Gasmesssysteme basierend auf Halbleitergassensoren für sicherheitskritische
Anwendungen mit dem Ansatz der Sensorselbstüberwachung

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

von

Dipl.-Ing. Peter Reimann

Saarbrücken

2011

Tag des Kolloquiums: 27.05.2011
Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Helmut Seidel
Mitglieder des
Prüfungsausschusses: Prof. Dr. rer. nat. Christoph Becher
Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze
Prof. Dr. rer. nat. Claus-Dieter Kohl
Prof. Dr.-Ing Maximilian Fleischer
Dr.-Ing. Björn Martin

Aktuelle Berichte aus der Mikrosystemtechnik
Recent Developments in MEMS

Band 19

Peter Reimann

**Gasmesssysteme basierend auf Halbleitergas-
sensoren für sicherheitskritische Anwendungen
mit dem Ansatz der Sensorelbstüberwachung**

Shaker Verlag
Aachen 2011

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., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0232-4

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

Halbleitersensoren sind aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit und geringen Stückkosten in sicherheitskritischen Anwendungen zielführend. Im Allgemeinen weisen solche Messsysteme eine geringe Selektivität und Stabilität auf, weshalb sie heute in vielen sicherheitskritischen Anwendungen nicht eingesetzt werden. Dynamische Betriebsmodi wie die Temperaturmodulation des Sensors (TCO) in Kombination mit DC-Messungen oder die elektrische Impedanzspektroskopie (EIS) können diese Nachteile beheben.

In dieser Arbeit soll eine Verbesserung von Messsystemen für sicherheitskritische Anwendungen erzielt werden. Dabei steht die Branderkennung unter Tage als typisches Beispiel für Zuverlässigkeit und Fehlalarmunterdrückung im Vordergrund.

Dazu wird ein Felderprobungssystem für eine effizientere Branderkennung unter Tage entwickelt und erprobt. Die Detektion von Ethen im ppb-Bereich bei gleichzeitiger Anwesenheit von Störgasen im %-Bereich stellt große Anforderungen an die sichere Funktionsweise des Systems und dessen Stabilität.

Die Generierung redundanter Informationen durch TCO und EIS erlaubt den Entwurf einer neuartigen Selbstüberwachungsstrategie zur weiteren Steigerung der Stabilität und Zuverlässigkeit. Diese wurde im Labor erfolgreich getestet. Durch einen systemtheoretischen Ansatz ist die schnelle Berechnung der Sensorimpedanz und erstmals eine temperaturzyklische EIS möglich. Es wird ein Realisierungskonzept für eine Hardware vorgeschlagen, die den Einsatz der Selbstüberwachung auf andere Anwendungen ermöglichen soll.

Abstract

Due to their high sensitivity and low cost, semiconductor gas sensors are ideally suited for safety and security applications. However, measurements systems based on such sensors in general exhibit poor selectivity and stability, preventing their use in these applications. The major drawbacks can be overcome with dynamic operating modes, e.g. using temperature cycled operation (TCO) with DC measurements or electrical impedance spectroscopy (EIS).

In this thesis, improvement of gas sensor based systems for safety and security applications is addressed. Special emphasis is placed on underground fire detection in coal mines as a typical example for this problem in terms of reliability and suppression of false alarms.

A field test system for efficient fire detection in coal mines was developed and tested underground. The detection of ethene in the ppb range against a background of interfering gases in the % range represents an immense challenge for a reliable fire detection system especially concerning the stability of the operation.

For further improvement of both stability and reliability, combination of TCO and EIS providing redundant data allows the development of a novel self-monitoring strategy which was tested in the lab. For fast operation, the impedance measurement is realized with a novel approach based on systems theory. For this approach a new hardware concept for impedance measurements during temperature-cycling is presented. The general self-monitoring strategy should be portable to other safety and security applications.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Gasmesssysteme für sicherheitskritische Anwendungen.....	7
2.1	Anwendungsspektrum für sicherheitskritische Anwendungen.....	8
2.2	Branderkennung unter Tage.....	14
2.2.1	Aufgabenstellung und Motivation	15
2.2.2	State-of-the-art der Branderkennung unter Tage	17
2.2.3	Brandfrüherkennung auf Basis von Ethen	20
3	Grundlagen.....	25
3.1	Sensoren	25
3.1.1	Halbleitersensoren	25
3.1.2	Feuchtesensoren	29
3.1.3	Durchflusssensoren	33
3.2	Betriebsweise von Halbleitersensoren	35
3.2.1	Temperaturzyklischer Betrieb.....	35
3.2.2	Impedanzmessung	37
3.3	Signalverarbeitung und Auswertemethoden	38
3.3.1	Datenvorverarbeitung.....	39
3.3.2	Merkmalsextraktion	40
3.3.3	Dimensionsreduktion	46
3.3.4	Klassifizierung	49
3.3.5	Künstliche Neuronale Netze	52
4	Messtechnische Komponenten	55

4.1	Gasmischanlage	55
4.2	Messplattformen für den Temperaturzyklischen Betrieb.....	56
4.2.1	GaSTON.....	56
4.2.2	PuMaH.....	57
4.3	IO-Karte.....	59
4.4	Impedanzmessung.....	60
4.4.1	Impedanzmessplatz	60
4.4.2	Identifikation der Sensorantwort.....	61
5	Konfiguration eines Messsystems zur Branderkennung unter Tage	67
5.1	Auswahl von Halbleitergassensoren.....	68
5.1.1	Vorauswahl anhand von Datenblättern	69
5.1.2	Szenarien zur Charakterisierung	69
5.1.3	Statische Sensorcharakterisierung.....	70
5.2	Auswahl des Temperaturzyklus	75
5.2.1	Temperaturdynamik	76
5.2.2	Testmessung des Temperaturzyklus	78
5.3	Datenvorverarbeitung und Merkmalsextraktion	79
5.3.1	Zyklusmittelwertnormierung und Standardmerkmale	80
5.3.2	Approximation mittels Legendrepolyomen	82
5.4	Auswertalgorithmus.....	88
5.4.1	Messzenario.....	88
5.4.2	Informationsgehalt der Daten.....	91
5.4.3	Hierarchische Alarmentscheidung	92
5.4.4	Evaluation der Ergebnisse.....	98
5.5	Stellungnahme der Dekra/EXAM zum Messsystem.....	100

5.6	Ansatz der Kalibrierung	101
5.6.1	Motivation und Rahmenbedingungen.....	101
5.6.2	Algorithmus zur Kalibrierung.....	102
5.6.3	Evaluierung des Algorithmus zur Kalibrierung.....	106
5.7	Evaluation in Labortests	109
5.7.1	Messaufbau und –ablauf.....	109
5.7.2	Ergebnisse der Kohleverbrennung.....	112
6	Realisierung eines Felderprobungssystem	117
6.1	Aufbau des Gasmesssystems	118
6.1.1	Sensoren.....	118
6.1.2	Sensorkammern.....	122
6.1.3	Kompletter Aufbau.....	124
6.2	Messschrank und Kommunikation	124
7	Felderprobung unter Tage	129
7.1	Ergebnisse der Felderprobung unter Tage	131
7.2	Test der Kalibrierung	136
7.3	Langzeitverhalten des Felderprobungssystems	139
7.3.1	Optische Begutachtung des Felderprobungssystems.....	140
7.3.2	Messungen zur Begutachtung des Felderprobungssystems.....	142
7.4	Fazit der Felderprobung	147
8	Ansatz zur Sensorselbstüberwachung	149
8.1	Motivation	149
8.2	Szenarien der Sensorvergiftung	150

8.3	Impedanzspektroskopie	151
8.3.1	Messungen.....	152
8.3.2	Signalverarbeitung	156
8.4	Selbstüberwachungsstrategie	157
8.5	Übertragung auf Branderkennung unter Tage	160
9	Realisierungskonzept einer Low-cost Impedanzmessung	163
9.1	Messaufbau und Sensoridentifikation	164
9.1.1	Messaufbau	164
9.1.2	Auswahl eines Signals.....	167
9.1.3	Vergleichsmessungen.....	174
9.1.4	Kombination mit Temperaturzyklus	176
9.2	Merkmalsextraktion	181
9.2.1	Statische Impedanzmessung.....	181
9.2.2	Temperaturzyklische Impedanzmessung	184
9.3	Integration in einem FPGA basierten System	186
9.3.1	Signalerzeugung und Aufbereitung	188
9.3.2	Signalerfassung und -verarbeitung	191
9.3.3	Realisierungskonzept	193
10	Zusammenfassung und Ausblick	195
	Literatur und Quellenverzeichnis	201
	Eigene Veröffentlichungen	221
	Anhang	225