

# Die Verfahren zur Ermittlung der Transferimpedanz von konfektionierten geschirmten Leitungen

Referent: Prof. Dr.-Ing. Harm-Friedrich Harms, Hochschule Emden-Leer, FB Technik, Abt. E+I, Constantiaplatz 4, D-26725 Emden, Deutschland, Harm-Friedrich.Harms@hs-emden-leer.de

Co-Autor: BEng. Alexander Schneider, Hochschule Emden-Leer, FB Technik, Abt. E+I, Constantiaplatz 4, D-26725 Emden, Deutschland, alexschneider\_1@yahoo.de

## 1 Einleitung

Die Transferimpedanz  $Z'_T$  ist aus EMV-Sicht die wichtigste Eigenschaft einer geschirmten Leitung. Sie gibt an, wie groß die in den Signalweg eingekoppelte Spannung ist, wenn ein definierter Strom auf dem Schirm fließt. Dieser Strom wird in der Praxis durch elektromagnetische Störungen verursacht. Dazu zählen insbesondere die galvanische, induktive und gestrahlte Einkopplung. Solange die Leitungslänge gering im Verhältnis zur Wellenlänge des betrachteten Störsignals ist, kann davon ausgegangen werden, dass die eingekoppelte Störspannung proportional zur Leitungslänge ist. Um den Wert der Impedanz zu erhalten wird daher die eingekoppelte Spannung nicht nur durch den Strom, sondern auch durch die Leitungslänge dividiert. Diese Transferimpedanz ist daher eine längenbezogene Größe (Gl. 1.1; Bild 2.1).

$$Z'_T = U/(I \cdot l) \quad (\text{Gl. 1.1})$$

In der Praxis ist aber auch die Ausführung und der Übergangswiderstand von Steckverbindern oder von Ein- und Durchführungen an den Enden der Leitung zu berücksichtigen. Die gute Schirmung einer Leitung wird durch ungeschirmte Steckverbindungen nahezu nutzlos. Werden diese konfektionierten Leitungen untersucht, ergibt sich die Transferimpedanz als Spannung bezogen auf den Strom. Diese Transferimpedanz gilt nur für einen bestimmten Leitungstyp in Kombination mit den verwendeten Steckverbindern. Daher geht die spezielle Länge üblicherweise nicht in die Bestimmung ein (Gl. 1.2).

$$Z_T = U/I \quad (\text{Gl. 1.2})$$

Es geht nicht nur die Transferimpedanz der mit den Leitungen verbundenen Stecker in ein Messergebnis ein. Die Qualität der Buchsen und der Übergangswiderstand zwischen ihnen beeinflussen das Ergebnis ebenso. Insbesondere bei Steckverbindern, bei denen keine exakten Montagevorgaben wie beispielsweise Drehmomente für Schraubverbindungen, Einrasten des Verbinders oder ähnlich existieren, sind die Ergebnisse von Messungen häufig wenig reproduzierbar.

## 2 Messverfahren zur Messung der Transferimpedanz

Angeregt durch den Beitrag: *Alternative Messmethoden zur Bestimmung der Transferimpedanz (Z<sub>T</sub>) von HV-Kabeln und HV-Kabel-Stecker-Systemen für Elektro- und Hybridfahrzeuge* [1] der EMV2016 in Düsseldorf wurden im Rahmen studentischer Arbeiten an der Hochschule Emden-Leer unterschiedliche Messverfahren untersucht. Die Messver-

fahren, außer Kap. 2.1, basieren alle auf demselben Prinzip zur Ermittlung der Transferimpedanz (Bild 2.1). Abweichend von der prinzipiellen Darstellung sind die Enden sinnvollerweise mit dem Wellenwiderstand abzuschließen.

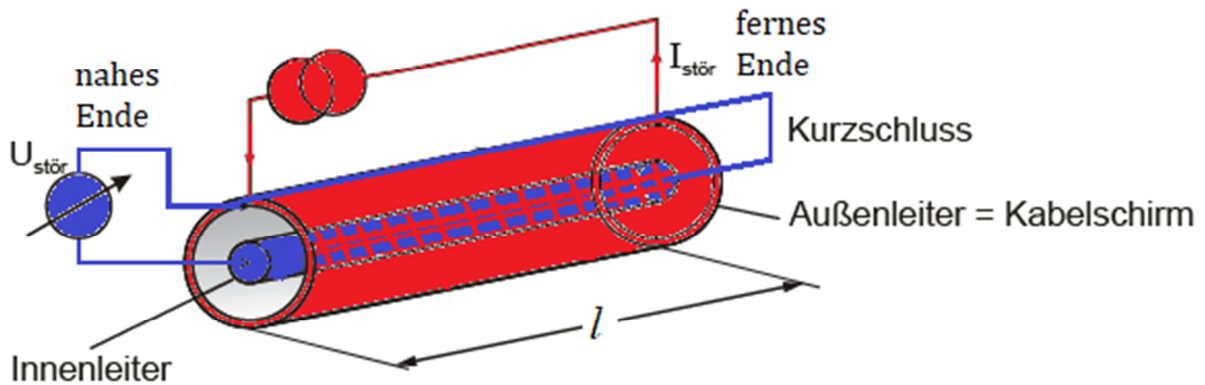


Bild 2.1: Prinzip der Messung der Transferimpedanz, Primärkreis rot, Sekundärkreis blau [2]

## 2.1 Gleichstrommessungen

Ein erstes Indiz für die Qualität der Schirmung einer Leitung ist der ohmsche Widerstand des Schirmes. Wenn zu wenig Material für den Schirm verwendet wird, kann keine gute Transferimpedanz und somit keine gute Schirmung erzielt werden. Im Rahmen einer ersten Untersuchung wurde daher ein Aufbau zur Messung des Gleichstromwiderstandes entworfen (Bild 2.2). Die Grundlage bildete die Vier-Leiter Messmethode. Dieses Verfahren ist für die genaue Bestimmung niedriger Widerstände unabdingbar.

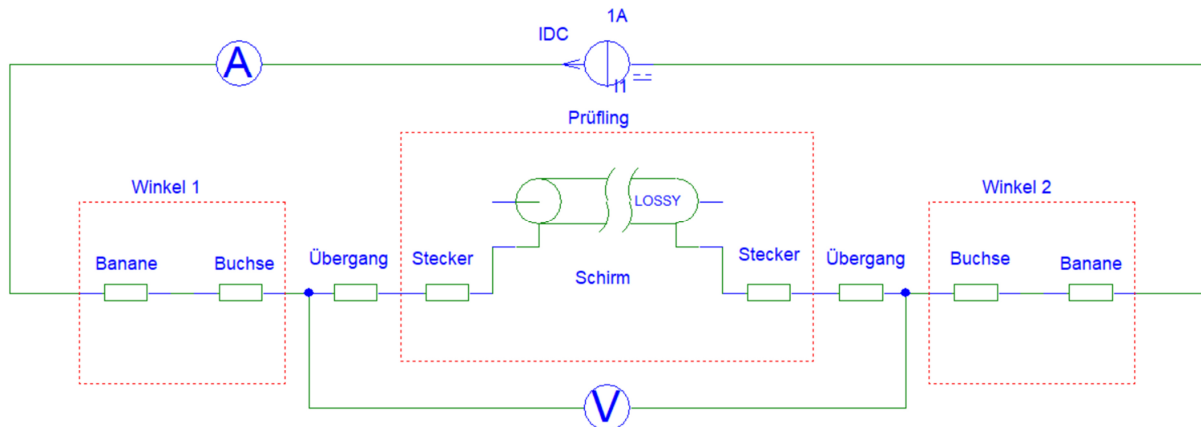


Bild 2.2: Schematischer Aufbau zur Messung des Gleichstromwiderstandes [3]

Der Teststrom sollte mindestens 1 A betragen, um einen gut messbaren Spannungsabfall an der zu prüfenden Leitung zu bewirken. Das Spannungsmessgerät wird mittels zweier weiterer separater Leitungen mit dem Prüfling verbunden. In Bild 2.2 wird deutlich, dass somit nur der gewünschte Spannungsabfall über dem Schirm und den Steckern gemessen wird. Die Widerstände der Zuleitungen der Stromquelle sowie die Eigenschaften der Bananenstecker und der Buchsen gehen nicht in den Wert der Spannung ein. Der Gleichstromwiderstand wurde aus der gemessenen Spannung berechnet. Die sehr unterschiedlichen Ergebnisse sind in Bild 2.3 dargestellt.

Bezugsgröße: I/A		1		Alle Messungen bei 20°	
Messaufbau	Bezeichnung	U/mV	Rmess/mΩ	Messlänge/cm	Rschirm'/Ω/km
USB-μUSB	Kommunikationskabel(USB2.0)	44	44	46,5	94,62
	Ladekabel Tablet	1220	1220	99,5	1226,13
	Ladekabel Powerbank	0	∞	66	∞
	Kommunikations-/Ladekabel	680	680	79,5	855,35
RJ45	Stecker vorgefertigt	7,5	7,5	22	34,09
	Stecker von Hand aufgelegt	4,5	4,5	24	18,75
USB	USB3.0 blau	620	620	51	1215,69
BNC	RG58 C/U	38	38	175	21,71
	Markenleitung	14,3	14,3	99	14,44
	RG58U gechrimt	499	499	101,5	491,63

Bild 2.3: Messergebnisse zu konfektionierten, symmetrischen sowie unsymmetrischen Leitungen [3]

Die Ergebnisse gemäß Bild 2.3 stellen die Transferimpedanz der Leitung für den Gleichstromfall dar. Die in diesem Verfahren gemessene Spannung teilt sich im Verhältnis der Abschlusswiderstände auf die Leitungsenden auf. Geht man vom beidseitigen Abschluss der Leitung mit dem Wellenwiderstand aus halbiert sich diese.

## 2.2 Messungen mit Oszilloskop

Der Aufbau zur Messung der Transferimpedanz mit potentialfreien Oszilloskopen (Akkubetrieb) basiert auf dem Verfahren zur Gleichstrommessung (Bild 2.2). Die Stromquelle wird durch einen Signalgenerator ersetzt. Zur Anpassung des Generators erfolgt die Einspeisung des Stromes auf den Schirm über einen 50 Ω Widerstand im Primärkreis. Die Spannung über diesem Widerstand wird mittels eines Oszilloskops gemessen. Diese Spannung repräsentiert den Speisestrom (Bild 2.4). Mittels eines zweiten Oszilloskops wird die Spannung des Sekundärkreises am Ende der Leitung gemessen [4]. Ergebnisse der Messungen finden sich in Bild 2.5.

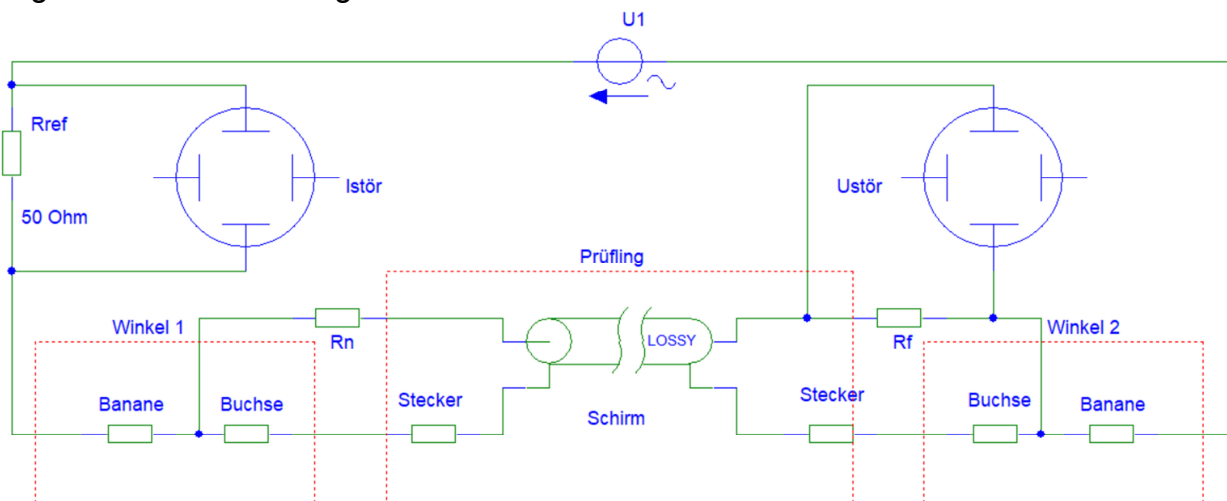


Bild 2.4: Schaltplan zur Ermittlung der Transferimpedanz [4]

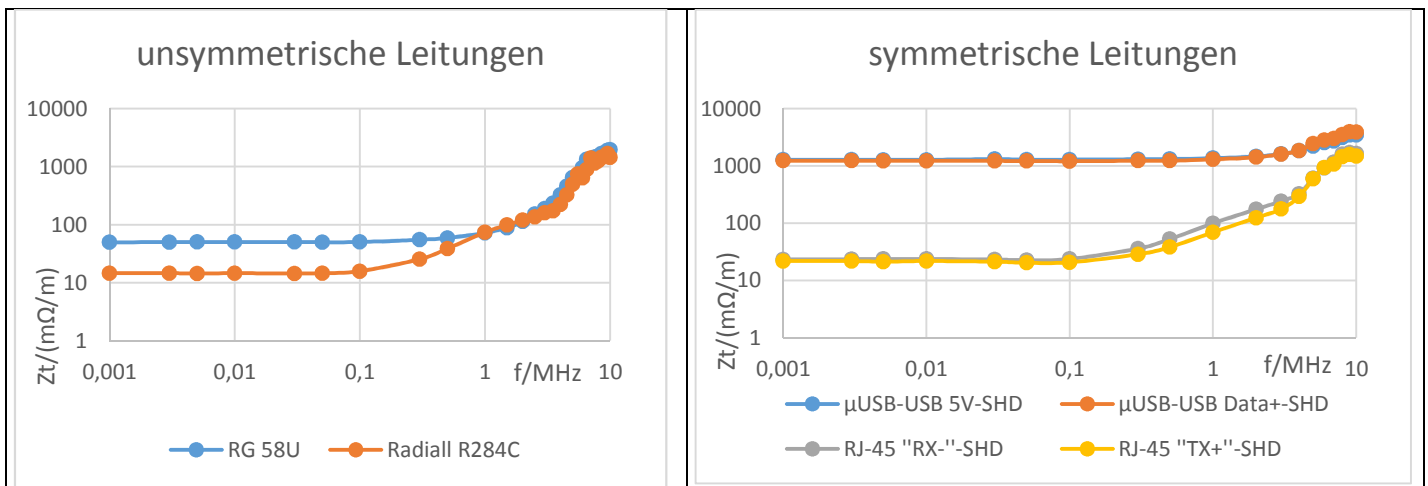


Bild 2.5: Messungen mit geänderten Aufbau [4]

### 2.3 Messungen mit Spektrumanalysator und Stromzangen

Während der Messung mit den Oszilloskopen zeigten sich insbesondere Schwächen des Verfahrens aufgrund der Massungssituation der Messtechnik. Zur Vermeidung dieser Problematik wird im folgenden Ansatz auf die galvanische Einspeisung verzichtet. Der Störstrom wird sowohl mittels Stromzangen eingekoppelt, als auch gemessen. Der Aufbau befindet sich über einer Massefläche (Bild 2.6). Als Signalquelle dient der Trackinggenerator eines Spektrumanalysators. Er speist direkt die Stromwandlerzange zur Einspeisung des Stromes. Mittels einer weiteren Stromwandlerzange wird der eingespeiste Strom vom Spektrumanalysator gemessen. Diese Messung dient als Referenzmessung, da die Höhe des eingekoppelten Stromes von der Frequenz abhängt. In einem zweiten Durchlauf wird dann nicht die eingekoppelte Stromstärke, sondern die eingekoppelte Spannung gemessen. Bezieht man diese auf den Strom, so erhält man wiederum die Transferimpedanz. Die Leitungen werden mit dem Wellenwiderstand am nahen und fernem Ende abgeschlossen. Die gemessene Spannung entspricht somit der halben Spannung, die auf dem Innenleiter einkoppelt. Somit muss die (Gl. 1.1) zur Berechnung der Transferimpedanz angepasst werden zu (Gl. 2.1) [4].

$$Z'_T = 2 * U / (I * l) \quad (\text{Gl. 2.1})$$

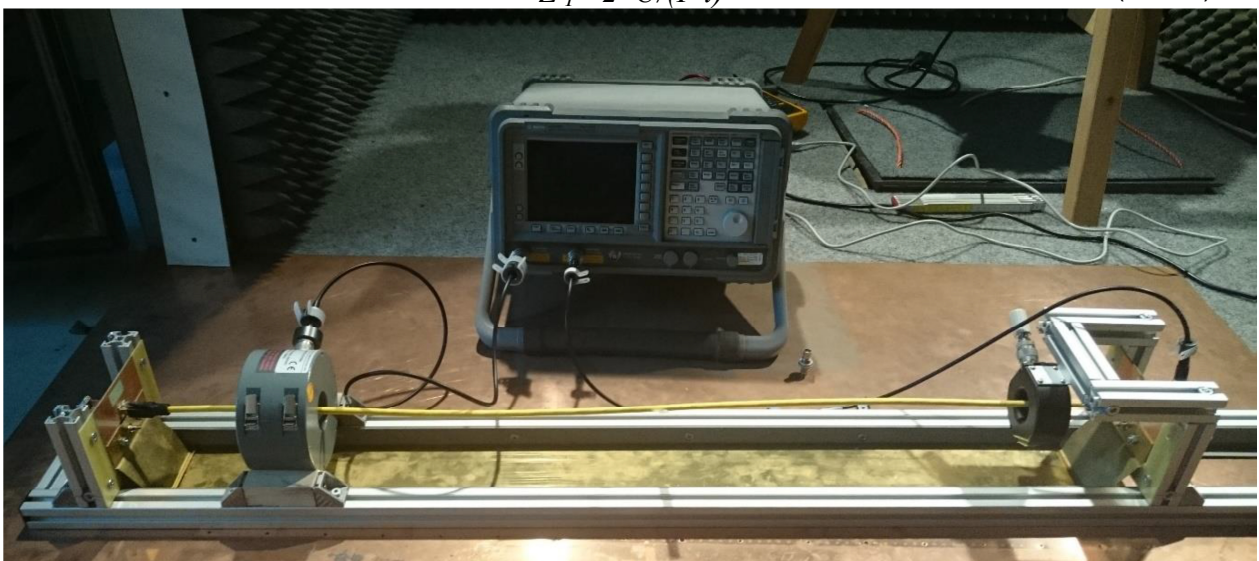


Bild 2.6: Messaufbau mit Spektrumanalysator und Stromzangen [2]

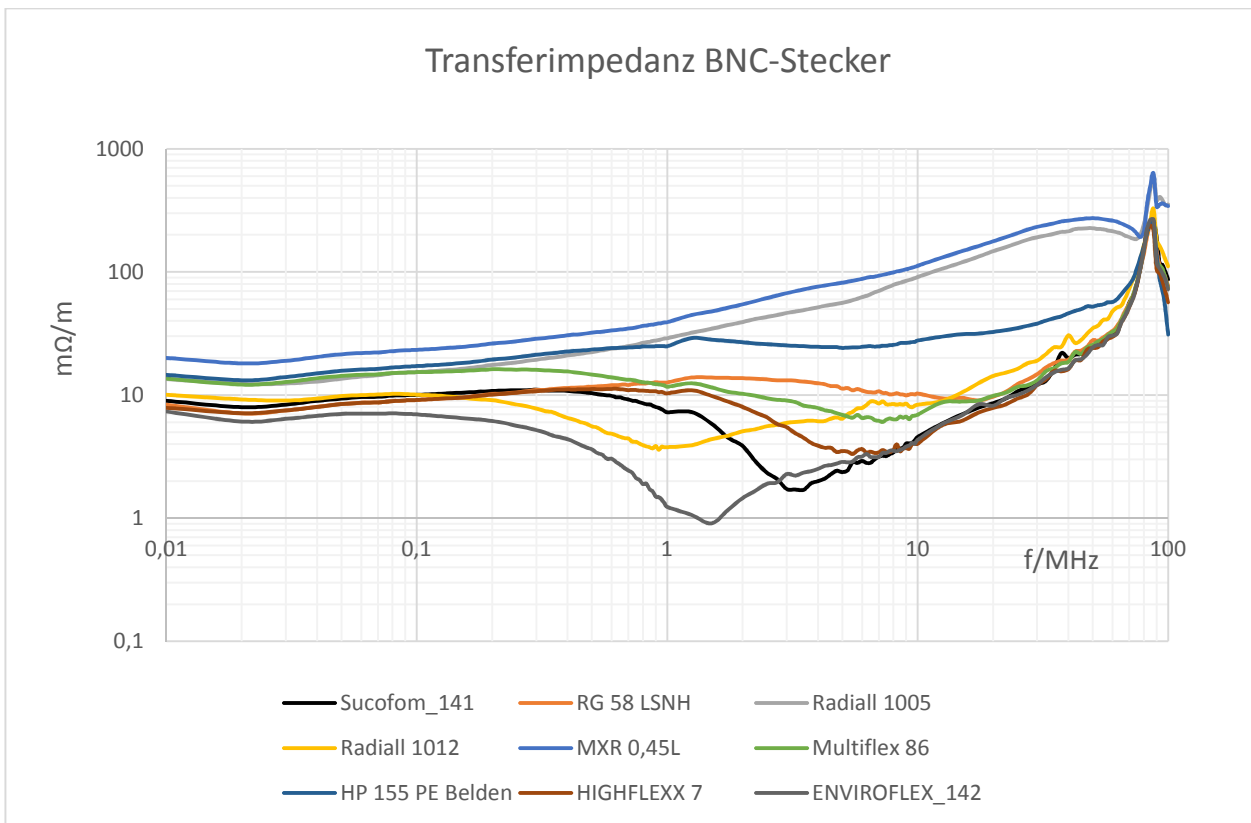


Bild 2.7: Ergebnisse zu diversen Leitungen mit BNC-Steckern [2]

In diesem Aufbau zeigten sich zunächst unerwünschte parasitäre Effekte. Durch den Einsatz von Common Mode Drosseln auf den Messleitungen liefert der Messaufbau für koaxiale Leitungssysteme gute, reproduzierbare Ergebnisse (Bild 2.7).

Gut zu erkennen ist der Abfall der Transferimpedanz bei einigen Leitungen der auf die zunehmende Stromverdrängung zurück zu führen ist. Der stetige Anstieg der Transferimpedanz entsteht durch den magnetischen Durchgriff durch die Löcher bzw. Schlitze der Schirmung. Bei allen Leitungen tritt bei ca. 85-90 MHz eine Resonanz aufgrund der Länge der Leitung auf. Diese Resonanz konnte auch in einer Simulation nachvollzogen werden. Mit Einsetzen der Resonanz sind keine verlässlichen Messergebnisse mehr zu erwarten.

## 2.4 Paralleldrahtverfahren

Das Paralleldrahtverfahren [5] unterscheidet sich beim vorangegangenen Aufbau durch die Einspeisung des Störstromes auf den Schirm. Sie erfolgt über einen Draht bzw. eine Leitung, die direkt auf der Oberfläche der zu untersuchenden Leitung geführt wird. Die Einspeisung erfolgt praktisch durch ein Übersprechen eines Testsignals auf den Prüfling. Der Primär- und Sekundärkreis sind über die Gehäuse galvanisch verbunden. Bei mehradrigen Leitungen werden die Adern an den Enden gegeneinander kurzgeschlossen und anschließend mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen (Bild 2.8).

Der Paralleldraht muss ordnungsgemäß aufgelegt und befestigt werden, ansonsten werden die Messergebnisse verfälscht [6]. Die Impedanz des Paralleldrahtes gegenüber dem Schirm der zu testenden Leitung sollte möglichst nahe dem Wellenwiderstand des verwendeten Signalgenerators sein. Der Messaufbau beinhaltet ein starres Ende zur

Einspeisung mittels Signalgenerator und ein flexibles Ende zur Anpassung an differierende Längen der konfektionierten zu prüfenden Leitungen. Gemessen werden kann am fernen oder nahen Ende der Leitung. Das Bild 2.9 zeigt die Messergebnisse für eine USB-A Leitung die an einem Ende mit einer Gleichtaktrossel belegt ist.

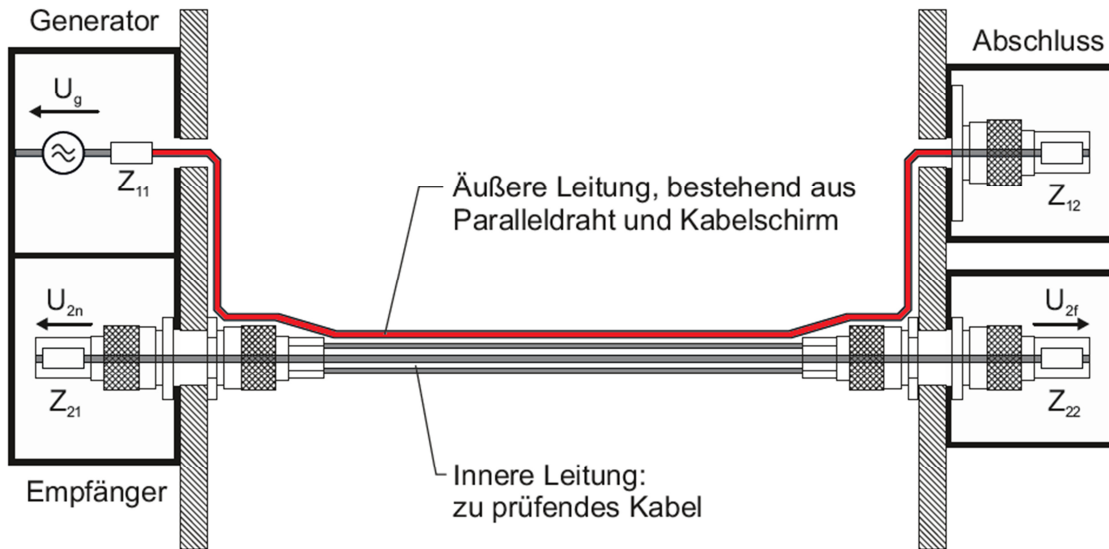


Bild 2.8: Messaufbau zur Messung der Transferimpedanz mit dem Paralleldrahtverfahren [6]

### Transferimpedanz $Z_T$ mit Ferritkern

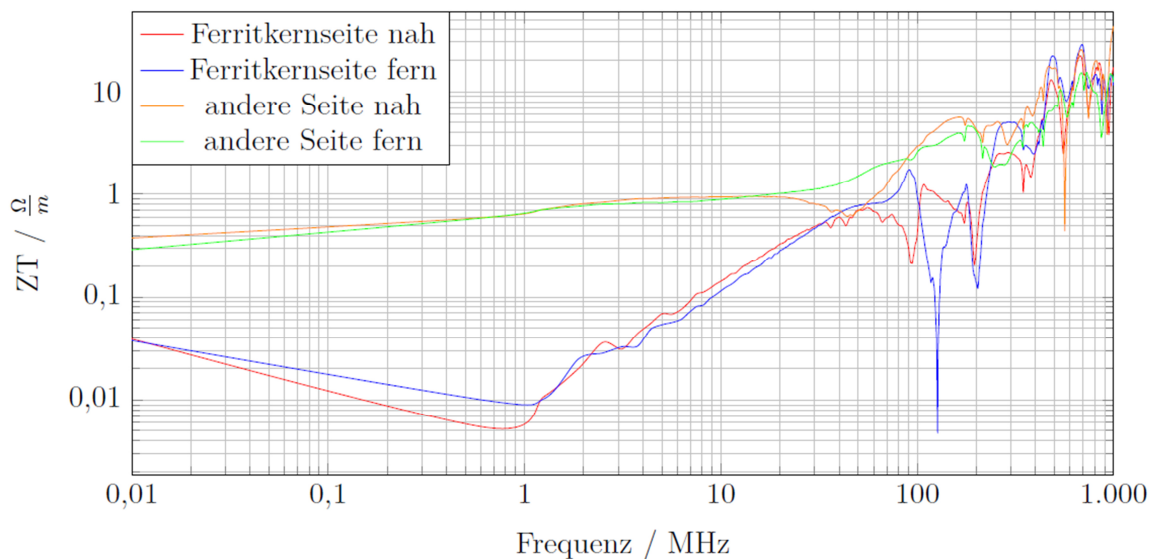


Bild 2.9: Messung der Transferimpedanz einer USB-A Leitung mit Ferritkernen [6]

## 2.5 Triaxiales Messverfahren

Das Triaxiale Messverfahren [7] wurde im Rahmen der aktuellen Untersuchungen nicht erprobt und wird hier nur der Vollständigkeit halber aufgelistet. Es ähnelt in seinem Messprinzip dem aus Kap.2.3. Augenscheinlichster Unterschied ist das Massesystem. Anstelle einer Massefläche wird die zu prüfende Leitung von einem Rohr umschlossen, das auf Massepotential liegt. Der Primär- und Sekundärkreis sind galvanisch verbunden. Das Verfahren ist grundsätzlich nur für Leitungsstücke ohne Steckverbinder definiert und genormt. Die Leitungsenden müssen speziell präpariert werden [7].



### 3 Zusammenfassung

Generell muss bei der Ermittlung der Transferimpedanz klar sein, was bestimmt werden soll: Die Transferimpedanz einer Leitung, einer Leitung plus Steckverbindern, einer Leitung plus Steckverbindern plus Übergangswiderstand (Bild 2.2) oder einer Leitung plus Steckverbinder plus Übergangswiderstand plus Buchsen. Im Verlauf mehrerer Untersuchungen wurden Erfahrungen im Umgang mit unterschiedlichen Messverfahren zur Transferimpedanz gesammelt. Es sollten Messverfahren untersucht werden, die den Einfluss der Steckverbinder an den Enden der Leitungen berücksichtigen.

Die Basis für gute EMV-Eigenschaften der konfektionierten Leitung kann ggf. schon eine Sichtprüfung ergeben. Die Steckverbinder müssen rundum geschirmt sein. Die Masseverbindung der Beiden darf nicht einfach durch eine einzelne Litze in der Leitung realisiert werden. Es muss ein durchgängiger Schirm zwischen den beiden Steckern vorhanden sein. Wenn dann die Gleichstrommessung einen geringen Widerstandswert ergibt, kann von einer geringen Transferimpedanz und damit guten EMV-Eigenschaften der Leitung ausgegangen werden. Diese Messung darf jedoch keinesfalls einfach mit einem Widerstandsmessgerät erfolgen. Es muss das beschriebene Vierleitermessverfahren verwendet werden.

Für eine Messung im Frequenzbereich würden die Autoren das Verfahren mit Spektrumanalysator und Strommesszangen bevorzugen. Es ist relativ einfach in seinem Aufbau und liefert verlässliche Ergebnisse bis die in der Länge der Leitung begründete erste Resonanz auftritt. Der bislang verwendete Aufbau weist allerdings noch Entwicklungspotential auf. Bei den mehradrigen Leitungen muss der Anschlussbereich der Abschlusswiderstände noch besser ausgeführt werden. Dies betrifft insbesondere die Schirmung. Zudem sollten die Aluminium Strebenprofile durch solche aus nicht leitfähigem Material ersetzt werden.

Das Triaxiale Messverfahren fand im Rahmen dieser Untersuchung bislang keine Anwendung. Für die Untersuchung von konfektionierten Leitungen ist es in seiner genormten Ausführung nicht geeignet. Eine Modifikation dürfte aufwendig sein. Dieses Verfahren bleibt sicherlich der Untersuchung von reinen Leitungen und Kabeln vorbehalten.

### 4 Ausblick

Der Fokus weiterer Untersuchungen liegt bei symmetrischen Leitungen [8]. Im Gegensatz zu den asymmetrischen Leitungen ist der Schirm ein reiner EMV-Schirm und dient nicht als Rückleitung für ein Signal. Zur Vermeidung von Störein- bzw. Störauskopplungen sind die Adern (*a-b*), die gemeinsam ein Signal oder eine Versorgungsspannung übertragen sollen, häufig verseilt. Um den störreduzierenden Effekt der Verseilung zu erfassen, müssen diese Adern, wie im regulären Betrieb der Leitung, ebenfalls im *differential mode* vermessen werden. Der Messaufbau ist in Bild 4.1 dargestellt.

Der Wellenwiderstand für symmetrisch übertragene Signale liegt bei Netzwerkleitungen bei 100  $\Omega$  und bei USB-Leitungen bei 90  $\Omega$ . Aufgrund der Symmetrie ergeben sich für die Abschlusswiderstände  $R$  nach Masse 50  $\Omega$  bzw. 45  $\Omega$ . Das Einprägen des Störstroms  $I_{st}$  erfolgt vorzugsweise mittels einer Stromwandlerzange wobei die Messung dieses Stromes als  $I_m$  mittels einer weiteren Stromwandlerzange erfolgt. Es sind jedoch auch die galvanische und die Einspeisung mittels Paralleldrahtverfahren möglich. Zur Messung der Differenzspannung am Ausgang der Leitung bietet sich die Verwendung

eines Oszilloskops oder auch eines Vektorvoltmeters unter Nutzung der Differenzbildung zwischen zwei Kanälen an.

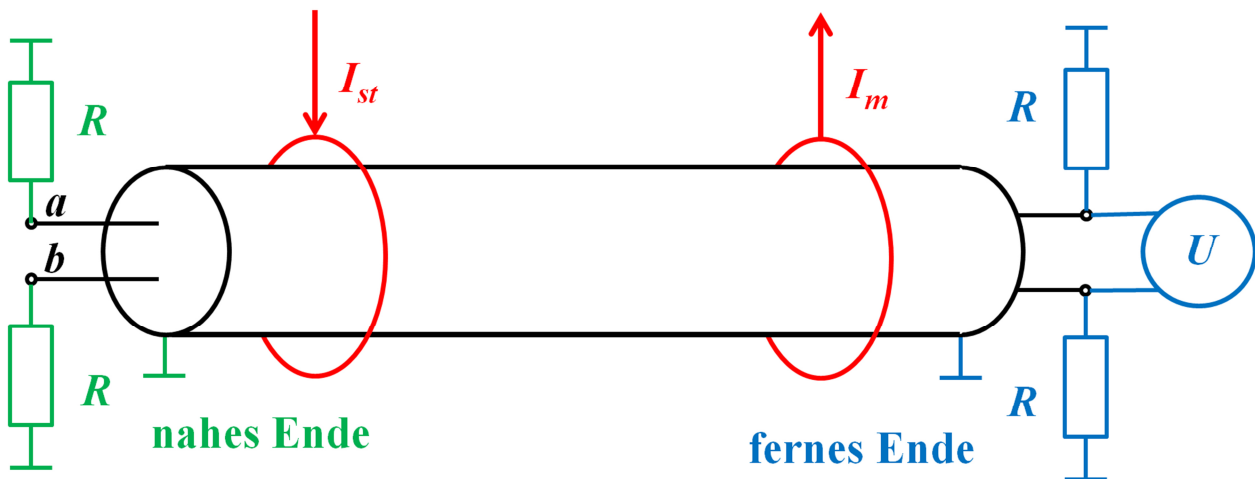


Bild 4.1: Prinzipschaltbild zur Vermessung von symmetrischen Leitungen

Typischerweise handelt es sich, wie bei der USB oder Netzwerkleitung, um einen Leitungstyp, der mehr als nur ein Aderpaar ( $a-b$ ) enthält. Dann sind alle übrigen Aderenden ebenfalls mit dem Wellenwiderstand abzuschließen.

Die Messanordnung wird optimiert. Um die Einflüsse des Aufbaus auf die Messungen zu reduzieren, wird das metallische Fundament (Bild 2.6) durch eines aus Kunststoff ersetzt. Zudem ergibt sich aus den bisherigen Erfahrungen die Notwendigkeit, den Anschlussbereich äußerst sorgfältig abzuschirmen.

## 5 Literaturangaben

- [1] Abid Mushtaq, Katharina Hermes, Prof. Dr. Stephan Frei: Alternative Messmethoden zur Bestimmung der Transferimpedanz (ZT) von HV-Kabeln und HV-Kabel-Stecker-Systemen für Elektro- und Hybridfahrzeuge, EMV 2016 Tagungsband, pp. 489 – 495
- [2] Alexander Schneider: Messung der Transferimpedanz von Kommunikationskabeln mit Steckverbindern, Bachelorarbeit HS-EL 2017SS
- [3] Alexander Schneider, Anlage zur Schirmmessung(DC), Praxisphase HS-EL 2016SS
- [4] Alexander Schneider: Bestimmung der Schirmungsqualität von Datenübertragungsleitungen, Projektarbeit HS-EL 2016WS
- [5] E DIN IEC 62153-4-6:2004-07, Prüfverfahren für Metallische Kommunikationskabel Speisedrahtverfahren
- [6] Frederic Driessen: Paralleldrahtverfahren zur Prüfung von konfektionierten Leitungen, Bachelorarbeit HS-EL 2017SS
- [7] E DIN EN 62153-4-3:2011-10, Prüfverfahren für metallische Kommunikationskabel Triaxialverfahren
- [8] Jann Hyda: Entwicklung eines Aufbaus zur Messung der Transferimpedanz von konfektionierten symmetrischen Leitungen, Bachelorarbeit HS-EL 2018SS