Untersuchung zum Einsatz von mikrostrukturierten Halbleitergassensoren in der heutigen Gebäudebrandmeldertechnik

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

von

Dipl.-Ing. Zafer Ankara

Saarbrücken

2008

Tag des Kolloquiums:	09.05.2008
Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze
Mitglieder des Prüfungsausschusses:	Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Janocha
	Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze
	Prof. Dr. rer. nat. Claus-Dieter Kohl
Akademischer Mitarbeiter:	Dr. rer. nat. Ulrich Schmid

Aktuelle Berichte aus der Mikrosystemtechnik
Recent Developments in MEMS

Band 4

Zafer Ankara

Untersuchung zum Einsatz von mikrostrukturierten Halbleitergassensoren in der heutigen Gebäudebrandmeldertechnik

Shaker Verlag
Aachen 2008

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., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7310-1
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

„Die Forschung ist immer auf dem Wege, nie am Ziel.“

Adolf Pichler, Ritter von Rautenkar (1819-1900),
österreichischer Schriftsteller und Naturwissenschaftler

KURZFASSUNG

Gefahrenmeldetechniken werden zum Schutz von Mensch, Tier, Umwelt und Sachwerten eingesetzt und sind ein wichtiger Bestandteil von Sicherheitssystemen in Gebäuden. In Räumen, in denen sich vornehmlich Mensch und Tier aufhalten, sind insbesondere Brände als sehr gefährlich anzusehen. Jüngste Meldungen und auch Berichte aus der Wirtschaft zeigen, dass heute eingesetzte Brandmelder keinen allgemeinen und ausreichenden Schutz bieten und darüber hinaus noch verbesserungsbedürftig sind.

Die Verwendung von chemischen Gassensoren in Brandmeldern hat den entscheidenden Vorteil, dass die Gassensoren auf die bei Bränden in der Entstehungsphase entstehenden Gase reagieren und damit eine frühe Branderkennung ermöglicht werden kann. In der heutigen Brandmeldertechnik werden die selektiv arbeitenden elektrochemischen Zellen bereits eingesetzt. In der Fülle der chemischen Gassensoren bieten die mikrostrukturierten Halbleitergassensoren auf Zinndioxid-Basis zu elektrochemischen Zellen eine kostengünstige Alternative. Allerdings kamen Halbleitergassensoren bisher fast ausschließlich nur in Spezialanwendungen zum Einsatz. Somit ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, mikrostrukturierte Halbleitergassensoren auf ihre Eignung in der heutigen Brandmeldertechnik hin zu überprüfen. Zur Bewältigung dieser Aufgabe müssen vorhandene Mess- und Betriebsplattformen weiter optimiert bzw. an die Aufgabenstellung angepasst und entsprechende Messprofile erarbeitet werden.

Hierzu wurde bei der Firma Novar GmbH in Neuss ein EN 54-genormter Brandversuchsraum aufgebaut und im Hinblick auf die Untersuchung von Gassensoren optimiert. Zusätzliche Brandversuchsräume im Labormaßstab helfen bei der Charakterisierung und Funktionsuntersuchung von Gassensoren. Nach dem Vorbild der am Lehrstuhl für Messtechnik an der Universität des Saarlandes zur Verfügung stehenden automatisierten Gasmischanlage wurde bei Novar eine weitere Variante aufgebaut und für die Untersuchungen von Gassensoren zum Einsatz in der Brandmeldertechnik optimiert. Temperaturgezykelte Betriebsmodi sowie besondere Signalauswerteverfahren können helfen, den Informationsgehalt von Halbleitergassensoren noch weiter zu steigern. Ausgewählte multivariate Analyseverfahren werden dazu verwendet, die einzelnen Brandereignisse von Falschalarmen zu unterscheiden und die Falschalarmrate zu reduzieren.

Die in Labormessungen gewonnenen Erkenntnisse werden danach in Feldtests an ausgewählten Einsatzorten unter nahezu Realbedingungen getestet. Die Ergebnisse sollen tiefere Einblicke in die Langzeiteigenschaften der Halbleitergassensoren, wie z.B. Drifterscheinungen, liefern.

ABSTRACT

Building security systems are designed to protect human beings, animals, the environment and material assets from any kind of damage or dangers. Fire poses a special danger to life and property. While fire detectors can save lives, no existing fire detector can extinguish a fire once it is established. No institution is immune from fire and damage from fire is usually permanent and irreparable.

Fire detection today poses several challenges, mainly improved false alarm suppression as well as early discovery of smoldering fires, both of which could reduce the likelihood of fire. Chemical gas sensors seem suitable to address these needs as they are able to detect gases given off by fire, even in the very early stage of fire development. Some current fire detectors contain electrochemical cells. They can be used to detect deep seated smoldering fire by sensing the level of carbon monoxide in the environment. The disadvantages of electrochemical cells - high costs and short lifetime - lead to the use of low-cost sensors, in the form of semiconductor gas sensors based on Si-substrates. Microstructured metal oxide gas sensors seem particularly suitable for this application. The goal of this thesis work is to investigate the usage and integration of microstructured metal oxide gas sensors in applications for fire detection. Previous experience in detector development suggests that existing measurement and operation platforms can be optimized.

To facilitate this research, a new EN 54 standardized fire test chamber needs to be constructed at Novar GmbH in Neuss. This fire test chamber has to be optimized for investigations that support development of a brand new fire detection technology. Miniaturized fire test chambers can help reach this goal to characterize and test the functionality of used gas sensors.

The automated gas mixture test bench currently in place at the Laboratory for Measurement Technology of Saarland University had to be duplicated at Novar GmbH and then remodelled and optimized for characterizing gas sensors for fire applications. A universal operating hardware platform is the basis for temperature cycled operation modes which will lead to the development of a new generation of fire detectors by reducing power consumption and increasing gas sensing selectivity. Innovative fire detectors can be immunized to false alarms by using multivariate analysis with a focus on distinguishing different fire and non-fire situations.

Scaled measurements conducted in the laboratory can help to model field-test conditions. The results from different field-tests at selected sites, where real environmental conditions are present, can help promote understanding of the long-term properties of gas sensors, such as drift phenomena, and facilitate successful development of innovative fire detectors.

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG 1

1.1 Problemstellung und Zielsetzung 5

1.2 Aufbau der vorliegenden Arbeit 7

2 ANFORDERUNGEN UND RICHTLINIEN FÜR HEUTIGE BRANDGASMELDER 10

2.1 Korrosionstest 11

2.2 Signalerzeugung bzw. Messung der Ansprechschwellenwerte 12

2.3 Querempfindlichkeiten und Täuschungsgrößen 12

2.4 Sensorvergiftung 13

2.5 Langzeitstabilität 14

2.6 Erprobungstest 14

3 GRUNDLAGEN HEUTIGER BRAND- UND RAUCHMELDERTECHNIKEN 16

3.1 Brandentstehung und –verlauf 16

3.2 Rauchmelder 18

3.2.1 Optische Streulichtmelder (O-Melder) 19

3.2.2 Durchlichtmelder 19

3.2.3 Ionisationsmelder (I-Melder) 20

3.3 Wärmemelder (T-Melder) 21

3.4 Flammenmelder 21

3.5 Einzelsensor- und Multisensormelder 22

3.5.1 OT- und OTI-Melder 23

3.5.2 O^2T-Melder 23

3.5.3 OT^{Blue}-Melder 24

3.5.4 Signalverarbeitung bei heutigen Brandmeldern 24

3.6 Beispiele für Gassensoren in der heutigen Brandmeldertechnik 25

3.6.1 OTG-Melder 26

3.6.2 GSME – Gas-Sensor-Melde-Einheit ... 26

3.7 Einbaubedingungen von Brandgasmeldern ... 27

4 GRUNDLAGEN AUSGEWÄHLTER SENSOREN MIT CHEMISCH SENSITIVEN SCHICHTEN ... 30

4.1 Wärmetönungssensoren ... 31

4.2 Optochemische Gassensoren ... 34

4.3 Massensensitive Sensoren ... 36

4.4 Chem-FET (GasFET, ISFET) ... 38

4.4.1 ISFET und ADFET ... 39

4.4.2 GasFETs ... 39

4.5 Elektrochemische Gassensoren ... 40

4.5.1 Elektrochemische Gassensoren mit Flüssigelektrolyt ... 41

4.5.2 Elektrochemische Gassensoren mit Feststoffelektrolyt ... 42

4.6 Halbleitergassensoren ... 44

4.6.1 Adsorption ... 45

4.6.2 Desorption ... 47

4.6.3 Adsorptions- und Desorptionsrate, Adsorptions-Isotherme ... 48

4.6.4 Elektrische Wechselwirkung zwischen Adsorbat und Halbleiteroberflächen ... 51

4.6.5 Wirkungsmechanismen polykristalliner Halbleiter-Metalloxid-Gassensoren ... 54

4.6.6 Empfindlichkeitserhöhung und Selektivitätssteigerung durch Katalysatoren ... 59

4.6.7 Empfindlichkeitserhöhung und Selektivitätssteigerung durch Temperaturmodulation ... 61

4.7 Leitfähige Polymere ... 63

4.8 Fazit zur Auswahl chemischer Gassensoren ... 65

4.9 Halbleitergassensoren der Firma MiCS ... 67

5 MULTIVARIATE SIGNALANALYSE ... 72

5.1 Principal Component Analysis (PCA) ... 75

5.2 Neuronale Netze ... 77

5.3 Lineare Diskriminanzanalyse (LDA) ... 82

5.4 Schrittweise lineare Diskriminanzanalyse ... 86

6 VORHANDENE MESSPLATTFORMEN ... 88

6.1 Rauchkanal nach EN 54 ... 89

6.2 EN 54-genormter Brandversuchsraum und EN 54-genormte Brände ... 90
6.2.1 TF1: Offener Holzbrand ... 93
6.2.2 TF2: Schwelender Holzbrand ... 94
6.2.3 TF3: Glimmend-schwelender Baumwollbrand ... 95
6.2.4 TF4: Offener Kunststoffbrand (Polyurethan) ... 95
6.2.5 TF5: Offener Flüssigkeitsbrand mit n-Heptan ... 96
6.2.6 TF6: Offener Flüssigkeitsbrand mit Ethanol (Spiritus) ... 96
6.2.7 TF8: Offener Flüssigkeitsbrand mit Dekalin ... 96
6.2.8 Weitere Testfeuer ... 97

6.3 Chemisch analytische Messplattformen (GC/MS, FT-IR, NDIR) ... 98
6.3.1 GC bzw. GC-MS-Verfahren ... 99
6.3.2 FT-IR-Spektroskopie ... 101
6.3.3 Nicht-dispersive IR-Absorption (NDIR) ... 105

6.4 Automatische Gasmischanlage (GMA) ... 106

6.5 Universelle Hardwareplattform: GaSTON ... 108
6.5.1 Funktionsprinzip ... 108
6.5.2 Sensorsignalerfassung ... 111
6.5.3 Alternative Schaltungen zur Signalerfassung ... 113

7 NEU ENTWICKELTE BZW. OPTIMIERTE MESSPLATTFORMEN UND SOFTWARETOOLS ... 118

7.1 Temperierkammer-Ofen ... 118

7.2 Feldtestplattform (GaSTON mit vier Modulen) ... 119

7.3 Brandversuchsraum bei Esser ... 123

7.4 Brandmessplätze im Labormaßstab ... 126
7.4.1 Brandmessplatz am Lehrstuhl für Messtechnik ... 126
7.4.2 Ein-Kammer-Brandmessplatz bei Esser ... 129
7.4.3 Mehr-Kammern-Brandmessplatz bei Esser ... 130

7.5 Nicht-genormte Testfeuer (NTF) ... 132
7.5.1 NTF1: Wunderkerzen ... 133
7.5.2 NTF2: Schwelendes Toastbrot ... 135
7.5.3 NTF3: Verdampfen von künstlichem Nebelfluid („Disconebel“) ... 136
7.5.4 NTF4: In Spiritus getränkter und verbrannter Zucker ... 137
7.5.5 NTF5: Verdampfen von Essigsäure ... 138
7.5.6 NTF6: Tabak- bzw. Zigarettenrauch ... 139
7.5.7 NTF7: Propan als Ersatz für Treibgase ... 141

7.6 GMA bei Esser ... 141

7.7 Messplatz für Vergiftungs- und Korrosionstests ... 145

7.8 DaCAPro - Software zur Datenextraktion und zur LDA-Analyse ... 147

8 ERGEBNISSE AUS LABORVERSUCHEN ... 158

8.1 Übertragung der Chemisch analytischen Ergebnisse auf die GMA ... 161

8.2 Verwendete NTFs ... 164

8.3 Anwendungsbeispiele zur Unterscheidung von Brandszenarien ... 166

8.4 Vergiftungen und Korrosionstests gemäß dem Richtlinienentwurf für Brandgasmelder ... 168

8.4.1 O_3-Vergiftung ... 168
8.4.2 SO_2-Korrosionstest ... 170
8.4.3 HMDSO-Vergiftung ... 171
8.4.4 Auswahl des Sensortypen: MiCS 5131 ... 174
8.4.5 Driftverhalten in Langzeitmessungen ... 176
8.4.6 Temperaturkoeffizientenbetrachtung ... 177

9 METHODISCHES VORGEHEN UND DER WEG ZUR BRANDERKENNUNG ... 180

9.1 Statischer Betrieb zur Auswahl geeigneter Sensoren für die Feldtests ... 180

9.2 Selektivitätssteigerung durch temperatur-zyklischen Betrieb ... 181

9.3 Dynamischer Betrieb an der automatischen Gasmischanlage ... 187

9.3.1 Signalvorverarbeitung und Merkmalsextraktion ... 187
9.3.2 Verfahren zur Durchführung der schrittweisen linearen Diskriminanzanalyse ... 190

9.4 Beispiel zur Unterscheidung von Luft, CO und H_2 bei variabler rel. Feuchte ... 192

10 ERGEBNISSE AUS FELDVERSUCHEN ... 198

10.1 Messorte in Feldtests ... 198

10.2 LDA – Kalibriermessungen ... 200

10.2.1 Codegenerierung als Vorbereitung zur LDA ... 200
10.2.2 Ausgewähltes LDA-Beispiel: Messdaten aus dem Hühnerstall ... 202
10.2.3 Ausgewähltes LDA-Beispiel: Messdaten aus dem Raucherraum bei Esser ... 207
10.2.4 Hierarchische Analysemethode ... 209
10.2.5 Diskussion der LDA-Untersuchungen ... 211

10.3 Zeitliche Untersuchungen ... 212

10.3.1 Hühnerstall ... 213
10.3.2 Großküche der Esser-Kantine ... 220
10.3.3 Chemisches Hochschullabor an der Fachhochschule Bonn-Rhein-Sieg ... 223
10.3.4 Arbeitslabor an der Universität des Saarlandes ... 225

10.3.5 Produktionshalle ... 227
10.3.6 Damen-Umkleide ... 230
10.3.7 Raucherraum ... 233
10.3.8 Büroraum ... 235
10.3.9 Hörsaal ... 238
10.3.10 Diskussion der zeitlichen Untersuchungen ... 240

10.4 Beispiele zur Mustererkennung in Feldversuchen ... 242
10.4.1 Hühnerstall ... 242
10.4.2 Großküche der Esser-Kantine ... 244
10.4.3 Raucherraum ... 245
10.4.4 Damenumkleide ... 247
10.4.5 Chemisches Hochschullabor ... 248
10.4.6 Fazit zur Mustererkennung in Feldversuchen ... 252
10.4.7 Diskussion der Drifterscheinungen ... 253

11 ZUSAMMENFASSUNG ... 256

12 AUSBLICK ... 260

13 LITERATURVERZEICHNIS ... 264

14 BEZUGSQUELLEN ... 288

ANHANG A: VERWENDETE ABKÜRZUNGEN ... 293

ANHANG B: VERWENDETE SYMBOLE ... 297

ANHANG C: ABBILDUNGSVERZEICHNIS ... 301

ANHANG D: TABELLENVERZEICHNIS ... 313

ANHANG E: VORTRÄGE UND VERÖFFENTLICHUNGEN 315

ANHANG F: LEBENSLAUF 317

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG..... 319

DANKSAGUNG 321