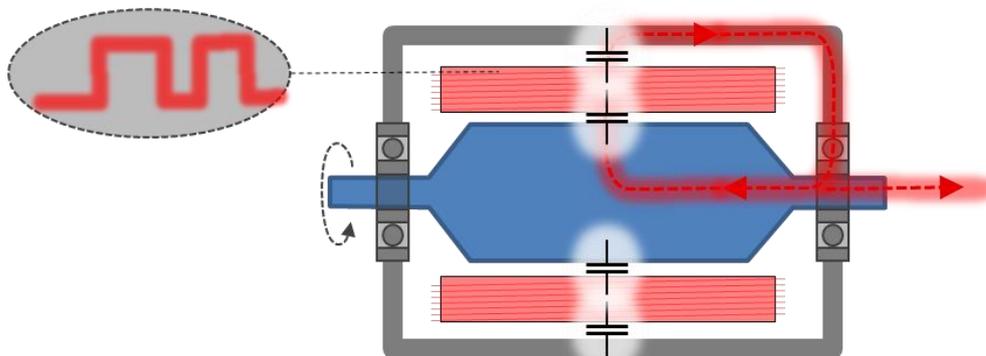


# HF-Eigenschaften von Wellenkontaktierungen in Abhängigkeit zur Drehzahl

Dr. Bastian Arndt, AVL, Deutschland  
M. Eng. Mario Kießlich, AVL, Deutschland  
Dr. Peter Olbrich, AVL, Deutschland  
Robin Michelberger, ZF Friedrichshafen AG, Deutschland  
Dr. Matthias Beringer, ZF Friedrichshafen AG, Deutschland

## 1 Einleitung

Innerhalb von Elektromotoren für automobiler HV-Anwendungen wird der Bedarf an EMV-Maßnahmen in und um den Elektromotor immer wichtiger. Ein möglicher Ausbreitungspfad für EMV-Störungen auf Systemebene ist hierbei die rotierende Motorwelle [1]. Transientes Schaltverhalten aus dem angeschlossenen Wechselrichter wird hierbei über die Statorwicklungen kapazitiv auf die Motorwelle übertragen und kann sich im schlimmsten Fall unkontrolliert im System ausbreiten (Bild 1). Eine mögliche Maßnahme zur Unterdrückung dieser Störausbreitung ist eine Kontaktierung der rotierenden Motorwelle gegenüber dem Motorgehäuse. Zur Wellenkontaktierung sind Lösungen von unterschiedlichen Herstellern verfügbar.



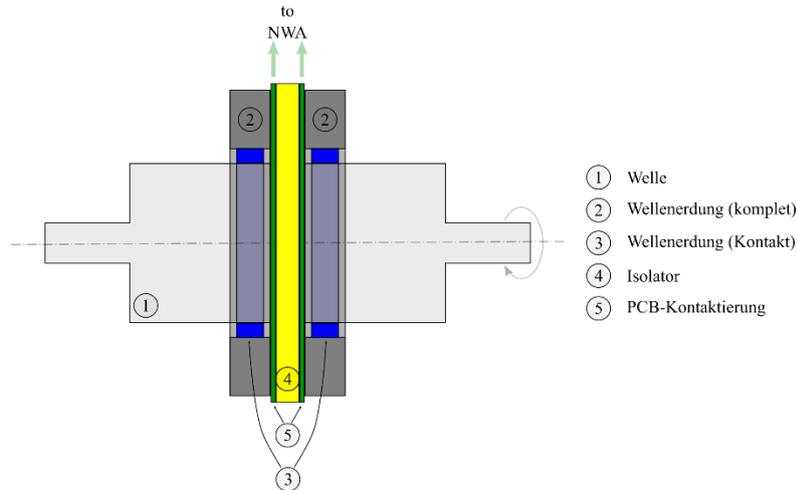
**Bild 1:** Schematische Darstellung eines EMV-Störausbreitungspfad innerhalb eines elektrischen Motors für Traktionsanwendungen

## 2 Messverfahren

Leider werden die Eigenschaften dieser Kontaktverfahren häufig unter statischen Bedingungen, bzw. im Stillstand des Motors angegeben. Auch ist in der Literatur kein normatives Verfahren bekannt um die frequenzabhängigen Kontaktierungseigenschaften bei unterschiedlichen Drehzahlen zu messen und zu vergleichen.

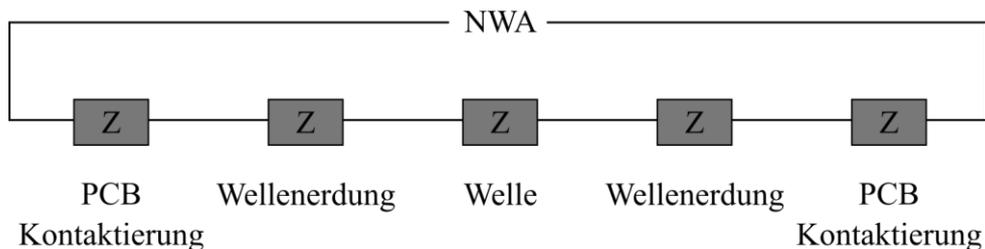
Es wurde daher auf ein Verfahren zurückgegriffen, welches auch bei Messaufbauten von Kugellagern Verwendung findet. Der schematische Messaufbau wird in Bild 2 dargestellt.

Hierbei wird die Impedanz von zwei Wellenkontaktierungen (2) auf eine rotierende Welle (1) mittels eines Netzwerkanalysators (NWA) gemessen. Die beiden Wellenkontaktierungen (2) sind hierbei jeweils mittels einer Leiterplatte (5) kontaktiert und durch einen Isolator (4) getrennt. Mithilfe dieser Messanordnung bleibt die Kontaktierungen zum Netzwerkanalysator unbeweglich, während die Welle rotieren kann.



**Bild 2:** Schematische Darstellung eines Messverfahrens zur Untersuchung des drehzahlabhängigen Impedanzverhaltens von Wellenkontaktierungen

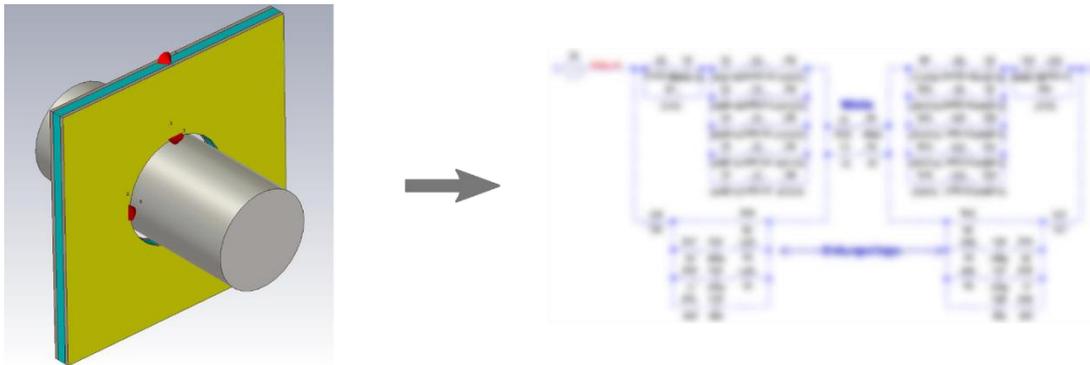
Bei dieser Anordnung werden die Eigenschaften von zwei Wellenkontaktierungen, des Messaufbaus und der Welle gemessen (Bild 3). Die Eigenschaften des Messaufbaus und der Welle müssen bekannt sein, um diese von den Impedanzeigenschaften der Wellenkontaktierungen zu separieren. Sind diese bekannt und von den Messdaten separiert, erhält man die Impedanzeigenschaften von zwei Wellenkontaktierungen. Aus diesen Messdaten kann die Impedanzeigenschaft einer Kontaktierung berechnet werden.



**Bild 3:** Schematische Darstellung der Impedanzaufteilung eines Messaufbaus zur Untersuchung des drehzahlabhängigen Impedanzverhaltens von Wellenkontaktierungen

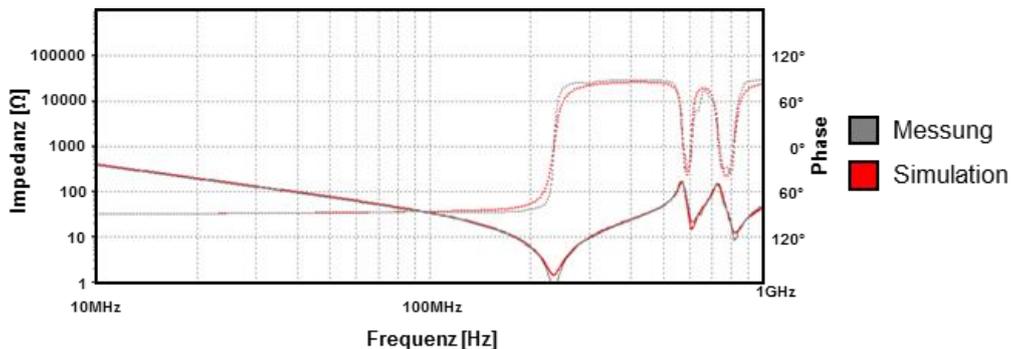
Hierbei stellt die Separation des Messaufbaus vom Messobjekt eine nicht einfach zu lösende Aufgabe dar. Übliche Kalibrierverfahren für Netzwerkanalysatormessungen stoßen hierbei schnell an ihre Grenzen. Daher wurde in diesem Fall auf eine Nachmodellierung des Messaufbaus mittels einer 3D-Feldsimulation zurückgegriffen (Bild 4). Aus den geometrischen Eigenschaften des Messaufbaus wurde eine RLC-

Ersatzschaltung generiert, welche im Anschluss verwendet wurde, um die Eigenschaften der Wellenkontaktierung aus den Messdaten zu bestimmen.



**Bild 4:** Schematische Darstellung einer simulationsgestützten Datennachbearbeitung

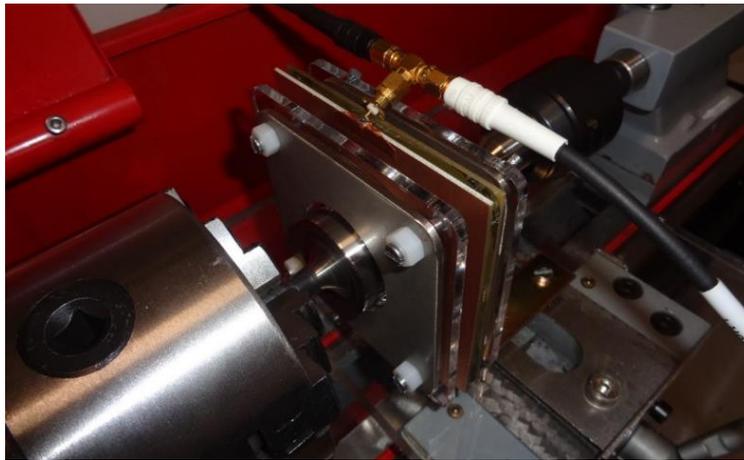
In Bild 5 wird eine Korrelation zwischen dem gemessenen Impedanzverlauf (grau) des Messaufbaus und der Beschreibung durch RLC-Ersatzelemente (rot) gezeigt. Hierbei wird der Messaufbau durch die RLC-Ersatzelemente hinreichend genau beschrieben.



**Bild 5:** Gegenüberstellung der Impedanzeigenschaften des simulierten und gemessenen Messadapters

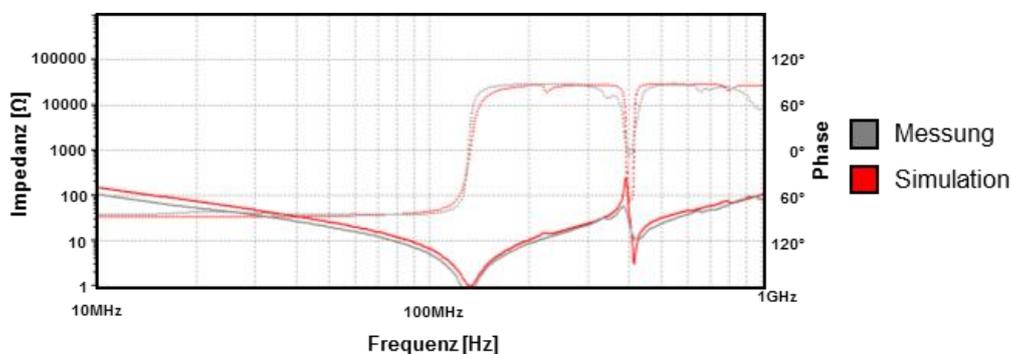
### 3 Messung und Verifikation der Methode

Die Anwendbarkeit der Messmethode wird anhand von sechs unterschiedlichen Wellenkontaktierungen verifiziert. Hierbei wird das frequenzabhängige Kontaktierungsverhalten im Bereich von 10 kHz bis 500 MHz im Stillstand und bei unterschiedlichen Drehzahlen bis 2000 rpm untersucht (Bild 6). Hierbei stellte sich heraus, dass die Kontaktierungen nach dem Aufschieben auf die Welle deutlich niedrigere Impedanzwerte aufwiesen als nach der ersten Inbetriebnahme. Um eine realitätsnahe Messung zu gewährleisten wurden die Wellenkontaktierungen daher vor der ersten Stillstandmessung für einige Minuten bei 600 rpm betrieben und anschließend bei 0 rpm die Impedanz der Wellenkontaktierungen im Stillstand gemessen.



**Bild 6:** Messaufbau zur Untersuchung des drehzahlabhängigen Impedanzverhaltens von Wellenkontaktierungen bis 2000 rpm

Basierend auf den daraus entstandenen Messergebnissen wurden RLC-Ersatzelemente der Wellenkontaktierungen erstellt. In Bild 7 werden die Impedanzeigenschaften exemplarisch bei 1500 rpm für eine Wellenkontaktierung dargestellt, um die Qualität der Messmethode und der anschließenden simulationsbasierenden Extraktion der Welleneigenschaften darzustellen. Hierbei zeigen gemessene (grau) und simulierte (rot) Impedanzeigenschaften eine hinreichend genaue Übereinstimmung auf. Im nachfolgenden wird daher nur noch auf die extrahierten Impedanzeigenschaften einer Wellenkontaktierung zurückgegriffen.

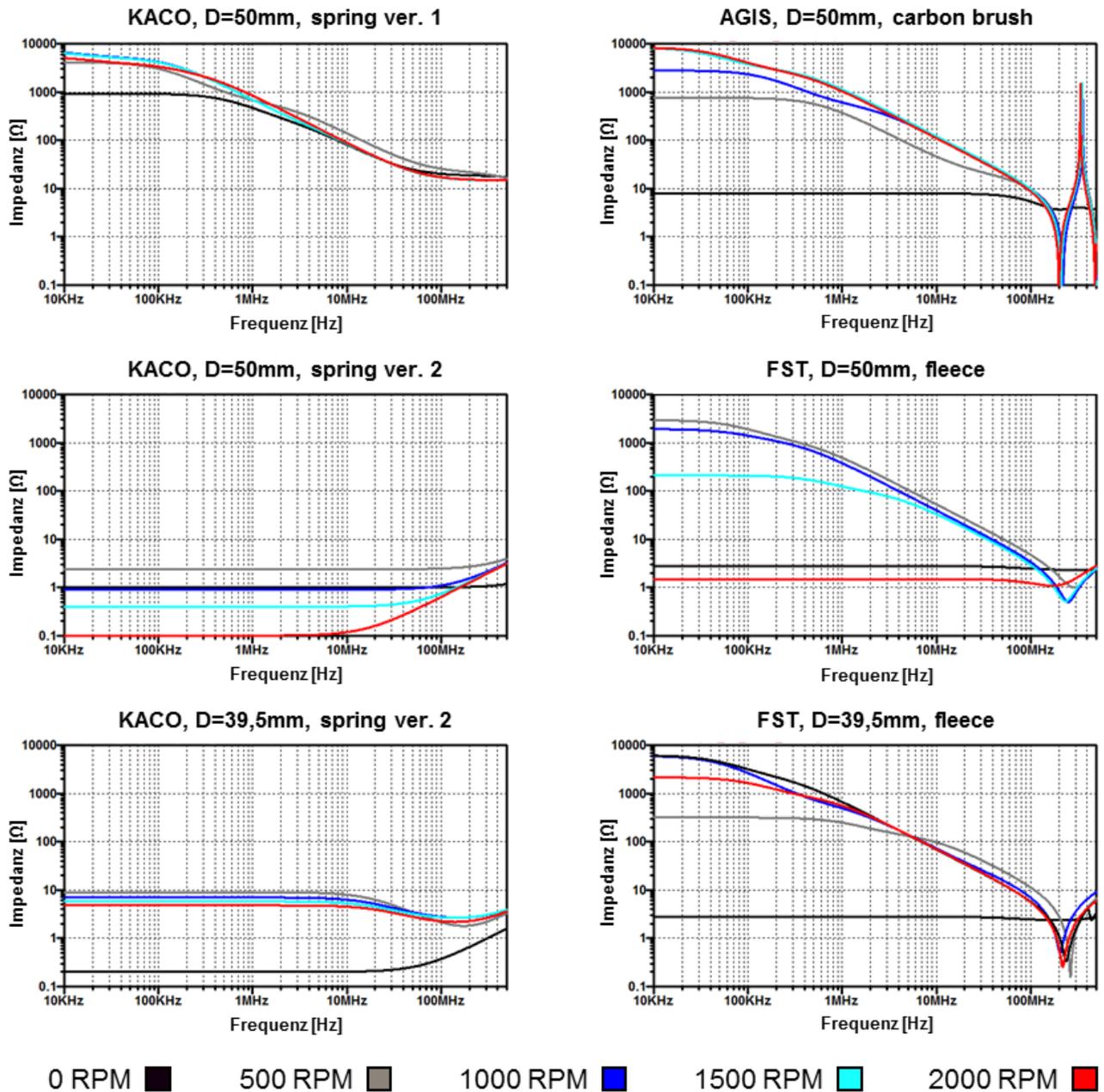


**Bild 7:** Gegenüberstellung der Impedanzeigenschaften der simulierten und gemessenen Impedanzeigenschaften von zwei Wellenkontaktierungen auf eine rotierende Welle (1500 rpm)

#### 4 Eigenschaften der Wellenkontaktierungen

Anhand der vorgestellten Mess- und Simulationsmethode wurden die Impedanzeigenschaften von sechs Wellenkontaktierungen exemplarisch bei unterschiedlichen Drehzahlen ermittelt. Hierbei wurden auf im Handel erhältliche Wellenkontaktierungen der Firmen AGIS, FST und KACO zurückgegriffen. Von jeder

Wellenkontaktierung wurden zwei neue Bauteile in einem Messaufbau verwendet. Es handelt sich daher um eine exemplarische Darstellung der Impedanzverhältnisse. Es wurden zwei Messaufbauten für unterschiedliche Wellendurchmesser erstellt (50 mm, 39,5 mm), wobei die Messaufbauten einen maximalen Wellenschlag von 50  $\mu\text{m}$  aufweisen.

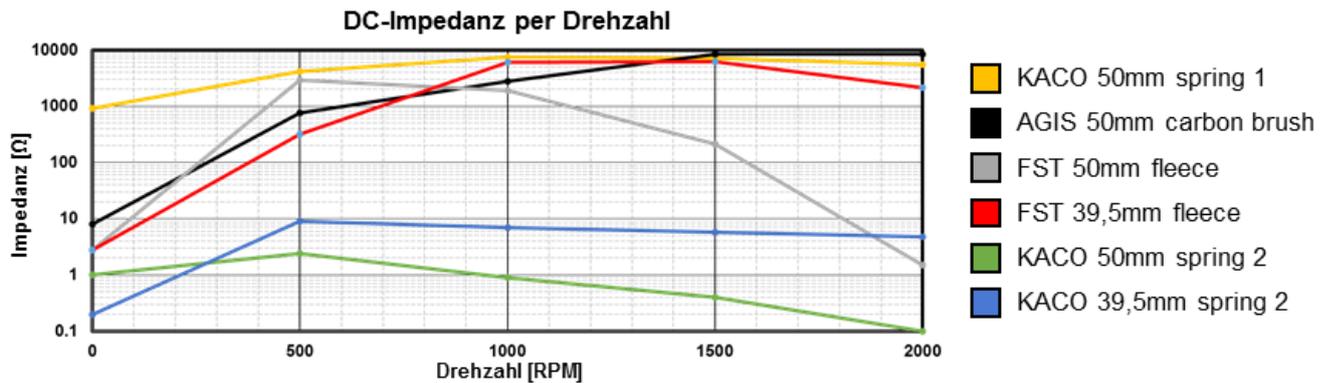


**Bild 8:** Gegenüberstellung der exemplarischen Impedanzeigenschaften von unterschiedlichen Wellenkontaktierungen bei verschiedenen Drehzahlen

Die Messung und anschließende Extraktion der Impedanzeigenschaften erfolgte gemäß der beschriebenen Methode. Hierbei stellt sich ein signifikanter Unterschied der Kontakteigenschaften heraus, welche exemplarisch in Bild 8 dargestellt wird. Die Messergebnisse zeigen, dass die Impedanzen der einzelnen Lösungen um mehrere

Größenordnungen variieren können. Hierbei zeigen bis etwa 100 kHz alle Kontaktierungen ein rein resistives Verhalten.

Alle getesteten Kontaktierungen zeigen eine deutliche Drehzahlabhängigkeit, welche es nicht möglich macht die Eigenschaften der Kontaktierung im Stillstand zu bestimmen. In Bild 9 wird daher die DC-Impedanz der einzelnen Kontaktierung in Abhängigkeit zur verwendeten Drehzahl dargestellt. Hierbei fällt auf, dass die einzelnen Kontaktierungen über Drehzahl ein Impedanzmaximum haben, welcher bis zur maximalen Drehzahl wieder abfällt.

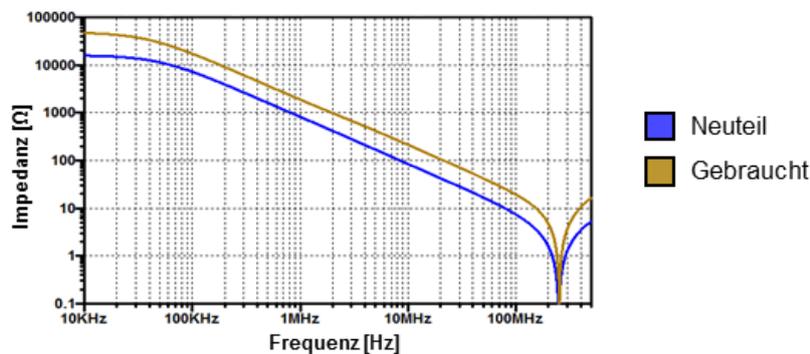


**Bild 9:** Darstellung der DC-Impedanzeigenschaften von Wellenkontaktierungen bei unterschiedlichen Drehzahlen

## 5 Änderung der Eigenschaften über Lebensdauer

Zusätzlich zu den vermessenen neuwertigen Wellenkontaktierungen wurden die Impedanzeigenschaften eines unter realen Bedingungen gealterten Bauteiles vermessen. Hierzu würde eine Wellenkontaktierung aus einem in Serie gefertigten Elektrofahrzeug verwendet, welches eine Laufleistung von 30000 km aufwies. In diesem Fahrzeug wurde an der Antriebswelle des elektrischen Motors eine Wellenkontaktierung verwendet, welche im Handel frei verfügbar war. In Bild 10 wird die Impedanzeigenschaft der gealterten und der neuwertigen Kontaktierung bei 1000 rpm verglichen. Hierbei fällt auf, dass sich sowohl der resistive als auch der kapazitive Anteil in den Impedanzeigenschaften verändern. Der DC-Widerstand des gealterten Bauteils nimmt um den Faktor 3 zu, der kapazitive Anteil nimmt um den Faktor 2 ab, was auf eine

verringerte Fläche bzw. vergrößerten Abstand zwischen der Kontaktierung und der Welle schließen lässt.



**Bild 10:** Darstellung der Impedanzeigenschaften einer neuwertigen und einer gealterten von Wellenkontaktierungen bei 1000 rpm

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags wird eine Messmethode aufgezeigt, mit welcher die Drehzahl- und frequenzabhängigen Eigenschaften von Wellenkontaktierungen verglichen werden können. Die gezeigten Ergebnisse für sechs exemplarische Kontaktierungen zeigen einen signifikanten Unterschied der Wellenkontaktierungen bei unterschiedlichen Drehzahlen. Dies stellt eine neue Betrachtungsweise in der Auslegung von EMV-Gegenmaßnahmen mittels Wellenkontaktierung dar.

Von jeder Wellenkontaktierung wurden nur zwei Bauteile vermessen. Die hier dargestellten Ergebnisse stellen daher die Eigenschaften exemplarisch dar.

## Literatur

[1] Y. Gemeinderr: Lagerimpedanz und Lagerschädigung bei Stromdurchgang in umrichter gespeisten elektrischen Maschinen. In: *Dissertation* (2016), ISBN 9783944653068