

# Qualitätssicherung und Untersuchung von Kanal-Schlauchlinern mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren

Maryam MANAVIPOUR\*, Christoph SKLARCZYK\*, Jochen H. KURZ\*,  
Christian BOLLER\*

\* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP  
Campus E3 1, 66123 Saarbrücken, Tel. 0681 9302 3881  
E-Mail maryam.manavipour@izfp.fraunhofer.de

**Kurzfassung.** Rohrsanierungen und Technologien zur grabenlosen Erneuerung von Abwasserleitungen wurden in den letzten 30-40 Jahren stetig zunehmend eingesetzt. Von der Gesamtlänge des öffentlichen Kanalnetzes in Deutschland waren 2004 ca. 20 % kurz- oder mittelfristig und weitere 21 % langfristig sanierungsbedürftig. Zur Sanierung der schadhafte Kanäle werden insbesondere Renovierungsverfahren in geschlossener Bauweise, d.h. ohne Störungen an der Oberfläche, eingesetzt. Mit einem Anteil von 88 % sind Reliningverfahren die am häufigsten angewandten Renovierungsverfahren. Als Marktführer gilt hier das Schlauchlining-Verfahren. Bei der Qualitätssicherung und Zustandserfassung der Schlauchliner ist nach dem Einbau eine Beschädigung der eingesetzten Materialien zu vermeiden. Die dazu notwendigen Inspektionsverfahren sollten im Vergleich zur manuellen Inspektion schnell und automatisierbar sein. Ein hierfür geeignetes zerstörungsfreies Prüfverfahren (Mikrowellenverfahren) und erste mit diesem Verfahren an Schlauchlinern erzielte Ergebnisse werden vorgestellt. Um ein räumlich hoch aufgelöstes Bild der Schlauchlinerproben zu erhalten, wurden Mikrowellen im Frequenzbereich 75 GHz - 100 GHz in berührungsloser Weise (Freiraum) im Reflexionsmodus eingesetzt. Hierzu wurde ein vektorielles Netzwerk-Analysatorsystem (VNWA) verwendet, das eine genaue und breitbandige Messung ermöglicht. Damit konnten künstliche Defekte mit verschiedenen Durchmessern und Tiefen detektiert werden.

## 1. Einführung

Die Gesamtlänge des öffentlichen Kanalnetzes in Deutschland lag im Jahr 2004 bei etwa 500.000 km, von denen ca. 20 % kurz- oder mittelfristig und weitere 21 % langfristig sanierungsbedürftig sind. Zur Sanierung der schadhafte Kanäle werden in geschlossener Bauweise, d.h. ohne Störungen an der Oberfläche, insbesondere Renovierungsverfahren eingesetzt. Mit einem Anteil von 88 % sind Reliningverfahren die am häufigsten angewandten Renovierungsverfahren. Als Marktführer gilt hier das Schlauchlining-Verfahren [1].

Im Prinzip bestehen Schlauchliner aus Trägermaterial und Harz. Als Trägermaterialien kommen im Wesentlichen korrosionsbeständige Synthese-/ Polymerfasern (auch Nadelfilz genannt) oder Glasfasergewebe (in der Regel aus korrosionsbeständigem E-CR-Glas) zum Einsatz [2].



Ein neuer Weg zur Überprüfung des Sanierungsergebnisses ergibt sich durch den Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren. Ziel hierbei ist es, mögliche Schwachstellen der Schlauchlinersanierung zu identifizieren und ggf. gezielt Proben an diesen Stellen zur weiteren Prüfung im Labor zu entnehmen. Bislang werden die Stellen zur Probenentnahme relativ subjektiv festgelegt.

Ein geeignetes zerstörungsfreies Prüfverfahren ist das Mikrowellenverfahren. Erste mit diesem Verfahren an Schlauchlinern erzielte Ergebnisse werden in diesem Artikel vorgestellt.

Die Mikrowellentechnik nutzt elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich von ca. 0,3 GHz bis 300 GHz, wobei die entsprechenden Vakuum-Wellenlängen zwischen 1 m und 1 mm liegen. Bei der Wechselwirkung mit Materie erfahren die Mikrowellen ähnliche Effekte wie Schallwellen (Streuung, Reflexion, Absorption, Brechung, ...). Die phänomenologischen Parameter wie Leitfähigkeit, Permittivität, Permeabilität oder Brechzahl beschreiben die Wechselwirkung der elektromagnetischen Wellen mit Materie. Die Mikrowellen können Metalle nicht durchdringen, sondern werden an deren Oberfläche vollständig reflektiert. Sehr dünne Metallschichten können jedoch im Transmissionsmodus charakterisiert werden [3].

Die Ausbreitung der Mikrowellen erfolgt im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  und im Medium mit der Geschwindigkeit  $c_0/\sqrt{\epsilon_r}$ , wobei  $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ ,  $\epsilon$  = Permittivität des Mediums,  $\epsilon_0$  = Permittivität des Vakuums.

Die von der Sendeantenne zum Prüfobjekt abgestrahlten Mikrowellen werden in Abhängigkeit von den Objekteigenschaften und etwaigen Defekten am Objekt gestreut und die gestreuten Wellen von derselben (monostatisch) oder einer anderen Antenne (bistatisch) aufgenommen und von weiteren Signalverarbeitungseinheiten erfasst und ausgewertet.

## **2. Zielsetzung**

Der Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren eröffnet einen neuen Weg zur Überprüfung des Ergebnisses einer Kanalsanierung mit Schlauchlinern. Ziel hierbei ist es, mögliche Schwachstellen der Schlauchlinersanierung mit Hilfe von berührungslosen Mikrowellenverfahren zu erkennen und möglichst zu quantifizieren.

Es besteht Bedarf an einem Mikrowellen-Prüfverfahren, das die Tiefe und die Größe der Defekte bestimmen kann. Für die hier zu bearbeitende Problemstellung ist die Ermittlung der optimalen Mikrowellenparameter (Frequenz, Bandbreite, Art der Antenne, Abstand der Antenne zum Prüfobjekt, ...) erforderlich.

## **3. Stand der Technik**

### *3.1 Konventionelle Methoden*

Bislang werden Schlauchliner nach der Fertigstellung visuell im Hinblick auf sichtbare Fehler und mit einer Druckprobe bezüglich Leckagen geprüft. Zusätzlich wird meistens eine Probe entnommen und diese im Labor untersucht. Mittels Messschieber erfolgt die Messung der Wanddicke. Die mechanischen Kenngrößen, die weitere wichtige Parameter zur Charakterisierung der Bauteilqualität, aber auch zur Beurteilung von Degradationsprozessen, sind, werden mit einem Dreipunkt-Biegeversuch geprüft. Die Dichtheit der Probe wird mit eingefärbtem Wasser untersucht [4].

### 3.2 Zerstörungsfreie Methoden

In einem Forschungsvorhaben unter Führung des Instituts für Unterirdische Infrastruktur (IKT, Gelsenkirchen) wurde Schlauchliner-Proben aus Nadelfilz und GFK unter Laborbedingungen mittels verschiedener zerstörungsfreier Prüfverfahren untersucht. Es sollte eruiert werden, inwieweit die unterschiedlichen Verfahren eine erfolgreiche Überprüfung des Schlauchliners, z. B. eine Detektion von Fehlstellen, eine Wanddickenbestimmung oder eine unzulässige Abweichung der Rohrgeometrie vom Soll ermöglichen [4].

Diese angewandten zerstörungsfreien Prüfverfahren waren: 3D-Laserscanning, Temperaturmessung während der Aushärtung des Schlauchliners, Wärmefluss-Thermographie, Impact-Echo-Verfahren, lokale Resonanzspektroskopie und Ultraschall-Echo-Verfahren [4]. Das hier vorgestellte Mikrowellenverfahren stellt ein weiteres potentielles zerstörungsfreies Prüfverfahren für Schlauchliner dar.

## 4. Probensatz

Die vom IKT Institut zur Verfügung gestellte Schlauchliner-Probe besteht aus ungesättigtem Polyester (UP) und Nadelfilz als Trägermaterial. Die Probe wurde ist ungealtert und wurde unmittelbar nach dem Einbau des Schlauchliners entnommen (siehe Tabelle 1).

Tabelle1: Einige Eigenschaften der Probe

Profil	Material	dicht	E-Modul [MPa]	Biegespannung [MPa]	Verbunddicke [mm]
DN1000	Nadelfilz, UP	ja	3.247	32	19,2

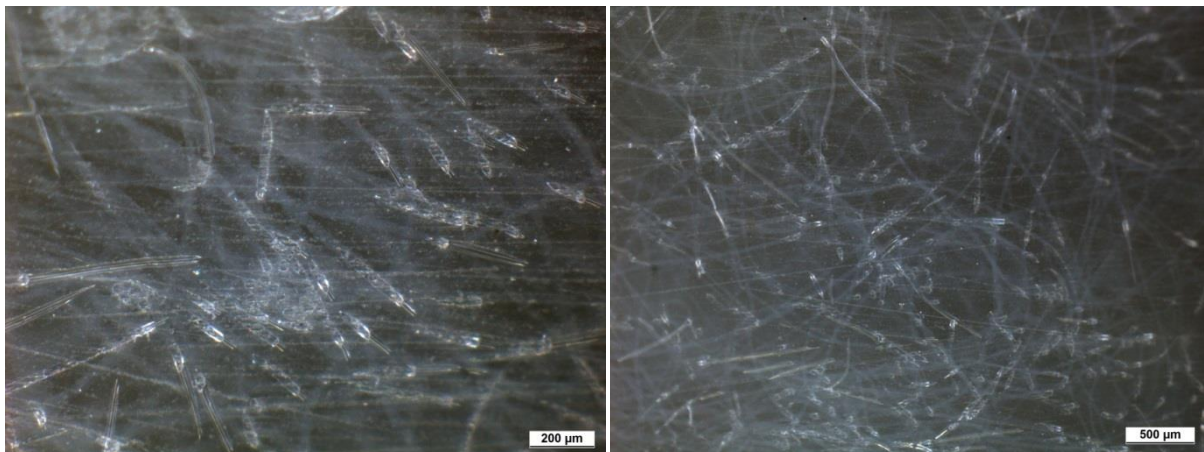


Abb.1: UP-Nadelfilz Probe, aufgenommen mit dem Stereomikroskop Leica M205A. verschiedene Vergrößerungen

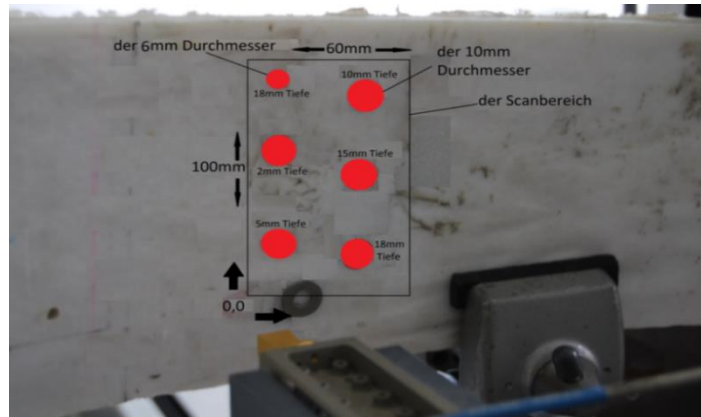


Abb.2: Innenseite der untersuchten Schlauchlinerprobe mit markierten Positionen der auf der Außenseite eingebrachten Flachbodenbohrungen. Die Scanfläche ist ebenfalls eingezeichnet.

Um zu prüfen, ob Defekte mit dem Mikrowellen-Verfahren erkannt werden können, wurden Flachbodenbohrungen mit 10 mm und 6 mm Durchmesser und einer Tiefe von 18, 15, 10, 5 und 2 mm auf der Außenseite gefräst. Abb. 2 zeigt die Innenseite der Probe. Diese Seite wäre bei einer Prüfung des Schlauchliners im Rohrrinneren zugänglich. Die roten Kreise geben die Positionen der Löcher auf der Außenseite wieder. Abb. 3 zeigt die Probenrückseite, also die Seite, die an dem Alrohr anliegt.

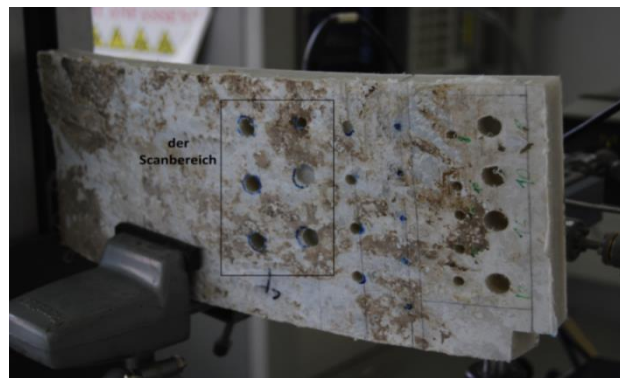


Abb. 3: Probenrückseite mit Flachbodenbohrungen

Die Probe ist in Abbildung 4 skizziert. Die Kreise sind die Flachbodenbohrungen. Der metallische Ring am rechten Probenrand dient aufgrund des starken Reflexes als Referenzpunkt.

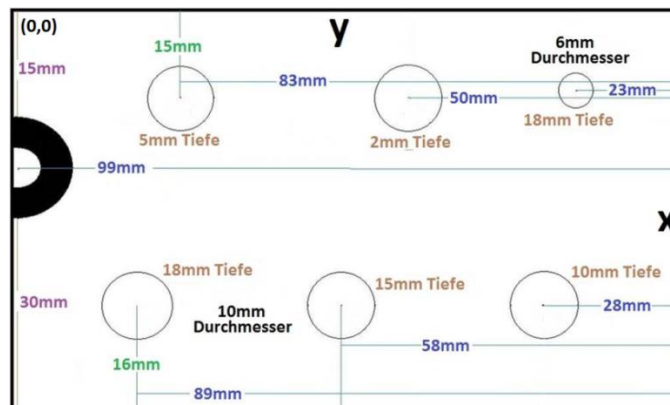


Abb. 4: Schematisches Bild der Probe

## 5. Messaufbau

Um ein räumlich hoch aufgelöstes Bild der Schlauchliner-Proben zu erhalten, wurden Mikrowellen im Frequenzbereich der Millimeterwellen zwischen 75 GHz und 100 GHz, entsprechend einer Wellenlänge im Vakuum von 3 - 4 mm, in berührungsloser Weise (Freiraum) im Reflexionsmodus eingesetzt.

Hierzu wurde ein vektorielles Netzwerk-Analysatorsystem (VNWA) verwendet, das eine genaue und breitbandige Messung ermöglicht. Das Prüfsystem erlaubt also die Messung von Phase und Amplitude bzw. Real- und Imaginärteil. Eine Hornantenne (Apertur ca.  $6 \times 9 \text{ mm}^2$ ) wurde sowohl als Sende- als auch als Empfangsantenne benutzt. Der Abstand zwischen der Probe und der Antenne betrug 50 mm.

Die Probe wurde mit einem Zweiachsen-Scanner über die feststehende Antenne (Startposition  $x=[0,100]$  und  $y=[0,60]$ ) verfahren. Ein Rechnerprogramm steuerte die Messdatenerfassung des VNWA und die Bewegung der Probe in der x- und y-Achse. Der Streuparameter  $S_{11}$  wurde an jeder Messposition für 201 Frequenzen zwischen 75 GHz und 100 GHz erfasst, wobei die Scan-Schrittweite in x- und y-Richtung 1 mm betrug. Die Messdaten werden auf einem Rechner gespeichert und dann mit Mathematica- und C++-Programmen verarbeitet. Dabei wurde ein Volumen ausgewertet, das mit der Scanfläche am Ort der Antennenapertur beginnt und in Strahlrichtung jenseits der Probenrückwand endet. Dabei wurde zur Erhöhung der lateralen Auflösung die Technik des Synthetic Aperture Radar (SAR) eingesetzt [5].

## 6. Experimentelle Ergebnisse

Die folgenden Abbildungen zeigen die Signalamplituden in Form von Schnittbildern des erfassten Volumens parallel zur Scanfläche und damit parallel zur Probenoberfläche (Rohrinnenwand). Dies ist analog zum C-Bild in der Ultraschallprüfung, wobei Abb. 5 die Amplituden im Bereich der Probeninnenwand und Abb. 10 die Amplituden an der Probenrückseite zeigt. Die Abb. 6 – 9 zeigen dementsprechend die Schnittebenen dazwischen. In Abb. 5 ist vor allem der Metallring aufgrund der starken Reflexion zu erkennen. Seine Position in Abb. 5 entspricht der in Abb. 4.

Abbildung 6. zeigt die Kreisscheiben der Flachbodenbohrungen in der Tiefe 18 mm (von der Probenrückseite aus gemessen). Rechts oben liegt das Loch mit 10 mm und links unter das mit 6 mm Durchmesser. Der Reflex des Rings ist noch schwach zu erkennen, da die axiale Ortsauflösung (in Strahlrichtung) 3 – 4 mm beträgt.

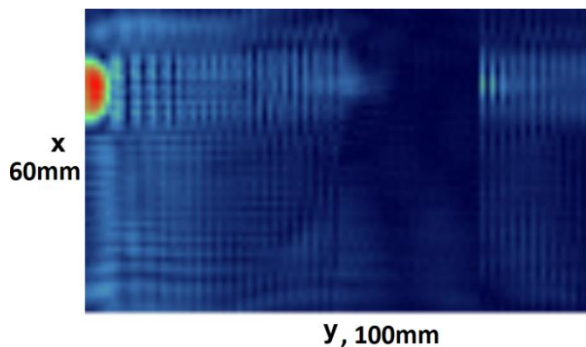


Abb. 5: Anzeige des Metallrings in der Schnittebene der Probenoberfläche

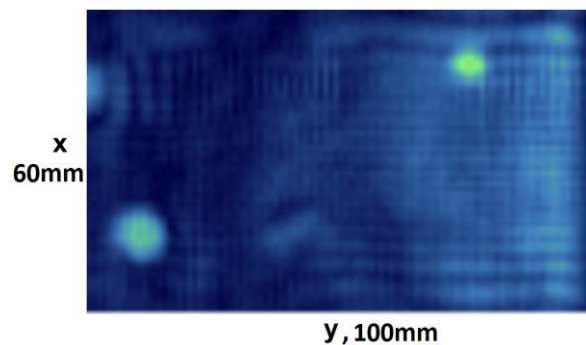


Abb. 6: Anzeigen der Löcher in 18 mm Tiefe

In den Abb. 7 und 8 erscheinen die Bohrungen mit der Tiefe 15mm und 10 mm. Bis jetzt sind alle Bohrungen deutlich zu erkennen.

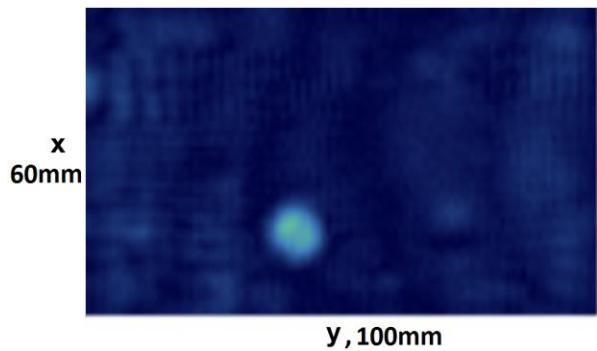


Abb. 7: Anzeige des Lochs in 15 mm Tiefe

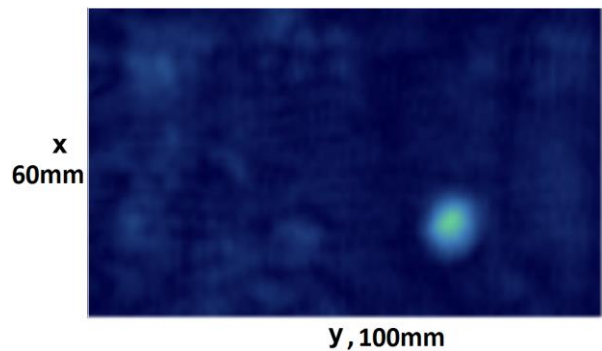


Abb. 8: Anzeige des Lochs in 10 mm Tiefe

In den größeren Tiefenlagen, also nahe an der Probenrückseite, taucht zunehmend ein Rauschen aufgrund der Rauheit der Probenrückseite auf und überlagert die Anzeigen der Flachbodenbohrungen (Abb. 9 und 10). Die Bohrung in 6 mm Tiefe ist noch gut zu erkennen, die in 2 mm Tiefe dagegen nur noch schwach.

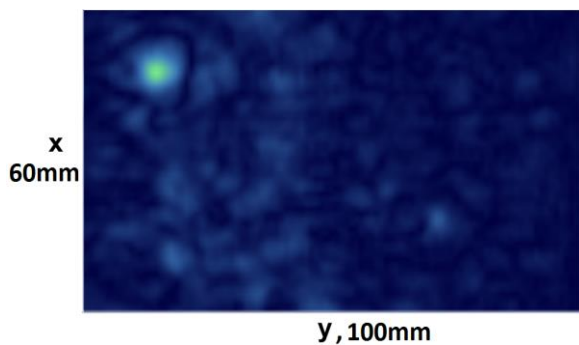


Abb. 9: Anzeige des Lochs in 5 mm Tiefe

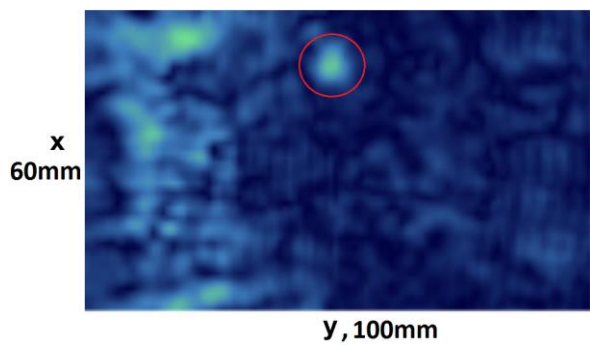


Abb. 10: Anzeige des Lochs in 2 mm Tiefe

Die Abb. 11 und 12 zeigen Schnittbilder parallel zur Strahlachse mit horizontalen Schnittebenen entsprechend Abbildung 4. Der unterste horizontale Streifen in Abb. 11 und 12 ist Reflexion an der Antenne. Der zweite Streifen repräsentiert die Vorderwand der Probe. Im Bild 11 ist links der Metallring auf der Vorderwand sichtbar. Der dritte unterbrochene Streifen stellt die Rückwand der Probe dar. Zwischen der Vorderwand und der Rückwand kann man in Bildern 11 und 12 einige der Flachbodenbohrungen erkennen.

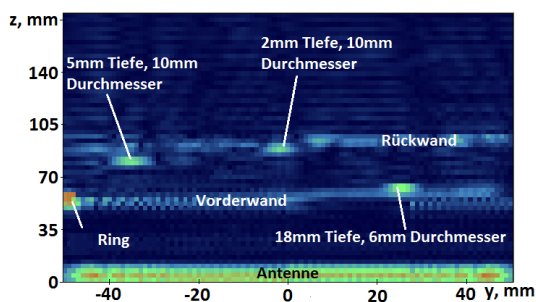


Abb. 11: Schnittbild parallel zur Strahlachse. Darstellung des Rings und der Flachbodenbohrungen in 2, 5 und 18 mm Tiefe

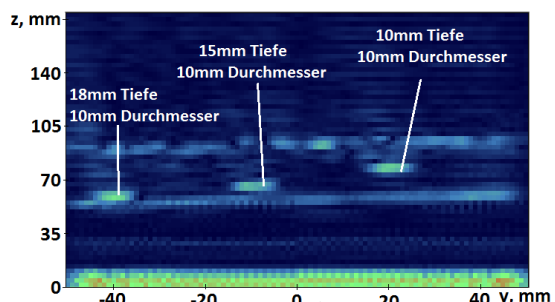


Abb. 12: Schnittbild parallel zur Strahlachse. Darstellung der Flachbodenbohrungen in 10, 15 und 18 mm Tiefe

Im folgendes werden die Ergebnisse des Versuchs an der zweiten Inliner-Probe, bei der die Rückwand nicht mehr erkennbar war, beschrieben. Die Eigenschaften der Probe sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle2: Einige Eigenschaften der Probe

Profil	Material	dicht	E-Modul [MPa]	Biegespannung [MPa]	Verbunddicke [mm]
DN 400	Nadelfilz, EP	ja	2.591	64	9,8



Abb. 13: Bild der EP-Nadelfilz Probe mit Stereomikroskop Leica M205A

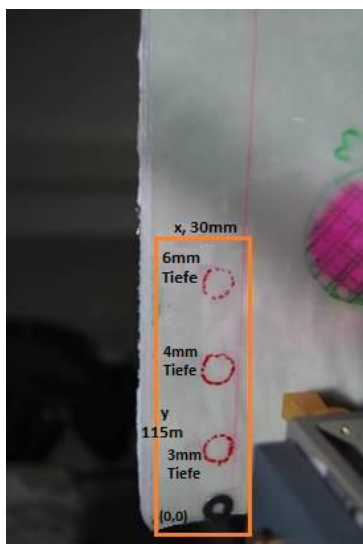


Abb. 14: Vorderwand der Schlauchlinerprobe mit markierten Positionen der auf der Außenseite eingebrachten Bohrungen. Die Scanfläche ist ebenfalls eingezeichnet.

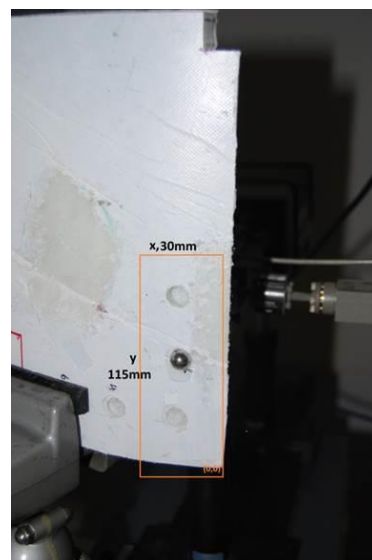


Abb. 15: Probenrückseite mit Bohrungen

In den Abb. 14 und 15 sieht man die Vorderwand und die Rückwand der Probe. Die Abbildung 15 zeigt 3 Bohrungen mit 10mm Durchmesser und verschiedenen Tiefen (6 mm, 4 mm, 3mm).

Um die Bohrungen besser erkennen zu können, wurde eine Stahlkugel in die 4 mm tiefe Bohrung eingesetzt.

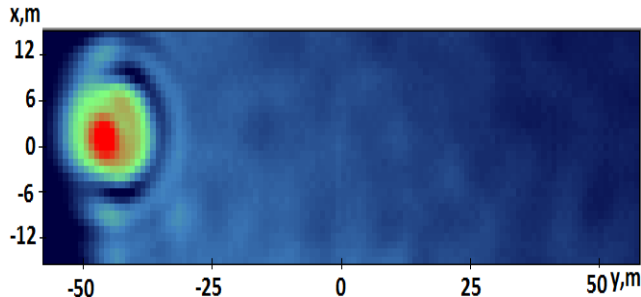


Abb. 16: Anzeigebild des Metallrings in der Schnittenebene der Probenoberfläche

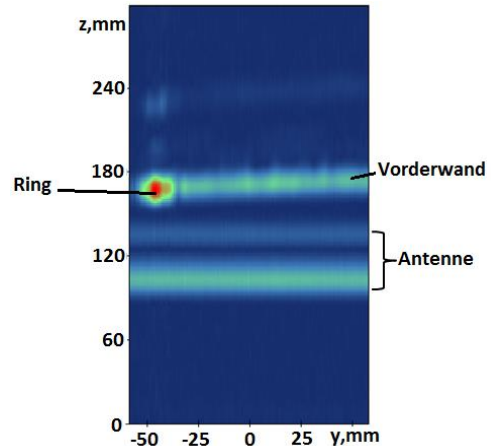


Abb. 17: Anzeigebild des Metallrings in der horizontalen Schnittenebene

In den Abb. 16 und 17 erscheint der Ring, doch sind die Bohrungen nicht erkennbar. Abb. 17 zeigt das Schnittbild parallel zur Strahlachse und analog zu Abb. 4 in horizontaler Ausrichtung. In diesem Bild kann die Rückwand im Gegensatz zu den Abbildungen 11 und 12 nicht detektiert werden.

## 7. Schlussfolgerungen

- Schlauchliner aus UP und Nadelfilz mit der Dicke 19,2 mm sind prüfbar mit Mikrowellen/Millimeterwellen.
- Die Tiefe und die Größe der Ersatzfehler können mittels Millimeterwellen bestimmt werden.
- Zur Differenzierung in Tiefenrichtung muss die Frequenzbandbreite groß genug sein.
- Eine Verbesserung der lateralen Ortsauflösung ist möglich mit Synthetic Aperture Radar.
- In einigen Proben ist die Absorption hoch. Es ist daher empfehlenswert, die Mittenfrequenz zu verkleinern, um auch diese Proben mit Mikrowellen untersuchen zu können.
- Die Ursachen für die starken Unterschiede in der Absorption sind noch nicht im Detail bekannt.

## 8. Referenzen

- [1] Berger, C.; Lohaus, J.: Zustand der Kanalisation - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2004. Korrespondenz Abwasser, Abfall 2005 (52) Nr. 5, S. 528-539.
- [2] Bosseler, B. ; Diburg, B. : Sanierung von Abwasserkanälen und -leitungen in Rehabilitation von Rohrleitungen – Sanierung und Erneuerung von Ver- und Entsorgungsnetzen. Weiterbil-



denes Studium Wasser und Umwelt; Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland; 2., überarbeitete Auflage; September 2008.

- [3] Zoughi, R. : Microwave Non-Destructive Testing and Evaluation; 2000.
- [4] IKT Endbericht :Abnahme von Liningmaßnahmen Materialnachweise und Bewertung der Liningqualität; Gelsenkirchen, März 2009.
- [5] Yakubov, V.P.; Sklarczyk, C.H.; Pinchuk, R.V.; Sukhanov, D.Ya.; Bulavinov, A.N.; Bevetskii, A.D. : Radio-Wave Tomography of Hidden Objects for Safety Systems, Russian Physics Journal, Vol. 51, No. 10, 2008, 1064 – 1082.