Mikroelektromechanischer Sensor zur Detektion und Charakterisierung von luftgetragenen Nanopartikeln

Dissertation



Mikroelektromechanischer Sensor zur Detektion und Charakterisierung von luftgetragenen Nanopartikeln

Der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

> zur Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

> > eingereichte Dissertation

von Maik Bertke aus Lohne

1. Referent: apl. Prof. Dr. rer. nat. Erwin Peiner

2. Referent: Prof. Dr.-Ing Wolfgang Kowalsky

3. Referent: Prof. Dr. rer. nat. Andreas Waag

eingereicht am: 04.06.2020 mündliche Prüfung am: 25.09.2020

Braunschweig, 04.06.2020

Berichte aus der Mikrosystemtechnik

Maik Bertke

Mikroelektromechanischer Sensor zur Detektion und Charakterisierung von luftgetragenen Nanopartikeln

Shaker Verlag Düren 2021

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021 Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7939-5 ISSN 1610-5907

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren Telefon: 02421/99011-0 • Telefax: 02421/99011-9 Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Meinen besonderen Dank gilt meinem Mentor und Forschungsgruppenleiter apl. Prof. Dr. Erwin Peiner, der mir die Möglichkeit gegeben hat in dem Forschungsfeld der Entwicklung mikroelektromechanischer Systeme (MEMS) zu arbeiten und mich bei allen meinen Arbeiten unterstützt und nachhaltig geprägt hat. In diesem Zusammenhang danke ich auch dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Verbundprojekts "Hochgeschwindigkeitsmikrotaster für die Messung an Oberflächen von Strukturen mit großem Aspektverhältnis, kurz: HmtS" und dem Niedersächsischen Vorab für die Förderung durch die Quantum- and Nanometrology (QUANOMET) Initiative mit dem Projekt NP 2-2. An dieser Stelle möchte ich mich auch bei Prof. Dr. Andreas Waag und Prof. Dr. Wolfgang Kowalsky für die Übernahme des Vorsitzenden des Promotionsverfahrens und des zweiten Referenten des Prüfungsausschusses bedanken.

Ich bedanke mich bei Ina Kirsch und Dr. Erik Uhde vom Fraunhofer Wilhelm-Klauditz-Instituts (WKI) für die Ermöglichung und Unterstützung bei der Durchführung der Referenzmessungen. Bei allen Kollegen und Kolleginnen des Instituts für Halbleitertechnik (IHT) bedanke ich mich für die vielen fachlichen und außerfachlichen Gespräche und Diskussionen. Besonders möchte ich mich hier bei den Mitgliedern und ehemaligen Mitgliedern der MEMS-Forschungsgruppe Dr. Hutomo Suryo Wasisto, Dr. Gerry Hamdana, Jiushuai Xu, Andi Setiono, Wilson Ombati Nyang'au und Michael Fahrbach bedanken. Mein ausdrücklicher Dank gilt auch den technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern Juliane Breitfelder, Aileen Michalski, Angelika Schmidt und Karl-Heinz Lachmund, die mir stets mit Rat und Tatkraft zur Seite standen sowie den Mitarbeiterinnen der Verwaltung Klaudia-Dagmar Stegert, Angelika John, Shanice Thyme und Silke Feldhusen für die Hilfestellungen bei organisatorischen Fragen.

Zuletzt möchte ich mich bei Uili Wobeto Reinheimer, Idriss Joel Dambia Tenke, Saige Ni, Michael Fahrbach, Chi Liu, Lukas Eisele, Yiyuan Zhang, Chenshuo Ding, Lidvine Joelle Kemajou Tchuisseu und Quang Duc Pham bedanken, die in studentischen Arbeiten oder als studentische Hilfskräfte meine Arbeiten unterstützt haben. Besonders hervorzuheben möchte ich hier Lukas Eisele, der über zwei Jahre an vielen Entwicklungsschritten mitgewirkt hat.

Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation behandelt die Entwicklung eines mikroelektromechanischen System (MEMS)-basierenden, gravimetrischen Nanopartikel (NP)-Sensors, zur Detektion und Größenklassifizierung von luftgebundenen ultrafeinen Partikeln (<100 nm) bei Massenkonzentrationen $<10 \text{ µg/m}^3$. Der Sensor besteht aus einem Array von 3,1 \pm 0,3 µm, 5,9 \pm 0,4 µm oder 10,5 \pm 0,4 µm breiten, 118,7 \pm 0,8 µm, 168,8 \pm 0,8 µm bzw. 171,2 ± 1 µm langen und 3,5 ± 0.5 µm dicken mikromechanischen Silizium Cantilever-Resonatoren, die sich an den Enden von in den Sensor-Chip integrierten µ-Kanälen befinden. Au/Cr-Elektrodenpaare aus Sammelelektroden auf den Cantilevern und Gegenelektroden an den Rändern der Kanäle dienen zur elektrostatischen Sammlung der NP aus der Luft. Durch Verfolgung der Resonanzfrequenzen kann die Masse der abgelagerten Partikel und über eine Kalibration mit einem Referenzmessgerät Partikelmassekonzentrationen bestimmt werden. Der Sensor ist aus Bulk-Si mit Verfahren der Mikrosystemtechnik hergestellt, das Sensorkonzept und -Design wurden durch Unterstützung von Finite Elemente Modelling (FEM) optimiert. Für die Fertigung ist ein neuer Front-Size-Release Prozess entwickelt worden mit dem freistehende Mikrostrukturen in einem Prozessschritt durch Tieftemperatur reaktives Ionenätzen mit induktiv gekoppeltem Plasma (cryo-ICP-RIE) ohne zusätzlichen Passivierungsschritt erzeugt werden können. Die elektronische Auslesung ist über jeweils zwei piezoresistiven Streben an den Seiten der Cantilever verwirklicht, welche einen sehr hohen Grad an Miniaturisierung ermöglichen. Die Resonatoren besitzen demzufolge geringe effektive Massen von lediglich $3,9\pm0,9$ ng, $11,0\pm2,1$ ng und $16,3\pm2,9$ ng. In Referenzmessungen mit einem Fast Mobility Particle Sizer (FMPS) konnte für die $10.5 \times 171.2 \times 3.5 \ \mu\text{m}^3$ großen Sensoren mit einer Sammelspannung von -30 V und einer Sammelzeit von 9,5 min eine Sammeleffizienz von 12,6 ±4,2 % und eine Nachweisgrenze der Partikelmassekonzentration von $0.75 \pm 0.03 \ \mu g/m^3$ gezeigt werden. Durch die Variation der Sammelspannung konnten verschiedene Sammeleffizienzen für unterschiedliche Partikelgrößen erzielt werden. Mit Hilfe von Simulationsergebnissen wurde so die Partikelgrößenverteilung der FMPS-Messung in sechs Größenklassen (von 19 nm bis 523 nm) nachgebildet. Eine einfache und effiziente Reinigung kontaminierter MEMS-NP-Sensoren (bis zu 89% Regeneration) konnte durch Resonanzanregung mit umgekehrter Sammelspannung in einer Aceton-Dampfatmosphäre erreicht werden. Hierzu war kein Ausbau des Sensors aus dem Sammlergehäuse nötig. Neben der Entwicklung des Nanopartikelsensors beinhaltet die Arbeit die Beschreibung der Auswirkungen von parasitären Einflüssen auf das Resonanzverhalten mikromechanischer Resonatoren und deren elektronische Auslesung, Maßnahmen zur Kompensation und die Analyse asymmetrischer Resonanzkurven mit einer auf der Fano-Resonanz basierenden Fit-Funktion. Dadurch bietet diese Arbeit nicht nur entscheidende, neu entwickelte Prozesse und Systemkonzepte für ein handliches und kostengünstiges gravimetrisches Messsystem zur Bestimmung von NP-Konzentrationen und -Größenverteilungen in der Luft, sondern auch unterstützende Verfahren für die Entwicklung und Optimierung weiterer neuer mikroelektromechanischer Sensorsysteme.

Abstract

This dissertation discusses the development of a microelectromechanical system (MEMS)- based gravimetric nanoparticle (NP) sensor for the detection and size classification of airborne ultrafine particles (<100 nm) at mass concentrations <10 μ g/m³. The sensor consists of an array of $3.1 \pm 0.3 \,\mu\text{m}$, $5.9 \pm 0.4 \,\mu\text{m}$ or $10.5 \pm 0.4 \,\mu\text{m}$ wide, $118.7 \pm 0.8 \,\mu\text{m}$, $168.8 \pm 0.8 \,\mu\text{m}$ or $171.2 \pm 1 \,\mu\text{m}$ long and $3.5 \pm 0.5 \,\mu\text{m}$ thick micromechanical silicon cantilever resonators located at the ends of µ-channels integrated in the sensor chip. Au/Cr electrode pairs consisting of collecting electrodes on the cantilevers and counter electrodes on the edges of the channels are used for the electrostatic collection of airborne NPs. By tracking the resonance frequencies, the mass of the deposited particles and particle mass concentrations can be determined using calibration against a reference measuring instrument. The sensor is made of bulk Si using micromachining technology methods. The sensor concept and design have been optimized by support of Finite Element Modelling (FEM). A new front-size-release process has been developed for the manufacturing, which allows the production of free-standing microstructures in a single process step by low-temperature reactive ion etching with inductively coupled plasma (cryo-ICP-RIE) without the use of an additional passivation step. The electronic readout is realized via two piezoresistive struts on each side of the cantilever. This allows a very high degree of miniaturization. The resonators thus have small effective masses of only 3.9 ± 0.9 ng, 11.0 ± 2.1 ng and 16.3 ± 2.9 ng. In reference measurements with a Fast Mobility Particle Sizer (FMPS) a collection efficiency of 12.6 ± 4.2 % and a limit of detection of $0.75 \pm 0.03 \,\mu\text{g/m}^3$ of mass concentration was shown for the $10.5 \times 171.2 \times 3.5 \ \mu\text{m}^3$ sensors with a collection voltage of -30 V and a collecting time of 9.5 min. By varying the collection voltage, different collection efficiencies could be achieved for different particle sizes. By the use of simulation results, the particle size distribution of the FMPS measurement was reconstructed in six particle size classes (from 19 nm to 523 nm). A simple and efficient cleaning of contaminated MEMS-NP sensors (up to 89% regeneration) was achieved by resonance excitation with reversed collection voltage in an acetone-vapor atmosphere. This did not require removal of the sensor from the collector housing. Besides the development of the nanoparticle sensor, the work includes the description of the effects of parasitic influences on the resonance behaviour of micromechanical resonators and its electronic readout, measures for compensation and the analysis of asymmetric resonance curves by a Fano-resonance-based fitting function. Thus, this work not only offers decisive, newly developed processes and system concepts for a wearable low-cost gravimetric measuring system for the determination of airborne NP concentrations and size distributions, but also supporting methods for the development and optimization of further new microelectromechanical sensor systems.

Liste der Veröffentlichungen

Wissenschaftliche Zeitschriften

- M. Bertke, G. Hamdana, W. Wu, H.S. Wasisto, E. Uhde, E. Peiner, Analysis of asymmetric resonance response of thermally excited silicon micro-cantilevers for mass-sensitive nanoparticle detection, Journal of Micromechanics and Microengineering 27 (2017) 064001. https://doi.org/10.1088/1361-6439/aa6b0d.
- M. Bertke, M. Fahrbach, G. Hamdana, J. Xu, H.S. Wasisto, E. Peiner, Contact resonance spectroscopy for on-the-machine manufactory monitoring, Sensors and Actuators A: Physical 279 (2018) 501-508. https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.012.
- M. Bertke, J. Xu, M. Fahrbach, A. Setiono, H.S. Wasisto, E. Peiner, Strategy toward miniaturized, Self-out-readable resonant cantilever and integrated electrostatic microchannel separator for highly sensitive airborne nanoparticle detection, Sensors 19 (2019) 901. https://doi.org/10.3390/s19040901.
- M. Bertke, J. Xu, A. Setiono, I. Kirsch, E. Uhde, E. Peiner, Fabrication of a microcantilever-based aerosol detector with integrated electrostatic on-chip ultrafine particle separation and collection, Journal of Micromechanics and Microengineering 30 (2019) 014001. https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab4e56.
- S. Zhang, Y. Ding, W. Wu, M. Bertke, H.S. Wasisto, L. Doering, U. Brand, E. Peiner, Direct-reading resonant silicon cantilever for probing of surface deposits, Procedia Engineering 168 (2016) 658-661. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.241.
- J. Yang, J. Xu, W. Wu, M. Bertke, H.S. Wasisto, E. Peiner, Piezoresistive silicon cantilever covered by ZnO nanorods for humidity sensing, Procedia Engineering 168 (2016) 1114-1117. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.361.
- G. Hamdana, M. Bertke, L. Doering, T. Frank, U. Brand, H.S. Wasisto, E. Peiner, Transferable micromachined piezoresistive force sensor with integrated double-meander-spring system, Journal of Sensors and Sensor Systems 6 (2017) 121-133. https://doi.org/10.5194/jsss-6-121-201.
- G. Hamdana, T. Südkamp, M. Descoins, D. Mangelinck, L. Caccamo, M. Bertke, H.S. Wasisto, H. Bracht, E. Peiner, Towards fabrication of 3D isotopically modulated vertical silicon nanowires in selective areas by nanosphere lithography, Microelectronic Engineering 179 (2017) 74-82. https://doi.org/10.1016/j.mee.2017.04.030.

- G. Hamdana, P. Puranto, J. Langfahl-Klabes, Z. Li, F. Pohlenz, M. Xu, T. Granz, M. Bertke, H.S. Wasisto, U. Brand, E. Peiner, Nanoindentation of crystalline silicon pillars fabricated by soft UV nanoimprint lithography and cryogenic deep reactive ion etching, Sensors and Actuators A: Physical 283 (2018) 65-78. https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.09.035.
- J. Xu, M. Bertke, X. Li, H. Mu, H. Zhou, F. Yu, G. Hamdana, A. Schmidt, H. Bremers, E. Peiner, Fabrication of ZnO nanorods and Chitosan@ ZnO nanorods on MEMS piezoresistive self-actuating silicon microcantilever for humidity sensing, Sensors and Actuators B: Chemical 273 (2018) 276-287. https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.06.017.
- G. Hamdana, P. Puranto, J. Langfahl-Klabes, Z. Li, F. Pohlenz, M. Xu, T. Granz, M. Bertke, H.S. Wasisto, U. Brand, E. Peiner, Nanoindentation of crystalline silicon pillars fabricated by soft UV nanoimprint lithography and cryogenic deep reactive ion etching, Sensors and Actuators A: Physical 283 (2018) 65-78. https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.09.035.
- A. Setiono, M. Fahrbach, J. Xu, M. Bertke, O.N. Wilson, G. Hamdana, H.S. Wasisto, E. Peiner, Phase optimization of thermally actuated piezoresistive resonant MEMS cantilever sensors, Journal of Sensors and Sensor Systems 8 (2019) 37-48. https://doi.org/10.5194/jsss-8-37-201.
- W.O. Nyang'au, A. Setiono, M. Bertke, H. Bosse, E. Peiner, Cantilever-Droplet-Based Sensing of Magnetic Particle Concentrations in Liquids, Sensors 19 (2019) 4758. https://doi.org/10.3390/s19214758.
- S. Mariana, G. Hamdana, J. Dickmann, M. Bertke, C. Michel, J. Meyer, N. Yulianto, G. Cagnoli, E. Peiner, A. Waag, M. Granata, S. Kroker, H.S. Wasisto, Fabrication of SiO2 microcantilever arrays for mechanical loss measurements, Materials Research Express 6 (2019) 045206. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aafab7.
- J. Toledo, V. Ruiz-Díez, M. Bertke, H.S. Wasisto, E. Peiner, J.L. Sánchez-Rojas, Piezoelectric MEMS Resonators for Cigarette Particle Detection, Micromachines 10 (2019) 145. https://doi.org/10.3390/mi10020145.
- A. Setiono, J. Xu, M. Fahrbach, M. Bertke, W.O. Nyang'au, H.S. Wasisto, E. Peiner, Real-time frequency tracking of an electro-thermal piezoresistive cantilever resonator with ZnO nanorods for chemical sensing, Chemosensors 7 (2019) 2. https://doi.org/10.3390/chemosensors7010002.
- J. Xu, M. Bertke, H.S. Wasisto, E. Peiner, Piezoresistive microcantilevers for humidity sensing, Journal of Micromechanics and Microengineering 29 (2019) 053003. https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab0cf5.

- A. Setiono, W.O. Nyang'au, M. Fahrbach, J. Xu, M. Bertke, H.S. Wasisto, E. Peiner, Improvement of frequency responses of an in-plane electro-thermal cantilever sensor for real-time measurement, Journal of Micromechanics and Microengineering 29 (2019) 124006. https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab4e29.
- A. Setiono, M. Bertke, W.O. Nyang'au, J. Xu, M. Fahrbach, I. Kirsch, E. Uhde, A. Deutschinger, E.J. Fantner, C.H. Schwalb, H.S. Wasisto, E. Peiner, In-plane and out-of-plane MEMS piezoresistive cantilever sensors for nanoparticle mass detection, Sensors 20 (2020) 618. https://doi.org/10.3390/s20030618.

Konferenzbeiträge und Tagungsbände

- M. Bertke, G. Hamdana, W. Wu, M. Marks, H.S. Wasisto, E. Peiner, Asymmetric resonance frequency analysis of in-plane electrothermal silicon cantilever for nanoparticle detection, Micro-Nano-Integration; 6. GMM-Workshop (2016) 1-6.
- M. Bertke, G. Hamdana, W. Wu, M. Marks, H.S. Wasisto, E. Peiner, Asymmetric resonance frequency analysis of in-plane electrothermal silicon cantilevers for nanoparticle sensors, 27th Micromechanics and Microsystems Europe Workshop, Journal of Physics: Conference Series 757 (2016) 012006. https://doi.org/10.1088/1742-6596/757/1/012006.
- M. Bertke, U.W. Reinheimer, M. Fahrbach, G. Hamdana, H.S. Wasisto, E. Peiner, Piezo Resistive Read-Out Contact Resonance Spectroscopy for Material and Layer Analysis at High-Aspect-Ratio Geometries, Eurosensors 2017, MDPI Proceedings 1 (2017) 371. https://doi.org/10.3390/proceedings1040371.
- M. Bertke, G. Hamdana, W. Wu, H.S. Wasisto, E. Peiner, Asymmetric resonance response analysis of a thermally excited silicon microcantilever for mass-sensitive nanoparticle detection, SPIE Microtechnologies, Smart Sensors, Actuators, and MEMS VIII 10246 (2017) 102460K. https://doi.org/10.1117/12.2266084.
- M. Bertke, W. Wu, H.S. Wasisto, E. Uhde, E. Peiner, Size-selective electrostatic sampling and removal of nanoparticles on silicon cantilever sensors for air-quality monitoring, 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS) (2017) 1493-1496. https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994342.
- M. Bertke, J. Xu, M. Fahrbach, A. Setiono, G. Hamdana, H.S. Wasisto, E.Peiner, Design of Miniaturized, Self-Out-Readable Cantilever Resonator for Highly Sensitive Airborne Nanoparticle Detection, EUROSENSORS 2018, MDPI Proceedings 2 (2018) 879. https://doi.org/10.3390/proceedings2130879.

- M. Bertke, M. Fahrbach, G. Hamdana, H.S. Wasisto, E. Peiner, Large area contact resonance spectroscopy mapping system for on-the-machine measurements, 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (2018) 897-900. https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2018.8346701.
- M. Bertke, J. Xu, A. Setiono, G. Hamdana, H.S. Wasisto, E. Peiner, Self-reading femtogram microbalance for highly sensitive airborne nanoparticle detection, 29th Micromechanics and Microsystem Europe Workshop - MME 2018, Journal of Physics: Conference Series 1319 (2019) 012004. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1319/1/012004.
- M. Bertke, J. Xu, A. Setiono, E. Peiner, I. Kirsch, E. Uhde, Piezoresistive Microcantilever for Gravimetric Particulate Matter Monitoring, MikroSystemTechnik 2019; Congress (2019) 1-4.
- G. Hamdana, M. Bertke, T. Suedkamp, H. Bracht, H.S. Wasisto, E. Peiner, Highly ordered silicon nanopillar by nanoparticle lithography, Micro-Nano-Integration; 6. GMM-Workshop (2016) 1-5.
- J. Xu, J. Yang, W. Wu, G. Hamdana, M. Bertke, H.S. Wasisto, E. Peiner, ZnO nanorods-patterned piezoresistive Si cantilevers for humidity sensors, Micro-Nano-Integration; 6. GMM-Workshop (2016) 1-6.
- J. Xu, M. Bertke, A. Gad, F. Yu, G. Hamdana, A. Bakin, E. Peiner, Fabrication of ZnO nanorods on MEMS piezoresistive silicon microcantilevers for environmental monitoring, Eurosensors 2017, MDPI Proceedings 1 (2017) 290. https://doi.org/10.3390/proceedings1040290.
- G. Hamdana, T. Granz, M. Bertke, Z. Li, P. Puranto, U. Brand, H.S. Wasisto, E. Peiner, Nanomechanical traceable metrology of vertically aligned silicon and germanium nanowires by nanoindentation, Eurosensors 2017, MDPI Proceedings 1 (2017) 375. https://doi.org/10.3390/proceedings1040375.
- G. Hamdana, M. Bertke, T. Südkamp, H. Bracht, H.S. Wasisto, E. Peiner, Largearea fabrication of silicon nanostructures by templated nanoparticle arrays, SPIE Microtechnologies, Nanotechnology VIII 10248 (2017) 1024808. https://doi.org/10.1117/12.2264995.
- J. Xu, M. Bertke, X. Li, A. Gad, H. Zhou, H.S. Wasisto, E. Peiner, Gravimetric humidity sensor based on ZnO nanorods covered piezoresistive Si microcantilever, SPIE Microtechnologies, Smart Sensors, Actuators, and MEMS VIII 10246 (2017) 102460C. https://doi.org/10.1117/12.2264897.
- J. Xu, M. Bertke, X. Li, A. Setiono, M. Fahrbach, A. Schmidt, E. Peiner, Silicon Microcantilevers with ZnO Nanorods/Chitosan-SAMs Hybrids on Its Back Surface for Humidity Sensing, EUROSENSORS 2018, MDPI Proceedings 2 (2018) 838. https://doi.org/10.3390/proceedings2130838.

- J. Xu, K. Strempel, H. Zhou, A. Waag, M. Bertke, A. Schmidt, E. Peiner, Area-Selective Growth of Aligned ZnO Nanorod Arrays for MEMS Device Applications, EUROSENSORS 2018, MDPI Proceedings 2 (2018) 887. https://doi.org/10.3390/proceedings2130887.
- M. Fahrbach, L. Krieg, T. Voss, M. Bertke, J. Xu, E. Peiner, Optimizing a Cantilever Measurement System towards High Speed, Nonreactive Contact-Resonance-Profilometry, EUROSENSORS 2018, MDPI Proceedings 2 (2018) 889. https://doi.org/10.3390/proceedings2130889.
- J. Xu, M. Bertke, X. Li, H. Mu, F. Yu, A. Schmidt, A. Bakin, E. Peiner, Self-actuating and self-sensing ZNO nanorods/chitosan coated piezoresistive silicon microcantilever for humidity sensing, 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (2018) 206-209. https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2018.8346520.
- A. Setiono, M. Fahrbach, M. Bertke, J. Xu, G. Hamdana, H.S. Wasisto, E. Peiner, Phase characteristic optimization of resonant MEMS environmental sensors, Sensors and Measuring Systems; 19th ITG/GMA-Symposium (2018) 1-4.
- J. Xu, M. Bertke, A. Setiono, A. Schmidt, E. Peiner, ZNO Nanostructures Functionalized Piezoresistive Silicon Microcantilever Platform for Portable Gas Sensing, 2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (2019) 456-459. https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2019.8870852.
- J. Xu, A. Setiono, M. Bertke, K. Strempel, N. Markiewicz, A. Schmidt, A. Waag, J.D. Prades, E. Peiner, Piezoresistive Microcantilevers 3D-Patterned Using Zno-Nanorods@ Silicon-Nanopillars for Room-Temperature Ethanol Detection, 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII) (2019) 1211-1214. https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808821.
- 23. J. Xu, M. Bertke, S. Bornemann, S. Mariana, C. Fan, A. Schmidt, H.S. Wasisto, A. Waag, E. Peiner, Silicon Nanopillars with ZNO Nanorods by Nanosphere Lithography on a Piezoresistive Microcantilever, 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII) (2019) 2420-2423. https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808435.
- W.O. Nyang'au, A. Setiono, P. Puranto, M. Bertke, H.S. Wasisto, T. Viereck, E. Peiner, H. Bosse, Droplet-on-cantilever approach for determining the mass of magnetic particles, 20. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2019 (2019) 222-229. https://doi.org/10.5162/sensoren2019/3.2.1.
- A. Setiono, M. Fahrbach, J. Xu, W.O. Nyang'au, M. Bertke, H.S. Wasisto, E. Peiner, Programmable reference parameters for resonance locking in electro-thermal piezoresistive cantilever sensor, 20. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2019 (2019) 243-249. https://doi.org/10.5162/sensoren2019/3.2.4.

- 26. A. Setiono, J. Xu, M. Fahrbach, M. Bertke, W.O. Nyang'au, H.S. Wasisto, E. Peiner, Enhancement of real-time resonance tracking in electrothermally actuated cantilever sensor with optimized phase characteristic, 29th Micromechanics and Microsystem Europe Workshop MME 2018, Journal of Physics: Conference Series 1319 (2019) 012003. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1319/1/012003.
- W.O. Nyang'au, G. Hamdana, A. Setiono, M. Bertke, J. Xu, M. Fahrbach, P. Puranto, H.S. Wasisto, E. Peiner, Adsorption and detection of microparticles using silicon microcantilevers, 29th Micromechanics and Microsystem Europe Workshop MME 2018, Journal of Physics: Conference Series 1319 (2019) 012010. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1319/1/012010.

Inhaltsverzeichnis

Danksagungi			
Kurzfassungiii			
Abstractv			
Liste der Veröffentlichungen vii			
Inhaltsverzeichnis xiii			
Abkürzungsverzeichnisxv			
Symbolverzeichnis			
1. Einleitung1			
2. Stand der Technik			
2.1. Konventionelle Messtechniken			
2.1.1. Optische Partikeldetektion			
2.1.2. Elektrische Detektion			
2.1.3. Gravimetrische Messmethoden			
2.1.4. Methoden zur Bestimmung von Größenverteilungen			
2.2. MEMS-basierte Nanopartikeldetektoren11			
2.3. Cantilever-basierter Nanopartikel Detektor (Cantor)14			
2.4. Was wurde erreicht und was bleibt zu tun?17			
3. Eigenschaften resonanter MEMS-Sensoren			
3.1. Resonanzverhalten /-analyse			
3.2. Resonante Anregung und Auslesung			
3.2.1. Piezoelektrische Wandler			
3.2.2. Elektromagnetische Wandler			
3.2.3. Elektrothermische Wandler			
3.2.4. Kapazitive/Elektrostatische Wandler			
3.2.5. Piezoresistive Wandler			
3.3. Resonanzfrequenzanalyse und -verfolgung			
3.3.1. Nachbildung resonanter Messkurven			
3.3.2. Asymmetrisches Resonanzverhalten und Übersprechen des Anregungs signals			
3.3.3. Nichtlineares Resonanzverhalten			

Inhaltsverzeichnis

	3.3	.4.	Resonanzfrequenzverfolgung	46
4. Miniaturisierter, selbstauslesender Cantilever-Resonator		risierter, selbstauslesender Cantilever-Resonator	53	
	4.1.	Ser	nsor-Design	53
	4.1	.1.	Konzeptentwicklung	53
	4.1	.2.	Design-Optimierung durch Finite-Elemente-Modeling (FEM)	55
	4.2.	Grö	ößenselektive Partikelsammlung	58
4.3. Senso		Ser	nsorherstellung	61
	4.3	.1.	Herstellungsprozess	62
	4.3	.2.	Anisotropes Ätzen von MEMS-Strukturen	64
	4.3	.3.	Unterätzen von mikromechanischen Strukturen	67
	4.3	.4.	Herstellung einer Abschirmwand unterhalb der Cantilever-Struktu	ır72
	4.4.	Sys	stemaufbau	74
 4.5. Funktionstests		77		
		.1.	Resonanzanalyse	77
		.2.	Detektion von Nanopartikeln	80
		nsorreinigung	81	
 Referenzmessung Auflösungsvermögen und Langzeitstabilität Partikelmessung 		86		
		flösungsvermögen und Langzeitstabilität	86	
		tikelmessung	88	
	5.3.	Ab	hängigkeit der Sammeleffizienz von der Sammelspannung	93
	5.4.	Bei	echnung der Partikelgrößenverteilung	98
6.	Zu	samr	nenfassung	101
Liste der Tabellen				
R	eferenz	en		105

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current	
AGC	automatische Verstärkungsregelung	
BOX	Buried-Oxide	
CCD	Charge-Coupled Device	
CPC	Condensation Particle Counter	
cryo-ICP-RIE	Tieftemperatur reaktives Ionenätzen mit induktiv gekoppeltem	
	Plasma	
DC	Direct Current	
DMA	Differential Mobility Analyzer	
ELPI	Electrical Low Pressure Impactor	
EM	Elektromobilität	
ES	Elektrostatik	
ESB	Ersatzschaltbild	
FBAR	akustischer Filmvolmenresonator	
FEM	Finite Elemente Modelling	
FIMS	Fast Integrated Mobility Spectrometer	
FMPS	Fast Mobility Particel Sizer	
ICP	induktiv gekoppeltes Plasma	
IHT	Institut für Halbleitertechnik	
k. A.	keine Angabe	
KI	Kaskadenimpaktor	
LII	Laser Induced Incandescence	
LOD	Nachweisgrenze	
MEMS	mikroelektromechanische Systeme	
NEMS	nanoelektromechanische Systeme	
NP	Nanopartikel	
OMC	Optical Mobility Counter	
OPC	Optical Particle Counter	
PASS	Photoacoustic Soot Sensor	
PCB	Printed Circuit Board	
PDMS	Polydimethylsiloxan	
PM	Particle Matter	
PLL	Phasenregelschleife	
PR-Koeffizient	piezoresistiver Koeffizient	
PVDF	Polyvinylidenfluorid	
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat	
Q-Faktor	Gütefaktor	
QCM	Quartz Crystal Microbalance	
REM	Rasterelektronenmikroskop	

RIE	reaktives Ionenätzen
SAW	Sureface Acoustic Wave
SHO	Single Harmonic Oscillator
SOI	Silicon-on-Insulator
SPN	Solid Particle Number
SMPS	Scanning Mobility Particel Sizer
TDMA	Tandem Differential Mobility Analyser
TEOM	Tapered Elemet Oscillation Microbalance
ТР	Thermophorese
UFP	ultrafeine Partikel
VCO	spannungsgeregelter Oszillator
VI	virtueller Impaktor
VPR	Volatile Particle Remover
WHO	Weltgesundheitsorganisation
XOR-Gatter	Exklusiv-Oder-Gatter
μR	μ-Resonator

Symbolverzeichnis

A	Amplitude
A_0	Nullpunktamplitude
a_0	Gitterkonstante
$A_{\rm C}$	Elektrodenoberfläche
$A_{ m off}$	Offset-Amplitude
$A_{\rm R}$	Widerstandsquerschnittsfläche
В	Magnetische Flussdichte
BW	Bandbreite
C_{C}	Kapazität eines Kondensators
cm	Massenkonzentration
C_{pz}	Piezoelektrische Ladungskonstante
D	Dielektrische Verschiebung
d	Partikeldurchmesser
dc	Elektrodenabstand
$D_{\rm E}$	Elastizitätsmatrix
Ε	Energie
e	Elementarladung
Ee	Elektrische Feldstärke
F	Kraft
f	Frequenz
f_0	Resonanzfrequenz
G	Schermodul
g	Kurvenbreite
Н	Verstärkungsfaktor
ħ	reduziertes Plancksches Wirkungsquantum
Ι	Elektrischer Strom
Ip	Polares Flächenträgheitsmoment
J	Scherkoeffizient
k	Wellenzahl
k_0	Steifigkeit
k _m	Kalibrierfaktor
L	Strukturlänge
1	Länge
LOD	Limit of Detection
m	Masse
m^*	Effektive Masse
m_0	Resonatormasse
me	Masse freier Elektronen
Ν	Ladungsträgerkonzentration
NF	Blindwert

nm	Mittlere Ladungszahl
р	Impuls
$P_{ m h}$	Wärmeleistung
$p_{\rm S}$	Strebenposition
$p_{\rm V}$	Differenzdruck
Q	Gütefaktor
q	Ladung
R	Elektrischer Widerstand
rH	Relative Luftfeuchtigkeit
S	Messempfindlichkeit
$s_{\rm E}$	Youngsche Elastizitätsmodul
Т	Temperatur
t	Zeit
t _C	Strukturtiefe/Schichtdicke
t _d	Diffusionstiefe
Δt	Sammelzeit
U	Elektrische Spannung
Uc	Sammelspannung
V _{AC}	Wechselspannung
Vair	Luftströmungsgeschwindigkeit
$V_{\rm DC}$	Gleichspannung
$V_{ m h}$	Heizspannung
V_s	Strukturvolumen
ΔV	Messvolumen
W	Strukturbreite
W_0	gespeicherte mechanische Energie
ΔW	Energieverlust
α	Asymmetriefaktor
γ	Elektrische Leitfähigkeit
\mathcal{E}_0	Permittivität des Vakuums
Er	Relative Permittivität
η	Wirkungsgrad
$\eta_{\rm s}$	Verlustfaktor
λ_n	Eigenwert der n-ten Mode
$\mu_{\rm n}$	Ladungsträgerbeweglichkeit
v	Poissonzahl
ξ	Sammeleffizienz
π	Piezoresistiver Koeffizient
ρ	Spezifischer Widerstand
$ ho_{ m m}$	Dichte
Σ	Mechanische Verformung
$\sigma_{ m m}$	Mechanische Spannung

τ	Zeitkonstant
φ	Phasenunterschied
χ	Querkontraktionszahl
ω	Kreisfrequenz