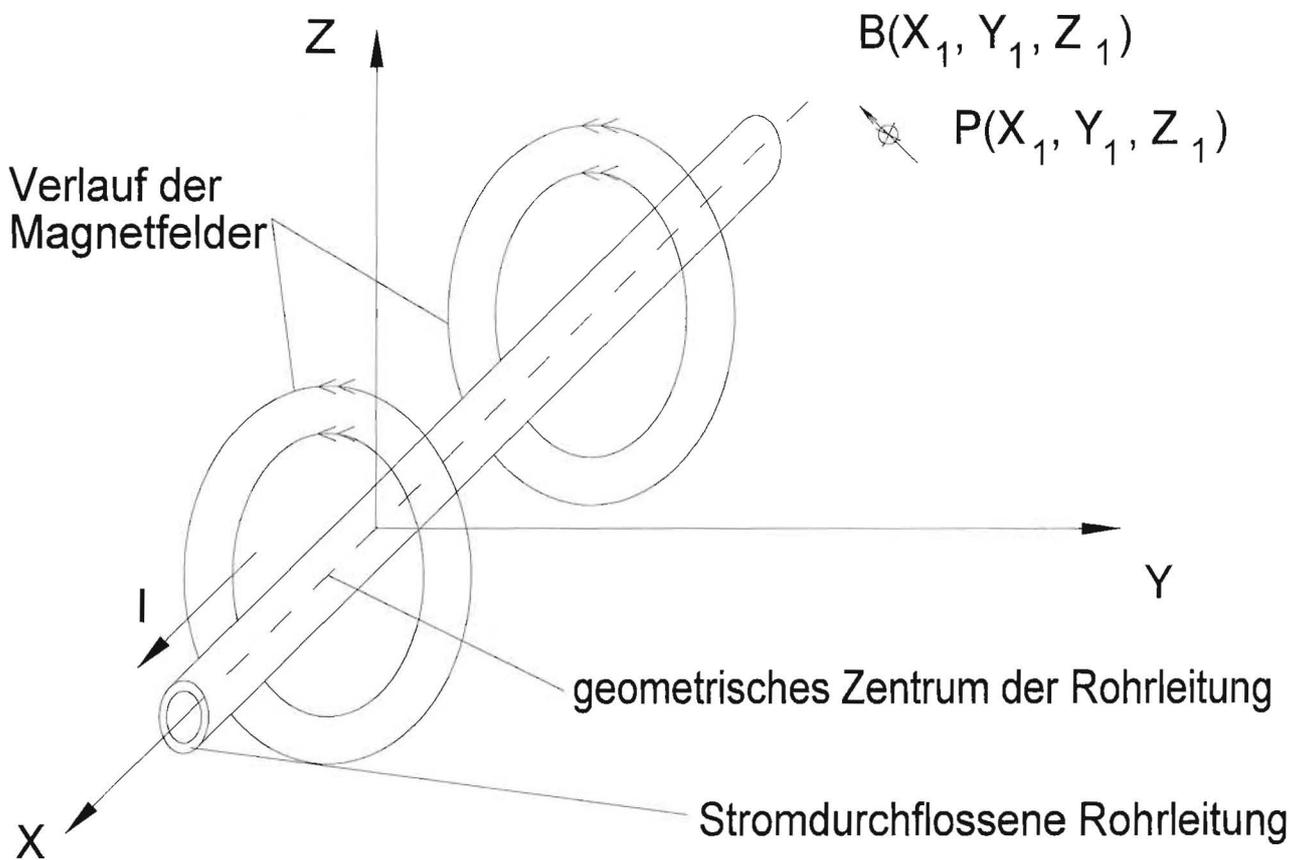
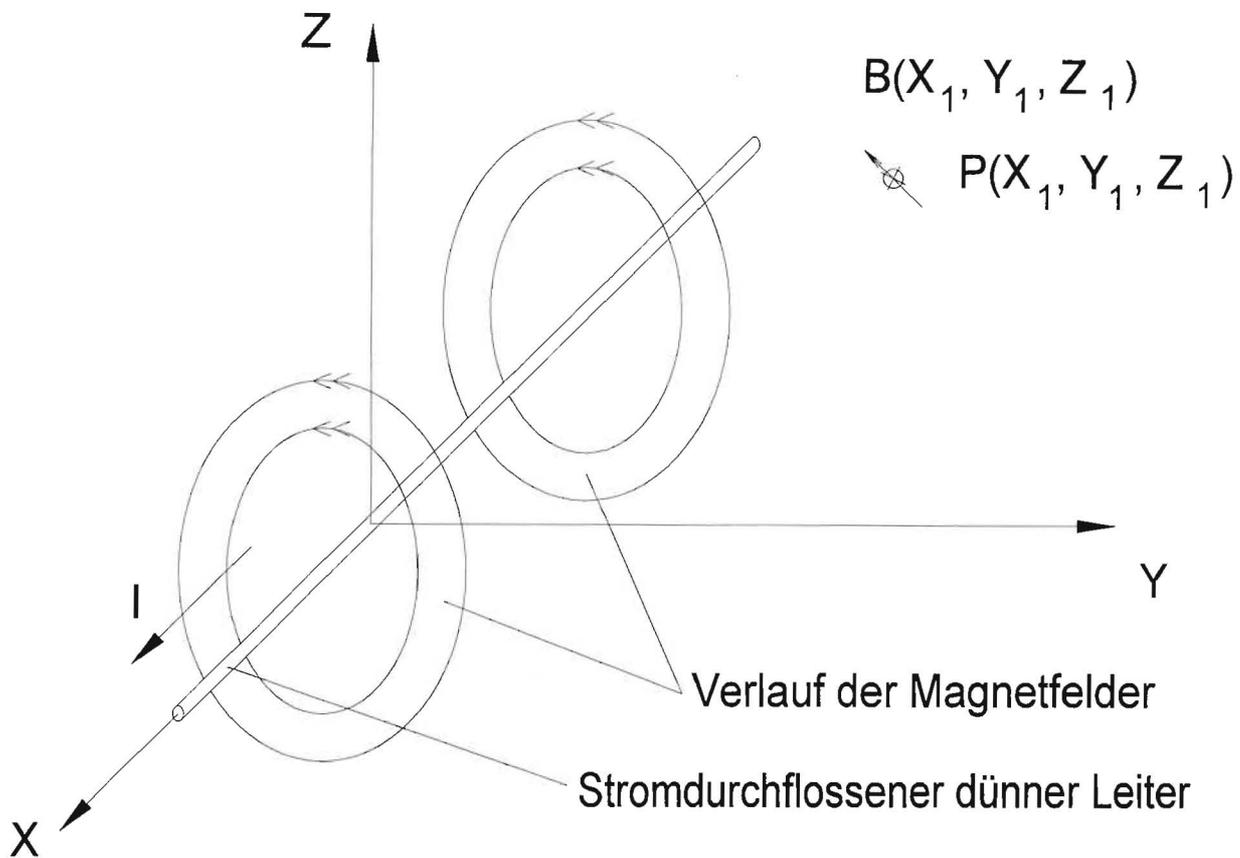


Bild 1: Stromdurchflossener dünner Leiter und stromdurchflossene Rohrleitung im Vergleich

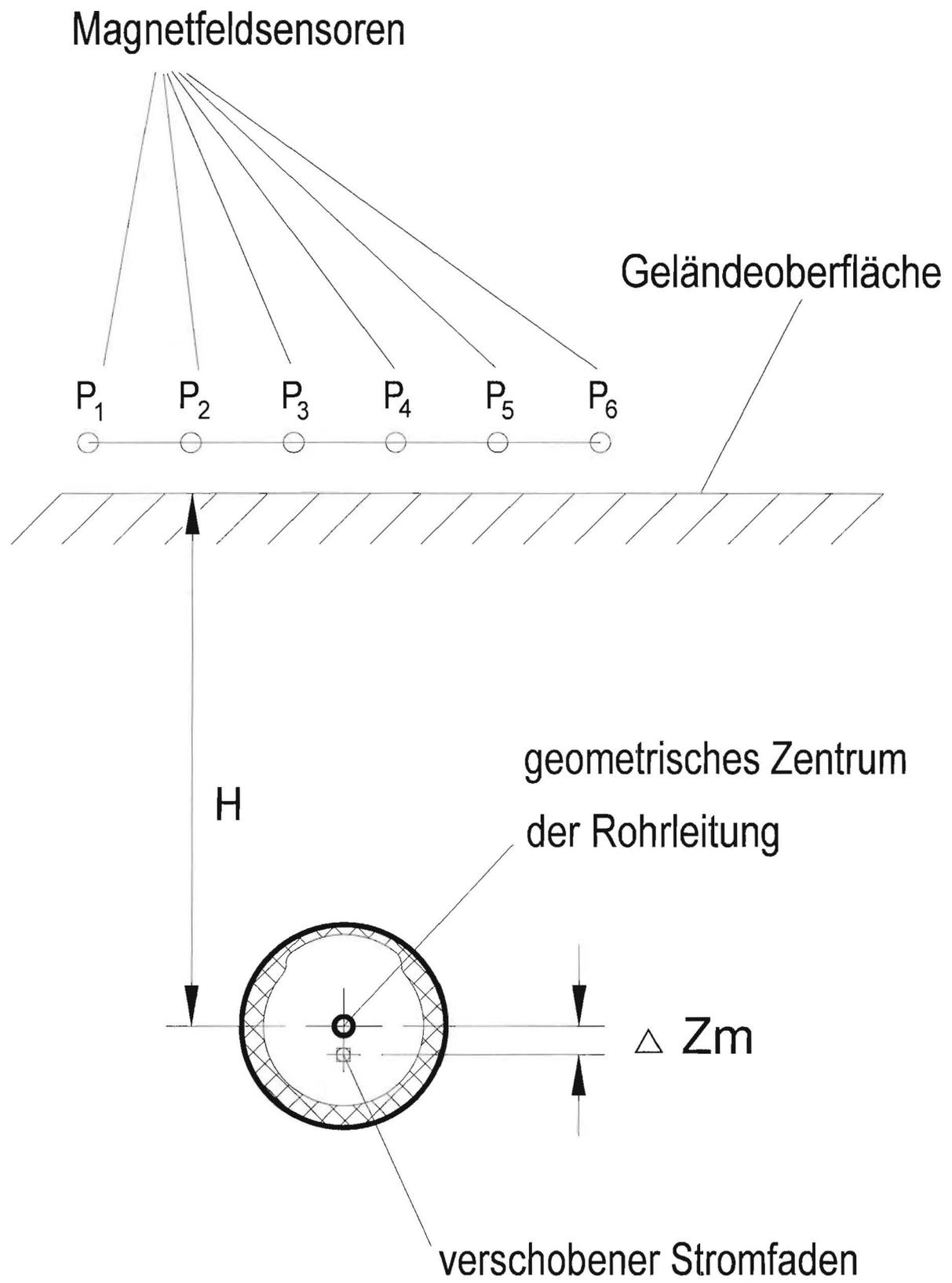
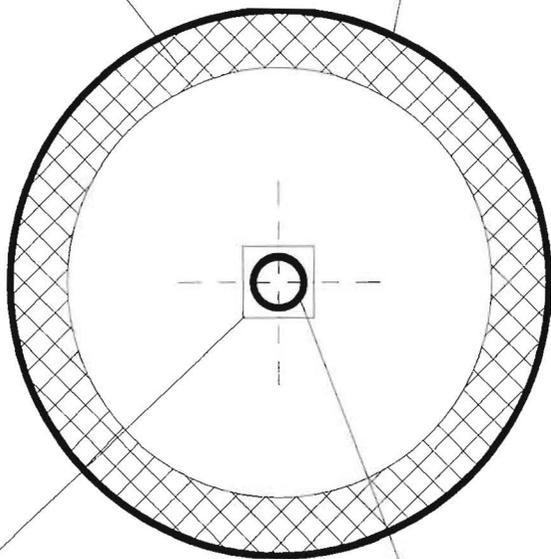


Bild 2: Rohr mit unterschiedlichen Wanddicken

Niederfrequenter Strom

Hochfrequenter Strom

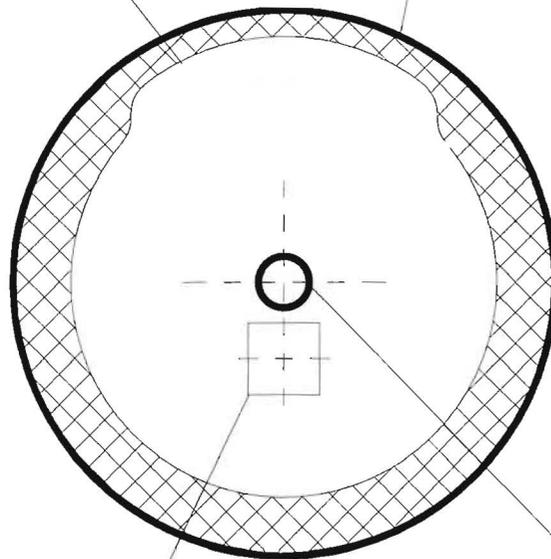


Lage des Stromfadens
bei niederfrequentem
Strom

Lage des Stromfadens
bei hochfrequentem
Strom

Niederfrequenter Strom

Hochfrequenter Strom



Lage des Stromfadens
bei niederfrequentem
Strom

Lage des Stromfadens
bei hochfrequentem
Strom

Bild 3: Lage der Stromfäden für ein ungestörtes Rohr
und für ein Rohr mit Wandabtrag

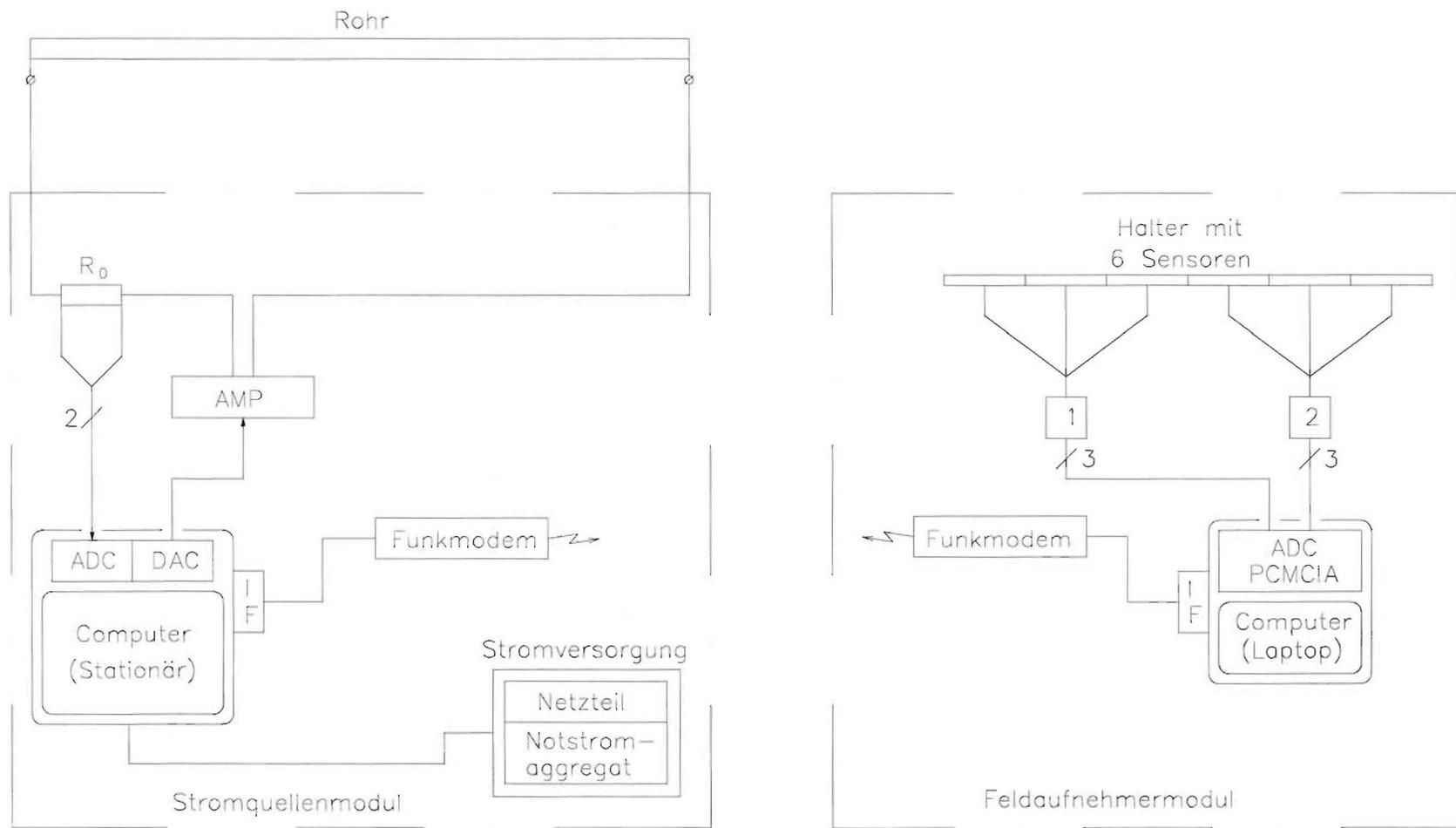
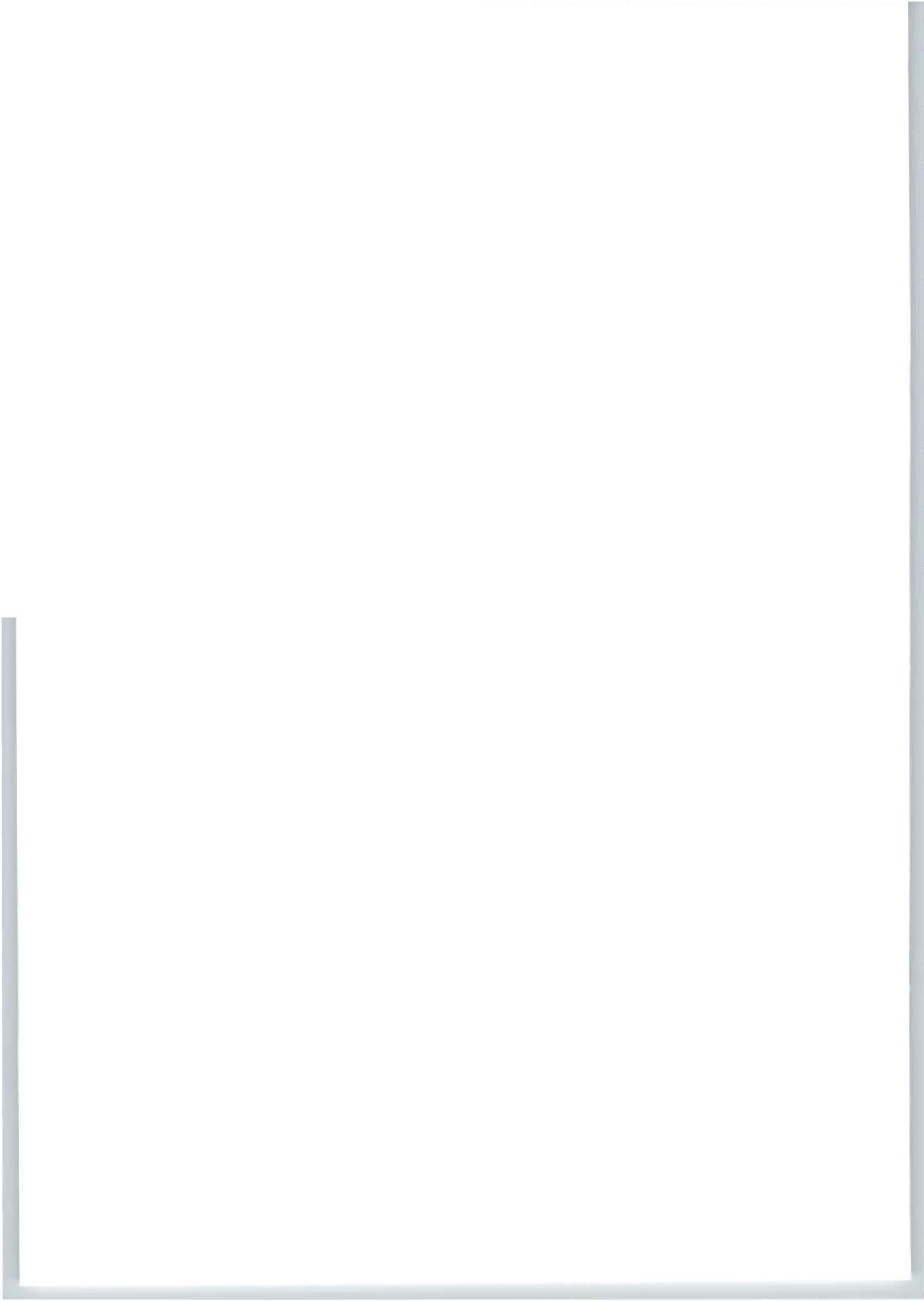


Bild 4: Prinzipschaltung für den Aufbau des Prototyp I



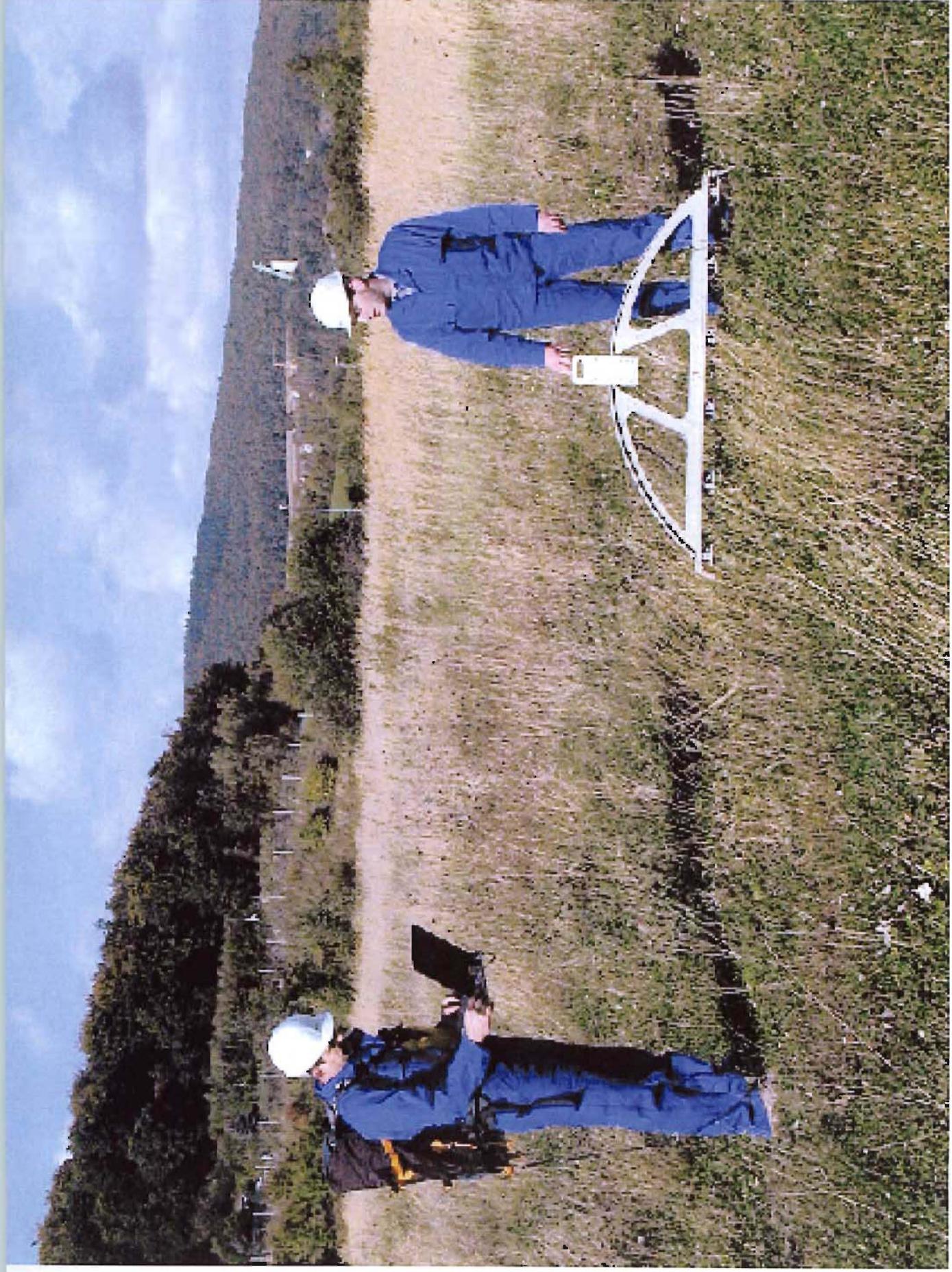
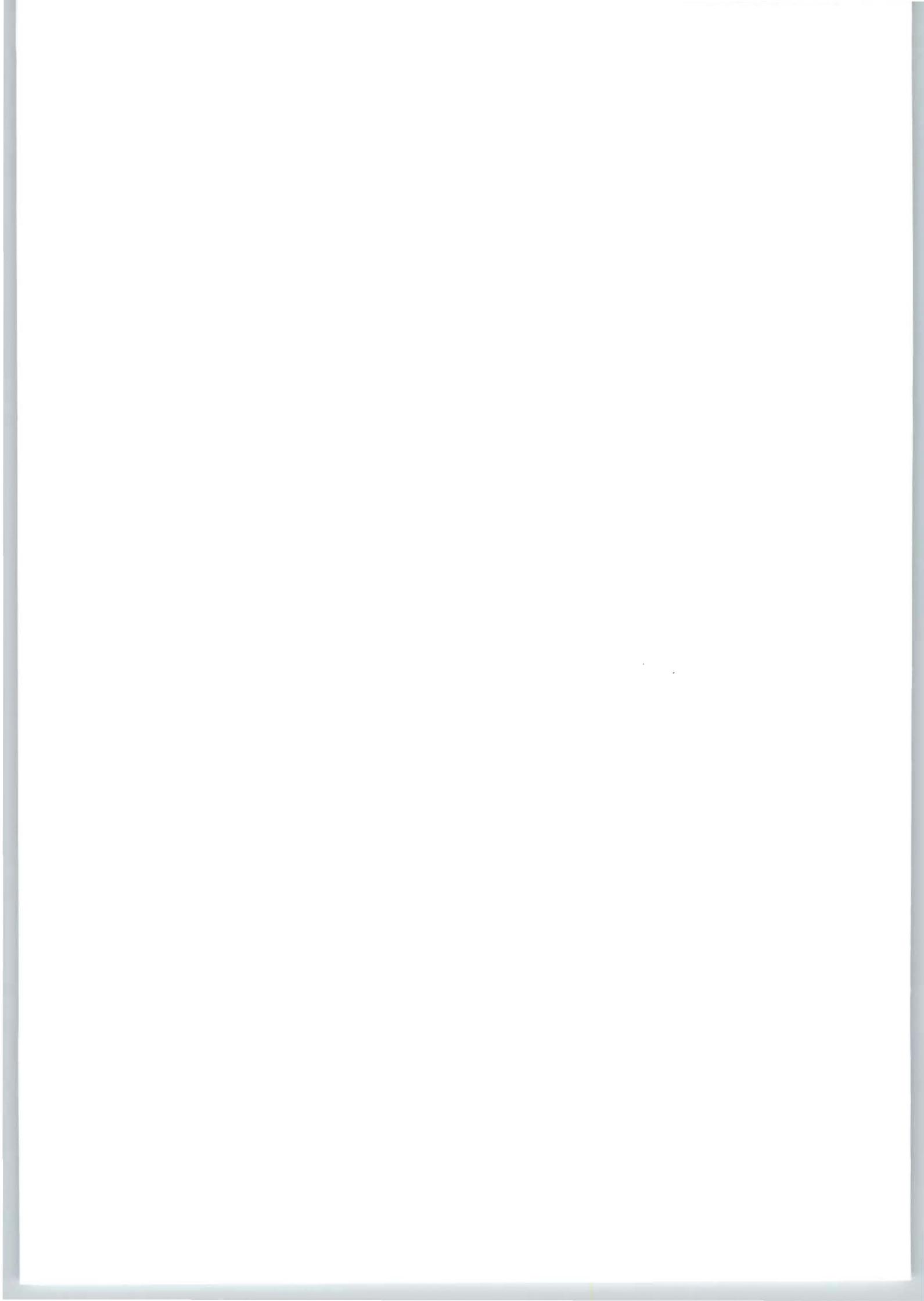


Bild 5: Foto des Prototyp I



Seitenversatz u. Tiefenversatz /mm

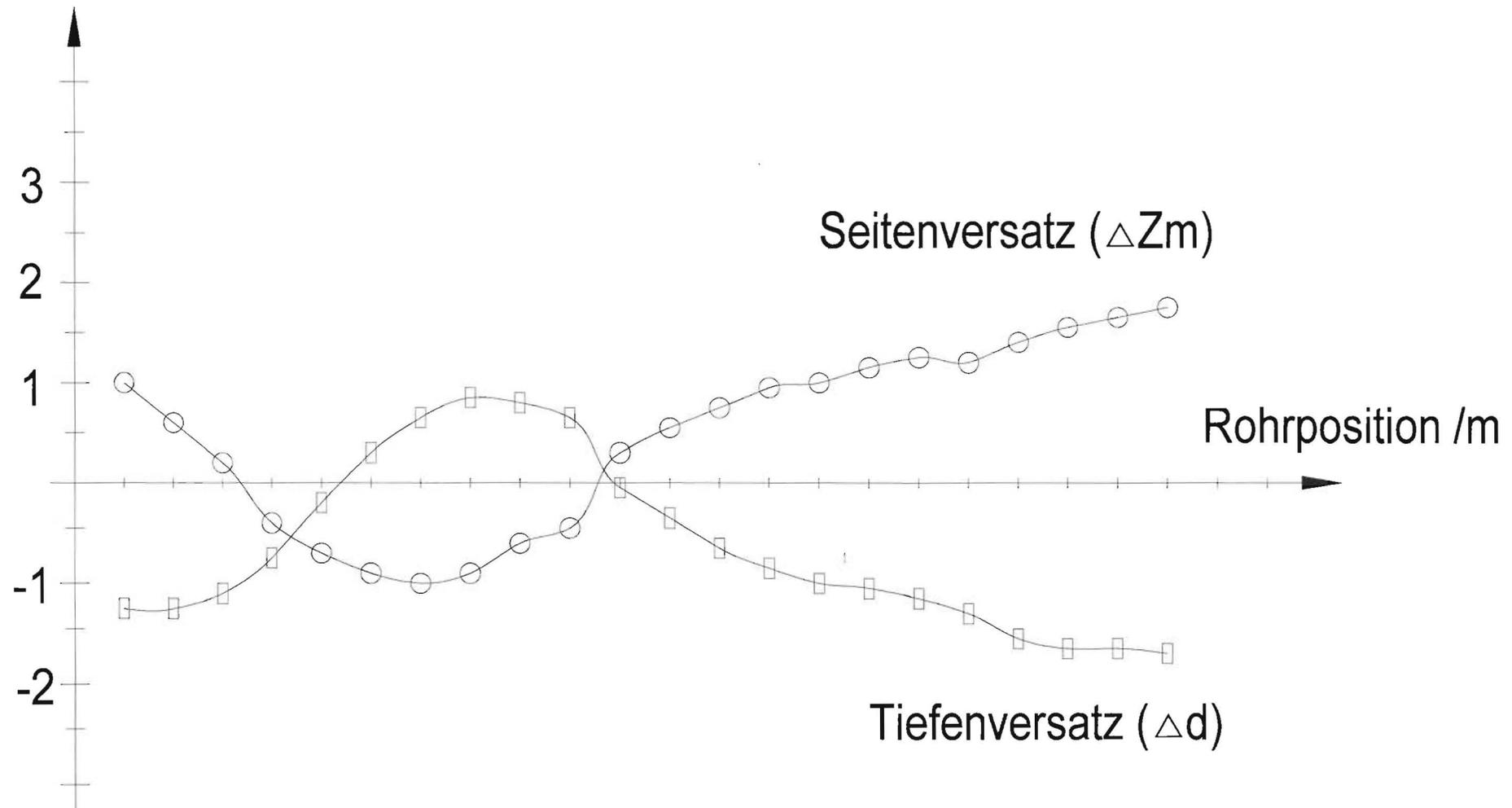


Bild 6: angezeigte Daten während der Untersuchung

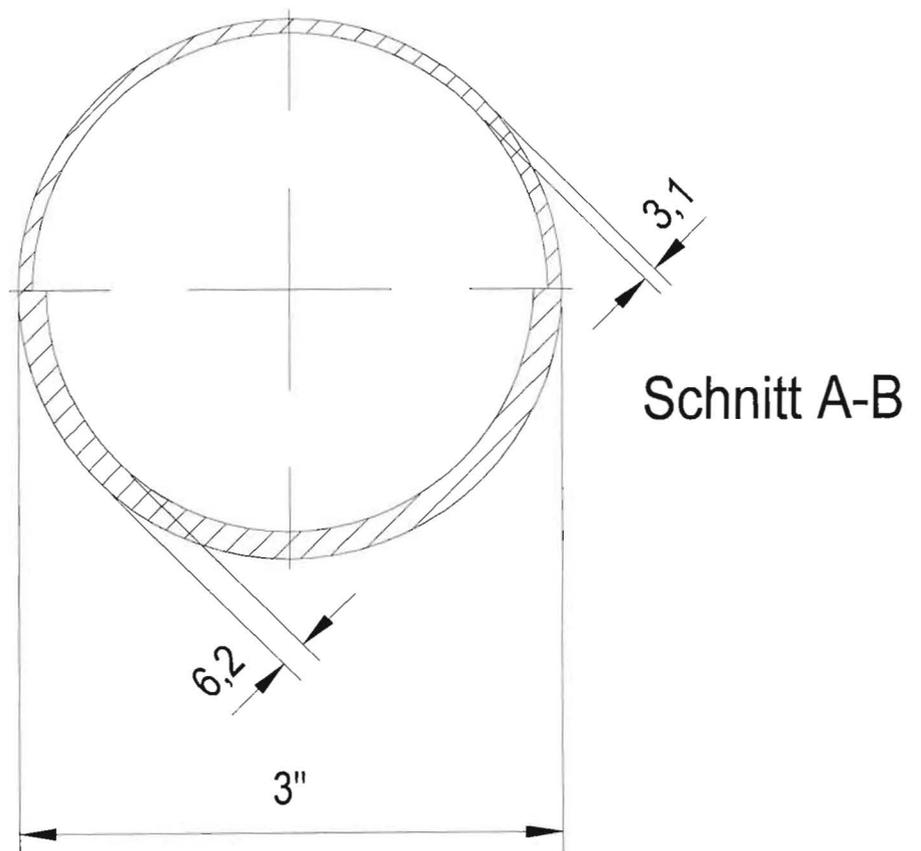
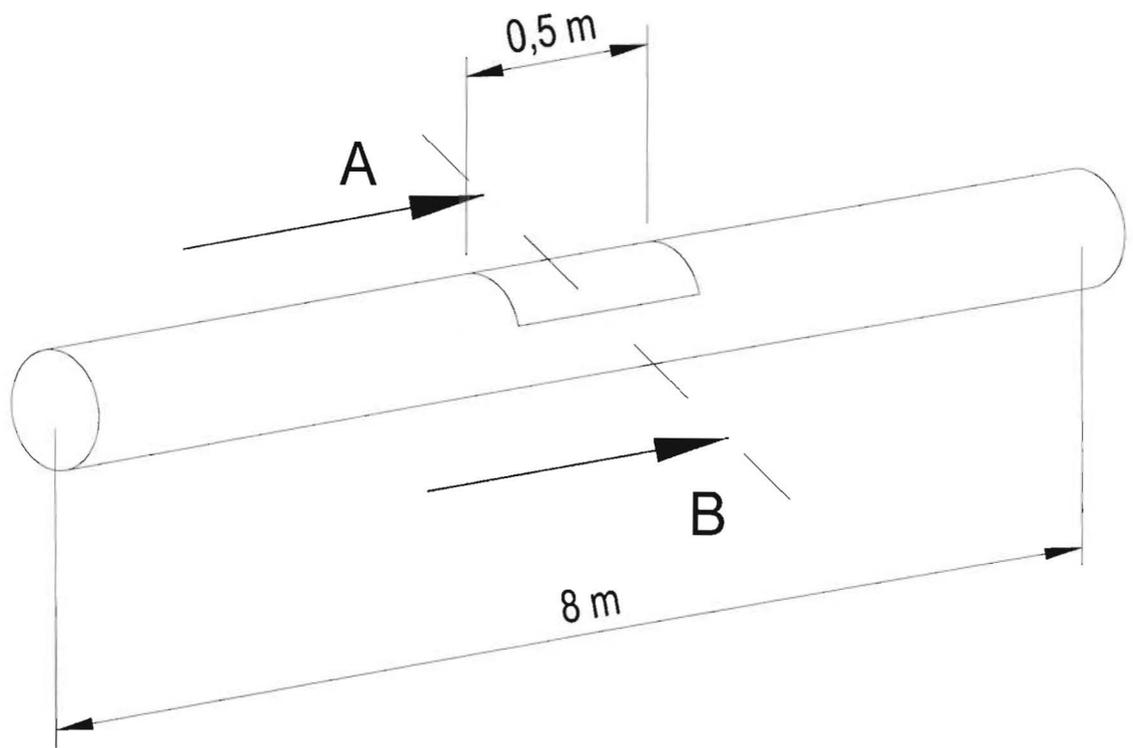


Bild 7: Meßrohr mit eingeschweißtem Innendefekt

Bild 8: Messergebnis des Messrohres

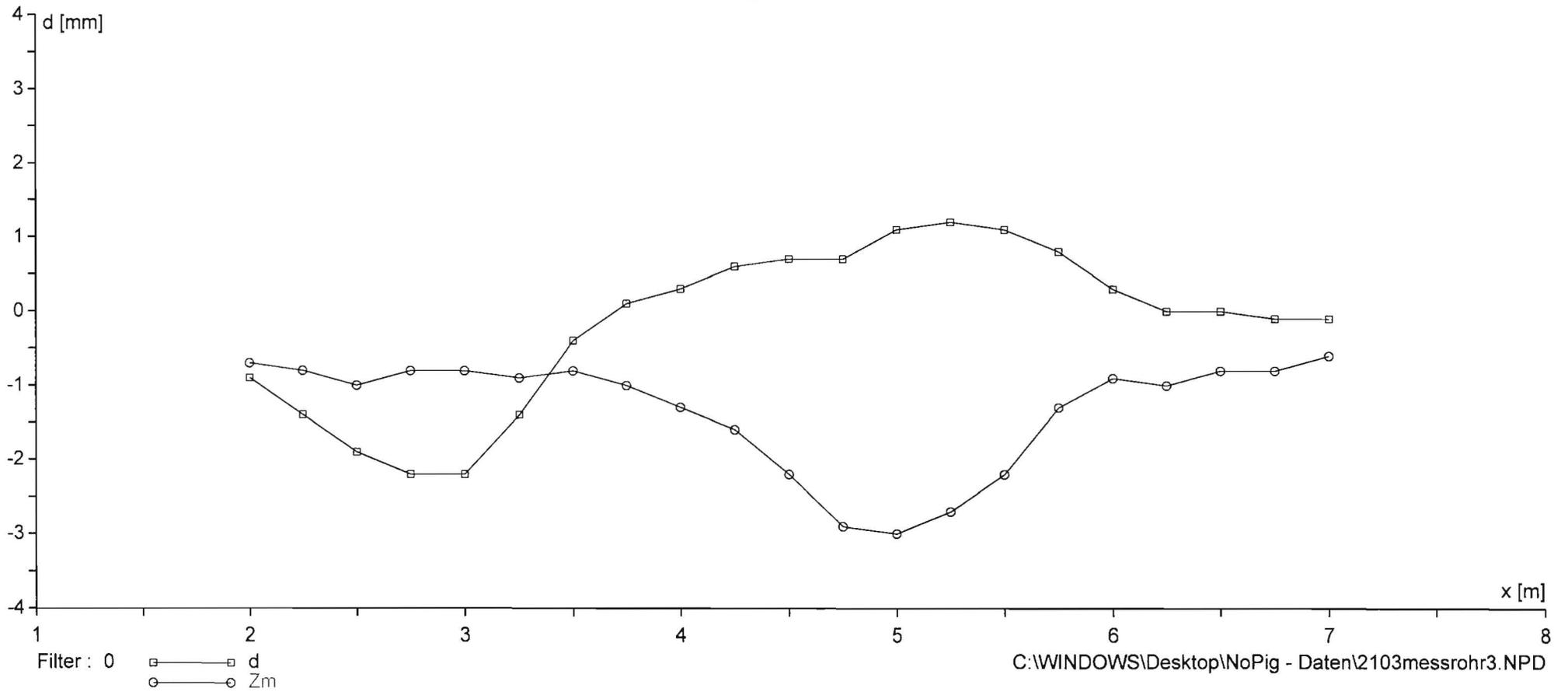


Bild 9: Seitenversatz der Sensorzeile

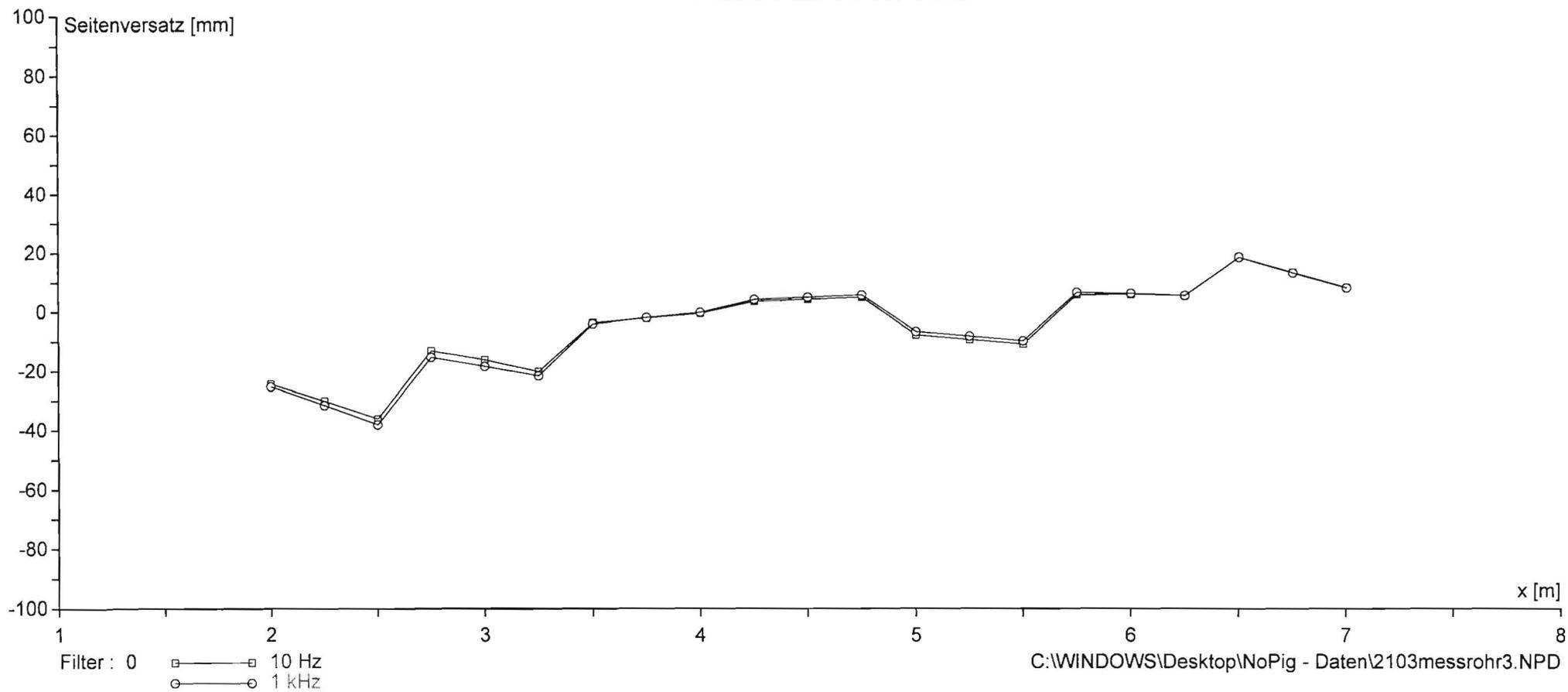
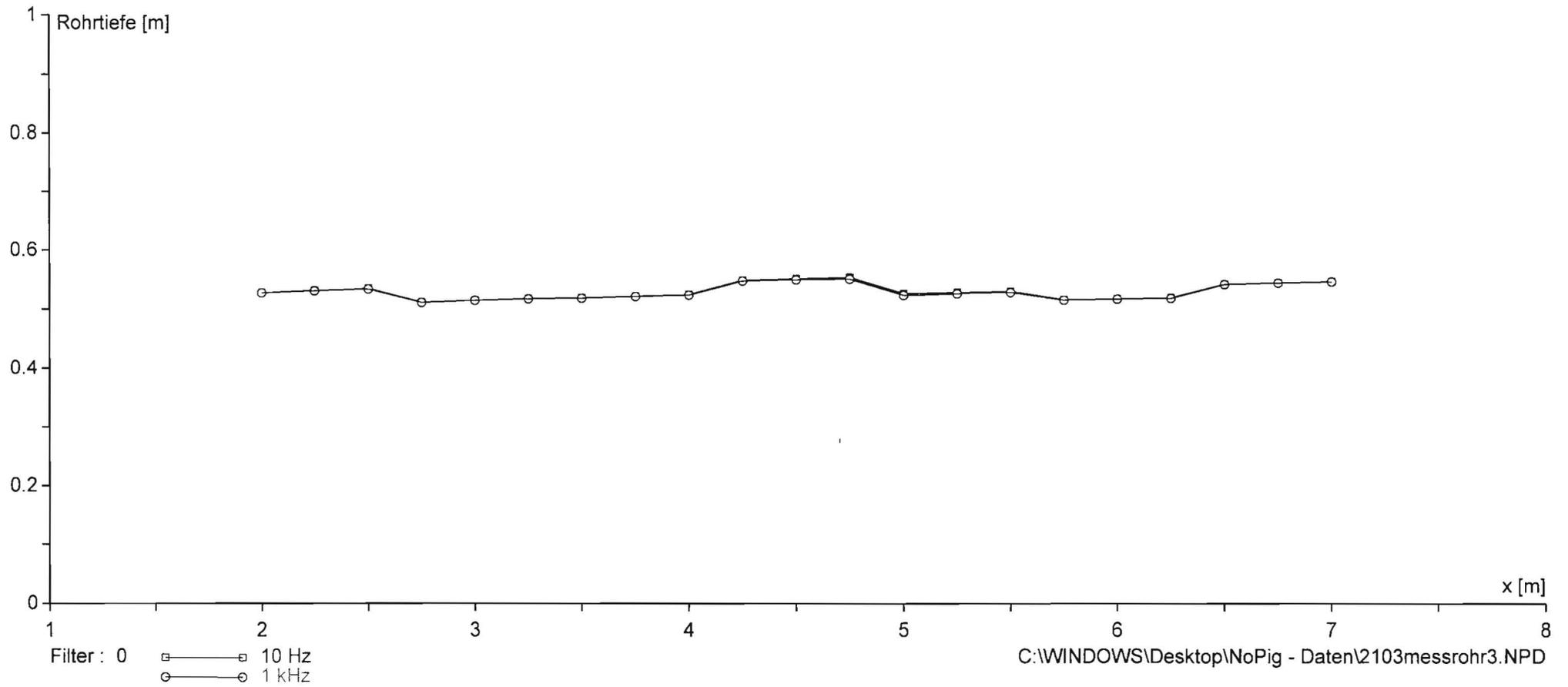


Bild 10: Abstand zwischen Rohr und Sensorzeile



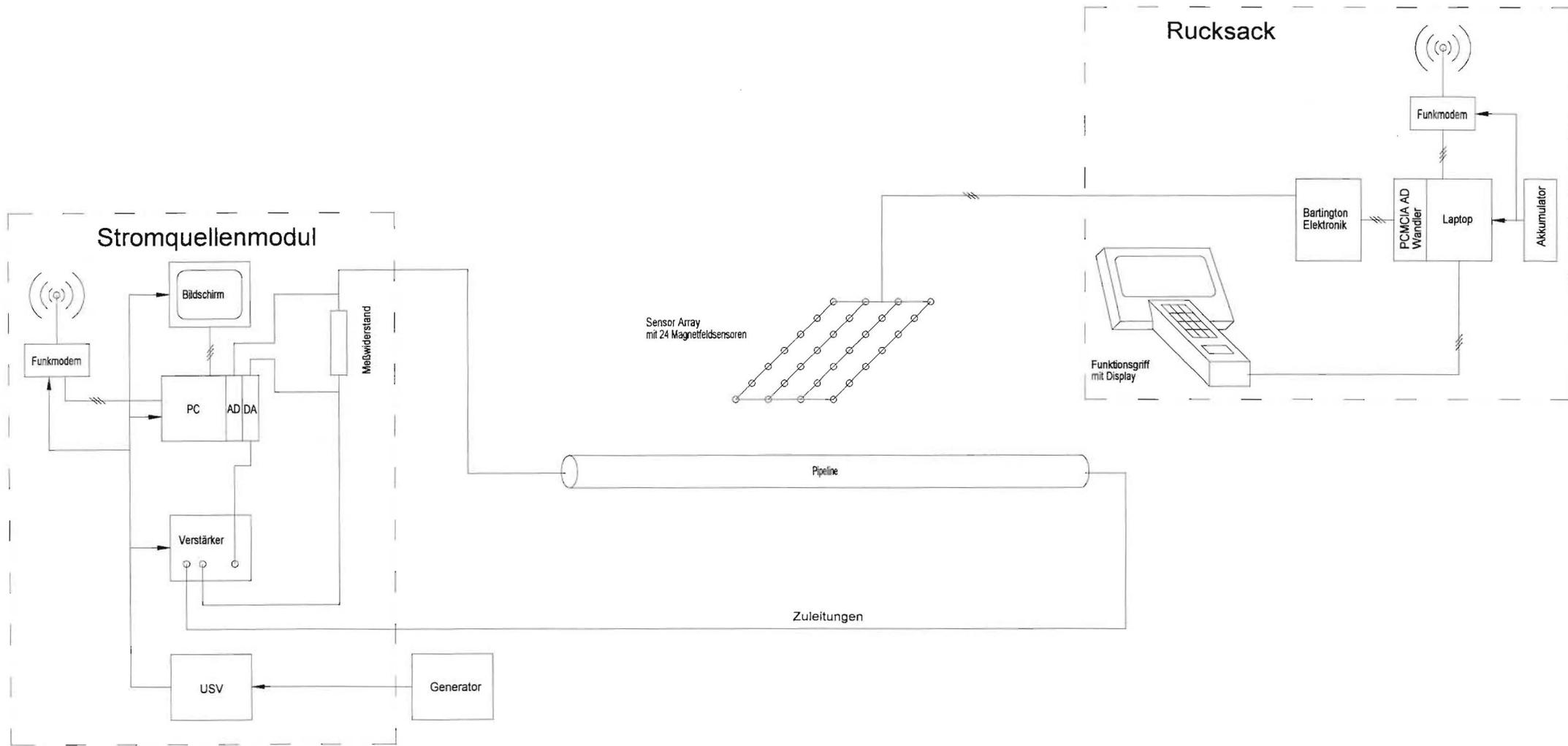
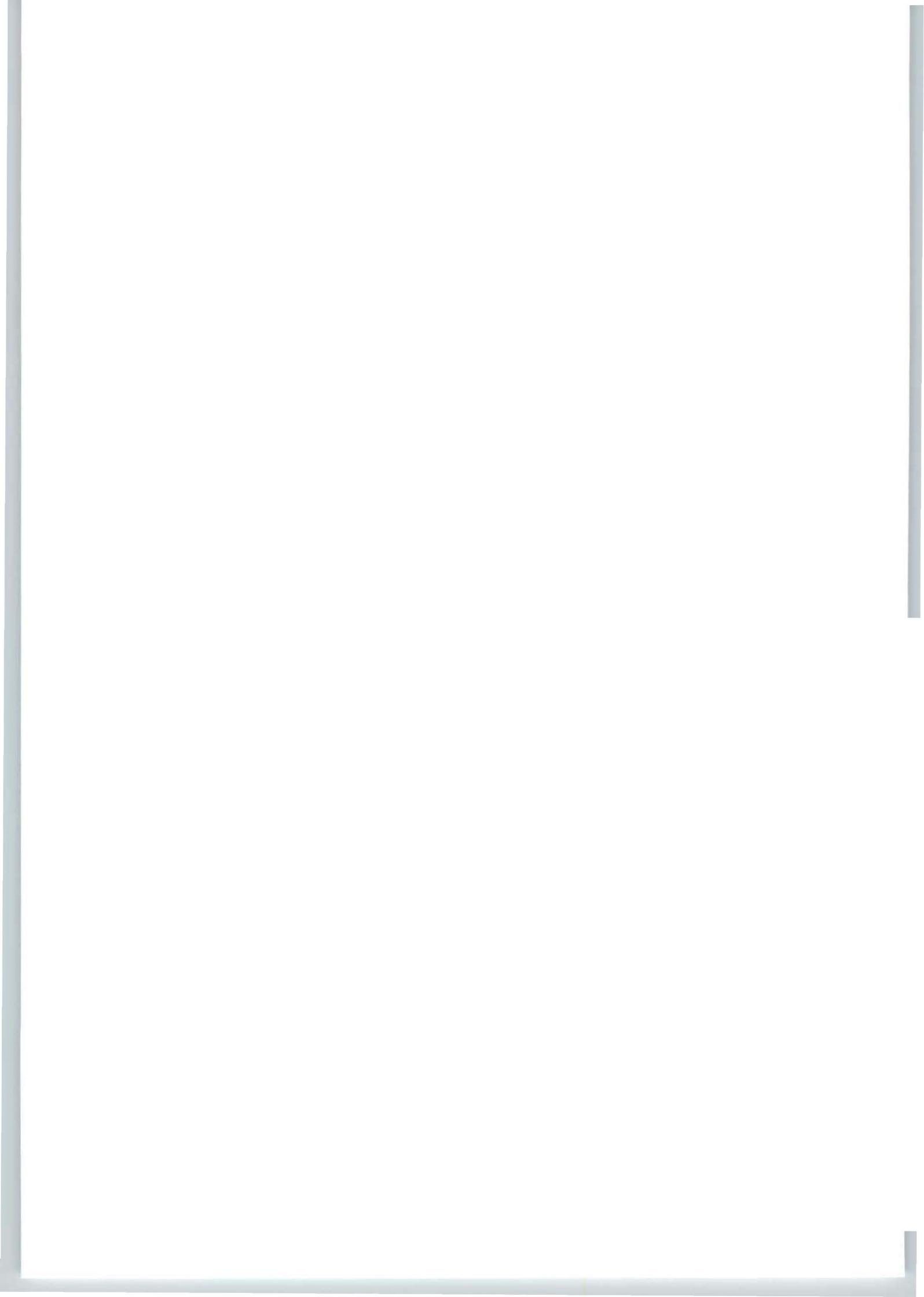
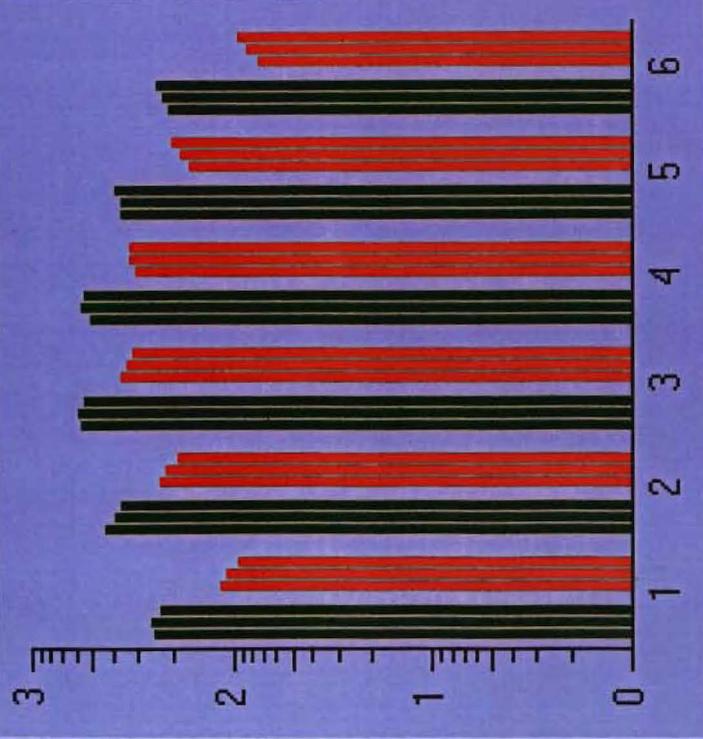


Bild 11: Blockschaltbild des Prototyp II



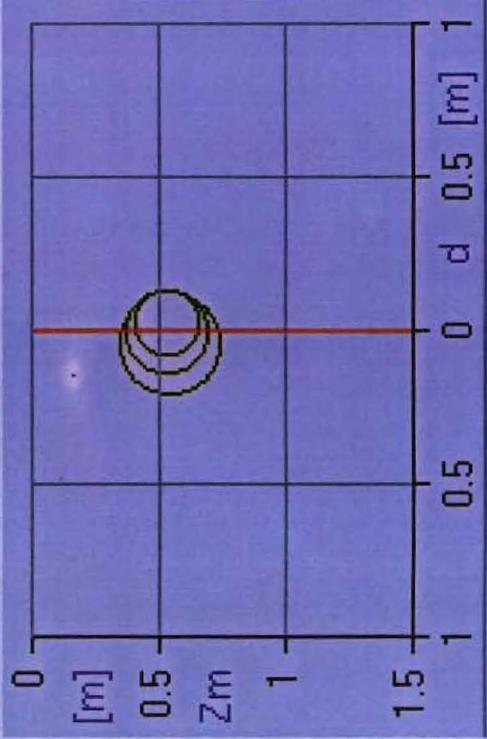
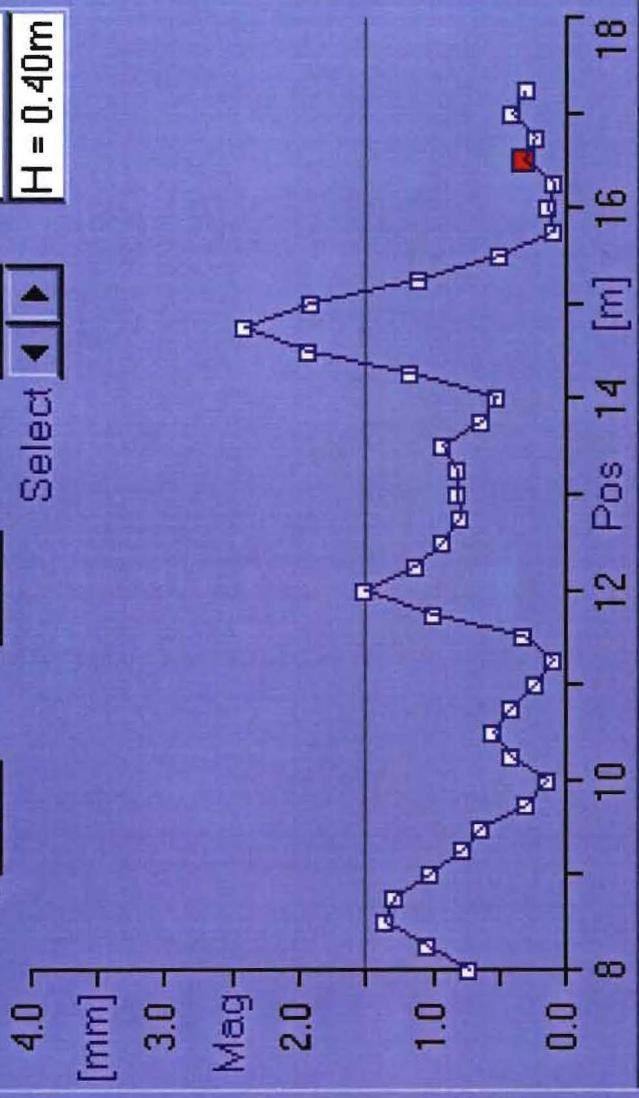
Bild 12: Foto des Prototyp II





D = n.a.
H = 0.40m

Mag [mm] Pos Filter Select



File 2505ki04

Pipe Current
Auto Level

Position 17.50 m

| Line | d | Zm |
|------|------|-----|
| 4 | | |
| 3 | -6.7 | 1.8 |
| 2 | 2.9 | 7.1 |
| 1 | 13.0 | 9.6 |

n1 1

n2 1

Reset

Update

Details

Calibration

Step

Special

Sample

Bild 13: Bedienoberfläche des Messprogramms

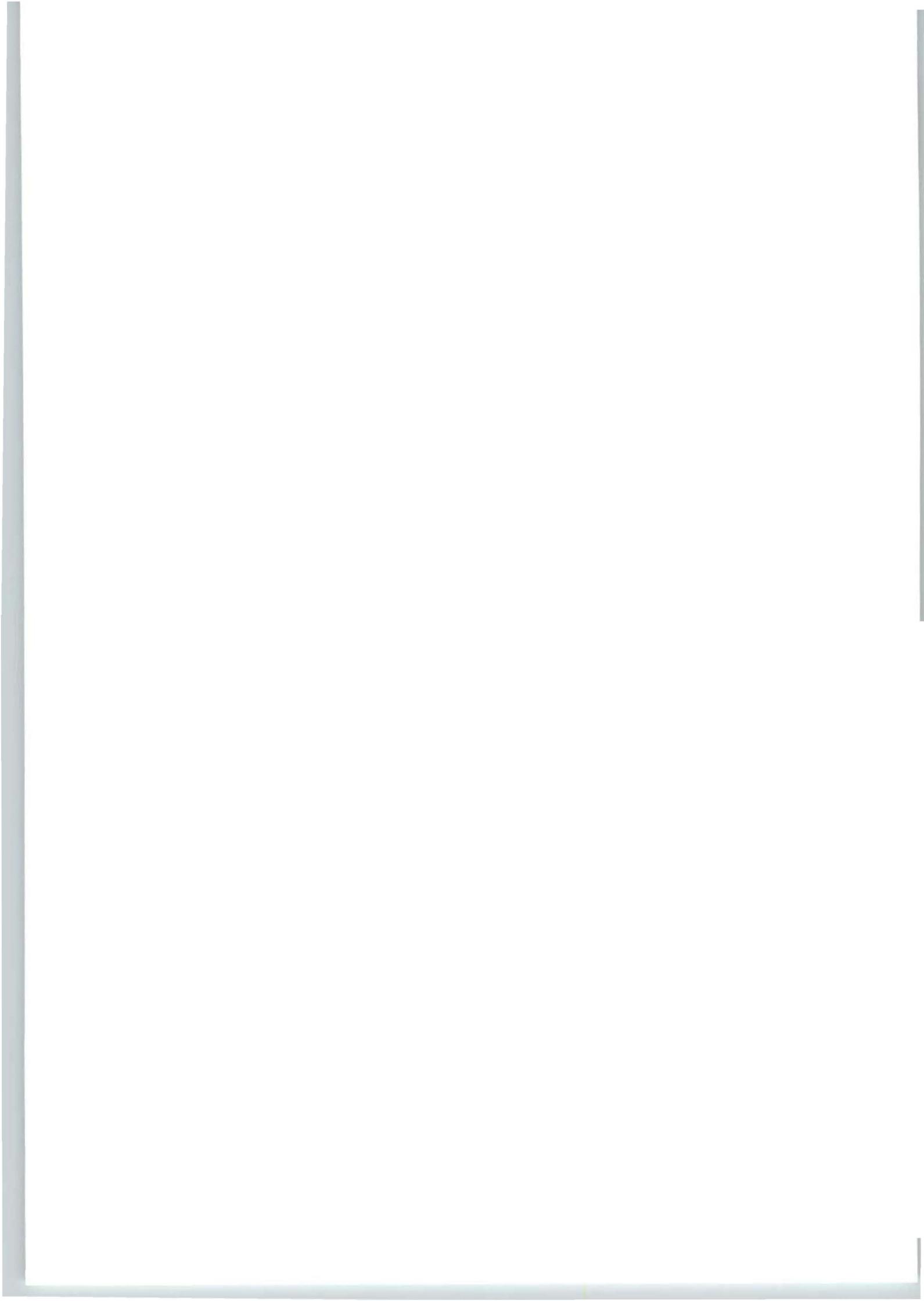


Bild 14: Messdaten des Messrohrs gemessen mit dem Prototy II

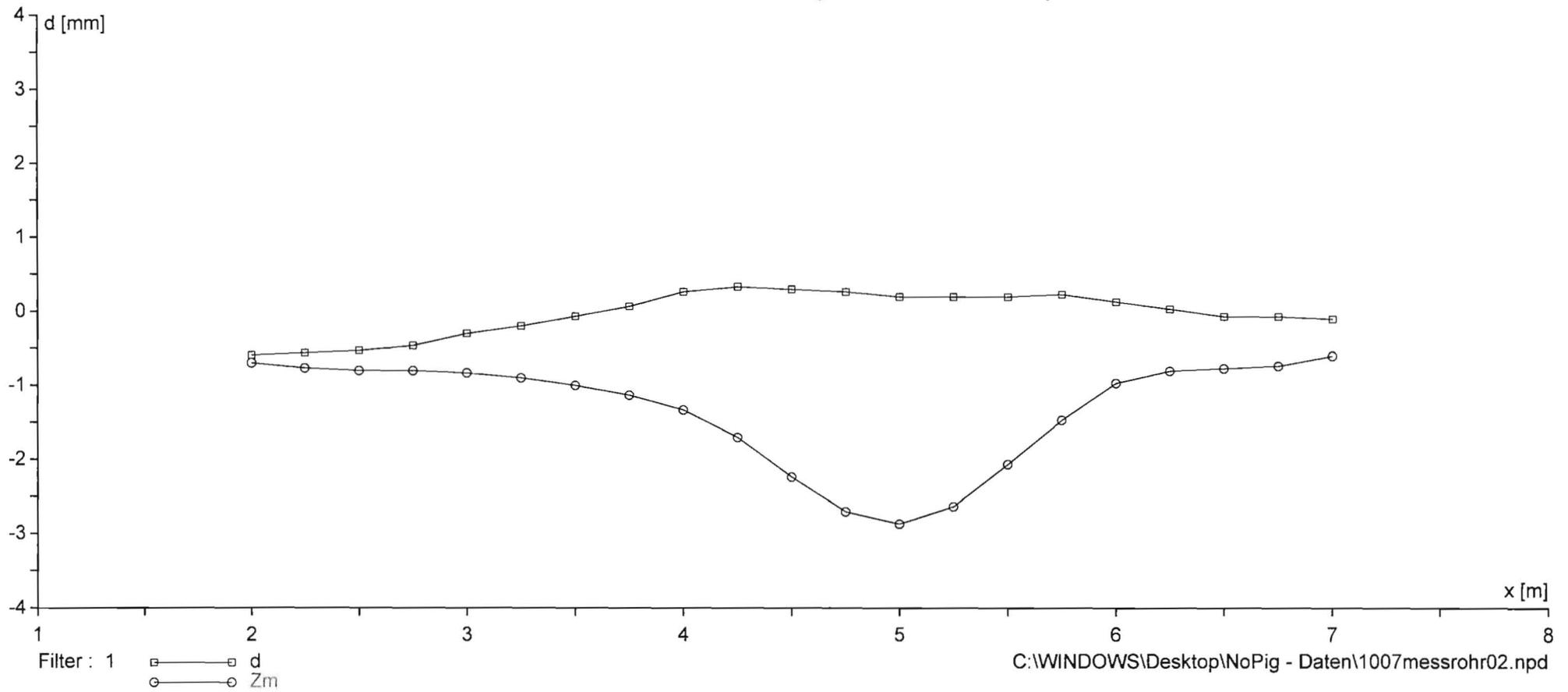
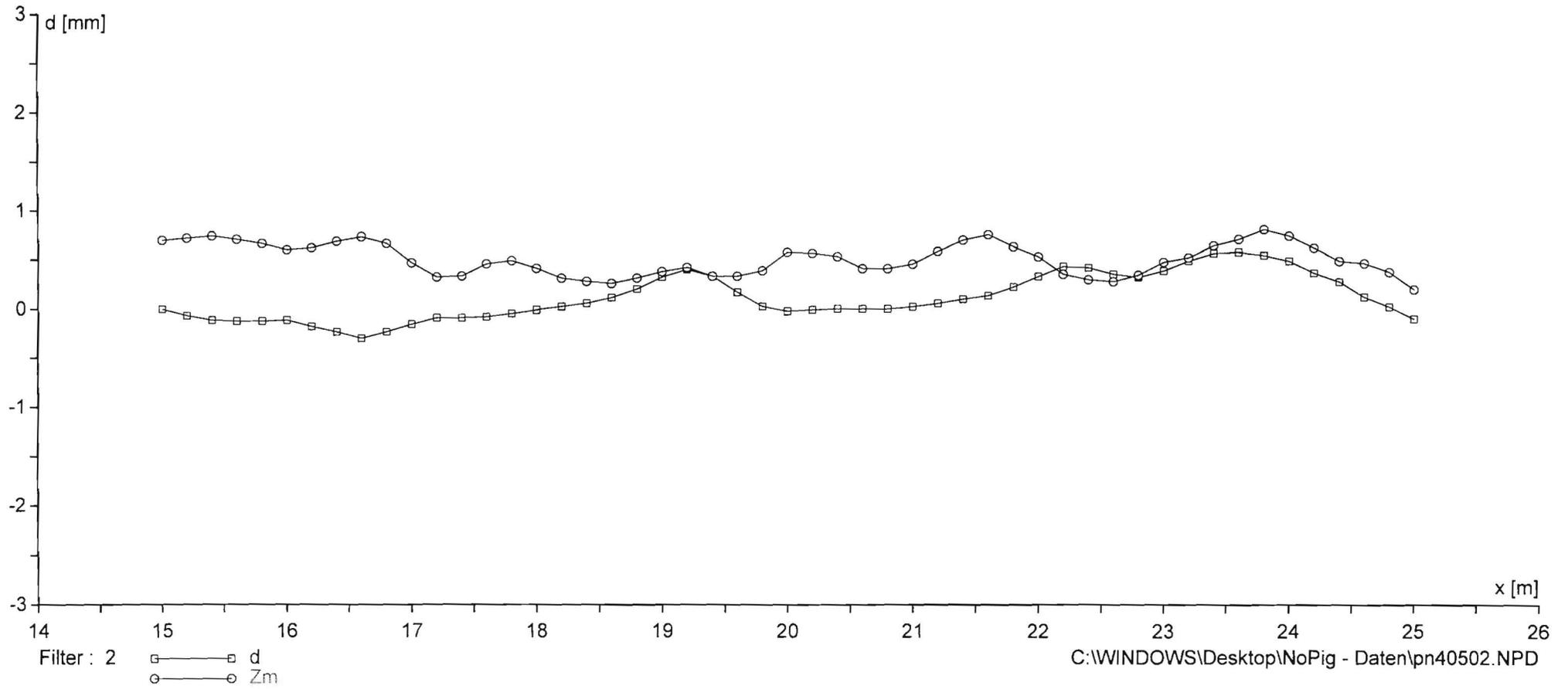


Bild 15: Messdaten ohne Fehlstelle





Bereich mit
Aussenabtrag

Bild 16: Foto des Rohrs mit Aussenabtrag

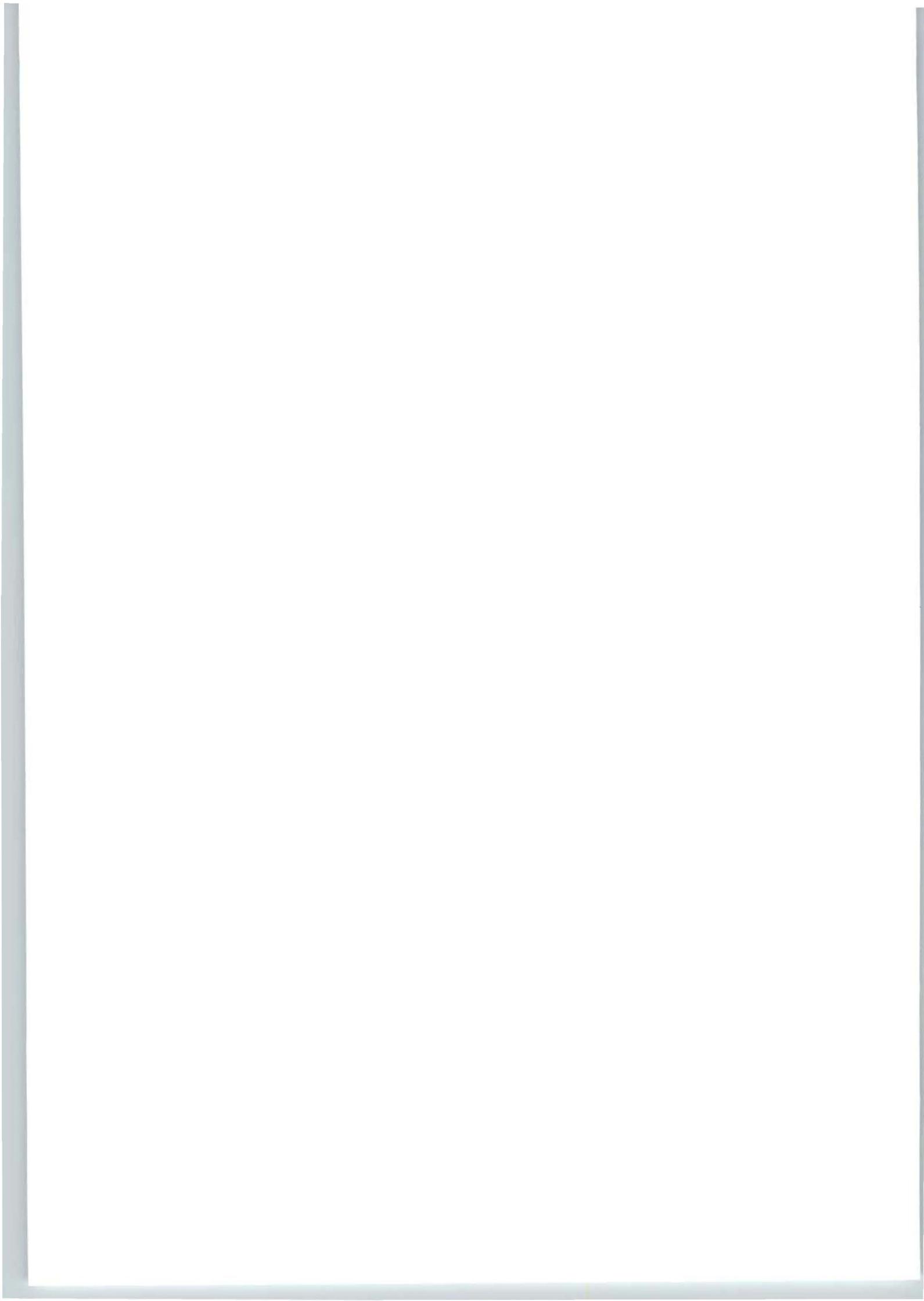


Bild 17: Messdaten mit Fehlstelle

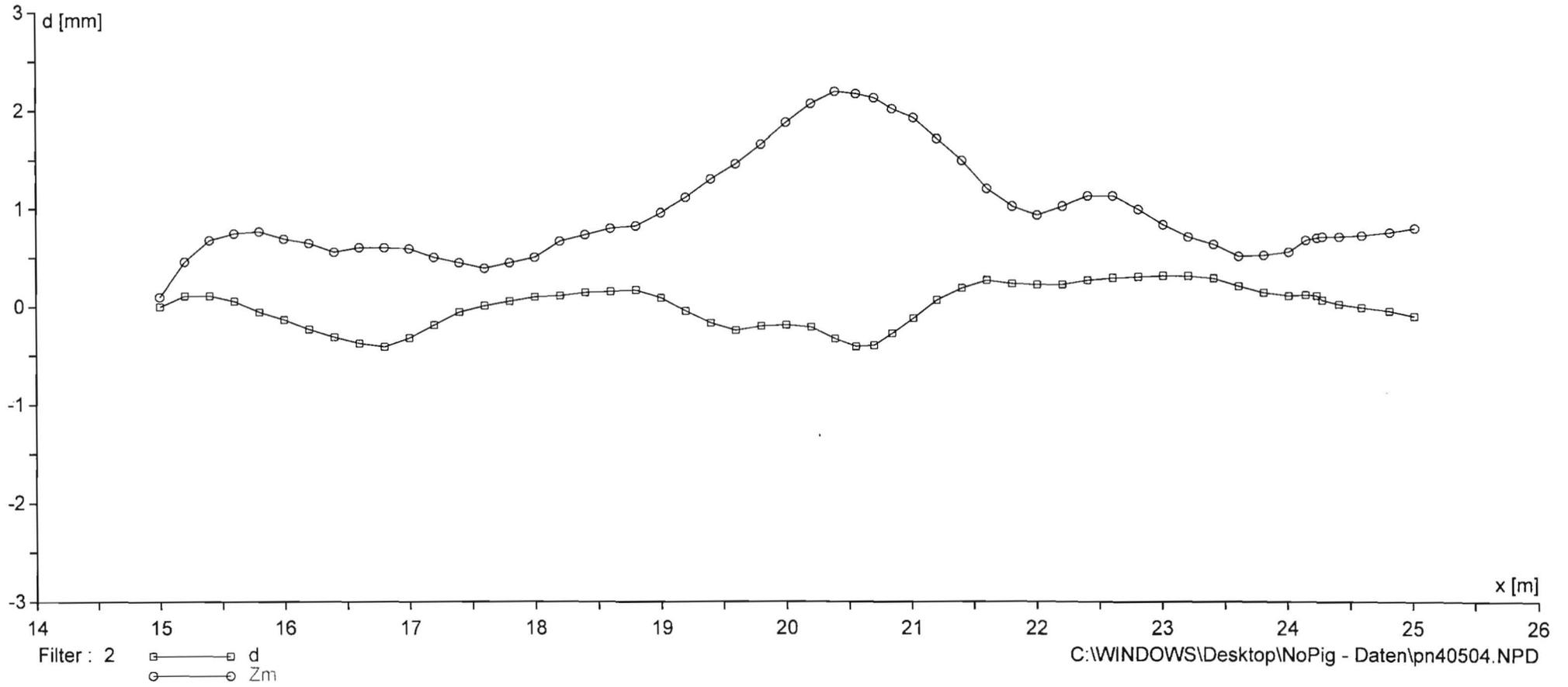
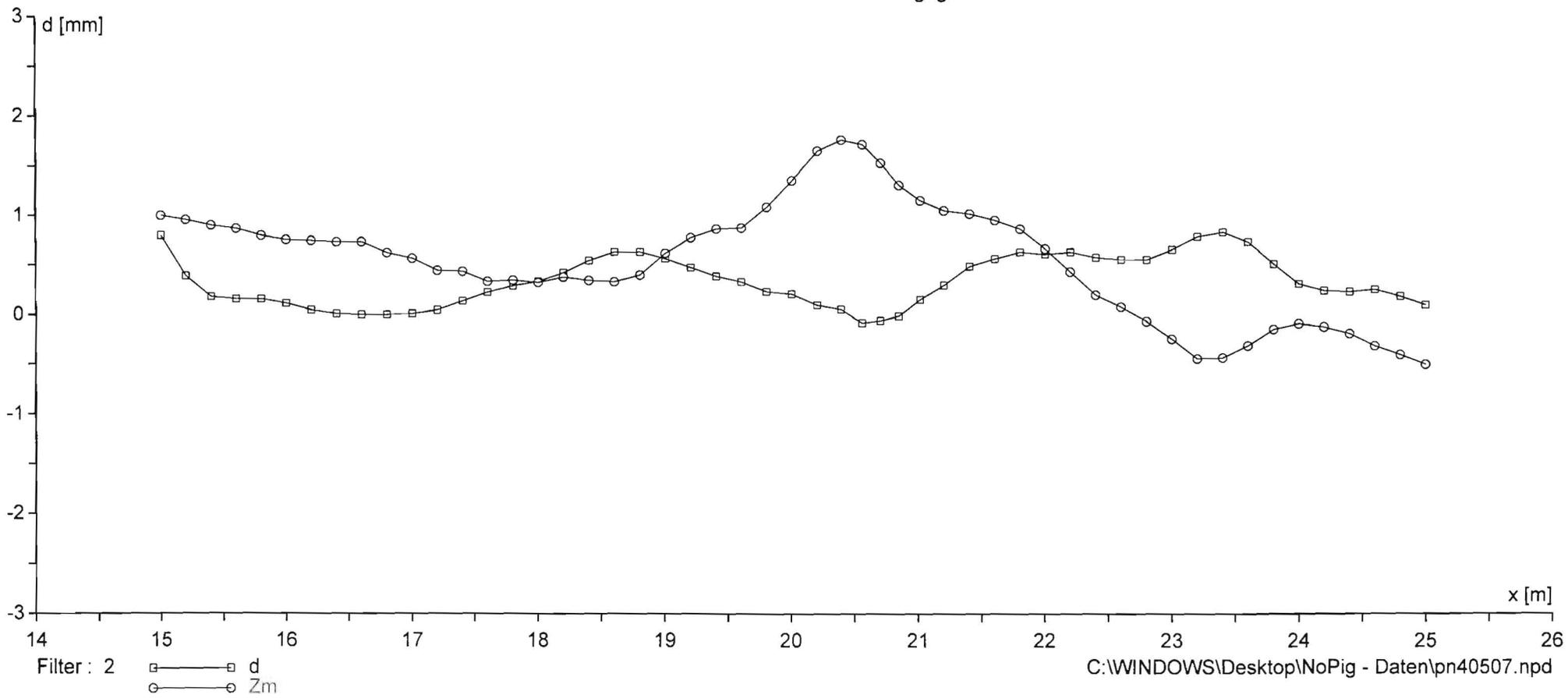
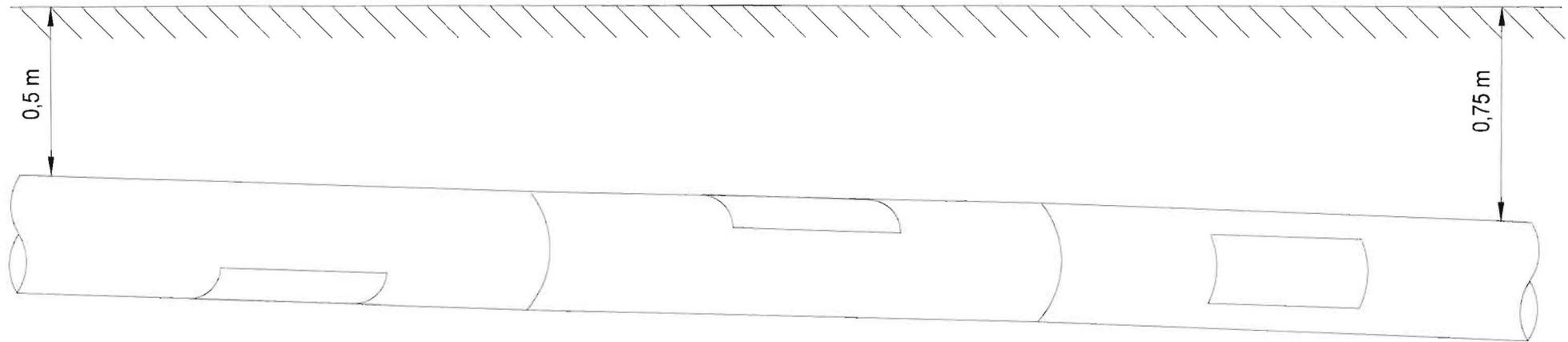


Bild 18: Messdaten mit Fehlstelle eingegraben



Error Positions of the Pipeline for the Presentation



D = 50 %
L = 50 cm
w = 90 °
6 o'clock Position
outer Diameter

D = 25 %
L = 50 cm
w = 90 °
12 o'clock Position
inner Diameter

D = 50 %
L = 50 cm
w = 90 °
3 o'clock Position
inner Diameter

Bild 19: Fehlerrohr für die Präsentation

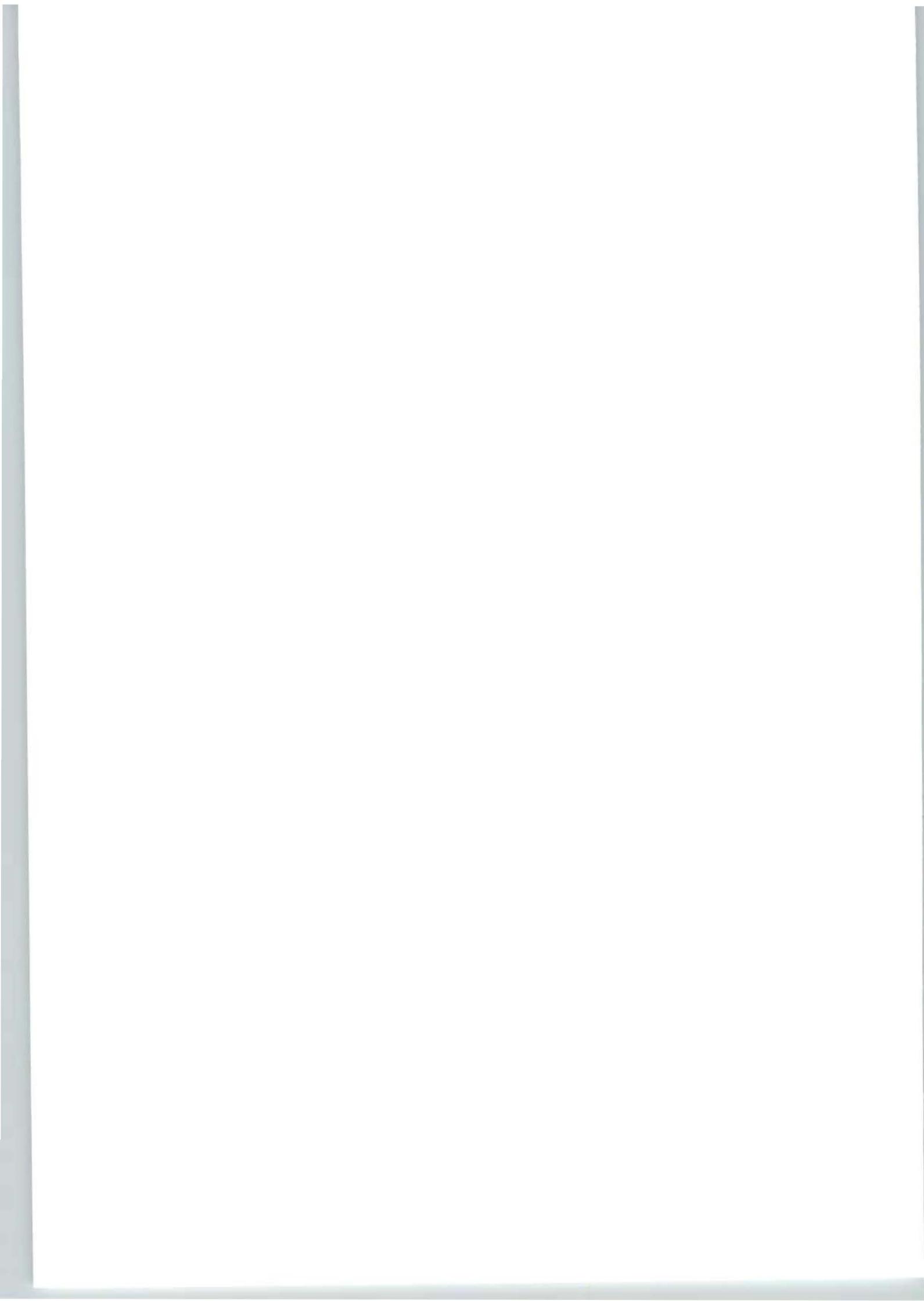




Bild 20: Fehlerrohr vor dem Eingraben

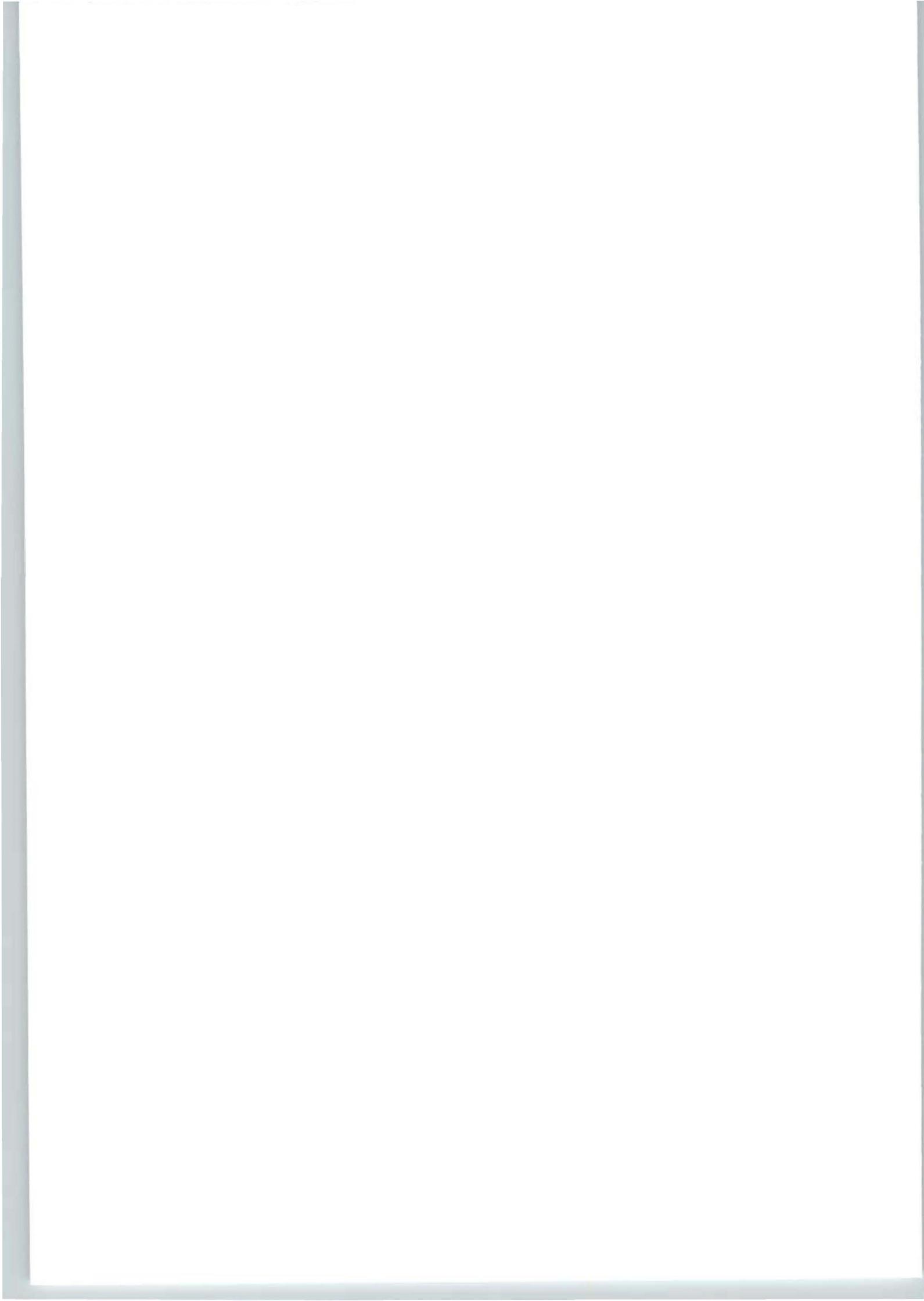


Bild 21: Betrag des Stromfadenversatzes

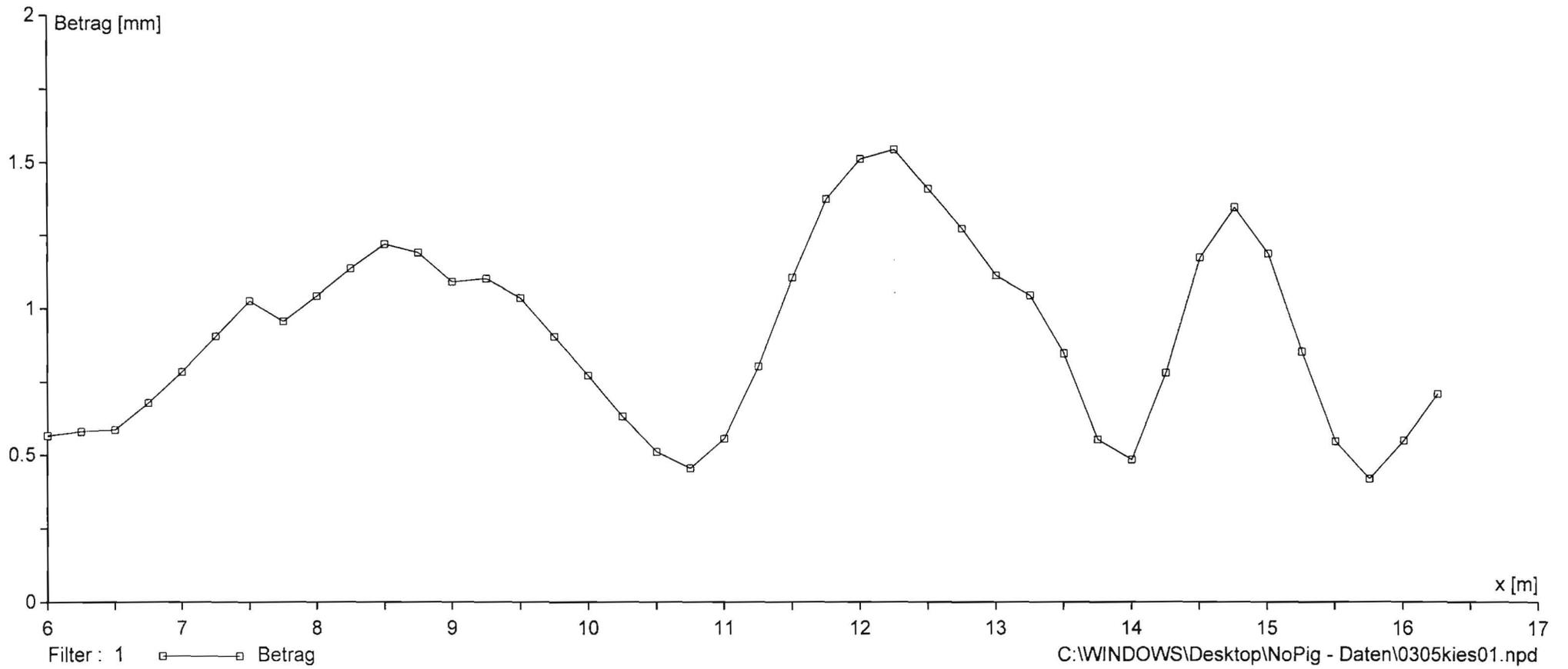


Bild 22: Tiefen- und Seitenversatz des Stromfadens

