

## **Magnetinduktives System zur Metaldetektion in der Nassbaggerei**

H. Ewald, A. Wolter, Universität Rostock

### **1. Einleitung**

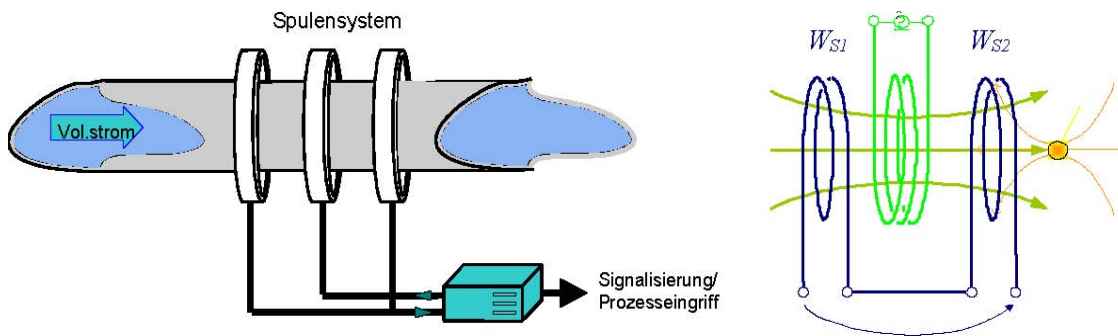
Induktive Sensoren finden seit vielen Jahren einen breiten Einsatz für verschiedenste Aufgaben, z. B. als Abstands- und Näherungssensor in der Automatisierungstechnik oder in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und Qualitätssicherung zur berührungslosen Erfassung von Materialeigenschaften und Defekten. Bisher existierte kein Verfahren zur Detektion von Munition während der Förderung in der Nassbaggerei. Dies bedeutete ein hohes Risiko, nicht nur bei der Gewinnung sondern auch für die weitere Nutzung der Sande von marinen Kieslagerstätten für den Küstenschutz und zur Baustoffgewinnung.

Am Beispiel der Metaldetektion in der Nassbaggerei wird mit Hilfe numerischer Modelle auf der Grundlage der Finiten Elemente (FEM) und der Finiten Integrationstechnik (FIT) das Sensorsystem - eine Differenzspulenanordnung - so optimiert, dass auch störende Einflüsse auf die Signalauswertung, wie z. B. Konzentrationsunterschiede im Volumenstrom (Wasser-Sandgemisch) sicher unterdrückt werden, bzw. keinen Einfluss auf die Nachweisempfindlichkeit haben.

Im Vergleich der theoretischen Ergebnisse mit den praktischen Messungen an Förderströmen in der Nassbaggerei bis zu Nenndurchmessern von 800mm wird das Potential der Technik aufgezeigt.

### **2. Mathematische 3D-Modellierung des Systems**

Untersucht wird eine Differenzspulenanordnung nach Abbildung 1, wie sie typischerweise zur Detektion von metallischen Fremdkörpern in Volumenströmen, beispielsweise in der Nahrungsmittelverarbeitung oder auch in der Holzverarbeitung zum Einsatz kommt. Das von der Primärspule erzeugte Magnetfeld induziert in den symmetrischen Sekundärspulen (WS1/WS2) zunächst gleich große Spannungen, d. h. ohne elektrisch oder magnetisch leitende Fremdkörper ist die Differenzspannung Null. Tritt nun ein solcher Körper ins Messvolumen ein, entsteht durch Störung dieser Symmetrie eine Differenzspannung. Üblicherweise arbeiten solche Systeme bei einer oder mehreren diskreten Frequenzen (Mehrfrequenz-Wirbelstromverfahren).



Wirbelstromgerät mit  
integrierter Auswertung

$u(t)$

**Abbildung 1:** Durchlaufspulenanordnung für den Nachweis von metallischen Fremdkörpern, Links: technische Realisierung, Rechts: Wirkprinzip

Die mathematische Grundlage der Modellierung derartiger induktiver Sensoren bilden die Maxwell'schen Gleichungen der Elektrodynamik in der bekannten Form

$$\text{rot } \underline{H} = \underline{S} + \partial \underline{D} / \partial t \quad (1)$$

und 
$$\text{rot } \underline{E} = - \partial \underline{B} / \partial t \quad (2)$$

mit den Materialgleichungen

$$\underline{S} = \kappa \underline{E} \quad (3)$$

$$\underline{B} = \mu \underline{H} \quad (4)$$

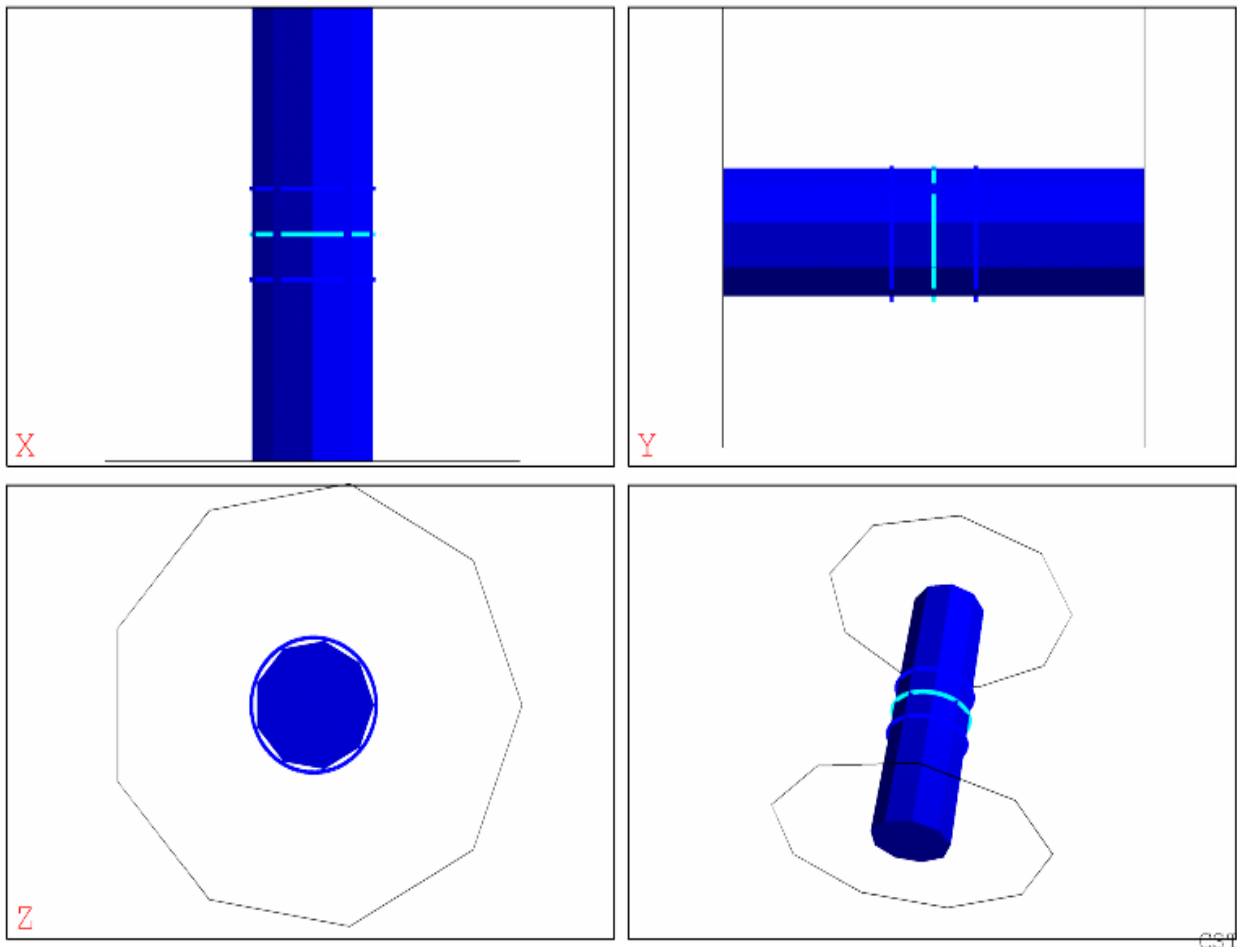
$$\underline{D} = \varepsilon \underline{E} . \quad (5)$$

( $\kappa$  – elektrische Leitfähigkeit,  $\mu$  – magnetische Permeabilität,  $\varepsilon$  – dielektrische Permittivität)

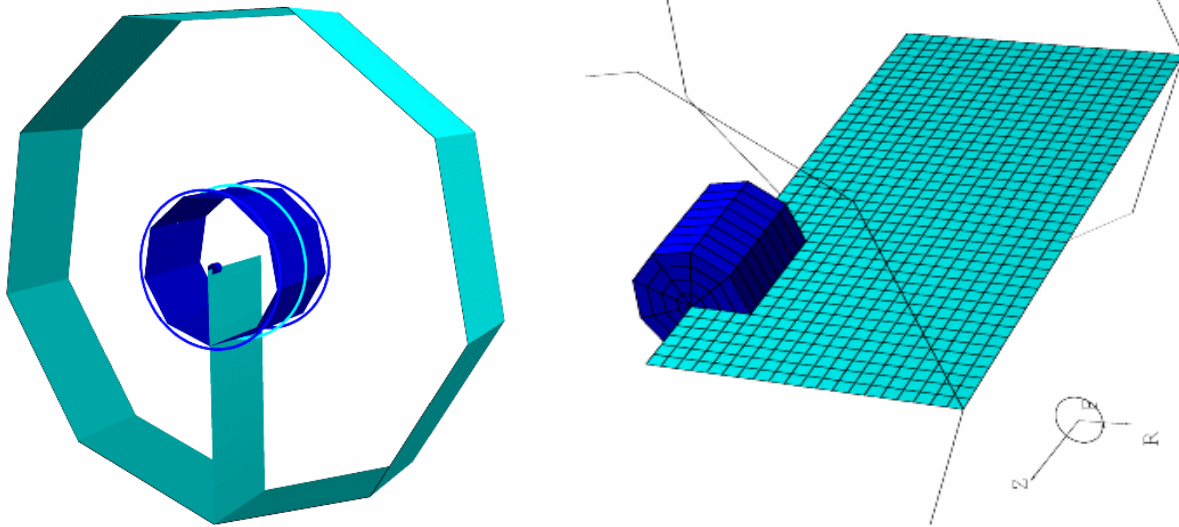
Dabei stellen  $\underline{E}$  und  $\underline{H}$  die elektrische und magnetische Feldstärke,  $\underline{S}$  die elektrische Stromdichte,  $\underline{D}$  die Verschiebestromdichte und  $\underline{B}$  die magnetische Flussdichte dar. Die Wirkung der Verschiebestrome  $\underline{D}$  kann im untersuchten Frequenzbereich auf Grund der Abmessungen der Spulenanordnung und der hohen relativen Dielektrizitätskonstante von Wasser (ca. 81) nicht vernachlässigt werden. Durch Einführung eines Vektorpotentials  $\underline{A}$  kann die dann entstehende Differentialgleichung mit verschiedenen Methoden gelöst werden (RWA, Randwertaufgabe).

In der Wirbelstromprüfung werden zur Lösung dieser Gleichungen problemangepasste analytische [1-3] oder numerische Modelle [4-7] verwendet. Durch die gesteigerte Leistungsfähigkeit der Rechentechnik haben sich in den letzten Jahren zunehmend numerische Modelle mit ihrer größeren Variabilität durchgesetzt.

Mit Hilfe derartiger numerischer 3-D-Modelle, welche auf der Finiten Elemente Methode (FEM) und der Finiten Integrationstechnik (FIT) basieren, wurden die Arbeitsfrequenzen und die Geometrie der Spulenanordnung auf die spezifischen Materialeigenschaften des Transportmediums und der zu detektierenden Metallteile optimiert [8]. Im Vorfeld sind verschiedene kommerziell erhältliche Softwarepakete für diese Aufgabenstellung untersucht worden [9-14], wobei dann letztendlich die Simulationsrechnungen mit FEMLAB [11] und MAFIA [14] durchgeführt worden sind. Beispielhaft zeigen die Abbildungen 2 und 3 das Modellgitter für die FIT-Modellierung mit MAFIA.

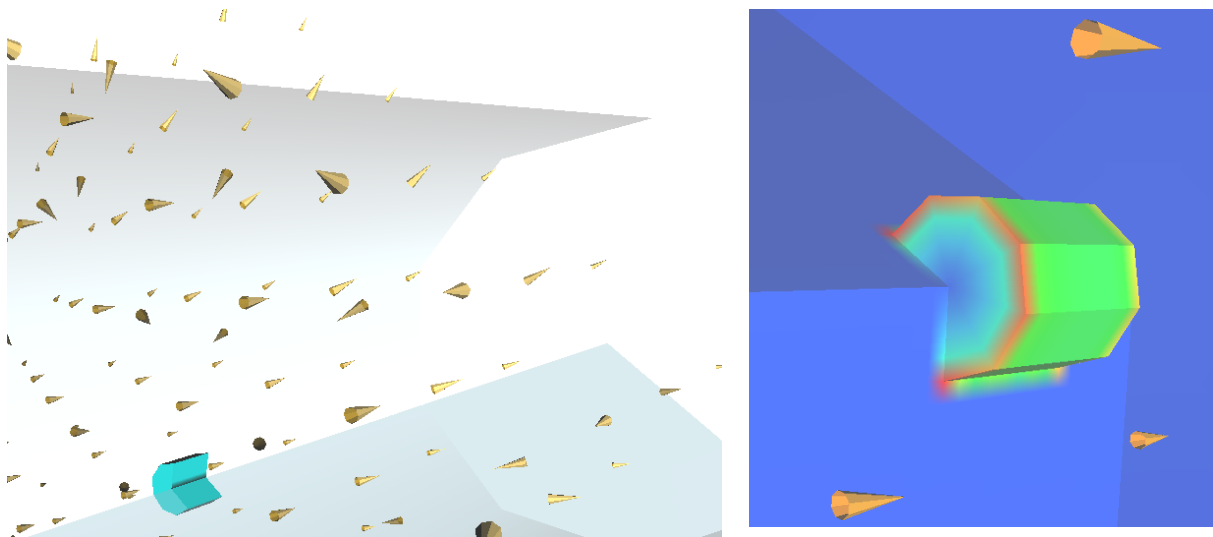


**Abbildung 2:** Modellgitter in Zylinderkoordinaten zur FIT-Modellierung des magnetinduktiven Sensors mit den Grenzen des Gesamtgebietes (dünne Linien), der Transportströmung (Zylinderförmig), umschlossen vom ringförmigen Spulensystem



**Abbildung 3:** FIT-Modellierung des magnetinduktiven Sensors: Details des Modellgitters in Zylinderkoordinaten: **Links:** Schnittdarstellung des Gitters im Bereich des Spulensystems, die vertikale Fläche (grau) stellt die Schnittebene  $\varphi = 0$  dar. **Rechts:** Gitter im Bereich des metallischen Probekörpers (dunkel) mit der Schnittebene  $\varphi = 0$

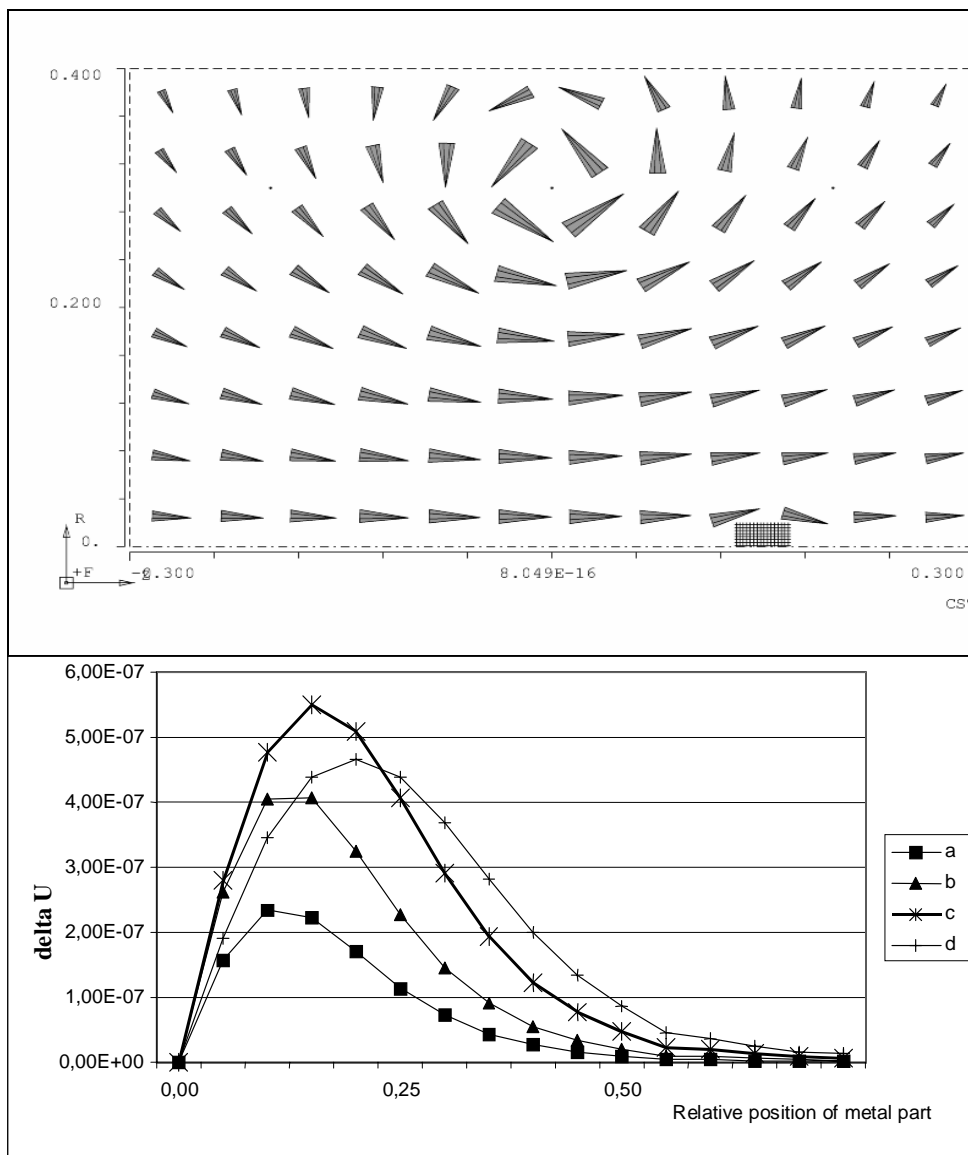
Im Ergebnisse der numerischen Berechnung entstehen 3-D-Feldbilder, aus denen während der Nachbearbeitung (postprocessing) alle physikalisch relevanten Größen, wie z. B. Betrag und Phase der Differenzspulenspannung, berechnet wurden. In der Abbildung 4 ist der Ausschnitt einer VRML-Visualisierung der Feldverteilung - hier für die magnetische Induktion und die Wirbelstromdichte im Bereich eines metallischen Probekörpers - aufgeführt.



**Abbildung 4:** Ausschnitte aus der VRML-Visualisierung der Feldverteilung: **Links:** Die Pfeile zeigen Betrag und Richtung der magnetische Flussdichte in der Umgebung des metallischen Probekörpers, **Rechts:** farbkodierte (Grauwerte) Darstellung der Verteilung der induzierten Wirbelstromdichte auf der Oberfläche des Probekörpers.

In umfangreichen Simulationsreihen wurden des Weiteren Parameterstudien durchgeführt, wie zum Beispiel der frequenzabhängige Einfluss gewählter Spulenabstände auf die Spulendifferenzspannung, der Einfluss von Dichte- bzw. Konzentrationsschwankungen des mehrphasigen Transportmediums (Sand-Wassergemisch) auf das Sensorsignal u.v.a.m..

Abbildung 5 zeigt beispielsweise die Verteilung der magnetischen Flussdichte während des Durchgangs eines metallischen Probekörpers durch das Spulensystem und den Einfluss verschiedener Spulenabstände auf die Stärke und den zeitlichen Verlauf der induzierten Differenzspulenspannung.



**Abbildung 5:** Magnetische Flussdichte und Spulenspannung **Oben:** Magnetische Flussdichte, generiert von der Primärspule sowie deren Verzerrung beim Durchgang eines metallischen Probekörpers (r-z-Ebene), **Unten:** induzierte Differenzspulenspannung als Funktion der Position des metallischen Probekörpers für vier verschiedene Spulenabstände (a ...d)

Im Ergebnis der Parameterstudien wurden die optimalen Systemkonfigurationen (Spulenabstände, Arbeitsfrequenzen sowie Detektionskriterien) für verschiedene Messbedingungen ermittelt.

### 3. Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen zur optimierten Sensoranordnung und zur angepassten Sensorsignalverarbeitung erfolgten im Labor und an realen Förderprozessen von Hopper-Baggern an der Ostseeküste. Das Spulensystem wurde an Druckleitungen (nichtmetallische Ausführung) bis zu Durchmessern von 800 mm erprobt, wobei Fördergeschwindigkeiten des Sand-Wassergemisches bis zu 8 m/s erreicht worden sind. Ein experimentelles Durchlaufspulensystem und dessen Anbringung am Spülrohr eines Hopper-Baggers sind aus der Abbildung 6 ersichtlich.

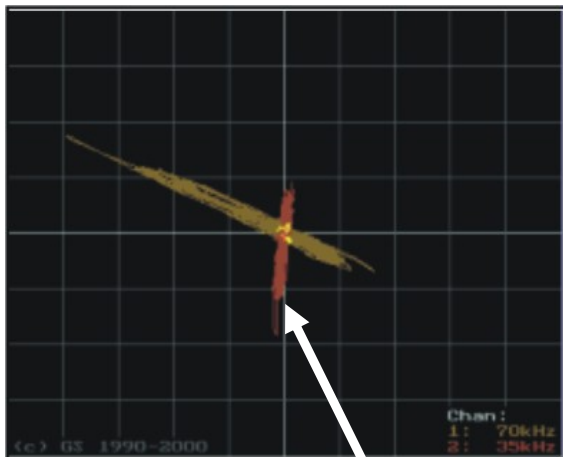


**Abbildung 6:** Durchlaufspulensystem zur Metaldetektion am Spülrohr eines Hopper-Baggers

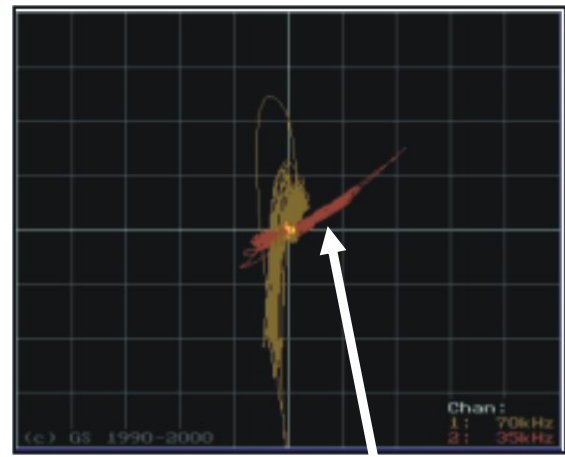
Es zeigte sich, dass eine besondere Herausforderung beim praktischen Einsatz die sich stochastisch ändernden elektromagnetischen Eigenschaften des Transportmediums darstellen. Beispielsweise schwankt die Sandkonzentration während des Förderprozesses zwischen 0 ... 40 %, mitgeführte Luftblasen bewirken eine temporäre Änderung im Füllgrad.

Durch die Messreihen am realen Prozess konnten insbesondere über die statistischen Eigenschaften derartiger Schwankungen wertvolle Informationen gewonnen werden.

Zur Verifizierung der Klassifikation bzw. der Geräteeinstellungen und der angepassten Signalverarbeitung kamen Geschoss-Surrogate unterschiedlichster Kaliber und einfache metallische Probekörper, wie z.B. Bolzen und Muttern, zum Einsatz. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die unterschiedlichen Geräteanzeigen des getesteten Mehrfrequenzsystems bei Detektion von Probekörpern aus Eisen- bzw. Nichteisenwerkstoffen (Messing).



Nichtweisenwerkstoff



Eisenwerkstoff

**Abbildung 7:** Mehrfrequenzverfahren: Geräteanzeige bei der Detektion unterschiedlicher Probekörper aus Eisen- bzw. Nichteisenwerkstoffen

Die richtige Wahl der beiden Arbeitsfrequenzen bildet nicht nur die Basis für die Unterscheidung von Eisen- und Nichteisenwerkstoffen sondern auch von Störsignalen welche z. B. infolge schwankender Dichteverhältnisse des Sand-Wassergemisches auftreten.

#### 4. Zusammenfassung

Die Untersuchungen zeigen, dass magnetinduktive Sensorsysteme für die Erkennung von metallischen Fremdkörpern (Munition) im Spülrohr bei der Nassbaggerei grundsätzlich anwendbar sind.

Die vorliegenden Prozessbedingungen erfordern allerdings gegenüber herkömmlichen Durchlaufspulensystemen eine modifiziertes Sensordesign und zusätzliche Maßnahmen in der Signalaufbereitung und Detektion.

Die am realen Prozess gewonnenen Messdaten bilden die Basis für die Optimierung des Spulensystems und den Entwurf angepasster Algorithmen zur Signalverarbeitung und Detektion.

Durch mathematische 3-D-Modellierung wurden neben der *Spulengeometrie* auch die *Arbeitsfrequenzen* sowie die *Parameter* der Signalaufbereitung und Klassifikation optimiert.

Durch den Einsatz einer adaptiven Signalaufbereitung sind die Einflüsse von Leitfähigkeitsschwankungen des Transportmediums (Süß-/Salzwasser und Dichteschwankungen des Sand-Wassergemisches) zu kompensieren.

Zusätzlich zu den Untersuchungen wurde ein Konzept zur Selektion von Munition aus dem Förderstrom erarbeitet, welches eine *Klassifikation der Materialien* in Echtzeit in Kombination mit einem nachgeordneten Prozesseingriff beschreibt.

**Die wissenschaftlichen Arbeiten wurden gefördert durch das Staatliche Amt für Umwelt und Natur (STAUN) Rostock.**

- [1] Sobolev, V.S.: K teorii metoda nakladnoi katuski kontrole vichrevymi tokami. -IZV AN SSSR, (1963)2,-S.78-88 (in Russisch)
- [2] Dodd, C.V.; Deeds, W.E.: Analytical Solution to Eddy-Current Coil Problems. Oak Ridge National Laboratory, 1967, Report ORNL-TM-1987
- [3] Suchorukov, V.V.: Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh polej v provadjaschich sredach. Uzd. Energija, Moskva 1975 (in Russisch)
- [4] Ida, N.; Lord, W.: Simulating Electromagnetic NDT Probe Fields. IEEE Comp. Graphic and Appl., Vol. CGA (1983)5, pp.21-28
- [5] Fawzi, T.H.; Ali, K. F.; Burke, P.E.: Boundary Integral Solution Equation Analysis of Induction Devices with Rotational Symmetry. IEEE Trans. on Magn. 19(1983)1, pp34-36
- [7] Burke, S. K.: A perturbation method for calculating coil impedance in eddy-current testing. J. Phys. D: Appl. Phys. 18(1985) pp.1745-1760
- [8] Ewald, H.; Wolter, A.: Optimisation of inductive sensors using mathematical modelling. Sensor and their Applications XII, Sensor Series, pp. 407-413, IOP Publishing Ltd. 2003, Bristol and Philadelphia 2003
- [9] OPERA-2D/3D: *Software Description*, Version 8.0, Vector Fields Corp. , Oxford, GB, Spring 2002
- [10] Maxwell-3D: *Software Description*, ANSOFT Corp., Pittsburgh (PA), USA, 2002
- [11] FEMLAB Toolbox for MATLAB: *Version 2.3*, COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2002
- [12] VIC-3D: *Software Description*, Version 3.0, Sabbagh Associates, Inc., Bloomington, (IN), USA, 2003
- [13] FARADAY 3D: *Software Description*, Integrated Engineering Software Sales, Inc., Winnipeg, Manitoba, USA 2004
- [14] MAFIA: *Software Description*, Version 4.0, CST Darmstadt, Germany, 1997-2001