

# Phasenrichtige HF-Störstrommessung und HF-Stromeinspeisung mit kalibrierten Impedanzzangen

M. Sc. Martin Harm, M. Sc. Oliver Kerfin

Technische Universität Braunschweig, Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit

## 1 Einleitung

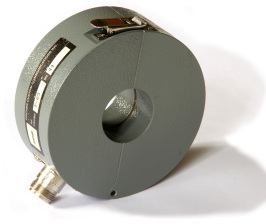
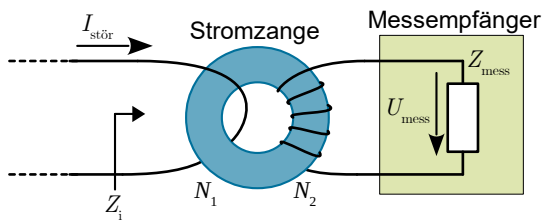
Der Einsatz schnell schaltender Wide-Bandgap-Halbleiter mit dem Ziel der Effizienzsteigerung leistungselektronischer Systeme erfordert präzise EMV-Messtechnik. Nicht nur um sicherzustellen, dass die Grenzwerte eingehalten werden, sondern auch zur Unterstützung des Designprozesses im Sinne einer ganzheitlichen Effizienzoptimierung, die auch EMV-Maßnahmen wie Filter und Schirmungen mit einbezieht. Eine solche Optimierung erfordert eine umfangreiche Modellierung des Gesamtsystems und dazu die möglichst genaue Kenntnis der Hochfrequenzeigenschaften der beteiligten Komponenten unter realen Randbedingungen. Am Institut für EMV wird dazu an einem kontaktlosen Messverfahren geforscht, das auf der Verwendung so genannter Impedanzzangen basiert, die zusammen mit dem dazugehörigen Kalibrierverfahren in [1] präsentiert wurden. Die Impedanzzange ist eine spezielle Form der Stromzange, die nur eine einzige oder sehr wenige Sekundärwindungen besitzt. Idealerweise wird so die Impedanz des Systems unter Test (SUT) direkt auf den Anschluss der Impedanzzange abgebildet. Dies ermöglicht die rückführbare 3-Term-Kalibrierung der Zange unter Verwendung dreier Kalibrierstandards mit Hilfe von Reflexionsmessungen, wodurch das komplexe Übertragungsverhalten der Impedanzzange ermittelt werden kann [1]. Dieses Verfahren ermöglicht breitbandige kontaktlose Impedanzmessungen [1] und kontaktlose vektorielle Netzwerkanalyse [2, 5].

In diesem Beitrag geht es darum, inwiefern dieses Verfahren auch zur Hochfrequenzstörstrommessung und Hochfrequenzstromeinspeisung verwendet werden kann, ob sich dadurch Vorteile gegenüber den klassischen Methoden ergeben und welche Probleme dabei auftreten.

In der klassischen EMV kommen für Störstrommessungen üblicherweise spezielle Stromzangen zum Einsatz, die eine transformatorische Kopplung zwischen Messobjekt und Messsystem bewirken. Sie bestehen aus einem Ringkern aus magnetischem Material, durch den die zu vermessende Leitung geführt wird. In Abbildung 1a ist die Messsituation schematisch dargestellt, dabei ist die durch die Zange geführte Leitung als Primärseite definiert und besitzt somit nur eine einzige Windung  $N_1 = 1$ . Die Sekundärseite ist die auf den Ringkern gewickelte Wicklung mit der Wicklungszahl  $N_2$ . In Abbildung 1b ist beispielhaft die kommerzielle Stromzange F-65 der Firma FCC abgebildet, die wie die meisten Stromzangen klappbar ausgeführt ist und ein metallisches Schirmgehäuse besitzt.

Der zu messende Strom  $I_{\text{stör}}$  bewirkt einen Spannungsabfall  $U_{\text{mess}}$  über dem Widerstand des an die Stromzange angeschlossenen Messgeräts, üblicherweise ein Funkstörmessempfänger mit  $50 \Omega$ . Der Zusammenhang der gemessenen Spannung und des gesuchten Stroms wird als Transferimpedanz

$$Z_T = \frac{U_{\text{mess}}}{I_{\text{stör}}} \quad (1)$$



(a)

(b)

**Bild 1:** (a) Schematische Darstellung eines Stromzangenmessaufbaus mit den wichtigsten Kenngrößen (b) Modell F-65 von FCC

bezeichnet. Die frequenzabhängige Transferimpedanz ist das Ergebnis der in einem speziellen Aufbau durchgeführten Kalibrierung der Stromzange und wird üblicherweise als Korrekturkurve vom Hersteller zu Verfügung gestellt. In der Praxis wird die Transferimpedanz nur betragsmäßig und meist in der Einheit  $\text{dB}\Omega$  angegeben. Klassische EMV-Stromzangen und deren Kalibrierung sind in der einschlägigen Literatur vielfach thematisiert. Für eine grundlegende Betrachtung sei vor allem [4] genannt.

Zur kontaktlosen Einspeisung eines Störstromes, der so genannten *Bulk Current Injection* (BCI), werden spezielle BCI-Zangen verwendet, die prinzipiell genauso wie die oben beschriebenen Stromzangen aufgebaut sind. Jedoch kann hier aufgrund spezieller Auslegung eine hohe Speiseleistung verwendet werden. Bei der BCI-Methode wird eine zusätzliche Monitorstromzange benötigt, um den tatsächlich eingespeisten Strom zu bestimmen und damit die Signalquelle einzuregeln, da die Impedanz des Testsystems in der Regel unbekannt ist.

## 2 Verwendung von Impedanzzangen zur Störstrommessung und Stromeinspeisung

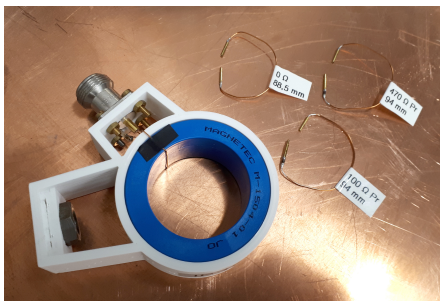
Für die in dieser Veröffentlichung gezeigten Messergebnisse wird eine eigens konstruierte Impedanzzange mit der internen Bezeichnung IP15 verwendet. Diese Zange ist in Abbildung 2a dargestellt. Sie besteht aus einem nanokristallinen Ringkern (Nr. M-1504-01) der Firma Magnetec mit einer Anfangspermeabilität von  $\mu_r = 4000$ . Dieser Kern ist in einer Kunststoffhalterung fixiert, an der auch der Anschluss in N-Technik angebracht ist. Die Zange besitzt eine einzige Sekundärwindung und ist ungeschirmt. Diese Impedanzzange ist für Messungen im Frequenzbereich von 100 kHz bis 100 MHz geeignet.

Die Kalibrierung der Impedanzzange liefert als Ergebnis die vollständige Zweitorstrommatrix  $S$ , die die an den Toren auslaufenden Wellen  $b_{1,2}$  mit den einlaufenden Wellen  $a_{1,2}$  verknüpft:

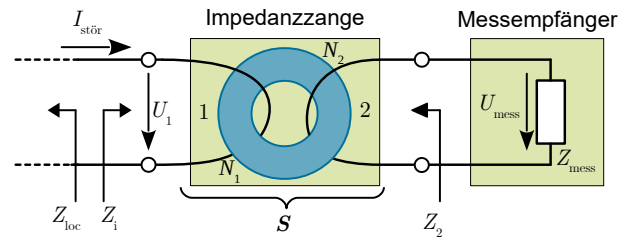
$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}}_S \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Die Bezugsimpedanz  $Z_0$  der Streuparameter wird dabei sinnvollerweise zu  $50 \Omega$  gewählt. In diesem Fall wurde die IP15 mit einem Vektoriellen Netzwerkanalysator (Keysight ENA 5080) und einem Set aus drei Kalibrierschleifen mit  $0$ ,  $100$  und  $470 \Omega$  kalibriert. Die Impe-

danken der Kalibrierschleifen wurden dazu analytisch berechnet. Für detaillierte Informationen bezüglich des Kalibriervorgangs sei auf [1] verwiesen.



(a)



(b)

**Bild 2:** (a) Impedanzzange IP15 mit den zugehörigen Kalibrierschleifen und (b) Schematische Zweitordarstellung der Messsituation

## 2.1 Ermittlung der Transferimpedanz von Impedanzzangen

Analog zu EMV-Stromzangen kann auch für Impedanzzangen eine Transferimpedanz ermittelt werden. Diese lässt sich wie im Folgenden dargestellt direkt aus den durch die Kalibrierung bekannten Streuparametern der Impedanzzange berechnen. Dazu wird die in Abbildung 2b dargestellte Messanordnung herangezogen.

Der zu messende Strom  $I_{\text{stö}r}$  fließt durch die Impedanzzange, wodurch über deren Einfügeimpedanz  $Z_i$  die Spannung  $U_1$  abfällt. Somit ergibt sich die in Tor 1 der Impedanzzange einlaufende Welle  $a_1$  zu

$$a_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{U_1}{\sqrt{Z_0}} + I_{\text{stö}r} \sqrt{Z_0} \right) \quad (3)$$

Die aus Tor 2 der Impedanzzange auslaufende Welle ist dann gemäß den Gleichungen (2) und (3)

$$b_2 = \underbrace{S_{22}}_{=0} a_2 + S_{21} \frac{1}{2} \left( \frac{U_1}{\sqrt{Z_0}} + I_{\text{stö}r} \sqrt{Z_0} \right) \quad (4)$$

Wird die Impedanzzange reflexionsfrei an das Messgerät angeschlossen, was in der Praxis angenommen werden kann, dann existiert keine in Tor 2 einlaufende Welle, sodass  $a_2 = 0$  gilt. Damit fällt zunächst, wie bereits angedeutet, der erste Term in Gleichung (4) weg. Zusätzlich kann die Einfügeimpedanz der Impedanzzange direkt über

$$Z_i = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (5)$$

ausgedrückt werden, so dass

$$b_2 = \frac{S_{21} \sqrt{Z_0} I_{\text{stö}r}}{1 - S_{11}} \quad (6)$$

folgt. Die Welle  $b_2$  kann auch direkt aus Strom und Spannung an Tor 2 berechnet werden und vereinfacht sich mit  $I_2 = -U_{\text{mess}}/Z_{\text{mess}}$  zu

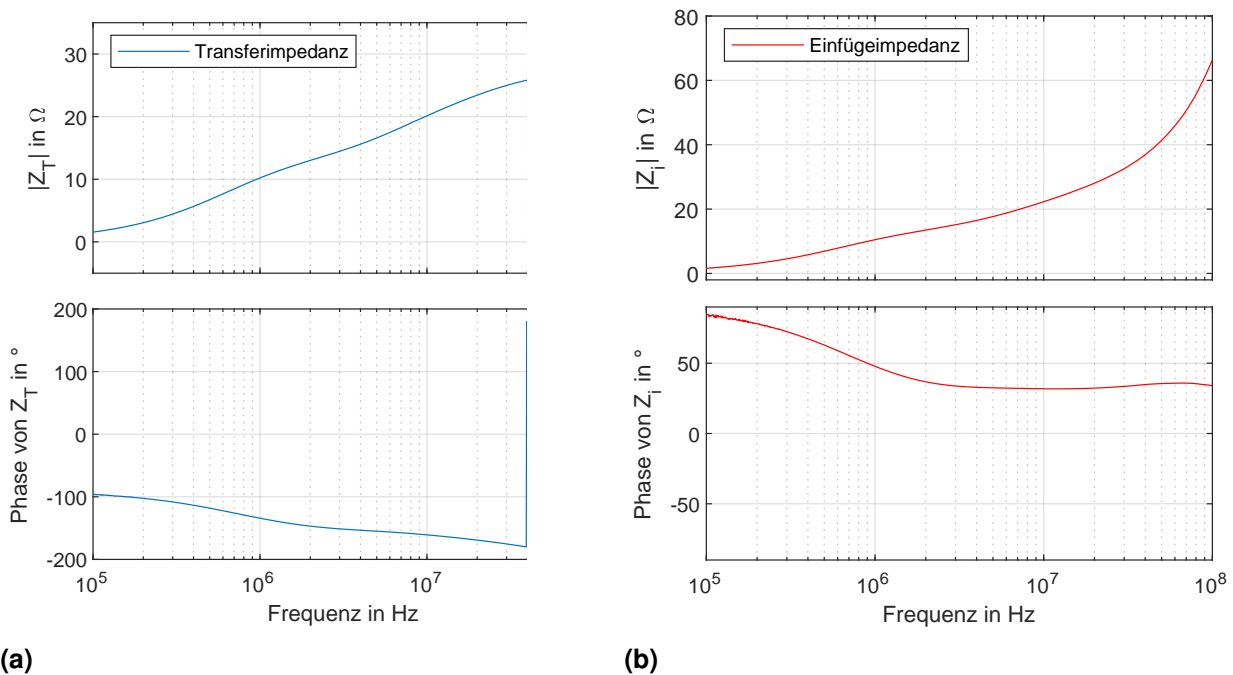
$$b_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{U_{\text{mess}}}{\sqrt{Z_0}} - I_2 \sqrt{Z_0} \right) = \frac{U_{\text{mess}}}{\sqrt{Z_0}} \quad (7)$$

Gleichsetzen der Gleichungen (6) und (7) und Umstellen nach  $Z_T$  liefert dann

$$Z_T = \frac{U_{\text{Mess}}}{I_{\text{stör}}} = \frac{S_{21} Z_0}{1 - S_{11}} \quad (8)$$

als Transferimpedanz der Impedanzzange. Die so berechnete Transferimpedanz liegt als komplexe Größe vor, ihr Betrag entspricht der für Stromzangen angegebenen Größe. Durch die Kenntnis der komplexen Transferimpedanz ist ein Rückschluss auf die tatsächliche Phasenlage des Stroms im SUT möglich.

In den Abbildungen 3b und 3a ist die sich aus der Kalibrierung ergebende Transferimpedanz bzw. Einfügeimpedanz der Impedanzzange IP15 dargestellt. Die Transferimpedanz



**Bild 3:** (a) Transferimpedanz und (b) Einfügeimpedanz der Impedanzzange IP15 aus der Kalibrierung

## 2.2 Korrektur des Einflusses der Einfügeimpedanz

Die Einfügeimpedanz der Impedanzzange kann, wie bereits in Abschnitt 2.1 gezeigt, über Gleichung (5) direkt aus den Streuparametern der Zange berechnet werden. Bei klassischen Stromzangen wird das Windungsverhältnis so gewählt, dass die Einfügeimpedanz  $1 \Omega$  nicht übersteigt. Dies ist bei Impedanzzangen nicht möglich. Hier beträgt die Einfügeimpedanz aufgrund des Übertragungsverhältnisses von 1:1 theoretisch  $50 \Omega$ , in der Praxis ist die Größe natürlich frequenzabhängig wie in Abbildung 3b zu sehen ist. Die Einfügeimpedanz der IP15 steigt von ca.  $1,6 \Omega$  bei  $100 \text{ kHz}$  auf  $66,5 \Omega$  bei  $100 \text{ MHz}$ .

Der mit der Impedanzzange gemessene Störstrom ist dann zwar der Strom, der tatsächlich auf der Leitung fließt, jedoch ist dieser aufgrund der zusätzlich eingebrachten Impedanz verfälscht. Dies gilt natürlich auch für Messungen mit klassischen Stromzangen, wobei dabei davon ausgegangen wird, dass die Einfügeimpedanz von  $1 \Omega$  keinen relevanten Einfluss auf den Störstrom hat. Die Abweichung des so gemessenen Stroms vom eigentlich gewünschten Messergebnis hängt natürlich maßgeblich von der Impedanz des

zu messenden Systems ab. Je kleiner dessen Impedanz ist, desto stärker wirkt sich eine zusätzliche Impedanz im Stromkreis aus.

Da die Funktionsweise der Impedanzzange gerade auf dem Übersetzungsverhältnis von 1:1 basiert, besteht hier keine Möglichkeit einer Verkleinerung der Einfügeimpedanz durch Änderung des Windungsverhältnisses. Im Folgenden wird ein Ansatz zur rechnerischen Korrektur der Einfügeimpedanz vorgestellt.

Mit Hilfe der Impedanzzange kann die so genannte lokale Impedanz  $Z_{loc}$  des Testobjekts gemessen werden [1]. Diese Impedanz ist die sich aus Sicht der Messzange ergebende Gesamtimpedanz des Testobjekts. Ohne Impedanzzange ergibt sich damit der Störstrom zu

$$I_{stör} = \frac{U_{stör}}{Z_{loc}} \quad (9)$$

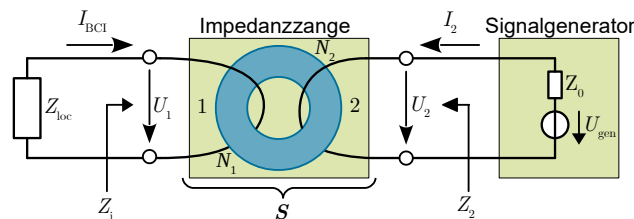
Wird nun die Impedanzzange in den Stromkreis eingebracht, so liegt deren Einfügeimpedanz in Reihe zu  $Z_{loc}$  und es fließt der beeinflusste Störstrom  $I'_{stör}$ . Über

$$I_{stör} = I'_{stör} \frac{Z_{loc}}{Z_{loc} + Z_i} \quad (10)$$

lässt sich dann aus dem Strom  $I'_{stör}$  und den Impedanzen der gesuchte Strom  $I_{stör}$  berechnen. Hierbei werden allerdings Störspannungsquelle und Impedanz des Stromkreises als konzentrierte Elemente angenommen, was für höhere Frequenzen fraglich ist. Zusätzlich wird vorausgesetzt, dass die Störquelle eine Spannungsquellencharakteristik besitzt und selbst nicht von der Impedanz des Stromkreises abhängt.

### 2.3 Stromeinspeisung

Prinzipiell ist mittels einer kalibrierten Impedanzzange die Einspeisung eines definierten Stroms ohne zusätzliche Monitorzange möglich. Die entsprechende Anordnung aus Signalgenerator, Impedanzzange und Testobjekt ist in Abbildung 4 dargestellt. Im folgenden wird der sich aus einer an Tor 2 der Zange anliegenden Spannung  $U_2$  ergebende Strom  $I_{BCI}$  im SUT berechnet.



**Bild 4:** Schematische Darstellung der Anordnung zur Stromeinspeisung mittels Impedanzzange

Die Berechnung des Faktors  $I_{BCI}/U_2$  ist komplizierter als die Berechnung der Transferimpedanz, da auf der Seite des SUTs keine Reflexionsfreiheit herrscht  $Z_{loc} \neq Z_0$ . Nach [3] ergibt sich mit der lokalen Impedanz  $Z_{loc}$  die aus Tor 1 auslaufende Welle zu

$$b_1 = a_2 \frac{S_{12}(Z_{loc} + Z_0)}{Z_{loc} + Z_0 - S_{11}(Z_{loc} - Z_0)} \quad (11)$$

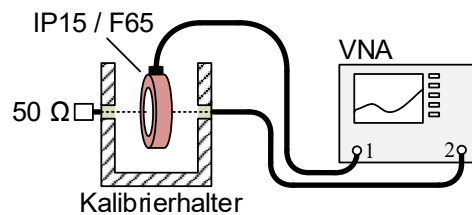
Einsetzen von  $b_1$  und  $a_2$  und Umstellen des Ergebnisses führt dann zu

$$\frac{I_{\text{BCI}}}{U_2} = \frac{S_{12}(Z_2 + Z_0)(Z_{\text{loc}} + Z_0)}{Z_2(Z_{\text{loc}} - Z_0)(Z_{\text{loc}} + Z_0 + S_{11}(Z_{\text{loc}} - Z_0))} \quad (12)$$

mit der resultierenden Eingangsimpedanz  $Z_2$  der in den Stromkreis eingefügten Impedanzzange und der lokalen Impedanz  $Z_{\text{loc}}$  des SUTs. Die Impedanz  $Z_2$  kann direkt am Anschluss der Impedanzzange gemessen werden, während die lokale Impedanz mit Hilfe der Kalibrierdaten der Impedanzzange gemäß [1] gemessen werden kann. Mit dem so bestimmten komplexen Zusammenhang ist prinzipiell eine phasenrichtige Stromeinspeisung möglich.

### 3 Messungen

Zur Überprüfung der im vorigen Abschnitt beschriebenen Berechnungen wird ein Referenzmessaufbau, bestehend aus einer Kalibrierhalterung für Stromzangen, verwendet, siehe Abbildung 5. Die an diesem Aufbau gemessenen Streuparameter werden gestrichen dargestellt.



**Bild 5:** Versuchsanordnung zur Verifikation der vorgestellten Messmethoden

#### 3.1 Strommessung im Referenzaufbau

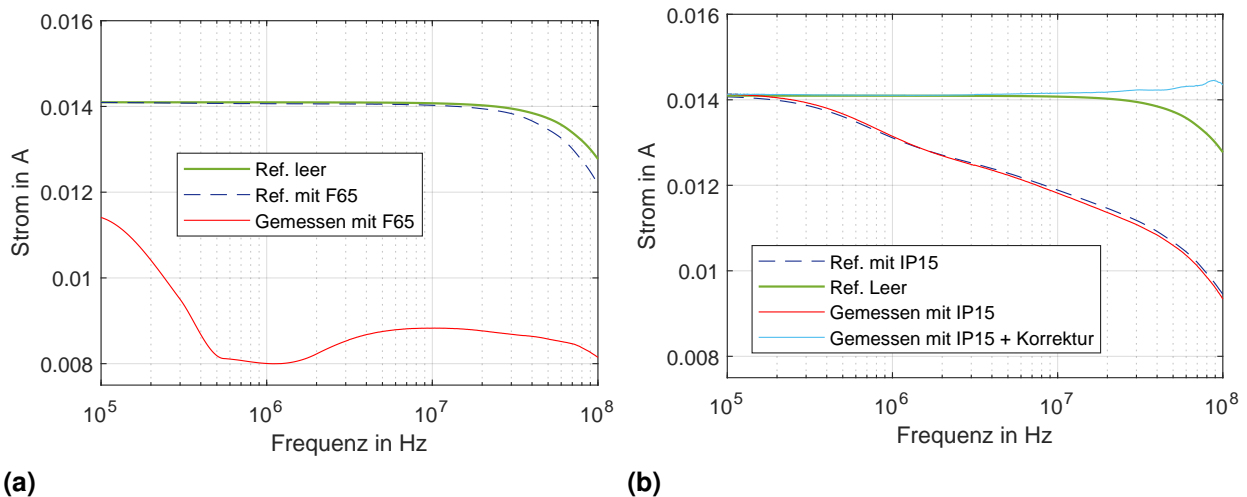
Wird an Tor 2 des Aufbaus ohne eingefügte Messzange ein HF-Signalgenerator, in diesem Falle ein VNA mit einer Sendeleistung von  $P_{\text{tx}} = 10 \text{ dB m}$  angeschlossen, dann kann unter Kenntnis des Reflexionsfaktors  $S_{22}$  über

$$I_{\text{ref}} = \sqrt{\frac{P_{\text{tx}}}{Z_0} \frac{1 - S'_{11}}{1 + S'_{11}}} \quad (13)$$

der tatsächlich im Versuchsaufbau fließende Strom  $I_{\text{ref}}$  berechnet werden. Mit einer Länge des Kalibrierhalters von 100 mm kann bis zu einer Frequenz von ca. 300 MHz von einer gleichförmigen Stromverteilung auf dem Innenleiter ausgegangen werden. Eine Strommesszange hat nun die Aufgabe, genau den Strom  $I_{\text{ref}}$  als Messergebnis zu liefern.

Dieser bekannte Strom wird nun wie in Abbildung 5 angedeutet mit der klassischen Stromzange F65 und der Impedanzzange IP15 vermessen. Die dazugehörigen Messergebnisse sind in den Abbildungen 6a und 6b dargestellt. Der Störstrom wurde über

$$I_{\text{stör}} = \frac{\sqrt{|S'_{21}|^2 P_{\text{tx}} Z_0}}{Z_{\text{T}}} \quad (14)$$



**Bild 6:** (a) Strommessergebnisse mit der F65 und (b) Strommessergebnisse mit der IP15 korrigiert und unkorrigiert

aus der Sendeleistung des VNA und über die jeweilige Transferimpedanz berechnet. Die Transferimpedanz der F65 ist vom Hersteller bereitgestellt.

Die Ergebnisse für die klassische Stromzange zeigen, dass der tatsächlich fließende Strom durch das Einbringen der Zange kaum verfälscht wird. Das Störstrommessergebnis weicht jedoch bis zu 75 % vom Referenzwert ab. Hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Kalibrierdaten der F65 schon einige Jahre alt sind.

Die Impedanzzange IP15 beeinflusst den tatsächlich fließenden Strom deutlich stärker, dieser weicht bis zu 16 % vom Referenzstrom ab. Dieser verfälschte Strom wird dann allerdings mit einer Genauigkeit von besser als 1 % gemessen. Die Korrektur der Strommesswerte der Impedanzzange gemäß Abschnitt 2.2 führt im Frequenzbereich bis zu 10 MHz tatsächlich zu deutlich besseren Ergebnissen. Bei hohen Frequenzen funktioniert dieses Verfahren erwartungsgemäß nicht mehr.

### 3.2 Stromeinspeisung im Referenzaufbau

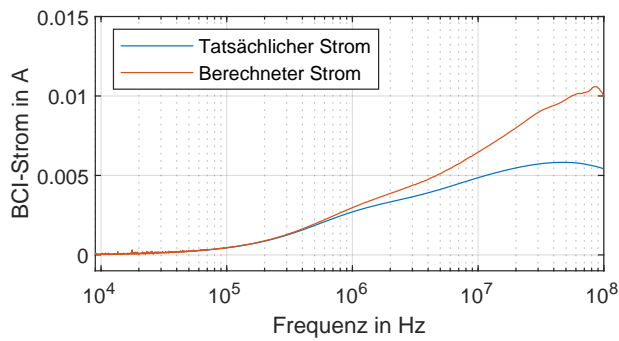
Die oben beschriebene Methode zur Stromeinspeisung mit Hilfe einer Impedanzzange wird ebenso am Aufbau aus Abbildung 5 überprüft. Die an der an Port 1 des VNA angeschlossene Impedanzzange anliegende Spannung  $U_2$  ergibt sich über

$$U_2 = Z_2 \frac{\sqrt{P_{tx} Z_0}}{Z_0 + Z_2} \quad (15)$$

aus der Sendeleistung  $P_{tx} = 10 \text{ dB m}$  des VNAs und der Systemimpedanz  $Z_0 = 50 \Omega$ . Über Gleichung (12) wird dann der injizierte Strom bestimmt. Als Referenz dient der über die an Port 2 des VNA ankommende Leistung berechnete, tatsächlich fließende Strom

$$I_{\text{ref}} = \sqrt{\frac{P_{tx} |S'_{21}|^2}{Z_0}} \quad (16)$$

In Abbildung 7 ist dieser Strom dem über die in Abschnitt 2.3 vorgestellte Methode berechneten eingespeisten Strom gegenübergestellt. Bis ca. 1 MHz stimmen die beiden Kurven gut überein, darüber kommt es zu Abweichungen von bis zu 50 %.



**Bild 7:** Ergebnis der Verwendung der Impedanzzange zur Stromeinspeisung

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Veröffentlichung wird erläutert, inwiefern sich kalibrierte Impedanzzangen zur HF-Störstrommessung und Störstromeinspeisung eignen. Es wurde herausgestellt, dass unter der Voraussetzung der Kenntnis der komplexen Streuparameter der Impedanzzange prinzipiell eine phasenrichtige Strommessung sowie Stromeinspeisung möglich ist. Die gezeigten Messergebnisse erster grundlegender Versuche zeigen vor allem für die Störstrommessung gute Ergebnisse, wenn auch mit der Einschränkung der großen Einfügeimpedanz der Impedanzzange. Die Korrektur dieser Ergebnisse mit Hilfe der lokalen Impedanz des Systems funktioniert nur für den unteren Frequenzbereich. Gleiches gilt für die Stromeinspeisung per Impedanzzange. Bei diesen Ergebnissen muss jedoch auch hinterfragt werden ob der verwendete Versuchsaufbau eine ausreichend gute Referenzumgebung darstellt. In der Zukunft werden die hier gezeigten Versuche weiter ausgebaut und vor allem an optimierten Aufbauten validiert.

#### Literatur

- [1] JUNGE, Axel: *Kontaktlose Verfahren zur breitbandigen Messung an Leitungen bei Hochfrequenz: Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2009.* Aachen : Shaker, 2009 (Berichte aus der Elektrotechnik). – ISBN 9783832283803
- [2] KÜLLMER, Alexander: *Kalibrierung von Magnetfeldantennen mittels kontaktloser vektorieller Netzwerkanalyse: Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2016.* Aachen : Shaker, 2016 (Berichte aus der Elektrotechnik). – ISBN 9783844045406
- [3] MICHEL, Hans-Jürgen: *Zweitor-Analyse mit Leistungswellen: Mit zahlreichen Anwendungsbeispielen.* Stuttgart : Teubner, 1981 (Teubner-Studienbücher Elektrotechnik). – ISBN 3519061120
- [4] MILLANTA, L. M.: Fundamentals of the EMC Current Probes. In: *12th International Symposium, Electromagnetic compatibility*, 1997. – ISBN 3952119911, S. 585–590
- [5] OPPERMANN, Lukas ; HARM, Martin ; ENDERS, Achim: Proof-of-concept of a method for Contactless Vector Network Analysis Using impedance probes. In: *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, IEEE, 04.09.2017 - 07.09.2017, S. 1–4. – DOI: 10.1109/EMCEurope.2017.8094664