

## Adaptive mehrkanalige Geräuschkompensation für magnetoelektrische Sensoren

Jens Reermann, Christin Bald, Phillip Durdaut, André Piorra, Volker Röbisch, Dirk Meyners,  
Eckhard Quandt, Michael Höft, Gerhard Schmidt

Technische Fakultät, 24143 Kiel, Deutschland, Email: {jere/cbal/pd/anp/vr/dm/eq/mh/gus}@tf.uni-kiel.de

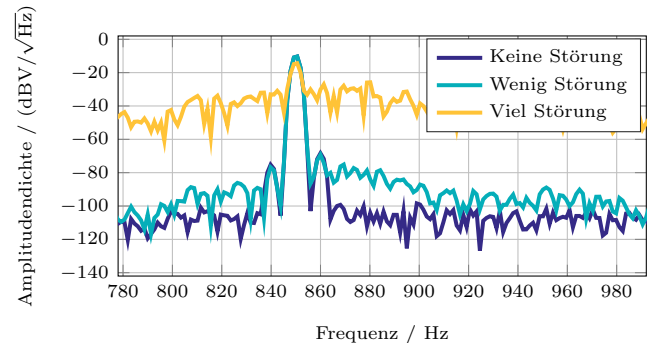
### Kurzzusammenfassung

Neuartige, auf dem magnetoelektrischen Effekt basierende Sensoren haben das Potential, biomagnetische Signale messen zu können. Allerdings koppeln aufgrund ihrer Struktur auch akustische Störungen mit in den Sensor ein, die das gesuchte magnetische Nutzsignal überlagern. Abhilfe schafft eine Kompensation der Störung mit Hilfe akustischer Referenzsensoren. In diesem Beitrag wird ein System zur mehrkanaligen Geräuschkompensation für magnetoelektrische Sensoren vorgestellt. Dabei werden verschiedene Ansätze zur Auswahl der Referenzsensoren entwickelt und miteinander verglichen. Durch das System soll eine einfachere Handhabung bei der Auswahl passender Referenzsensoren gewährleistet und eine Steigerung der Kompensationsleistung im Vergleich zur Verwendung eines einzelnen Referenzsensors erzielt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die beste Kompensation durch den Referenzsensor erzielt wird, dessen Resonanzfrequenz am nächsten an der Resonanzfrequenz des magnetoelektrischen Sensors liegt. Dadurch kann eine maximale Kompensation von über 20 dB erzielt werden. Der mehrkanalige Ansatz sucht für jede Frequenz den besten Referenzsensor aus, sodass eine solide Kompensation über der Frequenz aufrechterhalten wird.

### Einleitung

Magnetoelektrische (ME) Sensoren, als Verbund eines magnetostriktiven und eines piezoelektrischen Materials, haben Dank ihrer hohen Sensitivität das Potential, biomagnetische Signale in naher Zukunft messen zu können. Da die Nutzung dieser Sensoren keine Kühlung erfordert, könnten sie eine preiswerte Alternative zu den bisher verwendeten supraleitenden Quanteninterferometern (SQUID-Sensoren) darstellen. Allerdings koppeln aufgrund der Struktur der Sensoren auch akustische Störungen mit in den Sensor ein. In Abbildung 1 ist beispielsweise das Amplitudendichtespektrum eines ME-Sensors ohne und mit überlagerter akustischer Störung zu sehen. Es ist erkennbar, dass vor allem bei höheren Störungsamplituden das magnetische Nutzsignal nicht mehr zu detektieren ist. Dieses liegt aufgrund der verwendeten magnetischen Modulation [3] in Form einer Modulation des Anregungssignals vor und kann bei den Frequenzen 840 Hz und 860 Hz als Seitenband abgelesen werden.

Die Störungen können über eine adaptive Geräuschkompensation mittels Referenzsensoren gemindert werden [2]. Wie in vorherigen Versuchen gezeigt worden ist, eignen sich als Referenzsensoren insbesondere piezoelektrische (PE) Sensoren, die zwar



**Abbildung 1:** Amplitudendichtespektren eines ME-Sensors mit Resonanzfrequenz  $f_r = 870$  Hz. Das magnetische Nutzsignal hat eine Frequenz von  $f_n = 10$  Hz und wird mit der Trägerfrequenz  $f_{\text{mod}} = 850$  Hz in den hohen Frequenzbereich gemischt. Bei der Anwesenheit von akustischen Störungen wird das magnetische Nutzsignal überlagert und ist nicht mehr detektierbar. Angepasst, mit Erlaubnis, von [1].

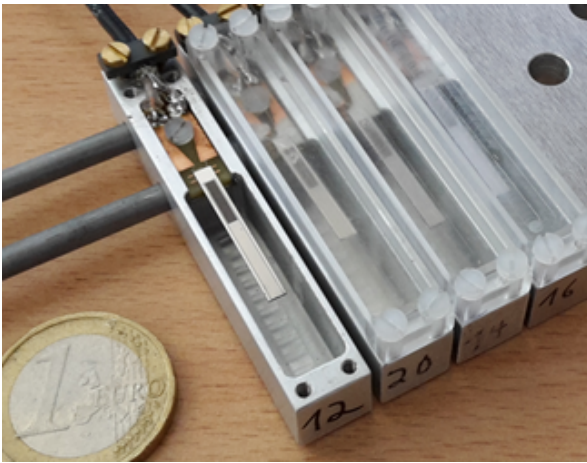
die akustische Störung, jedoch nicht das magnetische Nutzsignal aufnehmen [1]. Auch weisen sie Vorteile gegenüber Mikrofonen auf, da beispielsweise auch Körperschall mittels dieser Sensoren gemessen werden kann. Die Kompensationsleistung ist dabei eine Funktion der Differenz der Resonanzfrequenzen  $\Delta f_r$  zwischen PE-Sensor und ME-Sensor, falls die Güten der Resonatoren übereinstimmen. Für eine möglichst gute Kompensationsleistung ist somit eine stetige Anpassung des Referenzsensors an den ME-Sensor notwendig.

Um dies zu vermeiden, wird in dieser Veröffentlichung eine Bank an Referenzsensoren mit unterschiedlichen Resonanzfrequenzen (vgl. Abbildung 2) verwendet und um eine automatische Auswahl der Referenz zur Kompensation ergänzt. Dazu werden verschiedene Verfahren vorgestellt und evaluiert. Ziel ist die Vermeidung einer händischen Auswahl, wodurch die Anwendbarkeit der Kompensation in praktischen Aufbauten deutlich erhöht werden könnte.

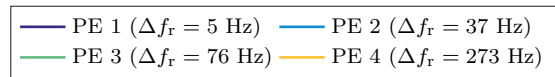
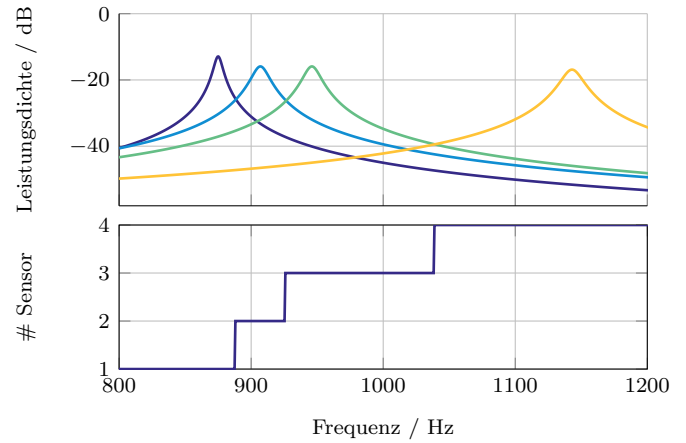
### Mehrkanalige Geräuschkompensation

Das Grundprinzip zur effizienten Kompensation der Störungen und automatischen Auswahl der Sensoren ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

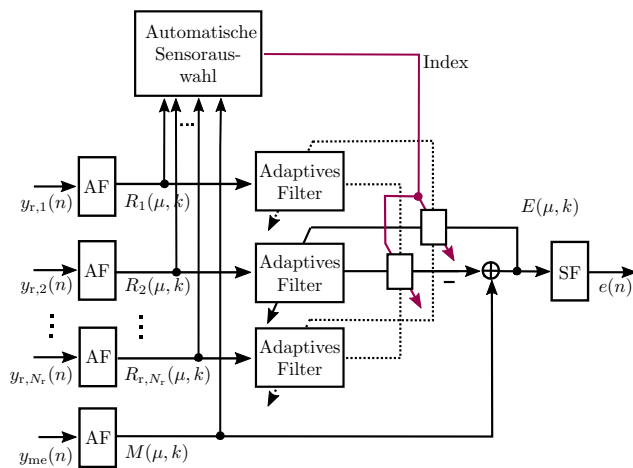
Die gemessenen Signale des ME-Sensors  $y_{\text{me}}(n)$  und der PE-Referenzsensoren  $y_{r,i}(n)$  mit  $i \in \{1, \dots, N_r\}$  werden in den Teilbandbereich transformiert und als  $M(\mu, k)$  bzw.  $R_i(\mu, k)$  bezeichnet. Nach einer automatischen Sensorauswahl, die im nächsten Teilabschnitt genauer beleuchtet wird, durchlaufen die Signale eine adaptive Filterung. Hierbei werden durch den NLMS (Normalized



**Abbildung 2:** Referenzbank bestehend aus unterschiedlichen PE-Sensoren. Aufgrund der unterschiedlichen Länge der Sensoren unterscheiden sich ihre Resonanzfrequenzen.



**Abbildung 4:** Im oberen Teil sind die Resonanzkurven der verwendeten PE-Referenzsensoren dargestellt. Über die Schnittpunkte der Kurven wird ermittelt, welcher Sensor für welchen Frequenzbereich zuständig ist. Diese Zuordnung ist im unteren Teil der Abbildung zu sehen.



**Abbildung 3:** Grundprinzip des mehrkanaligen Kompensationsystems. Nach Transformation in den Teilbandbereich mit einer Analyse Filterbank (AF) wird für jedes Teilband ein passender Referenzsensor über die automatische Sensorauswahl bestimmt. Dieses Signal wird adaptive gefiltert und vom ME-Sensorsignal subtrahiert. Das resultierende Fehlersignal wird mit Hilfe einer Synthesefilterbank (SF) zurück in den Zeitbereich transformiert.

Least Mean Square)-Algorithmus die Filterkoeffizienten aktualisiert. Daraufhin wird die Differenz zwischen ME-Sensorsignal und angepasstem Referenzsensordesign ermittelt. Anschließend erfolgt die Rücktransformation in den Zeitbereich, wobei das Ausgangssignal als  $e(n)$  bezeichnet wird.

### Automatische Sensorauswahl

Um über die Fehlerbestimmung nach der adaptiven Filterung der Signale eine möglichst exakte Nachbildung des gesuchten Nutzsignals zu bekommen, muss ein geeigneter Referenzsensor ausgewählt werden. Geeignet ist ein Referenzsensor, wenn dieser die Störung in ähnlicher Weise aufnimmt, wie der ME-Sensor und somit möglichst gut die Störung kompensieren kann. Die Bestimmung des optimalen Referenzsensors erfolgt für jedes Teilband und kann über unterschiedliche Entscheidungskriterien erfol-

gen. Im Folgenden werden vier Methoden der Sensorauswahl vorgestellt, die auf unterschiedliche Auswahlkriterien zurückgreifen.

### A priori Wissen

Sind Resonanzfrequenz und Bandbreite der Referenzsensoren bekannt, können deren Resonanzkurven mittels Lorentz-Kurven dargestellt werden. Auf Basis dieser Kurven können die Schnittpunkte jeweils benachbarter Kurven berechnet werden. Teilbändern, die sich oberhalb der Schnittpunktfrequenz befinden, wird der Sensor mit der höheren Resonanzfrequenz zugeordnet und umgekehrt. Die Resonanzkurven der hier verwendeten PE-Referenzsensoren und die resultierende Auswahl sind in Abbildung 4 dargestellt.

Streng genommen handelt es sich hierbei um keine automatische Auswahl eines geeigneten Referenzsensors. Vielmehr wird umgesetzt, was zur händischen Auswahl der Referenz notwendig wäre.

### Sensorparameterschätzung

Auch das Verfahren der Sensorparameterschätzung verwendet die Resonanzkurven und die sich ergebenden Schnittpunkte für die Zuordnung der akustischen Referenzsensoren zu den einzelnen Frequenzbereichen. Allerdings werden die Sensorparameter Resonanzfrequenz und Bandbreite über die aufgenommenen Signale geschätzt und sind nicht a priori bekannt. Da die PE-Sensoren in ihrer Resonanzfrequenz eine erhöhte Sensitivität aufweisen, kann angenommen werden, dass in diesem Bereich die höchste Signalenergie vorliegt. Die Resonanzfrequenz kann demnach über eine Extremwertsuche ermittelt werden. Die 3 dB-Bandbreite des Sensors wird über die obere und die untere 3 dB-Grenzfrequenz bestimmt. Nach der

Ermittlung der Sensorparameter kann wie beim a priori Wissen verfahren werden.

## Kohärenz

Dieses Auswahlverfahren betrachtet nicht direkt die Sensorparameter der akustischen Referenzsensoren, sondern vergleicht die aufgenommenen Signale des ME-Sensors mit denen der PE-Sensoren. Die Betragsquadrat-Kohärenz beschreibt die lineare Abhängigkeit zweier Signale je Frequenz. Sie kann Werte zwischen Null und Eins annehmen, dabei beschreibt der Wert Eins eine starke lineare Abhängigkeit. Der PE-Sensor, der im betrachteten Teilband den höchsten Kohärenzwert aufweist, wird zur Geräuschkompensation verwendet, da dieser die größte lineare Ähnlichkeit zum ME-Sensorsignal besitzt und somit die akustische Störung am besten kompensieren kann.

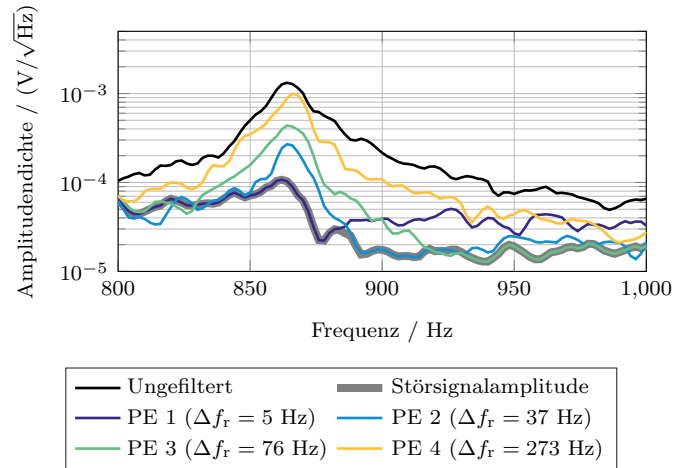
## Aufgenommene Störsignalamplitude

Auch das letzte betrachtete Auswahlverfahren bezieht sich auf die aufgenommenen Signale der PE-Referenzsensoren. Das akustische Störsignal wird zum einen durch die verschiedenen Resonanzfrequenzen von den einzelnen Sensoren unterschiedlich aufgenommen, zum anderen unterscheiden sich die Impulsantworten zwischen Störquelle und den einzelnen Sensoren, z.B. aufgrund unterschiedlicher Entfernungen der Sensoren zu der Störquelle. Es wird angenommen, dass der Sensor, der am meisten Störsignal aufnimmt, die akustische Störung des ME-Sensors am besten kompensieren kann. Um Fehlentscheidungen durch Eigenrauschen der Sensoren zu vermeiden, werden die aufgenommenen Sensorsignale abzüglich des sensoreigenen Rauschens betrachtet. Der Abstand von aufgenommener Signalleistung zu der Sensorrauschleistung wird mittels geglätteter Eingangssignale bestimmt, damit Unsicherheiten im Signalverlauf bei der Auswahl nicht die Entscheidung beeinflussen.

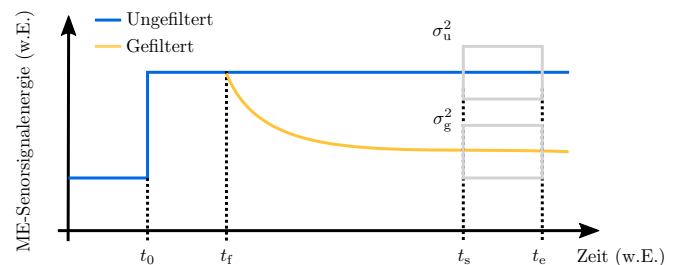
## Ergebnisse

Die Messungen der Sensorsignale werden in einer abgeschirmten Messkammer durchgeführt, um sowohl weitere magnetische Signale als auch nicht selbst generierte akustische Störquellen zu vermeiden. Vier PE-Sensoren, mit Resonanzfrequenzen im Bereich zwischen 875 Hz und 1143 Hz, und der magnetoelektrische Sensor, mit einer Resonanzfrequenz von  $f_r = 870$  Hz, werden auf einer Platte angebracht und ein Lautsprecher 50 cm neben der Platte aufgestellt. Über diesen Lautsprecher wird weißes Rauschen mit unterschiedlichen Rauschamplituden abgespielt. Die abgespielten Rauschamplituden simulieren dabei reale Umgebungsgeräusche, die in möglichen späteren Anwendungsgebieten auftreten können.

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse einer Simulation des beschriebenen Szenarios zu sehen. Sowohl die mittlere Rauschamplitude des ME-Sensorsignals, als auch die Ergebnisse der Kompensationen mit den einzelnen PE-Referenzsensoren und das Kompensationsergebnis des



**Abbildung 5:** Das Signal des ME-Sensors und die Kompensationsergebnisse bei Kompensation durch einzelne PE-Sensoren bzw. bei mehrkanaliger Kompensation mit a priori Wissen als Auswahlverfahren.

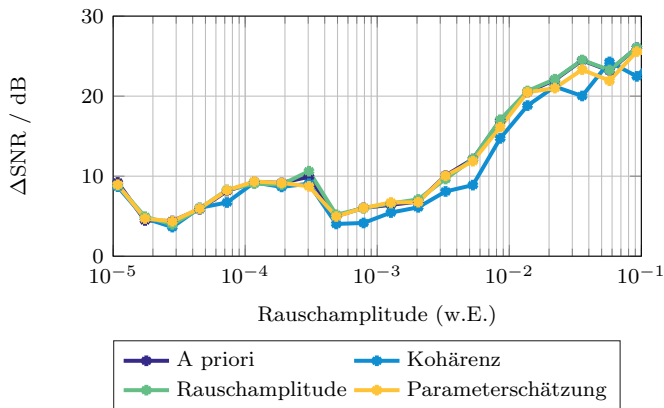


**Abbildung 6:** Die Zeitsignale des Eingangs und des Ausgangs des Systems. Zum Zeitpunkt  $t_0$  wird die Geräuschquelle und zum Zeitpunkt  $t_f$  die Geräuschkompensation aktiviert. Zwischen den Zeitpunkten  $t_s$  und  $t_e$  werden beide Signale analysiert. Angepasst, mit Erlaubnis, von [1].

mehrkanaligen Ansatzes bei Auswahl über die aufgenommene Störsignalamplitude sind abgebildet. Es ist erkennbar, dass die mehrkanalige Geräuschkompensation gute Kompensationsergebnisse liefert, die über die Frequenz konstant sind. Währenddessen werden über einen einzelnen Sensor nur in den Frequenzbereichen gute Kompensationsergebnisse erzielt, in denen die Resonanzfrequenz des jeweiligen PE-Referenzsensors liegt.

Um alle Auswahlmöglichkeiten messtechnisch miteinander zu vergleichen, wird eine Evaluierung in Anlehnung an [1] anhand des Verhältnisses von Eingangs- zu Ausgangsleistung verwendet. In Abbildung 6 sind die Zeitsignale des Eingangs und des Ausgangs des Systems dargestellt. Der Eingang des Systems ist das Signal des ME-Sensors und der Ausgang beschreibt das gefilterte ME-Sensorsignal, also den Restfehler, der im Optimalfall das gesuchte Nutzsignal ergibt. Zum Zeitpunkt  $t_0$  wird die Geräuschquelle aktiviert, ab dem Zeitpunkt  $t_f$  beginnt die Geräuschkompensation. Zwischen den Zeitpunkten  $t_s$  und  $t_e$  wird für den Eingang und den Ausgang des Systems der Geräuschpegel analysiert, der durch

$$\sigma_x^2 = \int_{t_s}^{t_e} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} |S_x(f, t)|^2 df dt \quad \forall x \in \{u, g\} \quad (1)$$



**Abbildung 7:** Messtechnisch ermittelte SNR-Verbesserung als eine Funktion des Störpegels eines Lautsprechers für verschiedene Auswahlmöglichkeiten der Referenzsensoren. Es ergibt sich ein linearer Anstieg der Kompensationsstärke in Abhängigkeit von der Anregungsamplitude mit einer maximalen SNR-Verbesserung von über 20 dB.

berechnet werden kann. Dabei ist  $f_{\min} = f_r - 10$  Hz,  $f_{\max} = f_r + 90$  Hz in Anlehnung an die benötigte Bandbreite in möglichen medizinischen Anwendungen, und  $S_x(f, t)$  die Kurzzeitleistungsdichte des Eingangs und des Ausgangs des Systems. Konstante Skalierungsfaktoren werden nicht berücksichtigt. Die SNR-Verbesserung wird entsprechend

$$\Delta\text{SNR} = 10\log_{10}\left(\frac{\sigma_u^2}{\sigma_g^2}\right) \quad (2)$$

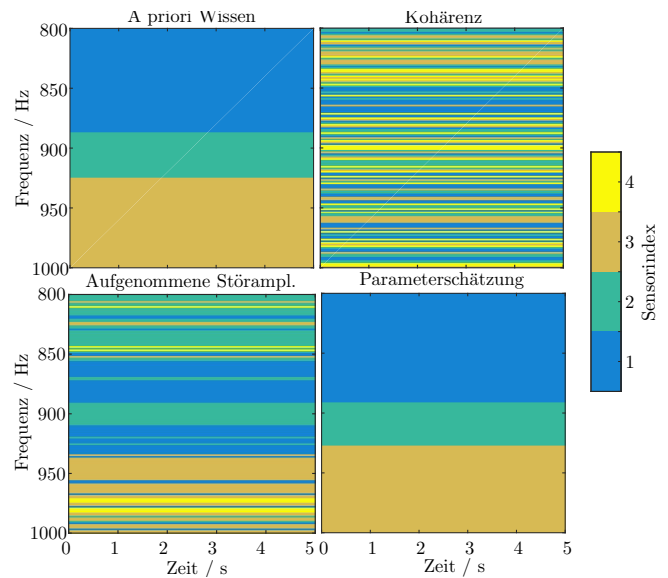
ermittelt [1].

In Abbildung 7 ist die SNR-Verbesserung für die in Abschnitt „Sensorauswahl“ vorgestellten Auswahlmöglichkeiten der PE-Referenzsensoren zu sehen. Die Kompensationsergebnisse steigen mit der Rauschamplitude linear an, erreichen bei hohen Anregungsamplituden jedoch ein Maximum von über 20 dB. Es ist zudem erkennbar, dass die Ergebnisse, die über das Auswahlverfahren Kohärenz getroffen werden, von den anderen Kompensationsergebnissen leicht abweichen.

Um genauer zu untersuchen, woher diese Unterschiede in der Kompensationsstärke kommen, sind in Abbildung 8 die ausgewählten PE-Sensoren für eine mittlere Anregungsamplitude zu sehen. Über die Auswahlverfahren a priori Wissen und Sensorparameterschätzung wird in etwa die gleiche Sensorauswahl getroffen. Die Auswahl über die aufgenommenen Störsignalamplituden liefert mit ein paar kleineren Abweichungen ähnliche Sensoren wie die zuvor betrachteten Auswahlverfahren. Die Sensorauswahl über die Kohärenz weicht schließlich stark von den anderen Verfahren ab. Auffällig ist hier vor allem, dass die Sensoren nicht wie bei den anderen Verfahren über große Frequenzbereiche beibehalten werden, sondern oft zwischen den Sensoren gewechselt wird.

## Fazit

Der mehrkanalige Kompensationsansatz liefert gute Kompensationsergebnisse von über 20 dB, wobei es nur



**Abbildung 8:** Ausgewählte Referenzsensoren für die verschiedenen Auswahlmöglichkeiten in Abhängigkeit von der Frequenz und der Zeit. Die Auswahlverfahren a priori Wissen, Sensorparameterschätzung und aufgenommene Störsignalamplitude unterscheiden sich nur gering auf die ausgewählten Sensoren. Die Sensoren, die über die Kohärenz ausgewählt wurden, weichen hingegen von diesen Sensoren ab.

leichte Unterschiede in der Kompensationsstärke der verschiedenen Auswahlverfahren gibt. Im Gegensatz zu einer Kompensation über einen einzelnen PE-Referenzsensor sind die Ergebnisse über einen breiten Frequenzbereich konstant. Zudem wird über den mehrkanaligen Ansatz garantiert, dass zu jedem ME-Sensor ein passender Referenzsensor ausgewählt wird. Hierdurch entfällt die händische Suche nach einem passenden Referenzsensor. Die Anwendbarkeit der Kompensation steigert sich deutlich.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die diese Arbeit im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 1261 gefördert hat.

## Literatur

- [1] J. Reermann, C. Bald, S. Salzer, P. Durdaut, A. Piorra, D. Meyners, E. Quandt, M. Höft, G. Schmidt: Comparison of Reference Sensors for Noise Cancellation of Magnetolectric Sensors, IEEE Sensors 2016 Proceedings, Orlando, November 2016
- [2] J. Reermann, G. Schmidt, I. Teliban, S. Salzer, M. Höft, R. Knöchel, A. Piorra, E. Quandt: Adaptive Acoustic Noise Cancellation for Magnetolectric Sensors, IEEE Sensors Journal, Vol. 15, Nr. 10, S. 5804–5812, 2015.
- [3] R. Jahns, H. Greve, E. Woltermann, E. Quandt, R. Knöchel: Sensitivity enhancement of magnetolectric sensors through frequency-conversion, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 183, S. 16–21, 2012.