

Akustische Anregungsquellen in hochintegrierten Leistungselektroniken mobiler Antriebe

Maximilian Herrnberger¹, Moritz Hülsebrock²

¹ BMW Group, 80809 München, E-Mail: Maximilian.Herrnberger@bmw.de

² TU Darmstadt: SAM, 64289 Darmstadt, E-Mail: huelsebrock@sam.tu-darmstadt.de

Einleitung

Im Zuge der weiteren Elektrifizierung des Antriebsstranges entstehen neue Herausforderungen im Bereich der Akustik. Durch das Wegfallen des Verbrennungsmotors rücken andere Geräuschquellen in den Vordergrund, die bislang durch dessen Klang maskiert wurden. Hierzu zählen unter anderem hochfrequente tonale Störgeräusche, die durch die Wechselrichter-Steuerung entstehen. Die Ursache dieser Störgeräusche lässt sich auf die Schaltvorgänge der Leistungselektronik (LE) zurückführen, die sowohl Komponenten innerhalb der LE als auch Rotor und Stator des Elektromotors elektromagnetisch anregen [1–3]. Die Untersuchungen in dieser Arbeit fokussieren sich auf die Anregungen innerhalb der Leistungselektronik. Hierfür wird unter anderem der Einfluss von Spannungs-Oberschwingungen auf Komponenten im Wechselrichter untersucht. Der Einfluss dieser Anregung wird am Beispiel des Zwischenkreiskondensators, der zum Schutz der Hochvoltbatterie als Zwischenpuffer dient und somit Spannungsschwankungen ausgesetzt ist, analysiert. Zu diesem Zweck erfolgen Untersuchungen, bei denen ein Ripplgenerator verschiedene Folienkondensatoren zu mechanischen Schwingungen anregt. Die Messergebnisse zeigen vielversprechende Einblicke in von Kondensator-Kräften verursachte interne elektromechanische Schwingungen.

Akustische Eigenschaften elektrischer Antriebe

Die Leistungselektronik in elektrischen Antrieben hat die Aufgabe, die DC-Gleichspannung der Batterie in eine dreiphasige AC-Wechselspannung mit variabler Frequenz und Amplitude umzuwandeln. Dabei ist die Auslegung der LE stets ein Kompromiss aus Energieeffizienz, elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) und Akustik. Zudem steht die LE in Wechselwirkung mit Getriebe und E-Maschine, da sie analog zu **Abbildung 1** in einem zentralen Gehäuse untergebracht ist. Diese hochintegrierte Bauweise birgt neue Herausforderungen im Bereich der Betriebsfestigkeit und Akustik.



Abbildung 1 Aufbau hochintegrierter E-Antrieb [4]

Die Umwandlung von Gleichstrom zu Wechselstrom wird innerhalb der Leistungselektronik durch Pulsweitenmodulation (PWM) realisiert. Durch gezieltes Schalten von Transistoren (z.B. IGBTs) wird ein Gleichstrom in einen Wechselstrom umgewandelt. Abhängig von der Taktfrequenz dieser Schaltvorgänge enthält dieser sinusförmige Wechselstrom Oberschwingungen, welche sowohl die E-Maschine als auch Komponenten innerhalb der Leistungselektronik zu Schwingungen anregen. Das Prinzip der PWM ist in **Abbildung 2** dargestellt.

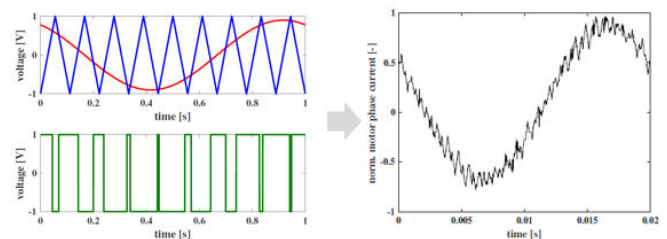


Abbildung 2 Erzeugung einer Wechselspannung durch PWM [5]

Zwischenkreiskondensator als Anregungsquelle

Die akustische Anregung der E-Maschine durch Oberschwingungen wurde bereits in der Literatur untersucht [1–3,6]. Dabei werden Moden von Rotor und Stator durch wechselnde Maxwell-Kräfte angeregt, wodurch eine Schallabstrahlung erfolgt.

Demgegenüber haben die hier vorgestellten Versuche die Zielsetzung, die Anregung des Zwischenkreiskondensators (ZKK) innerhalb der Leistungselektronik näher zu untersuchen. Dieser ZKK dient als Puffer zwischen Batteriespeicher und Leistungselektronik und wird durch Schaltvorgänge der Transistoren zu Schwingungen angeregt. Die Anregung von Kondensatoren wurde bereits in einigen anderen Anwendungen untersucht [7–11]. Die Lage des ZKKs wird im vereinfachten Schaltbild in **Abbildung 3** dargestellt.

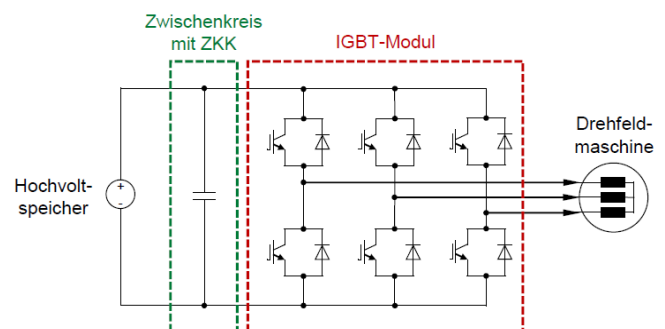


Abbildung 3 Schema IGBT-Modul mit Zwischenkreis

Eine häufige Kondensatorbauart für moderne LE sind Filmkondensatoren. Dabei werden Kondensatorplatten aus Alu-

minium auf eine dielektrische Schicht aus Polypropylen (PP) aufgedampft und aufgewickelt. Der Aufbau eines beispielhaften Kondensator-Wickels ist in **Abbildung 4** dargestellt.

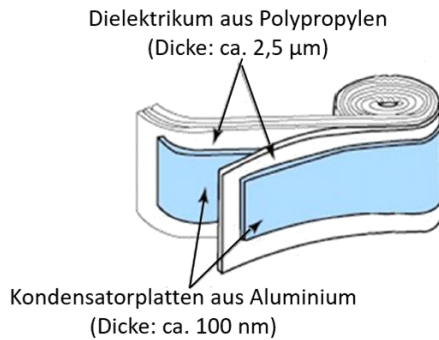


Abbildung 4 Aufbau eines Kondensatorwickels [9]

Für die LE eingesetzte Filmkondensatoren enthalten meist mehrere dieser Wickel, welche mit einer elastischen Vergussmasse in ein Kunststoffgehäuse eingebettet sind. Diese Vergussmasse dient unter anderem dazu, mechanische Anregungen der Wickel zu dämpfen.

Ändert sich die Spannung am Zwischenkreiskondensator, so ändert sich auch die anregende Kraft am Wickel. Als Ersatzmodell für den Kondensatorwickel kann ein Plattenkondensator herangezogen werden. Die dort auftretende Coulomb-Kraft ist neben der Kapazität C und der Plattenfläche A auch von der Gleich- und Wechselspannung ($U_{DC/AC}$) abhängig und wird durch Gleichung (1) beschrieben:

$$F_{ZKK} = CA(U_{DC}^2 + U_{AC}^2 + 2U_{DC}U_{AC}) \quad (1)$$

Versuchsaufbau

Um den Einfluss verschiedener Spannungszustände auf die mechanische Anregung mehrerer ZKKs zu untersuchen, wurden diese mit Hilfe eines Rippelgenerators elektrisch angeregt und die Oberfläche mit Hilfe eines Laser-Doppler-Vibrometers (LDV) abgetastet. Der verwendete Rippelgene-

rator stammt von der Firma Spitzenberger (Typ LVA 5000) und hat eine Gesamtleistung von 5 kW. Um den Kondensator im gesamten Frequenzbereich anzuregen, wurde ein gesweepeter Wechselstrom (AC-Anteil) verwendet. Zusätzlich wird der Kondensator mit einem Gleichstrom-Offset (DC-Anteil) beaufschlagt. Die Sweepanregung regt den Frequenzbereich 2-16 kHz an. Die Dauer für den Sweep beträgt 400 ms.

Der Versuchsaufbau aus Sicht des Laservibrometers ist in **Abbildung 5** dargestellt. Der ZKK ist in einem Rahmen an elastischen Seilen aufgehängt und somit frei schwingend gelagert. Der Strom wird mit Hilfe eines 1 Meter langen Geflechtkabels zum Kondensator geleitet.

Besteht ein System aus einer Kapazität und einer Induktivität, so weist dieses nach Gleichung (2) eine Resonanzfrequenz f_0 auf:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Das Geflechtkabel hilft dabei, die Eingangsinduktivität L zu reduzieren und somit den Resonanzpunkt in einen möglichst hohen Frequenzbereich zu legen.

Da die Kapazität hauptsächlich durch den Kondensator bestimmt wird, lässt sich mithilfe des Resonanzpunktes die Gesamtinduktivität im System berechnen. Je nach Lage der Anbindung an den Kondensator lag diese im Versuch bei rund 200 nH.

Der Kondensator wurde wie in **Abbildung 5** dargestellt von vier Seiten (-X/-Y/+Z/-Z) vermessen. Dabei wurde die -Y-Seite direkt, die übrigen Seiten über Spiegel vermessen. Die Verwendung des Spiegels wurde zudem im Versuch validiert. Die gemessenen Spektren waren bei Messungen jeweils mit und ohne Spiegel nahezu identisch.

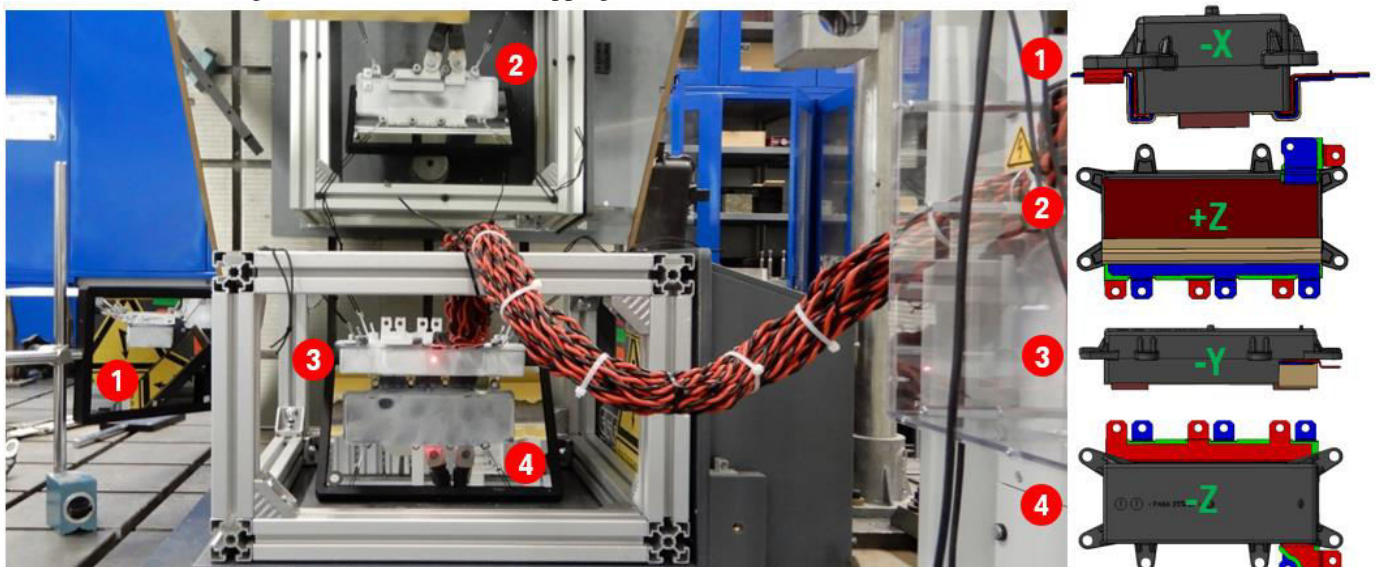


Abbildung 5 Versuchsaufbau aus Sicht des Laservibrometers

Folgende Signale werden bei der Messung mit Hilfe der FFT in den Frequenzbereich transferiert und aufgezeichnet:

- Oberflächenschnelle (20 Mittelungen je Punkt)
- Stromstärke (nahezu konstant über Frequenz)
- AC-Spannung (variabel über Frequenz)

Die Frequenzauflösung des Geschwindigkeitssignals beträgt 2.5 Hz. Dieser Wert passt zur Dauer des Frequenzsweeps, da die Messzeit je Mittelung dann $1/2.5 \text{ Hz} = 400 \text{ ms}$ betragen muss.

Elektrische Eigenschaften

Für den Betriebspunkt des ZKKs ist die frequenzabhängige elektrische Impedanz von Bedeutung. Wird der ZKK mit einem gesweepen Wechselstrom konstanter Stromstärke versorgt, so stellt sich je nach Frequenz eine andere Rippelspannung ein. Mithilfe der Impedanz Z lässt sich folgender Zusammenhang gemäß Gleichung (3) formulieren:

$$Z = U_{\text{eff}}/I_{\text{eff}} \quad (3)$$

Die Impedanz ist dabei eine komplexe Größe, welche von der Ersatzinduktivität (ESL), der Kapazität (C) Ersatzwiderstandes (ESR) abhängig ist. Die Impedanz für einen beispielhaften Kondensator ist in **Abbildung 6** nach Betrag und Phase dargestellt.

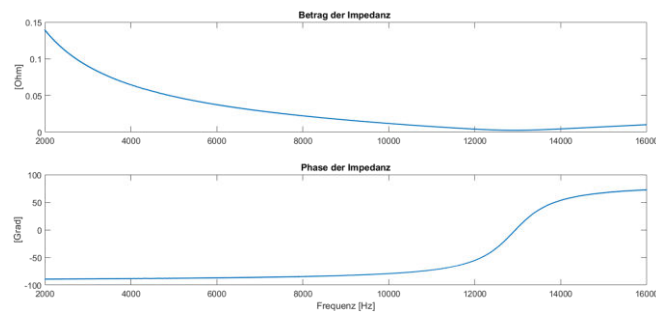


Abbildung 6 Betrag und Phase der Impedanz

Bei Frequenzen unterhalb der Resonanz fällt die Impedanz ab, was zu abfallenden Spannungen am Kondensator führt. Hier sind kapazitive Effekte dominierend und der Betrag der Impedanz ist proportional zu $1/C$. Zudem ist das Stromsignal phasenversetzt zum Spannungssignal. Unterhalb der Resonanzfrequenz eilt der Strom voraus, was zu einem erheblichen Anteil von Blindleistung führt.

Im Resonanzpunkt heben sich kapazitive und induktive Effekte gegenseitig auf. Hier gibt es ausschließlich Wirkleistung, welche durch den ESR verursacht wird. An diesem Punkt sind die Rippelspannungen minimal.

Bei Frequenzen oberhalb des Resonanzpunktes dominieren induktive Effekte. Die Gesamtinduktivität des Systems setzt sich dabei aus der Eingangsinduktivität des ZKKs und der Induktivität des Zuleitungskabels zusammen, wobei letztere deutlich dominierend ist.

Auswirkungen auf Anregungsspektren

Als Maß für die Anregung kann beispielsweise die Oberflächenschnelle herangezogen werden. Wie in vorherigem Abschnitt beschrieben, wurden von jedem ZKK jeweils 4 Seiten (-X/-Y/+Z/-Z) vermessen. Dazu wurde auf jeder Seite ein Gitter abgetastet. Die Spektren aller n Punkte einer Seite

lassen sich gemäß Gleichung (4) in einem gemittelten Geschwindigkeitsspektrum zusammenfassen:

$$v_{\text{gemittelt}}(\omega) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{abs}(v_i(\omega)) \quad (4)$$

Dieses gemittelte Spektrum kann als Maß für die kinetische Energie einer schwingenden Fläche interpretiert werden. Nach dem Kraftmodell ist zu erwarten, dass eine Erhöhung der Spannung am ZKK auch zu einer höheren Oberflächenschnelle führt. Es kann sowohl der DC-Anteil (**Abbildung 7**) als auch der AC-Anteil (**Abbildung 8**) erhöht werden.

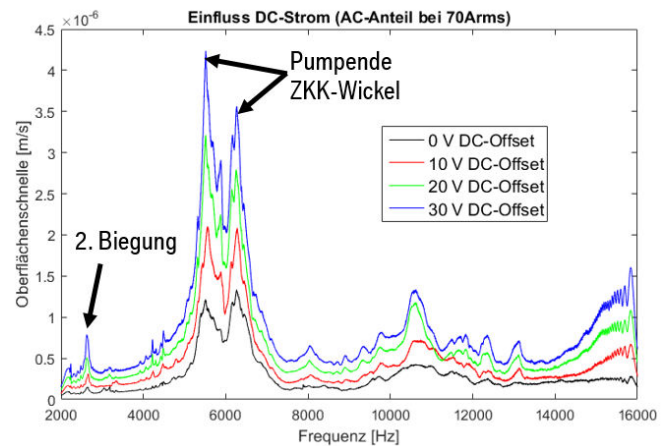


Abbildung 7 Gemittelte Oberflächenschnelle über -Z-Seite

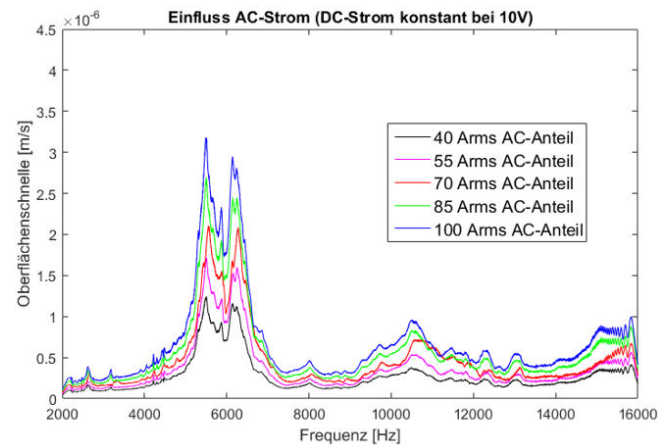


Abbildung 8 Gemittelte Oberflächenschnelle über -Z-Seite

Durch die elektrische Anregung werden Moden des ZKKs angeregt. In **Abbildung 7** sind beispielhaft die Peaks von drei Moden markiert. Dabei wird bei etwa 2,6 kHz die globale zweite Biegung des ZKKs angeregt. Um die 6 kHz tritt ein Pumpen der ZKK-Wickel aus **Abbildung 4** auf.

Luftschallabstrahlung des Kondensators

Nachdem in obigem Beispielspektrum aus **Abbildung 7** bei einer Frequenz von 6253 Hz ein hoher Peak auftritt, wird diese Anregung verwendet, um eine mögliche Luftschallabstrahlung nachzuweisen. Die dazugehörige Schwingform ist in **Abbildung 9** dargestellt. Von den vier verbauten Kondensator-Wickeln werden die drei rechten Wickel zu einer Pumpmode angeregt.

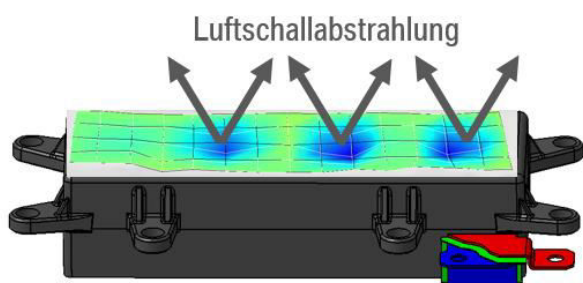


Abbildung 9 Eigenmode bei 6253 Hz

Die Anregungsfrequenz von 6253 Hz strahlt bei der Luftschallgeschwindigkeit von 340 m/s mit einer Wellenlänge von $\lambda = 0,054m$ ab. Ziel der Messung ist es, die abstrahlende Schallwelle im Zeitbereich aufzulösen. Zu diesem Zweck wird der Luftraum oberhalb des Kondensators mit einem feinen Gitter abgetastet. Der Laserstrahl wird dann von einer starren Platte reflektiert. Da ein Gebiet höheren Drucks einen anderen Brechungsindex aufweist, können diese druckinduzierten Schwankungen visualisiert werden. Diese druckinduzierten Schwankungen sind für einen Zeitpunkt in **Abbildung 10** dargestellt.

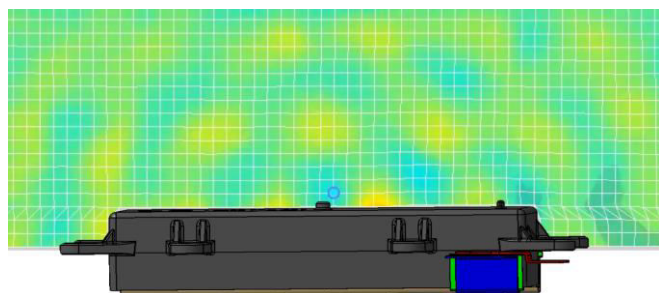


Abbildung 10 Luftschallabstrahlung bei 6253 Hz

Bei der Messung muss berücksichtigt werden, dass auch die reflektierende Platte nicht komplett starr ist und somit die Messung beeinflussen kann. Die Entstehungsorte der Schallwellen sowie die daraus resultierende Ausbreitung passen jedoch zur angeregten Mode sowie zur Wellenlänge der Luftschallabstrahlung.

Fazit und Ausblick

In der Arbeit wurden verschiedene Zwischenkreiskondensatoren elektrisch angeregt und der Einfluss von Rippelspannungen auf die mechanische Anregung untersucht. Dabei zeigt sich, dass sowohl Moden des gesamten ZKKs als auch Moden der einzelnen Wickel getroffen werden.

Um die an den Kondensator-Wickeln anregende Kraft abzubilden, wurde der ZKK als Plattenkondensator modelliert. Im Anschluss daran lässt sich die Kraft vereinfacht durch die Coulomb-Kraft darstellen. Weitere Veröffentlichungen zeigen, dass neben der Coulomb-Kraft auch Effekte wie die Elektrostriktion und der inverse piezoelektrische Effekt eine Rolle spielen könnten [7,12,13]. Für ein erweitertes Kraftmodell ist es demnach geplant, diese Effekte im Dielektrikum zusätzlich abzubilden.

Ein weiteres Ziel für zukünftige Untersuchungen ist es, die elektrischen Anregung und deren Auswirkungen auf die Struktur simulativ abzubilden. Da die Anregungen im hoch-

frequenten Bereich stattfinden, sind frequenzabhängige Materialparameter für ein gutes Simulationsergebnis erforderlich. Zur Identifizierung der frequenzabhängigen Materialparameter wird eine DMTA Untersuchung der Materialien des Zwischenkreiskondensators durchgeführt. Anhand der Ergebnisse der DMTA lässt sich das frequenzabhängige Materialverhalten über geeignete Materialmodelle (z. B. generalisiertes Maxwell Modell und fraktionales Ableitungsmodell) abbilden.

Literatur

- [1] Le Besnerais J, Lanfranchi V, Hecquet M, Brochet P. Characterization and Reduction of Audible Magnetic Noise Due to PWM Supply in Induction Machines. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010;57(4):1288–95.
- [2] Luznar J, Slavič J, Boltežar M. Experimental research on structure-borne noise at pulse-width-modulation excitation. *Applied Acoustics* 2018;137:33–9.
- [3] van der Giet M. Analysis of electromagnetic acoustic noise excitations: A contribution to low-noise design and to the auralization of electrical machines. 1st ed. Aachen: Shaker; 2011.
- [4] Juraschek S, Buchner A, Schinnerl B. Die elektrische Antriebstechnologie der BMW Group: BMW Group, München. 39. Internationales Wiener Motorensymposium 2018:65–81.
- [5] Amlinger H. Reduction of Audible Noise of a Traction Motor at PWM Operation: KTH Royal Institute of Technology; 2018.
- [6] Schwarzer M, Melz T, Beidl C. Structural Dynamic Modeling and Simulation of Acoustic Sound Emissions of Electric Traction Motors [Dissertation]. Darmstadt: Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt; 2017.
- [7] Acoustic noise of massmarket equipment caused by supraharmonics in the frequency range 2 to 20 kHz. *IEEE*; 2018.
- [8] Cox MD, Guan HH. Vibration and audible noise of capacitors subjected to nonsinusoidal waveforms. *IEEE Transactions on Power Delivery* 1994;9(2):856–62.
- [9] Zhu L, Ji S, Shen Q, Liu Y, Li J, Liu H. A noise level prediction method based on electro-mechanical frequency response function for capacitors. *PLoS ONE* 2013;8(12):e81651.
- [10] Peng W, Shengchang J, Yanming L, Tao C. Study on an audible noise reduction measure for filter capacitors based on compressible space absorber. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2011;26(1):438–45.
- [11] Wang H, Blaabjerg F. Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters—An overview. *IEEE Trans. on Ind. Applicat.* 2014;50(5):3569–78.
- [12] Gaal M, Bovtun V, Stark W, Kreuzbruck M. Bestimmung der elastischen Eigenschaften des Polypropylen-Ferroelektrets 2014.
- [13] Lee HY, Peng Y, Shkel YM. Strain-dielectric response of dielectrics as foundation for electrostriction stresses. *Journal of Applied Physics* 2005;98(7):74104.