

MEMS-Vakuummeter

basierend auf der Leitfähigkeitsmessung von Gasen

F. J. Giebel¹, M. Köhle¹, F. M. Münchenberger¹, K. T. Kallis¹, H. L. Fiedler¹

¹TU Dortmund, Lehrstuhl für Intelligente Mikrosysteme, Emil-Figge-Str. 68, 44227 Dortmund

Zusammenfassung

Es gibt bereits mehrere Ansätze für die Entwicklung von MEMS-Vakuummeter. Die meisten davon orientieren sich dabei an den Messkonzepten von bewährten makroskopischen Messgeräten. Wir stellen hier einen Ansatz zur Messung des Vakuumdruckes vor, der erst durch die Miniaturisierung der Sensoren möglich wird. Gase werden allgemein als Isolatoren betrachtet. Daher werden in konventionellen Gasmessgeräten Energiequellen zur Ionisation der Gase genutzt um die Anzahl der Ladungsträger zu erhöhen. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Leitfähigkeit eines Gasvolumens zwischen zwei Elektroden mit dem Druck um mehrere Picoampere steigt. In dieser Studie wird nun die Frage untersucht, ob sich durch Miniaturisierung des Messvolumens die Leitfähigkeit soweit erhöhen lässt, dass sie zur Messung des Gasdrucks genutzt werden kann. Dazu wird zunächst das Design und die Herstellung eines für die Vakuum-Messung entwickelten Sensorchips und eine für die elektrischen Messungen konzipierte Vakuumumgebung vorgestellt. Die elektrischen Voruntersuchungen zeigen, dass es grundsätzlich möglich ist, mittels der Leitfähigkeit zwischen zwei Elektroden auf den Gasdruck zurückzuschließen. Die elektrischen Messungen mit einem ersten Sensorchip liefern eine Leitfähigkeit in der Größenordnung von Mikro Siemens. Damit eröffnet der hier vorgestellte Sensorchip, gefertigt in Standard-CMOS-Technologie, der ohne zusätzliche Energiequelle wie Röntgenröhre, UV-Quelle, Heizung etc. auskommt, die Möglichkeit, eine neue Art von kleineren, einfacheren und preisgünstigeren Vakuummeter zu entwickeln.

Keywords: Vakuummeter, Planartechnologie, MEMS-Sensor, CMOS-Kompatibilität, Leitfähigkeit.

1 Einleitung

Der Bedarf für miniaturisierte Drucksensoren aller Art steigt rasant. Immer kleiner werdende Bauteile erweitern das Feld der Anwendungsmöglichkeiten. Die Herstellung durch kostengünstige Fertigungsverfahren der Mikrostrukturtechnik führt dabei zusätzlich zu einer anhaltenden Reduktion der pro-Stück-Kosten. Einen speziellen Bereich der Drucksensoren stellen dabei Niederdruckmessgeräte oder auch Vakuummeter dar. Diese sind in weiten Bereichen der Industrie nicht wegzudenken. Während Messgeräte für Hoch- bzw. Ultrahochvakuum vorwiegend in der Forschung oder in hochspezialisierten Industriezweigen, zum Beispiel in Elektronenmikroskopen oder Teilchenbeschleunigern, zu finden sind, werden Messgeräte für Grob- und Feinvakuum in weiten Bereichen wie beispielsweise in der Lebensmittel- und Automobilindustrie angewendet. Darüber hinaus spielt Vakuum auch bei der Herstellung von mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) eine große Rolle für die Verbesserung der Funktionsfähigkeit und der Lebensdauer [1].

In Folge der großen Nachfrage gibt es bereits viele Ansätze für die Messung des Vakuumdruckes mittels miniaturisierter Sensoren. Ein weit verbreiteter Ansatz ist zum Beispiel die Miniaturisierung von Pirani-Vakuummeter [2]. Diese basieren auf der Druckabhängigkeit der thermischen Leitfähigkeit eines Gases [3]. Der große Vorteil dieser Art der Vakuummessung ist der große Messbereich. Der Prozessaufwand zur Herstellung dieser Sensoren ist aber vergleichsweise groß [4,5].

Viele dieser MEMS-Sensoren arbeiten nach Messprinzipien, die von makroskopischen Messgeräten durch Miniaturisierung auf die Mikrosensoren übertragen wurden [6]. Es ist daher nicht überraschend, dass bisher, soweit es uns bekannt ist, keine Versuche unternommen wurden, die Messung der Leitfähigkeit des gasförmigen Mediums direkt zu nutzen, um den Gasdruck zu bestimmen. In makroskopischen Größenordnungen ist der Widerstand von Luft so hoch, dass die Ströme extrem klein und nur mit sehr hohem Messaufwand zu detektieren sind. Erst die Miniaturisierung und die Möglichkeit Messvolumen mit unter einem Mikrometer Durchmesser herzu-

stellen, eröffnen nun die Chance ein neues Messprinzip zu untersuchen.

Die Frage, ob es möglich ist ein MEMS-Vakuummeter zu entwickeln, das auf dem Prinzip der Leitfähigkeitsmessung an Gasen beruht, entstand während Messungen in einer evakuierbaren Umgebung durchgeführt wurden. Dabei fiel auf, dass die Messergebnisse von Strömen im Picoampere-Bereich stark mit dem Umgebungsdruck schwankten. Damit ergab sich die Frage, ob sich durch die Messung des Stroms direkt auf die Dichte des umgebenden Mediums zurückschließen lässt. Der im Folgenden vorgestellte Entwurf für ein MEMS-Vakuummeter lässt sich mit wenigen einfachen Prozessschritten prozessieren, die alle aus dem Repertoire der Standard-CMOS-Technologie stammen. Der gesamte Prozessablauf setzt sich aus vier Maskenebenen zusammen, die sich alle durch eine einfache UV-Lithografie realisieren lassen.

Das Ziel dieser Studie ist es zu überprüfen, ob die Durchführung von Leitfähigkeitsmessungen mit MEMS erfolgsversprechend sind und das Potential bieten einfachere, kostengünstigere Vakuummeter zu entwickeln. Im Folgenden wird zunächst der grundlegende theoretische Hintergrund zur Leitfähigkeit von Gasen dargestellt. Danach werden das Design und die planartechnologische Herstellung der Sensorchips beschrieben, gefolgt von einer Beschreibung der elektronischen Charakterisierung in einem Vakuummessstand. Schließlich werden die Ergebnisse der elektronischen Charakterisierung vorgestellt, analysiert und diskutiert.

2 Theorie und Methoden

Gemeinhin werden Gase als Isolatoren betrachtet. Die spezifische Leitfähigkeit von Luft liegt bei $\kappa = 1 \cdot 10^{-20} \text{ S}\cdot\text{m}/\text{mm}^2$ [7]. Die Leitfähigkeit von Gasen ist dabei abhängig von der Anzahl der Ladungsträger, also der Teilchendichte in einem Gas bzw. dem Druck. Daher nutzen konventionelle Ionisationsdetektoren zur Messung des Gasdruckes eine zusätzliche Energiequelle zur Ionisation des Gases, wie etwa eine Gasentladungslampe oder eine Röntgenröhre, um einen höheren Anteil an Ladungsträgern im Gas zu erzeugen und die Leitfähigkeit des Gases messbar zu machen [8]. Das hier vorgestellte Konzept beruht hingegen auf der Reduktion des Widerstandes von Gasen im Messvolumen durch Miniaturisierung. Die spezifische Leitfähigkeit

$$\kappa = q \cdot \mu \cdot \rho \quad (1)$$

ist definiert über das Produkt aus der Ladung q , der Beweglichkeit der Ladungsträger μ und der Dichte der Ladungsträger ρ . Dem Ohm'schen Gesetz

$$I = G \cdot U \quad (2)$$

zufolge ist der Strom durch einen Leiter I proportional zum Produkt aus Spannung U und elektrischem Leitwert

$$G = \kappa \cdot \frac{A}{d}, \quad (3)$$

der abhängig von der Materialkonstante κ , der Fläche senkrecht zum Stromfluss A und dem Dicke des Leiters in Stromrichtung d ist. Um den Stromfluss in einem schlecht leitenden Material zu erhöhen und damit leichter messbar zu machen, bietet es sich also an, die Fläche des Messvolumens senkrecht zur Stromrichtung zu vergrößern und den Dicke des Messvolumens zu minimieren.

Allerdings kann bei Messungen der Leitfähigkeit von Gasen nicht vorausgesetzt werden, dass die Kennlinien linear nach Gleichung (2) verlaufen. Daher soll an dieser Stelle der differentiellen Leitwert

$$g := \frac{dI}{dU} \quad (4)$$

definiert werden.

Das Konzept des hier vorgestellten Sensors beruht auf der Annahme, dass die Ladungsträgerdichte ρ in Gleichung (1) bei Gasen abhängig ist von der Teilchendichte n und damit über die Zustandsgleichung des idealen Gases

$$p = n \cdot k_B \cdot T \quad (5)$$

mit der Boltzmannkonstante k_B und der Temperatur T über

$$g = q \cdot \mu \cdot \rho \cdot \frac{A}{d} = f(p) \quad (6)$$

eine Funktion des Druckes p ist.

Im Folgenden werden zunächst das Design und die planartechnische Prozessierung eines MEMS-Sensors, der für die Durchführung der Leitfähigkeitsmessungen entwickelt wurde, beschrieben. Anschließend werden die Messaufbauten und -modi erläutert, die für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen relevant sind.

2.1 Design und Herstellung

Abbildung 1 zeigt das Design für einen Sensorchip zur Leitfähigkeitsmessung von Gasen. Hergestellt wird der Sensor auf handelsüblichem p-dotiertem Siliziumsubstrat, das auch als erste Elektrode dient. Die zweite Elektrode ist ein bienenwabenförmiges Gitter aus Titanitrid. Die hexagonale Struktur resultiert aus der Optimierung der Stabilität des freischwebenden Gitters [9]. Außerdem bietet die bienenwabenförmige Gitterelektrode ein ideales

Verhältnis von Öffnungen, durch die die Gasmoleküle in den Messbereich diffundieren können, zu Messvolumen zwischen den Gitterstegen und dem Substrat. Getrennt werden die beiden Elektroden durch eine 300 nm dicke Siliziumdioxid-Schicht. Das Bienenwabengitter umfasst im endgültigen Layout eine Fläche von 5 mm x 5 mm.

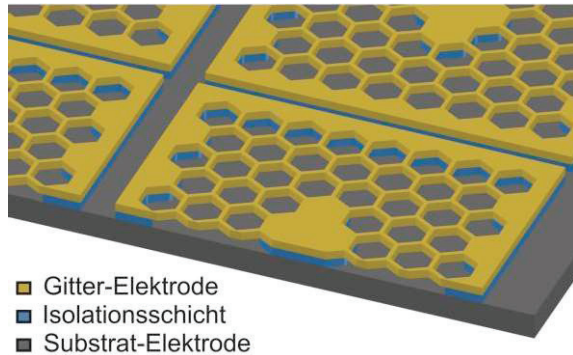


Abb. 1: Design des Sensorchips: Die gitterförmige Elektrode wird durch eine 300 nm dicke Isolationsschicht von der Substrat-Elektrode getrennt.

Die Prozessierung des Sensorchips beginnt mit der Deposition eben dieser Siliziumdioxid-Schicht in einem PECVD-Verfahren bei 350 °C. Anschließend wird mittels reaktivem Kathodenzerstäuben die 300 nm dicke Schicht Titannitrid abgeschieden, die später das freischwebende Gitter bildet (vgl. Abb. 2 a)).

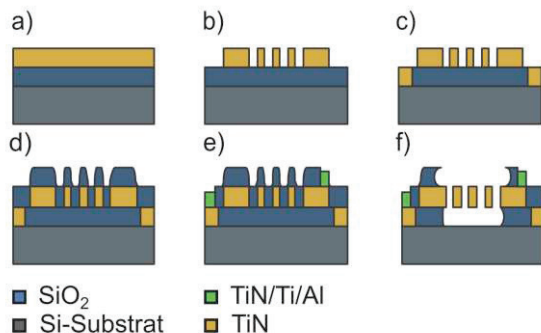


Abb. 2: Prozessablauf der Fertigung des Sensorchips.

Im zweiten Schritt wird eine herkömmliche UV-Lithografie mit Micro Chemicals AZ Mir 701 für die nachfolgende Strukturierung der Titannitrid-Schicht durchgeführt. Die Strukturierung erfolgt durch reaktives Ionenätzen mit den Prozessgasen Methan, Chlorgas und Siliziumtetrachlorid (vgl. Abb. 2 b)). Die zweite Lithografieebene mit Micro Chemicals AZ 5214 dient zur Kontaktierung des Substrats. Die Lackmaske schützt die Gitterbereiche auf dem Chip und nur die Randbereiche werden durch nasschemisches Ätzen mit 5 %-iger gepufferter Flusssäure vom PECVD-Oxid befreit, so dass hier anschlie-

ßend eine 250 nm dicke Schicht Titannitrid abgeschieden werden kann. In den Bereichen der Gitterelektroden wird die Titannitrid-Schicht anschließend in einem Lift-Off-Schritt wieder abgelöst, indem der Lack unter der Metallisierung mit Azeton gelöst wird (vgl. Abb. 2 c)). Die Abscheidung einer zweiten Siliziumdioxid-Schicht soll der Vermeidung von ungewünschten Kurzschlüssen oder Leckströmen zwischen der Substrat- und der Gitterelektrode dienen (vgl. Abb. 2 d)). Um die spätere Kontaktierung der Sensorchips durch Ultraschall-Bonden zu erleichtern werden nun Bond-Pads, bestehend aus einem Schichtenstapel aus Titannitrid (TiN), Titan (Ti) und Aluminium (Al) abgeschieden. Dazu wird zunächst wieder eine Lithografie mit AZ 5214 durchgeführt um die Bereiche der Bondpads auf den Gitterelektroden und dem Titannitrid-Rahmen freizulegen. Anschließend wird die Metallisierung abgeschieden und schließlich erneut im Lift-Off-Verfahren strukturiert (vgl. Abb. 2 e)). In der vierten und letzten Lithografieebene wird der gesamte Chip bis auf die Gitterbereiche abgedeckt. In einem vier minütigen Ätzschritt in Flusssäure wird das Siliziumdioxid über und unter dem Gitter bis zur Substratelektrode hin entfernt. Übrig bleibt ein bienenwabenförmiges, in weiten Bereichen freischwebendes Gitter und einige Stützstrukturen, die zur Stabilisierung dienen (vgl. Abb. 2 f)). Abbildung 3 zeigt die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines solchen freischwebenden Gitters im Querschnitt. Die Stegbreite des Gitters beträgt 800 nm während die Öffnungen einen Durchmesser von 6 µm aufweisen. Unter dem Gitter sind die Stützstrukturen aus Siliziumdioxid zu erkennen, die nach dem isotropen Ätzschritt mit gepufferter Flusssäure die Stabilität des Gitters maximieren.

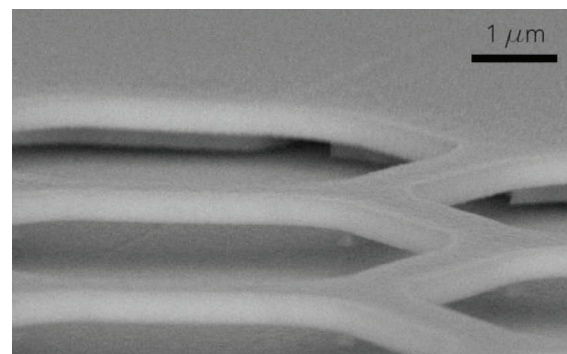


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme: Mikrostrukturiertes, freischwebendes Bienenwabengitter, gefertigt aus Titannitrid, auf Stützstrukturen aus Siliziumdioxid.

2.2 Elektrische Charakterisierung in einem Vakuummessstand

Die elektrische Anbindung der Sensorchips erfolgt durch Ultraschall-Bonden. Dazu wird der Chip, der in seiner endgültigen Form 8 mm x 8 mm umfasst, in eine Platine eingeklebt. Die Bonddrähte werden von den Bond-Pads auf dem Chip hin zu den Kontakt-Pads auf der Platine geführt. In der Vakuum-Kammer wird die Platine schließlich an die Anschlussleitungen gelötet, die an einen Agilent 4156C Semiconductor Parameter angeschlossen sind.

Für die elektrischen Messungen werden das Substrat des Chips und das Gitter über zwei SMU-Anschlüsse kontaktiert. Dabei werden zwei Messmodi verwendet. Bei der zeitabhängigen Messung werden die Spannung am Substrat U_s und am Gitter U_G vorgegeben und der Strom I im zeitlichen Verlauf gemessen, zum Beispiel während der Variation des Druckes in der Vakuumkammer. Diese Art der Messung lässt eine qualitative Aussage über die Änderung der Leitfähigkeit zu. Während der Kennlinien-Messung wird der Strom I unter Variation der Spannung an der Gitterelektrode U_G gemessen. Letztere Messung soll dann nach mehrfacher Durchführung bei unterschiedlichen Drücken zur quantitativen Untersuchung der Leitfähigkeit des Messvolumens genutzt werden.

Für erste Voruntersuchungen werden Gitter auf Platinen verwendet, die sich etwa im Abstand von einem Millimeter in der Messkammer befinden. Dabei kommen dieselben, eben beschriebenen Messmodi zum Einsatz. In Anlehnung an die Bezeichnungen der Elektroden einer Triode, werden die Gitter hier ihrer Anordnung entsprechend als Kathode, Gitter und Anode bezeichnet. Bei Messungen mit dem Sensorchip fällt die Anode weg.

Die Vakuumkammer, in die die Chips eingebaut werden, wurde speziell für die Messung sehr kleiner Ströme konzipiert. Es handelt sich hierbei um ein aus Vakuumstandardkomponenten aufgebautes System, das sich in einem Messschrank befindet, um Störsignale und Vibrationen zu minimieren. An der Kammer befinden sich Einlassventile für Gase und ein Transmitter MPT 100 Druckmessgerät der Firma Pfeiffer Vacuum. Als Vakuumpumpe kommt eine Turbomolekularpumpe TMU 065 von Pfeiffer Vacuum zum Einsatz, die über ein Ventil von der Vakuumkammer abgekoppelt werden kann.

3 Ergebnisse und Analyse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Voruntersuchungen und einer Messung mit einem MEMS-Chip beschrieben und analysiert. Im Anschluss wird die Plausibilität der Ergebnisse diskutiert.

3.1 Voruntersuchungen

Die zeitabhängigen Messungen an den Platinen-Elektroden zeigen, dass der Strom an den Elektroden ansteigt, wenn der Druck in der Vakuumkammer erhöht wird. Ein Beispiel für eine solche zeitabhängige Messung ist in Abbildung 4 dargestellt. Hier lag an den Elektroden eine Spannungsdifferenz von jeweils 10 Volt an. Während der Messung wurde der Druck zunächst durch die Öffnung des Ventils für die Gaszufuhr von $p_0 = 2 \cdot 10^{-1}$ mbar auf Atmosphärendruck erhöht ($t = 200$ s). Bei $t = 350$ s wurde der Druck durch Öffnung des Ventils zum Pumpenstand wieder auf $p_0 = 2 \cdot 10^{-1}$ mbar abgesenkt. Die Änderung des Stroms beträgt dabei bis zu 5 pA.

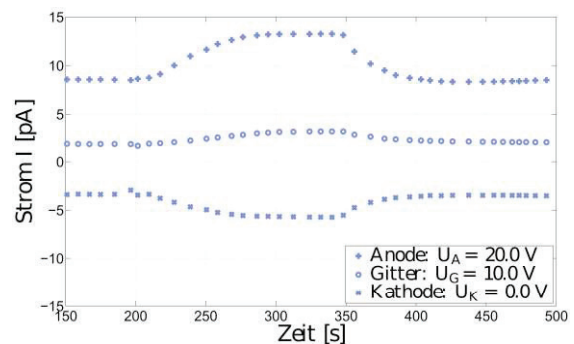


Abb. 4: Zeitabhängige Strom-Messung in einer Niederdruck-Umgebung: Zu Beginn herrscht ein Druck von $p_0 = 2 \cdot 10^{-1}$ mbar. Nach 200 s wird die Kammer belüftet bis nach 300 s Atmosphärendruck herrscht. Nach weiteren 50 s wird die Kammer wieder evakuiert.

Abbildung 5 zeigt einige Kennlinien, bei denen der Strom in Abhängigkeit von der Spannungsdifferenz gemessen wurde. Insgesamt wurden bei sechs unterschiedlichen Drücken jeweils drei Kennlinien aufgenommen. Der Übersichtlichkeit halber werden hier nur drei Kennlinien dargestellt, die bei einem Druck von $2 \cdot 10^{-2}$ mbar, 290 mbar und belüfteter Kammer, also etwa 1000 mbar, aufgenommen wurden.

Die Messungen zeigen deutlich erkennbar einen linearen Zusammenhang zwischen Gitterstrom und Gitterspannung. Der Gitterstrom liegt in dieser Messanordnung in einer Größenordnung von etwa 10 pA, wenn am Gitter 10 Volt anliegen. Daraus resultiert eine erste Abschätzung des Leitwerts G von einem Pico-siemens. Außerdem zeigt auch diese Messung eine Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Druck im Messvolumen.

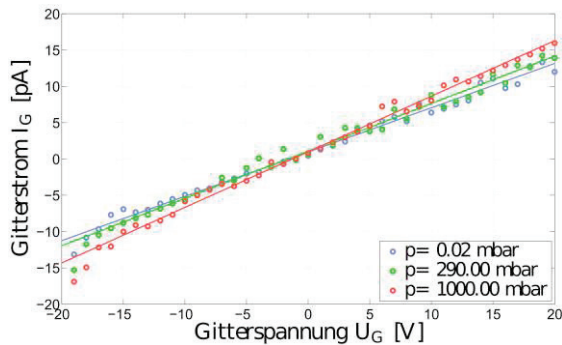


Abb. 5: Kennlinien-Messung in einer Niederdruck-Umgebung: Gitterstrom in Abhängigkeit von der Gitterspannung bei $U_K = 0$ V und $U_A = 0$ V.

Zur weiteren Analyse werden an die aufgenommenen Kennlinien mittels Linearer Regression Ausgleichsgeraden der Form

$$I = m \cdot U + b \quad (7)$$

angepasst, die in Abbildung 5 als durchgezogene Linien dargestellt sind. Dabei sind U die angelegte Spannungsdifferenz, I der Strom, m die Steigung und b der Achsenabschnitt. Der Vergleich mit Gleichung (4) zeigt, dass die Steigung m dem differentiellen Leitwert g entspricht.

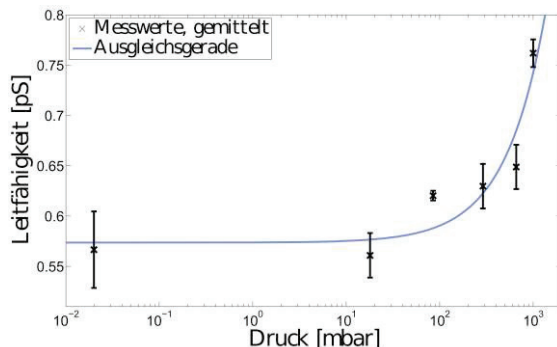


Abb. 6: Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Druck: Dargestellt ist jeweils der Mittelwert der aus den Kennlinien berechneten Leitwerte g .

Aus den durch diese Ausgleichsrechnung bestimmten Werten für den Leitwert g wurde für jeden Druck ein Mittelwert gebildet, der in Abbildung (6) gegen den Druck aufgetragen ist. Dargestellt ist der über jeweils drei beim selben Druck gemessene Kennlinien gemittelte Leitwert.

Abbildung 6 zeigt deutlich, dass die Leitfähigkeit mit dem Druck steigt. Die Messwerte weichen zum Teil von der berechneten Ausgleichsgeraden ab, aber bis auf eine Ausnahme liegen die berechneten Werte innerhalb der Fehlertoleranzen.

3.2 Charakterisierung eines Sensorchips

Im Folgenden werden die Messungen mit einem der ersten Exemplare, die nach dem in Abschnitt 2.1 beschriebenen Prozessablauf gefertigt wurden, vorgelegt und analysiert.

Abbildung 7 zeigt eine zeitabhängige Strom-Messung bei einer Gitterspannung von einem Volt. Dabei beginnt die Messung bei Atmosphärendruck. Während der Druck in der Kammer ab $t = 50$ s abnimmt, steigen sowohl Gitterstrom als auch der vom Vorzeichen entgegengesetzte Substratstrom vom Betrag her um mehr als $1,5 \mu\text{A}$. Nach 700 s liegt der Druck in der Kammer bei $5 \cdot 10^{-4}$ mbar, bevor die Kammer wieder belüftet wird und der Strom wieder auf den Ausgangswert zurückfällt. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Ergebnissen der Voruntersuchungen, nimmt der Strom im Sensorchip also mit steigendem Druck ab statt zu.

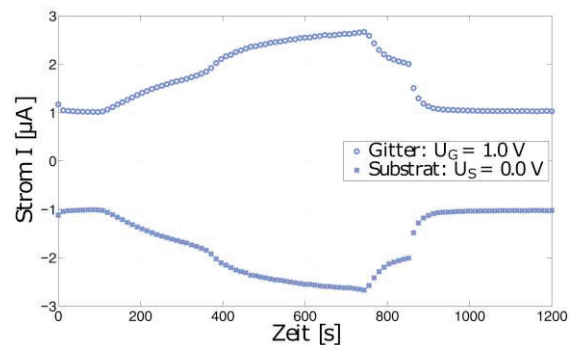


Abb. 7: Zeitabhängige Strom-Messung mit einem Sensorchip während des Belüftens und Evakuierens der Vakuummkammer:

$$p(t = 0 \text{ s}) = 1000 \text{ mbar},$$

$$p(t = 700 \text{ s}) = 5 \cdot 10^{-4} \text{ mbar},$$

$$p(t = 1200 \text{ s}) = 1000 \text{ mbar}.$$

Auch Kennlinien-Messungen wurden mit dem Sensorchip bei verschiedenen Drücken durchgeführt. Dabei wurde jede Kennlinie zwei bis dreimal gemessen. Eine Auswahl dieser Messungen ist in Abbildung 8 gezeigt. Es bestätigt sich die Beobachtung, dass der Gitterstrom mit steigendem Druck sinkt. Die Form der Kennlinien weicht dabei deutlich von dem ohmschen Verhalten, das in Abbildung 5 zu sehen ist, ab. Stattdessen bestehen die Kennlinien aus einem Anlaufstrombereich bei sehr kleinen Spannungen, in dem der Strom stark und nahezu linear mit der Spannung steigt und einem Sättigungsbereich, in dem der Strom vergleichsweise wenig ansteigt.

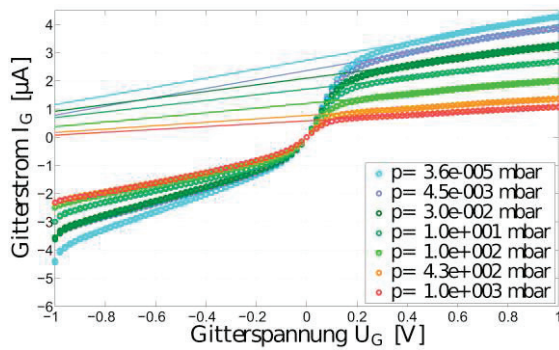


Abb. 8: Kennlinien-Messungen mit einem Sensorchip: Messwerte und Ausgleichsgeraden bei verschiedenen Drücken.

Mittels Linearer Ausgleichsrechnung nach Gleichung (7) kann aus diesen Kennlinien erneut der differentielle Leitwert bei verschiedenen Drücken bestimmt werden. Die so ermittelten Werte sind in Abbildung 9 gegen den Druck aufgetragen.

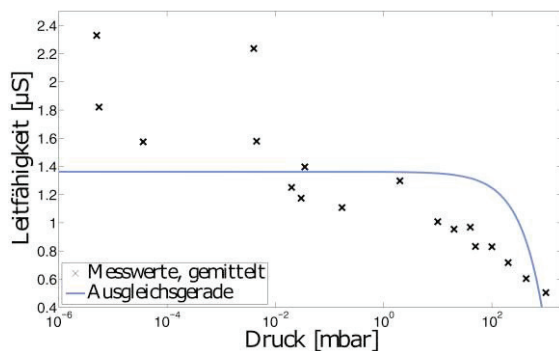


Abb. 9: Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Druck: Dargestellt ist jeweils der aus den Kennlinien des Sensorchips berechnete Leitwert g .

Im Ergebnis ändert sich die Leitfähigkeit in dem hier untersuchten Druckbereich um etwa zwei Mikrosiemens. Außerdem ist deutlich ersichtlich, dass zum einen die Leitfähigkeit mit steigendem Druck fällt und dass der Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Druck nicht linear ist.

4 Diskussion

Zunächst kann festgestellt werden, dass sowohl die Voruntersuchungen an Gittern im Abstand von etwa einem Millimeter als auch die Messungen mit einem Sensorchip eine deutliche Abhängigkeit des Stromes durch ein Gasvolumen vom Druck zeigen. Während sich die Leitfähigkeit bei den Voruntersuchungen insbesondere im Bereich zwischen 10 mbar und 1000 mbar verändert, zeigt die Messung der Leitfähigkeit mit dem Sensorchip eine steigen-

de Tendenz mit sinkendem Druck bis hin zu Drücken der Größenordnung $1 \cdot 10^{-5}$ mbar.

Darüber hinaus liegen die mit dem Test-Chip gemessenen Leitfähigkeiten zwischen $0,4 \mu\text{S}$ und $2,4 \mu\text{S}$ und damit sechs Größenordnungen höher als bei den Voruntersuchungen. Dies und die Beobachtung, dass die Leitfähigkeiten eher exponentiell mit dem Druck zu sinken scheinen anstatt linear mit steigendem Druck und damit steigender Teilchenzahl zu steigen, ist zunächst erstaunlich und widerspricht den Erwartungen.

Eine mögliche Erklärung bietet die Überlegung, dass die mittlere freie Weglänge der Gasteilchen druckabhängig ist. Wenn die mittlere freie Weglänge der Teilchen größer wird als der Abstand des Gitters vom Substrat, könnte das zu einer Änderung des Leitungs-Mechanismus führen. Obwohl der Effekt eines steigenden Stroms mit sinkendem Druck bei unterschiedlichen Sensorchips beobachtet werden konnte, lässt sich an dieser Stelle aber auch nicht ausschließen, dass dieser Effekt auf Unregelmäßigkeiten in der Prozessierung zurückzuführen ist. Die Form der in Abbildung 8 gezeigten Kennlinien wiederum ist durchaus plausibel und ähnelt der Strom-Spannungs-Kennlinie einer unelastischen Entladung [8].

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass diese Studie gezeigt hat, dass sich der Leitwert eines Gases mit dem Druck ändert. Daher erscheint die Entwicklung eines MEMS-Vakuummessgeräts grundsätzlich möglich. Insbesondere die Erhöhung der Leitfähigkeit um sechs Größenordnungen übertrifft bei Weitem die Erwartungen.

Als Nächstes sollte untersucht werden, in wie weit die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse mit mehreren Chips, in Hinblick auf Varianzen in der Prozessstabilität, hergestellt werden kann. Zur abschließenden Bewertung der Möglichkeiten, die der hier vorgestellte Vakuummeter-Chip eröffnet, sind eine große Anzahl an neuen Messungen von Nöten. Dabei stellt sich auch die Frage, ob die Messroutinen weiter optimiert werden können. Außerdem sollte ein Modell zum Verständnis der Leitungsmechanismen im Chip erarbeitet werden, um die Plausibilität der Messergebnisse zu überprüfen. Auch die Abhängigkeit der Messungen von Temperatur und Feuchtigkeit sollte abgeklärt werden.

In Zukunft könnte die Implementierung einer Verstärkerschaltung auf dem Chip den Messaufwand weiter verringern. Schließlich kann auch überlegt werden, ob eine drahtlose Übertragung der Messdaten weitere Vorteile mit sich bringen würde.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei Karola Kolander, Marko Kremer, Ulrike Lippe und Achim Wiggershaus für die technische und organisatorische Unterstützung bedanken. Darüber hinaus möchten oben genannte sich beim BMBF für die finanzielle Unterstützung dieser Studie bedanken.

Quellen

- [1] A. Go´recka-Drzazga, Vacuum 83 (2009) 1419-1426, doi:10.1016/j.vacuum.2009.05.003
- [2] T. Dankovic et al., Procedia Engineering 47 (2012) 1243 – 1246, doi: 10.1016/j.proeng.2012.09.378
- [3] X. Wang et al., Sensors and Actuators A 161 (2010) 108–113, doi:10.1016/j.sna.2010.04.034
- [4] D. V. Randjelovic et al., Vacuum 101 (2014) 118-124, doi:10.1016/j.vacuum.2013.07.044
- [5] X. Sun et al., Sensors and Actuators A 201 (2013) 428– 433, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2013.07.020>
- [6] D. Tenholte et al., Sensors and Actuators A 142 (2008) 166–172, doi:10.1016/j.sna.2007.05.031
- [7] R. Seeliger: Einführung in die Physik der Gasentladung. 2. Auflage, Verlag von Johann Ambrosius Barth, 1934, Leipzig.
- [8] K. Wiesemann: Einführung in die Gaselektronik. B. G. Teubner Stuttgart, 1976
- [9] K.T. Kallis et al., Microelectronic Engineering 121 (2014) 118–121, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2014.04.036>