



Gerhard Wiegleb

Gasmesstechnik in Theorie und Praxis

Messgeräte, Sensoren, Anwendungen

2. Auflage

 Springer Vieweg

2022

Mitarbeiterverzeichnis

Dipl.-Ing. (FH) Martin Bender WITT-Gasetechnik GmbH & Co KG, Salinger Feld 4-8, D-58454 Witten, Bender@wittgas.com

Dr. Thomas Beyer SICK AG, Nimburger Str. 11, 79276 Reute, thomas.beyer@sick.de

Dr.-Ing. Roland Bianchin DURAG Holding AG, Kollaustrasse 105, 22453 Hamburg, Roland.Bianchin@durag.de

Dipl.-Ing. (FH) Steffen Biermann Micro-Hybrid Electronic GmbH, Heinrich-Hertz-Strasse 8, 07629 Hermsdorf, S.Biermann@micro-hybrid.de

Dipl.-Ing. (FH) Gabriele Dietrich Dr. Födisch Umweltmesstechnik AG Zwenkauer Straße 159 04420 Markranstädt, dietrich@foedisch.de

Dr. Julian Edler SICK AG, Nimburger Str. 11, 79276 Reute, julian.edler@sick.de

Dipl.-Geol. Thomas Eisenmann DURAG Holding AG, Kollaustrasse 105, 22453 Hamburg, Thomas.Eisenmann@durag.de

Dipl.-Ing. Walter Fabinski ehem. ABB Automation Frankfurt, An der Landwehr 70, 65830 Kriftel, wjfabinski@arcor.de

Dr.-Ing. Holger Födisch Dr. Födisch Umweltmesstechnik AG, Zwenkauer Straße 159, D-04420 Markranstädt, vorstand@foedisch.de

Dipl.-Phys. Peer Fietzek Kongsberg Maritime Germany GmbH, Sorthmannsweg 21, 22529 Hamburg, peer.fietzek@km.kongsberg.com

Dipl.-Betriebsw. (FH) Oliver Franken Sensors Europe GmbH, Feldheider Str. 60, 40699 Erkrath, Oliver.franken@sensors-europe.eu

Dr. Axel-Ulrich Grunewald Messkonzept GmbH, Niedwiesenstraße 33, 60431 Frankfurt am Main, grunewald@messkonzept.de

Dr.-Ing. Frank Hammer LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG, Wiesenstraße 6, D-69190 Walldorf, hammer@lamtec.de

Alexander Hein B.Eng. WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, Alexander-Wiegand-Straße 30, 63911 Klingenberg, Alexander.Hein@wika.com

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Heckler WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, Alexander-Wiegand-Straße 30, 63911 Klingenberg, Thomas.Heckler@wika.com

Dr. Frank Herrmann Weinmann EMT GmbH, Frohbösestraße 12, 22525 Hamburg, f.herrmann@weinmann-emt.de

Dr. Wolfgang Jessel ehem. Dräger Safety AG, Lübeck, Eichenweg 17, 23858 Reinfeld, wolfgang.jessel@t-online.de

Dr. Joachim Kastner Weidmüller Interface GmbH & Co KG, Klingenbergstraße 16, 32758 Detmold, kastner.joachim@t-online.de

Dr. Olaf Kiesewetter UST Umweltsensortechnik GmbH, Dieselstraße 2 und 4, 98716 Geschwenda, o.kiesewetter@umweltsensortechnik.de

Dipl.-Phys. Rainer Krage Gesellschaft für Gerätebau mbH, Klönnestr. 99, 44143 Dortmund, rainer.krage@gfg-mbh.com

Dr. Roland Kurte WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG GmbH, Otto-Hahn-Strasse 15, 44227 Dortmund, Roland.kurte@wika.com

Dipl.-Ing. (FH) Tobias Lehmann Berufskolleg für Technik, Repelener Strasse 101, 47441 Moers, tobi.lehman@gmx.de

Dipl.-Ing. (FH) André Magi Micro-Hybrid Electronic GmbH, Heinrich-Hertz-Strasse 8, 07629 Hermsdorf, A.Magi@micro-hybrid.de

Dipl.-Ing. Matthias May UST Umweltsensortechnik GmbH, Dieselstrasse 2 und 4, 98716 Geschwenda, M.May@umweltsensortechnik.de

Dr. Holger Müller BlueSens gas sensor GmbH, Snirgelskamp 25, D-45699 Herten, Holger.Mueller@bluesens.de

Ing. Jürgen Müller UST Umweltsensortechnik GmbH, Dieselstraße 2 und 4, 98716 Geschwenda, J.Mueller@umweltsensortechnik.de

Dr. Ernst Murnleitner AWITE Bioenergie GmbH, Grünseiboldsdorfer Weg 5, D-85416 Langenbach, mur@awite.de

Dr. Peter Papelewski Bruker AXS GmbH, Östliche Rheinbrückenstrasse 49, 76187 Karlsruhe, peter.papelewski@bruker.com

Dipl.-Phys. Jürgen Reinmann Environnement S.A Deutschland, Benzstraße 11, 61352 Bad Homburg, j.reinmann@environnement-sa.com

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Römisch Dr. Födisch Umweltmesstechnik AG, Zwenkauer Straße 159, D-04420 Markranstädt, roemisch@foedisch.de

Dipl.-Technikredakteurin (FH) Anika Sauer Dr. Födisch Umweltmesstechnik AG, Zwenkauer Straße 159, 04420 Markranstädt, sauer@foedisch.de

Dr. Peter Schley SmartSim GmbH, Alfredstraße 81, 45130 Essen, peter.schley@smartsim.energy

Rolf Schiffler SICK AG, Nimburger Str. 11, 79276 Reute, rolf.schiffler@sick.de

Dr. Udo Schmale BlueSens gas sensor GmbH, Snirgelskamp 25, D-45699 Herten, udo.schmale@bluesens.de

David Triebel DURAG data systems GmbH, Kollaustraße 105, 22453 Hamburg, David.Triebel@durag-data.de

Dr. Michael Unruh ExTox Gasmess-Systeme GmbH, Max-Planck-Str. 15a, 59423 Unna, michael.unruh@extox.de

Dipl.-Ing. (FH) Michael Wagner Dr. Födisch Umweltmesstechnik AG, Zwenkauer Straße 159, D-04420 Markranstädt, wagner@foedisch.de

Dipl.-Ing. Thomas Weyrauch ABB Automation GmbH, Stierstädter Straße 5, 60488 Frankfurt a. M., thomas.weyrauch@de.abb.com

Prof. Dr. Gerhard Wiegler Fachhochschule Dortmund, Sonnenstrasse 96, 44139 Dortmund, wiegler@fh-dortmund.de

Dr. Patrick Zimmerman C-Lock Inc., 2025 Samco Road, Rapid City, SD 57702 (USA), contact@c-lockinc.com

Scott Zimmerman C-Lock Inc., 2025 Samco Road, Rapid City, SD 57702 (USA), contact@c-lockinc.com

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
	Literatur	6
2	Physikalische Eigenschaften von Gasen	7
2.1	Aggregatzustände	8
2.2	Die Atmosphäre	15
2.3	Kinetische Gastheorie	27
2.4	Transportvorgänge	36
2.5	Gasgesetze	59
2.6	Verbrennungsprozesse in Gasen	83
2.7	Gasströmungen	94
	Literatur	117
3	Physikalische Gassensoren	119
3.1	Wärmeleitfähigkeitssensoren (WLS)	122
3.2	Massensensitive Sensoren	155
3.3	Paramagnetischer Sauerstoffsensor	175
3.4	Ionisationsverfahren	189
	Literatur	202
4	Physikalisch-Chemische Gassensoren	207
4.1	Wärmetönungs-Sensoren (Pellistoren)	207
4.2	Elektrochemische Zellen	218
4.3	Halbleiter-Gassensoren	244
4.4	Einlagerung in dünnen Schichten	260
4.5	Farbreaktionen	268
	Literatur	275
5	Separationsverfahren	277
5.1	Gaschromatographie (GC)	278
5.2	Ionenmobilitätsspektrometrie (IMS)	300

5.3	Massenspektrometrie	314
	Literatur	324
6	Grundlagen der Strahlungsabsorption	327
6.1	Physikalische Grundlagen der Strahlungsübergänge	328
6.2	Gesetzmäßigkeiten der Strahlungsabsorption	345
	Literatur	360
7	IR-Absorptionsfotometer	361
7.1	Opto-pneumatische Gasanalysatoren	362
7.2	Filterfotometer	384
7.3	Photoakustische Gasanalysatoren (PAS)	400
7.4	IR Komponenten für Fotometer	404
7.5	Küvetten	424
7.6	Detektoren	445
	Literatur	473
8	UV-Absorptionsfotometer	479
8.1	Grundlagen	479
8.2	UV-Gasanalysengeräte	482
8.3	Neue Messverfahren	499
8.4	UV-Spektren	508
	Literatur	513
9	Strahlungsemission und Lasertechnik	515
9.1	Strahlungsemission	515
9.2	Laserspektrometer	533
9.3	Fernmessverfahren (<i>Remote</i>)	557
	Literatur	572
10	Feuchtemessung in Gasen	575
10.1	Grundlagen	576
10.2	Messverfahren	580
10.3	Kalibrierung	612
	Literatur	619
11	Durchflussmesstechnik	621
11.1	Einleitung	622
11.2	Messverfahren	623
11.3	Durchflusskalibrierung	665
	Literatur	671

12	Kalibrierung und Prüfverfahren	673
12.1	Einleitung	674
12.2	Nullgas und Prüfgas	676
12.3	Gasmischeinrichtungen	689
12.4	Prüfverfahren	733
	Literatur	762
13	Staubmesstechnik	767
13.1	Einführung	768
13.2	Diskontinuierliche Emissionsüberwachung für Staub	769
13.3	Gravimetrische Staubgehaltsbestimmung	770
13.4	Ermittlung der Korngrößenverteilung	781
13.5	Emissionsmessungen von Feinstäuben (PM _{2,5} /PM ₁₀)	788
13.6	Aktueller Stand der Feinstaubmesstechnik	791
13.7	Rußzahlmessung	794
13.8	Kontinuierliche Emissionüberwachung für Staub	795
13.9	Transmissiometrie	796
13.10	Streulicht-Messung	800
13.11	Beta-Strahlungs-Absorption	804
13.12	Triboelektrische Staubmessung	805
13.13	Rußzahlmessung	823
13.14	Vergleich der verschiedenen kontinuierlichen Messverfahren	825
13.15	Kalibrierung von Staubmessgeräten	828
	Literatur	842
14	Emissionsmesstechnik	845
14.1	Gasaufbereitung	846
14.2	Abgasanalyse an Kraftfahrzeugen mittels PEMS	897
14.3	Fortlaufende Emissionüberwachung von Sonderverbindungen mittels Langzeitprobenahme	910
14.4	In-situ-Gasanalyse mit Lasertechnik	925
14.5	Moderne Heißgasanalyse	938
14.6	Behördliche Emissionüberwachung von Verbrennungsanlagen	955
	Literatur	971
15	Energietechnik	977
15.1	Energiemessung und andere Messaufgaben in der Gaswirtschaft	977
15.2	Energiemessung in der Biogasanwendung	1000
15.3	SF ₆ -Leckagetüberwachung in Schaltanlagen	1017
15.4	Brennwertverfolgung in Gasnetzen (<i>SmartSim</i>)	1025

15.5	Mehrkomponentengasanalyse nach dem FTTCA-Analyseverfahren . . .	1039
15.6	Feuerungsoptimierung	1048
15.7	Gasanalyse von Metallproben (C, S, H, N, O)	1063
	Literatur	1081
16	Life Science	1085
16.1	Ammoniak-Gasanalyse in der Tierhaltung	1086
16.2	Gasmesstechnik in der Notfallbeatmung	1095
16.3	Kombinierte Luftgütemessung mit IR- und Halbleitergassensoren . . .	1115
16.4	Messung gelöster Gase in Gewässern	1129
16.5	Direkte Respirationsanalysen bei Nutztieren	1142
16.6	$^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ Messung von Atemgas in der Medizintechnik	1153
	Literatur	1167
17	Biotechnik	1173
17.1	Gasanalyse für Fermentationsprozesse	1173
17.2	Geruchserkennung in Brauereien mittels elektronischer Nase	1188
17.3	Gasmessungen in der Lebensmittelverpackung	1198
17.4	NDIR Gasanalyse bei hohen Umgebungstemperaturen	1207
	Literatur	1225
18	Sicherheitstechnik	1227
18.1	Sicherheitstechnik	1227
18.2	Gaswarnanlagen in der Sicherheitstechnik	1255
18.3	Mobile Gasmesstechnik	1279
18.4	Anhang	1291
	Literatur	1300
	Stichwortverzeichnis	1301