

# Charakterisierung zeitvarianter HF-Impedanzen im Hinblick auf die EMV-Modellierung leistungselektronischer Systeme

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

Technische Universität Braunschweig, Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit

## 1 Einleitung

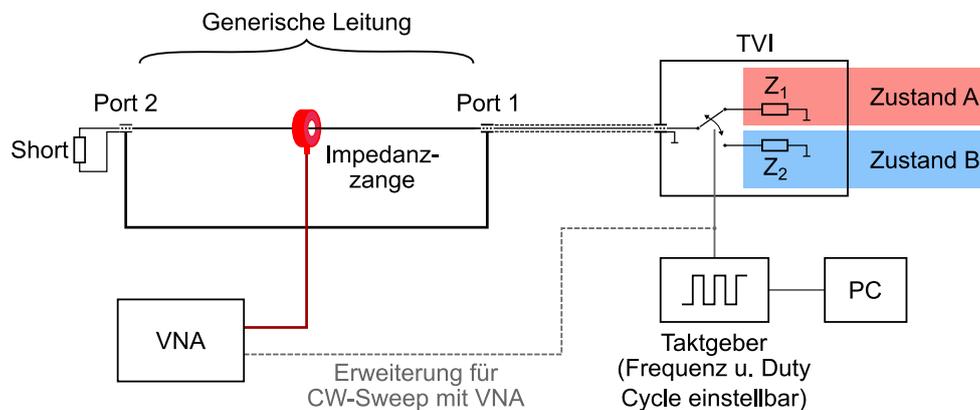
Zukünftige leistungselektronische Systeme werden von dem Einsatz von Wide-Bandgap-Halbleitern wie Siliciumcarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) profitieren. Gegenüber Silicium-Halbleitern sind deutlich gesteigerte Taktfrequenzen möglich, was sich positiv auf die Effizienz und den Bauraum der Systeme auswirkt. Aus Sicht der EMV stellen die sehr steilen Schaltflanken, die bei GaN-Leistungshalbleitern mehr als  $100 \text{ kV}/\mu\text{s}$  und  $50 \text{ kA}/\mu\text{s}$  betragen können, jedoch eine besondere Herausforderung dar. Häufig ist eine Modellierung des leistungselektronischen Systems u.a. hinsichtlich seiner HF-Impedanz sinnvoll, um die Leistungselektronik und gegebenenfalls erforderliche EMV-Maßnahmen bereits vor der Realisierung des Gesamtsystems optimal auslegen zu können. Hierdurch können der Designprozess verkürzt und Entwicklungskosten eingespart werden.

In [1] werden beispielsweise die Gleich- und die Gegentaktimpedanz eines im Betrieb befindlichen Umrichter-Motor-Systems durch Einkopplung eines HF-Signals und Messung der resultierenden HF-Spannungen und HF-Ströme charakterisiert. Diese Messdaten werden danach zur Modellierung einer Ersatzimpedanz genutzt. Falls die gemessene HF-Impedanz in dem untersuchten Szenario kaum vom Betriebszustand des Systems abhängt, ist die Nachbildung leicht möglich. Der zeitliche Verlauf der HF-Impedanzen leistungselektronischer Systeme ergibt sich aber durch das periodische Umschalten der Halbleiter und ist daher im Allgemeinen direkt durch den jeweiligen Betriebszustand der Leistungselektronik festgelegt. Es ist zu untersuchen, wie eine Modellierung solcher Systeme auch dann sinnvoll erfolgen kann, wenn sich die EMV-relevanten HF-Eigenschaften bei verschiedenen Betriebszuständen deutlich ändern.

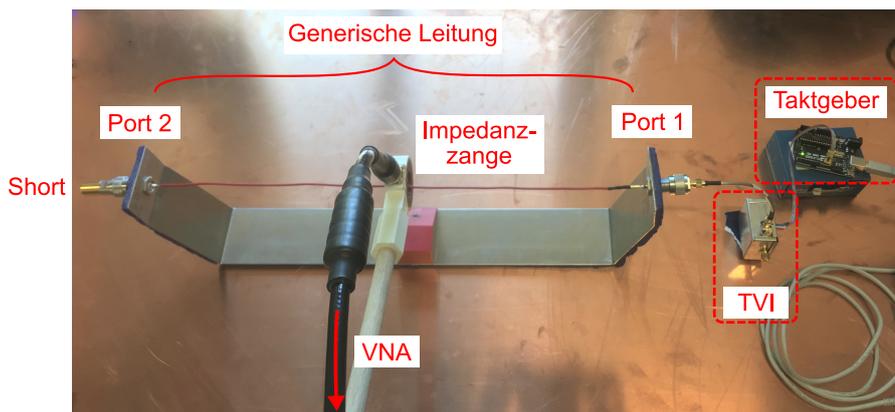
Im Rahmen dieser Veröffentlichung erfolgt eine grundlegende Betrachtung zur Charakterisierung zeitvarianter HF-Impedanzen. Anstelle eines realen leistungselektronischen, zu untersuchenden Systems (*system under test*, SUT) wird hier ein generischer Laboraufbau genutzt, mit dem unterschiedliche Impedanzverläufe mit Taktfrequenzen bis 100 kHz reproduzierbar nachgebildet werden können. Der Laboraufbau wird in Abschnitt 2 dieses Beitrags vorgestellt. Abschnitt 3 veranschaulicht, welchen Einfluss die Zeitvarianz von HF-Impedanzen auf deren Messung mit den in der EMV etablierten Messmethoden besitzt. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wird in Abschnitt 4 ein schalttaktsynchronisiertes Messkonzept vorgestellt, mit dessen Hilfe der tatsächliche zeitliche Verlauf der HF-Impedanz von leistungselektronischen Systemen analysiert werden kann. Mit diesem Verfahren aufgenommene Messkurven werden mit Referenzmessungen verglichen, um die Messgenauigkeit zu bewerten. Abschnitt 5 gibt abschließend einen kurzen Ausblick auf zukünftige, weiterführende Untersuchungen zu zeitvarianten HF-Impedanzen und mögliche Erweiterungen des hier vorgestellten Messkonzepts.

## 2 Laboraufbau zur Nachbildung zeitvarianter HF-Impedanzen

Für die grundlegende Betrachtung zur Charakterisierung zeitvarianter HF-Impedanzen dient das in Bild 1 schematisch dargestellte Setup. Bild 2 zeigt den entsprechenden Laboraufbau. Der Impedanzverlauf wird mit einer zeitvarianten Impedanznachbildung (*time-variant impedance*, TVI) vorgegeben und ist dementsprechend im Gegensatz zu der HF-Impedanz einer realen Leistungselektronik genau bekannt. Zentraler Bestandteil der TVI ist ein schneller HF-Schalter HMC641 von Analog Devices. Die TVI schaltet periodisch zwischen Zustand A mit der Impedanz  $Z_1$  und Zustand B mit der Impedanz  $Z_2$  um. Dabei sind die Schaltfrequenz sowie der Duty Cycle von einem PC aus mittels eines Taktgebers im Bereich zwischen 1 Hz und 100 kHz bzw. 0 % und 100 % einstellbar, sodass unterschiedliche Betriebszustände einer Leistungselektronik simuliert werden können. Bei einem Duty Cycle von 0 % verharrt die TVI in Zustand A, ein Duty Cycle von 100 % entspricht dauerhaft dem Zustand B. Die Impedanzen  $Z_1$  und  $Z_2$  werden durch externe Bauteile festgelegt, die über SMA-Steckverbinder mit dem HF-Schalter verbunden sind und bei Bedarf leicht geändert werden können.



**Bild 1:** Setup für die Nachbildung und Untersuchung zeitvarianter HF-Impedanzen



**Bild 2:** Laboraufbau mit TVI, generischer Leitung und Impedanzzange zur Messung der lokalen Impedanz

Die TVI ist an den Port 1 einer generischen Leitungsstruktur angeschlossen. Port 2 der Leitung ist mit einem Short abgeschlossen. Für ausgewählte Betriebszustände wird die lokale HF-Impedanz in der Mitte der Leitung mit einer kalibrierten Impedanzzange in Kombination mit einem vektoriellen Netzwerkanalysator (VNA) ENA5080 von Keysight Technologies gemessen. Die lokale Impedanz ist dabei die Gesamtimpedanz des SUT aus Sicht

der Impedanzzange. Die Grundlagen der Messung lokaler Impedanzen mit Impedanzzangen werden in [2] beschrieben. Für das in Abschnitt 4 vorgestellte schalttaktssynchronisierte Messkonzept wird der Laboraufbau zusätzlich um eine Verbindungsleitung zwischen dem Taktgeber für die TVI und dem externen Triggereingang des VNA erweitert.

### 3 Messung zeitvarianter HF-Impedanzen mit einem Frequenzbereichsweep

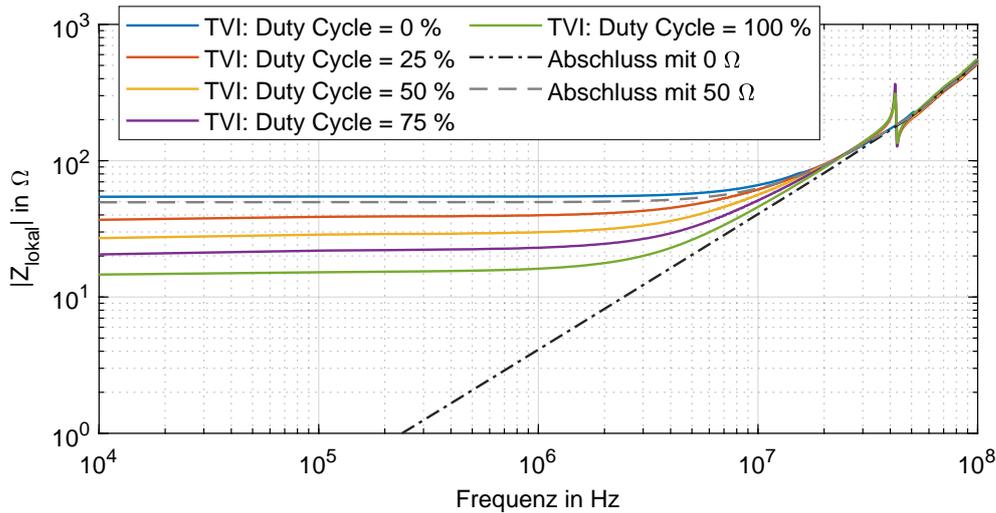
Üblicherweise werden die HF-Eigenschaften eines SUT im Bereich der EMV durch Messungen im Frequenzbereich charakterisiert. Z. B. werden zur Bewertung der Störaussendung des SUT Frequenzbereichsweeps mit Messempfängern durchgeführt, bei denen die Störpegel für die interessierenden Frequenzpunkte nacheinander ermittelt werden. Durch eine entsprechende Messzeit bei dem jeweiligen Frequenzpunkt wird dabei sichergestellt, dass auch nur sporadisch auftretende Peaks im Störspektrum erfasst werden.

Ein naheliegender Ansatz zur Charakterisierung von HF-Impedanzen ist daher ebenfalls deren Messung mit einem Frequenzbereichsweep, wie z. B. auch in [1] oder [3] durchgeführt. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird die lokale HF-Impedanz in der Mitte der generischen Leitungsstruktur aus Bild 1 und 2 durch einen Frequenzbereichsweep von 10 kHz bis 100 MHz mit dem VNA gemessen. Die eingestellte IF-Bandbreite beträgt für eine gute Messdynamik 100 Hz. Es werden 2000 Frequenzpunkte aufgenommen, wodurch sich die Gesamtdauer des Sweeps zu 19,22 s, entsprechend 9,61 ms je gemessenem Frequenzpunkt, ergibt. An die TVI werden ein  $50\ \Omega$ -Abschluss und ein Short angeschlossen. Durch den internen Aufbau des HF-Schalters ergeben sich die Impedanzen  $Z_1$  für Zustand A sowie  $Z_2$  für Zustand B zu  $54\ \Omega$  bzw.  $14\ \Omega$ . Die TVI wird zunächst mit einer Taktfrequenz von 1 kHz betrieben.

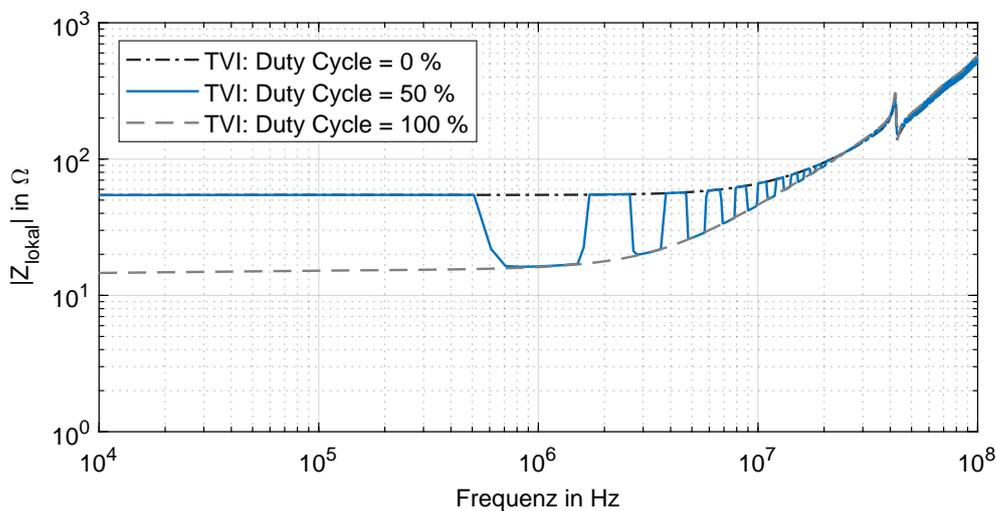
In Bild 3 ist der Betrag der gemessenen lokalen Impedanz für unterschiedliche Duty Cycle von 0 % bis 100 % aufgetragen. Die gestrichelten Linien zeigen ergänzend die gemessene HF-Impedanz bei direktem Abschluss der Leitung an Port 1 mit dem Short bzw. mit dem  $50\ \Omega$ -Abschluss anstelle der TVI. Deutlich sichtbar ist, dass die gemessene HF-Impedanz bei Frequenzen oberhalb von 10 MHz von den Eigenschaften der Leitung dominiert wird. Im unteren Frequenzbereich ergibt sich die gemessene Impedanz in Abhängigkeit des Duty Cycle als ein zeitlicher Mittelwert der Schaltzustände A und B der TVI, da die 1 ms-Periodendauer des Schaltzyklus wesentlich kürzer ist als die Messzeit des VNA je Frequenzpunkt.

Bei niedrigen Taktfrequenzen der TVI, bei denen die Periodendauer des Schaltzyklus wesentlich größer ist als die Messzeit je Frequenzpunkt, treten offensichtliche Probleme bei der Messung auf. Bild 4 zeigt als Extrembeispiel den Betrag der bei einer Schaltfrequenz von 5 Hz an der Leitung gemessenen lokalen Impedanz. Aufgrund der geringen Taktfrequenz wird beim Sweep des VNA kein zeitlicher Mittelwert über die unterschiedlichen Schaltzustände der TVI gebildet, sodass sich Sprünge in der Messkurve ergeben.

An dieser Stelle stellt sich die wesentliche Frage, unter welchen Voraussetzungen der zeitliche Mittelwert des Impedanzverlaufs ausreicht, um eine optimale Auslegung zukünftiger Leistungselektronik in Verbindung mit gegebenenfalls erforderlichen EMV-Maßnahmen zu realisieren. Diese Thematik ist nicht Gegenstand des vorliegenden Beitrags und wird in weiterführenden Untersuchungen ausführlich betrachtet.



**Bild 3:** Betrag der gemessenen lokalen Impedanz in Abhängigkeit des Duty Cycle bei einer TVI-Schaltfrequenz von 1 kHz sowie lokale Impedanz bei Abschluss der Leitung mit  $0\ \Omega$  bzw.  $50\ \Omega$  an Port 1



**Bild 4:** Betrag der gemessenen lokalen Impedanz in Abhängigkeit des Duty Cycle bei einer TVI-Schaltfrequenz von 5 Hz

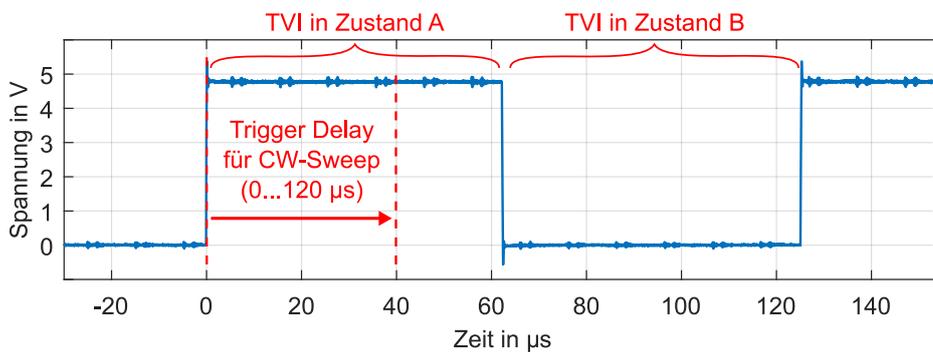
#### 4 Schalttaktsynchronisierte Messmethode zur Charakterisierung zeitvarianter HF-Impedanzen

Im vorigen Abschnitt wurde veranschaulicht, dass sich das Ergebnis eines Frequenzsweeps bei der Messung zeitvarianter HF-Impedanzen als duty-cycle-abhängige Mittelung über die unterschiedlichen Schaltzustände des SUT ergibt. Für die Optimierung leistungselektronischer Systeme kann jedoch zukünftig die Kenntnis des tatsächlichen Impedanzverlaufs ein wertvolles Hilfsmittel sein, z. B. bei der Modellierung. Im Folgenden wird daher eine Messmethode vorgeschlagen, mit der HF-Impedanzen mit dem VNA sowohl in Abhängigkeit der Frequenz als auch der Zeit charakterisiert werden können. Ausgangspunkt hierbei ist eine starke Verkürzung der Messzeit für die einzelnen Frequenzpunkte, um eine Mittelwertbildung über die Schaltzustände des SUT zu vermeiden. Die erste Erprobung des Messverfahrens erfolgt wieder mit dem in Abschnitt 2 beschriebenen Laboraufbau.

## 4.1 Vorstellung des Messverfahrens

Das vorgeschlagene Messverfahren basiert auf schalttaktsynchronisierten CW-Sweeps. Bei einem CW-Sweep misst der VNA die Streuparameter bei einer einzelnen, diskreten Frequenz als Funktion der Zeit. Durch eine Synchronisation des Sweeps mit dem Schalttakt des SUT wird die HF-Impedanz für alle relevanten Messfrequenzen nacheinander sukzessive für verschiedene Zeitpunkte während des Schaltzyklus ermittelt.

Das Taktsignal für die TVI wird gemäß Bild 1 zusätzlich auf den externen Triggereingang des VNA geführt. Das Takt- bzw. Triggersignal ist in Bild 5 dargestellt. Exemplarisch ist für die hier beschriebenen Untersuchungen eine typische Schaltfrequenz herkömmlicher Umrichter mit Silicium-Halbleitern von 8 kHz, entsprechend einer Periodendauer von 125  $\mu\text{s}$ , gewählt. Der Duty Cycle beträgt 50 %.



**Bild 5:** Referenztakt für TVI bzw. Triggersignal für den VNA

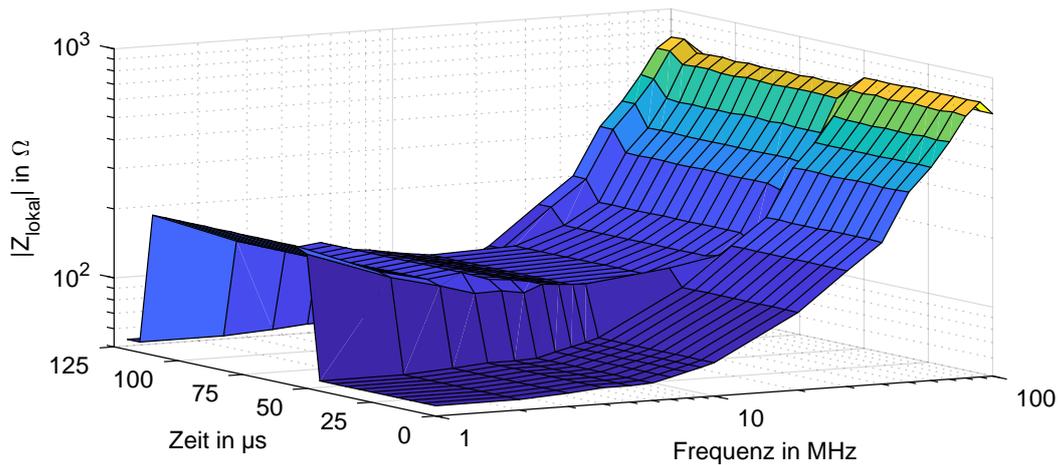
Die Verkürzung der Messdauer für die einzelnen Messpunkte wird durch eine IF-Bandbreite des VNA von 1 MHz erreicht. Dabei ergibt sich bei dem ENA5080 im Frequenzbereich von 1 MHz bis 100 MHz eine minimale Messzeit von ungefähr 5  $\mu\text{s}$  je Messpunkt. Während einer Periode des 8 kHz-Taktsignals sind mit den gewählten Einstellungen somit prinzipiell 25 Einzelmessungen möglich. Die Aufnahme eines einzelnen Messpunkts wird durch die steigende Flanke des Takt- bzw. Triggersignals gestartet. Durch ein in 5  $\mu\text{s}$ -Schritten von 0  $\mu\text{s}$  bis 120  $\mu\text{s}$  einstellbares Trigger Delay wird die lokale Impedanz der generischen Leitung definiert zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Schaltzyklus gemessen, sodass der zeitliche Impedanzverlauf des SUT durch iterative Einzelmessungen bestimmt werden kann.

Die gegenüber dem in Abschnitt 3 beschriebenen Frequenzbereichsweep stark erhöhte IF-Bandbreite verschlechtert die Dynamik des VNA allerdings um 40 dB. Aus diesem Grund erfolgt für jede Kombination aus Messfrequenz und Trigger Delay eine Mittelung über einen schalttaktsynchronisierten CW-Sweep mit 10000 Einzelmessungen, wodurch der Dynamikverlust kompensiert wird [4].

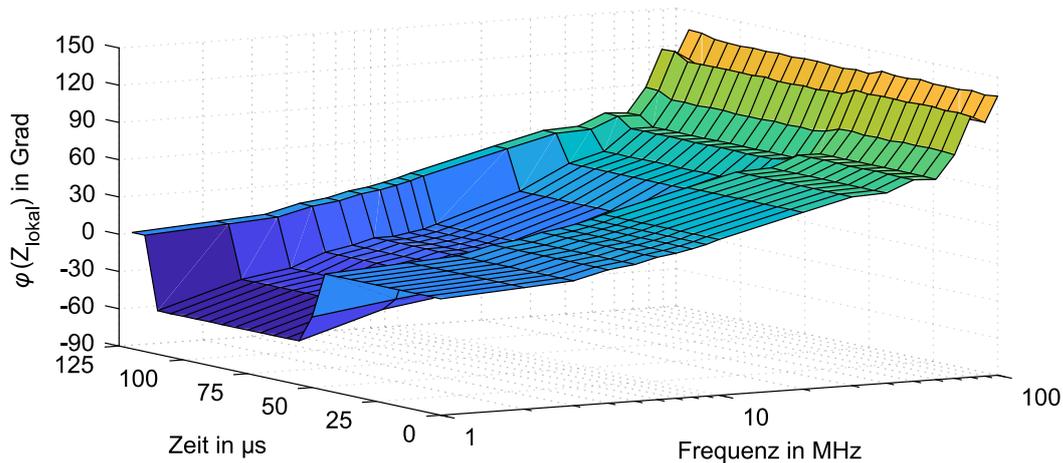
## 4.2 Auswertung der Messergebnisse

Im Folgenden wird die TVI für Zustand A mit einem 50  $\Omega$ -Abschluss sowie für Zustand B mit einer Serienschaltung aus einem 100  $\Omega$ -HF-Widerstand und einem 100 nF-Kondensator abgeschlossen. Durch das gewählte Netzwerk weist die HF-Impedanz für Zustand B eine deutliche, aber bekannte Frequenzabhängigkeit auf.

In Bild 6 und 7 sind der Betrag bzw. die Phase der im Laboraufbau bei der Schaltfrequenz von 8 kHz gemessenen lokalen Impedanz der Leitung in Abhängigkeit der Messfrequenz und der Zeit dargestellt. Deutlich erkennbar in Betrag und Phase ist das Umschalten der TVI zwischen den Zuständen A und B. Die Zustandsänderung der TVI findet sich im Messergebnis nicht genau nach der halben Periodendauer von  $62,5\ \mu\text{s}$  wieder, da die Messung aufgrund eines zusätzlichen und derzeit noch nicht kompensierten VNA-internen Delays ungefähr  $5\ \mu\text{s}$  verspätet ausgelöst wird. Wie bei den Frequenzbereichsweeps in Abschnitt 3 wird die gemessene HF-Impedanz oberhalb von 10 MHz durch die Eigenschaften der generischen Leitung dominiert.



**Bild 6:** Betrag der gemessenen lokalen Impedanz in Abhängigkeit der Messfrequenz und der Zeit bei einer TVI-Schaltfrequenz von 8 kHz



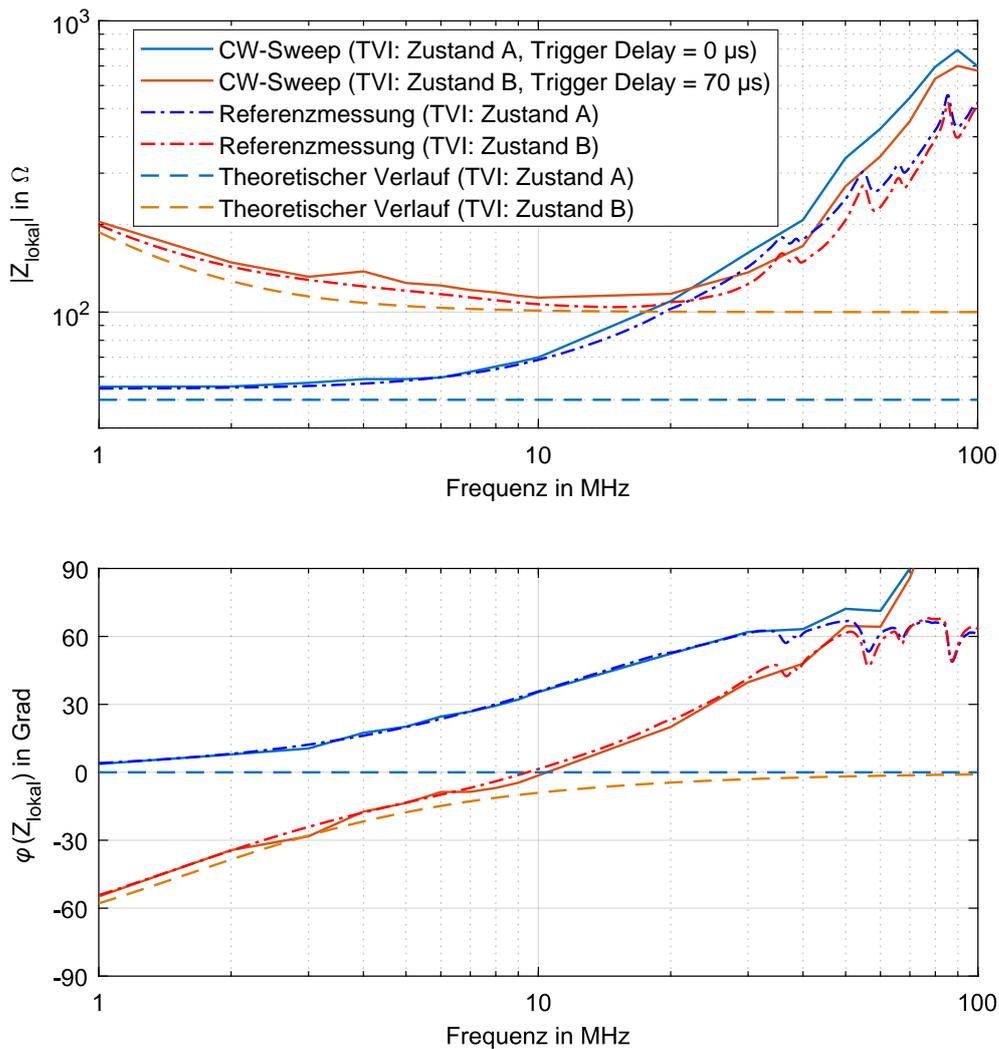
**Bild 7:** Phase der gemessenen lokalen Impedanz in Abhängigkeit der Messfrequenz und der Zeit bei einer TVI-Schaltfrequenz von 8 kHz

### 4.3 Analyse der Messgenauigkeit

Um die Genauigkeit der vorgeschlagenen Messmethode zu bewerten, werden die Ergebnisse des schalttakt synchronisierten Verfahrens mit Referenzmessungen verglichen. Wie

in Bild 6 und 7 zu erkennen ist, befindet sich die TVI bei einem Trigger Delay von  $0 \mu\text{s}$  bzw.  $70 \mu\text{s}$  in Zustand A bzw. in Zustand B. Die beiden zu diesen Zeitpunkten gemessenen Impedanzverläufe sind in Bild 8 in Abhängigkeit der Frequenz aufgetragen.

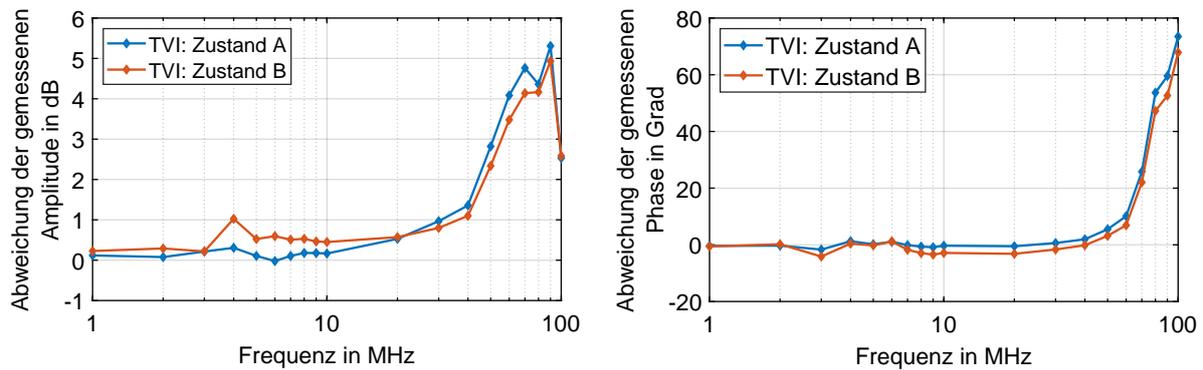
Bei den Referenzmessungen wird die TVI dauerhaft in Zustand A bzw. B geschaltet. In diesen statischen Betriebszuständen wird jeweils ein Frequenzbereichsweep mit dem VNA zur Bestimmung der lokalen Impedanz in der Leitungsmitte durchgeführt. Die entsprechenden Referenzkurven sowie die sich mit den Abschlussimpedanzen  $Z_1$  und  $Z_2$  theoretisch ergebenden Impedanzverläufe sind ebenfalls in Bild 8 dargestellt.



**Bild 8:** Vergleich zwischen der schalttaktsynchronisiert gemessenen lokalen Impedanz und entsprechenden Referenzmessungen

Gegenüber den theoretischen Impedanzverläufen der Zustände A und B ist bei den Messkurven wiederum der deutliche Einfluss der Leitungseigenschaften zu erkennen. Die Ergebnisse des schalttaktsynchronisierten Messverfahrens und der Referenzmessungen stimmen allerdings bis zu einer Frequenz von etwa 50 MHz sehr gut überein. In Bild 9 sind die Abweichungen der Amplituden- und Phasenverläufe gezeigt. Die schalttaktsynchronisiert gemessene Amplitude weicht bei 50 MHz für beide Zustände A und B um weniger als 3 dB von der Referenzmessung ab, die Phase um weniger als  $6^\circ$ . Oberhalb von

70 MHz treten deutliche Ungenauigkeiten insbesondere bei der schalttaktsynchronisierten Messung der Phase auf. Die Ursache hierfür wird in weitergehenden Untersuchungen genauer analysiert.



**Bild 9:** Abweichungen der schalttaktsynchronisiert gemessenen lokalen Impedanz gegenüber entsprechenden Referenzmessungen

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Eine grundlegende Betrachtung zur Charakterisierung zeitvarianter HF-Impedanzen wurde durchgeführt. Das Ergebnis eines Frequenzsweeps zur Messung der Impedanzen ergibt sich als duty-cycle-abhängige Mittelung über die unterschiedlichen Schaltzustände des SUT. Mit der vorgeschlagenen, schalttaktsynchronisierten Messmethode können HF-Impedanzen mit einem VNA sowohl in Abhängigkeit der Frequenz als auch der Zeit charakterisiert werden. In einem Laboraufbau wurde bis zu einer Frequenz von 50 MHz eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den schalttaktsynchronisierten Impedanzmessungen und entsprechenden Referenzmessungen erreicht.

Weiterführende Untersuchungen werden sich insbesondere mit der Frage beschäftigen, in welchen Situationen die Kenntnis des tatsächlichen, zeitabhängigen Verlaufs der HF-Impedanzen den Designprozess zukünftiger Leistungselektronik nachhaltig unterstützen kann. Zudem wird die schalttaktsynchronisierte Messmethode auch an realen leistungselektronischen Systemen erprobt.

## Literatur

- [1] JESCHKE, S. ; MAARLEVELD, M. ; BÄRENFÄNGER, J. ; HIRSCH, H. ; TSIAPENKO, S. ; OBHOLZ, M.: Impedanznachbildungen für aktive Hochvolt Komponenten des Antriebsstrangs bei Störaussendungsmessungen. In: *GMM-Fachbericht 88: EMV in der Kfz-Technik*, 2017
- [2] JUNGE, Axel: *Kontaktlose Verfahren zur breitbandigen Messung an Leitungen bei Hochfrequenz*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2009
- [3] KERFIN, Oliver ; HARM, Martin ; WILLMANN, Benjamin: Reference Setup for RF Impedance Measurements with High DC Bias Currents. In: *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe)*, 2019, S. 997–1002
- [4] KEYSIGHT TECHNOLOGIES: *Understanding and Improving Network Analyzer Dynamic Range (Application Note)*. 2014