

Rohrroboter zur internen Inspektion, Zerstörungsfreien Prüfung und Bearbeitung von Rohrsystemen

Alexander REISS
INSPECTOR SYSTEMS Rainer Hitzel GmbH, Rödermark

Kurzfassung. Inspector Systems ist spezialisiert auf die Herstellung selbstfahrender Rohr-Roboter zur internen Inspektion, Zerstörungsfreien Prüfung und Bearbeitung von Rohrsystemen.

Ursprünglich für die Nuklearindustrie entwickelt, kommen zusätzlich u. a. folgende Industriebereiche zur Anwendung: Öl & Gas (On-/Offshore, Raffinerien), Chemie, Petrochemie, Wasser etc.

Aufgrund der modularen und flexiblen Bauweise sind Einsätze auch durch eingeschränkte Zugänge (z.B. Ventile, Flansche) zum Rohrsystem, sowie bidirektionales Befahren durch Bögen und Steigungen (bis 90°) möglich.

Die Präsentation beschreibt das Systemkonzept der Rohrrobotertechnologie und die Möglichkeiten der Adaption von unterschiedlichen Inspektions.-/ Prüfungs.- und Bearbeitungsmodulen.

Kurz beschrieben werden Ultraschall.-/Wirbelstrom-Roboter zur Bestimmung von Wanddicken, Korrosionsflächen, Oberflächenrisse etc., sowie Schleifroboter zur internen Bearbeitung von Schweißnahtwurzeln.

Den Schwerpunkt bilden die Video/Laser-Roboter zur optischen Prüfung und Messung. Erklärt wird anhand von Beispielen die interne visuelle Inspektion von Rohrleitungen, deren Klassifizierung von Defekten (Laser-Tiefenmessung), 360° Laser-Rohrprofilmessung mit Kalkulation der Rohr-Ovalität zur optimalen Anpassung gleicher Rohrenden in der Offshore-Industrie, sowie Laser-Profilmessung von Schweißnähten in der Nuklearindustrie.

1. Einleitung

Technische Anlagen - insbesondere die hohen Anforderungen unterliegen - sollten immer auf dem bestmöglichen Niveau der Betriebssicherheit gehalten werden.

Dies gilt vor allem für die unzähligen Rohrleitungssysteme, die ein hohes Maß an Zuverlässigkeit, Komfort und Sicherheit benötigen.

Einzelne Rohrleitungsabschnitte in einwandfreiem Betriebszustand zu halten ist eine entscheidende Voraussetzung für einen störungsfreien Betrieb der gesamten Anlage.

Um Beschädigungen infolge von Verschleiß, Korrosion, Erosion und Risse (insbesondere in Schweißnähten) etc. frühzeitig zu entdecken, bzw. vorzubeugen, müssen daher regelmäßig strenge Prüfungen der verschiedensten Art durchgeführt werden. Dies kann bedeuten, wenn bei einer detektierten Schadstelle eine Reparatur von außen nicht möglich ist, muss eine Sanierung mit geeigneten Mitteln von innen stattfinden.

2. Systemkonzept Rohrroboter

Hauptkomponenten:

- Antriebseinheiten (eloxiertes Aluminium) mit speziell gummibeschichteten Rädern
- Flexible/Biegbare Faltenbälge (Edelstahl)
- Inspektions-, Prüfungs-, oder Bearbeitungsmodul
- Elektrischen Verbindungstöpfen
- Abriebfestes Spezialkabel
- Steuersystem (Bedieneinheit, Monitor, HDD-Recorder etc.)

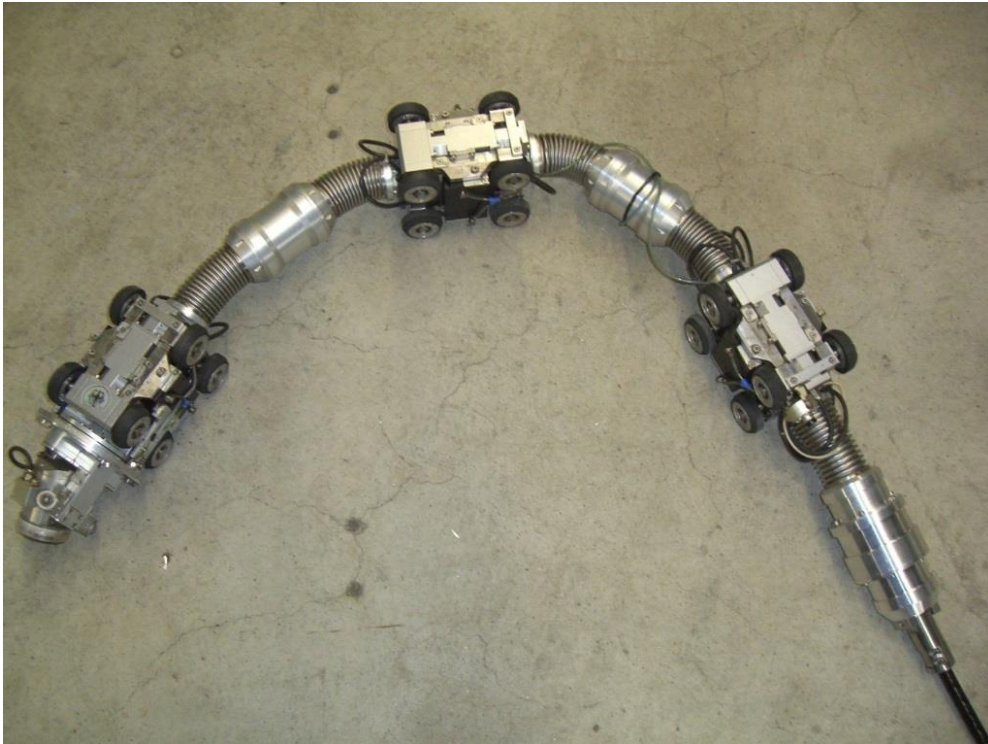


Abb. 1. Video/Laser-Roboter: Inspektionskopf, flexible Faltenbälge, Antriebseinheiten

Das Grundprinzip der Rohrroboter besteht aus mehreren Antriebseinheiten, sowie Inspektions-, Prüfungs-, oder Bearbeitungsmodulen, welche durch flexible Faltenbälge miteinander verbunden sind.

Mittels einstellbarer Vorspannung werden die mit einer speziellen Gummibeschichtung versehenen Reibrollen der Antriebseinheiten pneumatisch gegen die Rohrrinnenwand gedrückt. Dadurch wird der Roboter im Rohr stabilisiert/zentriert und kann anwendungsbedingt in vorwärts-rückwärts Richtung mehrere Bögen mit Biegeradius $>1.5D$, vertikale Abschnitte $\pm 90^\circ$, Durchmesserreduzierungen, sowie Abzweigungen durchfahren.

Durch hohen Biegungsgrad wird ein Einsetzen in das Rohrsystem durch enge und eingeschränkte Zugänge, z.B. offene Ventile, Flansche usw. ermöglicht.

Ein Spezialkabel vom Roboter zur Steuer- und Auswerteeinheit außerhalb, welches gleichzeitig auch eine Sicherheits-Rückholfunktion darstellt, dient zur Spannungs-/Luftversorgung, Datenübermittlung, Ansteuerung usw.



Abb. 2. Antriebseinheit eingefahren



Abb. 3. Antriebseinheit ausgefahren



Abb. 4. Spezialkabel mit robuster Steckverbindung



Abb. 5. Steuerung mit Auswerteeinheit Ultrasch.

Die Rohrroboter sind als Standard nach folgender Tabelle in Durchmesserbereiche aufgeteilt. Anwendungsbedingt und nach Kundenspezifikation sind unterschiedliche Durchmesserbereiche möglich.

TYPE	MM			INCH		
1.000	75	-	110	3	-	4
2.000	100	-	140	4	-	6
3.000	130	-	200	6	-	8
4.000	190	-	325	8	-	12
5.000	310	-	510	12	-	20
6.000	440	-	800	18	-	32
7.000	750	-	1.200	34	-	48

Abb. 6. Tabelle Standardgrößen-Durchmesserbereiche Rohrroboter

3. Hauptmerkmale Rohrroboter

Aufgrund des flexiblen und modularen Aufbaus bieten die Roboter ein weites Feld von Anwendungsmöglichkeiten.

Folgende Hauptmerkmale sind:

- Selbstfahrend
 - Kein externes Treibmedium (Wasser, Luft etc.)
 - Anhalten zu jeder Zeit
- Hoher Grad an Flexibilität und Biegsamkeit
 - Einsetzen durch eingeschränkte Zugänge (offene Ventile, Flansche etc.)
 - Passieren zahlreicher Bögen $\geq 1.5D$
 - Passieren Schweißnaht-Wurzeldurchhänge, T-Abzweige und Durchmesserreduzierungen
- Vorwärts-Rückwärts fahrend (Bi-Direktional)
 - Zugang nur von einer Seite notwendig
- Horizontale und vertikale Streckenbewältigung
 - Vertikal ($\pm 90^\circ$), geneigte Bergauf- und Bergabfahrten
- Echtzeit-Ergebnisse / Monitoring (Überwachung)
 - Direkterkundung
- Lange Wegstrecken (mehr als 500 m möglich)



Abb. 7. Einsetzen von Rohrroboter in eine Rohrleitung

4. Inspektions-, und Zerstörungsfreie Prüfmodule

Entsprechend den Erfordernissen können die Rohrroboter mit unterschiedlichen Modulen bestückt werden, die folgenden Beschreibungen zeigen eine Auswahl der häufigsten Anwendungen.

4.1 Video/Laser-Modul zur visuellen Inspektion

Für gewöhnliche visuelle Inspektionen von Rohrrinnenflächen oder zum Nachweis der Integrität spezifischer Komponenten (z.B. Ventile), werden üblicherweise Video/Laser-Module eingesetzt.

Auf einem um 360° drehbaren Inspektionskopf befindet sich eine neigbare hochauflösende (>460 TVL) CCD Farbbild-Videokamera mit 10-fach optischen Zoom, automatisch-manuellem Fokus und leistungsstarker stufenlos regelbarer Beleuchtung (LED-Ring) zur optimalen Ausleuchtung.

Zusätzlich im drehbaren Inspektionskopf befindet sich ein Punkt-Laser zur Beurteilung und Klassifizierung eventueller Schäden wie Risse oder Korrosion.

An jeder Stelle innerhalb einer Rohrleitung (auch im Bogenbereich) ist es möglich, Fehlstellen mit einer Ausbreitung > 2 mm und Genauigkeit besser 0.1 mm zu vermessen. Die Oberflächenbeschaffenheit der Rohrrinnenwand (z.B. stark glänzend, feucht oder sehr uneben) spielt durch entsprechende Justage dabei keine Rolle.

Alle Werte (Dreh- und Neigungswinkel, Laser usw.) werden am Laptop angezeigt und mit Hilfe eines Titelgenerators auf dem Monitor dargestellt, diese Werte werden dann auch zusammen mit dem Kamerabild und Kommentaren auf HDD/DVD gespeichert.

Durch den Laser ist es ebenfalls möglich eine innere Profil-/Ovalitätsmessung an einer beliebigen Stelle im Rohr durchzuführen und abzubilden (2D-Plot).

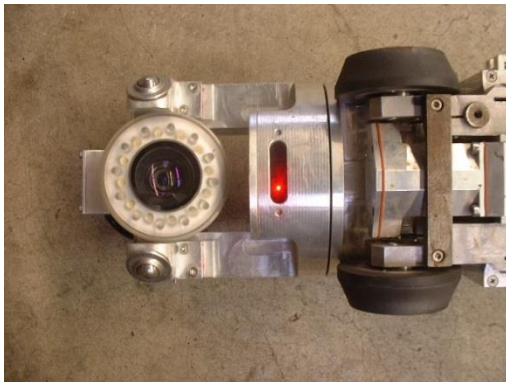


Abb. 8. Video/Laser-Inspektionskopf

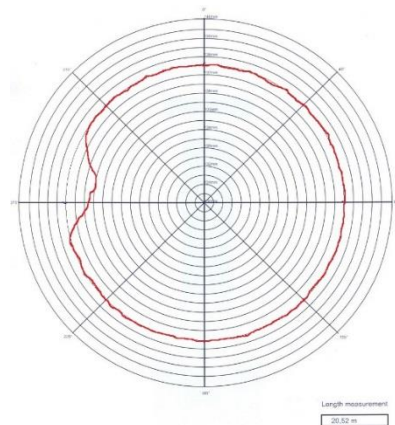


Abb. 9. Laser-Profilmessung (2D-Plot) mit Vertiefung bei ca. 270°

4.2 Axiales Laserscan-Modul zur Schleifprofilmessung

Hauptsächlich während der Montage von Rohrleitungen für im Bau befindliche Atomkraftwerke, dient dieses spezielle axiale Laserscan-Modul der Qualitätsbeurteilung und Dokumentation geschliffener innerer Schweißnähte zusammengesetzter Rohrleitungen.

Aufgrund des Kantenversatzes zusammengesetzter Rohrleitungen besteht für ein aktuelles Projekt die Anforderung darin, dass der Anstieg (Profil) der geschliffenen und polierten inneren Schweißnahtverbindung einen Winkel von 7° nicht überschreiten darf.

Dabei wird ein Punkt-Laser mit Hilfe einer hochgenauen Zentriereinrichtung, bestehend aus zwei Zentriereinheiten, im Bereich der Schweißnaht an einer Stelle fixiert und mittels einer axialen Motoreinheit über die Schweißnaht gefahren.

Gleichzeitig wird ein Laserprofil in der Software aufgenommen und der visuelle Zustand der Schweißnaht durch eine hochauflösende CCD Farbbild-Videokamera beurteilt.

Um eine Messung an mehreren Punkten durchführen zu können, ist zwischen den Zentriereinheiten eine Dreheinheit integriert, die es ermöglicht den Lasermesspunkt an der notwendigen Umfangsstelle im Rohr zu positionieren.

Vorgesehen für die Vermessung einer Schweißnaht sind vier Axialschans, der erste beginnend bei 0°, der Zweite bei 90°, der Dritte bei 180° und der Vierte bei 270°.

Mit Hilfe der Software ist es möglich, aufgenommene Profile jederzeit aufzurufen und mittels zwei Cursorpunkten den Winkel anzeigen zu lassen.

Die Software errechnet den Winkel automatisch und speichert ihn als Datensatz ab.

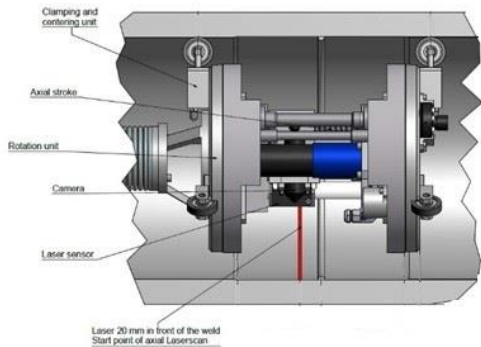


Abb. 10. Axiales Laserscan-Modul

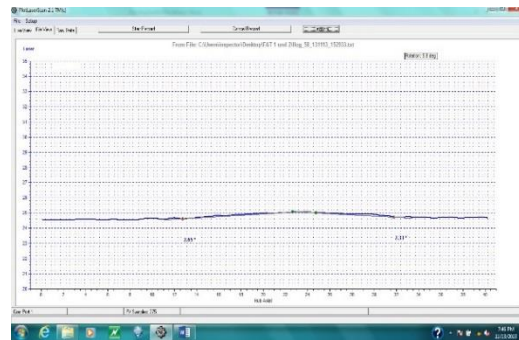


Abb. 11. Axiales Laserscan-Profil

4.3 Ultraschall-Modul zur Wanddickenbestimmung

Einsetzbar bei allen Echo-Fähigen Materialien, können mit der Ultraschalltechnik die Wanddicken von Rohrleitungen, sowie einzelne Bereiche mit Lochfrass etc. ermittelt werden, hierbei werden Fehler der inneren und äußeren Rohrfläche detektiert, ausgewertet und angezeigt.

Während der Roboter vorwärts durch die Rohrleitung fährt, rotiert eine ausgefahrene Sensorkammer des im Rohr zentrierten Ultraschall Moduls kontinuierlich an der Rohroberfläche entlang.

Ein kardanisches Aufhängesystem sorgt für einen permanent rechtwinkligen (orthogonalen) Kontakt der Sensorkammer entlang der zu inspizierenden Oberfläche.

Um von externen Koppelmedien unabhängig zu sein, kann der Sensorkammer mittels separater Zuleitung von außen Wasser zugeführt werden, dadurch ist eine Befüllung der Rohrleitung während der Prüfung nicht nötig.



Abb. 12. Ultraschall-Roboter

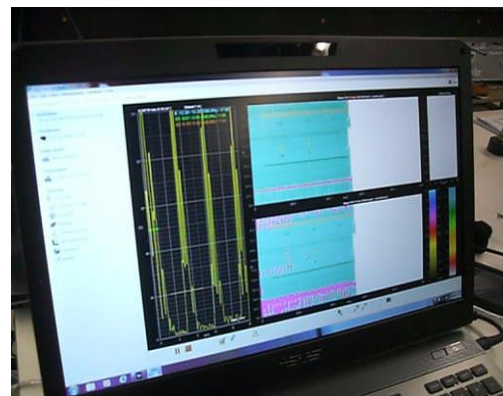


Abb. 13. Ultraschall-Auswerteeinheit

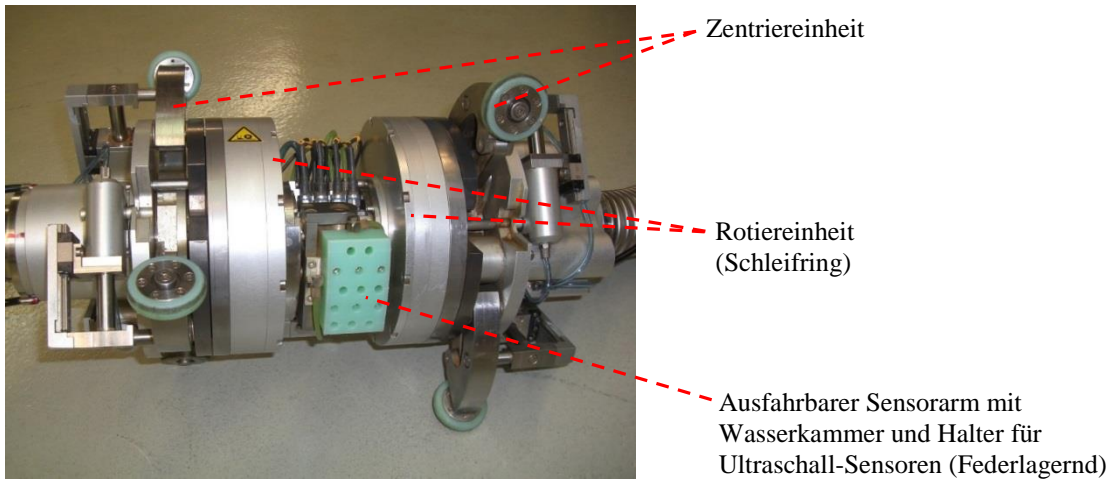


Abb. 14. Ultraschall-Modul

4.4 SLOFEC™-Modul zur Bestimmung von Materialschwächungen

Die SLOFEC™-Technologie (Saturated Low Frequency Eddy Current) eignet sich zur Bestimmung von Materialschwächungen in ferromagnetischen Rohrleitungssystemen, wobei eine Prüfung auch durch nichtleitfähige Beschichtungen (Gummi, Farbe) durchgeführt werden kann.

Basierend auf der Technik des Wirbelstromverfahrens, wird der erfasste Bauteilbereich durch Permanent- oder Elektromagnete vormagnetisiert, d.h. durch ein definiert eingeleitetes magnetisches Gleichfeld stellt sich eine relative Permeabilität ein (Homogenisierung der Materialeigenschaften).

Im Falle einer Materialschwächung kommt es im Bereich des Materialabtrages zu einer Verdichtung des örtlichen magnetischen Gleichfeldes, was ebenfalls eine Veränderung der relativen Permeabilität bedeutet und von zwischen den Magnetpolen angebrachten Wirbelstromsensoren erkannt wird.

Die Stärke des Gleichfeldes richtet sich nach der Bauteildicke, sowie der nachzuweisenden Fehlergröße und muss daher anhand von künstlichen oder realen Schädigungen in vergleichbaren Referenzkörpern eingestellt werden.

Aufgrund der Phasenlage ist eine Unterscheidung zwischen Fehlern an der Innen- und Außenseite möglich.

Der SLOFEC™ Inspektionsroboter wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Kontrolltechnik entwickelt

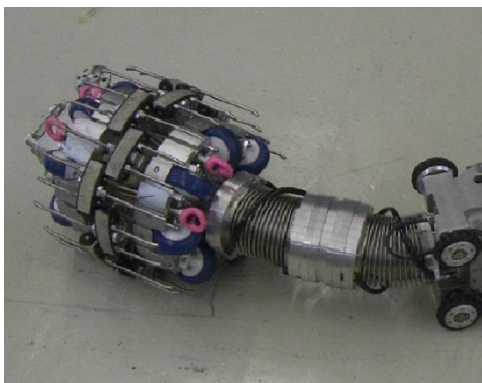


Abb. 15. SLOFEC™ -Modul

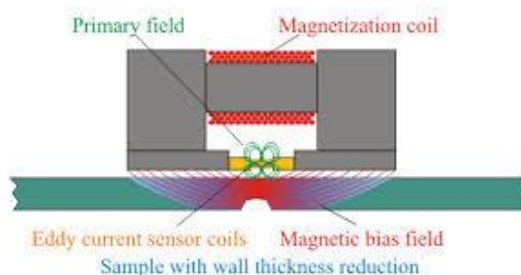


Abb. 16. SLOFEC™ -Prinzip

5. Bearbeitungsmodule

5.1 Schleif- und Polier-Modul

Mit dem Schleif- und Polier-Modul können die inneren Flächen von Rohrleitungssystemen maschinell bearbeitet werden.

Dies können - um Materialermüdung hinauszuzögern - stark beanspruchte Stellen sein, das Entfernen von Schweißnahtüberhängen oder Ablagerungen jeglicher Art, bzw. sicherheitsrelevante Schweißnähte von Rohrleitungen eines Primärkreislaufsystems nuklearer Anlagen während der Bauphase usw. Durch das gezielte Schleifen der inneren Schweißwurzeln wird die Qualität eines Rohrsystems (Lebensdauer) erhöht, Kantenversätze zusammengeführter Leitungen ausgeglichen, sowie wiederkehrende Prüfungen erleichtert. Mit einer Genauigkeit von 0,1 mm ist es möglich, lokale Bereiche punktuell nach genau definierten und vorgegebenen Geometrien auszuarbeiten. Der Schleifmodul beinhaltet ein elektro-mechanisches Spann- / Zentriersystem, einen radial verstellbaren leistungsstarken Drehstrom-Schleifmotor mit Schleifscheibe, sowie einer Dreheinheit mit einem Drehwinkel von 380 °.

Eine Kamera am Schleifmotor beobachtet, kontrolliert und steuert den Schleifvorgang.

Ein nachträgliches polieren mit einer Polierscheibe ermöglicht eine Oberflächenrauheit besser Ra 3,2 µm.

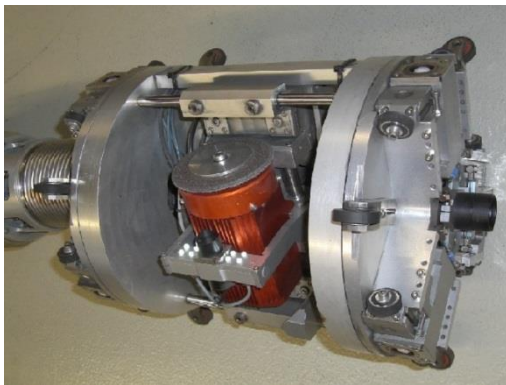


Abb. 17. Schleif-Modul

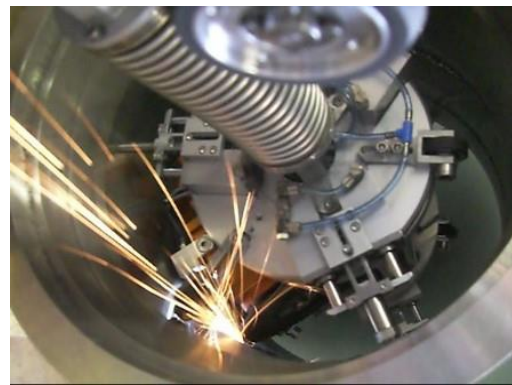


Abb. 18. Schleifvorgang

5.2 Vacuumreinigungs-Modul

Verunreinigungen können durch ein Vacuumreinigungs-Modul abgesaugt werden.

Auf der rotierenden Einheit des Moduls ist eine Saugereinheit mit Saugrohr angebracht, welche zur Rohrrinnenwand über einen Hub bewegt wird, dadurch ist eine gezielte Absaugung an jedem beliebigen Punkt in der Rohrleitung möglich.

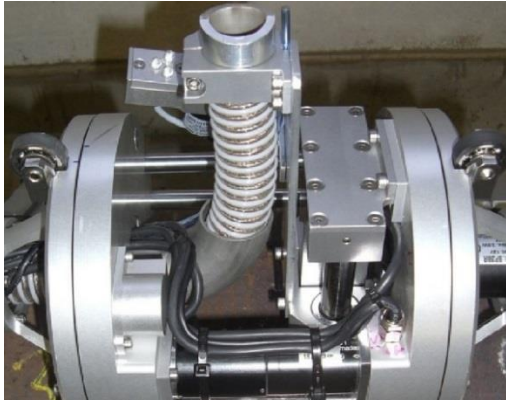


Abb. 19. Vacuumreinigungs-Modul

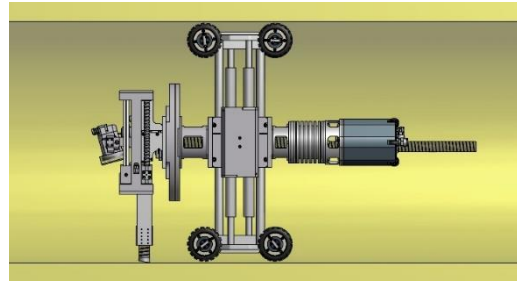


Abb. 20. Vacuumreinigungs-Modul: Ausgefahren

5.3 Beschichtungs-Modul

Aggressive oder abschleifende Medien können Materialien angreifen und zerstören, Beschichtungen ermöglichen dies zu verhindern.

Während der Fahrt in umgekehrter Richtung kann auf einer Entfernung von bis zu hundert Metern über eine rotierende Sprühdüse eine 1mm dicke Epoxid-Beschichtung, welche aus einer lösungsmittelfreien Zweikomponenten-Mischung besteht und durch temperierte Schlauchleitungen der Mischbatterie am Roboter zugeführt wird, gleichmäßig auf die Innenwand des Rohres aufgesprüht werden.

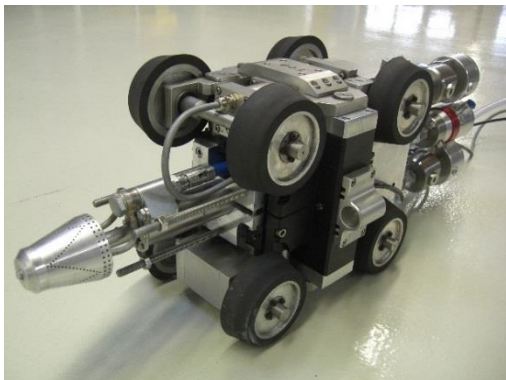


Abb. 21. Beschichtungs-Modul



Abb. 22. Innenbeschichtete Rohrleitung

6. Zusammenfassung

Der modulare Aufbau der Rohrroboter bildet die Plattform für Anwendungen innerhalb von Rohren, insbesondere wenn ein Zugang von außen schwierig, bzw. nicht möglich ist.

Das Grundkonzept erlaubt das bi-direktionale fahren in komplexen Rohrleitungssystemen mit horizontalen- und vertikalen Abschnitten, sowie durch Bögen.

Viele der beschriebenen Module wurden auf speziellen Wunsch aus unterschiedlichen Industriezweigen entwickelt und eingesetzt, kundenspezifische Lösungen sind anhand von Spezifikationen möglich.