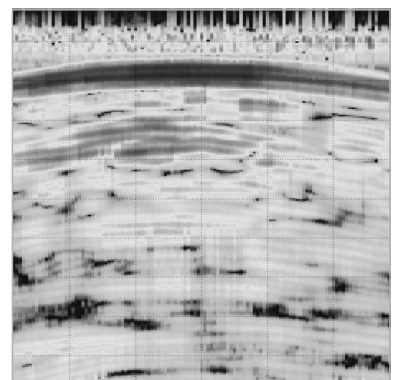
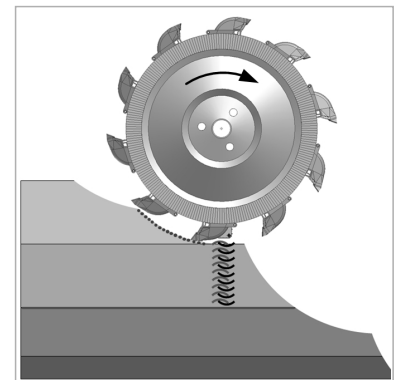


Tobias Mathiak

Automatische Trennschichterkennung mittels Georadar am Schaufelradbagger

Berichte aus dem ITA · Band 1/2014

Herausgeber: Ludger Overmeyer





Institut für Transport- und
Automatisierungstechnik

Berichte aus dem ITA

Wissenschaftliche Schriftenreihe des
Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik
der Leibniz Universität Hannover

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Zugleich: Dissertation,
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das
des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in
Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen
Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© TEWISS-Technik und Wissen GmbH, 2014
An der Universität 2 ♦ 30823 Garbsen
Tel: 0511-762-19434 ♦ Fax: 0511-762-18037
www.tewiss.uni-hannover.de ♦ mail: info@pzh-verlag.de

ISBN 978-3-944586-53-3
ISSN 1864-9122

Verlag: TEWISS-Technik und Wissen GmbH

Herstellung: Digital Print, Garbsen
Printed in Germany

Automatische Trennschichterkennung mittels Georadar am Schaufelradbagger

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Tobias Mathiak
geboren am 4. Oktober 1980
in Detmold

2014

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier
(3. Referent: Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena)
Tag der Promotion: 12.02.2014

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover im Rahmen des Industrieforschungsprojekts SEMT „Sensorische Erkennung der Materialart und Erfassung der Trennfläche“ mit der RWE Power AG.

Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer, Leiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik, für das entgegengebrachte Vertrauen und die persönliche Betreuung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier, Leiter des Instituts für Mess- und Regelungstechnik, für die Übernahme des Korreferates bedanken.

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena, Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, danke ich für den Prüfungsvorsitz.

Allen Beteiligten des Projekts SEMT danke ich für die angenehme und gute Zusammenarbeit. Besonders möchte ich mich bei Herrn Dr. Thomas Mannel und Frau Dipl.-Ing. Veronika Gau für das entgegengebrachte Vertrauen bedanken sowie bei Herrn Dipl.-Ing. Robert Ebener für die stets tatkräftige Unterstützung bei den Feldmessungen im Tagebau Iden.

Meinen Kollegen und Kolleginnen sowie den studentischen Hilfskräften des ITA danke ich für die langjährige, hilfsbereite gute Zusammenarbeit und Unterstützung sowie den freundschaftlichen Umgang. Besonders möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Kesting und Herrn Dr.-Ing. Jan-Florian Höfinghoff bedanken, die mir stets mit Rat und Tat bei den vielen Messeinsätzen zur Seite standen. Danken möchte ich auch Herrn Dr.-Ing. Sascha Falkenberg und Herrn Dipl.-Ing. Steffen Kleinert, die mit mir als Bürokollegen in der gemeinsamen Institutszeit durch dick und dünn gegangen sind.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Melanie sowie meiner Familie, die mir in der Zeit den notwendigen Rückhalt gegeben und mich immer unterstützt haben.

Hannover, den 17.02.2014

Tobias Mathiak

Zusammenfassung

Die kontinuierlichen Entwicklungen im Bereich der Sensortechnologien sowie der Signalverarbeitung ermöglichen es, neue Automatisierungslösungen zu generieren und somit bestehende Strukturen zu optimieren. Im Bergbau besteht das Potential im Bereich der Optimierung der Rohstoffgewinnung durch die Entwicklung und Verwendung von Sensortechnologien, die den Abbauprozess unterstützen. Hierzu zählen beispielsweise Technologien, die eine Materialerkennung ermöglichen oder die Schichtmächtigkeit des anstehenden Materials erfassen. Der Einsatz am Großgerät kann den Bediener in Form eines Assistenzsystems z.B. bei der selektiven Gewinnung von Rohstoffen unterstützen. Zugleich werden hierdurch die Voraussetzungen für zukünftige Automatisierungslösungen aufgezeigt. Das Forschungsprojekt SEMT, zwischen der RWE Power AG und dem Institut für Transport- und Automatisierungstechnik der Leibniz Universität Hannover, greift die Fragestellung der „Sensorischen Erkennung der Materialart und Erfassung der Trennfläche“ auf. Im Projekt wurden entsprechende Technologien auf Ihre Eignung untersucht. Hieraus resultierten das Georadar zur Trennschichterkennung und die Geoelektrik zur Materialarterfassung. Diese Technologien wurden im Verlauf des Projekts in eine Schaufel des Schaufelradbaggers 255 integriert und im Tagebau Inden erfolgreich getestet. Übergeordnetes Ziel war die Entwicklung eines automatisch arbeitenden Interpretationssystems, das kontinuierlich Informationen zur anstehenden Materialart und zu den jeweiligen Schichtmächtigkeiten am Abbaustoß während des Abbauprozesses mit dem Schaufelradbagger zur effizienten Planung und Kontrolle erzeugt.

In dieser Arbeit wird die automatische Trennschichterkennung mittels Georadar am Schaufelradbagger untersucht. Hierzu wird eine Bearbeitungsdatenbasis bestehend aus Simulations- und Feldmessungsdaten erstellt, anhand derer allgemeine Merkmale von Trennschichtreflexionen abgeleitet werden. Nach der Untersuchung einer adäquaten Signalvorverarbeitung werden die Trennschichtreflexionen mittels der Berechnung der spektralen Leistungsdichteverteilung infolge der Zeit-Frequenzanalyse extrahiert. Anhand eines entwickelten adaptiven Kennwerts mit Kennwertgrenze werden die extrahierten Reflexionen weiterhin selektiert sowie mittels einer Bewertungsmatrix interpretiert. Diese Vorgehensweise wird anschließend für die Applikation am Schaufelradbagger untersucht. Die Ergebnisse der entwickelten Signalverarbeitung zeigen, dass die untersuchten Trennschichten im Tagebau in relevanten Grenzen automatisch detektiert werden können.

Schlagwörter:

Georadar, Automatische Trennschichterkennung, Schaufelradbagger, Automatisierung

Abstract

Title: Automatic Boundary Layer Detection Using Ground Penetrating Radar at a Bucket-Wheel Excavator

Developments in the field of sensor technologies and signal processing generate new solutions in automation that enable an optimization of existing structures. Increasing potential exists in optimizing the raw-material extraction process in mining applications through the employment of sensors. These include technologies that e.g. identify and distinguish between different materials or measure the layer thickness. The deployment on large-scale equipment can support the machinery operator in the form of an assistance system in achieving a selective raw-material extraction. This moreover illustrates the prerequisites for future automation solutions in mining processes. The research project SEMT, initiated by RWE Power AG and the Institute of Transport and Automation Technology, Leibniz University Hanover, addresses the issue of „sensory material detection and boundary layer determination“. A pilot study pointed out the suitability of ground penetrating radar for the determination of boundary layers, whereas the identification of different material types on the surface was carried out using a geoelectric system. In the course of the project, an integrated system was developed based upon these sensor technologies and was adapted to the 255 bucket-wheel excavator and successfully tested at the Inden opencast mine. The aim was to develop a continuously working interpretation system that generates information on material type and layer thickness at the working face during the extraction process with the bucket-wheel excavator for the efficient planning and control.

The aim of this dissertation was to investigate and provide a solution for the automatic boundary layer detection using ground penetrating radar at the bucket-wheel excavator. Based upon data accumulated through field measurements and through simulations, common features of boundary layer reflexions were defined. By using efficient signal preprocessing, the extraction of boundary layer reflexions was realized using the calculated distribution of the power spectral density obtained during the time-frequency analysis. Further identification and selection of boundary layer reflexions was achieved by a developed adaptive specific value, while the interpretation was realized by an evaluation matrix. These techniques were tested for the application with the bucket-wheel excavator. The results illustrated the possibility of an automatic detection of the investigated boundary layers in opencast mines.

Keywords:

Ground penetrating radar, GPR, automatic boundary layer detection, bucket-wheel excavator, automation

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Thema und Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Forschung und Technik	5
2.1	Georadar	5
2.1.1	Grundlagen der elektromagnetischen Wellenausbreitung in dielektrischen Materialien	6
2.1.2	Systemaufbau und Messverfahren	11
2.1.3	Einsatzbereiche des Georadars	14
2.2	Konzepte der Georadar-Signalverarbeitung	16
2.2.1	Signalvorverarbeitung von Georadarmessdaten	16
2.2.2	Analyse und Interpretation von Georadarmessdaten	18
2.2.3	Fazit	20
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	21
3.1	Motivation und Ziele der Arbeit	21
3.2	Lösungsansätze	22
4	Simulative und experimentelle Erstellung der Bearbeitungsdatenbasis	25
4.1	Simulation der elektromagnetischen Wellenausbreitung an Materialschichtungen	25
4.1.1	Simulationsumgebung	26
4.1.2	Modellbildung und Modellerstellung	26
4.1.3	Simulationsdurchführung und Parametervariation	27
4.1.4	Simulationsergebnisse als Bearbeitungsdatenbasis 1	30
4.2	Feldmessungen mit dem Georadar an definierten Materialschichtungen	33
4.2.1	Das verwendete Georadarsystem	33
4.2.2	Messaufbau und Versuchsdurchführung	34

4.2.3	Versuchsergebnisse aus definierten Feldmessungen als Bearbeitungsdatenbasis 2	36
4.3	Korrelation zwischen Feldmessung und Simulation	39
4.4	Feldmessungen mit dem Georadar am Schaufelradbagger	39
4.4.1	Integriertes Georadarsystem am Schaufelradbagger	40
4.4.2	Kommunikation und Messdatenaufnahme	40
4.4.3	Durchführung der Feldmessungen im Tagebau	41
4.4.4	Versuchsergebnisse der Feldmessungen als Bearbeitungs- datenbasis 3	43
4.5	Fazit	44
5	Georadar-Messdatenvorverarbeitung und Analyse	47
5.1	Messdatenvorverarbeitung	47
5.1.1	1D-Filterung und adaptive Verstärkung	48
5.1.2	2D-Filterung der Georadarmessdaten	54
5.1.3	Prozedur zur Georadarmessdatenvorverarbeitung	54
5.2	Merkmalsuntersuchung von Trennschichten	56
5.2.1	Merkmalskategorie Amplitude	58
5.2.2	Merkmalskategorie Frequenz	63
5.2.3	Dispersion	67
5.2.4	Merkmalsbewertung und Fazit	68
5.3	Automatische Merkmalsextraktion und Selektion	70
5.3.1	Zeit-Frequenzanalyse zur Merkmalsextraktion	71
5.3.2	Adaptive Selektion der diskreten Laufzeitpositionen der Trennschichtreflexionen	76
5.4	Automatische Merkmalsbewertung und Interpretation	87
5.4.1	Aufbau der Bewertungsmatrix	88
5.4.2	Interpretation anhand der Bewertungsmatrix	90
5.5	Laufzeitberechnung und Tiefenzuordnung	91
5.5.1	Berechnung der materialspezifischen Ausbreitungs- geschwindigkeit	92
5.5.2	Berechnung der Tiefe der Trennschichtreflexionen	92
5.5.3	Bewertung der Tiefenzuordnung	94
5.6	Ergebnisvisualisierung	95
5.7	Fazit	96
6	Automatische Trennschichterkennung am Schaufelradbagger	97
6.1	Technische Umsetzung am Gewinnungsgerät	97
6.2	Kommunikationsstruktur und automatisches Datenhandling	98
6.3	Automatische Positionsdatenzuordnung über den UTC-Zeitstempel	100

6.4	Grafische Benutzeroberfläche	101
6.5	Applikationsspezifische Untersuchung der automatischen Trennschichterkennung	102
6.6	Verifikation der Berechnungsergebnisse	106
6.7	Bedeutung für die Praxis	109
6.8	Fazit	111
7	Zusammenfassung und Ausblick	113
	Abbildungsverzeichnis	115
	Tabellenverzeichnis	121
	Literaturverzeichnis	123

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AdBb*	Adaptive dB-Beschränkung
CMP	Common Mid Point - Gemeinsamer Mittelpunkt
DFT	Diskrete Fourier Transformation
EM	Elektro-Magnetische (Welle)
FFT	Fast Fourier Transformation
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave (Radar)
GPR	Ground Penetrating Radar - Georadar
GPS	Global Positioning System - Globales Positionsbestimmungssystem
GUI	Graphical User Interface - Benutzeroberfläche
ITA	Institut für Transport- und Automatisierungstechnik
MR	Mehrfachreflexion
MW	Mittelwert
Mw1	Schwellwert 1
Mw2	Schwellwert 2
OB	Oberfläche/ Oberflächenreflexion
PC	Personal Computer
RX	Receiver - Empfänger
SEMT	Sensorische Erfassung der Materialart und der Trennfläche
TDR	Time Domain Reflectometry - Zeitbereichsreflexionsverfahren
TX	Transmitter - Sender
UTC	Universal Time Coordinated - Koordinierte Weltzeit
WLAN	Wireless Local Area Network - Drahtloses lokales Netzwerk

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
A	–	Amplitude
A_{max}	–	Relative Maxima
A_{mix}	–	Relative Minima
\bar{A}	–	Arithmetisches Mittel der Amplitude
AKG	–	Adaptive Kennwertgrenze
AKG_{max}	–	Adaptive Kennwertgrenze Maxima
AKG_{min}	–	Adaptive Kennwertgrenze Minima
AZD_{max}	–	Amplitudenzeitdifferenz Maxima
AZD_{min}	–	Amplitudenzeitdifferenz Minima
D_{dB}	dB	Dämpfungswert
E	$V \cdot m^{-1}$	Elektrische Feldstärke
F_A	–	Faktor in der Bewertungsmatrix
F_D	–	Faktor in der adaptiven Verstärkung
G	–	Amplitude Georadarmessdaten
G'	–	Bearbeitete Georadarmessdaten
G_{mean}	–	Gemittelter A-Scan
N	–	Anzahl Berechnungskoeffizienten
R	–	Reflexionskoeffizient
R_{Grenz}	–	Grenzwert Reflexionskoeffizient
T	–	Transmissionskoeffizient
TRK	–	Trennschichtreflexionskennwert
TRK_{max}	–	Trennschichtreflexionskennwert Maxima
TRK_{min}	–	Trennschichtreflexionskennwert Minima
V	–	Verstärkungswert
W_{Luft}	–	Amplitude Luftwelle
Z	Ω	Wellenwiderstand
a	–	Konstante der Methode der linearen Ausgleichung
b	–	Konstante der Methode der linearen Ausgleichung
c	$m \cdot s^{-1}$	Lichtgeschwindigkeit
d	m	Distanz
d_A	m	Distanz zum Reflektor A
d_B	m	Distanz zum Reflektor B
f	Hz	Frequenz
f_i	Hz	Frequenz an Position i
i, j	–	Zähler

j	$j^2 = 1$	Imaginäre Einheit
k_A	m^{-1}	Ausbreitungskonstante
m	–	Spur
n	–	Sampleanzahl
t	s	Zeit
\bar{t}	s	Arithmetisches Mittel der Zeit
t_{Reflex}	s	Laufzeit der selektierten Trennschichtreflexion
Δt_{max}	s	Differenzlaufzeit Maxima
Δt_{min}	s	Differenzlaufzeit Minima
t_{end}	s	Letzter Zeitwert/ -Schritt
v_A	$m \cdot s^{-1}$	Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle in Material A
v_B	$m \cdot s^{-1}$	Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle in Material B
v_{Gesamt}	$m \cdot s^{-1}$	Gemittelte Ausbreitungsgeschwindigkeit
v_{Mat}	$m \cdot s^{-1}$	Materialspezifische Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle
v_P	$m \cdot s^{-1}$	Phasengeschwindigkeit
x	–	Betrachtete Spurenanzahl
x_{Ges}	–	Spurengesamtanzahl
z	m	z-Richtung: Betrachtete Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Welle
α	m^{-1}	Dämpfungsfaktor
α'	$dB \cdot m^{-1}$	Absorptionskoeffizient
β	m^{-1}	Phasenkonstante
δ	°	Verlustwinkel
ε^*	$As \cdot V^{-1}m^{-1}$	Komplexe Permittivität
ε'	$As \cdot V^{-1}m^{-1}$	Realteil der komplexen Permittivität
ε''	$As \cdot V^{-1}m^{-1}$	Imaginärteil der komplexen Permittivität
ε_r^*	–	Komplexe relative Permittivität
ε_0	$As \cdot V^{-1}m^{-1}$	Permittivitätskonstante
ε'_{rA}	–	Relative Permittivität des Materials A
ε'_{rB}	–	Relative Permittivität des Materials B
λ	m	Wellenlänge
Θ	°	Einfalls- bzw. Ausfallwinkel
Ψ	°	Brechungswinkel
μ	$Vs \cdot A^{-1}m^{-1}$	Permeabilität
μ^*	$Vs \cdot A^{-1}m^{-1}$	Komplexe Permeabilität

μ'	$Vs \cdot A^{-1}m^{-1}$	Realteil der komplexen Permeabilität
μ''	$Vs \cdot A^{-1}m^{-1}$	Imaginärteil der komplexen Permeabilität
μ_0	$Vs \cdot A^{-1}m^{-1}$	Permeabilitätskonstante mit $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7} Vs \cdot A^{-1}m^{-1}$
σ_A	$S \cdot m^{-1}$	Leitfähigkeit des Materials A
σ_B	$S \cdot m^{-1}$	Leitfähigkeit des Materials B
ω	s^{-1}	Kreisfrequenz