

Bewertung verschiedener Verfahren zur Impedanzmessung von Batteriemodulen

Manuel Haug, IEH, Universität Stuttgart, Deutschland

Dr.-Ing. Michael Beltle, IEH, Universität Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen, IEH, Universität Stuttgart, Deutschland

1 Einleitung

In diesem Beitrag werden mögliche Vorgehensweisen zur Impedanzmessung von Batteriemodulen untersucht, die in Antriebsbatterien von Elektrofahrzeugen verwendet werden. Die Antriebsbatterie ist eine zentrale Komponente im Elektrofahrzeug und stellt für EMV Betrachtungen häufig eine Senke für hochfrequente Störströme dar. Daher bedarf es einer plausiblen Charakterisierung der Batterieimpedanzen für Gleich- und Gegentaktströme über einen möglichst großen Frequenzbereich. Die Herausforderung in der messtechnischen Umsetzung zur Impedanzbestimmung besteht durch die Batteriespannung und die hohe Batteriekapazität. Es bedarf daher Messverfahren, welche die Batterieimpedanz über einen großen Frequenzbereich messen können und gleichzeitig das Messequipment vor DC-Strömen und Kurzschlüssen der Batteriemodule schützen. In einem zweiten Schritt können mit den messtechnisch ermittelten Impedanzverläufen eines Moduls passive RLC-Ersatztopologien bestimmt werden, die als Lastnachbildung für EMV-Komponententests eingesetzt werden können.

2 Vergleich zweier Methoden zur Impedanzmessung eines Batteriemoduls

Das im Folgenden untersuchte Batteriemodul besitzt eine Kapazität von 49,5 Ah und eine nominale Spannung von 22,2 V_{DC}. Bild 1 zeigt das Batteriemodul, sowie die Kontaktierung der Pole für die Messanschlüsse. Intern besteht das Batteriemodul aus zwölf Lithium-Ionen-Zellen, die in einer 6s2p-Struktur angeordnet sind, d.h. jeweils zwei Zellen parallel (grün), sechs Mal in Serie (gelb). Das untersuchte Modul kommt bei Elektrofahrzeugen in Traktionsbatterien zum Einsatz. Für 400 V Systeme werden hierzu 18 dieser Module seriell geschaltet, für eine weitere Erhöhung der Batteriekapazität entsprechend mehrere Modulstränge dazu parallel.

Zum Zeitpunkt der Impedanzmessungen betrug die Modulspannung 21,5 V, was einem State of Charge (SoC) der Batterie von ca. 50% entspricht. Die Kontaktierung der Batteriepole erfolgt mittels koaxialer N-Buchsen, deren Außenleiter mit dem Modulgehäuse verbunden sind.

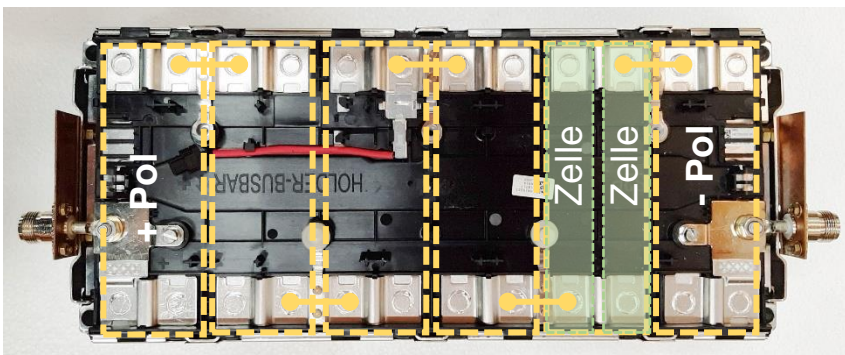
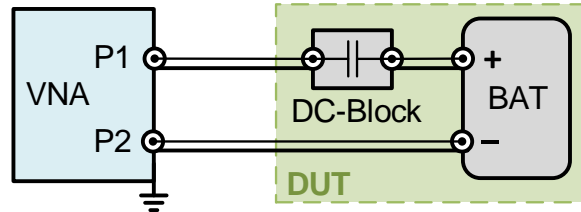
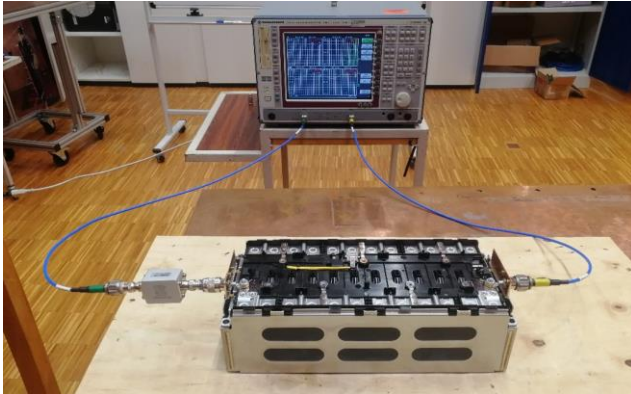


Bild 1 Links: Batteriemodul mit 12 Li-Ion Zellen in 6s2p Struktur.
Rechts: Kontaktierung der Batteriepole mittels N-Buchsen.

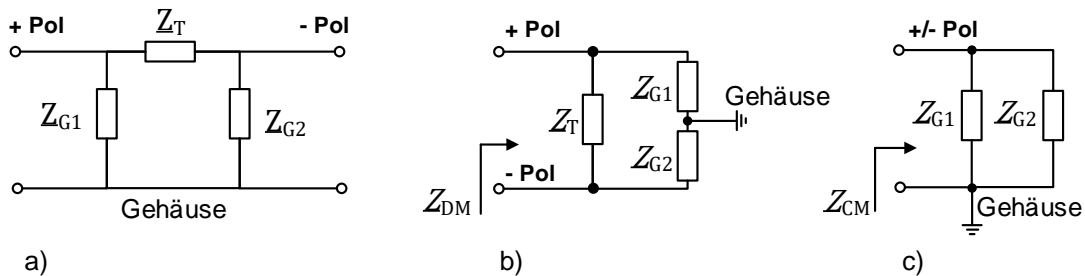
2.1 Messung mit Netzwerkanalysator und DC-Block

Mit einem vektoriellen Netzwerkanalysator (VNA) können die S-Parameter des Batteriemoduls messtechnisch bestimmt werden. Um die VNA-Ports vor DC-Strömen zu schützen, wird eine serielle Kapazität als DC-Block eingesetzt. Bild 2 zeigt den Messaufbau mit VNA, Batteriemodul und DC-Block.



a) Messaufbau mit VNA, DC-Block und Batteriemodul b) Blockschaltbild des Messaufbaus

Aus den gemessenen S-Parametern werden die Y-Parameter und die daraus abgeleiteten Admittanzen $Y_{1,2,3}$ für das π -Ersatzschaltbild nach den bekannten Gleichungen bestimmt [1]. Im Folgenden werden die Ersatzschaltungen aus Gründen der besseren Lesbarkeit mit den äquivalenten Impedanzen Z_T , Z_{G1} , Z_{G2} beschriftet. Das π -Ersatzschaltbild eignet sich gut als physikalisches Modell für die Betrachtung des Batteriemoduls aufgrund des Durchgangselements $Z_T = 1/Y_3$ zwischen den Batteriepolen und den parasitären Elementen $Z_{G1,2} = 1/Y_{1,2}$ an den Messanschlüssen gegenüber der gemeinsamen Referenzmasse, dem Modulgehäuse. Bild 3 zeigt den Zusammenhang zwischen dem π -Ersatzschaltbild und den abgeleiteten Ersatzschaltbildern für die Gegentaktimpedanz Z_{DM} und die Gleichtaktimpedanz Z_{CM} .



a) π -Ersatzschaltung des Batteriemoduls mit + Pol, - Pol und Gehäuse
 b) Gegentakt-Impedanz Z_{DM}
 c) Gleichtakt-Impedanz Z_{CM}

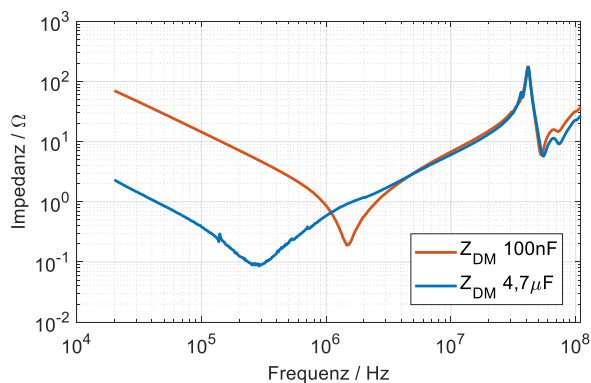
Die Gegentakt- (Z_{DM}) und Gleichtakt- (Z_{CM}) Impedanz berechnet aus dem π -ESB und der Y-Matrix zu:

$$Z_{DM} = Z_T \parallel (Z_{G1} + Z_{G2}) = \left(Y_3 + \frac{1}{Y_1^{-1} + Y_2^{-1}} \right)^{-1} \quad (1)$$

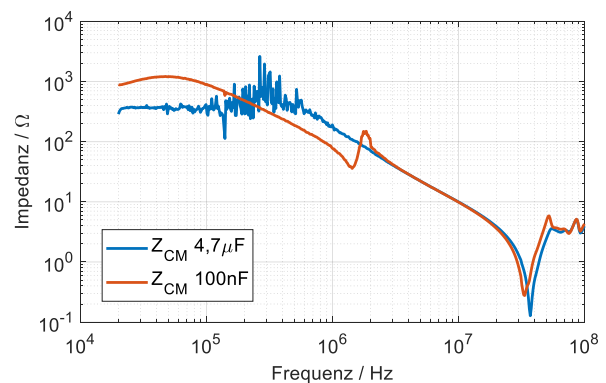
$$Z_{CM} = Z_{G1} \parallel Z_{G2} = (Y_1 + Y_2)^{-1} \quad (2)$$

Bild 4a) zeigt die Gegentakt-Impedanzen Z_{DM} des Messaufbaus, gemessen mit zwei verschiedenen vorgeschalteten DC-Blöcken. Die Impedanzverläufe werden im unteren Frequenzbereich durch die serielle Kapazität der DC-Blöcke begrenzt. Diese überlagern die deutlich niederohmigere Modul-Impedanz in diesem Frequenzbereich. Für Frequenzen größer 4 MHz stimmen die beiden Messungen qualitativ überein, im Bereich darunter ergeben sich abweichende Verläufe. Mit dem größeren DC-Block ($C = 4,7\mu\text{F}$) sinkt entsprechend die serielle Impedanz und der aussagekräftige Frequenzbereich der Messung erweitert sich nach unten bis ca. 500 kHz. Theoretisch wären auch DC-Blöcke mit größeren Kapazitäten vorstellbar um den aussagekräftigen Frequenzbereich weiter nach unten zu verschieben. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass es zu kritischen Stromamplituden beim Laden des DC-Blocks kommen kann je größer dessen Kapazität und damit dessen Energieinhalt wird. Der Ladestrom fließt über den entsprechenden $50\ \Omega$ Messport des VNAs und kann diesen u.U. zerstören. Es ist daher unbedingt der maximal zulässige Eingangsstrom an den Ports des VNAs zu beachten.

Bild 4b) zeigt die Gleichtakt-Impedanzen Z_{CM} des Batteriemoduls mit den gleichen DC-Blöcken. Die Resonanzstellen im Bereich zwischen 1 – 2 MHz bei der Messung mit dem 100 nF DC-Block sind durch dessen bedrahtete Folienkondensatoren und bauartbedingter parasitärer Kopplung über das Gehäuse zu erklären. Weiter begrenzt die Messdynamik des VNAs im unteren Frequenzbereich den kapazitiven Verlauf im hochohmigen Bereich. Die Messungen wurden mit unterschiedlichen IF-Bandbreiten durchgeführt, was eine Glättung und leichte Erhöhung der Messbereichsgrenze bis zu ca. $1\ \text{k}\Omega$ bewirkt. Auch hier stimmen die Messungen ab ca. 4 MHz qualitativ überein und zeigen ein kapazitives Verhalten mit ca. $1,6\ \text{nF}$. Die erste signifikante Serienresonanz liegt bei ca. 33 bzw. 37 MHz.



a)



b)

Bild 4: a) Gegentakt- und b) Gleichtakt-Impedanzverläufe des Batteriemoduls mit zwei DC-Blöcken

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die Impedanzbestimmung des Batteriemoduls mit einem Netzwerkanalysator, aufgrund des nötigen DC-Blocks, insbesondere im LF-Bereich kleiner 1 MHz, nur bedingt geeignet ist. Die Messung der Gegentaktimpedanz wird durch die serielle Kapazität des DC-Blocks begrenzt. Weiter besitzen Netzwerkanalysatoren einen stark frequenzabhängigen und vergleichsweise geringen Messdynamikbereich, was zu erheblichen Messunsicherheiten bei Resonanzstellen im nieder- und hochohmigen Bereich führt. Bei den hier durchgeführten Messungen wird dies bei den Kapazitäten der Gleichtaktimpedanz im LF-Bereich sichtbar.

2.2 Messung mit Impedanzanalysator und BIAS-Spannung

Das Messverfahren eines Impedanzanalysators („Auto-balancing bridge method“) erlaubt deutlich präzisere Messungen über einen weiten Frequenzbereich mit höherem Dynamikbereich als dies mit dem Netzwerkanalysator möglich ist [2]. Für die Impedanzmessung eines Batteriemoduls ist hierbei eine regelbare BIAS-Spannungsquelle hilfreich, die bei vielen Impedanzanalysatoren bereits integriert, oder als optionales Zubehör verfügbar ist. Wird die BIAS-Spannungsquelle auf exakt die gleiche Spannung wie das zu untersuchende Batteriemodul geregelt und parallel zu dieser geschaltet, kann kein DC-Strom aus der Batterie in das Messgerät fließen. Für die Überprüfung der korrekten Messanordnung wird vorgeschlagen, anstelle der Batterie zunächst eine regelbare Laborspannungsquelle zu verwenden, deren Stromlimit auf wenige Milliampere begrenzt wird, um das Setup gefahrlos testen zu können.

Bild 5a) zeigt die Messanordnung zur Bestimmung der Gegentaktimpedanz mit SMA-Buchse und Kupferschienen zur Kontaktierung der Batteriepole mit der Probe des Impedanzanalysators. Bei dieser Anordnung wird der Außenleiter der Messprobe mit dem Minuspol der Batterie verbunden und damit auf das Referenzpotential GND des Impedanzanalysators gelegt. Das Batteriemodul muss daher isoliert aufgestellt werden und das Modulgehäuse darf nicht über die Labormasse oder andere galvanische Kontaktierung mit dem Schutzleiter (PE, GND) des Impedanzanalysators verbunden sein.

Bild 5b) zeigt die Gleichtakt-Messanordnung zur Bestimmung der Kapazität zwischen einem Batteriepol und dem Modulgehäuse über die Kontaktierung mittels N-Buchse direkt am Batteriepol. Anders als bei der VNA-Messung wird hierbei allerdings nicht die tatsächliche Gleichtaktimpedanz gemessen, wie in Bild 3c) dargestellt, da der gegenüberliegende Batteriepol nicht mit der Probe verbunden ist. Dies würde erneut einen DC-Block erfordern, um keinen Kurzschluss zwischen den Batteriepolen zu erzeugen. Wird das π -Ersatzschaltbild aus Bild 3 betrachtet, wird mit dieser Messanordnung also Z_{G1} parallel zu $Z_T + Z_{G1}$ gemessen. Der Vorteil an dieser Methode ist, dass hierzu weder eine BIAS-Spannung noch ein DC-Block verwendet werden muss. Die Messung kann also auch bei Batterien durchgeführt werden, deren Spannung über der maximal möglichen BIAS Spannung des Messgeräts liegen. Die Gleichtakt-Kapazität gegen das Modulgehäuse wird dabei korrekt gemessen.

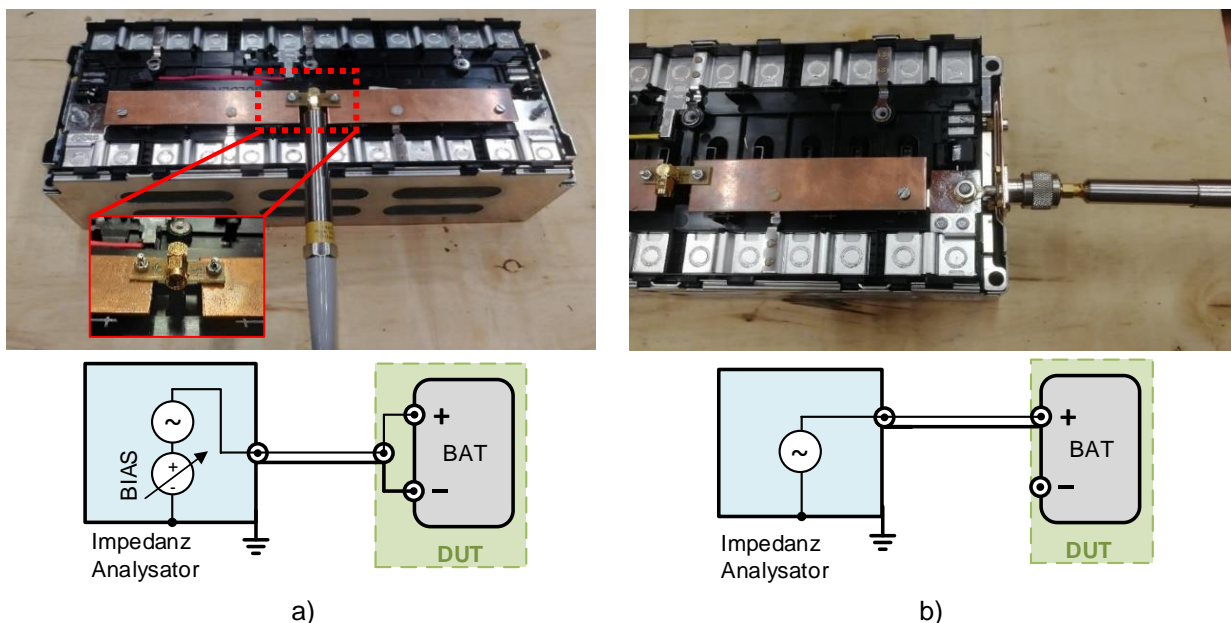
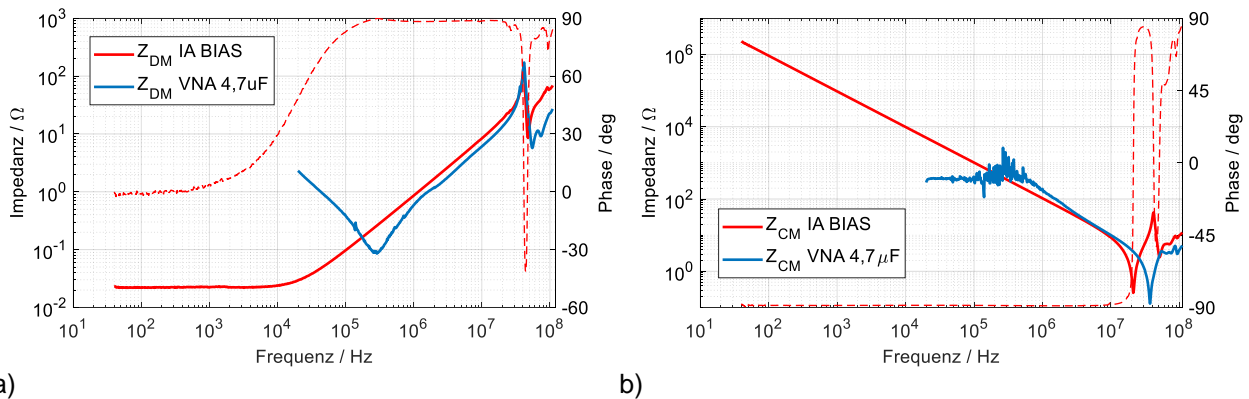


Bild 5: Messanordnung mit Impedanzanalysator-Probe

- Gegentaktimpedanz: Niederinduktive Anbindung der Probe mittels SMA-Buchse und Kupferschienen an die Batteriepole, links und rechts am Modul
- „Gleichtaktimpedanz“: Messung zwischen einem Batteriepol und dem Modulgehäuse

Bild 6 zeigt die Messergebnisse der Methode Impedanzanalysator mit BIAS Spannung („IA BIAS“) im Vergleich zu der in Kapitel 2.1 vorgestellten Methode mit Netzwerkanalysator und DC-Block mit großer Kapazität („VNA 4,7uF“). Sowohl bei der Gegentakt- wie auch Gleichtaktimpedanz kann mit der BIAS Methode ein deutlich größerer Frequenzbereich hin zu niedrigeren Frequenzen plausibel gemessen werden. Die VNA-Messungen sind wie in Kapitel 2.1 beschrieben nur für den oberen Frequenzbereich ab ca. 1 MHz aussagekräftig und bestätigen für diesen Bereich die Messergebnisse mit der BIAS Methode.



a) für Gegentaktimpedanz Z_{DM}
b) für Gleichtaktimpedanz Z_{CM}

Bild 6: Vergleich der Messmethoden „Impedanzanalysator mit BIAS-Spannung“ und „VNA mit DC-Block“

Die Gegentaktimpedanz Z_{DM} zeigt ab ca. 20 kHz ein induktives Verhalten und darunter einen Serienwiderstand im Milliohm-Bereich. Die Induktivität ist etwa 40 nH größer als bei der Messung mit VNA. Dies kann durch die zusätzlichen Kupferschienen zur Kontaktierung der SMA Probe an die Batteriepole erklärt werden. Die Frequenz der ersten auftretenden Parallelresonanz liegt bei beiden Messmethoden gleich bei 41,2 MHz. Der ermittelte Impedanzverlauf zeigt qualitativ das gleiche Verhalten wie die in [3] vorgestellte Batterie mit vergleichbarer Kapazität.

Die Gleichtaktimpedanz Z_{CM} zeigt im Bereich 40 Hz – 10 MHz kapazitives Verhalten, äquivalent zur VNA Messung. Die erste Serienresonanz tritt bei 21 MHz auf und liegt damit ca. 18 MHz unter der Resonanzfrequenz, die mit dem VNA bestimmt wurde. Diese Abweichung resultiert aus der weiter oben bereits erwähnten, unterschiedlichen Messanordnung der VNA- und IA-Methode: Bei der IA-Methode wird die Impedanz $Z_{G1} || (Z_T + Z_{G2})$ gemessen, im Gegensatz zu $Z_{G1} || Z_{G2}$, die bei der VNA-Methode bestimmt wurde.

3 Ableitung passiver Ersatzschaltungen

Die durch die BIAS-Methode bestimmten Impedanzverläufe können bis zur ersten Resonanzstelle durch einfache RLC-Schaltungstopologien nachgebildet werden. Für die Gegentaktimpedanz wird dazu ein Parallelschwingkreis mit seriellem Dämpfungswiderstand verwendet (Bild 7a) für die Gleichtaktimpedanz entsprechend ein Serienschwingkreis (Bild 7b).

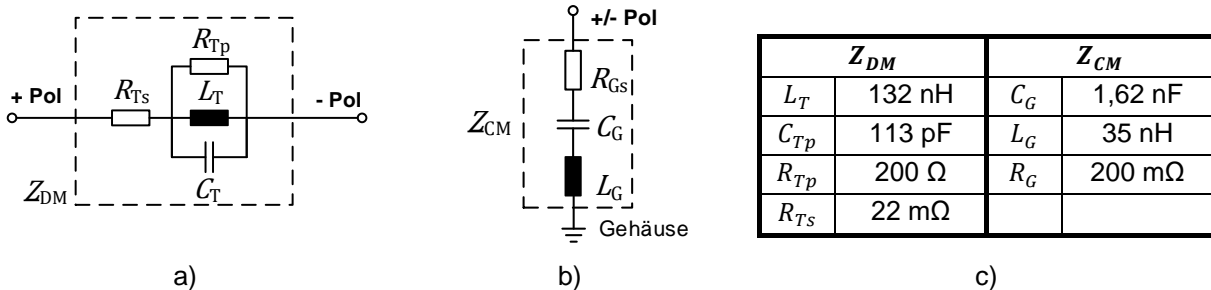


Bild 7: Schaltungstopologien zur Nachbildung der a) Gegentakt- und b) Gleichtakt-Impedanz des Batteriemoduls bis zur ersten Resonanzstelle c) aus „IA BIAS“ Messung abgeleitete Bauteilwerte

Um sowohl die Gleichtakt- wie auch die Gegentaktimpedanz in einer Ersatzschaltung kombiniert darzustellen, müsste eine Vierpol-Topologie entwickelt werden, die beide Impedanzen kombiniert abbilden kann. Dies erfordert eine nicht triviale Netzwerksynthese und wird im Folgenden nicht weiter betrachtet. Bei Lastnachbildungen für die EMV-Analyse in Ladeszenarien kommt hinzu, dass im Gegentakt-Pfad ein gewisser ohmscher DC-Lastwiderstand enthalten sein muss, der die DC-Ladeleistung aufnehmen kann und in Wärme umwandelt. Hierbei werden Leistungswiderstände verwendet, die im Frequenzbereich selbst ein induktives Verhalten aufweisen. Der Wert R_{DC} ist dabei von der Ladeleistung P_{Lade} und dem zu prüfenden Ladestrom $I_{Lade,DC}$ abhängig und bildet damit einen gewissen Zeitpunkt im Ladeverlauf der Batterie nach (I-Laden). Typische Werte für R_{DC} liegen daher im Bereich einiger zehn Ohm und berechnen sich nach

$$R_{DC} = P_{Lade} / I_{Lade,DC}^2 \quad (3)$$

Die HF-Gegentaktimpedanz Z_{DM} des Batteriemoduls muss parallel zu R_{DC} angeordnet werden und für DC-Ströme abgekoppelt werden, wie in Bild 8 dargestellt. Als DC Block wird hierzu eine große Kapazität C_{Block} benötigt, die für den betrachteten Frequenzbereich niederohmiger ist, als die Gegentaktimpedanz Z_{DM} des Batteriemoduls. Für typische EMV-Anwendungen, beginnend bei 9 kHz würde daher ein Blockkondensator mit mindestens 20 μF und sehr niedrigem ESL benötigt um bei 9 kHz niederohmiger als 1 Ohm zu sein.

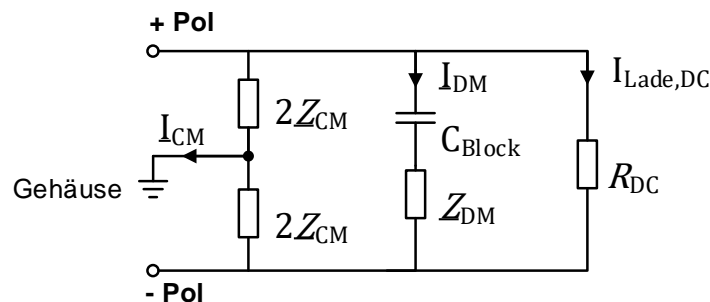


Bild 8: Lastnachbildung einer Batterie mit DC-Widerstand R_{DC} , zur Aufnahme der Ladeleistung. Die Gegentaktimpedanz Z_{DM} für HF-Störströme wird dazu parallelgeschaltet, abgekoppelt durch eine große Kapazität C_{Block}

Für eine erste Abschätzung ist es daher sinnvoll die Gegentaktimpedanz Z_{DM} zu vernachlässigen vor allem die Gleichtaktimpedanz Z_{CM} mit deren Serienresonanzstellen in der Lastnachbildung zu

berücksichtigen, zumal die daraus resultierenden Gleichtaktströme I_{CM} relevanter für die Feldabstrahlung sind. Für die Betrachtung eines einzelnen Moduls kann hierzu die Ersatztopologie aus Bild 7b) herangezogen werden. Für die Betrachtung komplexerer Batteriestrukturen, welche aus mehreren Modulen zusammengesetzt sind, können hier nur qualitative Abschätzungen getroffen werden. Für eine 400 V Batterie, bestehend aus 18 seriell geschalteten Batteriemodulen, verzehnfacht sich die Kapazität C_G im Gleichtakt-Pfad entsprechend und die Serienresonanz verschiebt sich im Frequenzbereich weiter nach unten. Durch den geometrisch ausgedehnten Aufbau und die Verkabelung der einzelnen Module kommt es in solchen Batterien zwangsläufig zu weiteren Streugrößen und die Gesamtkapazität im Gleichtakt-Pfad wird tendenziell größer, als die Addition der einzelnen Modulkapazitäten. Entsprechende Messungen aus der Literatur zeigen diesen Effekt; so wird in [4] unter anderem eine 360 V Batterie bestehend aus 96 Li-Ion Zellen vorgestellt, deren Gleichtakt-Kapazität ca. 30 nF beträgt und deren erste Serienresonanz bei 1 MHz auftritt.

4 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag werden zwei Ansätze zur Impedanzbestimmung von Batteriemodulen vorgestellt. Es werden die Gegentakt- und die Gleichtaktimpedanz eines Moduls mit 49,5 Ah und 22,2 V bestimmt, welches in der Antriebsbatterie für Elektrofahrzeuge verwendet wird. Die beiden vorgestellten Messmethoden zeigen sehr gut übereinstimmende Ergebnisse im Frequenzbereich 4 – 110 MHz und lassen sich somit gegenseitig validieren. Die Messmethode mit Impedanzanalysator und BIAS-Spannung erlaubt es auch im niederfrequenten Bereich die Gegentaktimpedanz des Batteriemoduls zu ermitteln, was mit einem Netzwerkanalysator und DC-Block nicht möglich ist. Weiter kann mit einem Impedanzanalysator auch bei Batterien mit höherer Spannung die Kapazität und die Resonanzstellen des Gleichtakt-Pfades bestimmt werden. Mit den messtechnisch bestimmten Impedanzverläufen des untersuchten Batteriemoduls können passive RLC-Netzwerke entwickelt werden, welche als Lastnachbildung für EMV-Komponententests eingesetzt werden können. Besonders die Gleichtaktimpedanzen sind hier von Interesse, da deren Serien-Resonanzstellen zu hohen Amplituden der Gleichtaktströme führen können.

Literaturangaben

- [1] R.Feldtkeller: Einführung in die Vierpoltheorie der elektrischen Nachrichtentechnik, S. Hirzel-Verlag Stuttgart, 1962
- [2] Agilent Technologies: Agilent Impedance Measurement Handbook, www.agilent.com/find/impedance
- [3] T.Doersam, S.Schoerle: High Frequency Impedance of Li-ion Batteries, IEEE EMC Symposium 2015
- [4] S.Jeschke, M.Maarleveld, J.Baerenfaenger: Development of a Passive Impedance Network for Modeling Electric Vehicle Traction Batteries for EMI Measurements, Proc. of the 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE 2017