

Entwicklung und Charakterisierung eines modularen Gasmesssystems, basierend
auf einer Kombination aus Halbleitersensoren und Infrarotmesstechnik

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

von
Dipl.-Ing. Karsten Mathias Kühn

Saarbrücken

2013

Tag des Kolloquiums:	29. November 2013
Dekan:	Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Christian Wagner
Mitglieder des Prüfungsausschuss:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Frey Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Andreas Schütze Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Seelecke Dr.-Ing. Björn Martin

Aktuelle Berichte aus der Mikrosystemtechnik
Recent Developments in MEMS

Band 24

Karsten Kühn

**Entwicklung und Charakterisierung eines modularen
Gasmesssystems, basierend auf einer Kombination
aus Halbleitersensoren und Infrarotmesstechnik**

Shaker Verlag
Aachen 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.

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

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2490-6

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

Die Gasesstechnik wächst sowohl in ihrer Bedeutung als auch im Spektrum ihrer Anwendungen. Dabei erfordern Gasmesssysteme aufgrund der meist hohen Komplexität der Gaszusammensetzung für viele Anwendungen eine hohe Selektivität, die aber durch chemische Sensoren meist nicht erreicht wird. Im Gegensatz dazu erlaubt die IR-Gasesstechnik, basierend auf physikalischen Sensorprinzipien, eine sehr hohe Selektivität, allerdings verbunden mit hohen Kosten und – für eine hohe Sensitivität – großen Abmessungen des Messsystems.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Charakterisierung eines kombinierten, sog. „physikochemischen“ Gasmesssystems, basierend auf einer Kombination aus physikalischen und chemischen Sensorprinzipien, um somit die Vorteile beider Verfahren nutzen und gleichzeitig durch Kombination auch bekannte Schwächen minimieren zu können. Hierfür bietet sich insbesondere die preisgünstige und robuste Halbleitersensorik an, aufgrund ihrer hohen Sensitivität sowohl als Sensor, aber gleichzeitig auch als IR-Strahlungsquelle für eine in der Infrarotmesstechnik übliche IR-Transmissions- oder auch Absorptionsmessung. Das neuartige kombinierte Messsystem bietet durch seinen modularen Ansatz und seine Adaptierbarkeit auf unterschiedlichste Anwendungen ein breites Einsatzpotential. Durch die systemische Integration der beiden Sensorprinzipien mit nur einer gemeinsamen Steuerung, Signalauswertung sowie Kommunikation werden die Kosten reduziert und die Zuverlässigkeit erhöht.

Abstract

Gas measurement technology is growing fast in relevance and range of applications. For many applications gas measuring systems require a high selectivity, mostly due to the high complexity of the gas composition, but which is not achieved by most chemical sensors. In contrast IR based gas detection systems as physical sensor principles offer a very high selectivity but at high cost, and for a high sensitivity large size of the measurement system.

The aim of this work is the development and characterization of a combined, so called physicochemical gas measurement system, based on the combination of physical and chemical sensor principles. This approach uses the advantages of both methods while minimizing well-known individual weaknesses. In particular the low-cost and robust semiconductor gas sensor provides high sensitivity as a sensor but also the functionality as an IR radiation source for a standard transmission or absorption measurement in the infrared measurement system. The novel combined measurement system offers a modular approach, and by its adaptability to different applications a broad application potential. The cost can be drastically reduced and reliability is increased by the systemic integration of the two sensor principles with only one common control, signal processing and communication.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Gasmesstechnik	1
1.2. Stand der Technik	3
1.3. Applikationen	6
1.3.1. Raumluftüberwachung	6
1.3.2. Atemgasanalyse	8
2. Modulares Konzept des Messsystems	11
2.1. Anforderungen des Messsystems	11
2.2. Konzept des neuartigen Ansatzes	13
2.3. Modularität und Adaptierbarkeit	14
2.3.1. Mechanik	15
2.3.2. Elektronik	16
2.3.3. Software	16
2.3.4. Signalverarbeitung	17
3. Theoretische Grundlagen	19
3.1. Physikalische Grundlagen	19
3.1.1. Wärmestrahlung	19
3.1.2. Schwarzer Strahler	21
3.1.3. Emissionsgrad	23
3.1.4. Absorptionsspektrometrie	24
3.1.5. Photoakustischer Effekt	32
3.1.6. Lambert-Beersches Gesetz	34
3.1.7. IR-Gasmesstechnik	35
3.2. Chemische Sensoren	37
3.2.1. Halbleitersensor	37
3.2.2. Pellistor	39
3.2.3. Gas-FET	40
3.3. Physikalische Sensoren	41
3.3.1. Thermopile	41
3.3.2. Pyroelektrischer Detektor	42
3.3.3. Mikrophon	43
3.4. Optische Strahlungsfilter	44
3.5. Signalverarbeitung	47
3.5.1. Histogramm-Analyse	47
3.5.2. Fourier-Analyse	48

4. Messsystem	51
4.1. Komponenten	51
4.1.1. Umgebungssensoren	51
4.1.2. IR-Strahlungsquelle	54
4.1.3. Chemischer Sensor als IR-Strahlungsquelle	54
4.1.4. IR-Strahlungsdetektor (Thermopile)	56
4.1.5. Schalldetektor (Kondensatormikrophon)	57
4.1.6. Fabry-Pérot Interferometer	58
4.1.7. 3/2-Wegeventile	59
4.1.8. Membranpumpe	60
4.2. Mechanik	61
4.2.1. IR-Messkammer	61
4.2.2. IR-HL-Messkammer	62
4.3. Elektronik	63
4.3.1. Mikrocontroller	63
4.3.2. IR-Basisplatine	65
4.3.3. Adapterplatinen	66
4.3.4. Zusatzplatine	67
4.4. Software	67
4.4.1. Firmware	69
4.4.2. Graphische Benutzeroberfläche (GUI)	70
5. Charakterisierung und Simulation des Messsystems	75
5.1. IR-Gasmessung mit Fabry-Pérot Etalon	75
5.2. IR-Gasmessung mit Fabry-Pérot Interferometer (stat. Betrieb)	80
5.3. HL-Sensor als IR-Strahlungsquelle	82
5.4. HL-Sensor mit Fabry-Pérot Interferometer (dynam. Betrieb)	88
5.5. Simulation des Messsystem	94
5.6. Ergebnisse	95
6. Applikationsspezifische Ergebnisse	97
6.1. ^{13}C -Atemgasanalyse	97
6.1.1. Konfiguration Messsystem	97
6.1.2. Signalverarbeitung	98
6.1.3. Ergebnisse	99
6.2. Kombinierte CO_2 /VOC-Detektion	101
6.2.1. Konfiguration Messsystem	101
6.2.2. Signalverarbeitung	102
6.2.3. Ergebnisse	103
7. Fazit und Ausblick	107
Literaturverzeichnis	111
Abkürzungsverzeichnis	119
Symbolverzeichnis	121

Inhaltsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	123
Abbildungsverzeichnis	125
A. Transmittierte atmosphärische Strahlung	129
B. Schaltpläne	131
C. Liste eigener Veröffentlichungen	143
D. Danksagung	145