

# **Vorstellung eines Messverfahrens zur Erfassung von wechselrichter-induzierten Lagerströmen in automobilen Anwendungen**

Dr., Bastian, Arndt, AVL Software and Functions GmbH, Deutschland

Dr., Peter, Olbrich, AVL Software and Functions GmbH, Deutschland

M. Eng., Mario, Kießlich, AVL Software and Functions GmbH, Deutschland

## **1 Einleitung**

Das Schaltverhalten von Wechselrichtern kann in Motorlagern Ströme erzeugen. Hierbei sind unter anderem vier Arten bekannt [1]:

- Rotorerdströme
- kapazitive Umladeströme
- EDM Ströme (Funkenentladung)
- Zirkularströme

Insbesondere die letzten beiden Arten bergen aufgrund der geringen, mechanischen Abstände in den Kugellagern das Potenzial bei der Entladung über eine Funkenstrecke im Lager schnelle Strom- und Spannungsänderungen im Bereich 100 ps bis 1 ns zu erzeugen. Hieraus ergibt sich ein Risiko für EMV-Störungen aus dem elektrischen Antrieb heraus, welche deutlich höhere Frequenzanteile aufweisen können als die dazugehörige Anregung aus dem Wechselrichter. Die mechanische Auswirkung von Lagerströmen ist bekannt und wurde in verschiedenen Arbeiten untersucht [6]. Hierbei wurde im Frequenzbereich der Augenmerk der resultierenden Ströme messtechnisch bis etwa 20 MHz quantifiziert und veröffentlicht [3]. Dies liegt unter anderem an einem Fehlen eines geeigneten Messmittels zur Aufzeichnung der auftretenden Ströme bei rotierenden Kugellagern. Daher soll in diesem Beitrag ein Messaufbau gezeigt werden, in welchem wechselrichterinduzierte Ströme in rotierenden Motorlagern bis etwa 300 MHz erfasst werden können. Hierzu wird das Messverfahren und dessen exemplarischer Aufbau beschrieben. Ziel ist es die Messergebnisse in Zukunft zur Qualifizierung von Funkenstrecken zu verwenden, um daraus Simulationsmodelle erstellen zu können.

## **1 Messverfahren**

Die Eigenschaften von Kugellagern ändern sich unter anderem deutlich in Abhängigkeit der Drehzahl. Es ist daher notwendig einen Messaufbau zu wählen der sowohl im Stillstand als auch bei unterschiedlicher Drehzahl das HF-Verhalten der Kugellager untersuchen kann.

### **1.1 Messaufbau**

Es wurde auf ein Verfahren zurückgegriffen, welches unter anderem in [4] beschrieben wurde und so auch bei Messaufbauten von Kugellagern Verwendung findet. Der schematische Messaufbau wird in Bild 1 dargestellt. Hierbei wird der Strom von zwei Lagern (2) auf eine rotierende Welle (1) jeweils mittels eines Messshunt auf einer Leiterplatte (5) in einem Oszilloskop (6) gemessen. Die beiden Lager (2) sind hierbei jeweils mittels einer Leiterplatte (5) kontaktiert, auf der sich jeweils ein Messshunt befindet. Die Lager sind durch einen Isolator (4) getrennt. Mithilfe dieser Messanordnung bleibt die Kontaktierungen zum Oszilloskop unbeweglich, während die Welle rotieren kann.



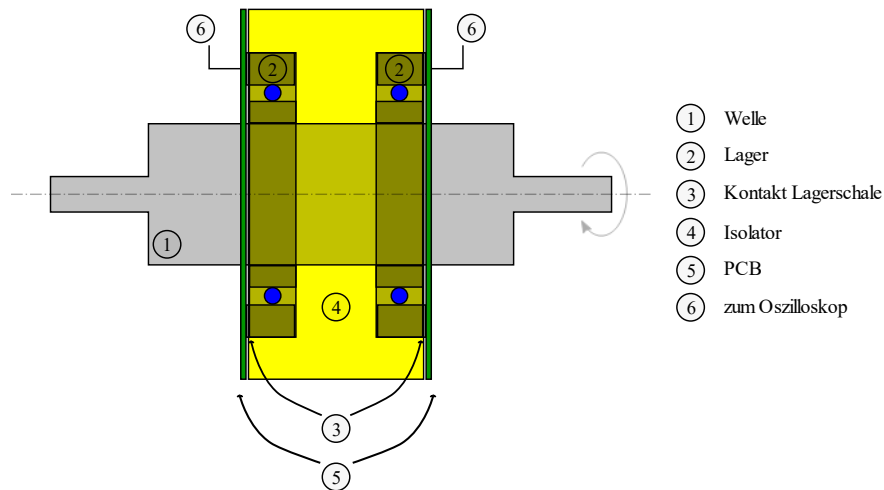


Bild 1: Schematische Darstellung eines Messverfahrens zur Untersuchung von drehzahlabhängigen Lagerströmen

Um bei der Strommessung Grenzfrequenzen bis 300 MHz abbilden zu können, wurde eine radialsymmetrische Anordnung mit mehreren Widerständen gewählt. Die Umsetzung erfolgt in Anlehnung an Stromsensoren zur Qualifizierung von ESD-Entladungen (Pommerenke target) (Bild 2)

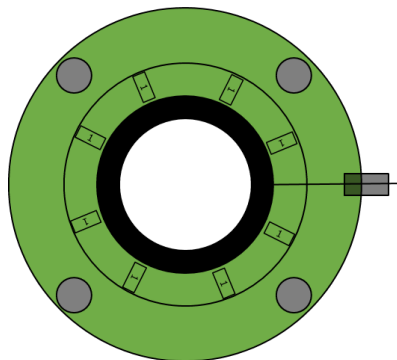


Bild 2: PCB mit einem radialsymmetrischen Stromshunt, bestehend aus mehreren Widerständen

Es ist zu erwarten, dass das Messergebnis deutlich vom Messaufbau beeinflusst wird. Eine frequenzabhängige Kalibrierung des Aufbaus ist hierbei eine nicht einfach zu lösende Aufgabe. Daher wurde wie in [4] der Messaufbau mittels 3D-Feldsimulation nachgebildet (Bild 3) und die daraus abgeleiteten parasitären Eigenschaften in einer Ersatzschaltung des Aufbaus abgebildet.

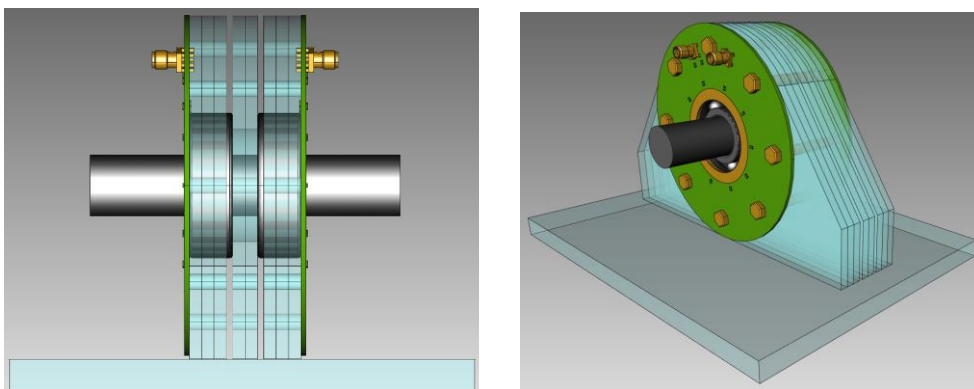


Bild 3: 3D-Modell des Messaufbaus



## 1.2 Grenzfrequenz des Messaufbaus

Bild 4 zeigt den unkalibrierten Messbereich der Messeinrichtung. Die untere Grenzfrequenz in der blauen und der grünen Kurve unterscheiden sich aufgrund unterschiedlicher Kondensatoren (10 nF bzw. 100 nF) als DC-Block an den Messabgriffen des Stromshunts. In den nachfolgenden Messungen wurde ein 100 nF DC-Block verwendet. Hierbei zeigt sich ein nutzbarer Frequenzbereich von mindesten 70 kHz bis 300 MHz. Unter Zuhilfenahme der in [4] Beschriebenen simulatorischen Aufbereitung kann dieser noch erweitert werden.

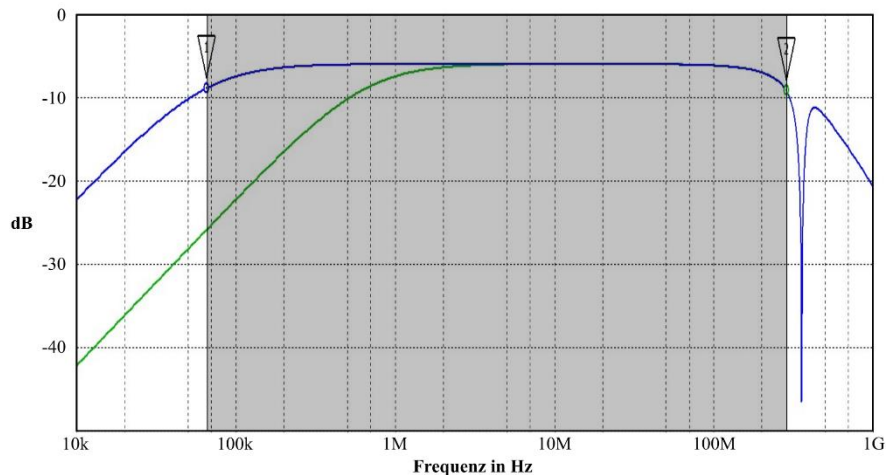


Bild 4: Grenzfrequenz des unkalibrierten Messaufbaus

## 1.3 Unterscheidung der Entladestrome in CM- und DM-Ströme

Mithilfe der zeitkorrelierten Messung der Ströme im Zeitbereich kann im Anschluss an die Messung in CM- und DM-Ströme bzw. in EDM und Zirkularströme unterschieden werden, da sich diese in ihrer Stromrichtung unterscheiden (Bild 5).

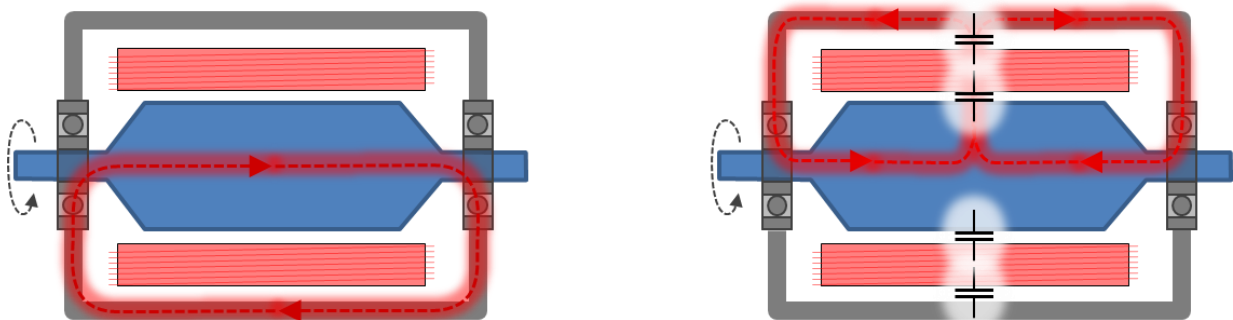


Bild 5: Unterscheidung der Entladestrome in CM- und DM-Ströme bzw. in EDM und Zirkularströme

Integriert man diesen Messaufbau in einer elektrischen Maschine kann der reale Lagerstrom messtechnisch ermittelt werden. Aufgrund der statistisch verteilten Auftretung von Lagerströmen kann hiermit der EDM- und Zirkularstromanteil unter denselben Bedingungen ausgewertet werden.



## 2 Messergebnisse

### 2.1 Exemplarischer Aufbau

Um das vorgestellte Messverfahren zu validieren wurde ein exemplarischer Aufbau (Bild 6) erstellt. Als Antrieb wurde hierbei eine handelsübliche Drehmaschine verwendet, um unterschiedliche Drehzahlen vermessen zu können. Als Kugellager wurden zwei Industriekugellager der Bauform 6204 integriert.



Bild 6: Prototyp der Messplatten und des Aufbaus

### 2.2 Messergebnisse

Bild 7 zeigt erste Messergebnisse des vorgestellten Messverfahrens. Hierzu wurde im Messaufbau aus 2.1 an den rotierenden Lagern eine Sinusspannung angelegt. Diese wurde kontinuierlich erhöht, bis am Oszilloskop Lagerströme sichtbar wurden. Eine Sinusspannung wurde gewählt, um sowohl positive als auch negative Lagerspannungen hervorzurufen und die daraus folgenden Funkenentladungen am Nulldurchgang der Sinusspannung zu löschen. Dies war notwendig, um die Lager während der Messung nicht zu schädigen und die Funkenstrecke in regelmäßigen Abständen in einen definierten Ausgangszustand zu bringen.

In diesem Aufbau traten ab  $4 V_{pp}$  erste Entladungen auf, welche Ströme mit etwa 1 A Spitze erzeugten. In Bild 8 – ZOOM ist eine Flankensteilheit von  $<1 \text{ ns}$  zu erkennen, was in diesem Messaufbau die anlage Grenzfrequenz des verwendeten Oszilloskops darstellt. Es erscheint wahrscheinlich, dass bei den Spannungen und Abständen deutlich schnellerer Flanken erzeugt werden [2]. Aufgrund der künstlichen Einprägung der Lagerspannung treten kein CM-Spannungen (EDM-Ströme) auf. In einer realen Applikation können diese jedoch aufgezeichnet werden und durch die Stromrichtung unterscheiden werden. Im verwendeten Messaufbau ist ein CM-Spannungseinspeisung zwischen Lager und Welle aufgrund der Rotation nicht vorgenommen worden, da dies den Messaufbau deutlich aufwändiger gestaltet hätte.

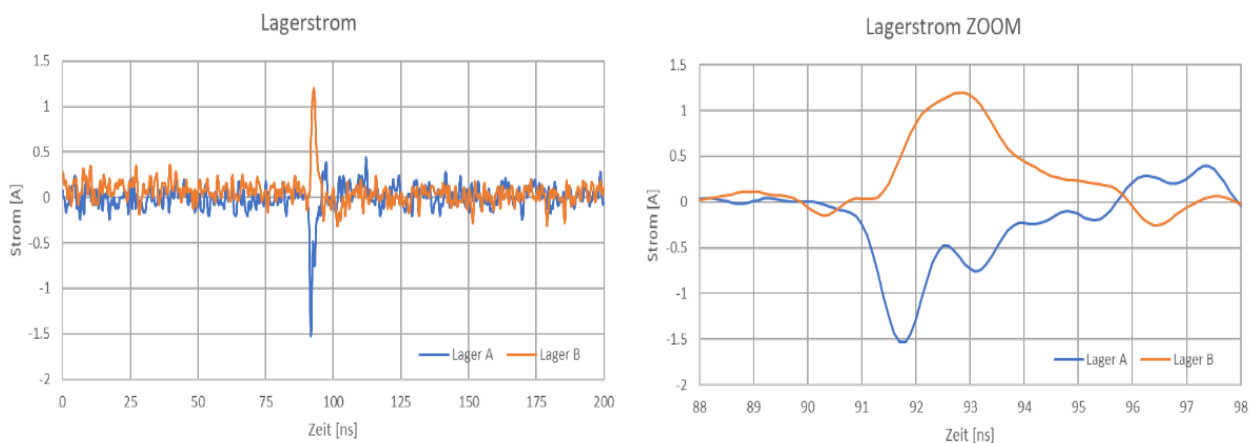


Bild 7: Erste Messergebnisse eines Lagerstrom mit der vorgestellten Messmethode



### **3 Zusammenfassung**

Mit dem hier vorgestellten Messverfahren ist es möglich Lagerströme bis mindestens 300 MHz Grenzfrequenz aufzunehmen. Mithilfe eines simulatorischen „de-embedding“ kann der Frequenzbereich noch erhöht werden, was in ersten Messungen gezeigt werden konnte.

Hiermit ist es sowohl möglich Modelle der auftretenden Funkenstrecken zu bilden als auch messtechnisch quantitativ nachzuweisen, dass Lagerströme für EMV-Störungen im Frequenzbereich größer 100 MHz verantwortlich sein können.

### **Literaturangaben**

- [1] Mütze Annette: Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors, Dissertation, 2004
- [2] Böhnisch Sven: Die elektrostatische Entladung (ESD) bei kleinen Abständen und Spannungen: Mechanismen und Parameterabhängigkeiten, Dissertation, 2009
- [3] Andreas Martin Bubert: Optimierung des elektrischen Antriebsstrangs von Elektrofahrzeugen mit Betrachtung parasitärer Ströme innerhalb der elektrischen Maschine, Dissertation, 2020
- [4] B. Arndt, M. Kießlich, P. Olbrich: HF-Eigenschaften von Wellenkontaktierungen in Abhängigkeit zur Drehzahl, EMV Köln, 2020
- [6] Schaeffler, Wälzlager zur Vermeidung von Stromdurchgangsschäden, TPI206; 2020