

# Simulationsverfahren zur Bestimmung der HF-Impedanzen von Traktionsbatterien

M. Sc. Moustafa Raya, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit

Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit

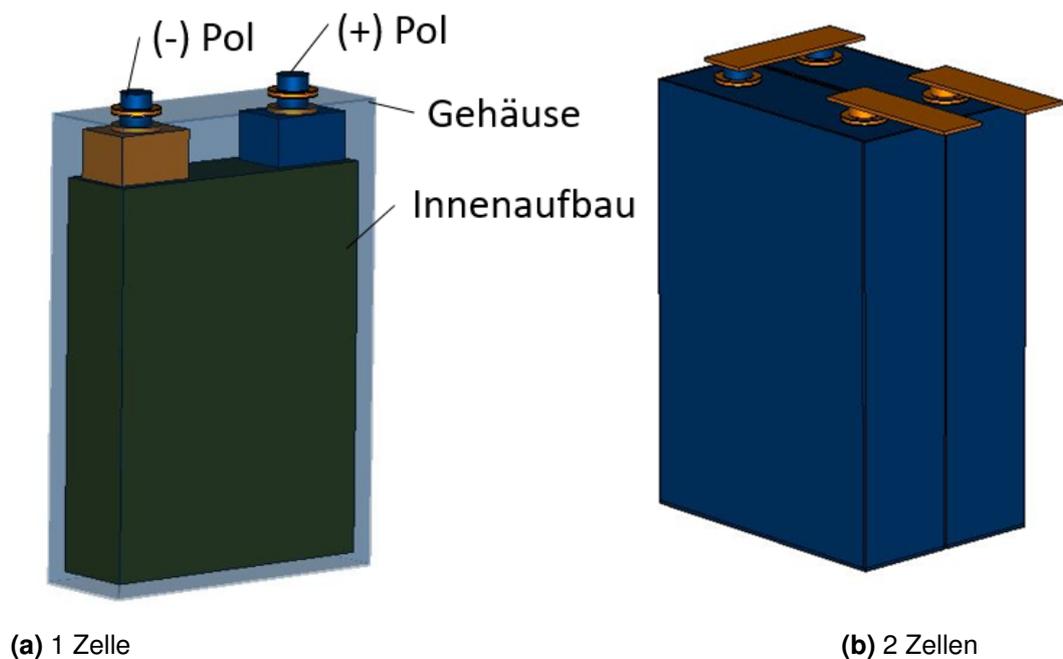
Dipl.-Phys. Jörg Petzold, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit

## 1 Einleitung

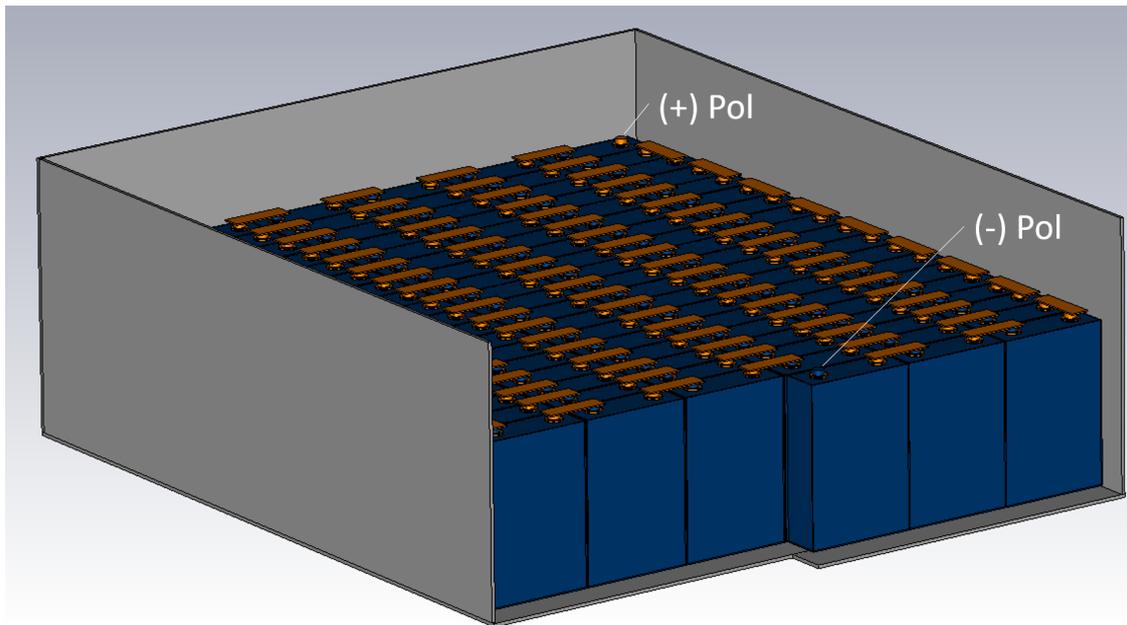
Emissionsfreie Elektroautos erfordern Traktionsbatterien mit hohem Energiespeicher als Teil des Bordnetzes. Implementierte, schnell schaltende Leistungsschalter im Wechselrichter und DC-DC-Wandler des Bordnetzes erzeugen Störungen bei Schaltfrequenzen und deren Oberschwingungen, die in das Batteriesystem einkoppeln können. Um die Wechselwirkung der Störungen zwischen der Batterie und dem Gesamtsystem zu analysieren, ist es erforderlich die Eingangsimpedanz der verwendeten Batterie im betroffenen Frequenzbereich zu ermitteln. Bisher basierten die meisten vorgestellten Methoden zur Bestimmung von HF-Impedanzen der Batterien auf experimentellen Messungen. Obwohl einige analytische Methoden zur Berechnung der Batterieimpedanzen vorgestellt wurden, sind solche Verfahren jedoch nur für einfache Zellen und Batterieanordnungen sinnvoll. Diese Arbeit stellt eine Simulationsmethode zur Bestimmung der HF-Impedanz der Traktionsbatterien dar. Die Methode basiert auf der Feldsimulation des konstruierten Batterie-modells. Damit ist die Bestimmung von Gleich- und Gegentaktimpedanzen möglich. Die Methode kann verwendet werden, um die Impedanz für Einzelzellen, sowie für Systeme aus mehreren solchen Zellen zu bestimmen. Sie wurde anhand verschiedener Batterietypen mit geringer Spannung in [5] untersucht. Das Verfahren wird in dieser Arbeit für die Impedanzbestimmung von prismatischen Zellen des Lithiumeisenphosphat-Typs ( $\text{Li-FePO}_4$ ) und von einer Hochspannungsbatterie aus einer Vielzahl dieser Zellen angewendet. Messungen der Impedanzen der genannten Batteriezellen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen. Die meisten veröffentlichten Arbeiten konzentrierten sich auf Messungen zur Bestimmung der Batterieimpedanzen. Doersam et al. präsentierten in [2] verschiedene Methoden im Zeit- und Frequenzbereich zur Messung der Batterieimpedanz. In [6], wurde eine Impedanzmessung einer Automobil-Traktionsbatterie unter Verwendung des Vektor-Netzwerk-Analysators (VNA) durchgeführt. Der Messbereich lag zwischen 300 kHz und 200 MHz. In [4] wurde ein Netzwerk Model für die Impedanznachbildung einer 360 V Traktionsbatterie erstellt. Das Model wurde mit passiven Komponenten nachgebaut, um EMV-Messungen nach Norm durchführen zu können. Eine analytische Berechnungsmethode wurde unter Verwendung der Leitungstheorie in [3] präsentiert. Die Rechenmethode kann für zylindrische Batteriezellen oder einfache linearen Anordnung verwendet werden. Aufgrund der Notwendigkeit einer effizienten Lösung für komplexe Strukturen von Batteriezellen und Anordnungen wie sie in E-Fahrzeugen Anwendung finden, wird in dieser Arbeit ein entsprechendes Simulationsverfahren vorgestellt. Das Verfahren kann die Impedanzen beliebiger Zellformen und Batterieanordnungen bestimmen. Es basiert auf der Kenntnis des Batterieinnenaufbaus. Mit dieser Methode ist es möglich, die Gleich- und Gegentaktimpedanzen zu bestimmen.

## 2 Simulation

Die LiFePO<sub>4</sub>-Einzelzellen besitzen eine prismatische Form mit den Abmaßen 120 mm x 45 mm x 188 mm. Sie weisen eine Einzelspannung von 3,2 V auf und werden in Reihe geschaltet, um eine Spannung von 400 V zu erreichen. Das Gehäuse der Zelle ist aus Aluminium. Der Innenaufbau besteht aus mehreren Aluminium- und Kupfer-Schichten, die übereinander gefaltet sind. Zwischen den Schichten befinden sich Elektroden aus Graphit und LiFePO<sub>4</sub>-Material, zusammen mit einem Elektrolyt und einem Separator. Der positive Pol (+ Pol) ist mit den Aluminiumschichten und der negative Pol (- Pol) ist mit den Kupferschichten verbunden. In [3] wurde ein Ansatz vorgestellt, in dem die komplexe innere Struktur der Batterie, bestehend aus Multielektroden, Elektrolyten und Separator im HF-Bereich als Massivleiter nachgebildet werden kann. Diese Form von Emulation wird für die Simulation verwendet. Dabei bleibt die Herausforderung die Bestimmung der elektromagnetischen Eigenschaften des definierten Massivmaterials. Die effektiven Werte der Permeabilität und der elektrischen Leitfähigkeit wurden zuerst berechnet und anschließend im Lauf der Parametrisierung im Simulationsmodell angepasst. Das homogene Material hat eine elektrische Leitfähigkeit  $\sigma_{\text{eff}}$  von  $3 \times 10^7$ , was vergleichbar mit der Leitfähigkeit von Aluminium ist. Dagegen hat die relative Permeabilität  $\mu_{\text{eff}}$  einen Wert von 50, dieser Wert kommt durch den Einfluss des LiFePO<sub>4</sub>-Materials zu Stande. Das Simulationsmodell für eine Zelle LiFePO<sub>4</sub> ist in Abb. 1a gezeigt. Abb. 1b zeigt das Modell zweier Zellen in Reihe mit ihren Verbindungen. Das Gehäuse ist aus Aluminium gemäß Fertigung und galvanisch von den beiden Polen getrennt. In Gegenteil zum realen Innenaufbau, besteht die innere Struktur des Simulationsmodells aus einem homogenen Material mit den oben beschriebenen elektrischen Eigenschaften. Abb. 2 präsentiert das Simulationsmodell der Traktionsbatterie. Es besteht aus 111 in Reihe geschalteten Zellen. Das Gehäuse der Gesamtbatterie besteht ebenfalls aus Aluminium. Die Simulation erfolgte mit der Finite-Integration-Technik von CST MICROWAVE STUDIO ® (CST MWS) [1].



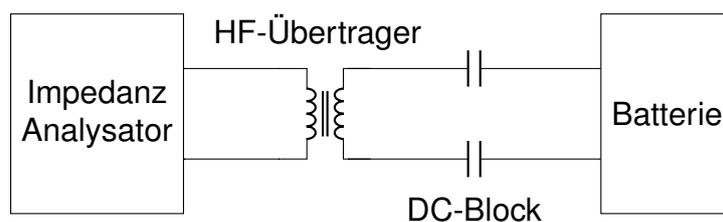
**Bild 1:** Simulationsmodell einzelner LiFePO<sub>4</sub>-Zellen



**Bild 2:** Simulationsmodell des Gesamtsystems

### 3 Messung

Für die Messungen wurde der Impedanzanalysator 4294A von Agilent verwendet. Aufgrund der hohen Spannung der Traktionsbatterie, wurde ein Kondensator als ein Gleichstromblock an jedem Pol eingebaut, wie in Abb. 3 dargestellt ist. Um das empfindliche Messgerät zusätzlich zu schützen, wurde ein HF-Übertrager in Reihe mit den Kondensatoren verbaut. Dieser entkoppelt das Messgerät von der Batterie galvanisch. Der Einfluss der Impedanzen der Leitungen, Kondensatoren und Übertrager wurde vor der Messung rauskalibriert. Die Messungen wurden mit einem Testsignal von 0,5 V von 20 kHz bis 110 MHz für Einzelzellen und bis 5 MHz für die Traktionsbatterie durchgeführt. Die Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt gezeigt und diskutiert.

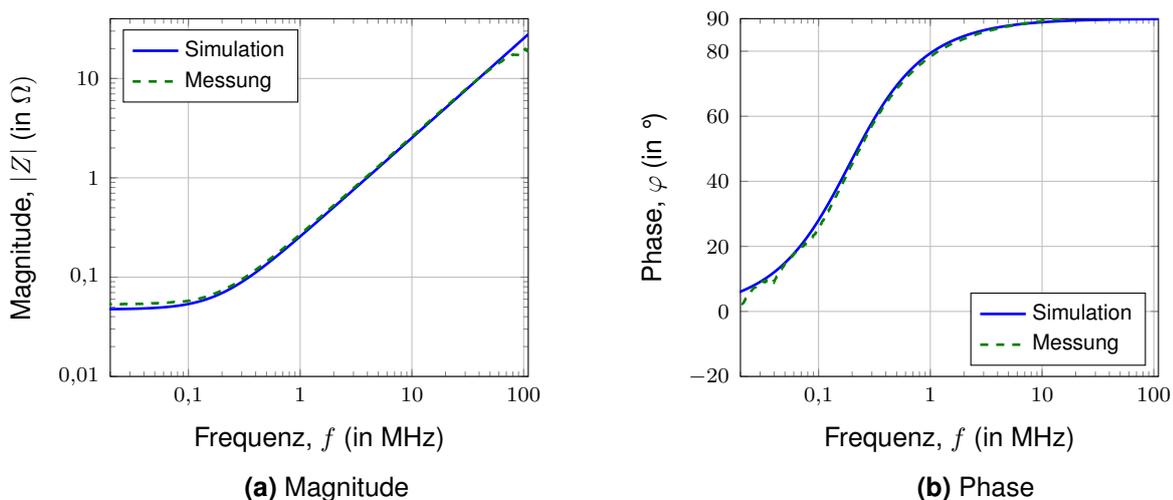


**Bild 3:** Messaufbau

#### 3.1 Auswertung

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse anhand der Amplitude und der Phase der Batterieimpedanzen mit den Messungen verglichen. Abb. 4 zeigt die Simulations- und Messergebnisse einer Zelle. Die Messungen und Simulationen weisen sowohl für die Magnitude als auch für die Phase eine gute Übereinstimmung auf. Die Impedanzergebnisse werden bei niedrigen Frequenzen vom Realteil dominiert, wobei diese Werte von der Temperatur und vom Ladezustand der Batterie (SoC) abhängig sind. Bei höheren Fre-

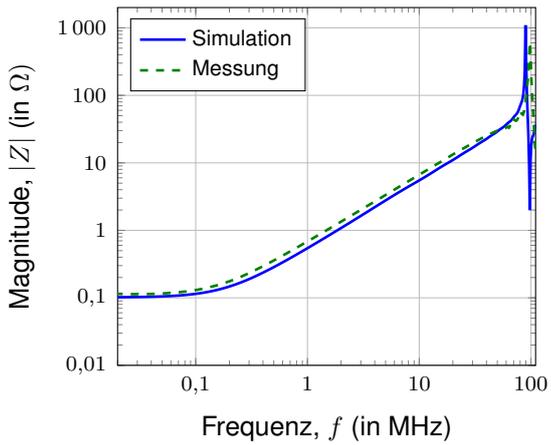
quenzen dominiert der induktive Teil, wobei dies hauptsächlich von der geometrischen Struktur der Batterien abhängt und weniger empfindlich gegenüber der Temperatur und dem SoC ist. Die Messergebnisse der zwei in Reihe geschalteten Zellen werden mit Simulationen in Abb. 5 verglichen. Das Simulationsmodell hierfür ist in Abb. 1b dargestellt. Die Simulationsergebnisse stimmen gut mit der Messung überein. Bei 97 MHz kann in den Graphen eine Resonanz beobachtet werden. Die Resonanz tritt aufgrund eines  $L - C$  Resonators auf.  $L$  resultiert durch die Batterie und  $C$  resultiert durch den Spalt zwischen den beiden Zellen. Die Resonanz kann sich verschieben, wenn der Abstand zwischen den Zellen geändert wird. Die Messung und Simulationsergebnisse der Gegentaktimpedanz der Traktionsbatterie sind in Abb. 6 dargestellt. Die Simulation stimmt auch hier mit der Messung überein. Die Magnitude zeigt ein induktives Verhalten mit einer Phase von  $90^\circ$ . Bei 2 MHz taucht eine Resonanz auf. Dafür sind die parasitären Kapazitäten zwischen den Verbindungen und zwischen den Gehäusen der Einzelzellen die Ursache. Hier könnten auch parasitäre Kapazitäten durch die Verbindungskabel innerhalb des Batteriesystems entstehen. Die asymmetrische Impedanz zwischen dem + Pol und dem Gehäuse in Abb. 7 zeigt wie erwartet ein kapazitives Verhalten mit einer Phase von  $-90^\circ$ , da die Magnitude über die Frequenz sinkt. Oberhalb von 1 MHz treten mehrere Resonanzen auf. Die erste Resonanz entsteht durch die Wechselwirkung der kapazitiven Kopplung zwischen Batterie und Gehäuse mit dem inneren induktiven Verhalten. Die zweite Resonanz ist dieselbe Resonanz wie bei der Gegentaktimpedanz.



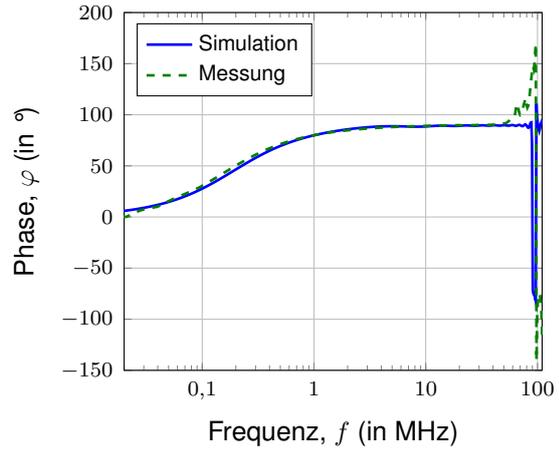
**Bild 4:** Messung und Simulation der Impedanz für eine Zelle

## 4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine Feldsimulationsmethode vorgestellt, um die Impedanz von Traktionsbatterien bei hohen Frequenzen zu bestimmen. Bei der Methode wird die Batteriezelle als 3D-Modell konstruiert, wobei ihre innere Struktur aus Mischelektroden mit Elektrolyten und Separator als homogenes festes Material modelliert wird. Nach der Definition der elektrischen Eigenschaften dieses Materials, kann die Simulation die Impedanz der komplexen Zelle liefern. Zum Bilden eines HV-Batteriesystems, werden mehrere Simulationsmodellzellen in Reihe geschaltet. Das Verfahren war in der Lage, genaue Ergebnisse für Batteriezellen und deren Netzwerke zu liefern. Mit dieser Methode konnten die asymmetrische Impedanz und die Gegentaktimpedanz der Traktionsbatterie bestimmt

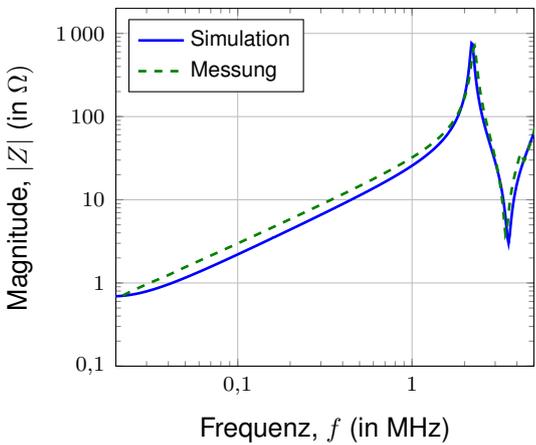


(a) Magnitude

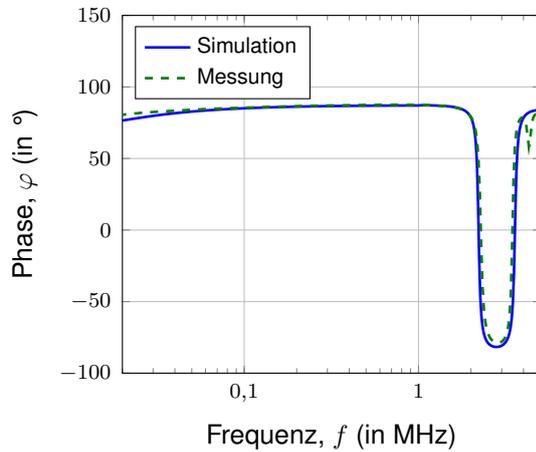


(b) Phase

**Bild 5:** Messung und Simulation der Impedanz für zwei Zellen

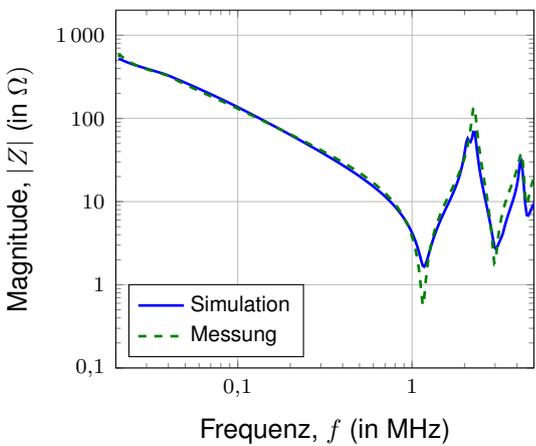


(a) Magnitude

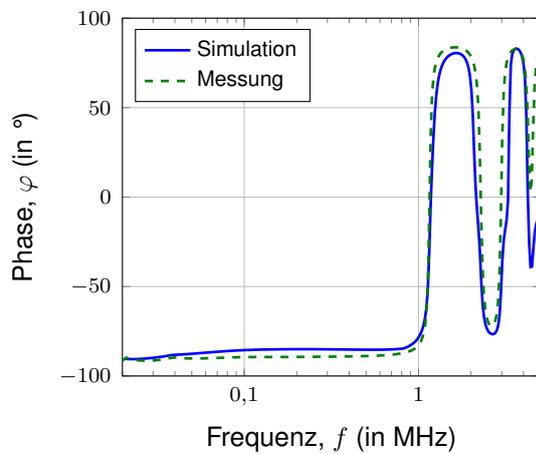


(b) Phase

**Bild 6:** Messung und Simulation der Gegentaktimpedanz der Traktionsbatterie



(a) Magnitude



(b) Phase

**Bild 7:** Messung und Simulation der asymmetrischen Impedanz der Traktionsbatterie

werden. Die Ergebnisse wurden von 20 kHz bis 110 MHz für Einzelzellen und bis 5 MHz für die Traktionsbatterie verglichen. Es wurde eine gute Übereinstimmung zwischen Simulationen und Messungen erzielt. Mit dieser Methode ist es möglich, das EMV-Verhalten von Batterien zu beobachten und vorherzusagen.

## 5 Danksagung

Diese Arbeit wurde unter dem Kennzeichen 16EMO0120K vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## Literatur

- [1] COMPUTER SIMULATION TECHNOLOGY: *CST Microwave Studio, Solvers, Transient Solver*. Darmstadt, Germany: CST AG, 2017. <https://www.cst.com/Products/CSTmws/Solvers/TransientSolver>
- [2] DOERSAM, T. ; SCHOERLE, S. ; HOENE, E. ; LANG, K. D. ; SPIEKER, C. ; WALDMANN, T.: High frequency impedance of Li-ion batteries. In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Dresden : IEEE, August 2015, S. 714–719
- [3] HOENE, E. ; GUTTOWSKI, S. ; SAIKLY, R. ; JOHN, W. ; REICHL, H.: RF-properties of automotive traction batteries. In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, 2003, S. 425–428
- [4] JESCHKE, S. ; MAARLEVELD, M. ; BAERENFAENGER, J. ; HIRSCH, H. ; TSIAPENKO, S. ; WALDERA, C. ; OBHOLZ, M.: Development of a passive impedance network for modeling electric vehicle traction batteries for EMI measurements. In: *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, S. 1–6
- [5] RAYA, Moustafa ; VICK, Ralf: A simulation method to determine the RF impedance of batteries. In: *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, S. 1–5
- [6] REUTER, M. ; FRIEDL, T. ; TENBOHLEN, S. ; KOHLER, W.: Influence of a traction battery's input impedance on conducted emissions of an automotive HV inverter. In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Denver : IEEE, August 2013, S. 229–234