

# Untersuchungen zur Richtcharakteristik von Messmikrofonen

Marvin Rust<sup>1</sup>, Christoph Kling<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, E-Mail: marvin.rust@tu-braunschweig.de

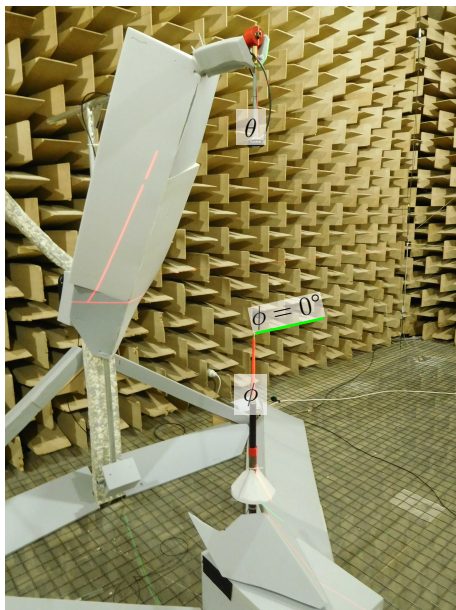
<sup>2</sup> Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, E-Mail: christoph.kling@ptb.de

## Einleitung

Bei Lärmmessungen wird in der Regel davon ausgegangen, dass die Richtcharakteristik der verwendeten Mikrofone vernachlässigt werden kann. Zu hohen Frequenzen ist diese Annahme nicht mehr zulässig, der Einfluss zahlenmäßig jedoch selten belegt. Vor dem Hintergrund von Lärmmessungen im Ultraschallbereich wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit Richtcharakteristiken verschiedener Mikrofone experimentell ermittelt [1].

In einer Freifeldumgebung wurden die Prüfobjekte in einem Galgenscanner platziert und mit einem geeigneten Lautsprecher über einer Halbkugel beschallt. Die Untersuchungen umfassen Messmikrofone verschiedener Größen, den Einfluss von Schutzgittern verschiedener Hersteller und verschiedene MEMS-Mikrofone. Vorge stellt werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit.

## Messplatz



**Abbildung 1:** Galgenscanner-Messplatz im reflexionsarmen Raum der PTB. Der Galgen realisiert den Polarwinkel  $\theta$ , der Azimutwinkel  $\phi$  wird über eine drehbare Stange abgebildet.

Zur Messung der Richtcharakteristik von Mikrofonen bis 70 kHz wurde ein Zweiachsen-Scanner in einem reflexionsarmen Raum aufgebaut (siehe Abbildung 1). In diesem Scanner sind der Polarwinkel  $\theta$  und der Azimutwinkel  $\phi$  der üblichen Kugelkoordinaten direkt in Hardware realisiert. Über die zwei beweglichen Achsen kann automatisch jede Einfallsrichtung einer Schallquelle auf den Prüfling eingestellt und der Frequenzgang des Prüflings

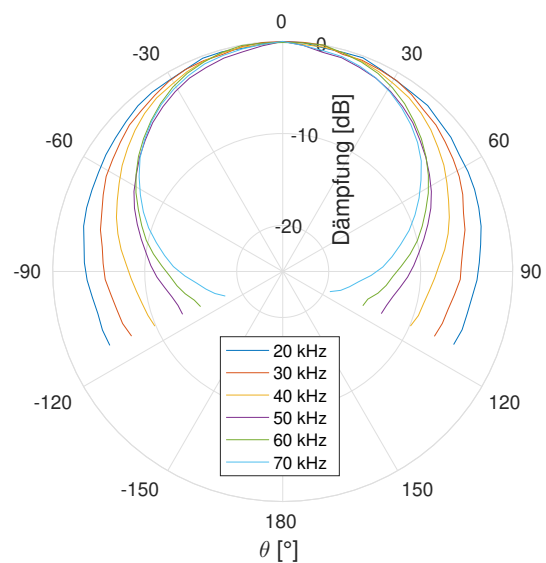
für diese Richtung ermittelt werden. Aus den Differenzen der Frequenzgänge zu einer Referenzrichtung wird die Richtcharakteristik über die obere Halbkugel einer Kugeloberfläche berechnet. Polarwinkel über  $120^\circ$  können im Messplatz nicht vermessen werden, da der Fahrweg des Galgens durch den Boden begrenzt ist.

Als Schallquelle am Galgen des Scanners kommt ein Diamant-Hochtöner der Firma Bowers & Wilkins zum Einsatz, dessen mechanische Resonanzfrequenz mit 70 kHz sehr hoch liegt. Unterhalb der Resonanzfrequenz ist die Haupt-Abstrahlkeule hinreichend breit, sodass das Schallfeld am Ort des Prüflings keinen großen Schwankungen unterliegt.

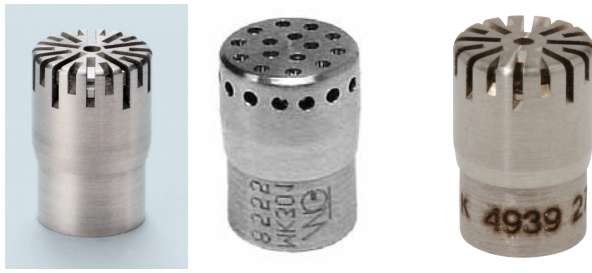
Aus Wiederholungsmessungen hat sich eine Wiederholbarkeit von  $\pm 1$  dB ergeben, innerhalb derer die Messungen aussagekräftig sind. Darüber hinaus wurde kein Unsicherheitsbudget erstellt.

Messergebnisse von rotationssymmetrischen Mikrofonen werden als Polarplot über den Polarwinkel  $\theta$  dargestellt. Die Richtcharakteristik ist in diesem Fall unabhängig vom Azimutwinkel  $\phi$ , sodass dieser nicht berücksichtigt werden muss.

Bei asymmetrischen Charakteristiken wird die Richtcharakteristik bei einer Frequenz direkt über die Kugeloberfläche aufgetragen. Der Pegel relativ zum Maximum wird dabei über die Farbe der Messpunkte dargestellt.



**Abbildung 2:** Richtcharakteristik des Viertelzoll-Messmikrofons Microtech Gefell MK301 ohne Schutzgitter.



**Abbildung 3:** Die verwendeten Viertelzoll-Mikrofonkapseln G.R.A.S. 40BF, Microtech Gefell MK301 und Brüel & Kjær 4939. Bilder entnommen aus [4], [5] und [6].

## Messergebnisse

### Messmikrofone

Die Bauform für Gebrauchs-Normalmikrofone ist in der DIN EN 61094-4 festgeschrieben [2]. Daher ist zu erwarten, dass die Richtcharakteristiken von Messmikrofonen derselben Baugröße ohne Schutzgitter übereinstimmen; Messungen an Viertelzoll-Messmikrofonen verschiedener Hersteller bestätigen diese Vermutung. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Richtcharakteristik des Viertelzoll-Messmikrofons Microtech Gefell MK301 ohne Schutzgitter bei verschiedenen Frequenzen. Die Empfindlichkeit des Mikrofons nimmt bei steigendem Winkel  $\theta$  zur Hauptachse monoton ab, auch mit steigender Frequenz sinkt die relative seitliche Empfindlichkeit. Bei  $\theta = 90^\circ$  nimmt die Dämpfung im Vergleich zur Hauptachse Werte zwischen 3 dB bei 20 kHz und 14 dB bei 70 kHz an.

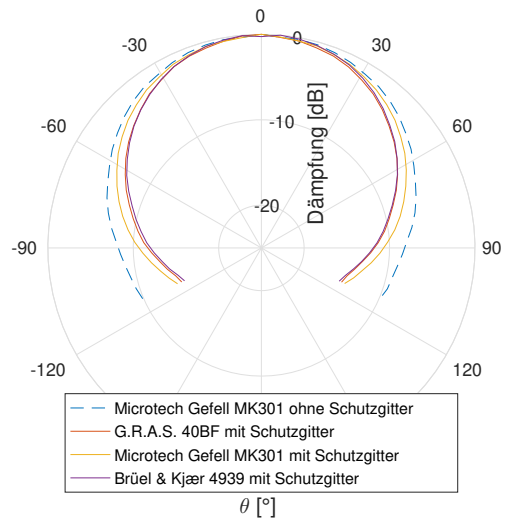
### Einfluss des Schutzgitters

In der Praxis werden Messmikrofone mit dem mitgelieferten Schutzgitter betrieben. Während der Einfluss des Schutzgitters im Hörschallbereich oft vernachlässigt werden kann, ändert sich die Richtcharakteristik im Ultraschallbereich teilweise stark.

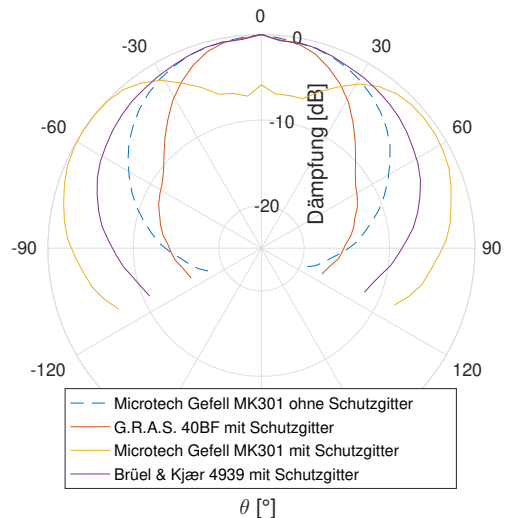
Um diesen Einfluss zu messen, wurde die Richtcharakteristik dreier Viertelzollmikrofone mit dem jeweiligen Schutzgitter gemessen und verglichen. Abbildung 3 zeigt die drei verwendeten Mikrofonkapseln.

Abbildung 4 und 5 zeigen die Richtcharakteristik dreier Viertelzollmikrofone mit Schutzgitter bei 40 kHz und 70 kHz. Zum Vergleich ist jeweils die Richtcharakteristik des Microtech Gefell MK301 ohne Schutzgitter abgebildet. Bei 40 kHz verhalten sich die Schutzgitter sehr ähnlich und erhöhen die maximale Dämpfung bei hohen Winkeln um bis zu 5 dB. Je höher die Frequenz wird, desto stärker fallen die Unterschiede zwischen den Schutzgittern auf: Die Richtcharakteristik des Brüel & Kjær 4939 ist bei 70 kHz mit Schutzgitter weniger stark ausgeprägt als ohne. Das optisch sehr ähnliche Gitter des G.R.A.S. 46BF erhöht die Richtwirkung dieses Messmikrofons. Beim Microtech Gefell MK301 sorgt das Schutzgitter bei senkrechtem Einfall für einen Einbruch im Frequenzgang bei 68,5 kHz, sodass die Empfindlichkeit mit Schutzgitter bei 70 kHz zu den Seiten höher ist als bei senkrechtem Einfall.

Insgesamt beeinflussen alle Schutzgitter die Richtcharakteristik des jeweiligen Mikrofons im Ultraschallbereich; je nach Ausführung des Schutzgitters fällt die Beeinflussung unterschiedlich aus. Für Frequenzen unter 20 kHz ist in dieser Messreihe keine Beeinflussung der Richtcharakteristik durch das Schutzgitter erkennbar.



**Abbildung 4:** Richtcharakteristik verschiedener Viertelzoll-Messmikrofone mit Schutzgitter bei 40 kHz. Zum Vergleich ist das Microtech Gefell MK301 ohne Schutzgitter aufgetragen.

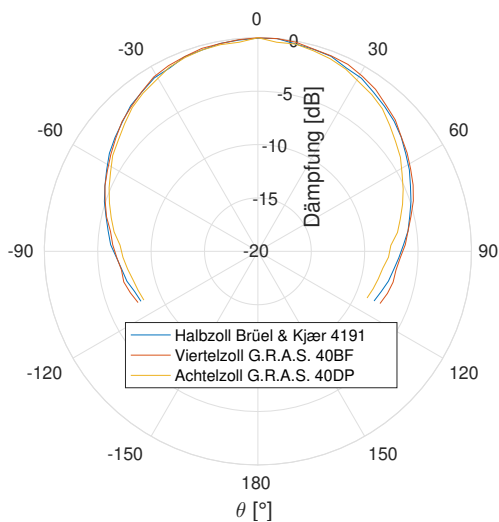


**Abbildung 5:** Richtcharakteristik verschiedener Viertelzoll-Messmikrofone mit Schutzgitter bei 70 kHz. Zum Vergleich ist das Microtech Gefell MK301 ohne Schutzgitter aufgetragen.

### Verschiedene Baugrößen

Zusätzlich zum Einfluss des Schutzgitters wurde die Richtcharakteristik von Messmikrofonen unterschiedlicher Baugrößen verglichen. Diese Messungen wurden ohne Schutzgitter durchgeführt, um nur den Einfluss der Baugröße zu untersuchen.

Bei Vergleich mit einem Mikrofon der halben Baugröße, in diesem Fall mit einem Achtelzoll-Messmikrofon, zeigt sich theoretisch beim kleineren Mikrofon dieselbe Richtcharakteristik bei der doppelten Frequenz. Dieser Effekt wurde durch Messungen an einem Halb Zoll-, ei-



**Abbildung 6:** Vergleich der Richtcharakteristik eines Halbzoll-Mikrofons bei 15 kHz, eines Viertelzoll-Mikrofons bei 30 kHz und eines Achtelzoll-Mikrofons bei 60 kHz.

nem Viertelzoll- und einem Achtelzoll-Messmikrofon untersucht. Abbildung 6 zeigt zum Vergleich die Richtcharakteristiken des Halbzoll-Mikrofons bei 15 kHz, des Viertelzoll-Mikrofons bei 30 kHz und die des Achtelzoll-Mikrofons bei 60 kHz. Im Rahmen der Messgenauigkeit stimmen diese Messergebnisse überein.

Für hohe Frequenzen sind also Mikrofone mit kleinen Membrandurchmessern gut geeignet. Die Richtcharakteristik bei hohen Frequenzen kann durch skalierte Messungen an größeren Mikrofontypen abgeschätzt werden. Diese Messungen finden entsprechend bei der halben oder einem Viertel der Frequenz statt und sind leichter handhabbar.

## MEMS-Mikrofone

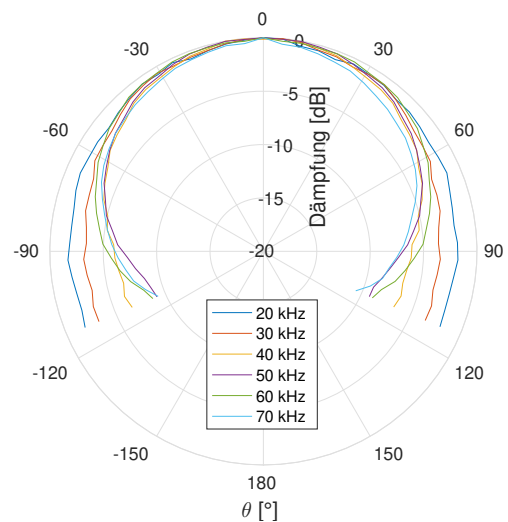
Als weiterer Mikrofontyp wurden MEMS-Mikrofone untersucht. Wegen der Integrierbarkeit in den Messplatz wurden nur Mikrofone in Top-Port-Bauweise mit analogem Signalausgang verwendet. Die übliche Membrangröße dieser Mikrofone beträgt 1 mm, das Gehäuse mit integriertem Vorverstärker hat eine Länge von 4 mm. Diese kleine Bauform ist für die Messung von Luftultraschall von Vorteil. Außerdem lassen sich dank der integrierten Bauweise mehrere MEMS-Mikrofone für eine gleichmäßigere Richtcharakteristik kombinieren.

Abseits der Richtcharakteristik wird in dieser Arbeit nicht untersucht, ob MEMS-Mikrofone für die Metrologie geeignet sind. In einer früheren Arbeit wurde festgestellt, dass gezielt modifizierte MEMS-Mikrofone für Messaufgaben in Anlehnung an die DIN EN 61094-4 geeignet sein könnten [3].

Betrachtet wird im Folgenden ein MEMS-Mikrofon vom Typ Knowles SPU0410HR5H-PB.

## Einzelne MEMS-Mikrofone

Zunächst wurde die Richtcharakteristik des einzelnen MEMS-Mikrofons untersucht, um sie mit der

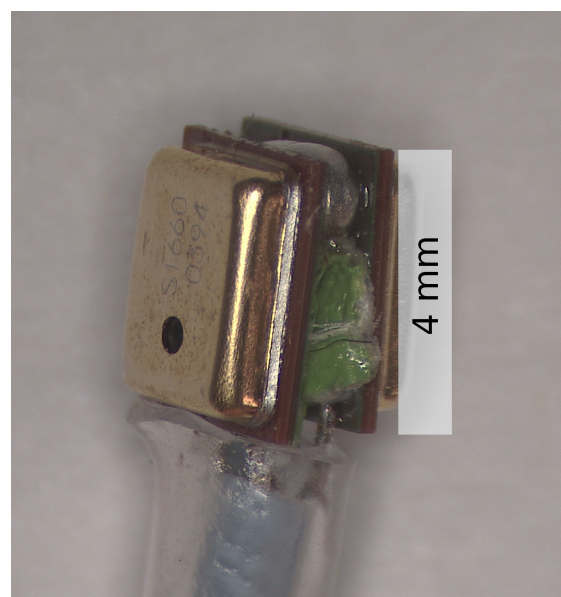


**Abbildung 7:** Richtcharakteristik des Knowles SPU0410HR5H-PB.

herkömmlicher Messmikrofone zu vergleichen. Dabei ist die Hauptachse des Mikrofons weiterhin oben.

Die Richtcharakteristik eines einzelnen MEMS-Mikrofons ist im betrachteten Frequenzbereich nahezu rotationssymmetrisch, sodass zur Auswertung wieder Polarplots zum Einsatz kommen. Abbildung 7 zeigt die Richtcharakteristik des verwendeten MEMS-Mikrofons vom Typ Knowles SPU0410HR5H-PB. Auch die Empfindlichkeit des MEMS-Mikrofons nimmt mit zunehmendem Winkel  $\theta$  zur Hauptachse ab. Dieser Effekt ist allerdings für verschiedene Frequenzen unterschiedlich stark ausgeprägt.

Insgesamt ähnelt die Richtcharakteristik des MEMS-Mikrofons der eines Achtelzoll-Messmikrofons, welches eine ähnliche Gehäusegröße, aber eine größere Membran besitzt.



**Abbildung 8:** MEMS-Mikrofon Knowles SPU0410HR5H-PB in Doppel-Konfiguration. Die größte Kantenlänge eines einzelnen Mikrofons beträgt 4 mm.

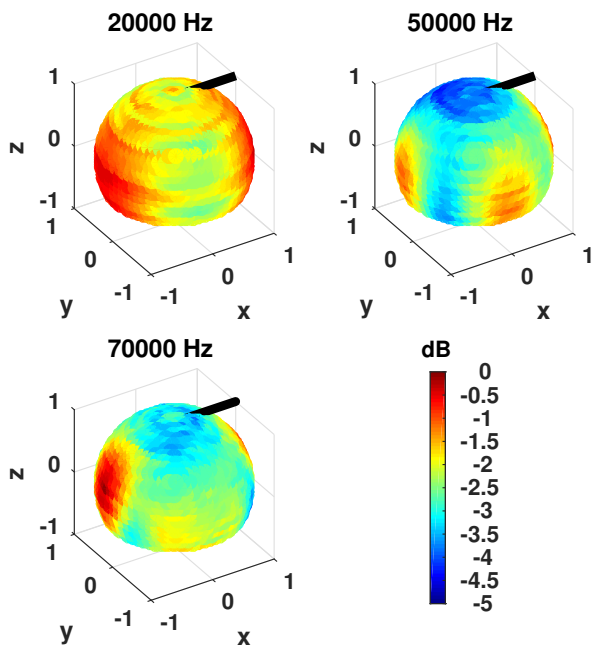


## Kombination mehrerer MEMS-Mikrofone

Auch die Richtcharakteristik eines einzelnen MEMS-Mikrofons ist weit von der idealen Kugelcharakteristik entfernt. Gerade die Abschattung durch das Gehäuse lässt sich schwer vermeiden, sodass Einzelmikrofone im Ultraschallbereich fast zwangsläufig eine stark ausgeprägte Richtcharakteristik besitzen. Um diesen Effekt auszugleichen, wurden zwei MEMS-Mikrofone mit den Rückseiten aneinander befestigt, sodass die Hauptachsen in entgegengesetzte Richtungen zeigen. Abbildung 8 zeigt diese Mikrofon-Kombination.

Da die beiden Schalleintrittsöffnungen einen Abstand von 3-4 mm voneinander haben, tritt je nach Einfallswinkel auf das Mikrofon eine Laufzeitdifferenz zwischen den Mikrofonen auf. Bei einer Frequenz von 70 kHz beträgt die Wellenlänge etwa 5 mm, sodass bereits ein Wegunterschied von 2,5 mm eine Phasendifferenz von 180° zur Folge hat. Eine einfache Summation beider Signale führt also zu einer Auslöschung der Signale und nicht zur gewünschten gleichmäßigen Richtcharakteristik.

Für die Messung des Schalldrucks an einem Ort ist die Phaseninformation des einfallenden Signals nicht wichtig. Daher können die Signale der beiden Mikrofone einzeln aufgenommen und ohne Berücksichtigung der Phase summiert werden (energetische Summierung). Bei dieser Art der Auswertung tritt keine Auslöschung auf.



**Abbildung 9:** Richtcharakteristik der MEMS-Kombination bei Summation der Frequenzgänge ohne Berücksichtigung der Phase. Der schwarze Strich markiert  $\phi = 0^\circ$ .

Abbildung 9 zeigt die resultierende Richtcharakteristik bei ausgewählten Frequenzen. Über den gesamten betrachteten Frequenzbereich ist die maximale Differenz in der Richtcharakteristik kleiner als 5 dB. Damit ist die Richtcharakteristik der MEMS-Mikrofon-Kombination deutlich gleichmäßiger als die aller betrachteten Einzel-

mikrofone. Allerdings existiert bei dieser Kombination keine Hauptachse mehr, auf der die Empfindlichkeit definiert am höchsten ist. Außerdem ist für die Auswertung ein zweikanaliger Analog-Digital-Wandler nötig.

## Fazit

Die Richtcharakteristik der bei Ultraschall-Messungen verwendeten Mikrofone hat einen starken Einfluss auf das Messergebnis. Zum Beispiel sinkt die Empfindlichkeit eines Viertelzoll-Mikrofons bei 70 kHz und einem Einfallswinkel von 90° um 14 dB gegenüber der Hauptachse.

Außerdem beeinflusst das Schutzgitter eines Messmikrofons dessen Richtcharakteristik zusätzlich und verfälscht teilweise den Frequenzgang im Ultraschallbereich.

Durch die Kombination zweier MEMS-Mikrofone ließ sich mit geeigneter digitaler Auswertung eine deutlich glattere Richtcharakteristik mit Pegeldifferenzen von unter 5 dB im gesamten vermessenen Frequenz- und Winkelbereich erzielen.

## Literatur

- [1] Rust, M: Untersuchung der Richtcharakteristik von MEMS- und Messmikrofonen. Bachelorarbeit, Technische Universität Braunschweig, Institut für Nachrichtentechnik. September 2017.
- [2] DIN EN 61094-4:1996-05: Messmikrofone – Teil 4: Anforderungen an Gebrauchs-Normalmikrofone. Norm. Mai 1996.
- [3] Michaelis, T. A., Kling, C.: MEMS-Mikrofone in der Metrologie. Fortschritte der Akustik - DAGA 2017, 391-394
- [4] Produkt-Homepage des G.R.A.S. 40BF, URL: <https://www.gras.dk/products/product/172-40BF>, besucht am 14.11.2017
- [5] Produkt-Homepage des Microtech Gefell MK301, URL: <http://www.microtechgefell.de/index.php/de/messtechnik/schall/kapseln/95-mk301>, besucht am 14.11.2017
- [6] Produkt-Homepage des Brüel & Kjær 4939, URL: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4939>, besucht am 14.11.2017