

MEMS-Mikrofone in der Metrologie

Tobias Alexander Michaelis¹, Christoph Kling²

¹ *Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, Deutschland, Email: tobias.michaelis@tu-bs.de*

² *Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, Deutschland, Email: Christoph.kling@ptb.de*

Einleitung

Mikrofone auf Basis mikroelektromechanischer Systeme (MEMS) haben sich im Consumer-Bereich durchgesetzt, z.B. in Smartphones. Aber sind sie auch den gehobenen Anforderungen der Metrologie gewachsen?

Um das zu überprüfen, wurden im Rahmen einer Studienarbeit an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), Anforderungen, angelehnt an die DIN EN 61094-4: „Anforderungen an Gebrauchs-Normalmikrofone [2], definiert und überprüft. Es wurde ein Adapter entwickelt, der ein MEMS-Mikrofon mit einem Vorverstärker für Messmikrofone verbindet. Somit konnten die MEMS-Mikrofone unter nahezu gleichen Bedingungen wie ein Messmikrofon geprüft werden. Des Weiteren wurde das Packaging eines MEMS-Mikrofon verändert, um die charakteristische Resonanzfrequenz im Bereich von 15-20 kHz zu beseitigen. In diesem Manuskript werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit und die Verbesserungsmöglichkeiten des Packings dargestellt. Die vollständige Dokumentation findet sich unter [1].

Grundlagen zu MEMS-Mikrofonen

MEMS-Mikrofone sind aufgebaut wie Kondensatormikrofone, aber in Siliziumtechnologie auf einer Leiterplatte gefertigt. Hierbei erreicht man Abmessungen des Mikrofon von wenigen Millimetern. Jedes MEMS-Mikrofon hat ein eingebauten ASIC (Application Specific Integrated Circuit), das die Polarisationsspannung für die Membran stellt und eine Verstärkung des Signals liefert. Dieses Signal wird nun entweder direkt analog ausgegeben oder noch im Mikrofon zu einem digitalen Signal gewandelt. Des Weiteren ist der Ort der Schalleintrittsöffnung entweder oben (Top-Port) oder unten neben den Lötkontakten (Bottom-Port). Konstruktionsbedingt hat die Bottom-Port-Bauweise bessere Eigenschaften. Für die Anwendung in der Metrologie ist die analoge Version besser geeignet, da man bei der digitalen keinen Einfluss auf die Art der Digitalisierung nehmen kann. Des Weiteren ist die Top-Port-Bauweise leichter anwendbar, da die schallempfindliche Fläche vorne ist und die Kontakte hinten, wie bei einem Messmikrofon.

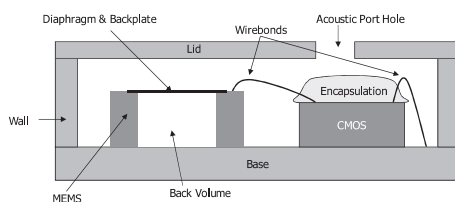


Abbildung 1: Skizze eines Top-Port-MEMS-Mikrofons, entnommen aus [5]

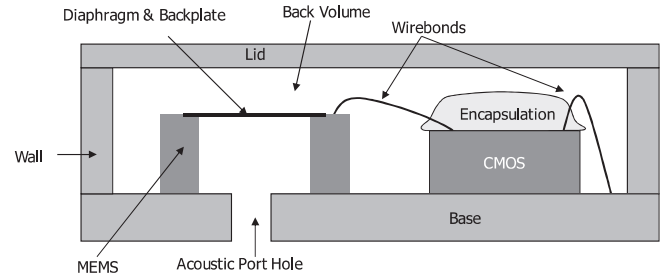


Abbildung 2: Skizze eines Bottom-Port-MEMS-Mikrofons, entnommen aus [5]

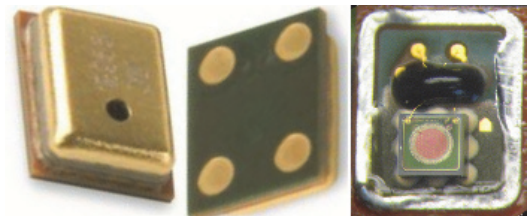


Abbildung 3: Ein MEMS-Mikrofon in Top-Port-Bauweise. Links mit Sicht auf den Metalldeckel, das sogenannte Packaging. Mittig die Unterseite mit den Kontakten. Beides entnommen aus [4]. Rechts das MEMS-Mikrofon ohne Packaging. Oben das ASIC mit den Bond-Drähten, unten das MEMS-Mikrofon mit Membran

Anforderungen

Das MEMS-Mikrofon wird hier nach DIN EN 61094-4, Typ WS3F geprüft. Dies entspricht einem Viertelzoll-Mikrofon für Freifeldmessungen. Die Anforderungen müssen aber teilweise an MEMS-Mikrofone angepasst werden, z.B. bezüglich der Bauform, aus der sich bei Messmikrofonen auch die EMV-Sicherheit ergibt (elektromagnetische Verträglichkeit). Da MEMS-Mikrofone grundlegend anders aufgebaut sind, ist eine zusätzliche EMV-Prüfung hinzugefügt. Diese richtet sich nach der Baumusterprüfung für Schallpegelmesser, siehe [3]. Hier wird auf eine genaue Erläuterung der Anforderungen verzichtet. Diese werden im Abschnitt Prüfungen jeweils mit dargestellt. Sie sind in [1] vollständig dokumentiert.

Der Adapter

Der SP.U.M.A. (Speise und Montage-Adapter) verbindet das MEMS-Mikrofon mit einem Vorverstärker für Messmikrofone. Das MEMS-Mikrofon benötigt hierbei eine Spannungsversorgung von 1 V - 3,5 V und besitzt einen oder mehrere Massepins und den Signalpin. Der Signalpin muss mit dem Stift des Vorverstärkers in der Mitte verbunden werden, die Masse mit dem Gewinde des

Vorverstärkers. Des Weiteren soll das MEMS-Mikrofon austauschbar sein.

Durch diese Anforderungen ergibt sich ein Adapter, der in Abbildung 5 - Abbildung 7 dargestellt ist. An die Kontakte des MEMS-Mikrofons werden vorher vier Kabel angelötet. Die beiden kurzen für die Masseverbindung, die langen für das Signal und die Spannungsversorgung, siehe Abbildung 4. Dieses MEMS-Mikrofon wird in den Adapter von oben eingeführt und mit den SMD-Klemmen verbunden, siehe Abbildung 5. Danach wird die Messinghülse darübergeschoben, siehe Abbildung 6. Der Kontakt zum Vorverstärker erfolgt über eine Marderschraube, die mit dem Signalpin des Vorverstärkers verbunden ist, und der Messinghülse, die den Massekontakt über die Verschraubung herstellt, siehe Abbildung 7



Abbildung 4: Ein MEMS-Mikrofon mit angelöteter Verkabelung für den Adapter



Abbildung 5: Der Adapter mit Sicht auf die Massekontakte. Die metallische Zunge erzeugt den Kontakt mit dem Minuspol der Knopfzellen und der Masse des MEMS zu einer Messinghülse, die in Abbildung 6 dargestellt ist. Die Zunge wird durch die Feder, die in der Knopfzellenkammer sitzt, leicht nach außen gedrückt.

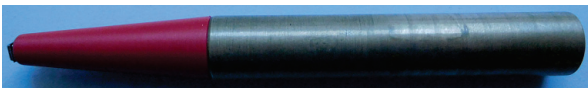


Abbildung 6: Der Adapter mit Messinghülse. Diese Hülse hat ein Gewinde wie ein Messmikrofon zur Verbindung mit einem Vorverstärker. Da dies gleichzeitig der Massekontakt ist, ist diese Hülse mit dem MEMS-Mikrofon intern über eine Metallzunge verbunden.

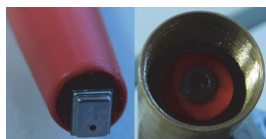


Abbildung 7: Links: Die Spitze des Adapters mit eingebautem MEMS-Mikrofon. Rechts: Die Verbindung des Adapters zum Vorverstärker. In der Mitte die Marderschraube für den Signalpin und außen das Gewinde für den Massekontakt.

Prüfungen

Für die Prüfungen wurde versucht, eine möglichst breite Auswahl an verschiedenen MEMS-Typen zu verwenden, die möglichst das komplette Spektrum an verfügbaren Typen repräsentieren. Aus Kompatibilitätsgründen mit den Messplätzen der PTB für Mikrofonprüfungen wurden nur analoge MEMS-Mikrofone ausgewählt. Besonders

interessant sind hierbei das eine MEMS-Mikrofon, das als Tieffrequenz-Mikrofon beworben wird, und das andere mit einstellbarer Verstärkung. Insgesamt wurden acht verschiedene MEMS-Mikrofone geprüft.

Prüfungen: Frequenzgang

Der Verlauf der Sensitivität der verschiedenen MEMS-Mikrofone ist in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt. Es handelt sich hierbei um die Messergebnisse der Hörschallmessung (25 Hz - 40 kHz) und der Ultraschallmessung (10 kHz - 100 kHz). Gut erkennbar sind die Resonanzspitzen, bedingt durch das Packaging, welches wie ein Helmholtz-Resonator wirkt. Typische Werte der Resonanzfrequenz sind 15 kHz - 17 kHz für Top-Port-MEMS-Mikrofone und 20 kHz - 30 kHz für Bottom-Port. Die meisten MEMS-Mikrofone sind so ausgelegt, dass sie ihre untere Grenzfrequenz bei ca. 100 Hz haben. Dies ist für die Aufnahme von Sprache sinnvoll, für die Messtechnik hingegen nicht. Es gibt aber auch ein MEMS-Mikrofon, dessen untere Grenzfrequenz bei ca. 5 Hz liegt. Die Sensitivitäten bei 1 kHz betragen bei allen betrachteten MEMS-Mikrofonen mindestens -45 dB (re 1V/Pa) und liegen damit oberhalb der Sensitivität eines üblichen Viertelzoll-Messmikrofons. Eins liegt sogar im Bereich eines normalen Halb Zoll-Messmikrofons mit ca. -20 dB (re 1V/Pa). Ab 10 kHz steigt dann die Sensitivität, aufgrund des Resonators, stark an. Es ergibt sich somit ein nutzbarer Frequenzbereich von 100 Hz - 10 kHz. Nach Norm [2] wird die Sensitivität auf 1 kHz normiert und die Toleranzgrenzen berechnet, siehe Abbildung 10. Dort erkennt man, dass die MEMS-Mikrofone die Toleranzgrenzen weit überschreiten.

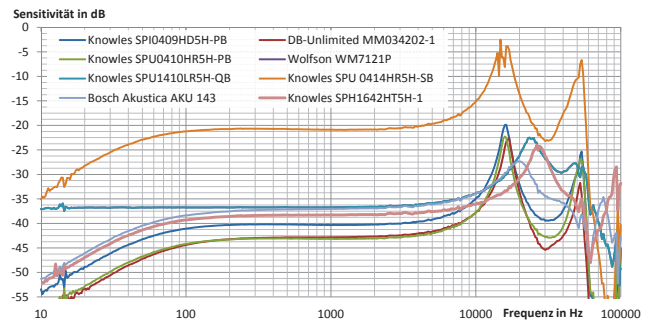


Abbildung 8: Die Sensitivität der betrachteten MEMS-Mikrofone im Hörschallbereich

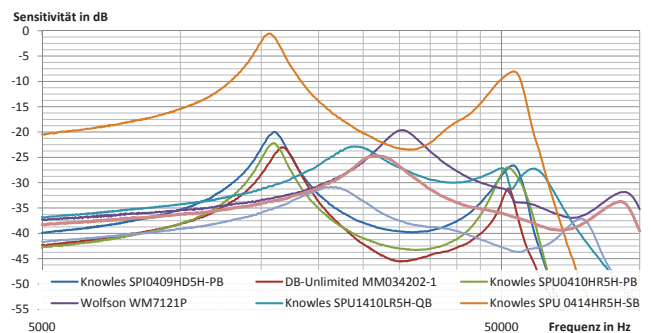


Abbildung 9: Die Sensitivität der betrachteten MEMS-Mikrofone im Ultraschallbereich

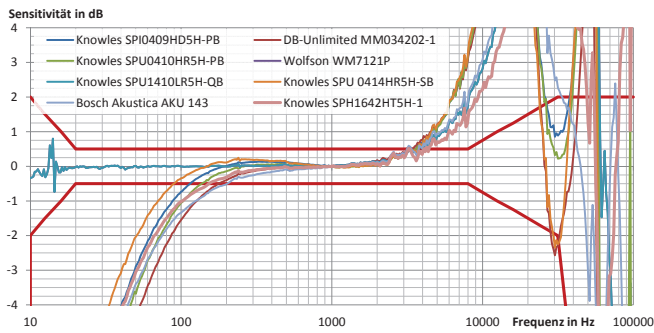


Abbildung 10: Die Sensitivität der betrachteten MEMS-Mikrofone normiert auf den Wert bei 1 kHz. Toleranzgrenzen in Rot. Sie erfüllen eindeutig nicht die Anforderungen eines WS3F-Mikrofon

Prüfungen: Decklexperimente

Um den Frequenzgang der MEMS-Mikrofone zu verbessern, ist das Packaging verändert worden. Im zeitlich sehr begrenzten Rahmen dieser Arbeit sind nur improvisierte Experimente möglich gewesen. Zwei Varianten haben sich hierbei als sinnvoll erwiesen: zum einen ein Top Port MEMS-Mikrofon ohne Packaging und ein Packaging mit zusätzlichen Löchern, siehe Abbildung 11. Ohne Packaging hat das MEMS-Mikrofon keine Resonanzen mehr und ist theoretisch brauchbar bis 100 kHz. Es hat aber keinen mechanischen Schutz mehr und ist stark anfällig für elektromagnetische Störungen. Daher wurde das Packaging mit zusätzlichen Löchern angefertigt. Hierdurch kann die Resonanzfrequenz beseitigt werden, wie beim entfernten Packaging, aber man hat trotzdem den mechanischen Schutz. EMV-Messungen waren geplant, aber aufgrund eines Defektes der benötigten Geräte musste diese Prüfung leider ausfallen. Die Frequenzgänge befinden sich in Abbildung 12.

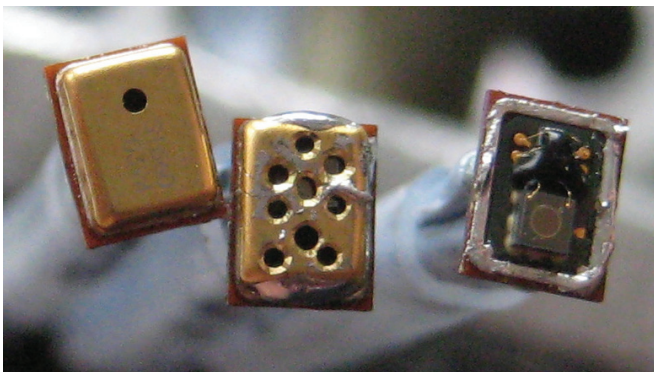


Abbildung 11: Ein MEMS Mikrofon mit verschiedenen Packagingvarianten. Links: Standard, Mitte: zusätzliche Löcher, Rechts: ohne Packaging

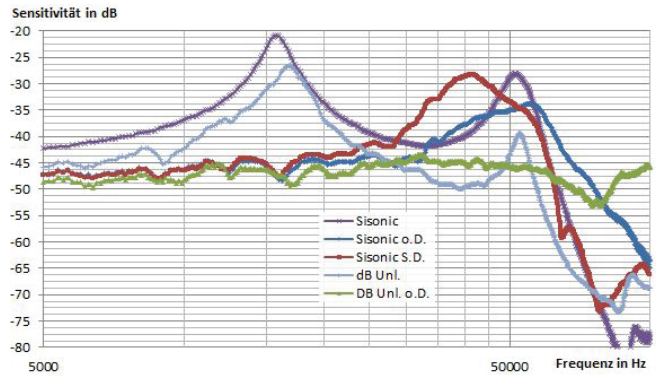


Abbildung 12: Die Sensitivitätskurve des Sisonic mit verschiedenen Packagings. o.D.: ohne Deckel, z.L.: zusätzliche Löcher. Die Helmholtz-Resonanz des Packagings ist in beiden Fällen beseitigt. Der Anstieg bei ca. 50 kHz könnte durch einen Druckstau vor der Membran zustande kommen.

Prüfungen: Richtcharakteristik

Die Richtcharakteristik von MEMS-Mikrofonen wurde mithilfe eines Scannermessplatzes in der PTB gemessen, der kugelförmige Richtcharakteristiken erstellt. Dort wird im Abstand von einem Meter ein Lautsprecher um das Mikrofon gefahren und an jeder Stelle in Sinustönen der gewünschte Frequenzbereich gemessen. In Abbildung 13 ist die Darstellung der Messergebnisse anschaulich erläutert.

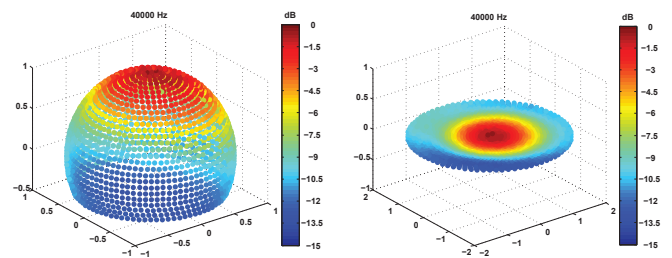


Abbildung 13: Links: Richtcharakteristik des MEMS-Mikrofon dB Unlimited, Standardpackaging, 40 kHz. Unverzerrte Darstellung.

Rechts: Richtcharakteristik des dB Unlimited, Standardpackaging. Gleiche Messung wie im linken Bild, aber verzerrt auf 2D, um in der Draufsicht die vollständige Richtcharakteristik sehen zu können

Aufgrund der schier Menge an Daten, wird hier nur beispielhaft die Richtcharakteristik bei 30 kHz eines MEMS-Mikrofon mit verschiedenen Packagings, siehe Abbildung 11, im Vergleich zu einem Viertelzoll-Messmikrofon dargestellt. In Abbildung 15 und Abbildung 14 sieht man den direkten Vergleich eines Viertelzoll-Messmikrofon mit einem MEMS-Mikrofon mit verschiedenen Packagings. Das MEMS-Mikrofon besitzt zwar einen deutlich schwächeren Pegelabfall als ein Viertelzoll-Messmikrofon, ist aber dafür nicht symmetrisch. Bei ca. 40 kHz ist die Richtcharakteristik ähnlich dem eines Viertelzoll-Messmikrofon. An der Richtcharakteristik des MEMS-Mikrofon ohne Packaging erkennt man aber, dass die Richtcharakteristik hauptsächlich durch das Gehäuse bedingt ist. Hier bietet sich also erhebliches Verbesserungs-

potential.

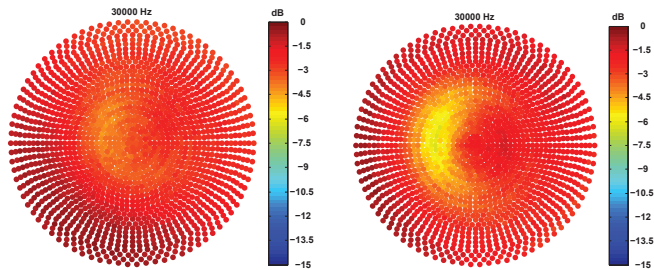


Abbildung 14: Links: Richtcharakteristik des dB Unlimited, Standardpackaging.

Rechts: Richtcharakteristik des dB Unlimited, Packaging mit zusätzlichen Löchern

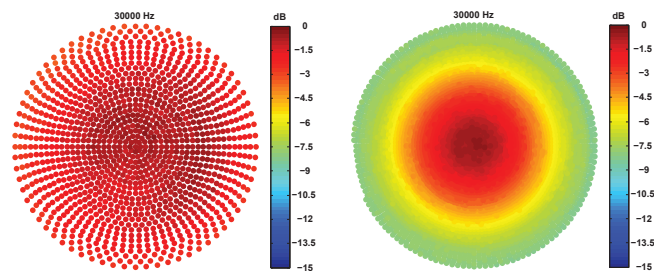


Abbildung 15: Links: Richtcharakteristik des dB Unlimited, ohne Packaging.

Rechts: Richtcharakteristik des Viertelzoll Messmikrofons G.R.A.S. 40BF, ohne Schutzgitter

MEMS-Mikrofone: Vor- und Nachteile

Vorteile:

- MEMS-Mikrofone sind unschlagbar günstig (ca. 1 Euro pro Stück)
- Kleinste Abmessungen bei akzeptabler Sensitivität
- Richtcharakteristik bis 30 kHz vernachlässigbar klein
- Großes Verbesserungspotential

Nachteile:

- MEMS-Mikrofone können die Anforderungen nach DIN EN 61094-4 nicht erfüllen
- Besonders kritisch: keine Kompatibilität mit Schallpegelkalibratoren
- Starke Verzerrung des Frequenzgangs bei ca. 15 kHz durch das Gehäuse
- Maximal zulässiger Schalldruck ca. 120 dB (re 20 μ Pa)

Realisierbares Mess-MEMS-Mikrofon:

- Glatter Frequenzgang von 10 Hz - 100 kHz
- Sensitivität eines Halbzoll-Mikrofons
- Kantenlängen von 1,5 mm
- Verwendbar ohne Vorverstärker und Speisegerät
- Richtcharakteristik bis mindestens 30 kHz vernachlässigbar klein

Fazit

Die MEMS-Mikrofone können die Anforderungen nach Norm DIN EN 61094-4 eindeutig nicht erfüllen, aber sie haben Potenzial. Das Tieffrequenz-Mikrofon, gekoppelt mit einem Packaging ohne Helmholtz-Resonator, könnte einen glatten Frequenzgang von 10 Hz - 100 kHz ermöglichen. Speziell im Packaging ist großes Verbesserungspotential enthalten. Des Weiteren kann man über den ASIC des MEMS-Mikrofons die Parameter günstiger einstellen. Die Verstärkung kann ruhig hoch eingestellt werden, wie die Messung am Knowles SPU21410LR5H-SB gezeigt hat. Außerdem kann man den maximalen Ausgangsstrom höher einstellen um keinen Vorverstärker zu benötigen. Natürlich bringt dies einen höheren Stromverbrauch mit sich, dies ist aber bei den meisten metrologischen Anwendungen uninteressant. Der sehr günstige Preis und die geringe Serienstreuung bieten interessante Möglichkeiten für Arrays. Man könnte ohne großen Fehler die Kalibrierung eines MEMS-Mikrofons auf viele andere übertragen. Aufgrund des begrenzten zeitlichen Rahmens fehlen hier leider die wichtigen Untersuchungen zur EMV und zur Langzeitstabilität. Auch die Untersuchung zur Serienstreuung wurde hier nur in eingeschränktem Maße durchgeführt. Wenn diese drei Punkte auch erfüllt werden, ist eine Kalibrierfähigkeit, nach eigener Norm angelehnt an die DIN EN 61094-4, durchaus denkbar.

Literatur

- [1] Tobias Alexander Michaelis: MEMS-Mikrofone in der Metrologie. 11.2016
- [2] DIN EN 61094 Teil 4: Anforderungen an Gebrauchsnormalmikrofone, 1995
- [3] DIN EN 61672 Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen, Juli 2014
- [4] Knowles: Datenblatt des SPU0410HR5H-PB, Revision H, 27.03.2013
- [5] Knowles: Sisonic Design Guide, Revision 3.0, 22.08.2011