

# Vorschlag zur Überarbeitung der Transferimpedanzanforderungen in CISPR 25 und CISPR 16-1-2

M.Sc. RWTH, Andrea Marie Scholl, Robert Bosch GmbH, Deutschland  
Dipl.-Ing., Roland Eidher, Robert Bosch GmbH, Deutschland

## 1 Einleitung

Neben der Messung der Störspannung gehört auch die Messung des Störstroms zu den normativen leitungsgebundenen Messverfahren, die nach CISPR 25 zur Charakterisierung der Störaussendung einer im Fahrzeug verbauten E/E-Komponente durchgeführt wird [1]. Der Messaufnehmer ist dabei eine Stromzange, die nach dem Transformatorprinzip den Störstrom aus dem Kabelbaum auskoppelt. Für die Anforderungen an eine Stromzange verweist die CISPR 25 dabei auf die CISPR 16-1-2. Während im ebenen (linearen) Bereich für die Transferimpedanz  $0,1 \Omega - 5 \Omega$  ( $\cong -20 \text{ dB}\Omega$  bis  $14 \text{ dB}\Omega$ ) zulässig sind, sind unterhalb des ebenen (linearen) Bereichs  $0,001 \Omega - 0,1 \Omega$  ( $\cong -60 \text{ dB}\Omega$  bis  $-20 \text{ dB}\Omega$ ) erlaubt. Der ebene (lineare) Bereich entspricht dabei dem Übertragungsbereich (Durchlassbereich) der Stromzange. Gemäß CISPR 16-1-2 sind auch genaue Messungen unterhalb des Übertragungsbereichs (Durchlassbereichs) möglich [2]. Abbildung 1 illustriert die Anforderungen inkl. exemplarischem Verlauf einer Stromzange.

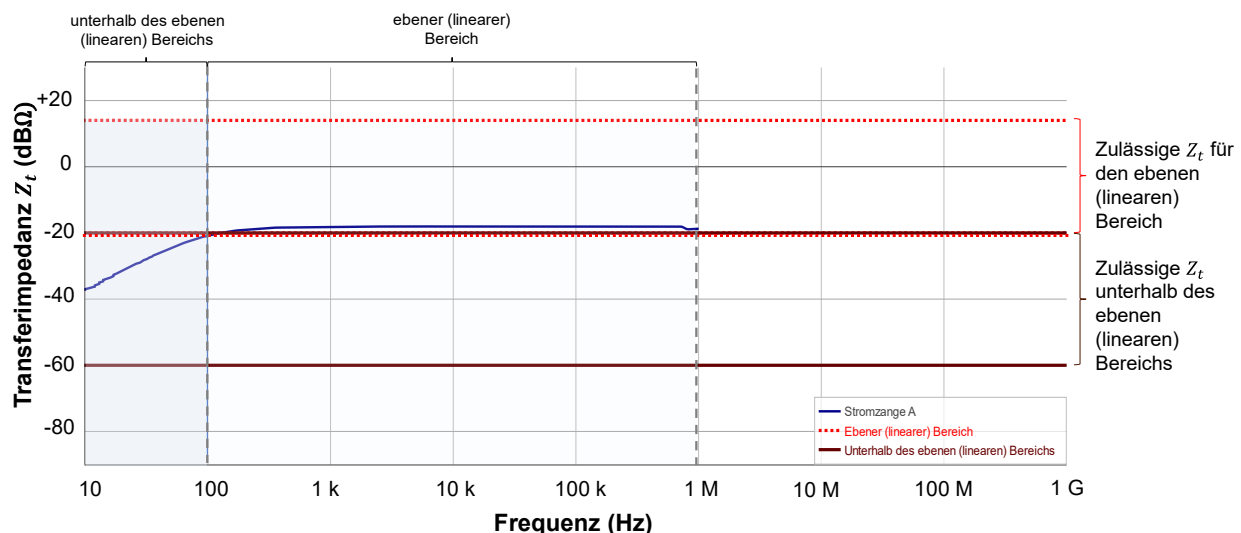


Abbildung 1: Anforderungen an die Transferimpedanz nach CISPR 16-1-2 [2] inkl. exemplarischem Verlauf

Die fehlende Durchgängigkeit der Transferimpedanz unterhalb des ebenen (linearen) Bereichs und die maximal zulässige Transferimpedanz von  $5 \Omega$  ( $\cong 14 \text{ dB}\Omega$ ) im ebenen (linearen) Bereich führen in der Praxis regelmäßig zu Herausforderungen: Während unterhalb des ebenen (linearen) Bereichs häufig Stromzangen zur Einhaltung der Transferimpedanzanforderungen gewechselt werden müssen, reicht der Einsatz eines externen Vorverstärkers oberhalb 200 MHz zur Einhaltung des 6 dB Abstands zwischen Grundrauschpegel und nächstgelegtem Grenzwert oft nicht aus.

Dieses Paper erläutert die bisherigen Transferimpedanzanforderungen und leitet anhand der identifizierten Schwachstellen einen überarbeiteten Vorschlag für die CISPR 16-1-2 und aufgrund des Verweises darauf letztlich auch für die CISPR 25 ab.

## 2 Messung der Transferimpedanz

Die Transferimpedanz  $Z_t$  einer Stromzange kann gemäß Abbildung 2 mit Hilfe eines Netzwerkanalysators und einer geeigneten Kalibrierhalterung (Jig) für die Stromzange ermittelt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass der nicht am Netzwerkanalysator angeschlossene Port der Kalibrierhalterung mit  $50\ \Omega$  terminiert wird.

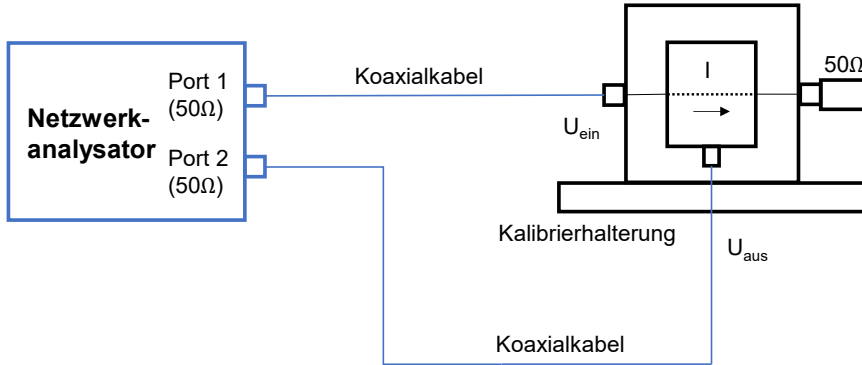


Abbildung 2: Exemplarischer Messaufbau zur Bestimmung der Transferimpedanz

Die Transferimpedanz  $Z_t$  ergibt sich dann zu:

$$Z_t = \frac{U_{aus}}{I} = \frac{U_{aus}}{\frac{U_{ein}}{50\ \Omega}} = \frac{U_{aus}}{U_{ein}} 50\ \Omega, \quad \text{wobei } I = \frac{U_{ein}}{50\ \Omega} \quad (1).$$

Alternativ lässt sich die Transferimpedanz  $Z_t$  auch logarithmisch unter Verwendung des Vorwärts-Transmissionsfaktors  $S_{21}$  ausdrücken als:

$$\begin{aligned} 20 \log(Z_t) &= 20 \log\left(\frac{U_{aus}}{I}\right) \\ &= 20 \log(U_{aus}) - 20 \log\left(\frac{U_{ein}}{50}\right) \\ &= 20 \log(U_{aus}) - 20 \log(U_{ein}) + 20 \log(50) \\ &= S_{21}(dB) + 34\ dB, \quad \text{wobei } S_{21} = 20 \log(U_{aus}) - 20 \log(U_{ein}) \end{aligned} \quad (2).$$

Aus den Formeln geht hervor, dass eine Stromzange mit höherer Transferimpedanz bei gleicher Eingangsspannung bzw. gleichem Eingangsstrom die höhere Ausgangsspannung liefert. Je höher also die Transferimpedanz einer Stromzange, desto effektiver ist ihre Wirkung als Transformator und desto höher ist ihre Sensitivität.

## 3 Transferimpedanzanforderungen

### 3.1 Aktuelle Transferimpedanzanforderungen und deren Schwachstellen

Die Transferimpedanzen verschiedener kommerziell erhältlicher Stromzangen wurden gemäß Abschnitt 2 gemessen und sind in Abbildung 3 zusammen mit den aktuellen Transferimpedanzanforderungen dargestellt. Wie in Abschnitt 1 beschrieben, sind im ebenen (linearen) Bereich  $0,1\ \Omega - 5\ \Omega$  ( $\triangleq -20\ \text{dB}\Omega$  bis  $14\ \text{dB}\Omega$ ) zulässig und unterhalb des ebenen (linearen) Bereichs  $0,001\ \Omega - 0,1\ \Omega$  ( $\triangleq -60\ \text{dB}\Omega$  bis  $-20\ \text{dB}\Omega$ ). Es zeigt sich, dass nicht alle Stromzangen die Transferimpedanzanforderungen aus der CISPR 16-1-2 über ihren gesamten operativen Frequenzbereich einhalten.

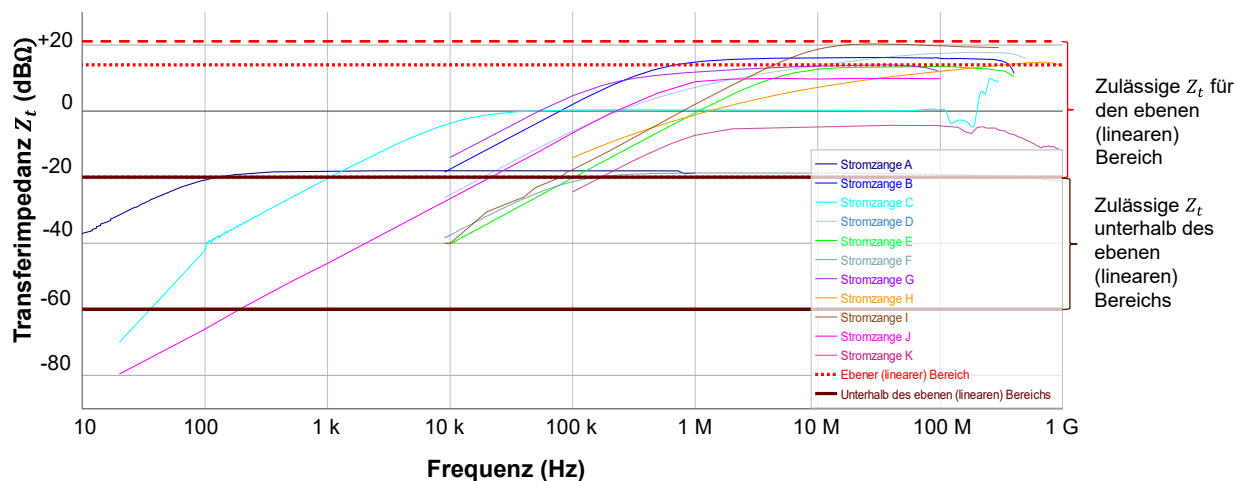


Abbildung 3: Exemplarische Transferimpedanzverläufe verschiedener kommerziell erhältlicher Stromzangen

Bei den Transferimpedanzanforderungen unterhalb des ebenen (linearen) Bereichs fällt auf, dass diese nicht durchgängig bis zur maximal zulässigen Transferimpedanz für den ebenen (linearen) Bereich reichen. Dies hat zur Folge, dass einige Stromzangen unterhalb des ebenen (linearen) Bereichs nur stückweise konform sind (siehe Abbildung 4).

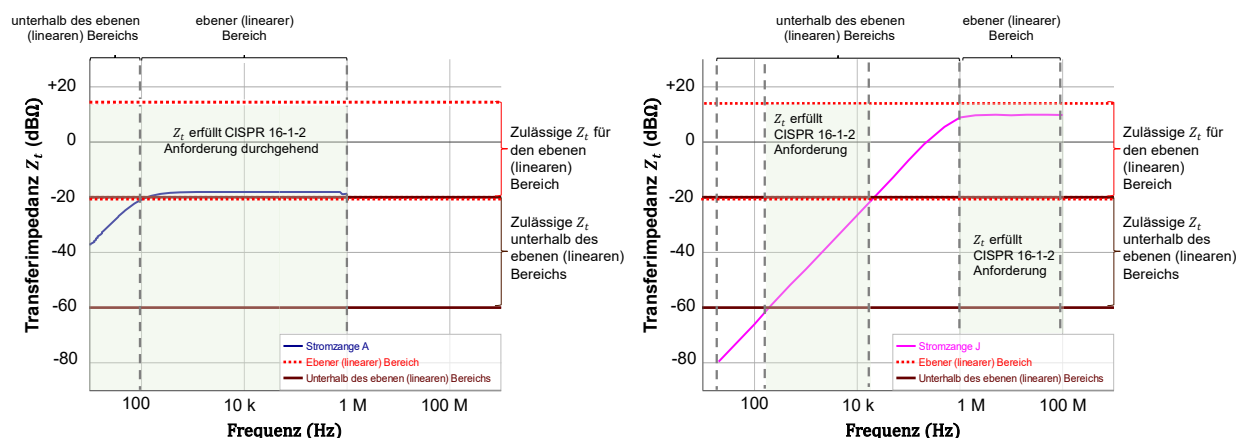


Abbildung 4: Links: Beispiel einer durchgängig konformen Stromzange, rechts: Beispiel einer stückweise konformen Stromzange unterhalb des ebenen (linearen) Bereichs

Wie bereits in Abschnitt 2 festgestellt, geht eine höhere Transferimpedanz mit einer höheren Sensitivität einher. Insbesondere oberhalb 200 MHz beeinträchtigt die Beschränkung der Transferimpedanz auf  $5 \Omega$  ( $\cong 14 \text{ dB}\Omega$ ) im ebenen (linearen) Bereich die Sensitivität von Stromzangen: Anspruchsvolle Störstromgrenzwerte oberhalb 200 MHz können dann auch vom Grundrauschen oft nur in Verbindung mit einem externen Vorverstärker eingehalten werden. Die Einhaltung des 6 dB Abstands zwischen Grundrauschen und nächstgelegenen Grenzwert ist als Folge oft nicht möglich. Hinzu kommt, dass die Verfügbarkeit von Stromzangen, die im ebenen (linearen) Bereich die Transferimpedanzanforderungen aus CISPR 16-1-2 erfüllen, begrenzt ist.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Transferimpedanzverläufe dreier Stromzangen: Während zwei der drei Stromzangen im ebenen (linearen) Bereich die Transferimpedanzanforderung  $< 5 \Omega$  ( $\cong 14 \text{ dB}\Omega$ ) erfüllen (Stromzangen E und K), überschreitet die dritte diese (Stromzange B). Unterhalb des ebenen (linearen) Bereichs unterscheiden sich die Stromzangen B und E um bis zu 23 dB,

während die Differenz zwischen Stromzangen B und K etwa 30 dB beträgt. Im ebenen (linearen) Bereich liegen Stromzangen B und E ca. 3 dB auseinander und Stromzangen B und K ca. 26 dB.

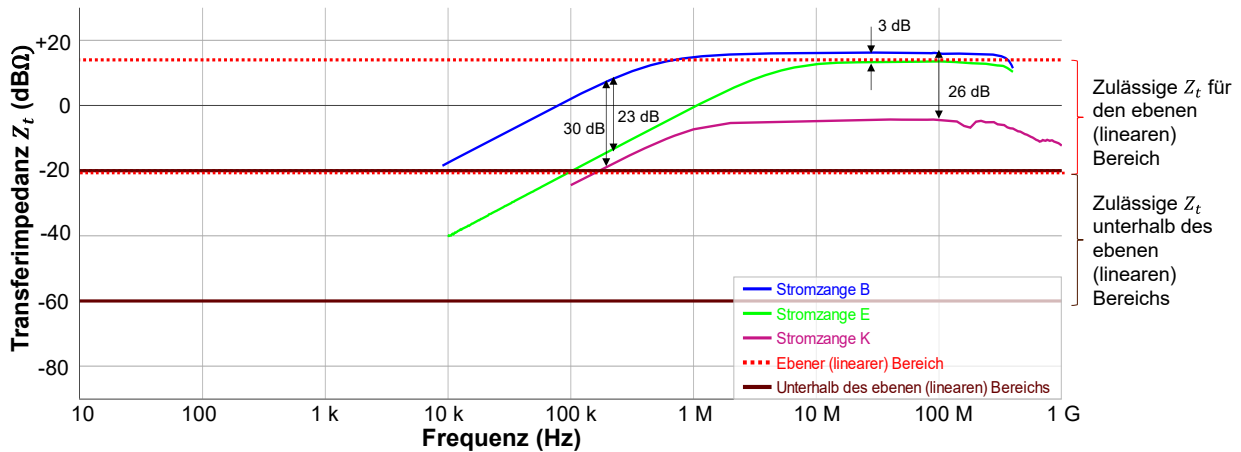


Abbildung 5: Exemplarische Transferimpedanzverläufe dreier ausgewählter, kommerziell erhältlicher Stromzangen

Die Auswirkungen auf das Grundrauschen sind für die Stromzangen B und E in Abbildung 6 dargestellt; auf der linken Seite ohne Verwendung eines externen Vorverstärkers (VV), auf der rechten Seite mit. Der Versatz aus Abbildung 5 zwischen den beiden Transferimpedanzen bildet sich in den Grundrauschmessungen eins zu eins ab.

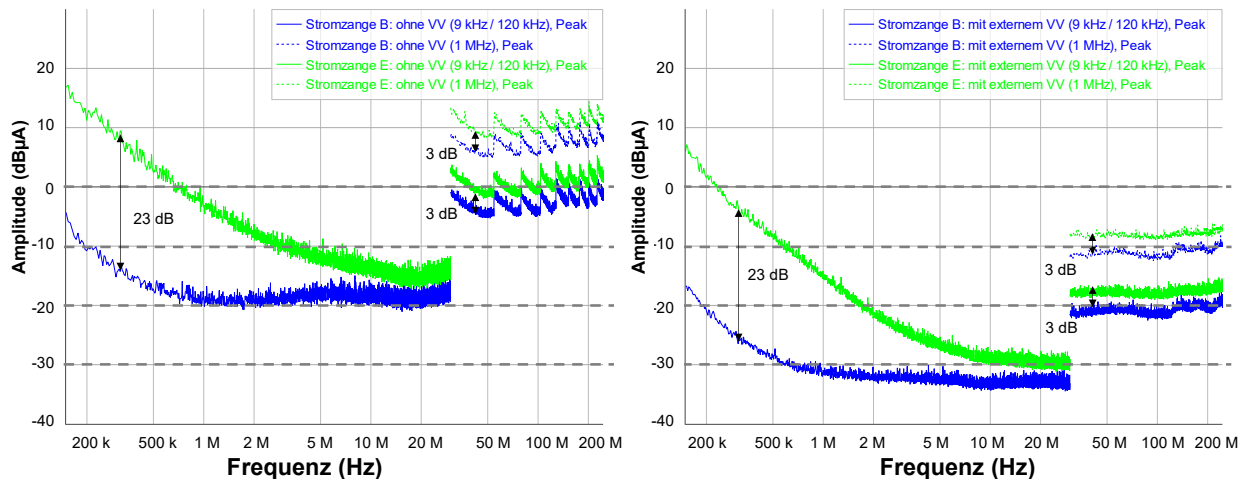


Abbildung 6: Vergleich des Grundrauschniveaus zwischen zwei verschiedenen Stromzangen (Messungen jeweils mit 1 s im FFT-Modus, ohne Input Protection, mit 0 dB Eingangsdämpfung, an Eingang 1 mit DC-Kopplung, 6 dB EMI-Filter und Peak-Detektor)

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass der sägezahnartige Verlauf des Grundrauschens ohne Verwendung eines Vorverstärkers auf die FFT-Methodik zurückzuführen ist und bei allen Auflösungsbandbreiten und Detektoren vorkommt. Abbildung 7 verdeutlicht dies anhand eines Vergleichs zwischen Suchlauf- (stepped) und FFT-Messempfänger. Bei Einsatz eines Vorverstärkers verschwindet der sägezahnartige Verlauf bei den FFT-Messungen.

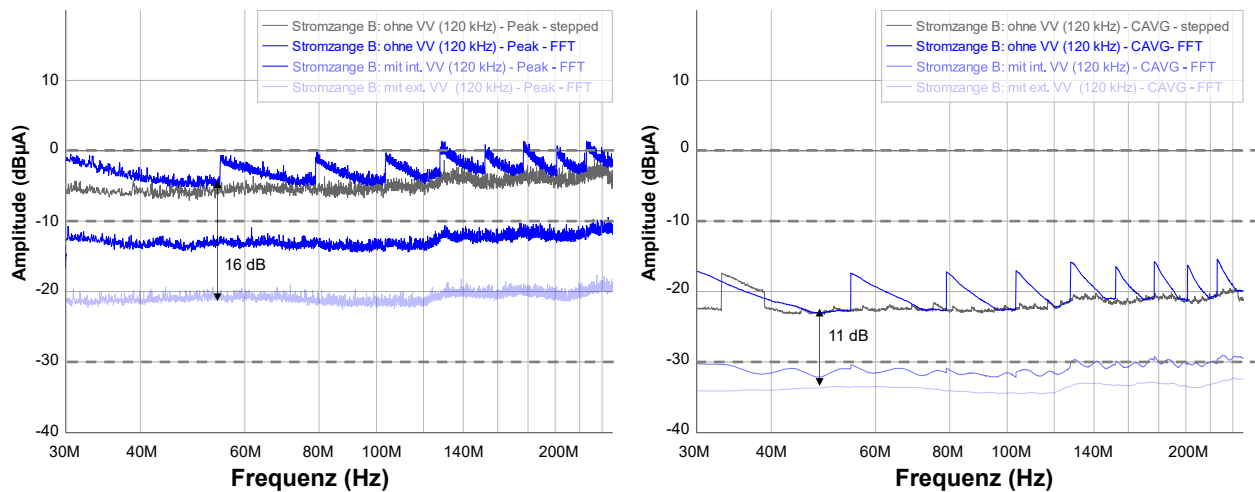


Abbildung 7: Vergleichende Grundrauschmessungen zwischen einem Suchlauf- und einem FFT-Messem Empfänger (Messungen jeweils mit 50 ms für den Suchlaufempfänger und 1 s für den FFT-Empfänger, ohne Input Protection, mit 0 dB Eingangsdämpfung, an Eingang 1 mit DC-Kopplung, 6 dB EMI-Filter und Peak- bzw. CISPR-Average-Detektor, kurz: CAVG)

Durch Verwendung einer Stromzange mit höherer Transferimpedanz (höher als die zulässigen  $5 \Omega (\cong 14 \text{ dB}\Omega)$ ) nach CISPR 16-1-2) kann je nach Frequenzbereich eine Verbesserung des Grundrauschniveaus von über 20 dB erreicht werden. Im ebenen (linearen) Bereich wird trotz der um 6 dB höheren Sensitivität (Anhebung der Transferimpedanzanforderung von  $14 \text{ dB}\Omega$  auf  $20 \text{ dB}\Omega$ ) für anspruchsvolle Grenzwerte voraussichtlich weiterhin ein geeigneter Vorverstärker erforderlich bleiben.

Bei Messungen mit einem Prüfling ist hinsichtlich Auswahl eines geeigneten Vorverstärkers jedoch darauf zu achten, dass dieser nicht übersteuert. Eine Übersteuerung hat eine nicht-lineare Verzerrung des ausgekoppelten Störstroms zur Folge, die nicht ohne Weiteres kompensiert werden kann. Abbildung 8 zeigt die Auswirkungen verschiedener Stromzangen (siehe Abbildung 5) mit und ohne Vorverstärker auf eine Prüflingsmessung (Bürstenmotor).

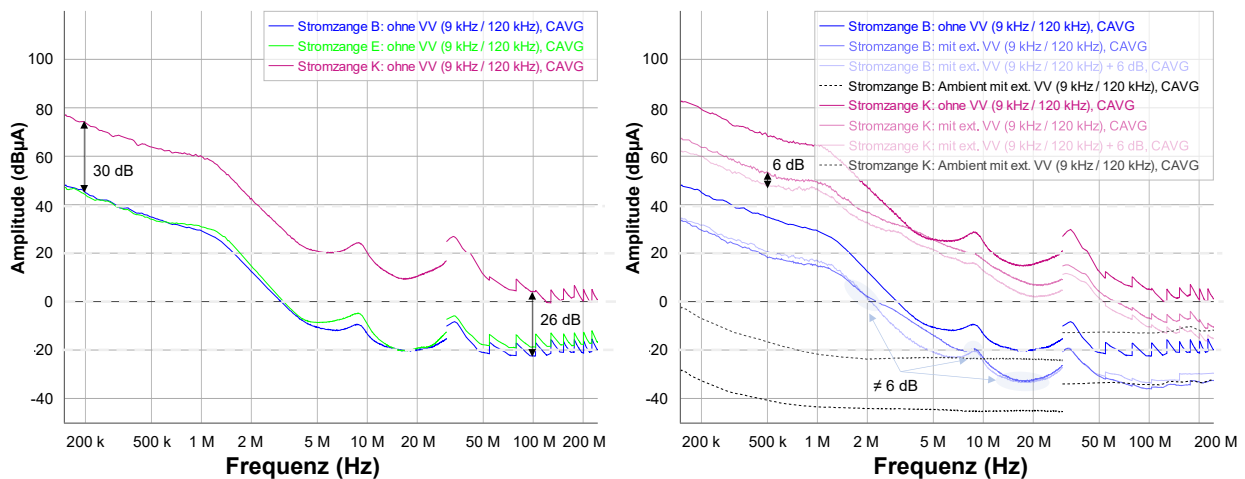


Abbildung 8: Auswirkungen verschiedener Stromzangen und Vorverstärker auf einen Bürstenmotor (Messungen jeweils mit 1 s im FFT-Modus, ohne Input Protection, mit Auto Dämpfung, an Eingang 1 mit DC-Kopplung, 6 dB EMI-Filter und CAVG-Detektor)

Anhand einer Linearitätsprüfung mit Hilfe eines 6 dB Dämpfungsglieds wird ersichtlich, dass der gewählte Vorverstärker in Kombination mit Stromzange B übersteuert. Für weitere Entwicklungs- und insbesondere Freigabemessungen ist in diesem Fall ein anderer Vorverstärker zu wählen.

### 3.2 Vorschlag für neue Transferimpedanzanforderungen

Die bisherigen Ausführungen zeigen, dass eine Überarbeitung der aktuellen Transferimpedanzanforderungen aus CISPR 16-1-2 die Sensitivität des Messsystems erhöhen, das Grundrauschniveau senken und darüber hinaus weitere kommerziell erhältliche Stromzangen kontinuierlich über ihren operativen Frequenzbereich CISPR-konform nutzbar machen kann.

Eine Anpassung der aktuellen Anforderungen auf  $0,1 \Omega - 10 \Omega$  ( $\triangleq -20 \text{ dB}\Omega$  bis  $20 \text{ dB}\Omega$ ) im ebenen (linearen) Bereich und  $0,001 \Omega - 10 \Omega$  ( $\triangleq -60 \text{ dB}\Omega$  bis  $20 \text{ dB}\Omega$ ) unterhalb des ebenen (linearen) Bereichs ist ggf. in Kombination mit einem geeigneten Vorverstärker bereits ausreichend. Abbildung 9 illustriert den Vorschlag inkl. exemplarischem Verlauf einer Stromzange, die gemäß den neuen Anforderungen ab 200 Hz vollständig CISPR konform wäre.

Von den angepassten Stromzangenanforderungen profitieren auch Prüflabore, weil durch eine geschickte Wahl der Stromzange häufige Wechsel im Messbetrieb entfallen können.

## 4 Ergebnisse / Abschluss

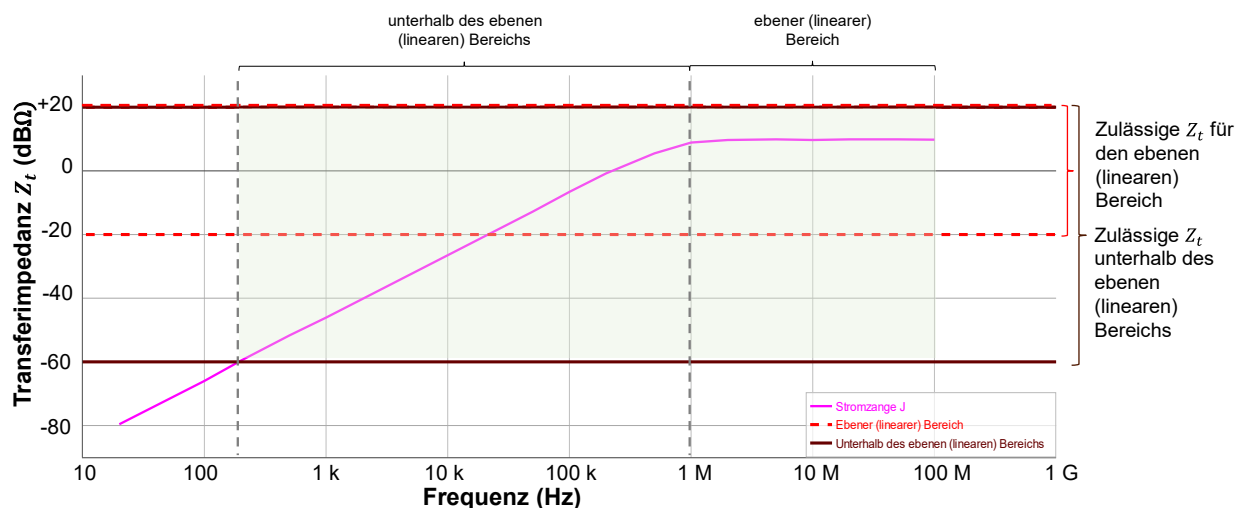


Abbildung 9: Vorschlag zur Überarbeitung der Transferimpedanzanforderungen inkl. exemplarischem Verlauf einer nun kontinuierlich konformen Stromzange

Der in Abschnitt 3.2 gemachte Vorschlag zur Überarbeitung der Transferimpedanzanforderungen ist auf der letzten Sitzung der CISPR/D/WG2 im Juni 2023 vorgestellt und zur Weitergabe an CISPR/A angenommen worden. CISPR/A berät aktuell über den Vorschlag (Stand: Januar 2024). Bisher wurde nach bestem Wissen der Autoren und gemäß Rückmeldung der beteiligten Normungsgremien noch kein anderer Vorschlag zur Überarbeitung der Transferimpedanzanforderungen in CISPR 25 und CISPR 16-1-2 bei den zuständigen Gremien eingereicht.

### Literatur

- [1] CISPR 25 – Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics, 2021.12 (Ed. 5)
- [2] CISPR 16-1-2 – Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Coupling devices for conducted disturbance measurements, 2014.03 (Ed. 2)