

# Störaussendungen von Antrieben in industriellen DC-Netzen

Prof. Dr.-Ing. Holger Borchering, Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Deutschland  
Dr.-Ing. Johann Austermann, Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Deutschland  
M. Sc. Lukas Fraeger, BLOCK Transformatoren-Elektronik GmbH, Deutschland  
Dipl.-Ing. Winfried Hovestadt, KEB Automation KG, Deutschland

## 1 Einleitung

Im Bereich der industriellen Antriebstechnik sind herstellereigenspezifische, räumlich konzentrierte Gleichspannungs-Verbünde seit vielen Jahren Stand der Technik, jedoch existieren derzeit keine technischen Regeln um herstellerübergreifende DC-Netze aufbauen zu können. Eine wichtige Aufgabe ist es daher, für Hersteller von Geräten, Maschinen und Anlagen die Basis zu schaffen, um EMV analog zum Vorgehen bei AC-Niederspannungsnetzen zu erreichen. Im Projekt DC-INDUSTRIE2 arbeiten 39 Partner aus Industrie und Forschung und der ZVEI daran, diese Lücke zu schließen. Informationen zu dem Systemkonzept von DC-INDUSTRIE2 sind in [1] zu finden.

In diesem Beitrag liegt der Schwerpunkt auf Störaussendungen und geeigneten Netznachbildungen für den Bereich von 150 kHz bis 30 MHz. Anhand von Messungen wird gezeigt, dass das im Systemkonzept von DC-INDUSTRIE beschriebene Konzept der dezentralen Funkentstörung funktioniert und ein so aufgebautes DC-Netz nicht stärker abstrahlt als ein vergleichbares AC-Netz.

## 2 Überblick über DC-Industrie

Das Konzept von DC-INDUSTRIE [1] besteht darin, industrielle Geräte wie elektrische Antriebe über ein offenes Gleichstromnetz miteinander zu verbinden. Durch die DC-Kopplung kann Bremsenergie ausgetauscht und die AC/DC-Wandlung, die bei geregelten Industrieantrieben immer notwendig ist, an zentraler Stelle zum übergeordneten AC-Netz erfolgen. Durch den Verzicht auf ungesteuerte Gleichrichter kann der Gesamtwirkungsgrad von Anlagen gesteigert und die Netzurückwirkung durch Oberschwingungen deutlich reduziert werden. Ein weiterer Vorteil von DC-Netzen ist die einfache Ankopplung von Speichern und dezentralen Energieerzeugern wie Photovoltaikanlagen. Wird das DC-Netz mit einem intelligenten Netzmanagement gesteuert, kann es flexibel auf Netzspannungsänderungen und -ausfälle reagieren. Dadurch erhöht sich die Verfügbarkeit der Anlagen.

In Bild 1 sind der Aufbau eines beispielhaften industriellen DC-Netzes zu sehen und die grundsätzlichen EMV-Anforderungen und Randbedingungen angegeben. Die Teilnehmer dieses DC-Netzes sind in DC-Sektoren unterteilt und mit DC-Schutzschaltern abgesichert. Wie bei typischen Anwendungen in der Industrie sind Maschinen, elektrische Antriebe, passive Lasten und Stromversorgungen für Hilfsenergien an das DC-Netz angeschlossen. Die Energieversorgung erfolgt über einen Active Infeed Converter (AIC) aus dem AC-Netz, ebenso ist eine direkte Einspeisung regenerativer Energie vorgesehen. Anders als sonst bei AC üblich wird der Energiefluss bei den meisten Teilnehmern bidirektional bereitgestellt. Als zusätzliche Ergänzung können auch Energiespeicher zur Spitzenlastreduzierung eingesetzt werden.

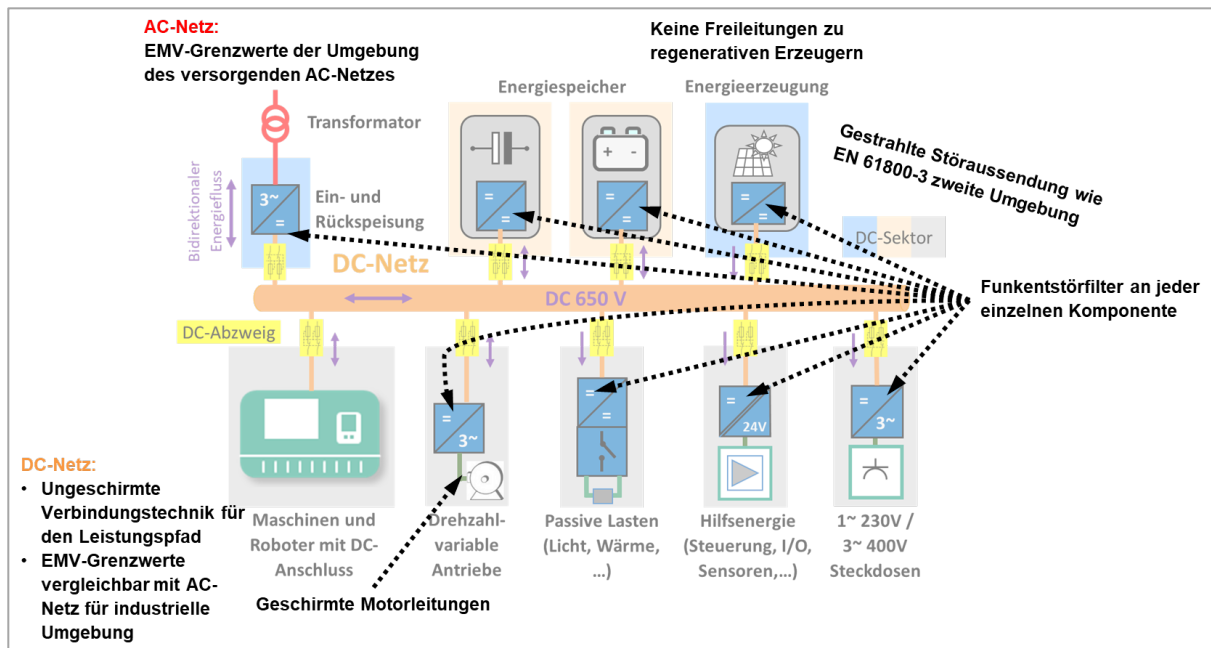


Bild 1: Aufbau des industriellen DC-Netzes mit EMV-Randbedingungen

Wichtig für die praktische Umsetzbarkeit von DC-Netzen ist, dass die DC-Leitungen ungeschirmt verlegt werden können. Diese Anforderung kann erfüllt werden, wenn hochfrequente Ableitströme, die beispielsweise bei Antriebsumrichtern auftreten, direkt am Gerät (über Y-Kondensatoren / Funkentstörfilter) zurückgeführt werden und nicht den Weg über das vorgelagerte DC-Netz nehmen. Bezüglich der Grenzwerte für den Industriebereich existieren derzeit keine verbindlichen Vorschriften für DC-Verteilnetze, sodass für dieses Konzept Grenzwerte und Messverfahren von AC-Niederspannungsnetzen, anderen DC-Netzen (PV) und nahen Produkt-Standards adaptiert worden sind. Bild 1 zeigt, an welchen Stellen sich im DC-Netz EMV-kritische Elemente befinden, für die Regeln definiert worden sind.

## 2.1 EMV-Umgebung industrieller DC-Netze

Das zu spezifizierende DC-Netz ist für die Versorgung industrieller Anlagen insbesondere von antriebstechnischen Komponenten gedacht. Als Rahmen sind daher die beiden Fachgrundnormen EN 61000-6-2 (Störfestigkeit Industrie) sowie EN 61000-6-4 (Störaussendung Industrie) anzuwenden, solange keine Produktnorm zur Anwendung kommt. Für Antriebe kann daher abweichend die EN 61800-3 für die zweite Umgebung herangezogen werden, die aber weitestgehend mit den allgemeinen Anforderungen der Fachgrundnorm übereinstimmt.

Für ein DC-Netz im Bereich des öffentlichen Netzes wäre zusätzlich die Vorschrift EN 61000-6-3 (Aussendung) einzuhalten, die niedrigere Pegel fordert (d.h. so wie in der EN 61800-3 für die erste Umgebung definiert). Bei der Störfestigkeit sind die Anforderungen mit der Einhaltung der Industrie-Grenzwerte abgedeckt. Zusätzlich kommen in diesem Fall stromabhängig Anforderungen zu NetZRückwirkungen dazu.

## 3 Konzept der Funkentstörung im DC-Netz

Im Prinzip haben alle Geräte am DC-Netz leistungselektronische Wandler, die schaltfrequente Störungen verursachen. Aufgrund der Leistung und Topologie sind geregelte elektrische Antriebe mit Umrichtern besonders relevant für die Störleistung. Bereits bei AC-versorgten Umrichtern werden hier aufwändige Funkentstörfilter sowie geschirmte Motorleitungen verwendet. Im DC-Netz sind vergleichbare Entstörmaßnahmen erwartbar. Die Zwischenkreise der Geräte werden

direkt an das Netz angeschlossen. Damit ist prinzipiell genauso eine leitfähige Verbindung der leistungselektronischen Wandler zum Netz vorhanden, wie es bei AC-Geräten über Diodengleichrichter möglich ist. Damit Störströme nicht über das gesamte DC-Netz fließen und dort andere Geräte stören, muss somit jedes Gerät über eigene Filter-Kondensatoren gegen den Schutzleiter verfügen, die einen niederimpedanten Rückstrompfad bilden.

#### 4 Validierung des Konzepts der Funkentstörung im DC-Netz

Zur Validierung dieses Konzepts für Funkentstörung, das im Systemkonzept [1] enthalten ist, wurden Vergleichsmessungen eines AC- und eines DC-versorgten Antriebs mit langer Zuleitung (15 m) im Freifeld durchgeführt. Untersucht wurde ein Antriebssystem bestehend aus einer AC-Quelle (3ph/400V-Netz, entkoppelt durch eine Netznachbildung), einer 15 m langen Versorgungsleitung, einem ungesteuerten B6U-Gleichrichter, einem Antriebswechselrichter, einer 8,5 m langen (geschirmten) Motorleitung, einem Asynchronmotor mit Schwungmasse und diversen Funkentstörfiltern. Bild 2 gibt einen Überblick über den Messaufbau.

Die Holzwand hatte eine Breite von 4 m, an ihr war eine insgesamt 15 m lange Leitung in drei Mäandern aufgespannt. Links hinter der Holzwand befand sich ein Holztisch, auf dem der Wechselrichter aufgestellt war, dahinter befand sich der Asynchronmotor. Rechts hinter der Holzwand befand sich eine AC-Netznachbildung, die als Versorgung für den Aufbau angesehen werden kann. Die Mitte der Loop-Antenne (R&S HFH2-Z2) befand sich ca. 1,5m über der geerdeten Bodenfläche in gleicher Höhe wie die aufgespannte Leitung. Der EMF-Messempfänger befand sich in einem Holzhäuschen hinter der Loop-Antenne und ist in diesem Bild nicht zu sehen.



Bild 2: Messaufbau im Freifeld mit langer Versorgungsleitung, links Frequenzumrichter, rechts Versorgung

Die Netznachbildung (Schwarzbeck NSLK 8163) dient als Entkopplung zum AC-Netz und soll eine definierte AC-Netzimpedanz liefern. Sie war ebenfalls hinter der Holzwand positioniert, so dass sie im Bild 2 nicht zu sehen ist.

An der Holzwand wurde eine 15 m lange Standard-AC-Leitung (H07RN-F 5x6) verwendet, die je nach Versuch mit DC oder AC betrieben wurde. An den Enden befanden sich Adapter von CE auf offene Kabelenden, an denen die Geräte angeschlossen waren.

Verwendet wurde ein Standard-Frequenzumrichter, der im U/f-Betrieb mit einer Schaltfrequenz von 4 kHz betrieben wurde. Der Umrichter war über eine 8,5 m lange geschirmte Motorleitung mit

einem Asynchronmotor verbunden. Der Umrichter ließ sich sowohl über DC als auch über AC versorgen. Im Umrichter selber waren keine Funkentstörfilter verbaut.

Die Ausgangsfrequenz des Umrichters wurde nicht verändert und betrug stets 20 Hz.

Es wurden insgesamt 5 Variationen des Aufbaus durchgeführt. Bei jeder der 5 Variationen wurden bei drei Stellungen der Loopantenne gemessen:

- Stellung 1:  $0^\circ$  zur Holzwand, d.h. die Loopantenne befand sich (wie in Bild 2 gezeigt) parallel zur Holzwand.
- Stellung 2:  $90^\circ$  zur Holzwand, d.h. hier ist die Antenne im rechten Winkel zur Holzwand ausgerichtet.
- Stellung 3:  $0^\circ$  zum Boden, d.h. die Mittelpunktsachse der Antenne ist vertikal zum Boden

#### 4.1 Beschreibung der Varianten für die Vergleichsmessungen

Als Bewertungskriterium wurde mittels Loopantenne die magnetische Feldstärke im Abstand von 10 m gemessen. Folgende 5 Varianten wurden vermessen:

##### a) AC-Versorgung ohne Filter

Bei dieser Messung wurde der Umrichter über seine AC-Anschlüsse versorgt. Es war an keiner Stelle ein Funkentstörfilter verbaut (Bild 3). Daher können sich hochfrequente kapazitive Ableitströme, die vom Motor über Erde fließen nur über die Netznachbildung und die aufgespannte Leitung zurück zum Umrichter fließen.

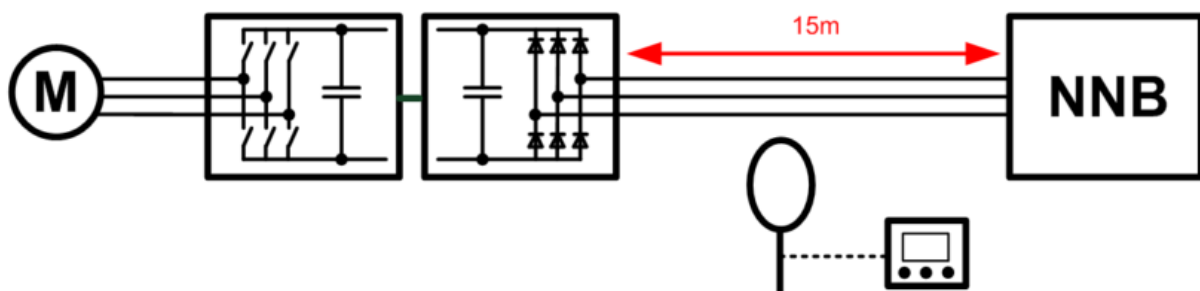


Bild 3: AC-Versorgung ohne Funkentstörfilter

##### b) AC-Versorgung mit Filter

Diese Variante ist die für AC übliche Entstörung. Gegenüber a bzw. Bild 3 wurde ein typischer, auf den Frequenzumrichter abgestimmter AC-Unterbau-Funkentstörfilter (Entstörgrad  $C1@50m/C2@100m$ -Motorleitung) verwendet.

Dadurch können die Ableitströme über den Motorschirm zurück in den Umrichter fließen, die aufgespannte Versorgungsleitung muss diese HF-Ströme nicht führen. Daher liegt bei diesem Aufbau die gemessene Störaussendung nur gering über der Leerlaufmessung.

##### c) DC-Versorgung ohne Filter

Wie auch bei der Variation „AC-Versorgung ohne Filter“ können hier HF-Ableitströme nicht direkt zum Wechselrichter zurückgeführt werden, sondern müssen über die lange Versorgungsleitung fließen. Infolge dessen entsteht hohe Störabstrahlung.

Für die Generierung der DC-Spannung wurde ein B6U-Gleichrichter verwendet, der über keine eigenen Filtermaßnahmen verfügte.

#### d) DC-Versorgung mit Filtern am Umrichter und am Gleichrichter

Bei dieser Variation ist ein DC-Filter am Umrichter, ein DC-Filter vor dem Gleichrichter und ein AC-Filter nach dem Gleichrichter vorhanden (Bild 4). Die zwei zusätzlichen Filter unterdrücken Störaussendungen, die durch den Gleichrichter emittiert werden. Bei dieser Variation können die HF-Ableitströme direkt vom Schirm der Motorleitung über Y-Kondensatoren in einem direkt an dem Umrichter verbauten DC-HF-Filter (KEB, 20E6T60-7B00) zurück zum Wechselrichter fließen, so wie es im Systemkonzept vorgesehen ist. Daher ist mit keinen signifikanten Störaussendungen zu rechnen.

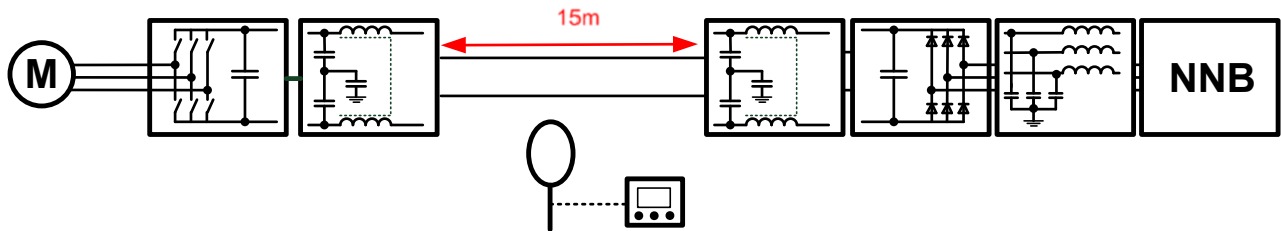


Bild 4: DC-Versorgung mit Funkentstörfiltern an Wechselrichter und Gleichrichter

#### e) Leerlaufmessung

Bei der Leerlaufmessung war die Stromversorgung abgeschaltet. Diese Variation dient als Referenz, um Sendequellen aus der Umgebung identifizieren zu können. Durch einen Vergleich mit der Leerlaufmessung kann also bestimmt werden, ob ein Störpegel auf die zu untersuchende Anlage zurückzuführen ist.

### 4.2 Ergebnisse der Vergleichsmessungen

Ab einer Messfrequenz von 150 kHz wurde (wie auch in allen anderen Messungen) die Empfängerbandbreite von 200 Hz auf 9 kHz (CISPR-Standard) erhöht, daher sind im Bereich >150 kHz keine ausgeprägten Maxima, sondern eine generelle Erhöhung der Pegel erkennbar.

Die im Folgenden dargestellten Messungen sind exemplarisch ausgewählt worden, um die Unterschiede zwischen AC- und DC-Störaussendung quantitativ bewerten zu können. Bei allen Messungen lagen die Ergebnisse des Peak-Detektors gleichmäßig ca. 10 dB über dem des Mittelwertdetektors, daher sind in den folgenden Bildern nur die Peak-Werte dargestellt. Der Frequenzbereich unter 150 kHz war unauffällig, es konnten keine Besonderheiten der 4 Varianten erkannt werden. Die Frequenzachse beginnt somit jeweils bei 150 kHz und endet bei 30 MHz.

Zum direkten Vergleich sind die Varianten a bis e farblich angepasst.

Bild 5 zeigt den Vergleich aller Peak-Wert-Messungen bei Antenne 0° zur Wand (Stellung 1), Bild 6 bei Antenne 90° zur Wand (Stellung 2) und Bild 7 bei Antenne parallel zum Boden (Stellung 3).



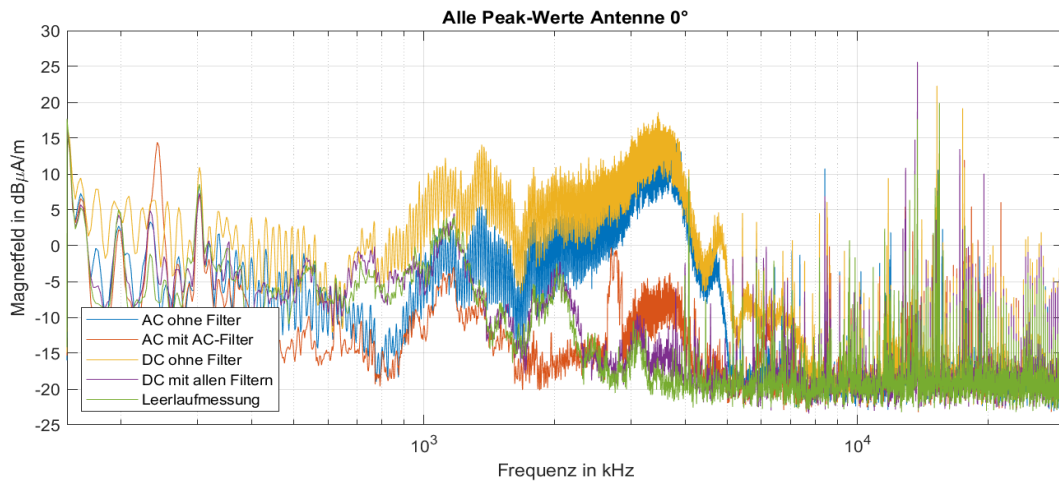


Bild 5: Vergleich aller Peak-Werte, Antenne 0° zur Wand (Stellung 1)

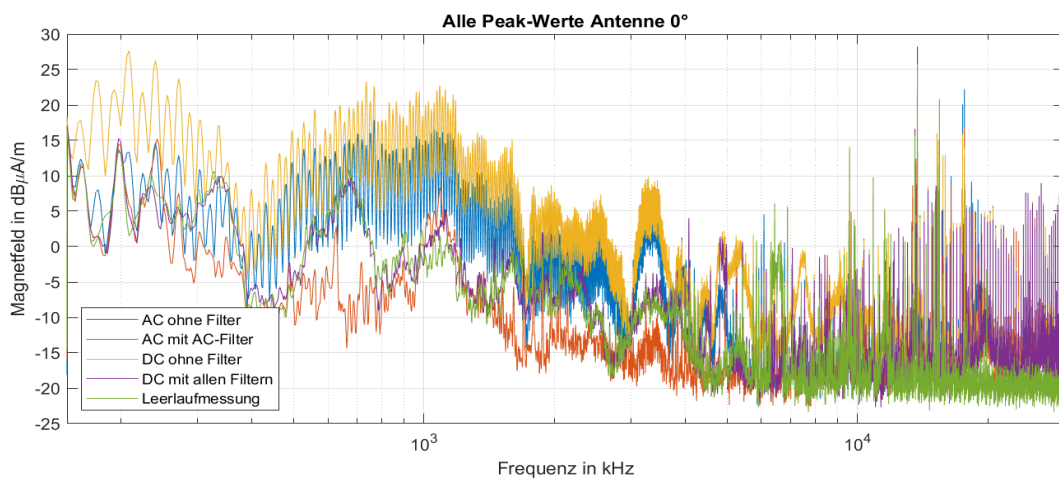


Bild 6: Vergleich aller Peak-Werte, Antenne 90° zur Wand (Stellung 2)

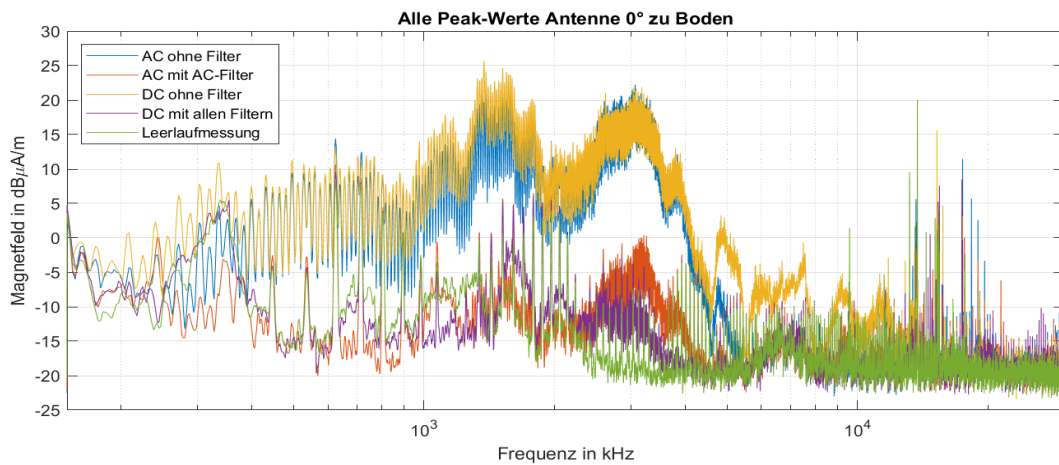


Bild 7: Vergleich aller Peak-Werte, Antenne parallel zum Boden (Stellung 3)

Folgendes kann festgestellt werden:

- Generell zeigen alle Messungen, dass die Störaussendung bei den Varianten ohne Filter jeweils bei DC-Speisung höher als bei AC-Speisung ist. Die grundsätzlichen Verläufe und Maxima sind sehr ähnlich.
- Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit der gemessenen Pegel von der Ausrichtung der Loop-Antenne zur Wand, insbesondere bei den Messungen ohne Filtermaßnahmen (gelb, blau).
- Im Bereich  $f < 1$  MHz treten in Bild 6 bis zu 20 dB höhere Pegel auf als in Bild 7.
- Im Bereich 1 ... 2 MHz sind die Pegel bei allen Ausrichtungen der Antenne ähnlich hoch.
- Bei  $f > 9$  MHz sind in Bild 5 und Bild 7 alle gemessenen Pegel in der Größenordnung der Leerlaufmessung. Hier weicht Bild 6 deutlich ab. Die erhöhten Pegel treten bei dieser Ausrichtung sowohl bei AC- als auch bei DC-Speisung auf.
- Bei etwas höherer Zeitauflösung wird erkennbar, dass die örtlichen Maxima einen Frequenzabstand von ca. 30kHz haben. Ursächlich für die Maxima könnte z.B. das Schaltnetzteil im Umrichter sein. Da die verwendeten Filter keinerlei Dämpfung der Pegel bewirken, kann angenommen werden, dass die Abstrahlung nicht über die aufgespannte Leitung, sondern über den Umrichter direkt erfolgt.

Das wichtigste Ergebnis ist:

- Werden Filterelemente wie im Systemkonzept [1] beschrieben eingebracht, so unterscheiden sich die gemessenen Pegel sowohl bei DC- als auch AC-Speisung nicht signifikant von der Leerlaufmessung.

Somit kann festgehalten werden: Wird die Funkentstörung gemäß Systemkonzept [1] ausgeführt, so ist keine Schirmung der Leitungen des DC-Netzes erforderlich.

## 5 Einfluss verschiedener Netznachbildungen

Für die Gerätequalifizierung im Frequenzbereich 150 kHz bis 30 MHz wird aus praktischen Gründen üblicherweise nicht die abgestrahlte magnetische Feldstärke ermittelt, sondern es wird die Funkstörspannung an einer Netznachbildung (NNB) gemessen. Bei AC-versorgten Geräten wird hierfür üblicherweise die 50  $\Omega$ /50  $\mu$ H-V-NNB nach DIN EN 55016-1-2:2019-10 verwendet (Grenzwerte siehe z.B. DIN EN 55011: 2018-05 Tab.2). Für DC-versorgte Geräte schlägt DIN EN 55011: 2018-05 (Anhang I) die Messung an einer 150  $\Omega$  NNB vor, mit der sowohl symmetrische, asymmetrische als auch unsymmetrische Störspannungen gemessen werden können (Grenzwerte siehe z.B. DIN EN 55011: 2018-05 Tab.3).

Im Bild 8 werden Messungen an üblichen Industrieumrichtern an beiden Netznachbildungen (50 und 150  $\Omega$ ) aufgezeigt und miteinander verglichen. Gemessen wurde die Störspannung bei einem Antrieb mit Funkentstörfilter im Vergleich 150-Ohm-DC-Netznachbildung und 50-Ohm-Netznachbildung. Gespeist wurde jeweils mit 500 V Gleichspannung aus einem Labornetzteil. Zusätzlich ist eine Messung ohne Funkentstörfilter mit angegeben, um die Filterwirkung nachweisen zu können.

Es kann festgestellt werden, dass Messwerte mit der DC-Netznachbildung je nach Frequenzbereich um 10 bis 20 dB über den Messwerten mit der 50-Ohm-Netznachbildung liegen. Die Messungen sehen optisch sehr ähnlich aus. Die Verläufe haben einen annähernd konstanten Abstand zueinander. Die Bewertung der leitungsgeführten Störaussendung ist somit mit beiden Netznachbildungen möglich. Allerdings ist eine spezifische Vorgabe für Grenzwertkennlinien für jede Netznachbildung erforderlich. Die beiden in Bild 8 angegebenen Grenzwerte EN 55011 Table 3 für die DC-NNB und EN 61800-3 Table 14 Umgebung C2 für die 50 Ohm NNB könnten als Vorschlag auch für DC-Netze übernommen werden.

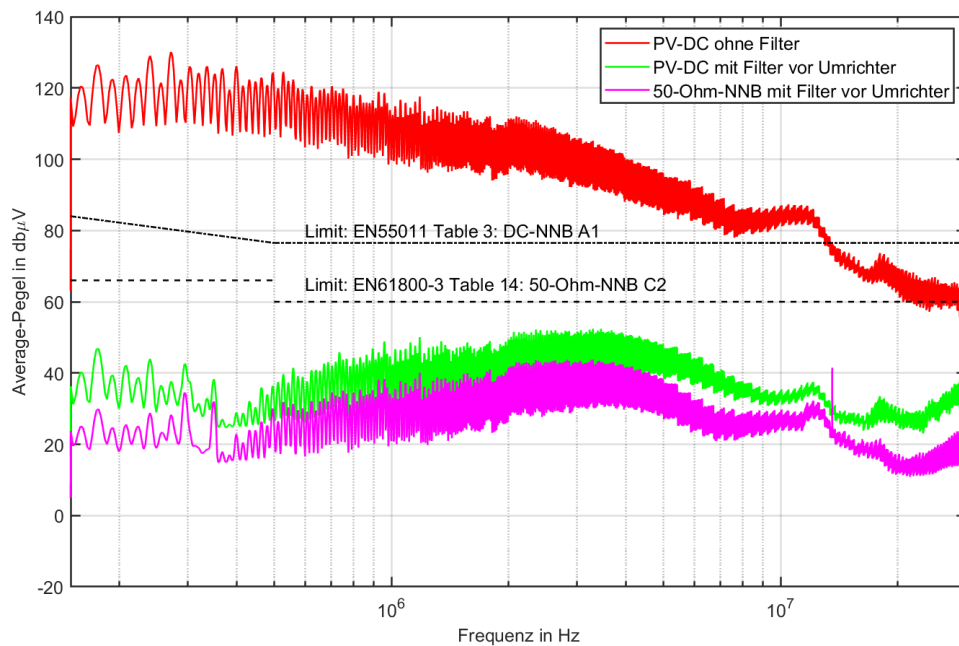


Bild 8: Vergleich der Messungen an den beiden Netznachbildungen

Bei der Bewertung der technischen Daten käuflicher Netznachbildungen konnten folgende Nachteile ermittelt werden:

- Nicht alle 50-Ohm-Netznachbildungen sind auch für hohe DC-Spannungen (> 600 V) geeignet.
- Zwischen 150-Ohm-Netznachbildungen und versorgendem Netzteil muss eventuell ein zusätzlicher Funkentstörfilter eingebaut werden, da die Netznachbildungen nur geringe Kapazitäten gegen PE aufweisen.

## 6 Zusammenfassung

Insgesamt sind die Ansätze des DC-INDUSTRIE Systemkonzepts bestätigt worden. Werden Filterelemente wie im Systemkonzept beschrieben eingebracht, so ist keine Schirmung der Leitungen des industriellen DC-Netzes erforderlich.

Sollte in späteren Standards der leitungsführten Störaussendung für industrielle DC-Netze eine Messumgebung empfohlen werden, so sind beide verwendeten Netznachbildungen geeignet, allerdings mit zugeordneten Grenzwerten.

## Literaturangaben

- [1] ZVEI & Konsortium DC-INDUSTRIE2: Systemkonzept DC-INDUSTRIE2, WEB-Veröffentlichung <https://dc-industrie.zvei.org/publikationen/systemkonzept-fuer-dc-industrie2>, 04. April 2022

## Danksagung

Die Projekte „DC-INDUSTRIE“ und „DC-INDUSTRIE2“ wurden bzw. werden vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) mit den Förderkennzeichen 03ET7558A-N (DC-INDUSTRIE) und 03EI6002A-Q (DC-INDUSTRIE2) gefördert und vom Projektträger Jülich betreut.