

Integriertes Multisensorsystem zur Zustandsüberwachung von
Schmierflüssigkeiten

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät II
- Physik und Mechatronik -
der Universität des Saarlandes

von

Dipl.-Ing. Torsten Bley

Saarbrücken
2013

Tag des Kolloquiums:	29.07.2013
Dekan:	Univ.-Prof. Dr. Christian Wagner
Mitglieder des	
Prüfungsausschuss:	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Helmut Seidel Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Nienhaus Dr.-Ing. Björn Martin

Aktuelle Berichte aus der Mikrosystemtechnik
Recent Developments in MEMS

Band 23

Torsten Bley

**Integriertes Multisensorsystem zur Zustands-
überwachung von Schmierflüssigkeiten**

Shaker Verlag
Aachen 2013

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.

Zugl.: Saarbrücken, Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2198-1

ISSN 1862-5711

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Derzeitige online Sensoren zur Bestimmung der Alterung sowie der Partikelbelastung von Schmierflüssigkeiten bieten aus wirtschaftlicher, wie auch aus ökologischer Sicht noch nicht die Aussagekraft, die von ihnen erwartet wird. Dahingehend werden oftmals Laboranalysen durchgeführt oder Schmierflüssigkeiten betriebsstundenabhängig gewechselt. In dieser Arbeit wird ein System vorgestellt, welches auf Basis der Infrarotspektroskopie Änderungen im molekularen Aufbau der Schmierflüssigkeit detektiert. Durch eine Bestimmung der wellenlängenabhängigen Transmission der Schmierflüssigkeit ist eine nicht invasive Messung möglich. Durch Nutzung einer Referenzwellenlänge wird die Messung unempfindlich gegenüber Verschmutzung. Unterschiedliche spektrale Bandpassfilter werden genutzt, um charakteristische spektrale Banden der Schmierflüssigkeit aufzulösen. Das Sensorsystem wird auf die Einflussgrößen von Druck, Volumenstrom und Temperatur untersucht. Zuvor gealterte bzw. kontaminierte Schmierflüssigkeiten werden mit dem Sensorsystem analysiert. Zum Erreichen eines vollwertigen Konzepts zum Condition-Monitoring von Fluiden wird das System mit einem Partikelsensor kombiniert, der es möglich macht, Luftblasen, Metall- und Staubpartikel zu unterscheiden und zu quantifizieren. Eine Kombination beider Systeme deckt somit die Überwachung der chemischen Alterung sowie auch die Bestimmung der Partikel und deren Konzentration ab.

Abstract

The information about the condition of lubricating fluids from today's sensors are not as adequate as expected. Therefore the change of the lubricating fluid is depended on results of an laboratory analysis or on the operating hours of the machine. For online condition monitoring of lubricating fluids a sensor system based on the near infrared spectroscopy is developed. Thus, the analysis of changes in the molecular structure is possible. This method is non invasiv and due to a spectral reference channel independent to broad spectral absorption. A sensor with four different narrow spectral bandpass filter is used. Each of the filters respresents a spectral region characteristic for fluid deterioration. A selection of different lubricating fluids are aged artificially and analyzed by the sensor system. The sensor system itself is characterized by pressure, flow and temperature changes. The sensor system is combined with a particle sensor to reach a full condition monitoring concept based on the chemical condition and particle contamination. With the particle sensor a discrimination and quantification of dust particles, metallic particles and air bubbles can be achived.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Systeme zur Bestimmung der Fluidqualität	3
2.1	Schmier- und Druckflüssigkeiten	3
2.2	Fluidqualität	3
2.3	Marktverfügbare Sensoren	4
2.3.1	Dielektrizitätskonstante	4
2.3.2	Temperatur	5
2.3.3	Viskosität	5
2.3.4	Wassergehalt	5
2.3.5	Partikel	6
2.3.6	Kombinierte Systeme	6
2.4	Anforderungen eines Multisensors	6
3	Grundlagen	10
3.1	Infrarotspektroskopie	10
3.1.1	Grundlagen der Infrarotspektroskopie	10
3.1.2	Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie	21
3.1.3	Probenvorbereitung und Auswertung	24
3.2	Mie Theorie	25
3.3	Optische Bauelemente	27
3.3.1	Thermopile	27
3.3.2	Interferenzerscheinung und Reflexion	32
3.3.3	Infrarot-Quellen	36
3.3.4	Laserdiode	41
3.3.5	Fotodiode	42
3.4	Schmierflüssigkeiten	43
3.4.1	Aufbau, Eigenschaften	44
3.4.2	Alterung	46

3.4.3	Additivierung	49
3.4.4	Kenngößen	51
3.4.5	Charakterisierung der Fluidalterung mittels Infrarotspektroskopie	53
3.4.6	Partikelkonzentration in Fluiden	55
3.5	Hydraulik	55
3.5.1	Viskosität und Dichte	56
3.5.2	Druckverlust bei Durchströmung	60
3.5.3	Wärmeentwicklung	65
3.6	Gase	66
3.7	Finite-Elemente-Methode	68
3.8	Mechanik	70
3.8.1	Festigkeitshypothesen der Mechanik	70
3.8.2	Anzugsmoment von Schraubverbindungen	72
4	Experimentelles	75
4.1	Untersuchungsmethoden	75
4.1.1	FTIR - Bruker Vertex 80v	75
4.1.2	Partikelanalyse	82
4.1.3	Titration - Titroline 6000	85
4.1.4	Viskositätsmessplatz	86
4.1.5	Zug- Druckprüfstand	88
4.1.6	Klimaschrank	89
4.2	Alterung von Schmierflüssigkeiten	90
4.2.1	Künstliche Oxidation	91
4.2.2	Künstliche Begasung	93
4.3	Experimentiermessplatz zur Variation von Volumenstrom, Druck, Temperatur	97
4.3.1	Komponenten	98
4.3.2	Messelektronik	99
4.3.3	Datenerfassung	101
4.3.4	Software	101
4.3.5	Charakterisierung	105
4.4	Experimentiermessplatz zur Verunreinigung von Schmierflüssigkeiten	107
4.4.1	Hydraulische Komponenten	108

4.4.2	Messelektronik	109
4.4.3	Datenerfassung	110
4.4.4	Software	110
4.4.5	Charakterisierung	112
4.5	Sensorsystem zur Bestimmung der Fluidqualität	113
4.5.1	Mechanischer Aufbau	113
4.5.2	Elektronik	116
4.5.3	Signalauswertung	120
4.6	Mobilplattform	121
4.6.1	Aufbau, Komponenten	122
4.6.2	Software	125
4.7	Partikelsensorsystem	128
4.7.1	Mechanischer Aufbau	129
4.7.2	Elektronik	129
4.7.3	Ansteuerung und Signalauswertung	131
4.8	Kombiniertes Sensorsystem - COPS	131
5	Ergebnisse	133
5.1	Charakterisierung von Schmierflüssigkeiten	133
5.1.1	Schmierflüssigkeiten	133
5.1.2	Infrarotspektren	134
5.1.3	Wasser	145
5.1.4	Begasung	149
5.1.5	Temperatureinfluss	151
5.1.6	Acid Number	153
5.1.7	Viskosität	155
5.1.8	Verschleiß der Schmierflüssigkeiten	158
5.2	Silizium-Zelle	159
5.2.1	Optische Charakterisierung der Messzelle	159
5.2.2	Mechanische Belastung	162
5.2.3	FEM Simulation	168
5.3	Charakterisierung des Sensorsystems für Fluidqualität	172
5.3.1	Detektor	173
5.3.2	Evaluation der IR-Quelle MIRL 17-900	175

5.4	Einflüsse auf das Sensorsystem im Betrieb	184
5.4.1	Erwärmung des Sensorsystems	185
5.4.2	Breitbandige Abschwächung des Signals	187
5.4.3	Druck	189
5.4.4	Volumenstrom	191
5.4.5	Schmierflüssigkeitstemperatur	194
5.5	Analyse von Fluiden mittels Sensorsystem für Fluidqualität	197
5.5.1	Wassergehalt	198
5.5.2	Oxidation	200
5.5.3	Oxidation und Wassergehalt	202
5.5.4	Viskosität	206
5.6	Mobilplattform	207
5.6.1	Laborevaluierung	207
5.6.2	Feldevaluierung	208
5.7	Bestimmung der Verunreinigung in Schmierflüssigkeiten mit dem Partikel- sensor	212
5.7.1	Kombinierte Verschmutzung	212
5.7.2	Partikelkalibrierung	217
6	Zusammenfassung und Ausblick	219
	Literatur	223