

**Anwendung der Stromeinspeisung
(Bulk-Current-Injection)
zur Störfestigkeitsprüfung bei
unterschiedlichen Prüfbedingungen**

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Thomas Zwemke
geboren am 31. August 1962 in Hamburg

2001

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Meyer

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe

Tag der Promotion: 28.02.2001

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Steuerungstechnik und Fachdidaktik der Elektrotechnik der Universität Hannover.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Meyer, der mir die Durchführung der Arbeit am Institut ermöglichte und mich mit großem Engagement und vielen Ratschlägen unterstützt hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Den Herren Jörg Feise, Klaas Gettner und Lars Otten gilt mein Dank für Ihre Mitarbeit im Rahmen Ihrer Diplom- und Hausarbeiten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernardo Wagner und den Mitarbeitern des Instituts danke ich für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung sowie die wertvollen Anregungen und Diskussionen.

Hannover, im März 2001

Thomas Zwemke

Kurzfassung

Zwemke, Thomas

Anwendung der Stromeinspeisung (Bulk-Current-Injection) zur Störfestigkeitsprüfung bei unterschiedlichen Prüfbedingungen

In dieser Arbeit wird die Anwendung der Stromeinspeisung (Bulk-Current-Injection, BCI) zur Störfestigkeitsprüfung bei unterschiedlichen Prüfbedingungen im Frequenzbereich 100 kHz...400 MHz untersucht.

Bei der Stromeinspeisung ergeben sich unterschiedliche Prüfbedingungen durch Änderungen der Eigenschaften des Prüfaufbaus, der Prüfeinrichtung, der Prüfumgebung, der Art der Prüfstörgröße sowie des Prüfablaufes. Diese Änderungen können durch die Wirkungen geometrischer und elektrischer Einflussgrößen beschrieben werden.

Zur Einstellung der Prüfströme müssen die Stromeinspeisezangen vor der Prüfung kalibriert werden. Hierbei sind grundsätzlich auch die Einflüsse durch die verwendete Kalibriereinrichtung in den Kalibrierdaten enthalten. Ein Korrektionsverfahren ('deembedding') ermöglicht die getrennte Bestimmung der Einflüsse der Kalibriereinrichtung und der Übertragungseigenschaften der Stromeinspeisezangen. Dadurch kann die während der Prüfung an das zu prüfende System abgegebene Leistung genauer angegeben werden.

Für die experimentellen Untersuchungen wird ein Prüfling mit genau bekanntem Störfestigkeitsverhalten aufgebaut, der die Überschreitung eines bestimmten Störpegels an den Prüflingseingängen bei der Stromeinspeisung detektiert. Die Einflüsse unterschiedlicher Einflussgrößen werden bewertet anhand des Prüfstromes, der jeweils zu einer Reaktion des Prüflings im Gesamtsystem führt (frequenzabhängige Störfestigkeitsschwelle).

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Einflussgrößen experimentell untersucht: Anzahl der Adern im Kabelbaum, Länge des Kabelbaumes, Abstand des Kabelbaumes von der Massefläche, Abstand der Stromeinspeisezange vom Prüfling (EUT), Verwendung zusätzlicher Strommesszangen, Eingangsimpedanzen von Prüfling und Zusatzgerät (AE), Referenzparameter bei der Prüfpegelinstellung.

Änderungen der Eingangsimpedanzen von Prüfling und Zusatzgerät können die frequenzabhängige Störfestigkeitsschwelle des Gesamtsystems erheblich beeinflussen. Dabei hängt die Resonanzfrequenz des Systems von der Länge des Kabelbaumes ab. Änderungen geometrischer Einflussgrößen in den Toleranzbereichen der Normen (DIN EN 61000-4-6, DIN ISO 11452-4) führen unterhalb der Resonanzfrequenz zu Unterschieden der Störfestigkeitsschwellen bis zu 4 dB. Oberhalb der Resonanzfrequenz ergeben sich hierbei Unterschiede von mehr als 10 dB.

Deskriptoren: Störfestigkeitsprüfung, Stromeinspeisung, Prüfbedingungen

Abstract

Zwemke, Thomas

Application of Bulk Current Injection (BCI) for electromagnetic susceptibility testing at varying test conditions

This paper describes the application of Bulk Current Injection (BCI) for electromagnetic susceptibility testing at varying test conditions in the frequency range from 100 kHz to 400 MHz.

Varying test conditions in BCI tests result from variations of the test set-up, test instrumentation, test surrounding, test signal and test method. These variations can be described by geometrical and electrical influence quantities.

A calibration of the bulk current injection clamps has to be performed prior to the equipment testing to adjust the test level (current). Principally the calibration data include effects of the calibration fixture. A correction procedure (deembedding) is applied to separate the effects of the calibration fixture and the characteristic properties of the bulk current injection clamps. The effective power transferred to the system under test so can be determined with higher accuracy.

The Equipment Under Test (EUT) constructed for the experimental investigation detailed in this paper has a well known susceptibility behaviour. It indicates the exceeding of a certain disturbance level at the EUT input ports. The effects of different influence quantities can be estimated by the test current, which is necessary for a response of the EUT (susceptibility profile).

The experimental work investigates the following influence quantities: number of wires of the wiring harness, length of the wiring harness, wiring harness elevation above ground plane, distance of the bulk current injection clamp from the EUT, use of current monitoring probes, input impedances of Equipment Under Test and Auxiliary Equipment (AE), reference parameter for applying test level.

Variations of EUT and AE input impedance may have strong effects on the system susceptibility profile. The system resonance frequency depends on the length of the wiring harness. At frequencies below resonance variations of geometrical influence quantities within the tolerances of standards (DIN EN 61000-4-6, DIN ISO 11452-4) change the system susceptibility profile up to 4 dB. Measurements above resonance frequency show differences of more than 10 dB.

Index Terms: Susceptibility Testing, Bulk-Current-Injection, Test Conditions

Anwendung der Stromeinspeisung (Bulk-Current-Injection)

zur Störfestigkeitsprüfung

bei unterschiedlichen Prüfbedingungen

	Seite
1 Einleitung	1
1.1 Stand von Forschung und Technik	3
1.2 Aufgabenstellung dieser Arbeit	6
2 Stromeinspeisung als Störfestigkeitsprüfverfahren	8
2.1 Prinzip der Stromeinspeisung	8
2.2 Stromeinspeisung und Feldeinstrahlung	11
2.2.1 Stromeinspeisung und Feldeinstrahlung bei einfachen Anordnungen	13
2.2.2 Stromeinspeisung und Feldeinstrahlung bei komplexen Systemen	18
2.3 Einflussgrößen	24
2.4 Übertragungseigenschaften der Stromzangen	28
2.4.1 Stromeinspeisezange	28
2.4.2 Strommesszange	31
2.5 Kalibriereinrichtung	36
2.5.1 Übertragungseigenschaften des Kalibrierhalters	38
2.5.2 Einfluss der Kalibriereinrichtung auf die Einfügungsdämpfung der Stromeinspeisezange	40
3 Normen zur Stromeinspeisung	46
3.1 Anwendungsbereiche	46
3.2 Elektrische und geometrische Daten	48
3.3 Prüfschärfewerte	54
3.4 Kalibrierung und PrüfpegelEinstellung	57

4	Untersuchungen bei unterschiedlichen Prüfbedingungen	62
4.1	Versuchsmethodik.....	62
4.2	Versuchseinrichtung.....	63
4.2.1	Aufbau.....	63
4.2.2	Messgeräte.....	65
4.2.3	Unterschiede gegenüber Normaufbauten.....	66
4.3	Verwendete Stromzangen und Kalibrierhalter	67
4.3.1	Technische Daten der Stromzangen	67
4.3.2	Kalibrierhalter	68
4.3.3	Einfügungsdämpfung.....	71
4.3.4	Transferimpedanz	73
4.3.5	Einfügeimpedanz.....	75
4.4	Aufbau und Eigenschaften von Prüfling und Zusatzgerät	76
4.4.1	Aufbau des Prüflings	76
4.4.2	Schaltswellen der Schwellwertdetektoren.....	77
4.4.3	Eingangsimpedanzen des Prüflings.....	79
4.4.4	Aufbau des Zusatzgerätes	82
4.5	Versuchsablauf.....	83
4.6	Versuchsauswertung.....	85
4.7	Versuchsparameter	86
4.8	Unsicherheitsbetrachtungen.....	89
4.9	Versuchsergebnisse	95
4.9.1	Anzahl der Adern im Kabelbaum.....	97
4.9.2	Länge des Kabelbaumes	98
4.9.3	Abstand des Kabelbaumes von der Massefläche	100
4.9.4	Abstand der Stromeinspeisezange vom Prüfling	102
4.9.5	Verwendung zusätzlicher Strommesszangen.....	105
4.9.6	Eingangsimpedanzen von Prüfling und Zusatzgerät.....	106
4.9.7	Referenzparameter für die Einstellung des Prüfpegels	108
4.9.8	Unterschiedliche Stromeinspeisezangen und Verstärker	109
5	Hinweise zur Anwendung der Stromeinspeisung	111
6	Zusammenfassung	113

Literaturverzeichnis	116
Anhang	124
A1 Induktivität und Gegeninduktivität von Strommesszangen	124
A2 Einfügeimpedanz von Strommesszangen.....	127
A3 Übertragungseigenschaften der Kalibriereinrichtung.....	128
A4 Einfügungsdämpfung einer Stromeinspeisezange ohne Einfluss der Kalibriereinrichtung	130
A5 Kombinierte Standardunsicherheit und erweiterte Unsicherheit.....	133
Lebenslauf des Verfassers.....	137

Verzeichnis der Schreibweisen, Definitionen, Formelzeichen und Abkürzungen

Schreibweisen

- Komplexe Größen sind unterstrichen, z.B.: $\underline{Z}_{\text{Ein}}$
- Konjugiert komplexe Größen sind mit * gekennzeichnet, z.B.: \underline{a}^*
- Matrizen sind fett gedruckt, z.B.: $\underline{\underline{S}}$
- Vektoren werden durch Pfeile gekennzeichnet, z.B.: \vec{A}
- Pegel von Spannungen, Strömen und Leistungen sowie Impedanzen in logarithmischer Form werden durch kleine Buchstaben bezeichnet, z.B.: u, i, p
- Indizierungen mit ° kennzeichnen Größen bei Auftreten einer Prüflingsreaktion (Überschreitung der Störfestigkeitsschwelle), z.B.: p_{Vor°
- Mehrfach verwendete Formelzeichen sind jeweils in ihrem Kontext eindeutig.
- Gleichungen, Abbildungen und Tabellen werden kapitelweise fortlaufend nummeriert.

Definitionen

- 'Messung (Messen einer Messgröße)':
Gesamtheit der Tätigkeiten zur Ermittlung eines Größenwertes (siehe B2.5 in [21]);
Ausführen von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich einer Messgröße mit einer Einheit (siehe Nr. 2.1 in [21]).
- 'Prüfung':
Feststellen, inwieweit ein Prüfobjekt eine Forderung erfüllt. Mit dem Prüfen ist immer der Vergleich mit einer Forderung verbunden, die festgelegt oder vereinbart sein kann (siehe Nr. 2.1.4 in [21]).
- 'Reflexionsfreier Abschluss eines Tores':
Abschluss mit dem Wellenwiderstand der Anschlussleitung an diesem Tor. Dieser ist i. Allg. gleich dem Bezugswiderstand Z_0 (vgl. [78]).

Formelzeichen

a	Länge des Kalibrierhalters
a_{Att}	Einfügungsdämpfung des Dämpfungsgliedes
a_E	Einfügungsdämpfung (insertion loss)
\underline{a}_i	auf das Tor i zulaufende (vorlaufende) Welle
a_{innen}	Breite des Kalibrierhalter-Innenraumes
a_D	Richtdämpfung des Richtkopplers
a_K	Koppeldämpfung des Richtkopplers
a_{K1}, a_{K2}	Einfügungsdämpfungen der Kabel
a_{RK}	Durchgangsdämpfung des Richtkopplers
a_S	Störabstand harmonischer Oberwellen zum Träger (CW)
\vec{A}	Flächenvektor
b	Breite des Kalibrierhalters
\underline{b}_i	aus dem Tor i ablaufende (rücklaufende) Welle
b_K	Breite des permeablen Kerns einer Stromzange
$b_{Z,E}$	Breite der Stromeinspeisezange (außen)
$b_{Z,M}$	Breite der Strommesszange (außen)
B	Breite des Innenraumes des Kalibrierhalters
\vec{B}	Magnetische Flussdichte
C_{KanalA}	Koppelfaktor des Richtkopplers (Kanal A, Vorlauf)
D_{KanalA}	Richtfaktor des Richtkopplers (Kanal A)
d	Durchmesser des Innenleiters des Kalibrierhalters
d_{Ader}	Durchmesser einer Ader des Kabelbaumes
d_{CUT}	Durchmesser des Kabelbaumes
d_{Isol}	Durchmesser der Isolation einer Ader des Kabelbaumes
d_Z	Durchmesser der Stromeinspeise- bzw. Strommesszange (außen)
D	Bohrungsdurchmesser einer Stromzange (window diameter)
D_a	Außendurchmesser des permeablen Kerns einer Stromzange

D_i	Innendurchmesser des permeablen Kerns einer Stromzange
e	Messabweichung
E_{LLSC}	Feldstärke bei Feldeinstrahlung mit LLSC
f	Frequenz (allgemein)
f_E	Eckfrequenz der frequenzabhängigen Prüfströme (MIL-STD-461D)
f_g	untere Eckfrequenz (3 dB) der Strommesszange (corner frequency)
f_h	obere Eckfrequenz (3 dB) einer Strommesszange
h_{innen}	Höhe des Kalibrierhalter-Innenraumes
h_{AE}	Abstand des Zusatzgerätes (AE) von der Massefläche
h_{CUT}	Abstand des Kabelbaumes (CUT) von der Massefläche
h_{EUT}	Abstand des Prüflings (EUT) von der Massefläche
I	Strom (allgemein)
I_{CUT}	Strom (Stromsumme) im Kabelbaum
I_{Det}	Strom am Eingang des Spitzenwertdetektors
I_{EUT}	Strom am Eingang des Prüflings
I_{LLSC}	Strom (Stromsumme) im Kabelbaum bei LLSC/BCI
I_M	Strom in Strommesszange (Sekundärseite) bei Belastung mit Z_M
I_{Max}	Max. zulässiger Strom im Kabelbaum
$I_{Prüf}$	Prüfstrom
I_0	Primärseitiger Strom bei Stromeinspeisung (Stromeinspeisezange)
I_2	Sekundärseitiger Strom bei Stromeinspeisung (Kabelbaum)
k_{Vor} , k_{Netto}	Übertragungsfunktionen (Prüfstrom \leftrightarrow Leistung)
k_p	Erweiterungsfaktor für erweiterte Unsicherheit
l	Länge (allgemein)
l_{CUT}	Länge des Kabelbaumes
l_S	Länge der Steckverbinder am Kabelbaum
$l_{Z,E}$	Abstand der Mitte der Stromeinspeisezange vom Prüfling
$l_{Z,M}$	Abstand der Mitte der Strommesszange vom Prüfling

L	Induktivität (allgemein)
L_{Kern}	Induktivität (Einfluss des permablen Kerns der Strommesszange)
m	Modulationsgrad
M	Gegeninduktivität
n	Anzahl der Schwellwertdetektoren
N, N_1, N_2	Windungszahlen der Stromzangen
p	Grad des Vertrauens (Überdeckungswahrscheinlichkeit)
p_{Gen}	Leistungspegel des Prüfgenerators
$p_{\text{Rück}}$	Leistungspegel der rücklaufenden Welle
p_{Vor}	Leistungspegel der vorlaufenden Welle
P_{Abs}	Absorbierte Leistung der Stromeinspeisezange
P_{CUT}	Abgegebene Leistung an den Kabelbaum
P_{G0}	Verfügbare Wirkleistung des Prüfgenerators
P_{L0}	Wirkleistung (aufgenommen von $\underline{Z}_L = Z_0$)
P_{Netto}	Nettoleistung (net power / total power)
$P_{\text{Rück}}$	Rücklaufleistung (Leistung der rücklaufenden Welle / reflected power)
P_{Vor}	Vorlaufleistung (Leistung der vorlaufenden Welle / forward power)
$P_{0,\text{max}}$	Maximal abgebbare Wirkleistung des Prüfgenerators
r	Radius
s	Stehwellenverhältnis (voltage standing wave ratio / VSWR)
\underline{S}_{ij}	Streuparameter (Element der Streumatrix) bezüglich Tor i und j
$\underline{\underline{S}}$	Streumatrix (Matrix der Streuparameter)
t	Dicke der Kalibrierhalter-Grundplatte
t_S	Sicherheitszuschlag zur Transferfunktion
T, T_i, T'	Transferfunktionen
T_{RK}	Transmissionsfaktor des Richtkopplers
$u(x_i)$	Standardunsicherheit für den Schätzwert x_i der Messgröße X_i
u_0	Prüfspannungspegel

u_A	Spannungspegel am Eingang des Spektrum-Analysators
$u_c(y)$	kombinierte Standardunsicherheit für den Schätzwert y
u_M	Spannungspegel am Ausgang der Strommesszange
\underline{U}	Spannung (allgemein)
U_{Aus}	Spannung am Ausgang des Spitzenwertdetektors
u_C	Spannung am Haltekapazitor des Spitzenwertdetektors
\underline{U}_{Det}	Spannung am Eingang des Spitzenwertdetektors
\underline{U}_{EUT}	Spannung am Eingang des Prüflings
\underline{U}_{G0}	Quellenspannung des Prüfgenerators
$U_{G0,eff}$	Effektivwert der Quellenspannung des Prüfgenerators
\underline{U}_M	Klemmenspannung an der Strommesszange bei Belastung mit \underline{Z}_M
\underline{U}_{M0}	Leerlaufspannung am Ausgang der Strommesszange
U_p	Erweiterte Unsicherheit
\underline{U}_S	Spannung am Schwellwertdetektor bei der Schaltschwelle
U_{VD}	Spannung über der Gleichrichterdiode des Schwellwertdetektors
U_{Vor}	Spannung der vorlaufenden Welle
\underline{U}_0	Primärseitige Spannung am Eingang der Stromeinspeisetzange
\underline{U}_2	Induzierte Spannung im Kabelbaum bei Stromeinspeisung
v	Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle
x, y	Schätzwerte der Messgrößen X, Y
X, Y	Messgrößen
\underline{Z}	Impedanz (allgemein)
\underline{Z}_{AE}	Eingangsimpedanz des Zusatzgerätes
\underline{Z}_{Det}	Eingangsimpedanz des Schwellwertdetektors
\underline{Z}_E	Einfügeimpedanz
$\underline{Z}_{E,Kern}$	Anteil von \underline{Z}_E durch permeablen Kern der Strommesszange
$\underline{Z}_{E,Refl}$	Anteil von \underline{Z}_E durch reflektierte Impedanz der Strommessschaltung
\underline{Z}_{Ein}	Eingangsimpedanz (allgemein)

Z_{EUT}	Eingangsimpedanz des Prüflings
Z_L	Lastimpedanz
Z_M	Eingangsimpedanz eines Messgerätes
Z_T	Transferimpedanz
$Z_{T,max}$	Maximalwert der Transferimpedanz (gesamter Frequenzbereich)
Z_w	Wellenwiderstand
Z_0	Bezugswiderstand (= 50 Ω)
Z_{2a}, Z_{2b}	Impedanzen (asymmetrisch) beiderseits der Einkoppelstelle (BCI)
λ	Wellenlänge
μ_r	relative Permeabilität, Permeabilitätszahl
ρ_i	Eingangsreflexionsfaktor am Tor i
Φ	Magnetischer Fluss
Ψ	Magnetische Flussverkettung
Θ	Durchflutung
ω	Kreisfrequenz ($\omega = 2\pi f$)

Mathematische Zeichen

d	Differential-Operator
$j = \sqrt{-1}$	Imaginäre Einheit
$\ln(x)$	Natürlicher Logarithmus von x (Basis: Eulersche Konstante)
$\log(x)$	Dekadischer Logarithmus von x (Basis: 10)

Naturkonstanten

$c_0 \cong 2,9979 \cdot 10^8$ m/s	Lichtgeschwindigkeit, Ausbreitungsgeschwindigkeit einer TEM-Welle im Vakuum
$\pi \cong 3,1416$	Kreiszahl
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am	Permeabilität im Vakuum
$\eta_0 = 120 \pi \Omega$	Freiraumwellenwiderstand im Vakuum

Abkürzungen

AE	Auxiliary Equipment
BCAS	Bulk Current Absorption Spectrum
BCI	Bulk Current Injection bzw. Bulk Cable Injection
CDN	Coupling Decoupling Network
CUT	Conductor Under Test bzw. Circuit Under Test bzw. Cable Under Test
DUT	Device Under Test
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EUB	Elektronische Unterbaugruppe
EUT	Equipment Under Test
HF	Hochfrequenz
HIRF	High Intensity Radiated Field
LISN	Line Impedance Stabilization Network
LLSC	Low-Level Swept Current Coupling bzw. Low-Level Swept Frequency Coupling bzw. Low Level Swept CW Field Illumination
MTL	Multiconductor Transmission Line
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
SAE	Society of Automotive Engineers
TEM	Transversal Elektro-Magnetisch

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

<u>Abbildungen</u>	Seite
Bild 2.1: Stromeinspeisung in einen Kabelbaum.....	9
Bild 2.2: Stromeinspeisezange.....	10
Bild 2.3: Stromeinspeisezange als HF-Übertrager.....	10
Bild 2.4: Prüfaufbau bei Komponentenprüfungen mit Stromeinspeisung.....	24
Bild 2.5: Störgrößeneinkopplung an einer Stromeinspeisezange.....	28
Bild 2.6: Ersatzschaltbild einer Strommesszange.....	31
Bild 2.7: Frequenzgang der Transferimpedanz.....	33
Bild 2.8: Einfügeimpedanz einer Strommesszange im Leiter (CUT).....	35
Bild 2.9: Prinzipdarstellung des Kalibrierhalters.....	37
Bild 2.10: Wellengrößen und Streuparameter des leeren Kalibrierhalters.....	38
Bild 2.11: Kalibrierhalter als Kettenschaltung zweier symmetrischer Zweitore.....	39
Bild 2.12: Stromeinspeisezange im Kalibrierhalter (Dreitor-Darstellung).....	40
Bild 2.13: Stromeinspeisezange im Kalibrierhalter (Zweitor-Darstellung).....	41
Bild 2.14: Zweitor-Darstellung der Serienverzweigung des Kalibrierhalters.....	41
Bild 2.15: Absorptionsdämpfung der Stromeinspeisezange 95242-1 bei unterschiedlichen Reflexionsfaktoren in der Bezugsebene 0'.....	44
Bild 2.16: Maximal abgebbare Leistung an das Gesamtsystem (normiert) bei Stromeinspeisung mit der Stromeinspeisezange 95242-1.....	45
Bild 3.1: Prüfstrom nach MIL-STD-461D sowie Strom, hervorgerufen durch Einstrahlung eines äußeren Feldes.....	56
Bild 3.2: Vorgeschriebene Einfügungsdämpfung der Stromeinspeisezangen nach DEF STAN 59-41.....	61
Bild 4.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.....	64
Bild 4.2: Geometrische Abmessungen des Versuchsaufbaus.....	67
Bild 4.3: Konstruktion der verwendeten Kalibrierhalter.....	69
Bild 4.4: VSWR der Kalibrierhalter (leer, ohne Stromzangen).....	70
Bild 4.5: VSWR der Kalibrierhalter (Stromeinspeisezangen montiert).....	70
Bild 4.6: Bestimmung der Einfügungsdämpfung der Stromeinspeisezangen....	71
Bild 4.7: Einfügungsdämpfungen der Stromeinspeisezangen (Messwerte).....	72

Bild 4.8: Einfügungsdämpfung der Stromeinspeisezange 95242-1 (Messwert) und Einfügungsdämpfung ohne Einfluss der Kalibriereinrichtung.....	73
Bild 4.9: Bestimmung der Transferimpedanzen der Strommesszangen.....	74
Bild 4.10: Transferimpedanzen der Strommesszangen (Messwerte)	75
Bild 4.11: Einfügeimpedanzen der Strommesszangen.....	75
Bild 4.12: Prinzipieller Aufbau des Prüflings	76
Bild 4.13: Prinzipielle Schaltung eines Spitzenwertdetektors.....	76
Bild 4.14: Bestimmung der Schaltschwellen der Schwellwertdetektoren	77
Bild 4.15: Ersatzschaltbild der Eingangsimpedanz des Schwellwertdetektors....	78
Bild 4.16: Frequenzabhängigkeit des Stromes in einem Schwellwertdetektor bei der Schaltschwelle.....	79
Bild 4.17: Ersatzschaltbild für das Impedanznetzwerk mit stufenweise einstellbaren Impedanzen.....	79
Bild 4.18: Frequenzabhängige Beträge der Eingangsimpedanz des Prüflings bei unterschiedlichen Stufen	80
Bild 4.19: Aufgenommene Wirkleistung P_{EUT° an einem Prüflingseingang bei der Schaltschwelle, jeweils bei unterschiedlichen Stufen der Eingangsimpedanz Z_{EUT}	81
Bild 4.20: Prinzipieller Aufbau des Zusatzgerätes (AE).....	82
Bild 4.21: Frequenzabhängige Beträge der Eingangsimpedanz des Zusatzgerätes bei unterschiedlichen Stufen	82
Bild 4.22: Messung der Vorlaufleistung	90
Bild 4.23: Störfestigkeitsschwelle des Gesamtsystems (Bezugsmessung).....	96
Bild 4.24: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlicher Anzahl der Adern im Kabelbaum.....	97
Bild 4.25: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlicher Anzahl der Adern im Kabelbaum.....	98
Bild 4.26: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Längen des Kabelbaumes	99
Bild 4.27: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Abständen des Kabelbaumes zur Massefläche	100
Bild 4.28: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei Änderung des Abstandes des Kabelbaumes zur Massefläche	101

Bild 4.29: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Abständen der Stromeinspeisezange vom Prüfling (Toleranzbereich nach DIN ISO 11452-4)	102
Bild 4.30: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei Änderung des Abstandes der Stromeinspeisezange vom Prüfling (Toleranzbereich nach DIN ISO 11452-4).....	102
Bild 4.31: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Abständen der Stromeinspeisezange vom Prüfling (Toleranzbereich nach DIN EN 61000-4-6)	103
Bild 4.32: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei Änderung des Abstandes der Stromeinspeisezange vom Prüfling (Toleranzbereich nach DIN EN 61000-4-6).....	104
Bild 4.33: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei Einfügung einer zusätzlichen Strommesszange	105
Bild 4.34: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Eingangsimpedanzen des Prüflings	106
Bild 4.35: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Eingangsimpedanzen des Zusatzgerätes	107
Bild 4.36: Störfestigkeitsschwellen bei Verwendung der Referenzparameter 'Vorlaufleistung' bzw. 'Nettoleistung'	108
Bild 4.37: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei Verwendung der entsprechenden Referenzparameter 'Vorlaufleistung' bzw. 'Nettoleistung'	109
Bild 4.38: Störfestigkeitsschwellen bei Verwendung unterschiedlicher Stromeinspeisezangen und Verstärker	110
Bild 4.39: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei Verwendung unterschiedlicher Stromeinspeisezangen und Verstärker	110
Bild A1.1: Strommesszange als Ringkernspule	124
Bild A3.1: Flussdiagramm der Streuparameter des leeren Kalibrierhalters	128
Bild A4.1: Flussdiagramm der Streuparameter einer Stromeinspeisezange in der Kalibriereinrichtung.....	130
Bild A4.2: Flussdiagramm der Streuparameter der Stromeinspeisezange.....	132

<u>Tabellen</u>	Seite
Tabelle 2.1: Normen zur Störfestigkeitsprüfung mit Stromeinspeisung und Feldeinstrahlung auf Komponenten- bzw. Systemebene	12
Tabelle 3.1: Richtlinie 95/54/EG (elektrische und geometrische Daten)	48
Tabelle 3.2: DIN ISO 11452-4 (elektrische und geometrische Daten)	49
Tabelle 3.3: DIN ISO 11451-4 (elektrische und geometrische Daten)	50
Tabelle 3.4: DIN EN 610004-6 (elektrische und geometrische Daten).....	51
Tabelle 3.5: MIL-STD-462D (elektrische und geometrische Daten).....	52
Tabelle 3.6: DEF STAN 59-41 (elektrische und geometrische Daten).....	53
Tabelle 3.7: Prüfschärfegrade und elektromagnetische Umgebungsklassen.....	54
Tabelle 3.8: Normenangaben für Prüfschärfewerte.....	57
Tabelle 3.9: Technische Daten von Stromeinspeisezangen nach DEF STAN 59-41.....	61
Tabelle 4.1: Verwendete Stromzangen	67
Tabelle 4.2: Technische Daten der verwendeten Stromzangen	68
Tabelle 4.3: Abmessungen der verwendeten Kalibrierhalter	69
Tabelle 4.4: Bezeichnungen der Eingangsimpedanzen des Prüflings (EUT)	80
Tabelle 4.5: Anzahl der Adern im Kabelbaum.....	87
Tabelle 4.6: Unterschiedliche Stromeinspeisezangen und Verstärker	88
Tabelle 4.7: Einzelkomponenten der Messunsicherheit	94
Tabelle 4.8: Kombinierte Standardunsicherheit und erweiterte Unsicherheit bei der Bestimmung des Prüfstromes	94
Tabelle 4.9: Kombinierte Standardunsicherheit und erweiterte Unsicherheit bei der Messung des Stromes im Kabelbaum.....	95
Tabelle 4.10: Untere Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Länge des Kabelbaumes	100
Tabelle 4.11: Maximale Unterschiede des Prüfstromes bei Änderung des Abstandes des Kabelbaumes von der Massefläche.....	101
Tabelle 4.12: Maximale Unterschiede des Prüfstromes bei Änderung des Abstandes der Stromeinspeisezange vom Prüfling.....	104
Tabelle 4.13: Maximale Unterschiede des Prüfstromes bei Einfügung einer zusätzlichen Strommesszange.....	106
Tabelle A5.1: Erweiterungsfaktor und Grad des Vertrauens für Rechteck- und Normalverteilung einer Messgröße.....	135

1 Einleitung

Zur Sicherstellung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von elektrischen und elektronischen Geräten und Systemen sind Messungen der Störaussendung (Emission) sowie Prüfungen der Störfestigkeit bzw. Störempfindlichkeit (Suszeptibilität) gegen äußere elektromagnetische Felder erforderlich.

In der elektromagnetischen Umwelt elektronischer Systeme erfolgt die Störbeaufschlagung i. Allg. durch äußere eingestrahlte elektromagnetische Felder. Zur Sicherstellung der Störfestigkeit der Systeme werden deshalb Prüfungen mit Feldeinstrahlungen im Freifeld, in geschirmten Absorberhallen sowie in TEM-Zellen und Streifenleitungen durchgeführt. Diese sollen so weit wie möglich die Bedingungen des Fernfeldes nachbilden.

Bei der Prüfung von Geräten und Systemen mit großen Abmessungen ist hierbei ein hoher Aufwand erforderlich, um Fernfeldbedingungen mit Feldhomogenität sicherzustellen sowie die erforderliche Prüffeldstärke zu erzeugen.

Als Alternative zur direkten Einstrahlung elektromagnetischer Felder wurde deshalb das Prüfverfahren mit Stromeinspeisung (Bulk Current Injection / BCI) entwickelt [40]. Hierbei wird die Störbeaufschlagung des Prüflings durch transformatorische Einkopplung leitungsgeführter Störgrößen in Leitungen und Kabelbäume des zu prüfenden Systems mit Hilfe von Stromeinspeisezangen nachgebildet.

Dabei ergeben sich mehrere Vorteile der Stromeinspeisung gegenüber Prüfverfahren mit gestrahlten Störgrößen:

- Die mit Stromeinspeisung erreichbare Störbeaufschlagung entspricht einer Feldeinstrahlung von ca. 2 V/m pro Watt Verstärkerleistung. Mit handelsüblichen Verstärkern können somit Prüffeldstärken bis zu mehreren kV/m nachgebildet werden [12].
- Aufgrund der hohen Kopplungswirkung der Stromeinspeisezangen sind für BCI-Prüfungen niedrigere Verstärkerleistungen als für Einstrahlungsprüfungen erforderlich. Die erforderlichen Prüfeinrichtungen (Generatoren, Verstärker, Stromzangen, Messgeräte) sind deshalb erheblich kostengünstiger.
- Störfestigkeitsprüfungen mit Stromeinspeisung sind leicht automatisierbar, weniger zeitaufwendig als Einstrahlungsprüfungen und daher ökonomischer [6] [55].

- Die Stromeinspeisung kann für einzelne über einer Massefläche montierte Komponenten oder direkt am gesamten System durchgeführt werden. Störfestigkeitsprüfungen am System sind damit bereits frühzeitig im Entwicklungsprozess (Prototypphase) möglich, so dass Zeit und Kosten etwaiger späterer Redesigns reduziert werden können.
- Bei Einstrahlungsprüfungen in Absorberhallen, TEM-Zellen oder Streifenleitungen hängen die maximal zulässigen Abmessungen der Prüflinge von den jeweiligen Prüfeinrichtungen ab. Dagegen kann die Stromeinspeisung auch zur Prüfung von Systemen und Komponenten mit sehr großen Abmessungen (z.B. Nutzfahrzeugen, Flugzeugen) verwendet werden.
- Für die Einkopplung der Störgrößen mit Stromeinspeisezangen sind keine Eingriffe in das zu prüfende System erforderlich, wie z.B. das Auftrennen der Kabelbäume zum Einfügen von Koppelnetzwerken.

Die Stromeinspeisung wird als Störfestigkeitsprüfverfahren aufgrund dieser Vorteile bereits seit mehr als 20 Jahren in der Flugzeugindustrie [11] und in der Automobilindustrie [6] verwendet. Der Einsatz erfolgt hierbei nicht nur zur Störfestigkeitsprüfung einzelner elektronischer Geräte und Komponenten (bench test) sondern auch zur Prüfung dieser Komponenten im gesamten System Flugzeug oder Fahrzeug (system test) [4] [13]. Der Anwendungsbereich erstreckt sich von 10 kHz bis 400 MHz.

Bei der Übertragung der Prüfergebnisse von Komponentenprüfungen mit Stromeinspeisung auf die tatsächlich auftretende Störbedrohung für das Gesamtsystem sind folgende Einschränkungen zu beachten:

- Zwischen Stromeinspeisung und Feldeinstrahlung bestehen prinzipielle Unterschiede hinsichtlich der Einkopplung der Störgrößen in die Kabelbäume (siehe Kapitel 2.2) .
- Die Prüfanordnungen bei Komponentenprüfungen (Prüfling mit angeschlossenem Kabelbaum montiert über einer Massefläche) unterscheiden sich von den tatsächlichen Installationsbedingungen des Prüflings im System. Diese Unterschiede sind besonders gravierend, wenn für die Komponentenprüfungen ein Prüfkabelbaum statt des später im System tatsächlich installierten Kabelbaumes verwendet wird.

1.1 Stand von Forschung und Technik

Durch Normen und Richtlinien sind sowohl die Stromeinspeisung als auch die Verfahren mit Feldeinstrahlung zur Störfestigkeitsprüfung auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene festgelegt (z.B. IEC 1000 Teil 4, ISO 11451, ISO 11452, EN 61000 Teil 4, Richtlinie 95/54/EG der Europäischen Union, DIN ISO 11451, DIN ISO 11452, DIN EN 61000 Teil 4). Außerdem bestehen auf dem militärischen Sektor umfangreiche, detaillierte Vorschriften zu den Störfestigkeitsprüfverfahren (z.B. MIL-STD-461D und MIL-STD-462D, DEF STAN 59-41). Dadurch sollen gleiche Prüfbedingungen und reproduzierbare Prüfergebnisse bei der Anwendung dieser Verfahren erreicht werden.

Änderungen der Prüfbedingungen bei der Stromeinspeisung ergeben sich durch die Wirkungen elektrischer und geometrischer Einflussgrößen.

Sultan beschreibt in einer theoretischen Untersuchung [86] die Auswirkungen unterschiedlicher Einflussgrößen auf den Strom in den einzelnen Adern und den Strom in einem Kabelbaum (Stromsumme, bulk current). Seine Berechnungen (Simulationen) erfolgen für eine monofrequente Störeinkopplung durch Stromeinspeisung in eine Anordnung mit einer 3-adrigen Leitung parallel über einer Massefläche. Die Leitung ist beidseitig mit unterschiedlichen Impedanzen abgeschlossen. Ihre Länge beträgt 1,8 m, der Abstand zur Massefläche 60 mm.

Unterschiedliche Positionen der Stromeinspeisenzange (Abstand vom Kabelbaumende bzw. Prüflingsanschluss 0,1 m ; 0,5 m ; 0,9 m ; 1,3 m) haben starken Einfluss auf die Stromverteilung in den Adern, auf die Stromsumme entlang des Kabelbaumes sowie insbesondere auf den Strom in den Abschlussimpedanzen.

Dagegen wirken sich unterschiedliche Positionen der Strommesszange (Abstand vom Kabelbaumende 0,7 m ; 1,15 m ; 1,65 m) weniger auf die Stromverteilung aus. Der über die Strommesszange ermittelte Wert des Stromes im Kabelbaum hängt stark von der Position der Zange ab. Da dieser Wert i. Allg. direkt das Prüfergebnis beeinflusst, sollte die Strommesszange so dicht wie möglich am Prüfling montiert werden.

Weitere Berechnungen erfolgen für unterschiedliche Abschlussimpedanzen (Leerlauf, Kurzschluss), Leitungslängen im Bereich 1,2...2,2 m sowie Abstände des Kabelbaumes zur Massefläche (50 mm ; 100 mm ; 150 mm). Hierbei zeigt sich, dass unterschiedliche Abschlussimpedanzen sowie unterschiedliche

Leitungslängen großen Einfluss auf die Stromverteilung haben. Dagegen wirken sich die Änderungen des Abstandes zur Massefläche weniger stark aus.

Kuvedu-Libla [54] untersucht die Auswirkung unterschiedlicher Einflussgrößen bei der Stromeinspeisung sowie der Feldeinstrahlung auf die Strom- und Spannungsverteilung in einem Kabelbaum. Hierbei werden die Änderungen der Höhe des Kabelbaumes über der Massefläche, unterschiedliche Längen der Leiter im Kabelbaum, Verzweigungen, Isolationsschichten, Abmessungen der Zangen bei der Stromeinspeisung, Masseverbindungen, unterschiedliche Einstrahlwinkel sowie Schirmwirkungen bei Feldeinstrahlung betrachtet.

Die Änderung des Abstandes des Kabelbaumes von der Massefläche im Bereich 25...100 mm führt zu einer Änderung der Strom- und Spannungsverteilung im Kabelbaum um ca. 20 %.

Trotz gleicher Summenströme im Kabelbaum können sich die Ströme in den einzelnen Adern, die durch Feldeinstrahlung oder durch Stromeinspeisung hervorgerufen werden, bis zu 45 dB unterscheiden.

Bittinger [7][8] untersucht den Einfluss elektrischer und geometrischer Größen bei der Stromeinspeisung an einem komplexen Kfz-Reglersystem (Prüfling) mit einem 3 m langen Kabelbaum und diversen Zusatzgeräten (Peripherie).

Hierzu ermittelt er experimentell als Übertragungsfunktionen den Zusammenhang zwischen 'eingekoppelter Leistung' und 'induziertem Strom' bei unterschiedlichen Anordnungen im Frequenzbereich 1...400 MHz. Folgende Parameter werden variiert: Anzahl der Leitungen, die durch die Stromzangen geführt werden, Abschlussimpedanzen des Kabelbaumes, Abstand des Kabelbaumes zur Massefläche (0...50 mm), Abstand zwischen Stromeinspeisung und Strommesszange (20...200 mm). Der Abstand zwischen Prüfling und Stromeinspeisung (150 mm) wird nicht verändert.

Es ergeben sich große Unterschiede der Übertragungsfunktionen (mehr als 10 dB) bei Änderungen der Höhe des Kabelbaumes über der Massefläche sowie bei Änderungen der Anzahl der Leitungen, die durch die Zangen geführt werden. Demgegenüber wirken sich Änderungen der Abschlussverhältnisse an der Peripherie (Ende des Kabelbaumes, Zusatzgeräte) nur geringfügig aus. Änderungen des Abstandes zwischen Stromeinspeisung und Messzange im Bereich 20...200 mm ergeben Unterschiede der Übertragungsfunktion bis zu 10 dB (100...400 MHz) bzw. 4 dB (bis 100 MHz). Änderungen des Zangenabstandes im Bereich 50...100 mm führen bis 200 MHz zu Unterschieden kleiner als 3 dB, oberhalb von 200 MHz zu Unterschieden kleiner als 5 dB.

Carter [11] führt Untersuchungen der Eigenschaften von Stromzangen sowie des Kalibrier- und Prüfaufbaus bei der Stromeinspeisung bis 400 MHz durch. Hierbei erfolgt zunächst eine Kalibrierung verschiedener Stromeinspeisungen in einer entsprechenden Anordnung (Kalibrierhalter bzw. calibration jig) mit einem Strom von 1 mA. Die jeweilige Vorlaufleistung wird anschließend in einen 3,3 m langen Prüfkabelbaum aus 6 Drähten eingekoppelt. Diese sind beidseitig mit Widerständen von 1Ω ... $10 \text{ k}\Omega$ sowie Kurzschluss gegen Masse beschaltet. Im Abstand 50 mm von diesem Leitungsende wird mit verschiedenen Strommesszangen jeweils der Strom im Kabelbaum gemessen. Hierbei ergeben sich Differenzen bis zu 12 dB. Carter führt diese Differenzen auf die unterschiedlichen Serienimpedanzen zurück, die durch die Stromzangen in den relativ niederohmigen Kabelbaum eingefügt werden. Daraus ergibt sich für ihn die Notwendigkeit, die Spezifikationen genau festzulegen, um die Unsicherheiten von Prüfergebnissen gering zu halten.

In einer weiteren Messanordnung werden durch Carter die Einflüsse der Position der Stromeinspeisung untersucht. Hierzu ist ein 1 m langer Draht im Abstand 50 mm über einer Massefläche montiert, einseitig kurzgeschlossen und auf der anderen Seite mit einem Widerstand von $2,2 \text{ k}\Omega$ beschaltet. Eine Strommesszange befindet sich im Abstand 50 mm vom kurzgeschlossenen Leitungsende. Bei Änderungen des Abstandes zwischen Strommesszange und Stromeinspeisung von 50 mm auf 100 mm werden Unterschiede des Stromes im Draht von 7 dB oberhalb von 200 MHz gemessen. Diese Unterschiede werden auch bei Variation der Position der Strommesszange im Abstand 50...100 mm vom kurzgeschlossenen Leitungsende festgestellt. Die gleichen Untersuchungen an einem Kabelbaum eines Navigationssystems zeigen Abweichungen des gemessenen Stromes oberhalb von 200 MHz bis zu 10 dB. Oberhalb von 200 MHz sind daher erhebliche Differenzen der gemessenen Ströme zwischen der Komponentenprüfung und der Systemprüfung zu erwarten.

In der Literatur sind außerdem zahlreiche Untersuchungen zur Anwendung der Stromeinspeisung und der Feldeinstrahlung bei der Störfestigkeitsprüfung sowie zur Äquivalenz beider Verfahren angegeben. Diese werden im Kapitel 2.2 näher betrachtet.

1.2 Aufgabenstellung dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung der Stromeinspeisung (Bulk-Current-Injection) bei unterschiedlichen Prüfbedingungen.

In den Normen zur Stromeinspeisung bestehen Unterschiede u.a. hinsichtlich der elektrischen und geometrischen Größen sowie der zulässigen Toleranzen des Prüfaufbaus. Störfestigkeitsprüfungen mit Stromeinspeisung können daher zu unterschiedlichen Prüfergebnissen aufgrund unterschiedlicher Prüfbedingungen führen, obwohl die Prüfungen normenkonform durchgeführt werden.

Daher soll der Einfluss geometrischer und elektrischer Einflussgrößen bei der Stromeinspeisung auf die Störfestigkeit des gesamten Systems bestehend aus dem Prüfling, dem Kabelbaum und weiteren Komponenten (Zusatzgeräten) untersucht werden. Die Betrachtungen umfassen den Frequenzbereich 0,1...400 MHz. Außerdem ist zu prüfen, in wie weit Störfestigkeitsprüfungen mit Stromeinspeisung nach verschiedenen Normen vergleichbare Ergebnisse liefern.

In der Literatur angegebene experimentelle Untersuchungen der Einflussgrößen bei der Stromeinspeisung betrachten den Betrag des Stromes in den einzelnen Adern oder die Stromsumme im Kabelbaum jeweils in der Nähe des Prüflings. Die Messungen werden mit Hilfe einer Strommesszange durchgeführt. Dabei erfolgt keine Trennung der Einflüsse, die durch die Zange und andere Einflussgrößen hervorgerufen werden.

Um einzelne Einflussgrößen getrennt untersuchen zu können, soll in dieser Arbeit als Prüfling (EUT) ein Detektor aufgebaut werden, der das Erreichen eines bestimmten Störpegels an den einzelnen Prüflingseingängen signalisiert.

Der Einfluss unterschiedlicher Einflussgrößen kann dann – bei gleichem Störpegel an den Prüflingseingängen – über die hierfür mit der Stromeinspeisung in den Kabelbaum einzukoppelnden äußeren Störgrößen verglichen und bewertet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen folgende Einflussgrößen des Prüfaufbaus sowie des Prüfablaufes experimentell untersucht werden:

- Anzahl der Adern im Kabelbaum
- Länge des Kabelbaumes
- Abstand des Kabelbaumes von der Massefläche
- Abstand der Stromeinspeisung vom Prüfling

- Verwendung zusätzlicher Strommesszangen
- Eingangsimpedanzen von Prüfling und Zusatzgerät
- Referenzparameter bei der PrüfpegelEinstellung

Die bei den Messungen wirksamen einzelnen Unsicherheitskomponenten der verwendeten Mess- und Prüfgeräte sind zu ermitteln und bei der Bestimmung der Gesamt-Messunsicherheit zu berücksichtigen.

Zur Einstellung des Prüfpegels (Prüfstromes) bei der Stromeinspeisung müssen die Stromeinspeisezangen vor der Prüfung in einer entsprechenden Kalibriereinrichtung kalibriert werden. Hierbei sind auch die Einflüsse der Kalibriereinrichtung in den Kalibrierdaten mit enthalten. Bei der Störfestigkeitsprüfung ergeben sich daraus zusätzliche Unsicherheiten des Prüfergebnisses.

Daher soll in dieser Arbeit außerdem untersucht werden, wie eine getrennte Bestimmung der Eigenschaften der Stromeinspeisezangen und der Einflüsse der Kalibriereinrichtung erfolgen kann.

2 Stromeinspeisung als Störfestigkeitsprüfverfahren

Die Stromeinspeisung (Bulk Current Injection) wird als Prüfverfahren zur Sicherstellung der elektromagnetischen Störfestigkeit elektronischer Komponenten, Betriebsmittel, Geräte und Systeme angewendet. Hierbei erfolgt eine transformatorische Einkopplung leitungsgeführter Störgrößen in Kabelbäume (Leitungsstränge), um die Störbeeinflussung durch eingestrahlte elektromagnetische Felder nachzubilden.

Im Kapitel 2 dieser Arbeit wird zunächst das Prinzip der Stromeinspeisung erläutert. Es folgt eine Zusammenstellung in der Literatur angegebener theoretischer und experimenteller Untersuchungen zur Anwendung und Vergleichbarkeit von Störfestigkeitsprüfungen mit Feldeinstrahlung und Stromeinspeisung.

Die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse hängt von den jeweiligen Prüfbedingungen ab. Deshalb werden die Einflussgrößen erläutert, die Änderungen der Prüfbedingungen bei der Stromeinspeisung bewirken können.

Die Einkopplung und Messung der Störgrößen im Kabelbaum erfolgt durch Stromeinspeise- bzw. Strommesszangen. Hierzu werden die Übertragungseigenschaften der Stromzangen betrachtet, insbesondere deren charakteristische Größen Einfügungsdämpfung und Transferimpedanz.

Der Einfluss der Kalibriereinrichtung zur Einstellung der Prüfströme und zur Bestimmung der Einfügungsdämpfung wird besonders berücksichtigt.

2.1 Prinzip der Stromeinspeisung

Bei der Störfestigkeitsprüfung mit Stromeinspeisung werden die zu prüfenden elektronischen Komponenten (Prüflinge) leitungsgeführten Störgrößen ausgesetzt. Dadurch soll die Störbeeinflussung aufgrund eingestrahelter äußerer elektromagnetischer Felder nachgebildet werden.

Diese Felder gehen z. B. von umliegenden Sendeanlagen aus und können Störgrößen in den elektronischen Komponenten hervorrufen.

Hierbei sind zwei Anteile zu unterscheiden:

- a) Störgrößen durch Einkopplung auf Leitungsstränge und Kabelbäume, die an die Komponenten angeschlossen sind,

- b) Störgrößen, die durch direkte Einstrahlung in die Komponenten hervorgerufen werden.

Im betrachteten Frequenzbereich bis 400 MHz kann bei Prüflingen mit angeschlossenen Kabelbäumen der Störgrößenanteil durch direkte Einstrahlung vernachlässigt werden (vgl. Ball / Jennings [5], Bittinger [7], Oberjatzas [65]).

Das bedeutet, dass die Beeinflussung im Wesentlichen leitungsgeführt über die Kabelbäume mit einzelnen oder mehreren Daten-, Kontroll- sowie Stromversorgungsleitungen zum Prüfling erfolgt.

Bei Stromeinspeisung werden diese Störgrößen induktiv (transformatorisch) in den einzelnen Kabelbaum gemäß Bild 2.1 eingekoppelt.

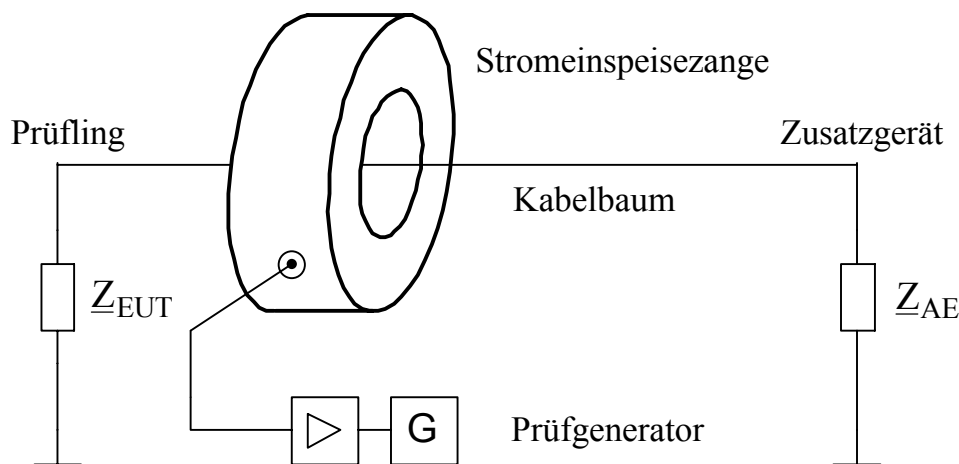


Bild 2.1: Stromeinspeisung in einen Kabelbaum

Hierzu wird eine Stromeinspeisezange (Bild 2.2) um den Kabelbaum montiert und an einen Prüfgenerator (HF-Signalgenerator mit nachfolgendem Verstärker) angeschlossen. Der Kabelbaum verbindet den Prüfling (Equipment Under Test / EUT) (Eingangsimpedanz Z_{EUT}) mit einem Zusatzgerät (Auxiliary Equipment / AE) (Eingangsimpedanz Z_{AE}). Dieses kann ein weiteres elektronisches Gerät oder eine Komponente sein, die für den Betrieb des Prüflings erforderlich ist.

Die Stromeinspeisezange stellt die Primärseite und der Kabelbaum die Sekundärseite eines HF-Übertragers dar, wobei die Zange je nach Bauart eine oder mehrere Windungen haben kann [33].



Bild 2.2: Stromeinspeisezange

Ein primärseitiger hochfrequenter Strom I_0 erzeugt im permeablen Kernmaterial der Stromeinspeisezange eine Änderung des magnetischen Flusses Φ . Dadurch wird auf der Sekundärseite im Kabelbaum eine Spannung \underline{U}_2 induziert. Der sich im Kabelbaum einstellende Strom I_2 hängt u.a. von den asymmetrischen Impedanzen Z_{2a} und Z_{2b} beiderseits der Einkopplungsstelle ab (siehe Bild 2.3).

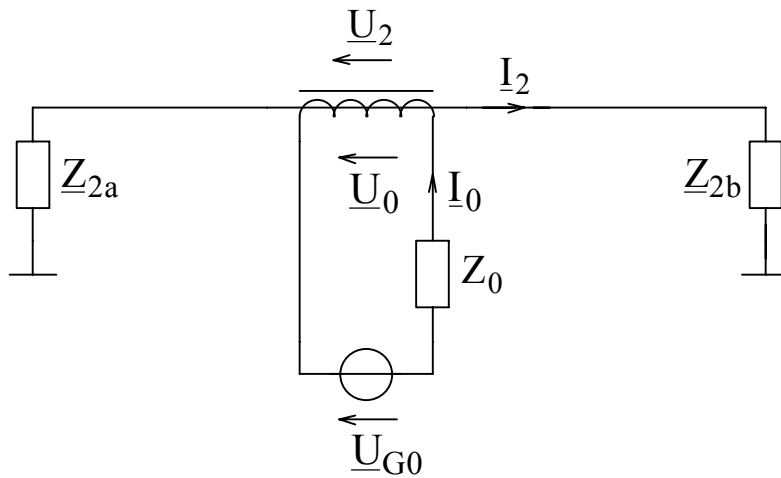


Bild 2.3: Stromeinspeisezange als HF-Übertrager

Der im Zusammenhang mit dem hier beschriebenen Verfahren verwendete Begriff 'Stromeinspeisung' bedeutet somit nicht unbedingt, dass Primär- und Sekundärstrom in einem festen, frequenzunabhängigen Verhältnis stehen.

Der Strom im Kabelbaum ist abhängig von den Eingangsimpedanzen des Prüflings und des Zusatzgerätes [58]. Er wäre davon unabhängig, wenn die Einspeisungsquelle (Prüfgenerator mit angeschlossener Stromeinspeisezange) eine sehr große Innenimpedanz hätte. Dieses lässt sich in der Praxis nicht realisieren, da der Prüfgenerator üblicherweise eine Impedanz von 50Ω besitzt.

Für einen konstanten Strom im Kabelbaum, unabhängig von den Eingangsimpedanzen, ist es daher erforderlich, diesen Strom direkt zu messen und die Ausgangsspannung der Einspeisungsquelle ständig entsprechend einzustellen (vgl. 'Prüfverfahren mit Benutzung einer Strommesszange (Geschlossener Regelkreis)' in DIN ISO 11452-4 [27]).

Dieses Verfahren kann jedoch zu Problemen bei der Prüflingsbelastung führen. Durch die eingepprägten Ströme treten an hochohmigen Prüflingseingängen hohe Spannungen und entsprechende Verluste auf. Um eine unzulässig hohe Belastung des Prüflings und damit seine Zerstörung zu vermeiden, ist es daher notwendig, zusätzlich die eingekoppelte Störleistung zu überwachen.

Bei direkter Einstrahlung besteht nach Oberjatzas [65] der 'Worst-Case' der Störbedrohung für den Prüfling, wenn die maximal durch den Kabelbaum aus dem Feld aufnehmbare Leistung am Prüfling ansteht. Zur Nachbildung dieser Störbedrohung ist deshalb die Einkopplung einer entsprechenden Leistung durch Stromeinspeisung erforderlich. Strom und Spannung an den einzelnen Prüflingseingängen ergeben sich dabei abhängig von den entsprechenden Eingangsimpedanzen von Prüfling und Zusatzgeräten.

Aufgrund der großen Bereiche möglicher Eingangsimpedanzen sowie auftretender Resonanzerscheinungen ist es nicht sinnvoll, Prüfschärfewerte für die während der Prüfung im Kabelbaum fließenden Ströme oder Spannungen am Prüfling zur Beurteilung der Störfestigkeit zu definieren.

Daher wird von den Leistungen ausgegangen, die auf das gesamte System wirken und über die Stromeinspeisetzange eingekoppelt werden. Durch eine Kalibrierung der Stromeinspeisetzange in einer Kalibriereinrichtung mit definierter Last (siehe Kapitel 2.5) wird der Zusammenhang zwischen der vom Prüfgenerator abgegebenen Leistung und der in die Kalibriereinrichtung (Kalibrierhalter) eingekoppelten Leistung ermittelt. Diese eingekoppelte Leistung wird durch entsprechende Ströme oder Spannungen im Kalibrierhalter ausgedrückt.

In den Normen (siehe Kapitel 3) sind diese Ströme oder Spannungen als Prüfschärfewerte angegeben.

2.2 Stromeinspeisung und Feldeinstrahlung

In der Literatur sind zahlreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen zu Störfestigkeitsprüfungen mit Feldeinstrahlung bzw. Stromeinspeisung beschrieben. Sie unterscheiden sich sowohl in den betrachteten Mess- und

Prüfanordnungen als auch in den Zielsetzungen, Vorgehensweisen und Kriterien zur Bewertung der Vergleichbarkeit.

Hierbei lassen sich zwei Gruppen bilden:

1. Einfache Anordnungen:

Diese Untersuchungen umfassen Berechnungen der Störeinkopplung und Wellenausbreitung sowie ihre experimentelle Verifizierung.

Hierzu werden Anordnungen aus mehradrigen Leitungen (Kabelbaum) verwendet, die i. Allg. geradlinig in einem konstanten Abstand über einer leitfähigen Struktur (Massefläche) montiert sind. Beide Enden der Leitungen sind jeweils mit linearen Impedanzen beschaltet.

Die Vergleichbarkeit von Feldeinstrahlung und Stromeinspeisung wird anhand der Störgrößen (Ströme und Spannungen) bewertet, die bei den jeweiligen Verfahren in einzelne Adern bzw. in den gesamten Kabelbaum eingekoppelt werden.

2. Komplexe Anordnungen:

Bei diesen Untersuchungen werden Störfestigkeitsprüfungen elektronischer Geräte in Verbindung mit angeschlossenen Kabelbäumen und Zusatzgeräten insbesondere aus dem Bereich der Automobil- und der Flugzeugindustrie betrachtet.

Prüfungen erfolgen sowohl auf Komponentenebene im Laboraufbau als auch auf Systemebene. Die Prüfverfahren mit Stromeinspeisung bzw. Feldeinstrahlung sind in Normen (siehe Tabelle 2.1) angegeben und werden entweder getrennt oder in Kombination eingesetzt.

	Stromeinspeisung (BCI test)	Feldeinstrahlung (field illumination / radiated test)
Komponentenprüfung (bench test)	(DIN) ISO 11452-4	(DIN) ISO 11452-3
Systemprüfung (system test)	(DIN) ISO 11451-4, MIL-STD-461D (CS114)	(DIN) ISO 11451-3, MIL-STD-461D (RS103)

Tabelle 2.1: Normen zur Störfestigkeitsprüfung mit Stromeinspeisung und Feldeinstrahlung auf Komponenten- bzw. Systemebene

Durch die Messung der Prüfgrößen (Strom bzw. Feldstärke) beim Auftreten einer Prüflingsreaktion (Funktionsstörung) lassen sich jeweils frequenzabhängige Störfestigkeitsschwellen (Störfestigkeitsprofile) des Prüflings für die unterschiedlichen Prüfverfahren angeben.

Die Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Prüfverfahren wird dann anhand der jeweiligen Störfestigkeitsprofile bewertet. Hierbei ist insbesondere die Übereinstimmung störempfindlicher Frequenzbereiche von Bedeutung.

2.2.1 Stromeinspeisung und Feldeinstrahlung bei einfachen Anordnungen

Eine detaillierte analytische Beschreibung der Wellenausbreitung auf gekoppelten Mehrfachleitungen (Multiconductor Transmission Lines / MTL) sowie der Einkopplung äußerer elektromagnetischer Felder in diese Leitungen gibt **Paul** [68].

Hierbei werden die Störgrößen, die durch das elektrische und magnetische Feld entlang der einzelnen Leiter eingekoppelt werden, in den Leitungsgleichungen durch verteilte Spannungs- und Stromquellen berücksichtigt.

Für einfache Anordnungen (elektrisch kurze Leitung, ein Leiter parallel über einer Massefläche, zwei Leiter parallel über einer Massefläche) liefert Paul analytische Lösungen zur Berechnung der frequenzabhängigen Ströme in den Abschlüssen an den beiden Leitungsenden bei Einstrahlung mit einer ebenen TEM-Welle.

Drei Spezialfälle für die Einstrahlungsrichtung werden genauer betrachtet:

'endfire' (Wellenausbreitung in Richtung der Leitung, E-Feld \perp Massefläche),

'sidefire' (Wellenausbreitung \perp Massefläche, E-Feld in Richtung der Leitung),

'broadside' (Wellenausbreitung \perp Richtung der Leitung, E-Feld \perp Massefläche).

Die für die 2-Leiter-Anordnung mit dem MTL-Modell berechneten frequenzabhängigen Ströme in den Leitungsabschlüssen stimmen sehr gut mit denen aus einer numerischen Berechnung unter Anwendung der Momentenmethode überein.

Sultan [86] gibt ein mathematisches Modell für die Stromeinspeisung (BCI) an. Hierbei wird der Kabelbaum als eine Anordnung gekoppelter verlustloser Mehrfachleitungen betrachtet. Die Beschreibung der Wellenausbreitung auf dem Kabelbaum erfolgt unter Annahme einer Quasi-TEM-Welle durch ortsabhängige lineare Differentialgleichungen zweiter Ordnung.

Die Eigenschaften der Stromzangen werden durch äquivalente Netzwerke beschrieben. Hierbei handelt es sich um reale Ersatzspannungsquellen bei Stromeinspeisungen sowie um Ersatzimpedanzen bei Strommessungen. Diese liegen jeweils in Serie mit den Mehrfachleitungen sowie den Abschlussimpedanzen an den beiden Kabelbaumenden.

Simulationen erfolgen zunächst für eine Anordnung mit einer 1,8 m langen 3-adrigen Leitung, die 60 mm über einer Massefläche montiert ist. Hierfür wird die Stromverteilung entlang der einzelnen Leitungen sowie die Stromsumme entlang des Kabelbaumes berechnet. Durch Variation von Stromzangenposition, Kabelbaumlänge, Höhe über Massefläche, Abschlussimpedanzen an den Kabelbaumenden soll ermittelt werden, welche geometrischen Größen einen starken Einfluss auf die Stromverteilung haben.

Audone et al. [3] beschreibt theoretische Simulationen und experimentelle Verifizierungen von Feldeinstrahlungen und Stromeinspeisungen im Frequenzbereich 15...305 MHz. Hierfür werden einfache Anordnungen mit 1-adriger Leitung unterschiedlicher Länge und unterschiedlichen Abschlussimpedanzen gegen Masse verwendet (1,8 m Länge bei beidseitigem Kurzschluss bzw. 1,8 m und 3 m Länge bei beidseitigem Abschluss mit dem Wellenwiderstand). Der Abstand der Leitungen zur Massefläche beträgt 60 mm.

Für die Simulationen der Einkopplung durch Einstrahlung wird das Modell von Paul [68] (verteilte Spannungs- und Stromquellen), für die Stromeinspeisung das Modell von Sultan [86] (Ersatzspannungsquelle) verwendet.

Bezüglich des Resonanzverhaltens der Leitungen ergeben sich nur geringfügige Unterschiede zwischen Feldeinstrahlung und Stromeinspeisung aufgrund der hierbei zusätzlich durch die Stromzangen in die Leitungen eingefügten Impedanzen. Diese können jedoch gegenüber dem Wellenwiderstand der Leitungen i. Allg. vernachlässigt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Einkopplungsmechanismen bei Stromeinspeisung und Feldeinstrahlung bestehen jedoch erhebliche Unterschiede der Ströme an den beiden Enden der Leitung (Prüfling bzw. Zusatzgeräte). Diese Unterschiede werden theoretisch begründet und auch experimentell festgestellt.

Beide Verfahren liefern keine äquivalenten Ströme über einen weiten Frequenzbereich. Änderungen der Position der Stromeinspeisetzange (Abstand vom Prüfling: 0,5 m bzw. 1 m) beeinflussen stark die Stromverteilung auf dem Kabelbaum und insbesondere den Strom am Prüflingsanschluss. Nach Audone ist die Stromeinspeisung selbst bei angepasst betriebenen Leitungen (Kabelbäumen) nicht geeignet, die durch Feldeinstrahlung eingekoppelten Störgrößen breitbandig im Prüfling hervorzurufen.

Oberto et al. [48] führen einen experimentellen Vergleich von Einstrahlung (Prüfverfahren RS03 in MIL-STD-461), kapazitiver Störgrößeneinkopplung (Prüfverfahren CS02 in MIL-STD-461) sowie induktiver Störgrößeneinkopplung (BCI) im Frequenzbereich 20...400 MHz durch.

Um einen direkten Bezug zu den theoretischen Ergebnissen von Audone [3] zu ermöglichen, wird hierzu eine Anordnung bestehend aus einer 1-adrigen, 1,8 m langen Leitung verwendet, die 50 mm über einer Massefläche montiert ist. Der Wellenwiderstand dieser Anordnung beträgt ca. 220 Ohm. Die Leitung wird am einen Ende angepasst, am anderen Ende mit Kurzschluss oder Leerlauf betrieben. Der Zusammenhang zwischen der Eingangsgröße (Leistung bei kapazitiver und induktiver Störeinkopplung, Feldstärke bei Feldeinstrahlung) und dem Strom am Leitungsende wird experimentell ermittelt. Hierbei zeigen die Verfahren CS02 und BCI vergleichbare Ergebnisse. Gegenüber RS03 ergeben sich dagegen große Unterschiede.

Der Strom am Leitungsende wird außerdem bei unterschiedlichen Versuchsparametern gemessen. Variiert werden die Abschlussimpedanzen (Kurzschluss, Anpassung, Leerlauf), der Einstrahlwinkel bei RS03 (0...75 Grad) und die Position der Störeinkopplung bei CS02 und BCI (0,1 m, 0,5 m, 1 m vom Leitungsende). Auch hierbei sind die Ergebnisse der kapazitiven Störeinkopplung (CS02) und der Stromeinspeisung (BCI) vergleichbar. Außerdem ergeben sich Übereinstimmungen mit den Berechnungen von Audone [3].

Bei der Feldeinstrahlung festgestellte Resonanzfrequenzen stimmen mit denen bei der Stromeinspeisung überein. Allerdings weichen die gemessenen Beträge der bei Feldeinstrahlung eingekoppelten Ströme erheblich von den Berechnungen ab. Der Grund hierfür liegt in dem verwendeten vereinfachten Einkopplungsmodell für die Feldeinstrahlung mit einem homogenen ebenen Feld konstanter Feldstärke. Hierbei werden zahlreiche Einflüsse wie z.B. Reflexionen und Feldinhomogenitäten nicht erfasst. Nach Aussage von Oberto et al. ist es somit möglich, die komplexen Einkopplungsbedingungen bei der Feldeinstrahlung durch die Stromeinspeisung nachzubilden.

Auch **Adams et al.** [1] beschreiben eine experimentelle Untersuchung der Ströme im Kabelbaum bei Feldeinstrahlung und Stromeinspeisung. Hierzu verwenden sie Kabelbäume mit 2 x 3 Leitungen unterschiedlicher Länge (3 m, 6 m, 30 m), die jeweils beidseitig mit unterschiedlichen Abschlüssen von Kurzschluss bis Leerlauf beschaltet werden.

Mit Hilfe von Strommesszangen wird der Strom im Kabelbaum (Stromsumme) sowie in den einzelnen Leitern bestimmt. Die Strommesszangen werden hierbei so dicht wie möglich an den Abschlüssen montiert. Auch der Abstand zwischen der Stromeinspeisung und den Strommesszangen ist möglichst klein. Über den Abstand des Kabelbaumes zur Massefläche werden keine Angaben gemacht.

Die Messungen erfolgen bei 14 Frequenzwerten im Bereich 20...150 MHz. Die Leistungen des Prüfgenerators werden so eingestellt, dass die Summenströme bei Stromeinspeisung und Feldeinstrahlung gleich groß sind. Dabei ergeben sich in den einzelnen Leitern Unterschiede der gemessenen Ströme bis zu 45 dB. Die Verwendung der Stromeinspeisung zur Nachbildung der Verhältnisse bei Feldeinstrahlung erscheint den Autoren daher nicht praktikabel.

Auch die theoretischen Untersuchungen von **Hill** [41] zeigen unterschiedliche Stromverteilungen in den einzelnen Leitern eines Kabelbaumes bei Feldeinstrahlung und Stromeinspeisung. Hierzu erfolgen Berechnungen bei 15 MHz, 100 MHz sowie 150 MHz für eine Anordnung mit einem 2 m langen 2-adrigen Kabelbaum im Abstand 6 cm über einer Massefläche. Beide Leiter sind beidseitig mit Impedanzen von 50 Ohm gegen Masse beschaltet. Hierbei wird Linearität (lineares Kopplungsverhalten, lineare Lastimpedanzen) sowie Verlustlosigkeit der Leitungen vorausgesetzt.

Die Simulationen zeigen lediglich für 15 MHz geringe Differenzen (kleiner als 3 dB) der bei beiden Verfahren auftretenden Stromverteilungen. Bei 100 MHz und 150 MHz, d.h. im Fall elektrisch langer Leitungen gegenüber der Wellenlänge, werden dagegen große Differenzen aufgrund stehender Wellen festgestellt. Eine Strommesszange sollte sich so nah wie möglich am Prüfling befinden, da dort die geringsten Änderungen der Stromverteilung auftreten. Änderungen der Polarisierung sowie des Einstrahlwinkels führen bei der Feldeinstrahlung ebenfalls zu großen Unterschieden der Stromverteilung in den einzelnen Leitern.

Perini und Cohen [69][70][71] betrachten die Äquivalenz von Störfestigkeitsprüfungen mit gestrahlten bzw. eingespeisten Störgrößen (Stromeinspeisung) bezüglich der Anschlusspunkte von Prüfling und Zusatzgerät. Die elektromagnetische Einkopplung in die einzelnen Leiter des Kabelbaumes wird

durch eine Ersatzschaltung bestehend aus linearen aktiven Zweitoren beschrieben. Diese sind beidseitig mit den Impedanzen von Prüfling bzw. Zusatzgerät beschaltet.

Die jeweiligen Einspeisungsquellen der aktiven Zweitore (äquivalente Spannungs- und Stromquellen) müssen hierfür bezüglich Amplitude und Phasenlage so bestimmt werden, dass sich am Prüfling bei beiden Verfahren dieselben Störgrößen ergeben. Dieses erfolgt mit Hilfe der Leerlaufspannungen und der Kurzschlussströme am Prüflingsanschluss.

Simulationen erfolgen bei den Frequenzen 10 MHz, 100 MHz und 300 MHz für eine Anordnung bestehend aus einer 2 m langen 3-adrigen Leitung (Wellenwiderstand 228Ω), die beidseitig mit unterschiedlichen Impedanzen im Bereich $50 \dots 1000 \Omega$ abgeschlossen ist. Die in den Leitern eingekoppelten Ströme werden mit der Momentenmethode berechnet.

Eine Äquivalenz lässt sich demnach nur in Sonderfällen bezüglich der Störbelastung an den Prüflingsanschlüssen (Lastimpedanzen des Kabelbaumes) erreichen. Hierfür ist Voraussetzung ein lineares Verhalten des Prüflings. Die Verfasser weisen darauf hin, dass keine Äquivalenz der Prüfverfahren bezüglich der Störgrößen innerhalb des Prüflings besteht. Ist der Prüfling nichtlinear, so besteht auch bezüglich der Prüflingsanschlüsse keine elektromagnetische Äquivalenz der Einkopplung mit Einstrahlung und Einspeisung.

Die Bestimmung äquivalenter Spannungs- und Stromquellen nach Betrag und Phase und die Realisierung der erforderlichen idealen Leerlauf- und Kurzschlussbedingungen führt insbesondere bei hohen Frequenzen zu Problemen. Außerdem ist die mathematische Beschreibung der Kopplung zwischen den einzelnen Leitern eines handelsüblichen Kabelbaumes aufwendig.

Um die Störgrößen an den Prüflingsanschlüssen bei Stromeinspeisung und Feldeinstrahlung genauer ermitteln zu können, verwenden **Klingler et al.** [53] für die Berechnung zusätzlich die gemessenen Streuparameter eines Kabelbaumes.

Hierzu wird ein Test-Kabelbaum mit 10 Anschlüssen (Toren) betrachtet, der in einem Metallgehäuse verlegt ist. Die Streuparameter werden zwischen allen Toren für den Frequenzbereich $1 \dots 1000$ MHz bestimmt. Feldeinstrahlung und Stromeinspeisung rufen jeweils unterschiedliche frequenzabhängige Störspannungen an den betrachteten Toren hervor. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der berechneten Störspannungen an den betrachteten Toren (Simulation) mit den gemessenen Werten.

Kuvedu-Libla [54] betrachtet in seiner Arbeit die unterschiedliche Störgrößen-einkopplung bei Feldeinstrahlung und Stromeinspeisung im Frequenzbereich 1...400 MHz. Durch Feldeinstrahlung hervorgerufene Störgrößen werden wie bei Paul [68] durch verteilte Strom- und Spannungsquellen entlang des gesamten Kabelbaumes nachgebildet. Für die Stromeinspeisung werden sowohl (wie bei Sultan [86]) einzelne Ersatzspannungsquellen als auch über der Breite der Stromeinspeisezange verteilte Quellen betrachtet.

Die mathematische Beschreibung der Wellenausbreitung auf dem Kabelbaum erfolgt durch ortsabhängige lineare Differentialgleichungen zweiter Ordnung bei Annahme eines Quasi-TEM-Verhaltens. Hierbei werden lineare Eingangsimpedanzen für Prüfling und Zusatzgeräte vorausgesetzt. Die beiden Prüfverfahren führen zu unterschiedlichen frequenzabhängigen Störströmen und Störspannungen entlang des Kabelbaumes. Beeinflussungen der im Kabelbaum auftretenden Störgrößen ergeben sich insbesondere durch Verzweigungen, Masseverbindungen, Leiter unterschiedlicher Länge sowie den Abstand des Kabelbaumes zur Massefläche.

Die Differenzen der Störgrößen am Prüflingseingang können reduziert werden, in dem bei beiden Verfahren die gleiche Prüfanordnung verwendet und die Stromeinspeisezange bei der BCI-Prüfung möglichst dicht am Prüfling (in maximal 15 cm Abstand) montiert wird.

2.2.2 Stromeinspeisung und Feldeinstrahlung bei komplexen Systemen

Obwohl nach den genannten Untersuchungen Unterschiede der in den Kabelbaum eingekoppelten Störgrößen bei Feldeinstrahlung und Stromeinspeisung auftreten und somit keine Äquivalenz beider Verfahren besteht, wird die Stromeinspeisung neben der Feldeinstrahlung zur Störfestigkeitsprüfung insbesondere von komplexen Systemen angewendet.

Carter et al. [9][13][14] beschreiben ein Verfahren für die Störfestigkeitsprüfung von Flugzeugen als Alternative zur Einstrahlung mit großen Feldstärken (High-Field-Illumination / HIRF) im Frequenzbereich 10 kHz...400 MHz. Die Stromeinspeisung (BCI) wird hierbei in Kombination mit der Einstrahlung niedriger Feldstärken (Low-Level-Swept-Coupling bzw. Low-Level-Swept-CW-Field-Illumination / LLSC) wie folgt eingesetzt:

1. Durch Kalibrierung der Stromeinspeisezangen wird zunächst der Zusammenhang zwischen dem in der Kalibriereinrichtung fließenden Strom (Prüfstrom) und der hierfür erforderlichen Vorlaufleistung ermittelt.

2. Zur Bestimmung der frequenzabhängigen 'Schleifenimpedanz' (loop impedance) der Prüfanordnung im Laboraufbau erfolgt die Stromeinspeisung in den Kabelbaum. Die Schleifenimpedanz ist ein Maß für den Strom im Kabelbaum bezogen auf die jeweilige Vorlaufleistung zur Stromeinspeisung. Strom und Vorlaufleistung werden gemessen.

Durch Vergleich der Schleifenimpedanzen bei der Komponentenprüfung im Laboraufbau und bei der Systemprüfung kann festgestellt werden, ob sich beide Prüfanordnungen signifikant unterscheiden. Aufgrund von Resonanzerscheinungen würden sich in diesem Fall erhebliche Unterschiede der ermittelten Störfestigkeit ergeben.

3. Anschließend wird das frequenzabhängige Störfestigkeitsprofil der zu prüfenden Komponente durch Stromeinspeisung im Laboraufbau ermittelt. Hierzu erfolgt eine sukzessive Erhöhung der Vorlaufleistung zur Stromeinspeisung bei jedem Frequenzwert, bis eine Prüflingsreaktion auftritt oder ein vorgegebener Grenzwert für die Vorlaufleistung oder den Strom im Kabelbaum überschritten wird. Der Strom im Kabelbaum $I_{\text{CUT}}(f)$ wird in der Nähe der angeschlossenen Komponente (EUT) gemessen.
4. Die Einstrahlung äußerer elektromagnetischer Felder in das Gesamtsystem (Flugzeug) wird bei niedriger Feldstärke $E_{\text{LLSC}}(f)$ (z.B. 1 V/m) untersucht. Der hierbei im Kabelbaum fließende Strom $I_{\text{LLSC}}(f)$ wird wie bei der Komponentenprüfung in der Nähe der elektronischen Komponente gemessen. Der Zusammenhang zwischen dem Strom und der Feldstärke wird als Transferfunktion $T(f)$ bezeichnet:

$$T(f) = \frac{I_{\text{LLSC}}(f)}{E_{\text{LLSC}}(f)} \quad (2.1)$$

Die Pegeldarstellung lautet entsprechend:

$$\frac{t(f)}{\text{dB}\left(\frac{\mu\text{A}}{\text{V/m}}\right)} = \frac{i_{\text{LLSC}}(f)}{\text{dB}(\mu\text{A})} - \frac{e_{\text{LLSC}}(f)}{\text{dB}(\text{V/m})} \quad (2.2)$$

Für unterschiedliche Kabelbäume, unterschiedliche Polarisierungen des elektromagnetischen Feldes, unterschiedliche Orientierungen des Flugzeugs zur Antenne sowie weitere Parameter werden jeweils individuelle Transferfunktionen ermittelt.

5. Mithilfe der Transferfunktionen kann der Strom I_{CUT} im Kabelbaum bestimmt werden, der bei einer vorgegebenen Prüffeldstärke $E_{\text{Prüf}}$ fließen würde:

$$I_{\text{CUT}} = |I_{\text{CUT}}| = T(f) \cdot E_{\text{Prüf}} \quad (2.3)$$

Die Systemprüfung erfolgt dann durch Stromeinspeisung in den Kabelbaum. Der hierbei im Kabelbaum fließende Strom wird erneut gemessen und für die Überprüfung der Schleifenimpedanz des zu prüfenden Systems herangezogen.

Es ist zu beachten, dass die Anwendung der Störfestigkeitsprüfung mit LLSC/BCI Linearität bezüglich der Aussteuerung voraussetzt. Nichtlineares Verhalten des Systems muss ggf. durch zusätzliche Sicherheitszuschläge bei der Prüfung berücksichtigt werden.

Nach Aussage von Carter treten bei der Einkopplung leitungsgeführter Störgrößen bereits oberhalb von 200 MHz erhebliche Unsicherheiten auf. Hierbei wirken sich insbesondere Änderungen der Position der Stromeinspeisung stark auf das Prüfergebnis aus. Oberhalb von 400 MHz sollten deshalb Störfestigkeitsprüfungen nicht mit Stromeinspeisung sondern ausschließlich mit Feldeinstrahlung durchgeführt werden, da hiermit genauere Ergebnisse erzielt werden [12].

Werner [89] beschreibt einen Vergleichstest der Störfestigkeitsprüfungen mit LLSC/BCI und Feldeinstrahlung (High Level Field Test / HERF) bei Kampfflugzeugen im Frequenzbereich 5...30 MHz. Er stellt fest, dass Einstrahlungsprüfungen grundsätzlich auch in diesem Frequenzbereich die präziseren und zuverlässigeren Störfestigkeitswerte liefern als Systemprüfungen mit LLSC/BCI. Die ermittelten Störfestigkeitswerte liegen bei LLSC/BCI deutlich höher als bei HERF.

Den Einsatz der Stromeinspeisung als zusätzliches alternatives Verfahren bei der Fahrzeugprüfung und Fahrzeugkomponentenprüfung für den Frequenzbereich 10...400 MHz beschreibt **Bates** [6]. Die Störeinkopplung erfolgt in den gesamten Kabelbaum bzw. einzelne Signalleitungen mit Hilfe einer Stromeinspeisung im Abstand 100 mm vom Prüfling entweder bei der Systemprüfung im Fahrzeug oder bei der Komponentenprüfung im Laboraufbau. Hierbei wird die Vorlaufleistung gemessen, die erforderlich ist, um eine Fehlfunktion des Prüflings hervorzurufen. Daraus ergibt sich jeweils ein frequenzabhängiges Störfestigkeitsprofil des Prüflings.

Der in den Kabelbaum eingekoppelte Strom kann auf zwei unterschiedliche Weisen angegeben werden:

- a) Mit Hilfe einer Strommesszange im Abstand 50 mm vom Prüfling wird der Strom im Kabelbaum (Stromsumme) direkt gemessen.
- b) Aus der gemessenen Vorlaufleistung wird ein äquivalenter Strom indirekt bestimmt. Hierzu wird durch eine vorangegangene Kalibrierung der Stromeinspeisetzange der Zusammenhang zwischen der Vorlaufleistung und dem in der Kalibriereinrichtung fließenden Strom ermittelt.

Zur Bestimmung des Sicherheitsabstandes zwischen dem bei der Komponentenprüfung ermittelten Störfestigkeitsprofil des Prüflings und den Störfestigkeitsanforderungen für das Fahrzeug wird außerdem das 'Bulk Current Absorption Spectrum' (BCAS) gemessen. Es handelt sich dabei lediglich um eine andere Bezeichnung für die Bestimmung der Transferfunktion mittels LLSC.

Die Feldeinstrahlung am gesamten Fahrzeug erfolgt mit geringer Feldstärke (hier: 5 V/m). Der im Kabelbaum fließende Strom wird gemessen. Hierbei werden Einflüsse durch die Schirmwirkung der Karosserie mit erfasst. Durch lineare Umrechnung kann frequenzabhängig der Strom angegeben werden, der bei höherer Prüffeldstärke (z.B. 100 V/m) im Kabelbaum fließen würde.

Aus dem Vergleich des Störfestigkeitsprofils der Komponentenprüfung mit dem frequenzabhängigen Strompegel bei Feldeinstrahlung mit Prüffeldstärke ergibt sich dann der Sicherheitsabstand zwischen Komponenten- und Fahrzeugprüfung.

Eine gute Korrelation zwischen Fahrzeugprüfung und Komponentenprüfung stellt Bates in Bezug auf gleiche störempfindliche Frequenzbereiche fest. Oberhalb von 200 MHz sind die Abweichungen zwischen beiden Prüfungen kleiner als 6 dB. Die Ursache für Abweichungen von 6...10 dB zwischen der Fahrzeug- und der Komponentenprüfung unterhalb von 200 MHz wird vermutet in der eingefügten Impedanz im Kabelbaum durch die Stromeinspeisetzange. Um Abweichungen zu reduzieren, sollte bei der Komponentenprüfung möglichst der gleiche Kabelbaum verwendet werden, der auch im Fahrzeug montiert ist.

Lever [55][56] beschreibt Störfestigkeitsprüfungen mit Stromeinspeisung sowohl im Fahrzeug als auch in unterschiedlichen Laboraufbauten im Frequenzbereich 20...400 MHz. Hierbei wird eine Wiederholstandardabweichung von 1 dB erreicht. Ein Vergleich der Prüfergebnisse von Komponentenprüfungen mit Stromeinspeisung im Laboraufbau, Feldeinstrahlungen am Fahrzeug sowie Stromeinspeisung am Fahrzeug zeigt auch hier eine Übereinstimmung der Frequenzbereiche, in denen Prüflingsreaktionen auftreten.

In mehreren Arbeiten beschäftigen sich **Lever, Ball und Jennings** [4][48] [49][50] mit Möglichkeiten, die Unsicherheiten bei der Korrelation von Störfestigkeitsprüfungen elektronischer Komponenten im Laboraufbau (Komponentenprüfung) und der Prüfung des gesamten Fahrzeugs mit Feldeinstrahlung (Systemprüfung für Freigabe des Fahrzeugs, Typprüfung, sign-off-test) zu reduzieren. Das Ziel ist, die Stromeinspeisung auch als zuverlässiges und kostengünstiges Systemprüfverfahren im Vorfeld von Einstrahlungsprüfungen in der Absorberhalle einzusetzen.

Die Untersuchungen beschränken sich hierbei auf den Frequenzbereich 10...400 MHz, da nach Aussage der Verfasser nur dieser Bereich bezüglich der Störfestigkeit gegen leitungsgeführte Störgrößen von Bedeutung ist.

Zunächst werden hierzu die Transferfunktionen an Fahrzeugen mit unterschiedlichen Abmessungen sowie unterschiedlichen Ausstattungen an elektronischen Komponenten und Kabelbäumen bestimmt. Es ergeben sich hierbei individuell sehr unterschiedliche Transferfunktionen. Signifikante Unterschiede der Transferfunktionen treten sogar bei nominal identischen Fahrzeugen auf.

Um den gesamten Prüfaufwand zu reduzieren, ist daher eine globale Betrachtung durch Auswertung einer Vielzahl von Transferfunktionen gleicher oder ähnlicher Fahrzeuge erforderlich.

Die traditionelle Methode hierzu ist der 'Worst-Case'-Ansatz. Hierbei wird die Hüllkurve $T(f)$ über alle betrachteten Transferfunktionen $T_i(f)$ gebildet:

$$T(f) = \max_i(T_i(f)) \quad (2.4)$$

Häufig wird ein zusätzlicher Sicherheitszuschlag angesetzt, der auch die Einflüsse durch unterschiedliche Randbedingungen sowie nichtlineares Verhalten berücksichtigen soll.

Mit Hilfe der Transferfunktion lässt sich der maximal auftretende Strom im Kabelbaum für eine vorgegebene Prüffeldstärke angeben. Die Störfestigkeit der prüfenden Komponente ist dann sichergestellt, wenn dieser Strom bei Stromeinspeisung im Kabelbaum fließt, ohne dass eine Prüflingsreaktion auftritt.

Bei dieser Vorgehensweise wird allerdings die Mehrzahl der zu prüfenden Komponenten weit übertestet. Hieraus können kostspielige Maßnahmen resultieren, die für das tatsächliche Störfestigkeitsverhalten einer einzelnen Komponente möglicherweise unnötig sind.

Deshalb erfolgt durch Lever, Ball und Jennings eine statistische Betrachtung, bei der mehrere Transferfunktion zusammengefasst betrachtet werden. Bei jedem Frequenzwert wird der Mittelwert dieser Transferfunktionen sowie die Abweichung jeder Transferfunktion vom Mittelwert bestimmt. Anschließend erfolgt eine Diskretisierung durch Bildung von Abweichungsintervallen, z.B. in 0,5 dB-Schritten. Daraus ergibt sich frequenzabhängig die Wahrscheinlichkeit $P(T_1 \leq T_i < T_2)$, dass eine Transferfunktion T_i einen Wert im Intervall $[T_1, T_2[$ annimmt. Aus der Verteilungsfunktion $F = P(T_i < T_2)$ lässt sich dann die Wahrscheinlichkeit dafür angeben, dass die Transferfunktion T_i Werte kleiner als T_2 annimmt.

Daraus resultiert der Wert für eine Transferfunktion $T(f) = T_0(f)$, der mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit P_0 nicht überschritten wird.

Für eine vorab im Laboraufbau mit Stromeinspeisung geprüfte, störfeste elektronische Komponente kann somit die Wahrscheinlichkeit dafür angegeben werden, dass diese auch bei der späteren Einstrahlungsprüfung am gesamten Fahrzeug keine Reaktion (Funktionsstörung) zeigt.

Oberjatzas [39][64][65] beschreibt die Anwendung der Stromeinspeisung (BCI) bei Prüfung elektronischer Komponenten von Nutzfahrzeugen. Um eine Prüflingsreaktion hervorzurufen, ist eine entsprechende Störleistung notwendig. Zur Festlegung der erforderlichen Prüfgrößen betrachtet Oberjatzas die maximale Leistung, die aus einem elektromagnetischen Feld in einen Kabelbaum eingekoppelt werden kann. Unter Berücksichtigung der Kabelbaumlänge (Fahrzeuglänge) und der damit verbundenen Resonanzfrequenz wird die verfügbare Störleistung am Prüfling abgeschätzt. Daraus ergibt sich frequenzabhängig die erforderliche Prüfleistung.

Bei Untersuchungen der Systemreaktionen mit Feldeinstrahlung (Fahrzeugmessung) und Prüfungen der Kfz-Komponenten mit Stromeinspeisung werden Korrelationen festgestellt. Die Anwendung der Stromeinspeisung zeigt im Frequenzbereich 1...400 MHz eine 'Wiederholgenauigkeit' von 1...2 dB. Unsicherheiten bei der Position der Stromeinspeisezange im Bereich ± 5 cm werden als unkritisch für das Prüfergebnis angesehen. Die Untersuchungen von Oberjatzas zeigen eine gute Reproduzierbarkeit der Stromeinspeisung auch im Frequenzbereich bis 1000 MHz [66].

2.3 Einflussgrößen

Die Prüfbedingungen bei Störfestigkeitsprüfungen mit Stromeinspeisung können sich ändern durch die Eigenschaften des Prüfaufbaus, der Prüfeinrichtung, der Prüfumgebung, der Prüfstörgröße sowie des Prüfablaufes. Hierbei auftretende Einflussgrößen werden für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zusammengestellt und erläutert.

Prüfaufbau

Bei Komponentenprüfungen mit Stromeinspeisung besteht das zu prüfende System aus der elektronischen Komponente (Prüfling, EUT), einem mehradrigen Kabelbaum (CUT) sowie einem oder mehreren Zusatzgeräten (AE). Die Stromeinspeisung und ggf. eine Strommesszange sind prüflingsnah um den Kabelbaum montiert. Die Anordnung befindet sich über einer Massefläche innerhalb eines geschirmten Raumes (siehe Bild 2.4).

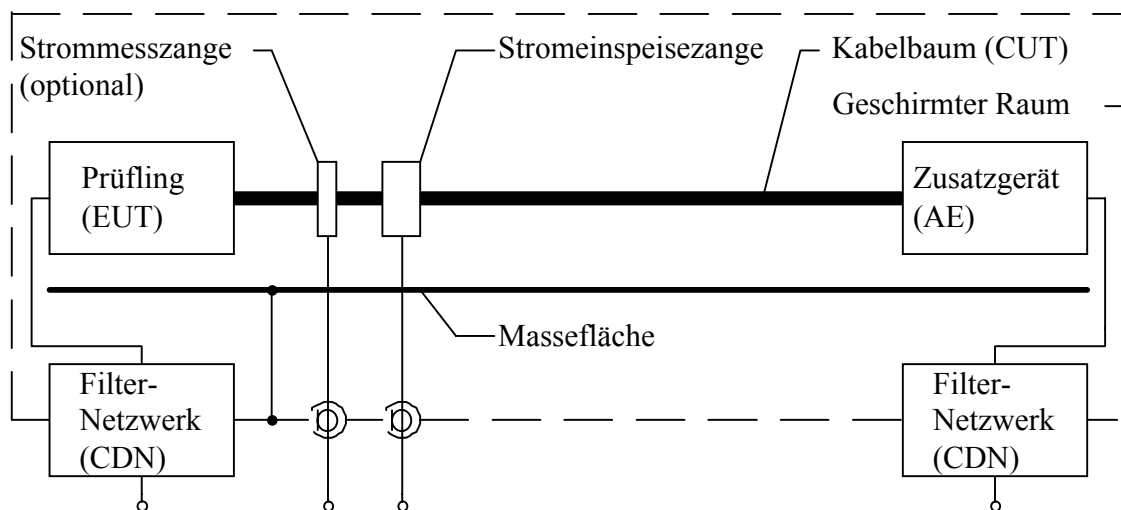


Bild 2.4: Prüfaufbau bei Komponentenprüfungen mit Stromeinspeisung

Prüfling und Zusatzgerät(e) sind jeweils über ein Filternetzwerk (CDN) mit der Prüfeinrichtung verbunden. Der Kabelbaum stellt ein elektromagnetisch gekoppeltes Mehrleitersystem dar. Dessen komplexen Wellenwiderstände und Ausbreitungskonstanten hängen von den geometrischen und elektrischen Eigenschaften ab [86].

Einflussgrößen hierbei sind:

- Anzahl der Adern des Kabelbaumes
- Anordnung der Adern, Abstand der Adern voneinander
- Leiter- und Isolationsdurchmesser der Adern

- Leitfähigkeit, Permittivität und Permeabilität der Leiter und Isolation
- Abstand des Kabelbaumes (bzw. der einzelnen Adern) von der Massefläche
- Verzweigungen und Knicke des Kabelbaumes

Bei der Stromeinspeisung breiten sich die Störgrößen vom Ort der Einkopplung (Position der Stromeinspeisezange) wellenförmig entlang der einzelnen Adern des Kabelbaumes aus. Die dabei an den Eingängen des Prüflings auftretenden Ströme und Spannungen hängen ab von den Abschlussverhältnissen an den Leitungsenden, d.h.:

- Eingangsimpedanz von Prüfling und Zusatzgerät
- Masseverbindung von Prüfling und Zusatzgerät (Impedanz zwischen Gerätemasse und Massefläche)

Weitere wichtige Einflussgrößen sind:

- Länge der einzelnen Adern des Kabelbaumes
- Abstand der Stromeinspeisezange vom Prüfling
- Abstand der Strommesszange vom Prüfling (bei Verwendung einer Strommesszange)
- Masseverbindung der Stromzangen (Galvanische Verbindung der Stromzangen mit der Massefläche)

Prüfeinrichtung

Unter dem Begriff 'Prüfeinrichtung' werden alle für die Stromeinspeisung verwendeten Mess- und Prüfgeräte (Hardware) zusammengefasst. Hierzu zählen Prüfgeneratoren, Richtkoppler, Dämpfungsglieder, Kabel, Leistungsmessgeräte, Spektrum-Analysatoren, Stromeinspeise- und Strommesszangen, Netznachbildungen, Ankoppel- und Filternetzwerke sowie Geräte zur Überwachung des Betriebsverhaltens des Prüflings. Bei der Messung bzw. Prüfung müssen die

- Unsicherheiten dieser Geräte

berücksichtigt werden. Insbesondere sind auch Beeinflussungen der Messwerte für die Vorlauf- bzw. Rücklaufleistung durch

- Oberwellen des Prüfgenerators
- Nichtlineares Verhalten in Verbindung mit der Stromeinspeisezange

zu beachten. Eine Unsicherheitsbetrachtung der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Prüfeinrichtung erfolgt in Kapitel 4.7.

Die Einrichtung zur Kalibrierung der Stromzangen und Einstellung der Prüfpegel ist ebenfalls Teil der Prüfeinrichtung. Hierbei ergeben sich Einflüsse durch

- Aufbau (Konstruktion) und Abmessungen der Kalibrierhalter

Prüfumgebung

Klimatische Faktoren wie

- Umgebungstemperatur
- Relative Luftfeuchtigkeit

können zu Änderungen der internen Störfestigkeit des Prüflings sowie zu erhöhten Messunsicherheiten der Prüfeinrichtung für Erzeugung und Messung der Prüfstörgrößen führen.

Einflussgrößen der Prüfumgebung werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Bei allen durchgeführten Untersuchungen beträgt die Umgebungstemperatur $21 \pm 3 \text{ °C}$ und die relative Luftfeuchtigkeit 30...70 %.

Prüfstörgröße

Bei der Prüfung sollen die gleichen Voraussetzungen für das Zustandekommen von Fehlfunktionen des Prüflings gegeben sein wie bei bestimmungsgemäßem Betrieb. Es müssen daher solche Prüfstörgrößen verwendet werden, die unterschiedliche Eigenschaften der im Betrieb zu erwartenden Störgrößen nachbilden.

- Art der Prüfstörgröße

Störfestigkeitsprüfungen erfolgen u.a. mit monofrequenten Prüfstörgrößen (CW), unterschiedlichen Modulationsarten (z.B. AM, FM, Pulsmodulation) sowie transienten Prüfstörgrößen (z.B. Impulsen, Spikes, Bursts). Bei Prüfungen mit Stromeinspeisung werden üblicherweise CW- und AM-Störgrößen verwendet. Aufgrund des unterschiedlichen zeitlichen Verlaufes der Prüfstörgrößen bzw. ihrer spektralen Verteilung können sich hierbei grundsätzlich unterschiedliche Prüfergebnisse ergeben.

- Gegentakt- und Gleichtaktstörgrößen

Gegentaktstörgrößen (symmetrische Störgrößen, differential mode, odd mode) treten zwischen den Hin- und Rückleitern von Stromkreisen zwischen den Eingängen auf. Sie liegen somit in Reihe mit den Nutzsignalen und können Funktionsstörungen und Fehlfunktionen bewirken.

Gleichtaktstörgrößen (unsymmetrische Störgrößen, common mode, even mode) haben ihre Ursache in Störquellen zwischen einzelnen Signaladern des Kabelbaumes und der Bezugsmasse. Dadurch werden gleichsinnige Ströme durch die einzelnen Adern getrieben, die über Impedanzen gegen Masse abfließen. In symmetrisch betriebenen Stromkreisen (identische Impedanzen der Prüflingseingänge an den einzelnen Adern) sind diese Ströme in allen Adern gleich groß, so dass keine Störspannungen zwischen den einzelnen Prüflingseingängen auftreten.

Bei ungleichen Impedanzen treiben Gleichtaktspannungen jedoch unterschiedliche Ströme durch die einzelnen Adern, so dass unterschiedliche Spannungen an den Prüflingseingängen sowohl gegenüber Masse als auch zwischen den einzelnen Prüflingseingängen hervorgerufen werden.

Die Gleichtaktspannungen werden dabei ganz oder teilweise in Gegentaktspannungen umgewandelt (Gleichtakt-Gegentakt-Konversion).

Prüfablauf

Bei der Durchführung der Prüfung (Prüfablauf) ergeben sich folgende Einflussgrößen:

- Frequenzbereich

Der in den unterschiedlichen Normen für die Stromeinspeisung (siehe Kapitel 3) genannte Frequenzbereich variiert zwischen 10 kHz und 400 MHz.

- Schrittweite

Die Schrittweite bei Prüfungen mit diskreten Frequenzschritten muss so festgelegt sein, dass Resonanzstellen mit großen Änderungen des Störfestigkeitsverhaltens über der Frequenz erfasst werden.

- Prüfdauer

Nach Beginn der Beaufschlagung des Prüflings mit der Prüfstörgröße benötigt der Prüfling eine bestimmte Zeitspanne, um reagieren zu können. Eine Funktionsstörung oder Fehlfunktion des Prüflings kann erst nach Ablauf dieser Zeitspanne auftreten. Das Prüfergebnis kann deshalb von der Dauer der Beaufschlagung (Prüfdauer) abhängen, insbesondere wenn die Prüfdauer (Verweilzeit) kürzer ist als die Reaktionszeit des Prüflings.

Als Prüfdauer wird in den Normen daher mindestens die Zeit gefordert, die der Prüfling für eine Reaktion benötigt, z.B. nach Herstellerangaben.

- Referenzparameter für die Einstellung des Prüfpegels

Die Einstellung des Prüfpegels (Amplitude der Prüfstörgröße) bei Störfestigkeitsprüfungen mit Stromeinspeisung erfolgt so, dass ein Referenzparameter in Bezug auf die Kalibrierung konstant gehalten wird. Dieser kann entweder die Vorlaufleistung an der Stromeinspeisung, die Nettoleistung oder die Pegelstellung des Prüfgenerators sein. Das Prüfergebnis wird damit auch durch den jeweiligen Referenzparameter beeinflusst.

2.4 Übertragungseigenschaften der Stromzangen

Zur Einkopplung der Störgrößen in einen Kabelbaum und zur Messung der darin fließenden Ströme sind Stromzangen erforderlich, die unterschiedliche konstruktive und elektrische Eigenschaften aufweisen. Aufgrund der jeweiligen Einsatzbereiche ist eine getrennte Betrachtung für Stromeinspeisungen und Strommesszangen sinnvoll.

2.4.1 Stromeinspeisung

Die Störgrößeneinkopplung mit einer Stromeinspeisung kann durch die Ersatzschaltung nach Bild 2.5 beschrieben werden.

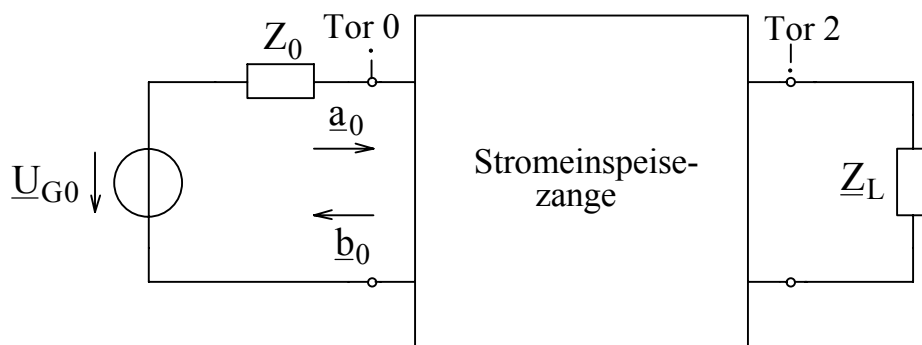


Bild 2.5: Störgrößeneinkopplung an einer Stromeinspeisung

Der angepasst betriebene Prüfgenerator (Innenwiderstand ist gleich dem Bezugswiderstand Z_0) mit der Quellenspannung \underline{U}_{G0} erzeugt eine in Richtung zur Stromeinspeisung vorlaufende Welle \underline{a}_0 :

$$\underline{a}_0 = \frac{\underline{U}_{G0}}{2 \cdot \sqrt{Z_0}} \quad (2.5)$$

Die durch den Generator maximal abgebbare Wirkleistung $P_{0,\max}$ ist halb so groß wie die verfügbare Wirkleistung der Quelle P_{G0} :

$$P_{0,\max} = \frac{1}{2} \cdot \underline{a}_0 \cdot \underline{a}_0^* = \frac{1}{2} \cdot |\underline{a}_0|^2 = \frac{1}{2} \cdot P_{G0} \quad (2.6)$$

Diese Wirkleistung wird der Stromeinspeisung zugeführt und als Vorlaufleistung P_{Vor} bezeichnet:

$$P_{\text{Vor}} = P_{0,\max} \quad (2.7)$$

Bei Fehlanpassung der Stromeinspeisung am Tor 0 (Eingangsimpedanz der Stromeinspeisung $\underline{Z}_{\text{Ein},0} \neq Z_0$) wird die vorlaufende Welle teilweise reflektiert, wobei sich eine zum Prüfgenerator rücklaufende Welle \underline{b}_0 mit der Leistung $P_{\text{Rück}}$ (Rücklaufleistung) ergibt:

$$P_{\text{Rück}} = \frac{1}{2} \cdot \underline{b}_0 \cdot \underline{b}_0^* = \frac{1}{2} \cdot |\underline{b}_0|^2 \quad (2.8)$$

Der Eingangsreflexionsfaktor $\underline{\rho}_0$ gibt das Verhältnis zwischen rück- und vorlaufender Welle am Eingang der Stromeinspeisung an:

$$\underline{\rho}_0 = \frac{\underline{b}_0}{\underline{a}_0} = \frac{\underline{Z}_{\text{Ein},0} - Z_0}{\underline{Z}_{\text{Ein},0} + Z_0} \quad \text{bzw.} \quad \underline{Z}_{\text{Ein},0} = Z_0 \cdot \frac{1 - \underline{\rho}_0}{1 + \underline{\rho}_0} \quad (2.9)$$

Für das Stehwellenverhältnis s ergibt sich:

$$s = \frac{1 + |\underline{\rho}_0|}{1 - |\underline{\rho}_0|} \quad \text{bzw.} \quad |\underline{\rho}_0| = \frac{s - 1}{s + 1} \quad (2.10)$$

Daraus folgt:

$$P_{\text{Vor}} = \frac{|\underline{U}_{G0}|^2}{8 \cdot Z_0} = \frac{(U_{G0,\text{eff}})^2}{4 \cdot Z_0} \quad (2.11)$$

$$P_{\text{Rück}} = |\underline{\rho}_0|^2 \cdot P_{\text{Vor}} \quad (2.12)$$

Die Differenz der Leistungen von vor- und rücklaufender Welle wird als Nettoleistung P_{Netto} bezeichnet:

$$P_{\text{Netto}} = P_{\text{Vor}} - P_{\text{Rück}} = P_{\text{Vor}} \cdot \left(1 - |\underline{\rho}_0|^2\right) \quad (2.13)$$

Sie umfasst sowohl die Absorptionsverluste der Stromeinspeisezange als auch die sekundärseitig umgesetzte Wirkleistung. In der Literatur [46][51][59] wird die Nettoleistung auch als 'absorbierte Leistung', 'Nutzleistung', 'eingespeiste Leistung' bzw. 'total power' bezeichnet.

Die Übertragungseigenschaft einer Stromeinspeisezange wird vom Hersteller angegeben durch die Einfügungsdämpfung a_E . Diese beschreibt das Verhältnis von der Leistung, die der Generator ohne Zwischenschaltung der Zange direkt an einen Verbraucher abgeben würde, zu derjenigen Leistung, die tatsächlich durch die Zange an den Verbraucher gelangt ist.

Die Einfügungsdämpfung wird in einer Kalibriereinrichtung (siehe Kapitel 2.5 und 4.3.3) durch Messung der Vorlaufleistung P_{Vor} und der von einem Verbraucher $Z_L = Z_0 = 50 \Omega$ aufgenommenen Wirkleistung P_{L0} ermittelt. Hierbei ist der Generator am Eingang der Zange (Tor 0) und der Verbraucher an einem koaxialen Anschluss des Kalibrierhalters (Tor 2) angeschlossen.

Es gilt:

$$\frac{a_E}{dB} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{Vor}}{P_{L0}} \right) \quad (2.14)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die Angaben der Einfügungsdämpfung generell auch die Übertragungseigenschaften der jeweils verwendeten Kalibriereinrichtung umfassen. Bei Abschluss des Kalibrierhalters beidseitig mit der Lastimpedanz Z_L beträgt die Schleifenimpedanz $2 \cdot Z_L$. Nach Millanta [60] und EATON [87] würde eine ideale Stromeinspeisezange (keine Absorptionsverluste, reflexionsfreie Anpassung) bei $Z_L = Z_0 = 50 \Omega$ theoretisch eine Einfügungsdämpfung von 3 dB aufweisen.

Die Kalibriereinrichtung mit einer Schleifenimpedanz von 100Ω bedingt jedoch generell - auch bei verlustloser Stromeinspeisezange - Reflexionen am Eingang der Zange (Tor 0). In diesem Fall beträgt der Eingangsreflexionsfaktor $|r_1| = 1/3$. Dort würde also 11 % der vorlaufenden Leistung reflektiert und nur 44,5 % der Leistung zum Verbraucher $Z_L = Z_0 = 50 \Omega$ (Tor 2) transmittiert. Die Einfügungsdämpfung einer Stromeinspeisezange bei Kalibrierung in einer Anordnung mit einer Schleifenimpedanz von 100Ω beträgt somit mindestens 3,5 dB.

Handelsübliche Stromeinspeisezangen weisen bei Kalibrierung mit einer Schleifenimpedanz von 100Ω minimale Einfügungsdämpfungen von ca. 4 dB auf.

In einigen Normen (siehe Kapitel 3) wird die Kalibrierung der Strom-einspeisungen bei einer Schleifenimpedanz von $2 \cdot \underline{Z}_L = 300 \Omega$ vorgeschrieben. Die hierbei ermittelten Einfügungsdämpfungen betragen somit auch im Idealfall verlustloser Zangen mindestens 10,9 dB.

Die Werte der Einfügungsdämpfung sind nur zusammen mit den quell- und lastseitigen Impedanzverhältnissen der Kalibriereinrichtung interpretierbar und nicht allgemein gültig (siehe auch [59]). Daher besteht i. Allg. keine Möglichkeit, die bei einer bestimmten Schleifenimpedanz ermittelte Einfügungsdämpfung auf andere Werte der Schleifenimpedanz zu übertragen.

2.4.2 Strommesszange

Die Übertragungseigenschaft einer Strommesszange kann nach Millanta [60] und Smith [79] vereinfacht durch die Ersatzschaltung in Bild 2.6 beschrieben werden. Hierbei wird die Rückwirkung durch das an die Strommesszange angeschlossene Messgerät auf den zu messenden Strom $\underline{I}_{\text{CUT}}$ zunächst nicht berücksichtigt.

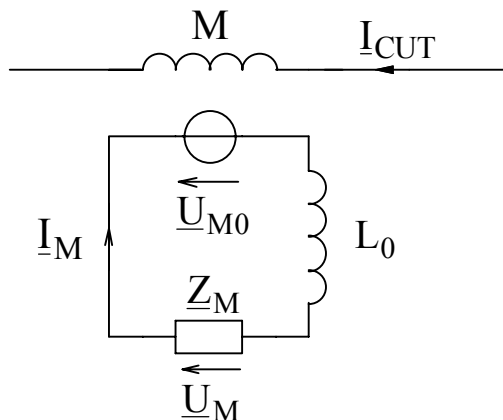


Bild 2.6: Ersatzschaltbild einer Strommesszange

Der zu messende Strom $\underline{I}_{\text{CUT}}$ im Leiter (Primärseite) verursacht am Ausgang der Strommesszange (Sekundärseite) die Leerlaufspannung \underline{U}_{M0} :

$$\underline{U}_{M0} = j\omega M \cdot \underline{I}_{\text{CUT}} \quad (2.15)$$

mit der Gegeninduktivität M zwischen der Wicklung der Stromzange und dem Leiter (Berechnung siehe Anhang A1):

$$M = \frac{\mu_0 \cdot \tilde{\mu}_r}{2\pi} \cdot N \cdot b_K \cdot \ln \left(\frac{D_a}{D_i} \right) \quad (2.16)$$

Hierbei sind die Breite b_K , der Außendurchmesser D_a , der Innendurchmesser D_i sowie die effektive relative Permeabilität $\tilde{\mu}_r$ des permeablen Kerns sowie die Windungszahl N der Strommesszange zu berücksichtigen.

Bei Belastung der Strommesszange mit der Impedanz \underline{Z}_M (Eingangsimpedanz des Messgerätes) ergibt sich an der Strommesszange die Klemmenspannung \underline{U}_M :

$$\underline{U}_M = \underline{U}_{M0} \cdot \frac{\underline{Z}_M}{\underline{Z}_M + j\omega L_0} = \underline{I}_M \cdot \underline{Z}_M \quad (2.17)$$

Hierbei beträgt die Induktivität L_0 der Wicklung (Sekundärseite):

$$L_0 = \frac{\mu_0 \cdot \tilde{\mu}_r}{2\pi} \cdot N^2 \cdot b_K \cdot \ln \left(\frac{D_a}{D_i} \right) \quad (2.18)$$

Aus den Gln. (2.16) und (2.18) ergibt sich:

$$\frac{L_0}{M} = N \quad (2.19)$$

Der Quotient aus dem Betrag der Klemmenspannung $|\underline{U}_M|$ und dem Betrag des Stromes $|\underline{I}_{CUT}|$ wird als Transferimpedanz Z_T bezeichnet. Die Transferimpedanz ist ein Maß für die Empfindlichkeit der Strommessschaltung für zu messende Ströme. Sie wird durch eine Kalibrierung (siehe Kapitel 4.3.4) ermittelt.

$$Z_T = \frac{|\underline{U}_M|}{|\underline{I}_{CUT}|} \quad (2.20)$$

Bei Angaben der Transferimpedanz z.B. in Datenblättern der Hersteller ist die Impedanz \underline{Z}_M des bei der Kalibrierung verwendeten Messgerätes zu beachten. Üblicherweise erfolgt die Kalibrierung mit $\underline{Z}_M = Z_0 = 50 \Omega$, so dass sich mit den Gln. (2.15), (2.17) und (2.20) ergibt:

$$Z_T = \left| \frac{j\omega M Z_0}{Z_0 + j\omega L_0} \right| = \frac{\omega M Z_0}{\sqrt{(Z_0)^2 + (\omega L_0)^2}} \quad (2.21)$$

Die Transferimpedanz zeigt somit das Übertragungsverhalten eines Hochpasses entsprechend Bild 2.7 mit der Eckfrequenz (3 dB) f_g :

$$f_g = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Z_0}{L_0} \quad (2.22)$$

Die Transferimpedanz ist proportional zur Frequenz f für $f \ll f_g$, d.h. für $\omega L_0 \ll Z_0$:

$$Z_T = 2\pi f \cdot M \quad (2.23)$$

Für $f \gg f_g$ ist die Transferimpedanz dagegen frequenzunabhängig:

$$Z_T = Z_{T,\max} = \frac{M}{L_0} \cdot Z_0 = \frac{1}{N} \cdot Z_0 \quad (2.24)$$

Breitbandige Messungen erfordern eine möglichst frequenzunabhängige Übertragungsfunktion, d.h. konstante Transferimpedanz im gesamten zu untersuchenden Frequenzbereich. Strommesszangen werden deshalb vorwiegend oberhalb von f_g betrieben.

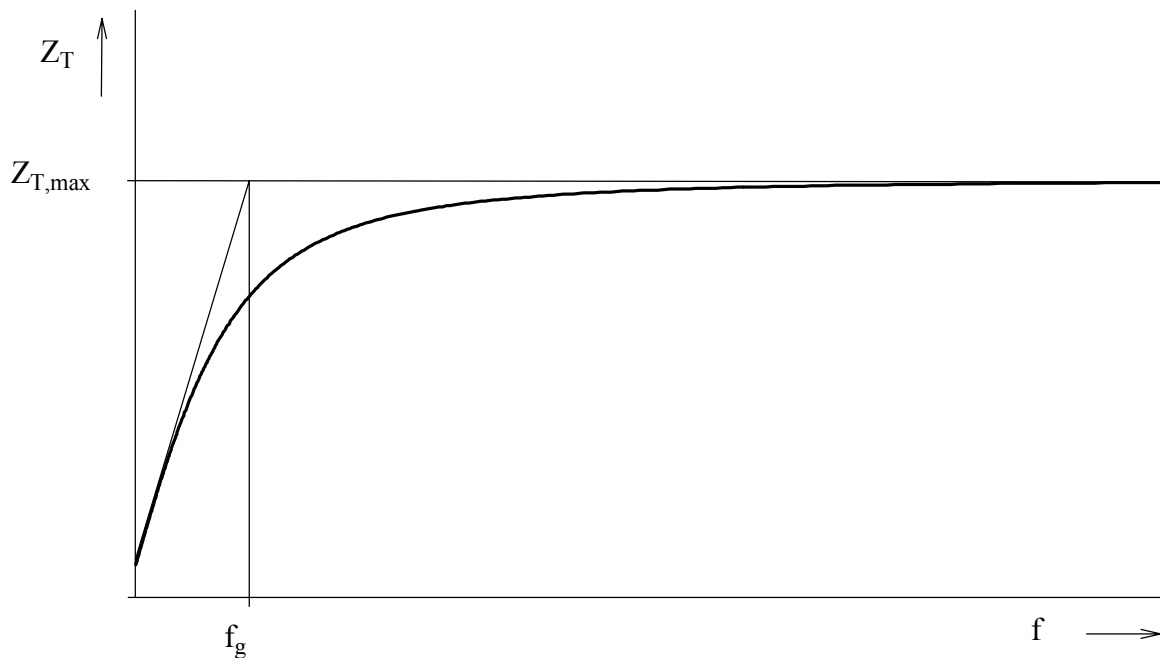


Bild 2.7: Frequenzgang der Transferimpedanz vereinfachte Darstellung nach Gl. (2.21)

Die Strommessung kann somit auf die Messung der Spannung $|\underline{U}_M|$ zurückgeführt werden:

$$|I_{\text{CUT}}| = \frac{1}{Z_T} \cdot |\underline{U}_M| \quad (2.25)$$

Die Messung kleiner Ströme erfordert eine hohe Empfindlichkeit der Strommessschaltung. Hierfür kommen Strommesszangen mit entsprechend

großer Transferimpedanz und somit kleiner Windungszahl N zum Einsatz. Auch Stromeinspeisungen sind aufgrund ihrer hohen Transferimpedanz - bis zu $34 \text{ dB}(\Omega)$ bzw. 50Ω - zur Strommessung geeignet. Dagegen erfordert die Messung großer Ströme Strommesszangen mit entsprechend kleiner Transferimpedanz, d.h. großer sekundärseitiger Windungszahl.

Handelsübliche Strommesszangen zur Messung hochfrequenter Ströme haben Transferimpedanzen im Bereich $0,05 \dots 25 \Omega$.

Während Stromeinspeisungen auch als Messzangen mit großer Transferimpedanz eingesetzt werden können, ist umgekehrt die Verwendung von Strommesszangen zur Stromeinspeisung aus konstruktiven Gründen (niedrigere Belastbarkeit) nicht möglich.

Die hier verwendeten Strommesszangen sind prinzipiell Übertrager mit Bandpassverhalten. Im Gegensatz hierzu arbeiten im Niederfrequenz-Bereich verwendete Stromwandler als Transformatoren mit kurzgeschlossener Sekundärwicklung. Letztere dürfen nicht mit geöffnetem Sekundärkreis betrieben werden, weil die dabei auftretende hohe Magnetisierungsdurchflutung zu einer Sättigung des Eisens, Verzerrung des Magnetisierungsstromes und damit verbundenen Spannungsspitzen im Sekundärkreis führt.

Im Kabelbaum fließen i. Allg. Betriebsströme (Gleichströme und niederfrequente Wechselströme), denen die hochfrequenten Störgrößen überlagert sind. Sie können das permeable Kernmaterial der Strommesszangen vormagnetisieren und dessen Sättigung hervorrufen. Hierdurch wird die Permeabilität des Kernmaterials reduziert. Dadurch ändern sich die Transferimpedanz Z_T und die untere Eckfrequenz f_g mit der Induktivität L_0 nach den Gln. (2.18), (2.21) und (2.22). Beim Einsatz der Strommesszangen sind deshalb unbedingt die Herstellerangaben zur Strombelastung einzuhalten. Dieses gilt auch dann, wenn der Frequenzbereich der Betriebsströme außerhalb des eigentlichen Messfrequenzbereiches der Zange liegt.

Das Einbringen einer Strommesszange um den Leiter (Kabelbaum / Conductor Under Test / CUT) führt zu Änderungen der Impedanzverhältnisse im Stromkreis und damit zu Rückwirkungen auf den zu messenden Strom I_{CUT} . Hierbei wirkt sich die durch die Zange im Leiter hervorgerufene Einfügeimpedanz Z_E sowie die kapazitive Kopplung zwischen der Zange und dem Leiter aus.

Die Einfügeimpedanz Z_E liegt in Serie mit den Impedanzen Z_{EUT} und Z_{AE} (siehe Bild 2.8). Letztere stellen die am Ort der Strommesszange wirksamen, entsprechend über den Leiter transformierten Eingangsimpedanzen von Prüfling

und Zusatzgerät dar. Die Spannungsquelle \underline{U}_0 beschreibt hierbei die Generatorwirkung der Stromeinspeisung im Leiter. Die Beeinflussung durch die Strommesszange ist daher insbesondere bei niedrigen Impedanzen im Stromkreis zu beachten.

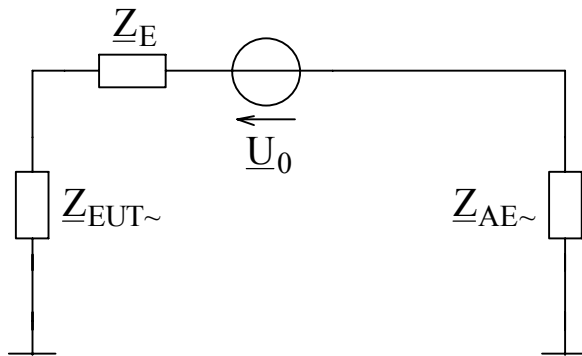


Bild 2.8: Einfügeimpedanz einer Strommesszange im Leiter (CUT)

Die Einfügeimpedanz \underline{Z}_E ergibt sich nach [60] (siehe Anhang A2) mit $\underline{Z}_M = Z_0$ zu:

$$\underline{Z}_E = \frac{1}{N^2} \cdot \frac{Z_0 \cdot j\omega L_0}{Z_0 + j\omega L_0} - j\omega \frac{L'}{N^2} \quad (2.26)$$

mit

$$\frac{L'}{N^2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot b_K \cdot \ln\left(\frac{D_a}{D_i}\right) \quad (2.27)$$

Zur Reduzierung der Einkopplung äußerer elektrischer Felder sind die Windungen der Strommesszange durch ein metallisches (nicht-permeables) Gehäuse abgeschirmt.

Parasitäre Kapazitäten von einigen pF sind wirksam zwischen dem Leiter (CUT) und dem Gehäuse der Strommesszange. Diese führen bei entsprechender Potentialdifferenz zwischen Leiter und Gehäuse insbesondere bei hohen Frequenzen zu einem zusätzlichen unerwünschten Strom (capacitive load). Das Gehäuse der Strommesszange wird daher möglichst direkt mit dem Bezugspotential (Masse) verbunden.

Auch zwischen dem Gehäuse und den Windungen der Strommesszange sind parasitäre Kapazitäten wirksam. Somit besteht eine kapazitive Kopplung zwischen dem Primärstromkreis (CUT) und dem Sekundärstromkreis (Messgerät) der Zange.

Beim Einsatz der Messzange ist darauf zu achten, dass der durch die kapazitive Kopplung im Sekundärstromkreis zusätzlich hervorgerufene Strom klein ist gegenüber dem Strom I_M . Hierzu wird die Klemmenspannung $|\underline{U}_M|$ bei unterschiedlichen Orientierungen der Strommesszange (um den Leiter montiert; senkrecht neben dem Leiter; parallel neben dem Leiter) gemessen. Eine analytische Beschreibung der kapazitiven Kopplung wird in der Literatur nicht angegeben.

Parasitäre Kapazitäten treten außerdem zwischen den einzelnen sekundären Windungen der Strommesszange auf. Der Einsatzbereich der Strommesszange wird daher auch zu hohen Frequenzen hin begrenzt. Nach Millanta [60] kann dieser Effekt im Ersatzschaltbild (Bild 2.6) näherungsweise durch eine zusätzliche Kapazität C parallel zur Wicklungsinduktivität L_0 berücksichtigt werden.

Dann ergibt sich die Transferimpedanz Z_T zu:

$$Z_T = \left| \frac{j\omega M}{1 - \omega^2 L_0 C - j\omega \frac{L_0}{Z_0}} \right| = \frac{\omega M}{\sqrt{\left(1 - \omega^2 L_0 C\right)^2 + \left(\omega \frac{L_0}{Z_0}\right)^2}} \quad (2.28)$$

Die obere Frequenzgrenze f_h (3 dB) lautet:

$$f_h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{Z_0 \cdot C} \quad (2.29)$$

2.5 Kalibriereinrichtung

Zur Bestimmung des Zusammenhanges zwischen den primär- und sekundärseitigen Größen - Vorlaufleistung und Strom bei Stromeinspeisungen bzw. Strom und Spannung bei Strommesszangen - sowie zur Einstellung des Prüfstromes werden die Stromzangen vor Beginn der Prüfung in einer entsprechenden Anordnung kalibriert [23][31][33][45].

Durch eine möglichst detaillierte Vorgabe der Kalibriereinrichtung und des Kalibrierverfahrens in Normen und Prüfvorschriften werden deshalb Wiederhol- und erweiterte Vergleichsbedingungen (siehe DIN 1319-1 [21]) festgelegt, um eine hohe Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse sicherzustellen. Die Unterschiede der systematischen Messabweichungen sollen hierdurch reduziert werden.

In den Normen wird zur Kalibrierung ein Kalibrierhalter (calibration jig / calibration fixture) nach Bild 2.9 vorgeschrieben, in dem die Stromzangen zentrisch montiert werden.

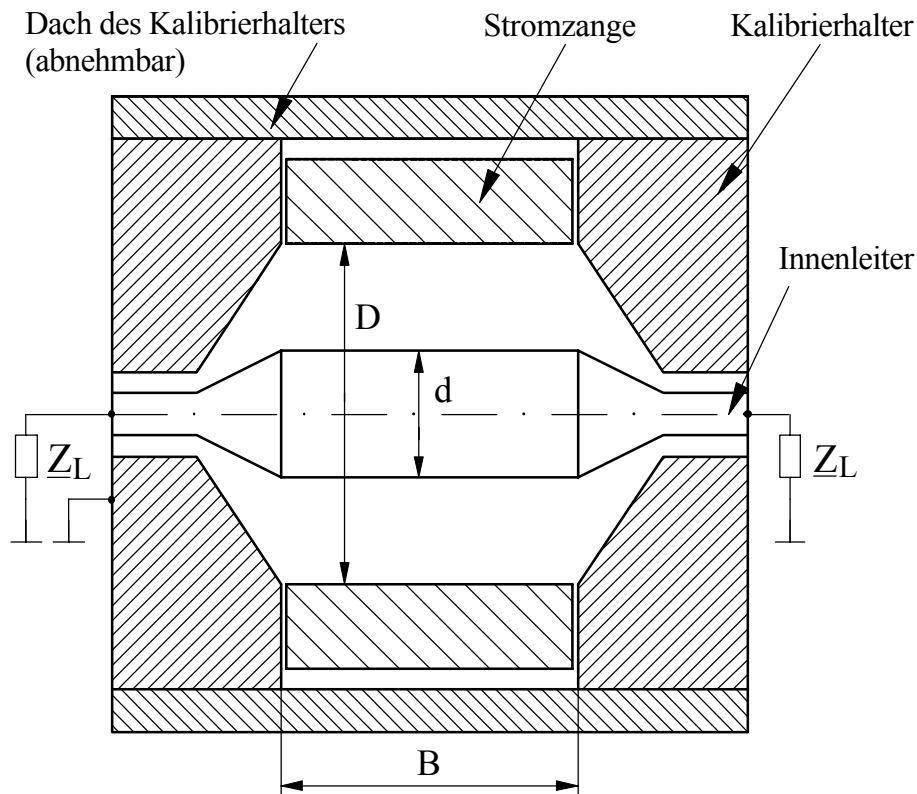


Bild 2.9: Prinzipdarstellung des Kalibrierhalters

Der Kalibrierhalter stellt einen aufgeweiteten Koaxialleiter (Innenraumbreite B) dar, wobei die Stromzange ein Teil des Außenleiters ist. Der Durchmesser d des Kalibrierhalter-Innenleiters und der Bohrungsdurchmesser D der Stromzange sind so aufeinander abgestimmt, dass sich näherungsweise ein Wellenwiderstand $Z_W = Z_0 = 50 \Omega$ ergibt. Es gilt:

$$Z_W \cong 60 \Omega \cdot \ln \left(\frac{D}{d} \right) \quad (2.30)$$

Der Kalibrierhalter besitzt zwei Tore mit koaxialen Steckverbindern. Er wird beidseitig mit Lastimpedanzen Z_L betrieben, so dass sich eine Schleifenimpedanz der Anordnung von $2 \cdot Z_L$ ergibt.

Um die Leistung angeben zu können, die während der Prüfung in den Kabelbaum eingekoppelt wird, ist die Kenntnis der Übertragungseigenschaften der Stromeinspeisetzangen ohne die Einflüsse der Kalibriereinrichtung erforderlich.

Diese ergeben sich durch

- Reflexionen und Dämpfungen durch den Kalibrierhalter sowie
- Aufteilung der eingekoppelten Leistung auf die beiden Tore des Kalibrierhalters.

2.5.1 Übertragungseigenschaften des Kalibrierhalters

Die Übertragungseigenschaften des Kalibrierhalters lassen sich im HF-Bereich durch Streuparameter angeben. Diese können bezüglich der koaxialen Anschlüsse des Kalibrierhalters (Tor 1 und 2 in Bild 2.10) direkt mit einem vektoriellen Netzwerk-Analysator nach Betrag und Phase gemessen werden. Der Bezugswiderstand für die Streuparameter ist gleich dem Wellenwiderstand Z_0 des Messsystems.

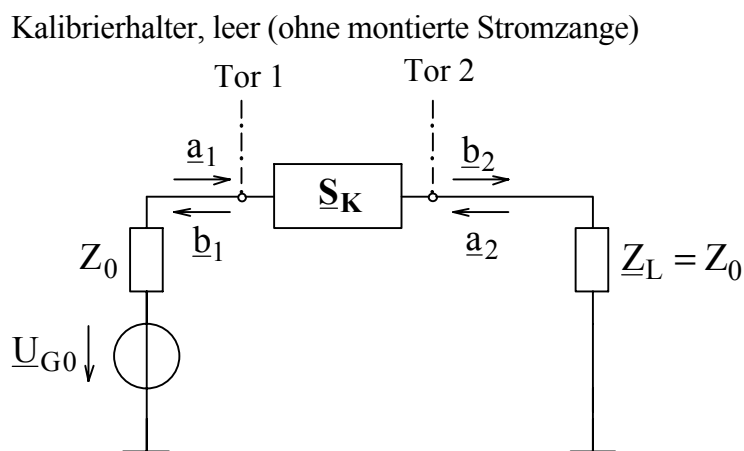


Bild 2.10: Wellengrößen und Streuparameter des leeren Kalibrierhalters

Die Wellengrößen \underline{a} und \underline{b} stehen mit den Streuparametern (Elementen der Streumatrix \underline{S}_K) des leeren Kalibrierhalters in folgendem Zusammenhang:

$$\begin{pmatrix} \underline{b}_1 \\ \underline{b}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{S}_{11,K} & \underline{S}_{12,K} \\ \underline{S}_{21,K} & \underline{S}_{22,K} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{a}_1 \\ \underline{a}_2 \end{pmatrix} \quad \text{bzw.} \quad \underline{b} = \underline{S}_K \cdot \underline{a} \quad (2.31)$$

Ein am Tor 1 angeschlossener Generator mit der Leerlaufspannung \underline{U}_{G0} und dem Innenwiderstand Z_0 ruft die in dieses Tor einlaufende Welle \underline{a}_1 hervor. Das Tor 2 wird mit $\underline{Z}_L = Z_0$ angepasst betrieben, so dass die Welle $\underline{a}_2 = 0$ ist.

Daraus ergeben sich die Streuparameter:

$$\underline{S}_{11,K} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad \underline{S}_{21,K} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (2.32) \quad (2.33)$$

Entsprechend können die Streuparameter $\underline{S}_{22,K}$ und $\underline{S}_{12,K}$ durch Umkehrung der Betriebsrichtung ($2 \rightarrow 1$) bestimmt werden.

Für die Einfügungsdämpfung des leeren Kalibrierhalters $a_{E,K}$ ergibt sich aufgrund der Anpassung beider Tore:

$$\frac{a_{E,K}}{\text{dB}} = 20 \cdot \log \left(\frac{1}{|\underline{S}_{21,K}|} \right) \quad (2.34)$$

Der Kalibrierhalter kann als Kettenschaltung der Zweitore A (Tor 1 – Tor 1') und B (Tor 2' - Tor 2) nach Bild 2.11 betrachtet werden. Die Bezugsebenen 1' und 2' liegen jeweils in der Mitte des Kalibrierhalters.

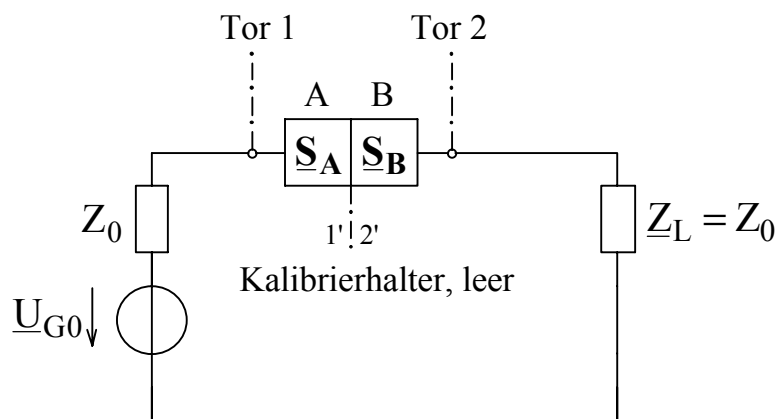


Bild 2.11: Kalibrierhalter als Kettenschaltung zweier symmetrischer Zweitore

Unter Berücksichtigung der Umkehrbarkeit (Übertragungssymmetrie) und Reflexionssymmetrie des Kalibrierhalters können die Elemente der Streumatrizen \underline{S}_A und \underline{S}_B für die Zweitore A und B bestimmt werden (vgl. Anhang A3). Es gilt dann:

$$\underline{S}_{11,A} = \underline{S}_{1'1',A} = \underline{S}_{2'2',B} = \underline{S}_{22,B} = \frac{\underline{S}_{11,K}}{1 + \underline{S}_{21,K}} \quad (2.35)$$

$$\underline{S}_{1'1',A} = \underline{S}_{11',A} = \underline{S}_{22',B} = \underline{S}_{2'2',B} = \sqrt{\underline{S}_{21,K} \cdot (1 - \underline{S}_{11,A}^2)} \quad (2.36)$$

2.5.2 Einfluss der Kalibriereinrichtung auf die Einfügungsdämpfung der Stromeinspeisung

Durch die Montage einer Stromeinspeisung im Kalibrierhalter ergibt sich eine 3-Tor-Anordnung nach Bild 2.12. Der koaxiale primärseitige Eingang der Stromeinspeisung stellt hierbei das Tor 0 dar. Zur Störeinkopplung in die Stromeinspeisung ist der Generator an das Tor 0 angeschlossen.

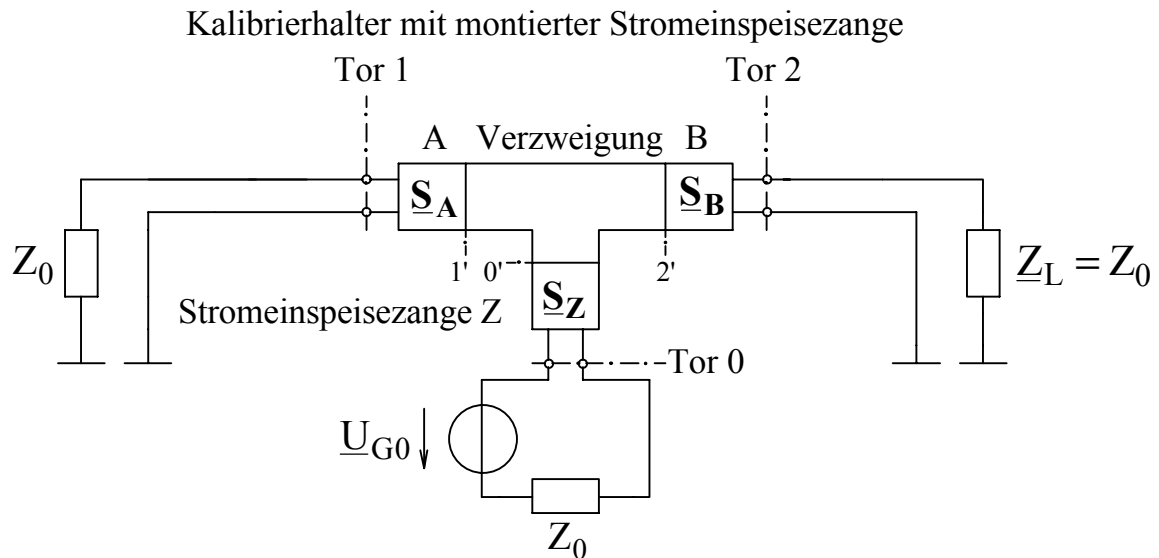


Bild 2.12: Stromeinspeisung im Kalibrierhalter (Dreitor-Darstellung)

Die Bezugsebenen $0'$, $1'$ und $2'$ liegen identisch in der Symmetrieebene (Mitte des Kalibrierhalters bzw. der Stromeinspeisung). Durch eine symmetrische 3-fache Serien-Verzweigung mit vernachlässigbar kurzen Leitungslängen, die zwischen den Bezugsebenen eingefügt ist, wird die Leistungsaufteilung im Kalibrierhalter berücksichtigt.

Eine vereinfachte Zweitor-Betrachtung erfolgt nach Bild 2.13. Die gesamte Anordnung besteht aus den einzelnen Zweitoren Z (Stromeinspeisung), V (Zusammenfassung von Zweitor A und Serienverzweigung bzgl. der Bezugsebenen $0'$ und $2'$) sowie B ("halber" Kalibrierhalter).

Die Streuparameter bezüglich der Tore 0 und 2 können ebenfalls direkt gemessen werden. Hierbei werden die Eigenschaften der gesamten Kettenschaltung erfasst. Es ergibt sich die Streumatrix \underline{S}_M für die in den Kalibrierhalter eingefügte Stromeinspeisung:

$$\underline{S}_M = \begin{pmatrix} \underline{S}_{00,M} & \underline{S}_{02,M} \\ \underline{S}_{20,M} & \underline{S}_{22,M} \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

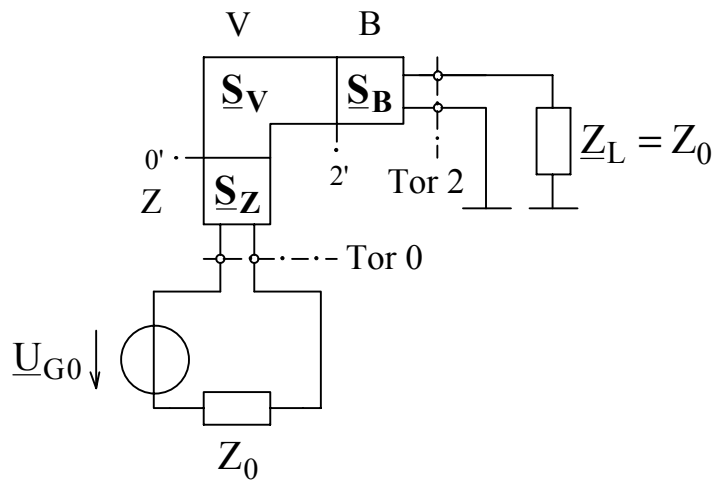


Bild 2.13: Stromeinspeisung im Kalibrierhalter (Zweitordnungs-Darstellung)

In der Zweitordnungs-Darstellung wird die Serienverzweigung V bezüglich der Bezugsebenen 0' und 2' durch die Längsimpedanz $\underline{Z}_{A,\text{ein}}$ dargestellt (siehe Bild 2.14). Hierbei handelt es sich um die Eingangsimpedanz des Zweitores A in der Bezugsebene 1'.

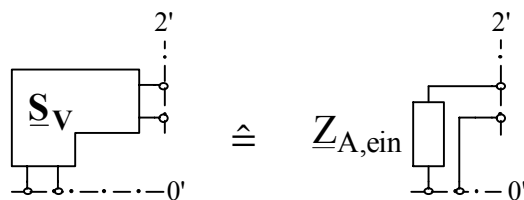


Bild 2.14: Zweitordnungs-Darstellung der Serienverzweigung des Kalibrierhalters

Für den Eingangsreflexionsfaktor $\rho_{1'}$ in der Bezugsebene 1' gilt aufgrund des reflexionsfreien Abschlusses von Tor 1:

$$\underline{\rho}_{1'} = \underline{S}_{22,A} \tag{2.38}$$

Daraus ergibt sich:

$$\underline{Z}_{A,\text{ein}} = \frac{1 + \underline{\rho}_{1'}}{1 - \underline{\rho}_{1'}} \cdot Z_0 = \frac{1 + \underline{S}_{22,A}}{1 - \underline{S}_{22,A}} \cdot Z_0 \tag{2.39}$$

Die Streumatrix $\underline{\mathbf{S}}_{\mathbf{V}}$ der Serienverzweigung ist übertragungs- und reflexions-symmetrisch [78]:

$$\underline{\mathbf{S}}_{\mathbf{V}} = \begin{pmatrix} \underline{S}_{0'0',\mathbf{V}} & \underline{S}_{2'0',\mathbf{V}} \\ \underline{S}_{0'2',\mathbf{V}} & \underline{S}_{2'2',\mathbf{V}} \end{pmatrix} = \frac{1}{2 + \frac{\underline{Z}_{\mathbf{A},\text{ein}}}{Z_0}} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\underline{Z}_{\mathbf{A},\text{ein}}}{Z_0} & 2 \\ 2 & \frac{\underline{Z}_{\mathbf{A},\text{ein}}}{Z_0} \end{pmatrix} \quad (2.40)$$

Die Einflüsse der Kalibriereinrichtung (systematische Messabweichungen) sind somit bekannt (Streumatrizen $\underline{\mathbf{S}}_{\mathbf{V}}$ und $\underline{\mathbf{S}}_{\mathbf{B}}$) und können zur Korrektur der gemessenen Streuparameter (Streumatrix $\underline{\mathbf{S}}_{\mathbf{M}}$) herangezogen werden. Dieses Verfahren wird u.a. in der Mikrowellentechnik angewendet und dort auch als 'deembedding' bezeichnet [80].

Das Reflexions- und Übertragungsverhalten der Stromeinspeisung bezügl. Tor 0 und Bezugsebene 0' ohne die Einflüsse der Kalibriereinrichtung kann dann durch die Elemente der Streumatrix $\underline{\mathbf{S}}_{\mathbf{Z}}$ angegeben werden.

Es gilt (vgl. Anhang A4):

$$\underline{\mathbf{S}}_{\mathbf{Z}} = \begin{pmatrix} \underline{S}_{00,\mathbf{Z}} & \underline{S}_{00',\mathbf{Z}} \\ \underline{S}_{0'0,\mathbf{Z}} & \underline{S}_{0'0',\mathbf{Z}} \end{pmatrix} \quad (2.41)$$

mit

$$\underline{S}_{00,\mathbf{Z}} = \underline{S}_{00,\mathbf{M}} - \frac{\underline{S}_{0'0',\mathbf{V}} \cdot (\underline{S}_{0'0,\mathbf{Z}})^2 \cdot (1 - \underline{S}_{2'2',\mathbf{V}} \underline{S}_{2'2',\mathbf{B}}) + (\underline{S}_{0'0,\mathbf{Z}})^2 \cdot (\underline{S}_{2'0',\mathbf{V}})^2 \cdot \underline{S}_{2'2',\mathbf{B}}}{\underline{X}_1} \quad (2.42)$$

$$\underline{S}_{0'0,\mathbf{Z}} = \underline{S}_{00',\mathbf{Z}} = \frac{\underline{S}_{20,\mathbf{M}}}{\underline{S}_{2'0',\mathbf{V}} \cdot \underline{S}_{2'2',\mathbf{B}}} \cdot \underline{X}_1 \quad (2.43)$$

$$\underline{S}_{0'0',\mathbf{Z}} = \frac{(\underline{S}_{22,\mathbf{M}} - \underline{S}_{22,\mathbf{B}}) \cdot (1 - \underline{S}_{2'2',\mathbf{V}} \underline{S}_{2'2',\mathbf{B}}) - \underline{S}_{2'2',\mathbf{V}} \cdot (\underline{S}_{2'2',\mathbf{B}})^2}{\underline{X}_2} \quad (2.44)$$

sowie

$$\underline{X}_1 = (1 - \underline{S}_{0'0',\mathbf{Z}} \cdot \underline{S}_{0'0',\mathbf{V}}) \cdot (1 - \underline{S}_{2'2',\mathbf{B}} \cdot \underline{S}_{2'2',\mathbf{V}}) - \underline{S}_{2'0',\mathbf{V}} \cdot \underline{S}_{0'2',\mathbf{V}} \cdot \underline{S}_{0'0',\mathbf{Z}} \cdot \underline{S}_{2'2',\mathbf{B}} \quad (2.45)$$

$$\underline{X}_2 = (\underline{S}_{2'2',\mathbf{B}})^2 \cdot ((\underline{S}_{0'2',\mathbf{V}})^2 - \underline{S}_{2'2',\mathbf{V}} \underline{S}_{0'0',\mathbf{V}}) + (\underline{S}_{22} - \underline{S}_{22,\mathbf{B}}) \cdot (\underline{S}_{0'0',\mathbf{V}} + \underline{S}_{2'2',\mathbf{B}} (\underline{S}_{0'2',\mathbf{V}})^2 - \underline{S}_{2'2',\mathbf{V}} \underline{S}_{0'0',\mathbf{V}} \underline{S}_{2'2',\mathbf{B}}) \quad (2.46)$$

Die Einfügungsdämpfung der Stromeinspeisetzange $a_{E,Z}$ zwischen ihrem primärseitigen koaxialen Anschluss und einer sekundärseitig in die Zange eingefügten Leitung über Masse lautet dann :

$$\frac{a_{E,Z}}{\text{dB}} = 20 \cdot \log \left(\frac{1}{|\underline{S}_{0'0,Z}|} \right) + 20 \cdot \log \left(|1 - \underline{S}_{0'0,Z} \cdot \underline{\rho}_{0'}| \right) \quad (2.47)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die Einfügungsdämpfung von der Eingangsimpedanz $\underline{Z}_{\text{Ein},0'}$ der Leitung an der Einspeiseposition (Bezugsebene 0', Zangenmitte) abhängt. Es gilt:

$$\underline{\rho}_{0'} = \frac{\underline{Z}_{\text{Ein},0'} - Z_0}{\underline{Z}_{\text{Ein},0'} + Z_0} \quad (2.48)$$

Die direkte Messung der Eingangsimpedanz $\underline{Z}_{\text{Ein},0'}$ bzw. des Eingangsreflexionsfaktors $\underline{\rho}_{0'}$ in der Bezugsebene 0' ist schwierig. Der Eingangsreflexionsfaktor $\underline{\rho}_{0'}$ kann jedoch aus dem Eingangsreflexionsfaktor $\underline{\rho}_0$ am Tor 0 bestimmt werden (siehe Anhang A4):

$$\underline{\rho}_{0'} = \frac{\underline{\rho}_0 - \underline{S}_{00,Z}}{(\underline{\rho}_0 - \underline{S}_{00,Z}) \cdot \underline{S}_{0'0,Z} + \underline{S}_{0'0,Z} \cdot \underline{S}_{00,Z}} \quad (2.49)$$

Damit kann die Leistung P_{CUT} angegeben werden, die während der Störfestigkeitsprüfung mit Stromeinspeisung an das zu prüfende System (Prüfling, Kabelbaum, Zusatzgeräte) abgegeben wird (Bezugsebene 0'):

$$P_{\text{CUT}} = \frac{1}{2} \cdot |\underline{b}_{0'}|^2 \cdot \left(1 - |\underline{\rho}_{0'}|^2 \right) \quad (2.50)$$

Mit den Gln. (2.7), (2.8), (A4.14) und (A4.15) ergibt sich:

$$P_{\text{CUT}} = P_{\text{Vor}} \cdot \left[\left| \frac{\underline{S}_{0'0,Z} \cdot (\underline{\rho}_0 - \underline{S}_{00,Z}) + \underline{S}_{0'0,Z} \cdot \underline{S}_{00,Z}}{\underline{S}_{0'0,Z}} \right|^2 - \left| \frac{\underline{\rho}_0 - \underline{S}_{00,Z}}{\underline{S}_{0'0,Z}} \right|^2 \right] \quad (2.51)$$

Die von der Stromeinspeisetzange hierbei in Wärme umgesetzte Leistung P_{Abs} (Absorptionsverluste) beträgt:

$$P_{\text{Abs}} = P_{\text{Vor}} - P_{\text{Rück}} - P_{\text{CUT}} = \frac{1}{2} \cdot \left[|\underline{a}_0|^2 - |\underline{b}_0|^2 - |\underline{b}_{0'}|^2 + |\underline{a}_{0'}|^2 \right] \quad (2.52)$$

Mit den Gln. (2.13), (A4.14) und (A4.15) folgt:

$$P_{\text{Abs}} = P_{\text{Vor}} \cdot \left(1 - |\underline{\rho}_0|^2 - \left| \frac{\underline{S}_{0'0',Z} \cdot (\underline{\rho}_0 - \underline{S}_{00,Z}) + \underline{S}_{0'0',Z} \cdot \underline{S}_{00,Z}}{\underline{S}_{00',Z}} \right|^2 + \left| \frac{\underline{\rho}_0 - \underline{S}_{00,Z}}{\underline{S}_{00',Z}} \right|^2 \right) \quad (2.53)$$

Das Bild 2.15 zeigt die frequenzabhängige Absorptionsdämpfung a_{Abs} der Stromeinspeisung 95242-1 beispielhaft für unterschiedliche Eingangsreflexionsfaktoren in der Bezugsebene 0': $\underline{\rho}_{0'} = 0$ (Anpassung), $\underline{\rho}_{0'} = 1$ (Leerlauf) sowie $\underline{\rho}_{0'} = 1 \cdot e^{j90^\circ}$ (rein induktiver Abschluss).

Es gilt :

$$a_{\text{Abs}} = -10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{Vor}} - P_{\text{Abs}}}{P_{\text{Vor}}} \right) = -10 \cdot \log \left(1 - \frac{P_{\text{Abs}}}{P_{\text{Vor}}} \right) \quad (2.54)$$

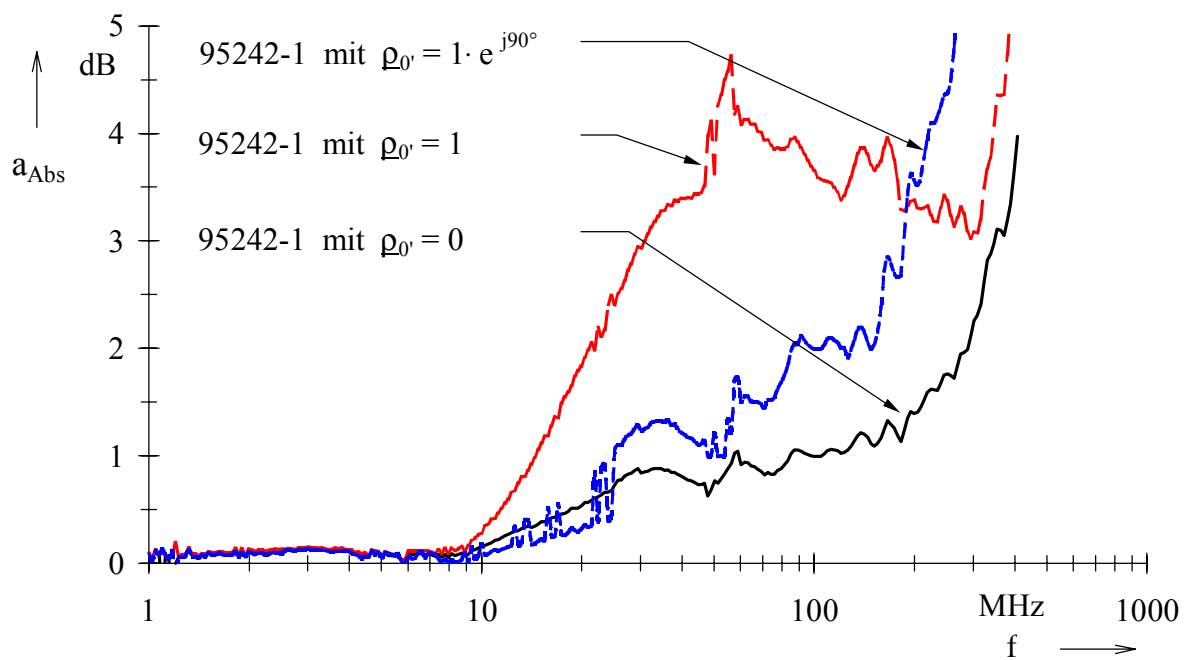


Bild 2.15: Absorptionsdämpfung der Stromeinspeisung 95242-1 bei unterschiedlichen Reflexionsfaktoren in der Bezugsebene 0'

Die maximale Leistung P_{CUT} wird bei Anpassung in der Bezugsebene 0' ($\underline{\rho}_{0'} = 0$) an das zu prüfende System abgegeben.

In diesem Sonderfall ergibt sich:

$$\underline{\rho}_0 = \underline{S}_{00,Z} \quad (2.55)$$

$$P_{\text{CUT}} = P_{\text{Vor}} \cdot \left[\left| \underline{S}_{0'0,Z} \right|^2 \right] \quad (2.56)$$

$$P_{\text{Abs}} = P_{\text{Vor}} \cdot \left[1 - \left| \underline{S}_{00,Z} \right|^2 - \left| \underline{S}_{0'0,Z} \right|^2 \right] \quad (2.57)$$

Das Bild 2.16 zeigt diese Leistung P_{CUT} bezogen auf die entsprechende Vorlaufleistung P_{Vor} . Die Leistungen P_{CUT} sowie P_{Abs} können aus den Messwerten der Vorlaufleistung P_{Vor} und des komplexen Eingangsreflexionsfaktors $\underline{\rho}_0$ am Tor 0 sowie den Streuparametern $\underline{S}_{ij,Z}$ der Stromeinspeisetzange bestimmt werden.

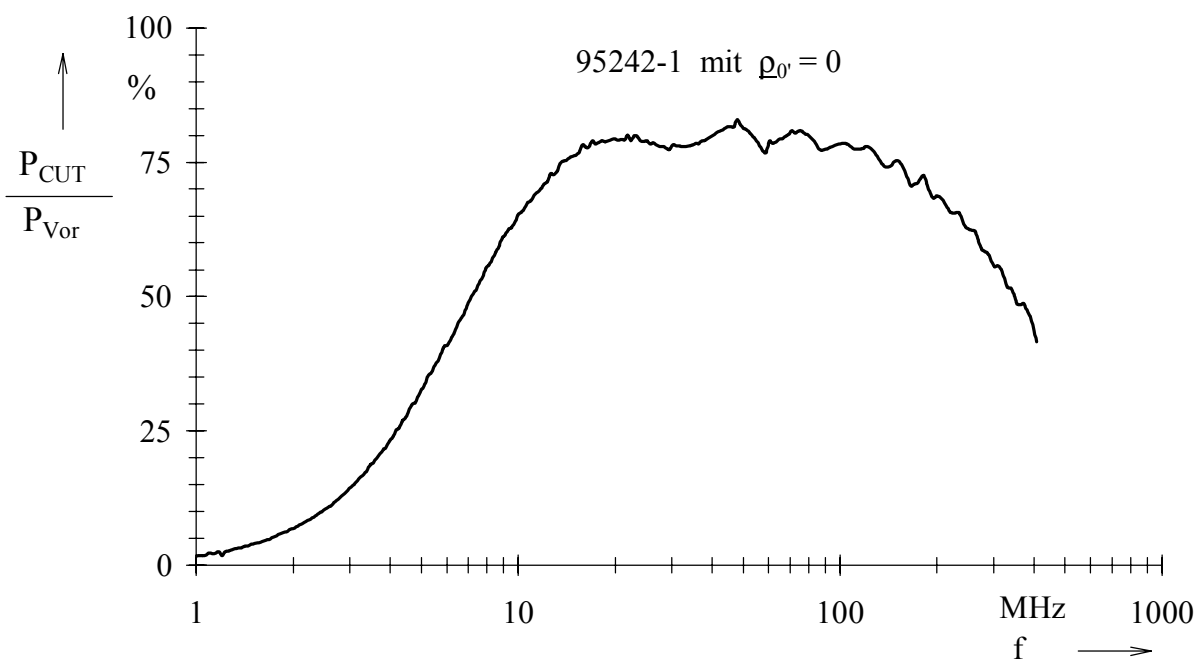


Bild 2.16: Maximal abgebbare Leistung an das Gesamtsystem (normiert) bei Stromeinspeisung mit der Stromeinspeisetzange 95242-1

Es ist zu beachten, dass die Festlegungen der Normen zur Stromeinspeisung keine Messung der Wellengrößen nach Betrag und Phase sondern nur eine Wirkleistungsmessung (P_{Vor} , $P_{\text{Rück}}$) vorsehen. Mit den hierfür erforderlichen Messgeräten kann der Eingangsreflexionsfaktor nur betragsmäßig ($|\underline{\rho}_0|$) bestimmt werden.

3 Normen zur Stromeinspeisung

Die Stromeinspeisung als Verfahren zur Störfestigkeitsprüfung ist auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene in Normen, Richtlinien und Vorschriften festgelegt. Im Kapitel 3 werden wichtige Normen zur Stromeinspeisung hinsichtlich ihrer Anwendungsbereiche, der elektrischen und geometrischen Daten, der Prüfschärfewerte sowie der Verfahren zur Kalibrierung und PrüfpegelEinstellung gegenübergestellt und verglichen.

3.1 Anwendungsbereiche

Die Stromeinspeisung ist Bestandteil der Kfz-EMV-Richtlinie 95/54/EG der Europäischen Union [32] und wird u.a. in den Normen ISO 11451-1 : 1995-12 [43], DIN ISO 11451-4 : 2000-03 [25], ISO 11452-4 : 1995-12 [45], DIN ISO 11452-4 : 2000-03 [27] sowie DIN EN 61000-4-6 : 1997-04 [23] beschrieben.

Im militärischen Bereich ist das Verfahren u.a. in den amerikanischen Normen MIL-STD-461D : 1993-01 [61] und MIL-STD-462D : 1993-01 (CS114 / CS115 / CS116) [62] sowie in der britischen Norm DEF STAN 59-41 (DCS02) [18][19] enthalten.

Die **Richtlinie 95/54/EG** der Europäischen Union regelt die Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit von Fahrzeugen sowie von Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten (elektrischen und elektronischen Unterbaugruppen, EUBs), die zum Einbau in Fahrzeuge bestimmt sind. In ihrem Anhang IX beschreibt sie die Stromeinspeisung als ein mögliches 'Verfahren zur Prüfung der Störfestigkeit von EUBs gegenüber eingestrahelten elektromagnetischen Feldern'. Zum Nachweis der Störfestigkeit werden Prüfungen mit bis zu 14 festen Frequenzen im Bereich 20...1000 MHz vorgeschrieben.

Die Normen **DIN ISO 11452-4 : 2000-03** bzw. **ISO 11452-4 : 1995-12** beschreiben das Verfahren der Stromeinspeisung in den Kabelbaum (BCI) zur Prüfung der elektromagnetischen Störfestigkeit von elektronischen Komponenten von Straßenfahrzeugen. Außerdem ist die Stromeinspeisung als Fahrzeugprüfverfahren in **DIN ISO 11451-4 : 2000-03** bzw. **ISO 11451-4 : 1995-12** zur Prüfung von PKW und Nutzfahrzeugen angegeben. Die berücksichtigten elektromagnetischen Störungen beschränken sich auf kontinuierliche schmalbandige elektromagnetische Felder. Der nach diesen Normen zur Stromeinspeisung anwendbare Frequenzbereich ist 1...400 MHz.

Die **DIN EN 61000-4-6 : 1997-04** ist anzuwenden für elektrische und elektronische Betriebsmittel, die elektromagnetischen Störungen von HF-Sendeanlagen im Frequenzbereich 9 kHz...80 MHz ausgesetzt sind und mindestens eine Leitung haben, über die HF-Störfelder eingekoppelt werden können. Die Norm beschreibt Verfahren zur Prüfung der Störfestigkeit gegenüber Einflüssen, die leitungsgeführte Störgrößen, induziert durch elektromagnetische Strahlung, auf das betroffene Betriebsmittel haben. Die elektromagnetischen Störfelder werden durch elektrische und magnetische Nahfelder nachgebildet, deren Ursache Spannungen und Ströme sind. Die Abmessungen der beeinflussten Betriebsmittel, bezogen auf die Wellenlänge, werden als klein angenommen. Die Simulation und die Messung dieser leitungsgeführten Störgrößen sind nicht hinreichend exakt, um Einflüsse quantitativ zu bestimmen. Die festgelegten Prüfverfahren dienen deshalb in erster Linie dem Ziel, hinreichende Reproduzierbarkeit der Ergebnisse unter verschiedenen Gegebenheiten für die qualitative Analyse von Einflüssen zu erreichen. Die Festlegungen in der Norm gelten für den Frequenzbereich 150 kHz...80 MHz. Unterhalb von 150 kHz sind keine Prüfungen erforderlich. Bei Betriebsmitteln mit kleinen Abmessungen können spezielle Produktnormen die obere Frequenzgrenze auf 230 MHz ausdehnen.

Die Einkopplung der Störgrößen in den Kabelbaum kann mit einer Koppelzange (Stromeinspeisenzange oder EM-Koppelstrecke), direkt (galvanisch) über einen 100- Ω -Widerstand oder über ein Koppel- / Entkoppelnetzwerk (CDN) erfolgen.

In **MIL-STD-462D : 1993-01** wird die Stromeinspeisung, dort bezeichnet als Bulk Cable Injection, in den Prüfverfahren CS114 bis CS116 beschrieben. Das Verfahren CS114 dient der Störfestigkeitsprüfung von Prüflingen (EUTs) gegenüber pulsmodulierten HF-Signalen, die in angeschlossene Kabel eingekoppelt werden. Die Prüfungen erfolgen im Frequenzbereich 10 kHz...400 MHz. In den beiden anderen Prüfverfahren werden Impulse (CS115) oder gedämpft-sinusförmige Transienten im Frequenzbereich 10 kHz...100 MHz (CS116) als Störgrößen verwendet. Die Prüfschärfewerte hierfür sind in der Norm **MIL-STD-461D : 1993-01** festgelegt.

Die britische Norm **DEF STAN 59-41** (United Kingdom Defence Standard) beschreibt die Stromeinspeisung (Bulk Current Injection) sehr detailliert im Teil 3 Anhang H (Test Method DCS02 Conducted Susceptibility, Power, Control and Signal Lines, 50 kHz - 400 MHz) in Verbindung mit dem Teil 5 für die Störfestigkeitsprüfung von elektrischem und elektronischem Equipment der See-, Land- und Luftstreitkräfte.

Darüber hinaus wird die Stromeinspeisung in weiteren Normen und Vorschriften wie u.a. **RTCA/DO-160D**, **ISO 7137**, **SAE J551/13**, **SAE J1113/4**, **Bellcore TR-NWT-001089** und **CSEFA-2 Euro Fighter** behandelt. Hierauf wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

3.2 Elektrische und geometrische Daten

Obwohl die genannten Normen das gleiche Prinzip der Störgrößeneinkopplung beschreiben, bestehen zwischen ihnen teilweise erhebliche Unterschiede bei den vorgeschriebenen elektrischen und geometrischen Daten für den Prüfaufbau und Prüfablauf. Diese sind in den folgenden Tabellen 3.1 bis 3.5 zusammengestellt.

Richtlinie 95/54/EG der Europäischen Union	
Frequenzbereich:	20...1000 MHz
Frequenzschrittweite:	keine Angaben, bis zu 14 feste Frequenzwerte
Durchlaufgeschwindigkeit (Sweep) bzw. Verweilzeit:	Verweilzeit ≥ 2 s, mindestens jedoch die für die Reaktion der EUB erforderliche Zeit
Modulation:	AM (80 ± 4) % bei 1 kHz
Abstand zwischen Kabelbaum und Massefläche:	keine Angaben
Abstand zwischen Prüfling und Stromeinspeisenzange:	(150 ± 10) mm (bezogen auf die Mitte der Stromzange sowie Ausgang des Prüflings / Steckverbinder)
Leitungslänge zwischen Prüfling und Zusatzgerät (Kfz-Bordnetznachbildung):	Länge des Prüfkabelbaums bzw. Abstand zwischen Prüfling und Kfz-Bordnetznachbildung: ($1,0 \pm 0,1$) m, sofern nicht anders festgelegt
Abstand (vertikal) zwischen Massefläche (Bezugserde) und Prüfling bzw. Zusatzgerät:	keine Angaben
Prüfung in geschirmtem Raum:	vorgeschrieben
Abstand (horizontal) zwischen Prüfling und metallischen Gegenständen (Wände des geschirmten Raumes)	$\geq 0,5$ m
Angaben zur Massefläche:	keine Angaben
Impedanzen der Zusatzgeräte:	alle Leitungen sollten mit möglichst realistischen Impedanzen beschaltet werden, vorzugsweise den betriebsmäßigen Lasten
Verwendung einer Strommesszange:	wahlweise, 50 mm Abstand vom Prüfling (bezogen auf die Mitte der Zange), keine Toleranzangaben

Tabelle 3.1: Richtlinie 95/54/EG (elektrische und geometrische Daten)

DIN ISO 11452-4 : 2000-03 bzw. ISO 11452-4 : 1995-12	
Frequenzbereich:	1...400 MHz
Frequenzschrittweite:	linear: ≤ 1 MHz im Frequenzbereich 1...10 MHz, ≤ 2 MHz im Frequenzbereich 10...200 MHz, ≤ 20 MHz im Frequenzbereich 200...400 MHz oder logarithmisch: ≤ 10 % im Frequenzbereich 1...10 MHz, ≤ 1 % im Frequenzbereich 10...200 MHz, ≤ 2 % im Frequenzbereich 200...400 MHz
Durchlaufgeschwindigkeit (Sweep) bzw. Verweilzeit:	Verweilzeit ≥ 2 s, jedoch mindestens die für die Reaktion des Prüflings erforderliche Zeit
Modulation:	CW (unmoduliert), AM 80 % bei 1 kHz mit konstantem Spitzenwert für die Nettoleistung bei CW- und AM-Prüfung
Abstand zwischen Kabelbaum und Massefläche:	50...60 mm, Angabe in der Norm: (50 +10/-0) mm
Abstand zwischen Prüfling und Stromeinspeisenzange:	(150 \pm 10) mm (bezogen auf die Mitte der Stromeinspeisenzange sowie Ausgang des Prüflings / Steckverbinder)
Leitungslänge zwischen Prüfling und Zusatzgerät:	Länge des Prüfkabelbaums: 1 m, sofern nicht anders festgelegt
Abstand (vertikal) zwischen Massefläche (Bezugserde) und Prüfling bzw. Zusatzgerät:	Prüfling und Zusatzgeräte werden entsprechend der betriebsmäßigen Installation mit der Masse verbunden
Prüfung in geschirmtem Raum:	vorgeschrieben
Abstand (horizontal) zwischen Prüfling und metallischen Gegenständen (Wände des geschirmten Raumes)	$\geq 0,5$ m
Angaben zur Massefläche:	Kupfer, Messing oder galvanisierter Stahl, Dicke $> 0,5$ mm, Fläche $> 2,25$ m ² , Länge $> 0,75$ m
Impedanzen der Zusatzgeräte:	alle Leitungen müssen abgeschlossen sein, möglichst mit den betriebsmäßigen Lasten
Verwendung einer Strommesszange:	optional möglich, kann die Prüfbedingungen verändern, erforderlich für das Verfahren 'Geschlossener Regelkreis', 50 mm Abstand vom Prüfling (bezogen auf die Mitte der Zange), keine Toleranzangabe

Tabelle 3.2: DIN ISO 11452-4 (elektrische und geometrische Daten)

DIN ISO 11451-4 : 2000-03 bzw. ISO 11451-4 : 1995-12	
Frequenzbereich:	1...400 MHz
Frequenzschrittweite:	linear: ≤ 1 MHz im Frequenzbereich 1...10 MHz, ≤ 2 MHz im Frequenzbereich 10...200 MHz, ≤ 20 MHz im Frequenzbereich 200...400 MHz oder logarithmisch: ≤ 10 % im Frequenzbereich 1...10 MHz, ≤ 1 % im Frequenzbereich 10...200 MHz, ≤ 2 % im Frequenzbereich 200...400 MHz
Durchlaufgeschwindigkeit (Sweep) bzw. Verweilzeit:	Verweilzeit ≥ 2 s, jedoch mindestens die für die Reaktion des Prüflings erforderliche Zeit
Modulation:	CW (unmoduliert), AM 80 % bei 1 kHz mit konstantem Spitzenwert für die Nettoleistung bei CW- und AM-Prüfung
Abstand zwischen Prüfling und Stromeinspeisenzange:	(150 \pm 10) mm (bezogen auf die Mitte der Stromzange sowie Stecker bzw. Ausgang des Prüflings im Fahrzeug)
Prüfung in geschirmtem Raum:	vorgeschrieben
Abstand (horizontal) zwischen Fahrzeug und metallischen Gegenständen (Wände des geschirmten Raumes)	$\geq 0,5$ m
Impedanzen der Zusatzgeräte:	das Fahrzeug sollte im Originalherstellungszustand geprüft werden; zusätzliche Masseverbindungen sind nicht erlaubt.
Verwendung einer Strommesszange:	optional möglich, kann die Prüfbedingungen verändern, erforderlich für das Verfahren 'Geschlossener Regelkreis', 50 mm Abstand vom Prüfling (bezogen auf die Mitte der Zange), keine Toleranzangabe

Tabelle 3.3: DIN ISO 11451-4 (elektrische und geometrische Daten)

DIN EN 61000-4-6 : 1997-04	
Frequenzbereich:	150 kHz...80 MHz (230 MHz)
Frequenzschrittweite:	logarithmisch: < 1 % des vorherigen Frequenzwertes bzw. der Startfrequenz (100 Frequenzwerte pro Dekade) (alternativ sind bis zu 4 % zulässig bei Verwendung des doppelten Prüfschärfewertes)
Durchlaufgeschwindigkeit (Sweep) bzw. Verweilzeit:	Durchlaufgeschwindigkeit < 0,0015 Dekaden/s (bei automatischem Sweep) bzw. Verweilzeit nicht kleiner als die Zeit, die der Prüfling benötigt, um seine Funktion zu erfüllen und entsprechend reagieren zu können (bei manuellem Frequenzdurchlauf)
Modulation:	AM 80 % bei 1 kHz
Abstand zwischen Kabelbaum und Massefläche:	30...50 mm
Abstand zwischen Prüfling und Stromeinspeisezange:	0,1...0,3 m (bezogen auf die Kante der Stromeinspeisezange)
Leitungslänge zwischen Stromeinspeisezange und Zusatzgerät:	≤ 0,3 m (so kurz wie möglich)
Abstand (vertikal) zwischen Massefläche (Bezugserde) und Prüfling bzw. Zusatzgerät:	0,1 m (Prüfling und jedes Zusatzgerät auf isolierender Unterlage)
Prüfung in geschirmtem Raum:	i. Allg. nicht erforderlich (aufgrund der Geometrie des Prüfaufbaus und der verwendeten Prüfpegel ist keine Abstrahlung hoher Energie zu erwarten)
Abstand (horizontal) zwischen Prüfling und metallischen Gegenständen:	≥ 0,5 m
Angaben zur Massefläche:	keine Angaben
Impedanzen der Zusatzgeräte:	möglichst 150 Ω, wenn nicht erreichbar: Impedanz des Zusatzgerätes ≤ Impedanz des Prüflingsanschlusses
Verwendung einer Strommesszange:	vorgeschrieben zur Überwachung des Stromes im Kabelbaum (der maximal zulässige Strom i_{Max} darf nicht überschritten werden); Strommesszange wird eingefügt zwischen Prüfling und Stromeinspeisezange (genaue Position ist nicht vorgeschrieben)

Tabelle 3.4: DIN EN 610004-6 (elektrische und geometrische Daten)

MIL-STD-462D (CS114) : 1993-01	
Frequenzbereich:	10 kHz...400 MHz
Frequenzschrittweite:	logarithmisch: $\leq 0,02 \cdot f_0$ im Frequenzbereich 10 kHz...1 MHz, $\leq 0,01 \cdot f_0$ im Frequenzbereich 1...30 MHz, $\leq 0,005 \cdot f_0$ im Frequenzbereich 30...400 MHz (f_0 : aktuelle Prüffrequenz)
Durchlaufgeschwindigkeit (Sweep) bzw. Verweilzeit:	≥ 1 s, jedoch mindestens die für die Reaktion des Prüflings erforderliche Zeit
Modulation:	Pulsmodulation 100 % mit 1 kHz, Tastverhältnis 50 %
Abstand zwischen Kabelbaum und Massefläche:	50 mm
Abstand zwischen Prüfling und Strommesszange sowie zwischen Strommess- und Stromeinspeisung:	50 mm (bezogen auf die Kanten der Stromzangen sowie Stecker bzw. Ausgang des Prüflings)
Leitungslänge zwischen Prüfling und Zusatzgerät (Netznachbildung)	Abstand zwischen Prüfling und Netznachbildung (LISN): max. 2 m, ggf. Kabelbaum mäanderförmig anordnen
Abstand (vertikal) zwischen Massefläche (Bezugserde) und Prüfling bzw. Zusatzgerät:	Prüfling und Zusatzgeräte werden entsprechend der betriebsmäßigen Installation mit der Masse verbunden
Prüfung in geschirmtem Raum:	vorgeschrieben
Abstand (horizontal) zwischen Prüfling und metallischen Gegenständen (Wänden des geschirmten Raumes):	$\geq 0,5$ m
Angaben zur Massefläche:	Fläche $> 2,25 \text{ m}^2$, Länge $> 0,76$ m, spezifischer Widerstand $\leq 0,1 \text{ m}\Omega/\text{m}^2$, Kupfer mit einer Dicke $> 0,25$ mm oder anderes leitfähiges Material
Impedanzen der Zusatzgeräte:	Alle Ein- und Ausgänge sollten mit realistischen Lasten abgeschlossen werden oder mit Lasten, die die Betriebsbedingungen in der realen Installation nachbilden
Verwendung einer Strommesszange:	vorgeschrieben, 50 mm Abstand vom Stecker bzw. Ausgang des Prüflings (bezogen auf die prüflingsseitige Kante der Strommesszange), keine Toleranzangabe

Tabelle 3.5: MIL-STD-462D (elektrische und geometrische Daten)

DEF STAN 59-41 (DCS02) : 1995-10	
Frequenzbereich:	50 kHz...400 MHz
Frequenzschrittweite:	logarithmisch: < 1 % des vorherigen Frequenzwertes bzw. der Startfrequenz (100 Frequenzwerte pro Dekade), Schrittweite so wählen, dass die Vorlaufleistung sich bei der Kalibrierung zwischen zwei Schritten um weniger als 1 dB ändert
Durchlaufgeschwindigkeit (Sweep) bzw. Verweilzeit:	Verweilzeit > 1 s bzw. Durchlaufgeschwindigkeit < 0,00833 Dekaden/s (bei automatischem Sweep)
Modulation (unterschiedlich für EUTs von See-, Land- und Luftstreitkräften)	a) Pulsmodulation 100 % mit 1 kHz, Tastverhältnis 50 %, b) AM 80 % bei 0,1...10 kHz, c) Pulsmodulation 100 % mit 1 Hz ggf. auch gleichzeitig mit a) oder b)
Abstand zwischen Kabelbaum und Massefläche:	50 mm ± 10 %
Leitungslänge zwischen Prüfling und Strommesszange sowie zwischen Strommess- und Stromeinspeisetzange:	50 mm Abstand (bezogen auf die Kanten der Stromzangen sowie Ausgang des Prüflings / Steckverbinder)
Leitungslänge zwischen Prüfling und Zusatzgerät:	möglichst reale Kabelbäume verwenden; wenn nicht anders festgelegt: (2 ± 0,1) m bei Kontroll- / Signalleitungen bzw. (1 ± 0,1) m bei Versorgungsleitungen
Abstand (vertikal) zwischen Massefläche (Bezugserde) und Prüfling bzw. Zusatzgerät:	Prüfling und Zusatzgeräte werden entsprechend der betriebsmäßigen Installation mit der Masse verbunden
Prüfung in geschirmtem Raum:	vorgeschrieben
Abstand (horizontal) zwischen Prüfling und metallischen Gegenständen (Wänden des geschirmten Raumes):	keine Angabe
Angaben zur Massefläche:	Kupfer, Messing, Alu, Dicke > 0,25 mm (für Kupfer) Fläche > 2,25 m ² , Länge > 0,75 m
Impedanzen der Zusatzgeräte:	möglichst betriebsmäßige Installation, LISN für Versorgungsleitungen verwenden
Verwendung einer Strommesszange:	vorgeschrieben, Abstand vom Stecker bzw. Ausgang des Prüflings (bezogen auf die prüflingsseitige Kante der Strommesszange) : 50 mm ± 10 %

Tabelle 3.6: DEF STAN 59-41 (elektrische und geometrische Daten)

3.3 Prüfschärfewerte

Die genannten Normen schreiben unterschiedliche Prüfschärfewerte und Verfahren zur Einstellung der Prüfsignale vor.

Bei Störfestigkeitsprüfungen nach **DIN EN 61000-4-6** sind die Prüfschärfegrade entsprechend den elektromagnetischen Umgebungsbedingungen auszuwählen, unter denen das Gesamtsystem bestehend aus Prüfling (zu prüfendem Betriebsmittel), Leitungen und Zusatzgeräten betrieben werden soll. Hierzu sind den Prüfschärfegraden entsprechende Umgebungsklassen nach Tabelle 3.7 zugeordnet.

Klasse	Feldstärken der elektromagnetischen Umgebung	Beispiele für felderzeugende Quellen
1	gering	Funkgeräte geringer Leistung, Rundfunksender in mehr als 1 km Entfernung
2	gemäßigt	Funkgeräte geringer Leistung (bis zu 1 W, eingeschränkte Anwendung in der Nähe des Prüflings/Betriebsmittels), typische Umwelt kommerzieller Einrichtungen
3	stark	Funkgeräte (2 W oder mehr), starke Rundfunksender in der Nähe der Prüflings/Betriebsmittels, industrielle, wissenschaftliche, medizinische (ISM-) Geräte neben dem Prüfling, typische industrielle Umwelt

Tabelle 3.7: Prüfschärfegrade und elektromagnetische Umgebungsklassen

Ein zusätzlicher Prüfschärfegrad X gilt für eine 'offene Umgebungsklasse', deren Prüfschärfewert vereinbart bzw. in Produktnormen angegeben werden kann.

Für die Prüfschärfegrade werden Spannungspegel als zugehörige Prüfschärfewerte angegeben. Hierbei handelt es sich um die Effektivwerte der Leerlaufspannung (EMK) u_0 des unmodulierten Prüfsignales am Prüflingsanschluss. Für die Anwendung der Stromeinspeisung können die sich

ergebenden Pegel des Prüfstromes $i_{\text{Prüf}}$ unter Berücksichtigung des Kalibrierverfahrens (siehe Kapitel 2.5 und 3.4) berechnet werden:

$$\frac{i_{\text{Prüf}}}{\text{dB}(\mu\text{A})} = \frac{u_0}{\text{dB}(\mu\text{V})} - 40 \quad (3.1)$$

In **DIN ISO 11452-4 bzw. ISO 11452-4** sind die Prüfschärfewerte als Ströme in mA angegeben, wobei 4 Prüfschärfeklassen unterschieden werden. Die Angaben beziehen sich auf die Effektivwerte des unmodulierten Signals. Auch in dieser Norm ist eine 'offene Klasse' zur freien Vereinbarung zwischen den Anwendern der Norm enthalten.

Die **Richtlinie 95/54/EG** der Europäischen Union enthält die Angabe eines 'Bezugsgrenzwertes' für den Prüfstrom. Die Prüfung soll erfolgen mit 125 % des Bezugsgrenzwertes, d.h. mit einem Pegel von ca. 2 dB über dem Bezugsgrenzwert (siehe Tabelle 3.8). Bei dem Prüfling handelt es sich um eine für ihren Typ repräsentative EUB eines Fahrzeugs. Diese darf keine Funktionsstörung aufweisen, die eine Verminderung des Leistungsverhaltens bewirkt oder die unmittelbare Kontrolle des Fahrers über das Fahrzeug beeinträchtigt.

Im Gegensatz zu den bisher genannten Normen sieht **MIL-STD-461D** frequenzabhängige Prüfschärfewerte für den Prüffrequenzbereich vor. Dadurch soll die Störbedrohung bei Einstrahlung äußerer elektromagnetischer Felder in den Kabelbaum besser durch die Stromeinspeisung nachgebildet werden. Im Frequenzbereich, in dem Resonanzen auftreten, soll eine Hüllkurven-Approximation statt des tatsächlichen frequenzabhängigen Störsignalverlaufes verwendet werden [46].

Oberhalb einer Eckfrequenz f_E ergeben sich dabei frequenzunabhängige Prüfströme. Unterhalb der Eckfrequenz fallen die Prüfströme zu niedrigeren Frequenzen hin mit 20 dB pro Dekade ab.

Die Eckfrequenz hängt von der maximalen Abmessung des zu prüfenden Systems, näherungsweise von der Länge l_{CUT} des Kabelbaumes ab:

$$f_E = \frac{c_0}{2 \cdot l_{\text{CUT}}} \quad (3.2)$$

In der Norm werden die Frequenzgänge der Prüfströme in 5 Schärfegraden jeweils normiert auf $f_E = 1$ MHz angegeben.

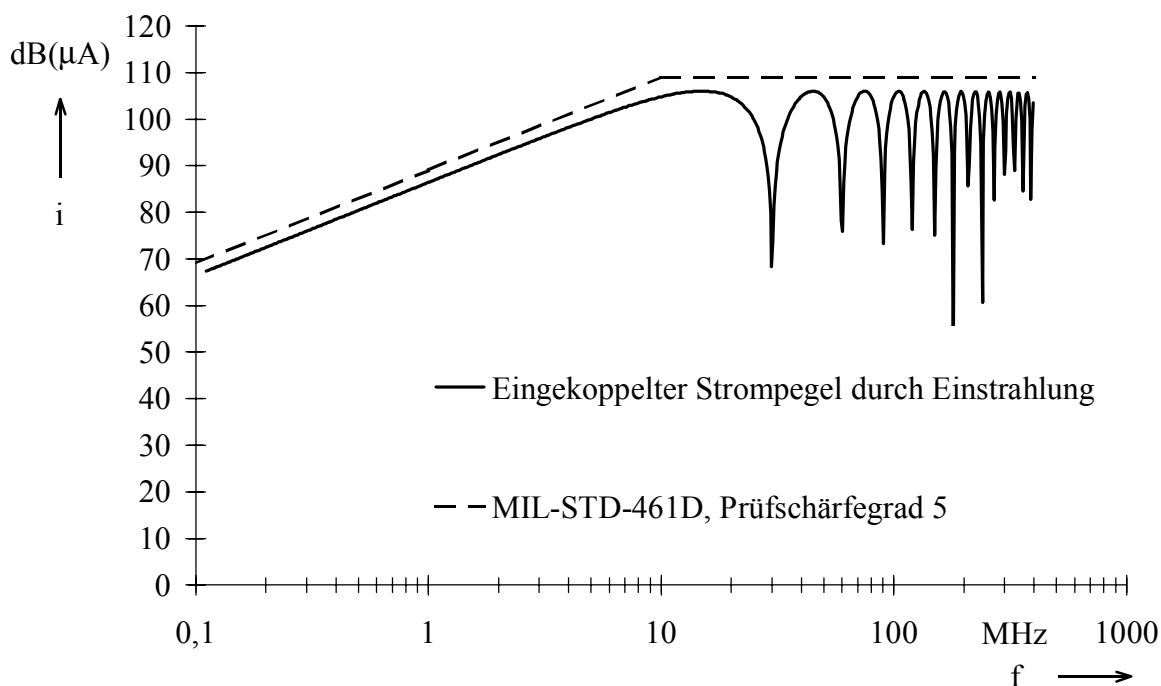


Bild 3.1: Prüfstrom nach MIL-STD-461D sowie Strom, hervorgerufen durch Einstrahlung eines äußeren Feldes

Bild 3.1 zeigt beispielhaft den Strompegel in einem Kabelbaum (Länge 10 m) aufgrund von Einstrahlung eines äußeren elektromagnetischen Feldes (Feldstärke 200 V/m). Die Impedanzen an den beiden Seiten des Kabelbaumes betragen 100 Ω . Außerdem ist zum Vergleich der Frequenzgang für den Prüfstrom nach MIL-STD-461D, Schärfegrad 5 mit $f_E = 10$ MHz dargestellt.

Die in den Normen genannten Prüfschärfewerte mit den sich daraus ergebenden Pegeln für den Prüfstrom sind in Tabelle 3.8 zusammengestellt.

Norm	Prüfschärfegrad					Einheit
	1	2	3	4	5	
DIN EN 61000-4-6	120	130	140		X	dB(μ V)
	80	90	100			dB(μ A)
DIN ISO 11452-4	25	50	75	100	X	mA
	88	94	97,5	100		dB(μ A)
Richtlinie 95/54/EG (125 % des Bezugswertes)	60					mA
	95,6					dB(μ A)

Norm	Prüfschärfegrad					Einheit
	1	2	3	4	5	
MIL-STD-461D (CS114) (oberhalb der Eckfrequenz)	77	83	89	97	109	dB(μ A)
	unterschiedlich für Land-, See- und Luftstreitkräfte					
DEF STAN 59-41 (DCS02)	3 Prüfschärfegrade mit frequenzabhängigen Prüfschärfewerten unterschiedlich für Land-, See- und Luftstreitkräfte im Bereich 76 ... 115 dB(μ A)					

Tabelle 3.8: Normenangaben für Prüfschärfewerte

Der Prüfling muss während und nach der Prüfung entsprechend seiner Funktionszustand-Klassifizierung funktionieren. Hierbei werden in den Normen folgende Klassen für den Funktionszustand bzw. das Betriebsverhalten des zu prüfenden Gerätes unterschieden:

- A : Alle Funktionen werden wie vorgegeben innerhalb der festgelegten Grenzen erfüllt (übliches Betriebsverhalten).
- B : Alle Funktionen werden erfüllt (übliches Betriebsverhalten), jedoch vorübergehend außerhalb der festgelegten Grenzen. Alle Funktionen kehren nach Ende der Beaufschlagung automatisch in die festgelegten Grenzen zurück. (Anmerkung: Diese Klasse ist in DIN EN 61000-4-6 nicht definiert.)
- C : Vorübergehende Beeinträchtigung (Funktionsverlust), die das Gerät selbst wieder korrigiert.
- D : Vorübergehende Beeinträchtigung (Funktionsverlust), die den Eingriff eines Bedieners und/oder die Rücksetzung des Systems erfordert.
- E : Beeinträchtigung oder Funktionsverlust, die aufgrund eines Schadens am Gerät (Zerstörung, Software- bzw. Datenverlust) nicht mehr korrigierbar sind.

3.4 Kalibrierung und Prüfpegelinstellung

Der in den Normen festgelegte Prüfstrom muss vor der eigentlichen Prüfung kalibriert werden. Hierbei wird der frequenzabhängige Zusammenhang zwischen dem Prüfstrom und einem Referenzparameter (Geräteeinstellung bzw.

Leistungsgröße) ermittelt. Dieser Referenzparameter wird dann bei der Prüfung wieder entsprechend der Kalibrierung eingestellt. Die Kalibrierung muss in einer Kalibriereinrichtung mit einer Schleifenimpedanz von $100\ \Omega$ erfolgen (vgl. Kapitel 2.5). Hierzu ist ein entsprechender Kalibrierhalter (calibration jig, calibration fixture) erforderlich (siehe Bild 2.9 und Bild 4.3). In den Normen DIN EN 61000-4-6 und DIN ISO 11452-4 ist der geometrische Aufbau des Kalibrierhalters festgelegt. Die wichtigsten Abmessungen sind in beiden Normen identisch:

- Äußere Abmessungen: 260 x 120 x 120 mm
- Durchmesser d des Innenleiters: 15 mm
- Breite B des Innenraumes: 70 mm

Unterschiede zwischen den Normen ergeben sich dagegen bei der Prüfpegelinstellung.

DIN EN 61000-4-6 schreibt vor, dass als Referenzparameter die 'Pegelinstellung des Prüfgenerators' (Softwareparameter, Abschwächer-einstellung) bei der Kalibrierung mit unmoduliertem Prüfsignal ermittelt und bei der Prüfung wieder eingestellt werden muss.

Zusätzlich zur Kalibrierung in einer Anordnung mit einer Schleifenimpedanz von $100\ \Omega$ definiert diese Norm Prüfschärfewerte für die Kalibrierung mit einer Schleifenimpedanz von $300\ \Omega$. Diese wird realisiert durch zwei zusätzliche Längswiderstände von $100\ \Omega$ zwischen Kalibrierhalter und $50\text{-}\Omega$ -Abschluss.

Die Einfügungsdämpfung, die sich ergibt, wenn die Haltevorrichtung zusammen mit der montierten und am Eingang mit $50\ \Omega$ abgeschlossenen Stromeinspeisetzange in ein $50\text{-}\Omega$ -System eingefügt wird, darf nicht größer als 1 dB sein. Die hierbei zugrunde liegende Definition der Einfügungsdämpfung unterscheidet sich somit von der üblicherweise von den Herstellern der Stromeinspeisetzangen [46][87] verwendeten (vgl. Kapitel 2.4.1).

Aufgrund der niedrigen Einfügungsdämpfung der Stromeinspeisetzangen besteht eine feste Kopplung zwischen der Primärseite (Verstärkerausgang) und der Sekundärseite (Kabelbaum, CUT). Im Gegensatz zur Kalibrierung mit festen Impedanzverhältnissen, wird der Verstärker bei Störfestigkeitsprüfungen mit veränderlichen Impedanzen belastet. Auch die Ausgangsimpedanz des Verstärkers ist i. Allg. nicht konstant. Diese veränderlichen Impedanzverhältnisse können nach [90] zu unkontrollierbaren Abweichungen des Prüfpegels zwischen

Kalibrierung und Prüfung führen und die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse erheblich reduzieren.

DIN EN 61000-4-6 schreibt deshalb vor, dass die Ausgangsimpedanz des Prüfgenerators (Signalgenerator mit nachgeschaltetem Verstärker) im Bereich $41,7...60 \Omega$ liegen muss ($VSWR \leq 1,2$). Um die Fehlanpassung an der Schnittstelle zwischen dem Verstärker (Prüfgenerator) und der Stromeinspeisenzange zu reduzieren, soll deshalb ein zusätzliches Dämpfungsglied mit einer Einfügungsdämpfung von mindestens 6 dB eingefügt werden. Dadurch werden der Verstärker und das zu prüfende System (Prüfling, Kabelbaum, Zusatzgeräte) impedanzmäßig entkoppelt. Für den gleichen Prüfpegel ist daher eine entsprechend höhere Ausgangsleistung am Verstärker erforderlich.

Bei Verwendung eines 6-dB-Dämpfungsgliedes darf das VSWR des Verstärkerausganges maximal 2,1 betragen, damit das VSWR am Ausgang des Dämpfungsgliedes den maximal zulässigen Wert von 1,2 nicht überschreitet.

Bei der Prüfung wird der Strom im Kabelbaum (Stromsumme) mit Hilfe einer Strommesszange überwacht, so dass der maximal zulässige Strom i_{Max} im Kabelbaum nach Gl. (3.3) nicht überschritten wird.

Für i_{Max} gilt nach Norm:

$$\frac{i_{Max}}{dB(\mu A)} = \frac{i_{Prüf}}{dB(\mu A)} - 3,5 \quad (3.3)$$

Bei dem in **DIN ISO 11452-4** bzw. **ISO 11452-4** beschriebenen 'Prüfverfahren mit einer kalibrierten Einspeisenzange (Substitutionsverfahren)' wird als Referenzparameter die Nettoleistung nach Gl. (2.13) verwendet. Die Vorlaufleistung wird zusätzlich bei Kalibrierung und Prüfung überwacht. Angaben zur Einfügungsdämpfung der Stromeinspeisenzange sind in diesen Normen nicht enthalten.

Die Normen schreiben vor, dass das Prüfsignal bei der Kalibrierung mit unmoduliertem Träger (CW) und bei der Prüfung mit Modulation (AM) den gleichen Spitzenwert haben muss. Das bedeutet, dass bei der Prüfung eine niedrigere Nettoleistung ($P_{Netto,AM}$) einzustellen ist als bei der Kalibrierung ($P_{Netto,CW}$). Unter Berücksichtigung des Modulationsgrades m gilt:

$$P_{Netto,AM} = P_{Netto,CW} \cdot \frac{2 + m^2}{2 \cdot (1 + m)^2} \quad (3.4)$$

Mit dem in der Norm vorgeschriebenen Modulationsgrad $m = 80\%$ ergibt sich:

$$\frac{P_{\text{Netto,AM}}}{\text{dBm}} = \frac{P_{\text{Netto,CW}}}{\text{dBm}} - 3,9 \quad (3.5)$$

Sofern das Stehwellenverhältnis nach Gl. (2.10) im Prüfaufbau kleiner als 1,2:1 ist, darf auch die Vorlaufleistung als Referenzparameter verwendet werden.

Als weiteres Prüfverfahren ist in der Norm das 'Verfahren mit Benutzung einer Strommesszange (geschlossener Regelkreis)' beschrieben. Der Prüfstrom wird hierbei direkt mit Hilfe einer Strommesszange bei der Prüfung gemessen. Hierzu muss die Transferimpedanz der Strommesszange zur Bestimmung des Stromes nach Gl. (2.25) bekannt sein und ggf. vor der Prüfung ermittelt werden.

In der **Richtlinie 95/54/EG** sind der Aufbau und die Schleifenimpedanz der Kalibriereinrichtung nicht explizit angegeben. Als Referenzparameter wird die 'Ausgangsleistung des Stromeinspeisungssystems' angegeben. Wie in DIN ISO 11452-4 ist auch in der EG-Richtlinie vorgeschrieben, dass das Prüfsignal bei Kalibrierung mit unmoduliertem Träger (CW) und bei Prüfung mit Modulation (AM) den gleichen Spitzenwert haben muss.

Die Norm **MIL-STD-462D (CS114)** schreibt die Verwendung der Vorlaufleistung zur Stromeinspeisung als Referenzparameter für die Einstellung der Prüfpegel vor.

Nach Javor [46] ergeben sich dadurch besser kontrollierte Prüfbedingungen als bei der Verwendung des Referenzparameters 'Nettoleistung'. Dieser würde zu unterschiedlichen eingekoppelten Leistungen in den Kabelbaum führen, jeweils abhängig von den Impedanzen des Kabelbaumes und der angeschlossenen Lastimpedanzen.

Die Kalibrierung erfolgt mit unmoduliertem Signal in einer Anordnung mit einer Schleifenimpedanz von $100\ \Omega$. Zusätzlich zu den Prüfströmen ist der maximal zulässige Strom im Kabelbaum in MIL-STD-461 festgelegt. Bei der Prüfung wird der Strom mit Hilfe einer Strommesszange überwacht.

Auch in **DEF STAN 59-41** wird der Referenzparameter Vorlaufleistung zur Einstellung der Prüfpegel in einem Kalibrierhalter (Schleifenimpedanz $100\ \Omega$) vorgeschrieben. Im Gegensatz zu anderen Normen wird im Teil 3 Anhang H dieser Norm die frequenzabhängige Einfügungsdämpfung (siehe Bild 3.2) sowie die Selbstinduktivität und die Eigenresonanzfrequenz (siehe Tabelle 3.9) der zu verwendenden Stromeinspeisungen genau spezifiziert.

Die Eingangsimpedanz des leeren Kalibrierhalters bei reflexionsfreiem Abschluss des zweiten Tores muss im Bereich $50 \pm 5 \Omega$ liegen. Das entspricht einem VSWR von maximal 1,1 am Eingang des Kalibrierhalters.

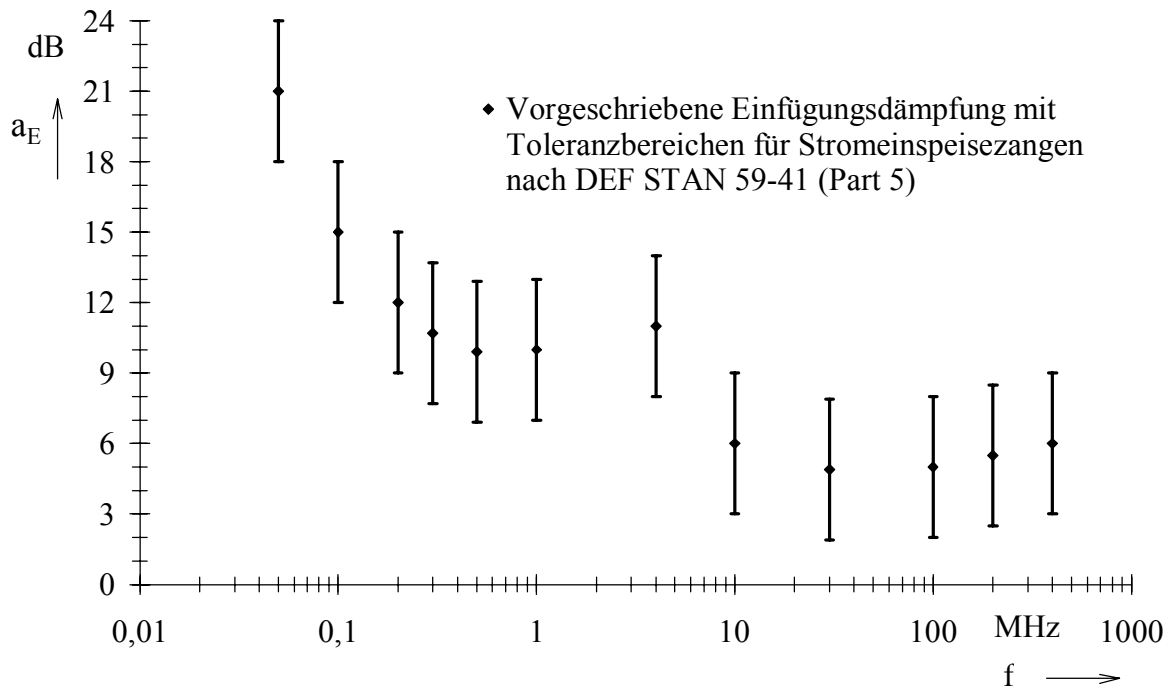


Bild 3.2: Vorgeschriebene Einfügungsdämpfung der Stromeinspeisetzangen nach DEF STAN 59-41

Frequenzbereich	0,05...4 MHz	4...200 MHz	200...400 MHz
Selbstinduktivität ($\pm 20 \%$)	29,2 mH	0,7 mH	0,35 mH
Resonanzfrequenz ($\pm 25 \%$)	1,25 MHz	53,5 MHz	70,0 MHz
Resonanzimpedanz ($\pm 25 \%$)	394 Ω	233 Ω	165 Ω

Tabelle 3.9: Technische Daten von Stromeinspeisetzangen nach DEF STAN 59-41

4 Untersuchungen bei unterschiedlichen Prüfbedingungen

Das Kapitel 4 beschreibt die experimentellen Untersuchungen bei unterschiedlichen Prüfbedingungen. Hierzu wird zunächst die Versuchsmethodik erläutert. Anschließend erfolgt eine Darstellung der Versuchseinrichtung, insbesondere der Übertragungseigenschaften der verwendeten Stromzangen und Kalibrierhalter.

Wegen der besonderen Bedeutung für die Untersuchungen werden der Aufbau, die Funktionsweise und die Eigenschaften des hierzu entwickelten Prüflings und des Zusatzgerätes detailliert beschrieben. Eine Darstellung des Versuchsablaufes und der Versuchsauswertung schließt sich an.

Im Rahmen dieser Arbeit werden wichtige Einflussgrößen des Prüfaufbaus und Prüfablaufes untersucht. Diese werden bei den Untersuchungen als Versuchsparameter variiert. Hierbei müssen die Eigenschaften der Prüfeinrichtung (Mess- und Prüfgeräte) und der Umgebung möglichst konstant bleiben.

Messungen sind jedoch generell mit Unsicherheiten behaftet. Deshalb werden die Beiträge der auftretenden Unsicherheitskomponenten zur Gesamt-Messunsicherheit bestimmt und bei der Bewertung der Versuchsergebnisse berücksichtigt.

4.1 Versuchsmethodik

Bei Störfestigkeitsprüfungen wird der Funktionszustand eines zu prüfenden Gerätes oder Systems in einem genormten Aufbau mit eingepprägter äußerer elektromagnetischer Störgröße nach vorgegebenen Kriterien bewertet. Hierbei können sich unterschiedliche Prüfbedingungen ergeben. Insbesondere können Änderungen geometrischer und elektrischer Einflussgrößen zu unterschiedlichen Störgrößen am Prüflingseingang und damit zu einer entsprechenden Prüflingsbelastung führen.

Diese Einflüsse lassen sich ermitteln, in dem die Störgrößen (Spannungen, Ströme, Leistungen) jeweils direkt am Eingang des Prüflings gemessen und ausgewertet werden. Hierzu ist allerdings ein höherer Messaufwand durch zusätzliche Messeinrichtungen erforderlich.

Deshalb soll für diese Untersuchungen eine Vorgehensweise angewandt werden, bei der ein Prüfling mit bekanntem Störfestigkeitsverhalten lediglich als Indikator für das Erreichen eines bestimmten Störpegels am Eingang des Prüflings dient.

Hierfür wird zunächst das frequenzabhängige Störfestigkeitsverhalten des Prüflings bezüglich seiner Schnittstelle zum Kabelbaum bestimmt. Dazu wird der Prüfling durch direkte galvanische Einkopplung von äußeren Störgrößen an den Eingangstoren gerade so beaufschlagt, dass der Prüfling die Überschreitung eines bestimmten Schwellwertes (Schaltschwelle) und damit eine Änderung des Funktionszustandes (fehlerfreies Betriebsverhalten \Rightarrow Funktionsstörung) meldet.

Anschließend erfolgt die Stromeinspeisung in das Gesamtsystem bestehend aus Prüfling, Leitungsstrang (Kabelbaum) und Zusatzgerät, so dass der Prüfling wiederum eine Änderung des Funktionszustandes signalisiert. Die hierzu jeweils erforderliche äußere Störgröße wird am Prüfgenerator bzw. am Eingang der Stromeinspeisenzange gemessen. Die aufwendigere Messung der Störgrößen am Eingang des Prüflings ist nicht erforderlich.

Der Einfluss elektrischer und geometrischer Einflussgrößen wird dann - bei gleicher Prüflingsbelastung - anhand der hierfür erforderlichen äußeren Störgrößen verglichen und bewertet.

Dabei ergeben sich für die Untersuchungen folgende Anforderungen an den Prüfling:

- Kenntnis des Schwellwertes in Abhängigkeit der Frequenz (Störfestigkeitsprofil),
- Hohe Wiederholpräzision hinsichtlich der Detektion des Schwellwertes,
- Zeitinvarianz der komplexen Eingangsimpedanzen.

4.2 Versuchseinrichtung

4.2.1 Aufbau

Zur Durchführung der Stromeinspeisung mit unterschiedlichen Prüfbedingungen wird ein Versuchsaufbau verwendet, dessen Konfiguration das Bild 4.1 zeigt.

Der Prüfling (Equipment Under Test, EUT) ist über einen Kabelbaum (Leitungsstrang, Conductor Under Test, CUT) bestehend aus mehreren gleichlangen ungeschirmten Adern mit einem Zusatzgerät (Auxiliary Equipment,

AE) verbunden. Die Anordnung ist auf einer Massefläche montiert und befindet sich in einem geschirmten Raum.

Die Einkopplung der Störgröße in den Kabelbaum erfolgt mit Hilfe einer Stromeinspeisetzange, die über einen Doppelrichtkoppler an einen Prüfgenerator angeschlossen ist. Der Richtkoppler ermöglicht in Verbindung mit einem Leistungsmessgerät die gleichzeitige getrennte Messung der vor- und rücklaufenden Welle in der Bezugsebene HF.

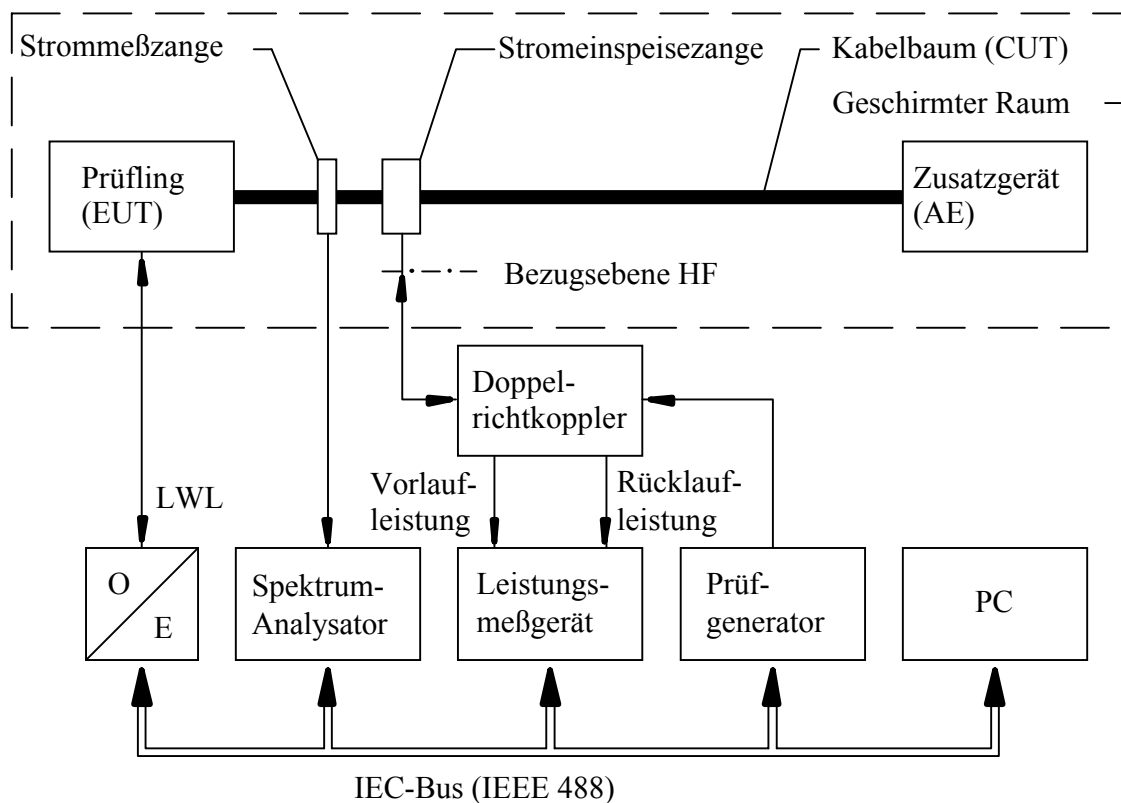


Bild 4.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Durch eine Strommeßzange in Verbindung mit einem Spektrum-Analysator kann die im Kabelbaum zwischen Prüfling und Stromeinspeisetzange fließende Stromsumme gemessen werden.

Der Funktionszustand des Prüflings wird über einen Lichtwellenleiter aus dem geschirmten Raum an einen Steuerrechner (PC) übertragen. Dieser führt die Prüflingsüberwachung, die Kontrolle der Messgeräte über den IEC-Bus sowie die Steuerung des Messablaufes durch.

4.2.2 Messgeräte

Die bei den Untersuchungen verwendeten Messgeräte sind von den Herstellern wie folgt spezifiziert:

- Prüfgenerator, bestehend aus:
 - Signalgenerator SMX, Rohde & Schwarz, 100 kHz...1000 MHz
 - Auflösung bei der Frequenzeinstellung: 10 Hz (100 kHz...100 MHz),
50 Hz (100...500 MHz),
100 Hz (500...1000 MHz)
 - Unsicherheit bei der Frequenzeinstellung: $7 \cdot 10^{-5}$
 - Auflösung bei der PegelEinstellung: 0,1 dB
 - Gesamtfehler des Pegels: 1,5 dB
 - Verstärker 150L, Amplifier Research, 150 W, 10 kHz...220 MHz
 - Harmonische Verzerrungen: < -15 dBc (10 kHz ...130 MHz),
< -30 dBc (130 MHz...220 MHz)
 - Verstärker 10W1000M7, Amplifier Research, 10 W, 1 MHz...1000 MHz
 - Harmonische Verzerrungen: < -22 dBc
- Doppelrichtkoppler DC3001, Amplifier Research, 100 kHz...1000 MHz
 - Koppeldämpfung beider Messkanäle: 39,5...40,5 dB (frequenzabhängig)
 - Unsicherheit der Koppeldämpfung: 0,2 dB (nach Kalibrierprotokoll)
 - Richtdämpfung: > 25 dB (nach Kalibrierprotokoll)
- Leistungsmessgerät bestehend aus:
 - Millivoltmeter URV5, Rohde & Schwarz
 - getrennte Messkanäle zur Messung der vor- und rücklaufenden Welle,
 - Fehlerbeiträge:
 - Grundgerät: 0,013 dB, Nullpunktfehler: 1 % (0,08 dB),
 - Anzeigerauschen: 1% (0,08 dB)
 - HF-Tastkopf URV5-Z7 und 50-Ω-Adapter URV5-Z50, 20 kHz...1000 MHz
 - für jeden Messkanal zur Messung der Wechselspannung (Effektivwert) an 50-Ω-Abschlussimpedanz,
 - Reflexionsfaktor: < 5 % (VSWR < 1,11)
 - Auflösung bei der Pegelmessung: 0,01 dB
 - Fehlerbeiträge:
 - Linearität der HF-Tastköpfe: 0,3 % (0,026 dB)
 - Frequenzgang der HF-Tastköpfe: 7 % (0,59 dB)

- Spektrum-Analysator:
HP 8568B, Hewlett-Packard, 100 kHz...1500 MHz
Unsicherheit bei der Pegelmessung: 2 dB
Auflösung: 0,01 dB
- Stromeinspeisezangen (siehe Kapitel 4.3.1):
FCC F-120-9, Fischer Custom Communications, 10 kHz...230 MHz
95242-1, TEGAM bzw. EATON Corporation, 2...400 MHz
- Strommesszangen (siehe Kapitel 4.3.1):
FCC F-61, Fischer Custom Communications, 1...1000 MHz
94106-1, TEGAM bzw. EATON Corporation, 100 kHz...450 MHz

Für Voruntersuchungen und Kalibrierungen wird zusätzlich ein vektorieller Netzwerk-Analysator eingesetzt, der aus folgenden Komponenten besteht:

- ZPV Vector-Analyzer, Rohde & Schwarz
mit Tuner ZPV-E2 (0,1...1000 MHz) sowie 2 Durchgangsadaptern ZPV-Z1 und 2 Richtkopplern ZPV-E3
Unsicherheit bei der Betragsmessung (Messung des Spannungsverhältnisses der beiden Eingangskanäle):
6 % (0,5 dB) unkalibriert bzw.
1,5 % (0,13 dB) nach Kalibrierung
Unsicherheit bei der Phasenmessung: 4°

4.2.3 Unterschiede gegenüber Normaufbauten

Der für die Untersuchungen verwendete Versuchsaufbau (Bild 4.1 und Bild 4.2) entspricht weitgehend den Vorgaben nach DIN ISO 11452-4. Prüfling und Zusatzgerät (siehe Kapitel 4.4) sind mit der Massefläche und der Wand des geschirmten Raumes elektrisch leitend verbunden. Es bestehen jedoch keine galvanischen Verbindungen zwischen dem System 'Prüfling - Kabelbaum - Zusatzgerät' und der Umgebung außerhalb des geschirmten Raumes.

Als Kabelbäume werden mehradrige ungeschirmte Leitungen Typ YR (n x 0,8) verwendet, bei denen an beiden Enden 9-polige SUB-D-Steckverbinder zum Anschluss des Prüflings und des Zusatzgerätes montiert sind. Die Kabelbäume

sind geradlinig verlegt und haben keine Verzweigungen. Alle Adern eines Kabelbaumes sind gleich lang.

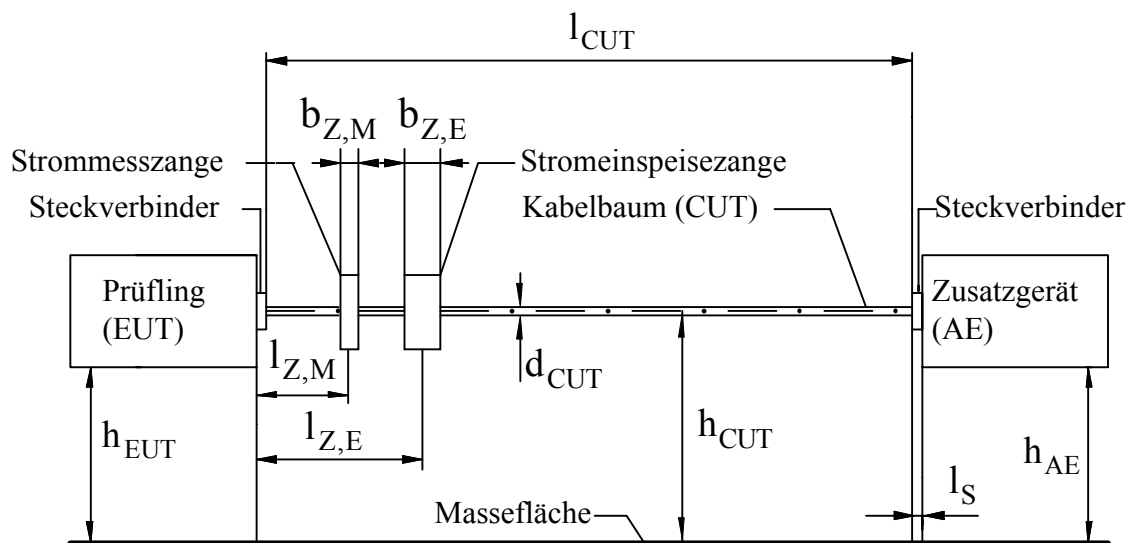


Bild 4.2: Geometrische Abmessungen des Versuchsaufbaus

4.3 Verwendete Stromzangen und Kalibrierhalter

4.3.1 Technische Daten der Stromzangen

Die Untersuchungen erfolgen mit unterschiedlichen Stromeinspeisezangen und Strommesszangen in einzelnen Teilfrequenzbereichen (siehe Tabelle 4.1).

Stromeinspeisezangen		
Frequenzbereich	Typ (Ser.-Nr.)	Hersteller
0,1 ... 100 MHz	F-120-9 (86)	Fischer Custom Communications (FCC)
1 ... 400 MHz	95242-1 (130)	EATON Corporation bzw. TEGAM Inc.

Strommesszangen		
Frequenzbereich	Typ (Ser.-Nr.)	Hersteller
0,1 ... 400 MHz	F-61 (187)	Fischer Custom Communications (FCC)
1 ... 400 MHz	94106-1 (94)	EATON Corporation bzw. TEGAM Inc.

Tabelle 4.1: Verwendete Stromzangen

In Tabelle 4.2 sind die technischen Daten der verwendeten Stromzangen zusammengefasst. Sie sind aus Datenblättern der Hersteller entnommen bzw. durch eigene Messungen (*) ermittelt worden.

Technische Daten der Stromzangen		95242-1	F-120-9	F-61	94106-1
Breite b_Z	*	60 mm	70 mm	19 mm	35 mm
Durchmesser d_Z (außen)	*	102 mm	127 mm	71 mm	81 mm
Durchmesser D (innen, Bohrung)	*	40 mm	40 mm	32 mm	32 mm
Breite b_K (Kern)	*	51,5 mm	58,0 mm	10,0 mm	26,0 mm
Durchmesser D_a (Kern, außen)	*	88,0 mm	88,5 mm	50,0 mm	57,5 mm
Durchmesser D_i (Kern, innen)	*	51,5 mm	50,5 mm	38,0 mm	45,5 mm
Belastbarkeit (CW)		200 W	100 W	20 A	20 A
Belastbarkeit (Puls)				50 A	50 A
Belastbarkeit (NF)				300 A	200 A
Max. Betriebszeit (volle Belastbarkeit)		30 min	30 min		
Schirmung (E-Feld, $f \leq 400$ MHz)				> 40 dB	
Windungsverhältnis (1 : N)		1 : 1	1 : 2		
Eckfrequenz f_g	*			10 MHz	200 MHz
Transferimpedanz $Z_{T,max}$ (für $f > f_g$) (vgl. Kapitel 4.3.4)	*			7 Ω	1...10 Ω

Tabelle 4.2: Technische Daten der verwendeten Stromzangen

4.3.2 Kalibrierhalter

Die Kalibrierung und Bestimmung der charakteristischen Daten der Stromzangen erfolgt in entsprechenden Haltevorrichtungen (Kalibrierhalter). Aufgrund der unterschiedlichen Stromzangen kommen hierbei verschiedene Kalibrierhalter aus Messing mit unterschiedlichen geometrischen Abmessungen nach Bild 4.3 und Tabelle 4.3 zum Einsatz. Diese sind in Anlehnung an die handelsüblichen Modelle FCC BCICF-1 [33], TEGAM 95241-1 [31] sowie die Vorgaben nach DIN EN 61000-4-6 [23] und DIN ISO 11452-4 [45] aufgebaut.

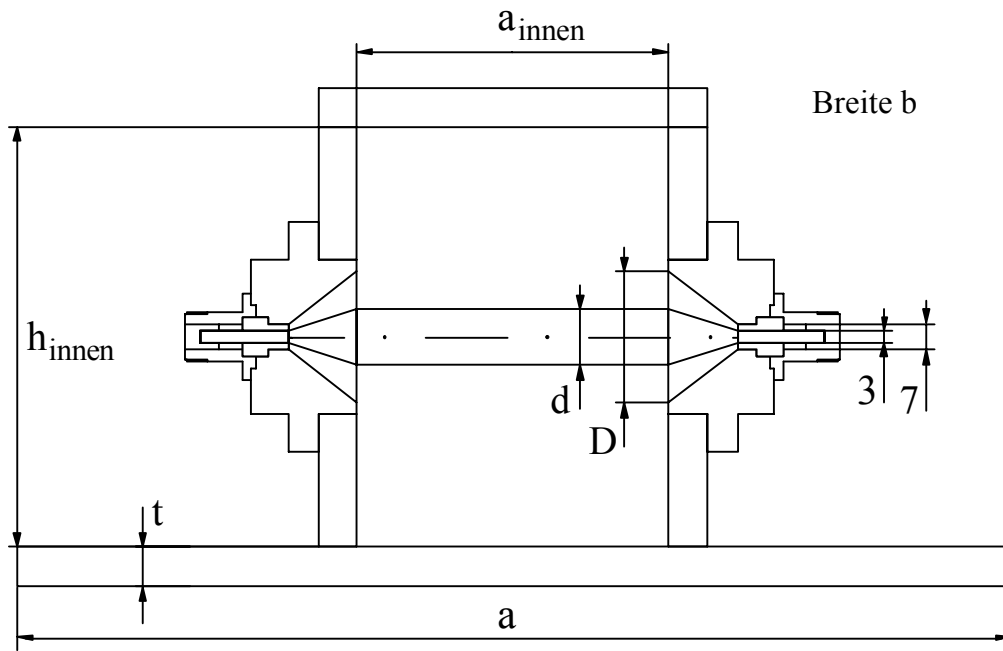


Bild 4.3: Konstruktion der verwendeten Kalibrierhalter

Abmessungen der Kalibrierhalter		Kalibrierhalter 1	Kalibrierhalter 2
Länge	a	200 mm	260 mm
Breite	b	150 mm	150 mm
Dicke	t	10 mm	15 mm
Höhe des Innenraumes	h_{innen}	110 mm	135 mm
Breite des Innenraumes	a_{innen}	22 mm ; 38 mm ; 70 mm	81,3 mm
Durchmesser (Innenleiter)	d	15 mm	15 mm
Durchmesser (Bohrung)	D	34 mm	34 mm

Tabelle 4.3: Abmessungen der verwendeten Kalibrierhalter

Die Innenraumbreite a_{innen} des Kalibrierhalters 1 kann für die Kalibrierungen unterschiedlicher Zangen entsprechend ihrer Breiten eingestellt werden.

Das Stehwellenverhältnis (VSWR) am koaxialen Eingang der verwendeten Kalibrierhalter wird sowohl ohne Stromzangen (Bild 4.4) als auch mit den montierten Stromeinspeisezangen (Bild 4.5) jeweils bei Abschluss der übrigen Tore mit einem 50- Ω -Absorber ermittelt.

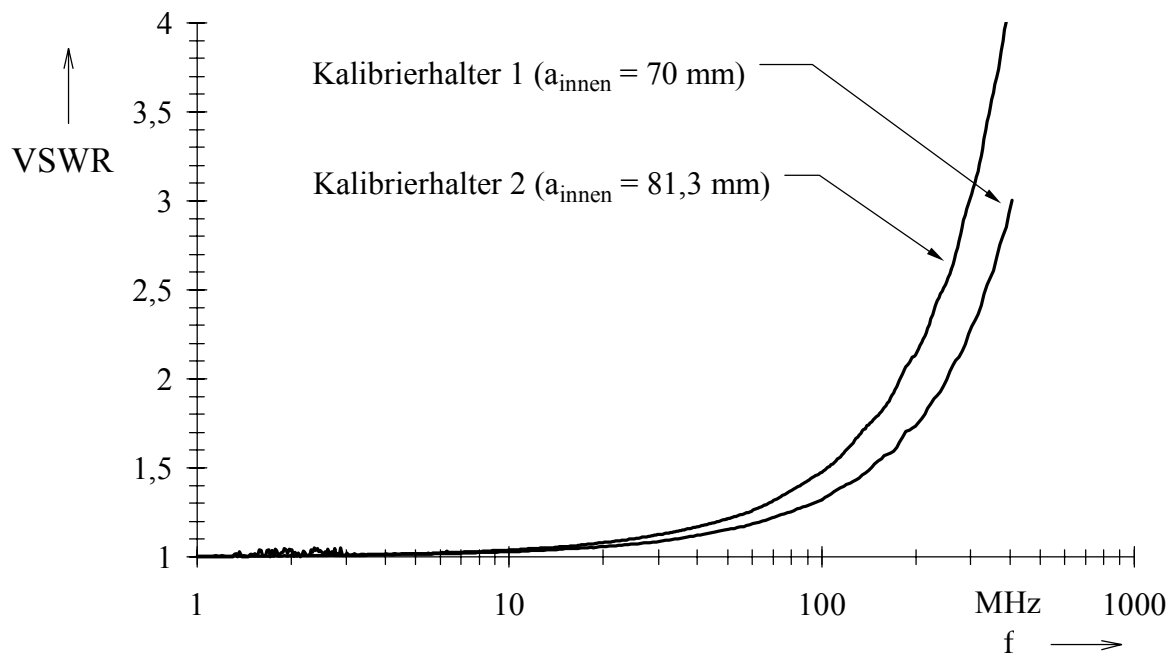


Bild 4.4: VSWR der Kalibrierhalter (leer, ohne Stromzangen)

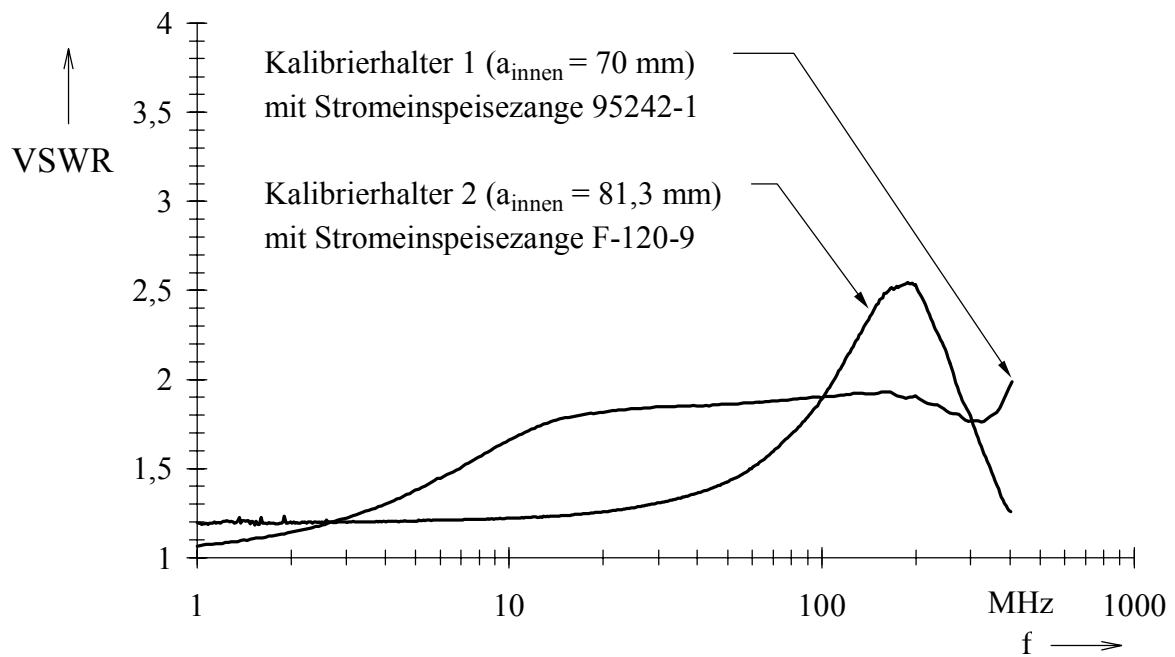


Bild 4.5: VSWR der Kalibrierhalter (Stromeinspeisezangen montiert)

4.3.3 Einfügungsdämpfung

Zur Bestimmung der frequenzabhängigen Einfügungsdämpfungen werden die Stromeinspeisungen jeweils im Kalibrierhalter zentrisch montiert und entsprechend Bild 4.6 über den Doppelrichtkoppler an den Prüfgenerator angeschlossen. Der Kalibrierhalter wird auf der einen Seite mit einem 50-Ω-Leistungsabsorber und auf der anderen Seite über ein Leistungsdämpfungsglied mit einem Spektrum-Analysator (Eingangsimpedanz 50 Ω) zusammenschaltet.

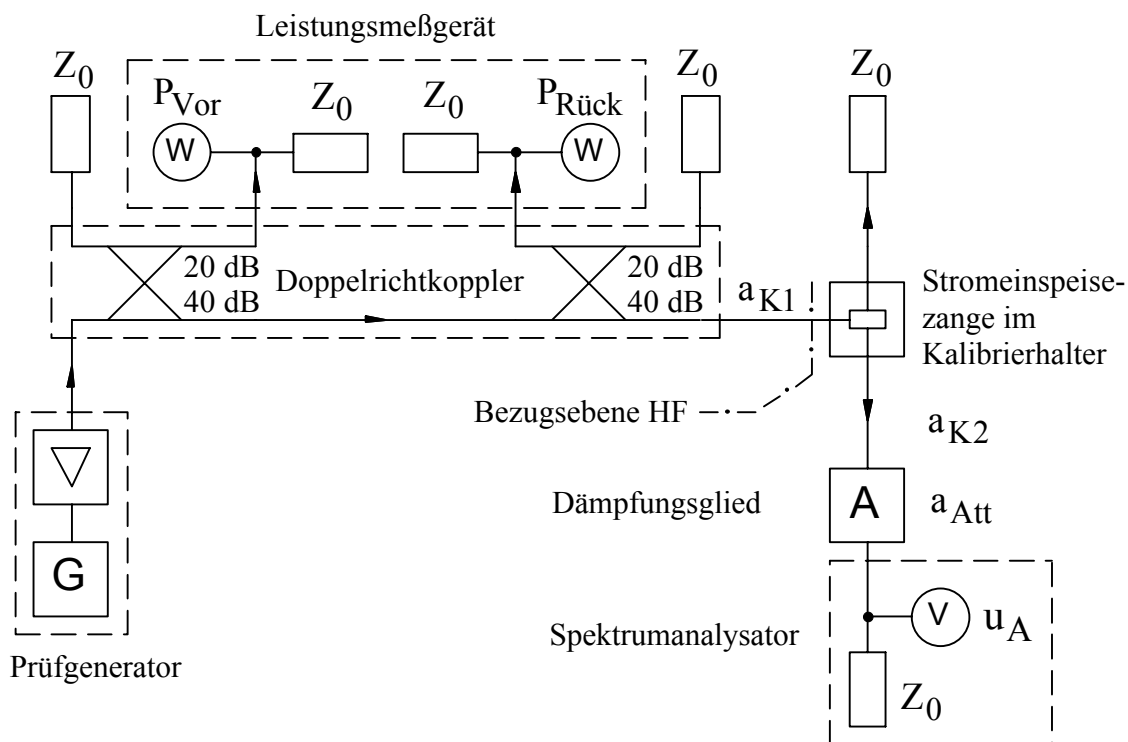


Bild 4.6: Bestimmung der Einfügungsdämpfung der Stromeinspeisungen

Die Einfügungsdämpfung a_E lässt sich aus den Messwerten der Vorlaufleistung P_{Vor} bezüglich der Bezugsebene HF und des Spannungspegels u_A am Spektrumanalysator berechnen. Hierbei sind die Dämpfungen a_{Att} des Leistungsdämpfungsgliedes, a_{K1} der Zuleitungen zwischen Doppelrichtkoppler und Stromeinspeisung sowie a_{K2} der Zuleitungen zwischen Kalibrierhalter und Spektrum-Analysator zu berücksichtigen:

$$\frac{a_E}{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{Vor}}{mW}\right) - \frac{a_{K1}}{dB} - \frac{u_A}{dB(\mu V)} + 107 + \frac{a_{K2}}{dB} + \frac{a_{Att}}{dB} \quad (4.1)$$

(Anmerkung: Bei einem Spannungspegel von 107 dB(μV) am Eingang des Spektrum-Analysators wird dort eine Leistung von 1 mW umgesetzt.)

Die Einfügungsdämpfungen der verwendeten Stromeinspeisenzangen sind dargestellt in Bild 4.7 .

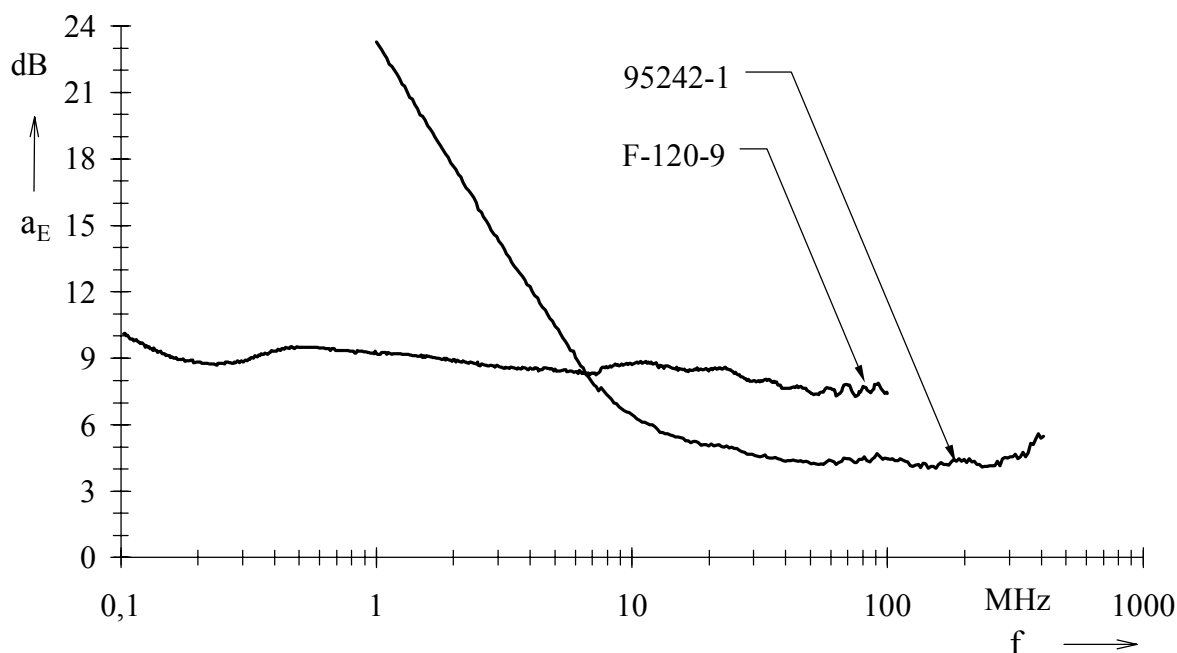


Bild 4.7: Einfügungsdämpfungen der Stromeinspeisenzangen (Messwerte)

In den angegebenen Werten für die Einfügungsdämpfung a_E der Stromeinspeisenzangen sind die Einflüsse der Kalibriereinrichtung jeweils mit enthalten. Diese können entsprechend Kapitel 2.5 ermittelt und zur Korrektur der Einfügungsdämpfung (deembedding) herangezogen werden. Daraus ergibt sich nach Gl. (2.47) die Einfügungsdämpfung $a_{E,Z}$ zwischen dem primärseitigen koaxialen Anschluss der Stromeinspeisenzange und einer sekundärseitig eingefügten Leitung.

In Bild 4.8 ist die gemessene Einfügungsdämpfung a_E der Stromeinspeisenzange 95242-1 sowie die Einfügungsdämpfung $a_{E,Z}$ ohne Einfluss der Kalibriereinrichtung dargestellt.

Durch die Leistungsaufteilung auf die beiden Abschlussimpedanzen des Kalibrierhalters ergibt sich nahezu frequenzunabhängig eine Differenz zwischen a_E und $a_{E,Z}$ von 3,5 dB. Der Anstieg der Einfügungsdämpfung a_E oberhalb von ca. 200 MHz ist zurückzuführen auf die Dämpfung des Kalibrierhalters.

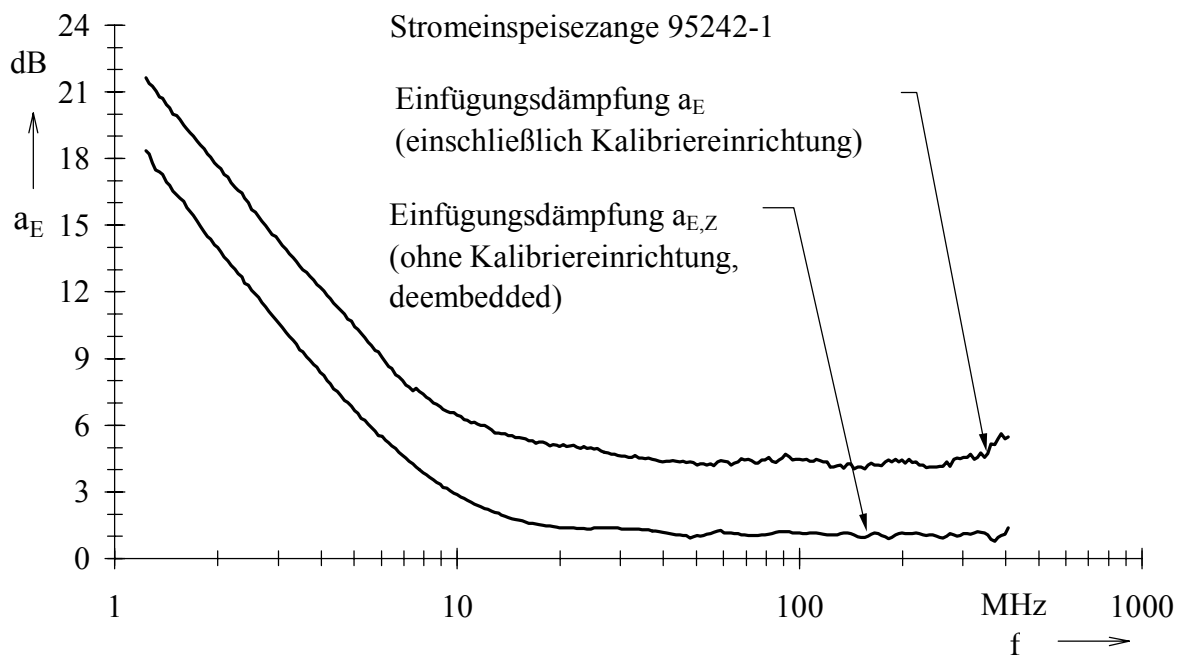


Bild 4.8: Einfügungsdämpfung der Stromeinspeisezange 95242-1 (Messwert) und Einfügungsdämpfung ohne Einfluss der Kalibriereinrichtung

Zur Verifizierung des aussteuerungsunabhängigen Verhaltens der Stromeinspeisezangen werden unterschiedliche Vorlaufleistungen im Bereich 1 mW...10 W für die Bestimmung der Einfügungsdämpfung verwendet. Hierbei ergeben sich keine signifikanten Abweichungen, so dass die Annahme eines linearen Verhaltens der Stromzangen bezüglich des Aussteuerungspegels bei den Untersuchungen zulässig ist.

Ergänzende Untersuchungen haben außerdem gezeigt, dass der Einfluss der Eigenerwärmung auf die Einfügungsdämpfung innerhalb des Betriebstemperaturbereiches bis 60 °C vernachlässigbar ist.

4.3.4 Transferimpedanz

Zur Bestimmung der Transferimpedanzen Z_T der verwendeten Strommesszangen erfolgt die Einkopplung des HF-Signals durch den Prüfgenerator über den Doppelrichtkoppler in den Kalibrierhalter. Der Spektrum-Analysator ist über ein Dämpfungsglied an die Strommesszange angeschlossen (siehe Bild 4.9).

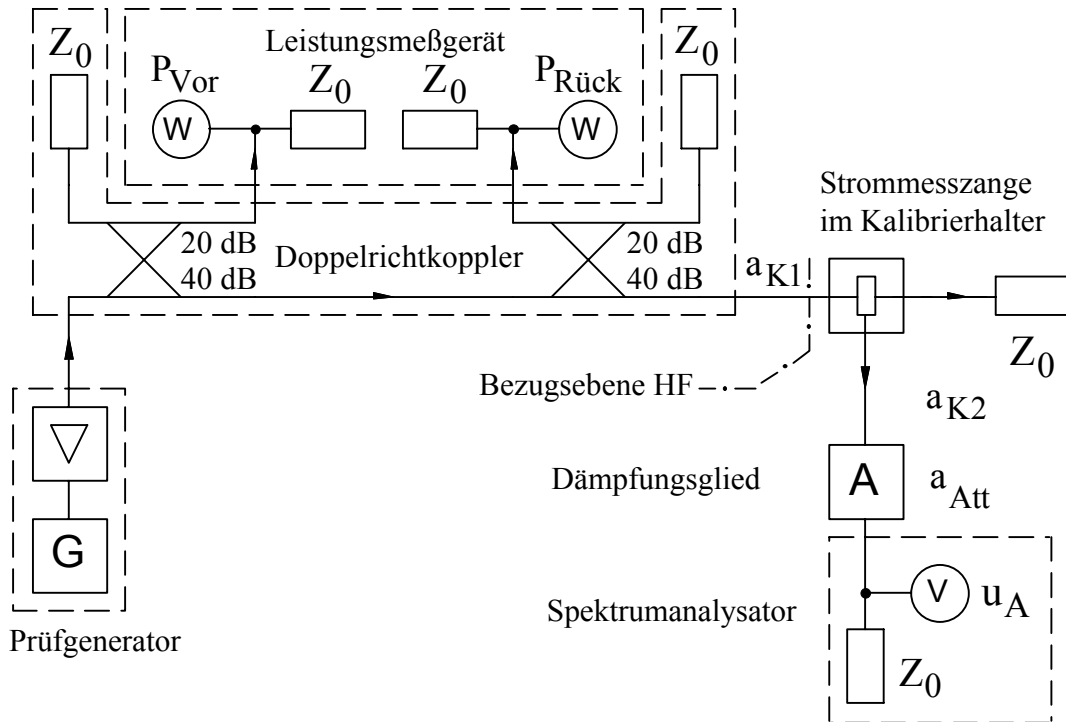


Bild 4.9: Bestimmung der Transferimpedanzen der Strommesszangen

Die Vorlaufleistung P_{Vor} bezüglich der Bezugsebene HF wird mit dem Leistungsmessgerät und der Spannungspegels u_A mit dem Spektrum-Analysator gemessen. Hierbei sind die Dämpfungen a_{Att} des Dämpfungsgliedes, a_{K1} der Zuleitungen zwischen Doppelrichtkoppler und Kalibrierhalter sowie a_{K2} der Zuleitungen zwischen Strommesszange und Spektrum-Analysator zu berücksichtigen.

In logarithmischer Darstellung berechnet sich die Transferimpedanz z_T zu:

$$\frac{z_T}{\text{dB}(\Omega)} = \frac{u_A}{\text{dB}(\mu\text{V})} - \frac{i}{\text{dB}(\mu\text{A})} + \frac{a_{\text{K2}}}{\text{dB}} + \frac{a_{\text{Att}}}{\text{dB}} \quad (4.2)$$

mit

$$\frac{i}{\text{dB}(\mu\text{A})} = 2 \cdot 10 \cdot \log\left(\frac{P_{\text{Vor}}}{\text{mW}}\right) - \frac{a_{\text{K1}}}{\text{dB}} - 34 \quad (4.3)$$

(Anmerkung: Bei einer Vorlaufleistung P_{Vor} von 1 mW am Eingang des Kalibrierhalters fließt dort ein Strom i von -34 dB(μA).)

Die Umrechnung der Transferimpedanz zwischen logarithmischer Darstellung (z_T) und linearer Darstellung (Z_T) erfolgt durch:

$$\frac{z_T}{\text{dB}(\Omega)} = 20 \cdot \log\left(\frac{Z_T}{\Omega}\right) \quad (4.4)$$

Die Transferimpedanzen der verwendeten Strommesszangen zeigt das Bild 4.10.

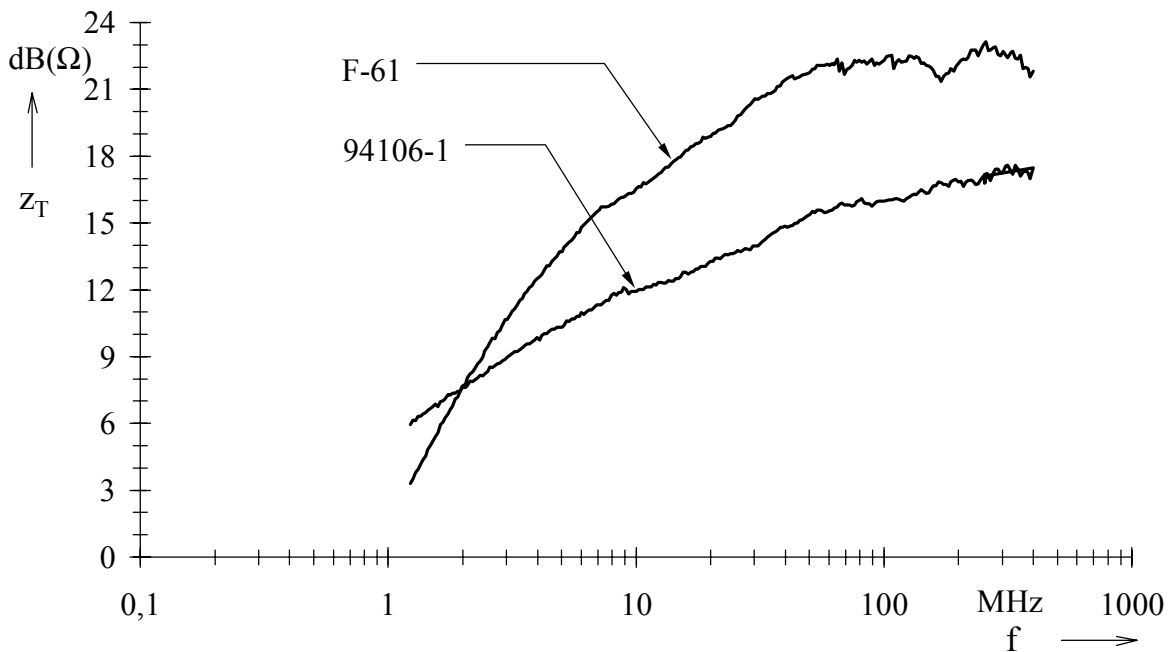


Bild 4.10: Transferimpedanzen der Strommesszangen (Messwerte)

4.3.5 Einfügeimpedanz

Die Einfügeimpedanzen Z_E der verwendeten Strommesszangen werden aus den geometrischen Daten unter Anwendung der Gln. (2.26) und (2.27) analytisch bestimmt. In Bild 4.11 ist der Frequenzgang von $|Z_E|$ dargestellt.

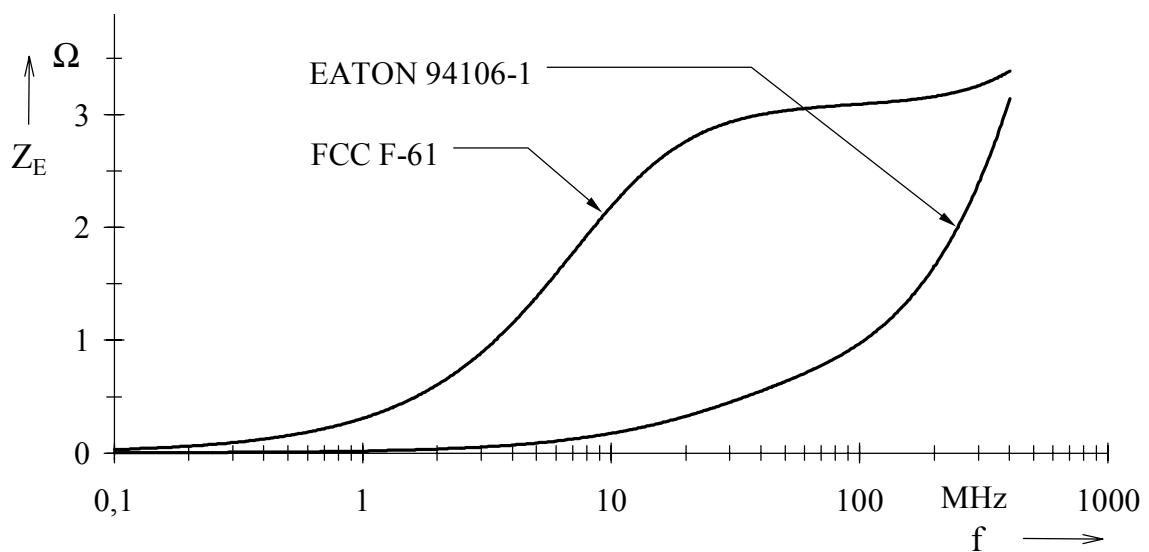


Bild 4.11: Einfügeimpedanzen der Strommesszangen

4.4 Aufbau und Eigenschaften von Prüfling und Zusatzgerät

4.4.1 Aufbau des Prüflings

Der für die Untersuchungen aufgebaute Prüfling besteht aus einer Anordnung von $n=6$ parallel arbeitenden Schwellwertdetektoren nach Bild 4.12. Jeder Detektor signalisiert die Überschreitung eines bestimmten Strompegels am entsprechenden Eingangstor des Prüflings.

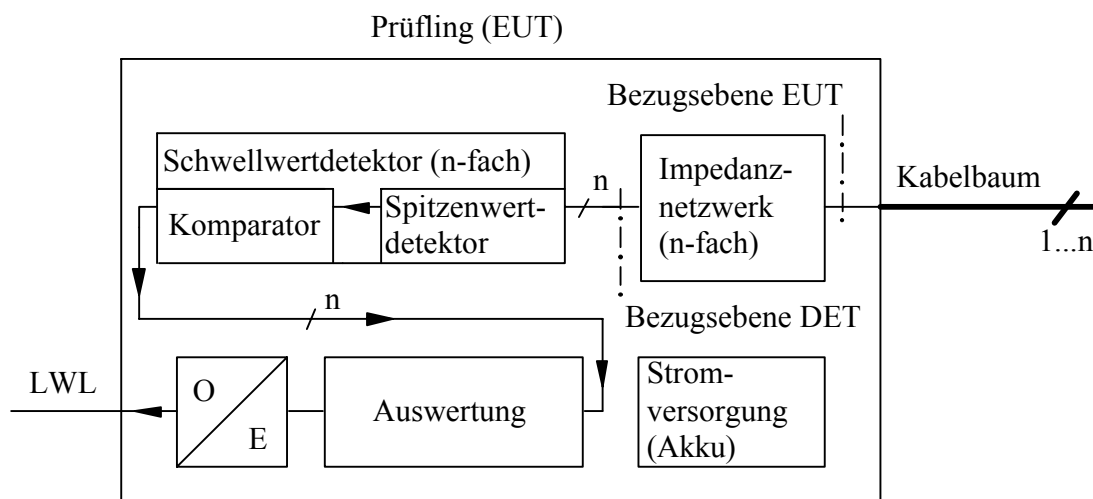


Bild 4.12: Prinzipieller Aufbau des Prüflings

Ein hochfrequenter Eingangsstrom I_{Det} ruft über der asymmetrischen Eingangsimpedanz Z_{Det} eines Schwellwertdetektors die asymmetrische Spannung U_{Det} hervor. Mit einem Spitzenwertdetektor nach Bild 4.13 wird deren Amplitude ermittelt.

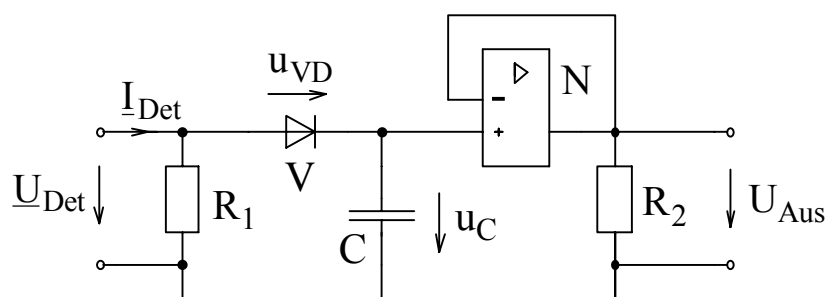


Bild 4.13: Prinzipielle Schaltung eines Spitzenwertdetektors

Hierzu wird der Haltekapazitor C über eine Diode V mit der Durchlassspannung u_{VD} auf die Spannung $u_C = \hat{U}_{\text{Det}} - u_{\text{VD}}$ aufgeladen. Die Diode V sperrt, wenn die Spannung U_{Det} kleiner ist als die Spannung u_C . Der

Impedanzwandler N mit hohem Eingangswiderstand dient zur Entkopplung der Ausgangsspannung U_{Aus} von der Spannung u_C . Die Ausgangsspannung U_{Aus} des Impedanzwandlers ist unter Berücksichtigung der Diodendurchlassspannung dem Spitzenwert der Spannung \underline{U}_{Det} proportional.

Ein nachfolgender Komparator (high-speed) vergleicht die Spannung u_{Aus} mit einem voreingestellten Grenzwert. Die für den Vergleich erforderliche Zeit (input-to-output high response time) beträgt ca. 8 ns.

Eine nachfolgende Auswertung fasst die Ausgangssignale der einzelnen Schwellwertdetektoren zusammen und bewertet den Funktionszustand des Prüflings. Eine fehlerfreie Funktion ('ungestört') besteht, solange kein Schwellwertdetektor eine Überschreitung des Grenzwertes signalisiert. Dagegen wird bei dessen Überschreitung durch einen oder mehrere Schwellwertdetektoren der Funktionszustand des Prüflings als Fehlfunktion ('gestört') bewertet. Der Funktionszustand wird nach elektrisch-optischer Wandlung des entsprechenden Signals über einen Lichtwellenleiter zum Steuerrechner übertragen.

4.4.2 Schaltschwellen der Schwellwertdetektoren

In einer Voruntersuchung sind zunächst die frequenzabhängigen Schaltschwellen aller Schwellwertdetektoren im betrachteten Frequenzbereich von 100 kHz bis 400 MHz zu bestimmen. Dazu wird der Prüfgenerator über den Doppelrichtkoppler (Bezugsebene HF in Bild 4.1) nacheinander direkt an jeden Schwellwertdetektor (Bezugsebene DET) angeschlossen. Bei jedem Frequenzwert erfolgt solange eine sukzessive Erhöhung des Prüfgeneratorpegels, bis der Funktionszustand 'gestört' gemeldet wird. Die hierfür erforderliche Vorlaufleistung P_{Vor}° sowie die auftretende Rücklaufleistung $P_{Rück}^\circ$ bezüglich der Bezugsebene HF werden gemessen.

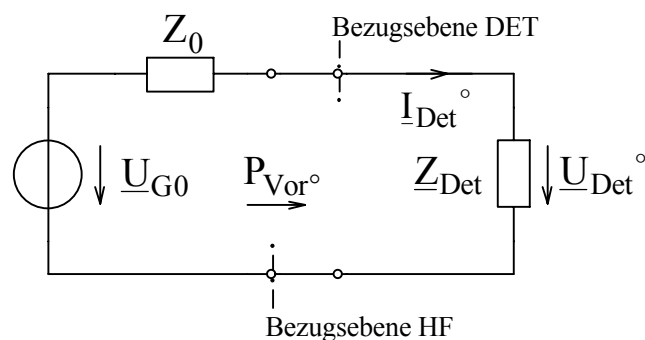


Bild 4.14: Bestimmung der Schaltschwellen der Schwellwertdetektoren

Nach Bild 4.14 ergibt sich die Spannung U_S an einem Schwellwertdetektor bei der Schaltschwelle:

$$U_S = \left| \underline{U}_{\text{Det}} \right| = \sqrt{8 \cdot P_{\text{Vor}} \cdot Z_0} \cdot \left| \frac{\underline{Z}_{\text{Det}}}{Z_0 + \underline{Z}_{\text{Det}}} \right| \quad (4.5)$$

Der Strom I_S beträgt dann:

$$I_S = \left| \underline{I}_{\text{Det}} \right| = \frac{\left| \underline{U}_{\text{Det}} \right|}{\left| \underline{Z}_{\text{Det}} \right|} \quad (4.6)$$

Hierbei ist der Bezugswiderstand $Z_0 = 50 \Omega$ und die Eingangsimpedanz des Schwellwertdetektors $\underline{Z}_{\text{Det}}$. Diese wird mit einem vektoriellen Netzwerkanalysator bestimmt und durch das Ersatzschaltbild in Bild 4.15 beschrieben.

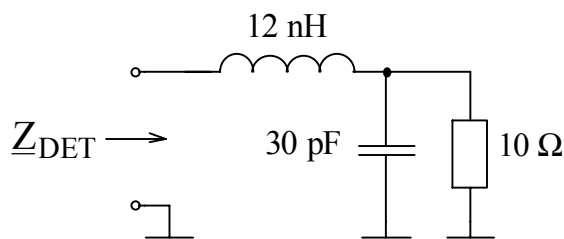


Bild 4.15: Ersatzschaltbild der Eingangsimpedanz des Schwellwertdetektors

Der entsprechende Strompegel in dB(μ A) wird berechnet aus

$$\frac{i_S}{\text{dB}(\mu\text{A})} = 20 \cdot \log\left(\frac{I_S}{\mu\text{A}}\right) \quad (4.7)$$

Bild 4.16 zeigt beispielhaft die Frequenzabhängigkeit des Stromes i_S in einem Schwellwertdetektor bei der Schaltschwelle.

Die Wiederholpräzision (Wiederholstandardabweichung) der frequenzabhängigen Schaltschwellen aller Schwellwertdetektoren wird durch 20 voneinander unabhängige Messungen unter Wiederholbedingungen ermittelt. Sie beträgt 0,3 dB. Die Wiederholbedingungen umfassen nach DIN 1319-1 [21] dasselbe Messverfahren, denselben Beobachter, denselben Ort, dasselbe Messgerät verwendet unter denselben Bedingungen sowie Wiederholung der Messungen innerhalb einer kurzen Zeitspanne.

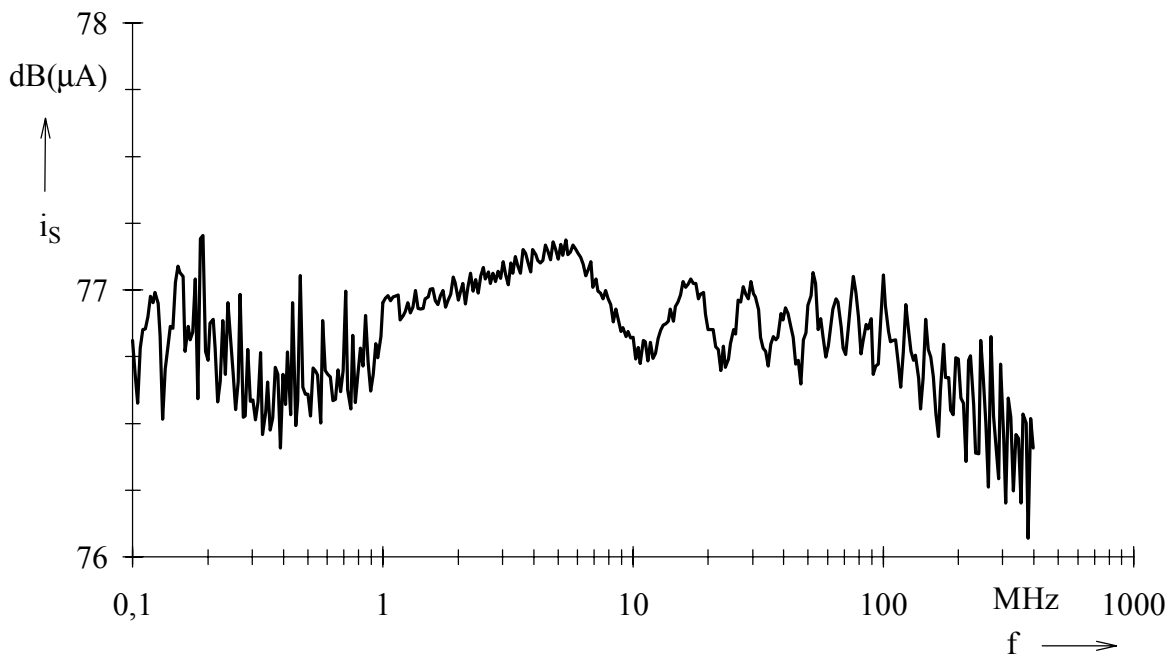


Bild 4.16: Frequenzabhängigkeit des Stromes in einem Schwellwertdetektor bei der Schaltschwelle

4.4.3 Eingangsimpedanzen des Prüflings

Die asymmetrischen Eingangsimpedanzen elektronischer Komponenten und Geräte können einen Bereich von wenigen Ω bis zu mehreren $k\Omega$ umfassen. Um Untersuchungen mit unterschiedlichen praxisrelevanten Eingangsimpedanzen des Prüflings durchführen zu können, ist zwischen jedem der n Prüflingseingänge (Bezugsebene EUT) und dem jeweiligen Spitzenwertdetektor (Bezugsebene DET) ein Impedanznetzwerk eingefügt. Dieses kann nach Bild 4.17 durch eine Reihenschaltung aus den Serienimpedanzen $Z_{V0} \dots Z_{V6}$ beschrieben werden, die wahlweise mit den Schaltern $S_1 \dots S_6$ überbrückt werden.

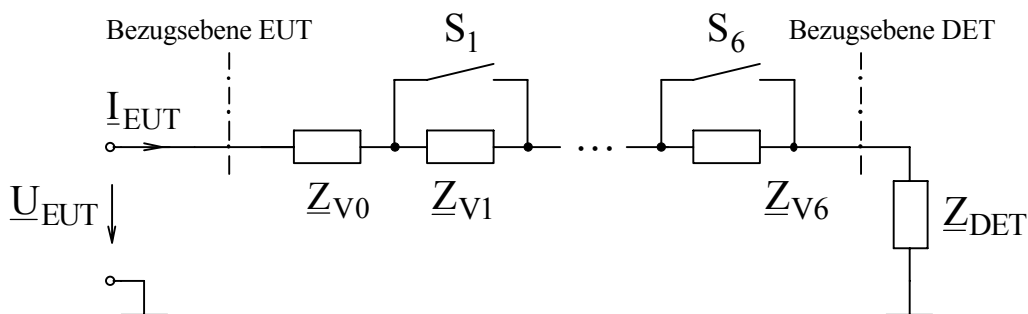


Bild 4.17: Ersatzschaltbild für das Impedanznetzwerk mit stufenweise einstellbaren Impedanzen

Stufe	Bezeichnung der Eingangsimpedanz des Prüflings	Gleichstromwiderstand (gemessen)
0	$\underline{Z}_{EUT,10}$	$10,3 \pm 0,05 \Omega$
1	$\underline{Z}_{EUT,49}$	$49 \pm 0,25 \Omega$
2	$\underline{Z}_{EUT,100}$	$100 \pm 1,2 \Omega$
3	$\underline{Z}_{EUT,149}$	$149 \pm 0,8 \Omega$
4	$\underline{Z}_{EUT,230}$	$230 \pm 1,2 \Omega$
5	$\underline{Z}_{EUT,1k}$	$1000 \pm 5 \Omega$
6	$\underline{Z}_{EUT,2k2}$	$2200 \pm 11 \Omega$

Tabelle 4.4: Bezeichnungen der Eingangsimpedanzen des Prüflings (EUT) und Gleichstromwiderstände bei unterschiedlichen Stufen

Die resultierenden komplexen asymmetrischen Impedanzen \underline{Z}_{EUT} des Prüflingseingangs in der Bezugsebene EUT werden durch Messungen des komplexen Eingangsreflexionsfaktors $\underline{\rho}_{EUT}$ mit dem vektorialen Netzwerkanalysator (siehe Kapitel 4.2.2) ermittelt.

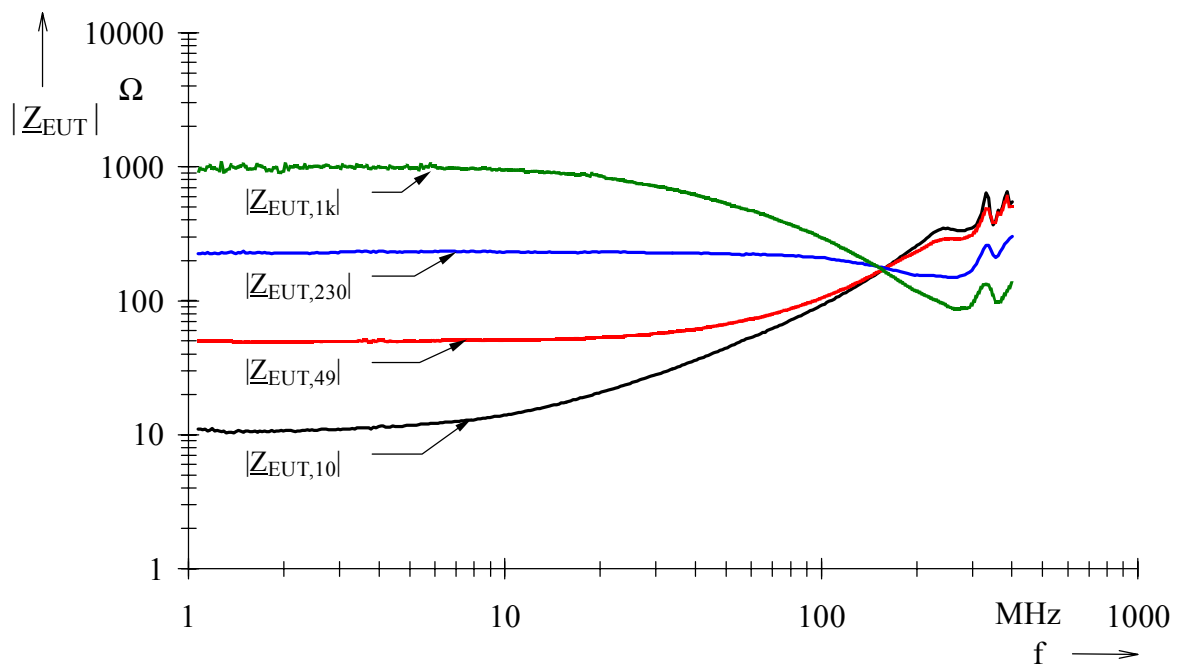


Bild 4.18: Frequenzabhängige Beträge der Eingangsimpedanz des Prüflings bei unterschiedlichen Stufen

Hierbei gilt:

$$\underline{Z}_{EUT} = Z_0 \cdot \frac{1 - \underline{\rho}_{EUT}}{1 + \underline{\rho}_{EUT}} \tag{4.8}$$

Aufgrund parasitärer Kapazitäten und Induktivitäten ergeben sich oberhalb von ca. 10 MHz erhebliche Differenzen zwischen den Beträgen der Eingangsimpedanz \underline{Z}_{EUT} und den entsprechenden Gleichstromwiderständen (siehe Tabelle 4.4 und Bild 4.18).

Die Wirkleistung P_{EUT° , die an einem Prüflingseingang bei der Schaltschwelle aufgenommen wird, hängt ab von der entsprechenden Eingangsimpedanz \underline{Z}_{EUT} . Sie ergibt sich mit den Gln. (4.5) und (4.6) zu

$$P_{EUT^\circ} = \frac{1}{2} \cdot \text{Re} \{ \underline{U}_{EUT} \cdot \underline{I}_{EUT}^* \} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(I_S)^2}{\text{Re} \{ \underline{Z}_{EUT} \}} \cdot |\underline{Z}_{EUT}|^2 \tag{4.9}$$

Bild 4.19 zeigt die Wirkleistung P_{EUT° , berechnet nach Gl. (4.9) aus den Messwerten der Eingangsimpedanz \underline{Z}_{EUT} und dem Strom I_S , der im Schwellwertdetektor bei der Schaltschwelle fließt.

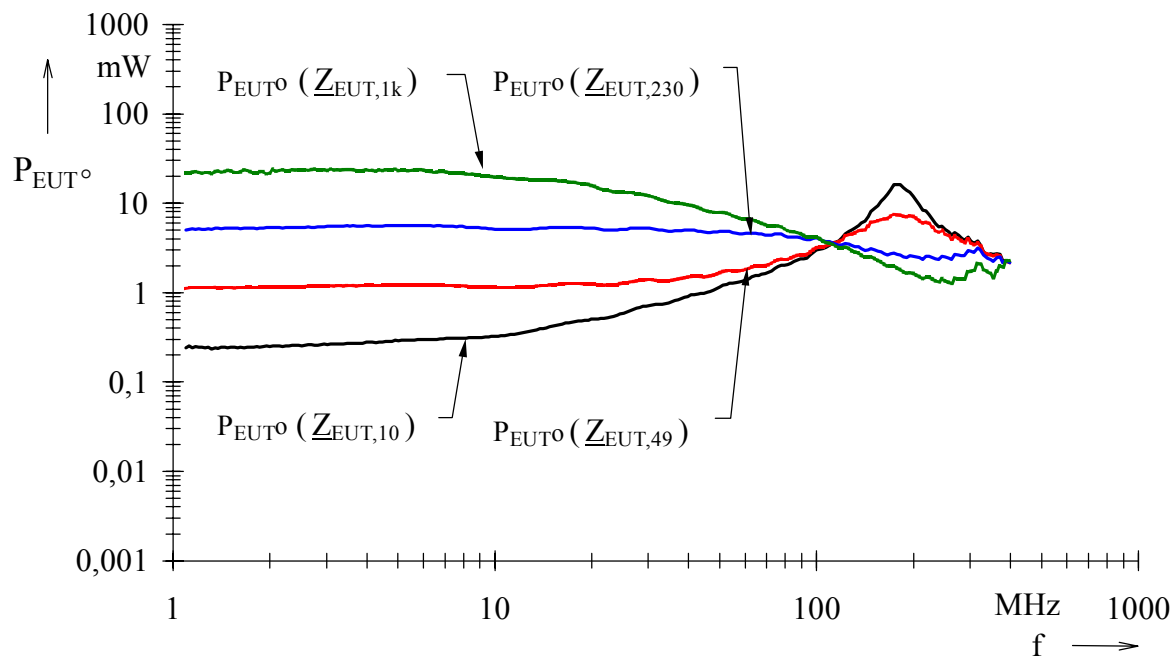


Bild 4.19: Aufgenommene Wirkleistung P_{EUT° an einem Prüflingseingang bei der Schaltschwelle, jeweils bei unterschiedlichen Stufen der Eingangsimpedanz \underline{Z}_{EUT}

4.4.4 Aufbau des Zusatzgerätes

Für die Untersuchungen mit unterschiedlichen Belastungen des Kabelbaumes wird als Zusatzgerät (AE) eine passive Anordnung nach Bild 4.20 verwendet. Hierbei kommt das gleiche Impedanznetzwerk mit stufenweise einstellbaren Eingangsimpedanzen wie für den Prüfling zum Einsatz (vgl. Bild 4.17).

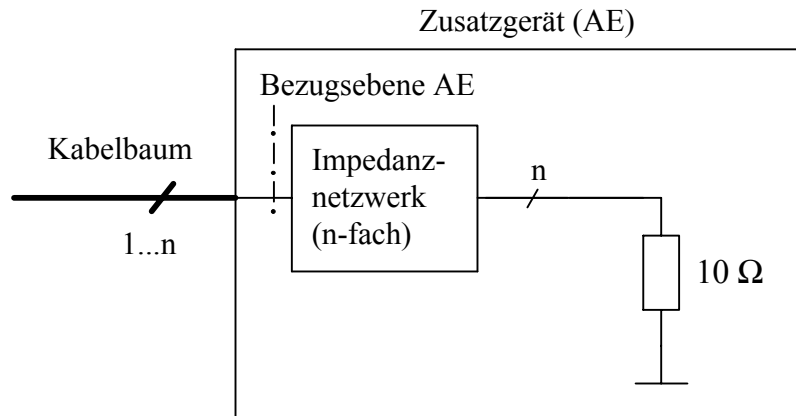


Bild 4.20: Prinzipieller Aufbau des Zusatzgerätes (AE)

Der Frequenzgang der Eingangsimpedanzen Z_{AE} des Zusatzgerätes bei unterschiedlichen Stufen ist in Bild 4.21 dargestellt. Signifikante Unterschiede zwischen Z_{AE} und Z_{EUT} treten oberhalb von ca. 300 MHz auf.

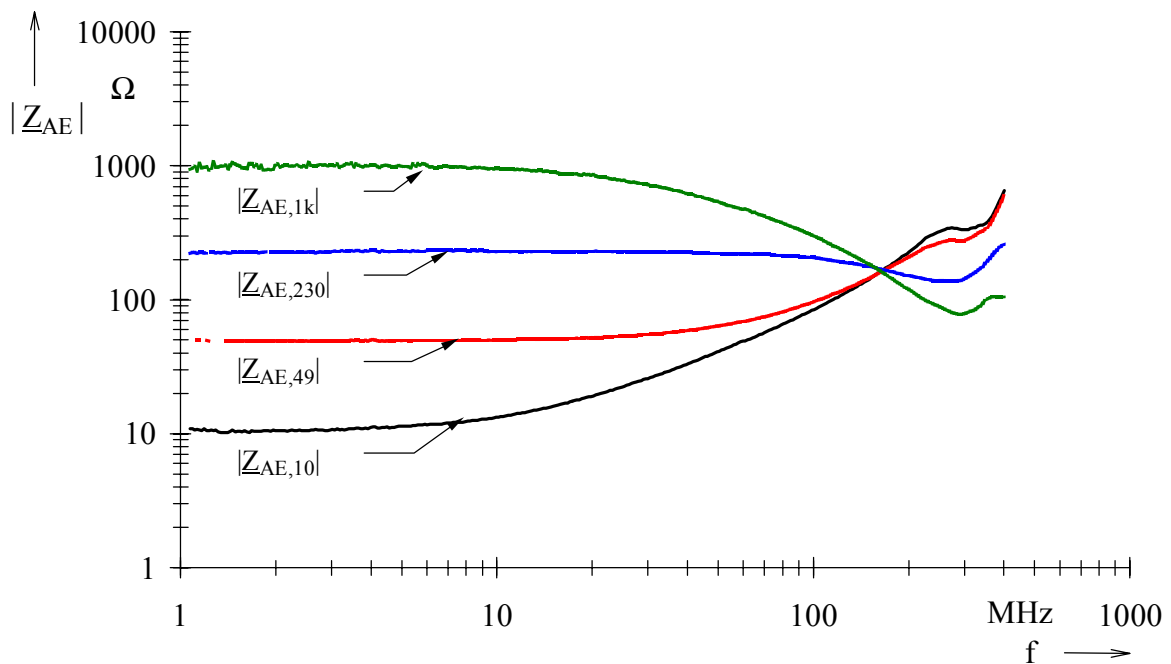


Bild 4.21: Frequenzabhängige Beträge der Eingangsimpedanz des Zusatzgerätes bei unterschiedlichen Stufen

4.5 Versuchsablauf

In **Voruntersuchungen** wurden zunächst das frequenzabhängige Störfestigkeitsverhalten des Prüflings und die Eigenschaften des Zusatzgerätes bezüglich der Schnittstelle zum Kabelbaum sowie die Übertragungseigenschaften der Stromzangen ermittelt.

Durch **Kalibrierung** der Stromeinspeisezangen soll nun in einem weiteren Schritt die Bestimmung des frequenzabhängigen Zusammenhanges zwischen den in den Normen angegebenen Prüfströmen $i_{\text{Prüf}}$ und den hierfür jeweils erforderlichen Leistungen P_{Vor} und P_{Netto} am Eingang der Stromeinspeisenzange (Bezugsebene HF) erfolgen. Hierzu wird der bereits zur Bestimmung der Einfügungsdämpfung verwendete Aufbau nach Bild 4.6 eingesetzt.

Für jede Stromeinspeisenzange ergeben sich die frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen $k_{\text{Vor}}(f)$ sowie $k_{\text{Netto}}(f)$. Es gilt:

$$\frac{k_{\text{Vor}}(f)}{\text{dB}} = \frac{i_{\text{Prüf}}(f)}{\text{dB}(\mu\text{A})} - \frac{p_{\text{Vor}}(f)}{\text{dB(m)}} \quad (4.10)$$

mit

$$\frac{p_{\text{Vor}}(f)}{\text{dB(m)}} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{\text{Vor}}(f)}{\text{mW}}\right) \quad (4.11)$$

sowie

$$\frac{k_{\text{Netto}}(f)}{\text{dB}} = \frac{i_{\text{Prüf}}(f)}{\text{dB}(\mu\text{A})} - \frac{p_{\text{Netto}}(f)}{\text{dB(m)}} \quad (4.12)$$

mit

$$\frac{p_{\text{Netto}}(f)}{\text{dB(m)}} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{\text{Netto}}(f)}{\text{mW}}\right) \quad (4.13)$$

Der im Kalibrierhalter fließende Strom $i_{\text{Prüf}}$ wird hierbei aus dem gemessenen Spannungspegel u_A (siehe Bild 4.6) berechnet:

$$\frac{i_{\text{Prüf}}(f)}{\text{dB}(\mu\text{A})} = \frac{u_A(f)}{\text{dB}(\mu\text{V})} - 34 + \frac{a_{K2}(f)}{\text{dB}} + \frac{a_{\text{Att}}(f)}{\text{dB}} \quad (4.14)$$

Durch **Stromeinspeisung** in den Kabelbaum können nun die Einflüsse elektrischer und geometrischer Größen des Prüfaufbaus untersucht werden.

Zunächst wird hierfür eine Bezugsmessung mit dem Versuchsaufbau nach Kapitel 4.2.3 durchgeführt. Aufgrund der verwendeten Stromzangen und Messgeräte sind getrennte Untersuchungen in den Frequenzbereichen 0,1...100 MHz und 1...400 MHz notwendig. Um zusätzliche Messunsicherheiten zu vermeiden und die Reproduzierbarkeit zu erhöhen, wird im Gegensatz zu den Vorgaben in den Störfestigkeitsnormen ein unmoduliertes Prüfsignal (CW) verwendet. Dieses ist sinnvoll, da der Einfluss unterschiedlicher Spektren und Zeitfunktionen der Störgrößen (impulsförmig, moduliert) auf die Prüflingsstörfestigkeit nicht Gegenstand dieser Untersuchungen ist.

Die Frequenzschrittweite beträgt 0,5 % der Startfrequenz bzw. des vorherigen Frequenzwertes. Die entsprechenden Anforderungen der Normen DIN EN 61000-4-6 und DIN ISO 11452-4 werden somit erfüllt.

Für jeden Frequenzschritt f wird der Pegel des Prüfgenerators sukzessive soweit erhöht, bis eine Prüflingsreaktion auftritt. Der hierbei eingestellte Prüfgeneratorpegel wird mit p_{Gen° bezeichnet. Um ungewollte Reaktionen durch nicht reproduzierbare Störempfindlichkeiten des Prüflings während der Pegeleinstellung (z.B. durch Schaltvorgänge des Prüfgenerators) zu vermeiden, ist die maximal zulässige Geschwindigkeit der Pegeländerung zu beachten.

Der beim Auftreten der Prüflingsreaktion vorhandene Leistungspegel der vorlaufenden Welle p_{Vor° und der rücklaufenden Welle $p_{\text{Rück}^\circ}$ am Eingang der Stromeinspeisenzange wird gemessen. Bei Verwendung einer Strommesszange wird außerdem der Spannungspegel u_{M° am Ausgang der Zange gemessen. Es ergibt sich somit ein Datensatz $V \{f, p_{\text{Gen}^\circ}, p_{\text{Vor}^\circ}, p_{\text{Rück}^\circ}, u_{\text{M}^\circ}\}$.

Anschließend wird der Pegel des Prüfgenerators schrittweise soweit abgesenkt, dass der Prüfling keine Reaktion mehr anzeigt, anschließend um weitere 20 dB.

Weitere Messungen erfolgen mit unterschiedlichen Prüfbedingungen gegenüber der Bezugsmessung. Hierzu werden jeweils einzelne oder mehrere Versuchsparameter (siehe Kapitel 4.7) geändert.

4.6 Versuchsauswertung

Die Störgröße am Prüflingseingang soll bei der Änderung der Versuchsparameter gleich bleiben. Deshalb müssen hierzu jeweils unterschiedliche äußere Störgrößen durch Stromeinspeisung in den Kabelbaum eingekoppelt werden, um eine Prüflingsreaktion auszulösen.

Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Kalibrierung der Stromeinspeisungen lassen sich die hierfür erforderlichen äußeren Störgrößen durch entsprechende Pegel des Prüfstromes $i_{\text{Prüf}}^{\circ}$ angeben. Anschließend kann ein Vergleich der jeweiligen Prüfströme bei unterschiedlichen Versuchsparametern durchgeführt werden.

Zunächst werden für jeden Datensatz V die zugehörigen Pegel des Prüfstromes ermittelt. Je nachdem, welcher Referenzparameter (Vorlaufleistung oder Nettoleistung) bei Kalibrierung und Prüfung verwendet wird, ergeben sich unterschiedliche Werte:

a) Referenzparameter Vorlaufleistung:

$$\frac{i_{\text{Prüf}}^{\circ}(f)}{\text{dB}(\mu\text{A})} = \frac{i_{\text{Prüf,Vor}}^{\circ}(f)}{\text{dB}(\mu\text{A})} = \frac{p_{\text{Vor}}^{\circ}(f)}{\text{dB}(m)} + \frac{k_{\text{Vor}}(f)}{\text{dB}} \quad (4.15)$$

b) Referenzparameter Nettoleistung:

$$\frac{i_{\text{Prüf}}^{\circ}(f)}{\text{dB}(\mu\text{A})} = \frac{i_{\text{Prüf,Netto}}^{\circ}(f)}{\text{dB}(\mu\text{A})} = \frac{p_{\text{Netto}}^{\circ}(f)}{\text{dB}(m)} + \frac{k_{\text{Netto}}(f)}{\text{dB}} \quad (4.16)$$

Hierbei wird Linearität bezüglich der Aussteuerung, d.h. ein linearer Zusammenhang zwischen dem Quadrat des Prüfstromes bei der PrüfpegelEinstellung und der Vorlaufleistung bzw. Nettoleistung vorausgesetzt:

$$P_{\text{Vor}} \sim (I_{\text{Prüf}})^2 \quad \text{bzw.} \quad P_{\text{Netto}} \sim (I_{\text{Prüf}})^2 \quad (4.17)$$

Ein hoher Wert des Prüfstromes $i_{\text{Prüf}}^{\circ}$ bedeutet, dass eine entsprechend große äußere Störgröße in das zu prüfende System eingekoppelt werden muss, um eine Reaktion des Prüflings hervorzurufen. Dagegen zeigt sich eine hohe Störempfindlichkeit des Systems anhand eines niedrigen Prüfstromes.

Die Ströme und Spannungen in den einzelnen Leitern des Kabelbaumes ergeben sich entsprechend der eingekoppelten Leistung sowie der Impedanzverhältnisse.

Die Verwendung des Referenzparameters 'Vorlaufleistung' führt bei der Prüfung zur Einkopplung der gleichen Leistung in die Stromeinspeisenzange, die auch bei der Kalibrierung verwendet wurde. Hierbei ist also die Amplitude der Störquelle (Spannungsquelle in Bild 2.8) bezogen auf die Kalibrierung fest vorgegeben. Dadurch ergeben sich nach Javor [46] besser kontrollierte Prüfbedingungen als bei Verwendung des Referenzparameters 'Nettleistung'.

Wird hingegen die Nettleistung bei Kalibrierung und Prüfung konstant gehalten, so hängt die Amplitude der Störquelle von der asymmetrischen Impedanz des gesamten Kabelbaumes an der Einkoppelstelle ab. Diese wird insbesondere durch die Einflussgrößen des jeweiligen Prüfaufbaus stark beeinflusst (siehe Kapitel 4.9).

Die in die Stromeinspeisenzange eingekoppelte Leistung stimmt daher bei Kalibrierung und Prüfung mit dem Referenzparameter 'Nettleistung' i. Allg. nicht überein.

4.7 Versuchsparameter

Für die Untersuchung der Einflussgrößen von Prüfaufbau und Prüfablauf auf das Prüfergebnis bei Stromeinspeisung wird zunächst eine **Bezugsmessung** mit folgenden Einstellungen durchgeführt (vgl. Kapitel 4.5 und Bild 4.2):

- 1-adriger Kabelbaum mit $d_{\text{CUT}} = d_{\text{Isol}}$, Aderdurchmesser $d_{\text{Ader}} = 0,8 \text{ mm}$, Durchmesser der Aderisolation $d_{\text{Isol}} = 1,5 \text{ mm}$
- Länge des Kabelbaumes $l_{\text{CUT}} = 1 \text{ m}$, Länge der Steckverbinder $l_{\text{S}} = 35 \text{ mm}$
- Abstand des Kabelbaumes von der Massefläche $h_{\text{CUT}} = 50 \text{ mm}$
- Abstand zwischen Prüfling und Mitte der Stromeinspeisenzange $l_{\text{Z,E}} = 150 \text{ mm}$
- Eingangsimpedanz des Prüflings $Z_{\text{EUT}} = Z_{\text{EUT},10}$, Eingangsimpedanz des Zusatzgerätes $Z_{\text{AE}} = Z_{\text{AE},10}$
- Stromeinspeisenzange 95242-1, Verstärker 10W1000M7, keine Strommesszange, Referenzparameter 'Vorlaufleistung'

Anschließend erfolgen weitere Messungen, bei denen jeweils einzelne oder mehrere elektrische und geometrische Parameter (Versuchsparameter) gegenüber der Bezugsmessung verändert werden.

Bei allen Messungen liegt die Umgebungstemperatur im Bereich $(21 \pm 3) ^\circ\text{C}$ und die relative Luftfeuchtigkeit im Bereich $(50 \pm 20) \%$, so dass hierdurch keine signifikante Beeinflussung der Prüfeinrichtung sowie des Prüflings erfolgt.

Folgende Einflussgrößen werden als **Versuchsparameter** bei den Messungen variiert:

- **Anzahl der Adern im Kabelbaum**

Für die Untersuchungen werden ungeschirmte Kabelbäume mit unterschiedlicher Anzahl von Adern gemäß Tabelle 4.5 verwendet. Die Isolation der Adern sowie der zusätzliche Mantel des 3-adrigen und 6-adrigen Kabelbaumes besteht aus Polyethylen.

Kabelbaum	Draht	Leitung YR 3 x 0,8	Leitung YR 6 x 0,8
Anzahl der Adern	1	3	6
Durchmesser der Adern d_{Ader}	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm
Durchmesser der Isolation der Adern d_{Sol}	1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm
Durchmesser des Kabelbaumes d_{CUT}	1,5 mm	4,6 mm	6,0 mm

Tabelle 4.5: Anzahl der Adern im Kabelbaum

- **Länge des Kabelbaumes**

Bei allen Messungen sind die Kabelbäume geradlinig verlegt und haben keine Verzweigungen.

Die Längen l_{CUT} der verwendeten Kabelbäume betragen 0,4 m ; 1 m ; 3,5 m mit einer Unsicherheit von 1 mm. Der Abstand zwischen Prüfling und Zusatzgerät ergibt sich nach Bild 4.2 zu $l_{\text{CUT}} + 2 \cdot l_{\text{S}}$.

- **Abstand des Kabelbaumes von der Massefläche**

Die Kabelbäume werden horizontal in unterschiedlichen Abständen h_{CUT} zur Massefläche 30 mm ; 50 mm ; 60 mm montiert. Außerdem werden Messungen an einem Kabelbaum durchgeführt, dessen Abstand zur Massefläche von 50 mm an den Kabelbaumenden (Steckverbindern) linear auf 5 mm zur Mitte des Kabelbaumes abfällt (50...5...50 mm).

- **Abstand der Stromeinspeisetzange vom Prüfling**

Die Stromeinspeisetzange wird jeweils an unterschiedlichen Positionen entlang des Kabelbaumes angeordnet. Der Abstand $l_{Z,E}$ zwischen Prüfling (EUT) und Stromeinspeisetzange (Mitte der Zange) (vgl. Bild 4.2) beträgt hierbei 100 mm ; 140 mm ; 150 mm ; 160 mm ; 300 mm. Die Unsicherheit der Längenangaben beträgt 1 mm.

- **Verwendung zusätzlicher Strommesszangen**

Für weitere Untersuchungen werden zusätzliche Strommesszangen (F-61 und 94106 nach Tabelle 4.1) zwischen Prüfling und Stromeinspeisetzange montiert. Der Abstand zwischen Prüfling (EUT) und Strommesszange (Mitte der Zange) beträgt $l_{Z,M} = (55 \pm 1)$ mm .

- **Eingangsimpedanzen von Prüfling und Zusatzgerät**

Die Untersuchungen erfolgen mit unterschiedlichen Eingangsimpedanzen von Prüfling und Zusatzgerät nach Tabelle 4.4 sowie Bild 4.18 und Bild 4.21.

- **Referenzparameter für die Einstellung des Prüfpegels**

Bei den Prüfungen mit Stromeinspeisung und den vorangegangenen Kalibrierungen der Stromeinspeisetzangen werden sowohl die Vorlaufleistung als auch die Nettoleistung gemessen. Mit den Gln. (4.10) bis (4.16) lässt sich für beide Referenzparameter der jeweilige Pegel des Prüfstromes $i_{\text{Prüf}}$ berechnen.

- **Unterschiedliche Stromeinspeisetzangen und Verstärker**

Zur Untersuchung des gesamten Frequenzbereiches von 0,1...400 MHz sind unterschiedliche Stromeinspeisetzangen und Verstärker nach Tabelle 4.6 erforderlich. Im Frequenzbereich 1...100 MHz werden Vergleichsmessungen mit beiden Konfigurationen durchgeführt.

Frequenzbereich	Untersuchungen mit Stromeinspeisetzange F-120-9 und Verstärker 150L	Untersuchungen mit Stromeinspeisetzange 95242-1 und Verstärker 10W1000M7
0,1...1 MHz	●	
1...100 MHz	●	●
100...400 MHz		●

Tabelle 4.6: Unterschiedliche Stromeinspeisetzangen und Verstärker

4.8 Unsicherheitsbetrachtungen

Bei den Messungen mit den Versuchsparametern nach Kapitel 4.7 müssen die Eigenschaften der Prüfeinrichtungen (Mess- und Prüfgeräte), des Prüflings und der Prüfumgebung konstant bleiben (gleiche Randbedingungen).

Hinweise für die Bestimmung der Unsicherheiten beim Messen sind u.a. in [20] [21][22][28] angegeben. Zur Ermittlung der Gesamt-Messunsicherheit werden zunächst die Standardunsicherheiten der einzelnen Unsicherheitskomponenten bei der Messung bestimmt und daraus die kombinierte Standardunsicherheit und die erweiterte Unsicherheit berechnet.

In [20] werden zwei Methoden zur Bestimmung der Standardunsicherheit unterschieden:

Bei der Ermittlungsmethode A wird von einer Normalverteilung der Messabweichungen ausgegangen. Mit Hilfe statistischer Verfahren werden aus einer ausreichenden Anzahl von Messungen die statistischen Parameter Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Dieses Verfahren ist nach Stecher [81] zur Bestimmung der Messunsicherheit einer Einzelkomponente, jedoch nicht zur Bestimmung der Gesamt-Messunsicherheit, z.B. einer Funkstörspannungsmessung geeignet.

Die Bestimmung der Gesamt-Messunsicherheit nach Ermittlungsmethode B erfolgt durch Verwendung der Herstellerangaben für die einzelnen Unsicherheiten der Messgeräte. Hierbei werden alle relevanten Beiträge zur Messunsicherheit erfasst und je nach Komponente unterschiedliche Verteilungen (Rechteck-, Normal-, U-Verteilung) angesetzt (siehe Anhang A5). Diese Methode wird i. Allg. in der Praxis angewendet.

Im Folgenden werden die Beiträge der einzelnen Komponenten zur Gesamtunsicherheit diskutiert.

- **Einstellung der Prüfstörgröße**

Die Einstellung des Prüfpegels durch den Prüfgenerator erfolgt mit einer minimalen Stufung (Auflösung) von 0,1 dB. Die Höhe des Prüfpegels wird durch eine Leistungsmessung bzw. Spannungsmessung bestimmt.

Harmonische Oberwellen, die insbesondere durch die Leistungsverstärker hervorgerufen werden, führen zu Abweichungen bei der Messung der Vorlaufleistung. Bei einem Störabstand a_S zwischen der Amplitude des CW-

Trägers und den Oberwellen beträgt die hierdurch hervorgerufene maximale Unsicherheit nach [75]:

$$8,7 \text{ dB} \cdot 10^{\left(\frac{a_S}{20 \text{ dBc}}\right)}$$

- **Messung der Vorlaufleistung**

Die Vorlaufleistung wird nach Bild 4.22 durch das Leistungsmessgerät indirekt über die Messung der Spannung an einem Widerstand $Z_0 = 50 \Omega$ bestimmt.

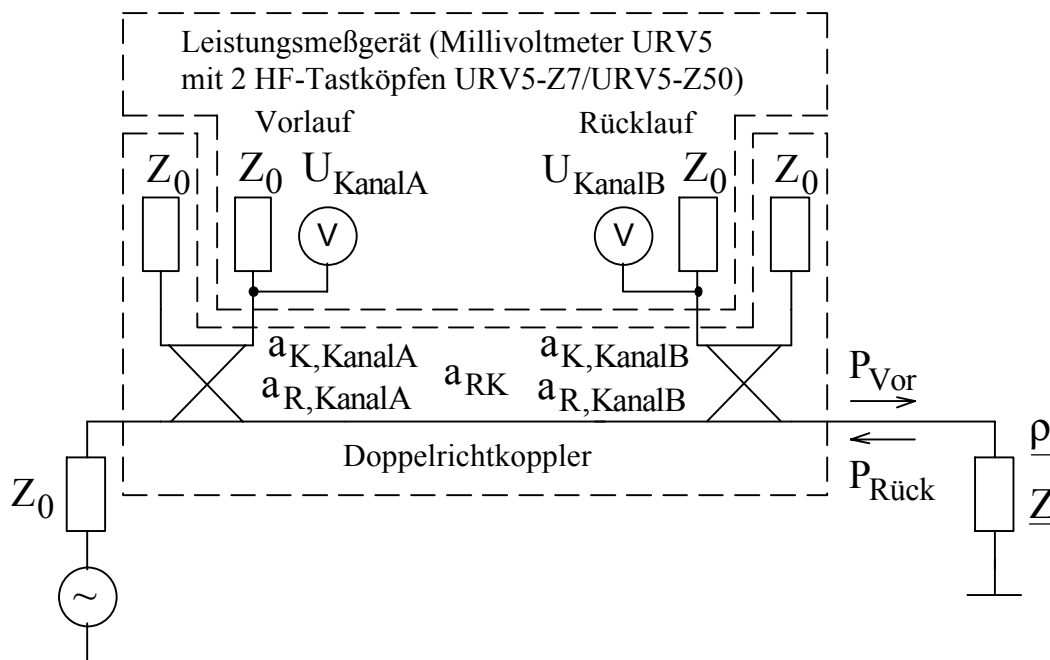


Bild 4.22: Messung der Vorlaufleistung

Die Vorlaufleistung P_{Vor} am Ausgang des Doppelrichtkopplers ergibt sich aus der im Kanal A (Vorlauf) gemessenen Spannung U_{KanalA} durch

$$P_{\text{Vor}} = \frac{(U_{\text{Vor}})^2}{Z_0} \quad (4.18)$$

mit

$$U_{\text{Vor}} = U_{\text{KanalA}} \cdot \frac{1}{C_{\text{KanalA}} \cdot \text{TRK}} \cdot \frac{1}{|1 + D_{\text{KanalA}} \cdot \underline{\rho}|} \quad (4.19)$$

Hierbei lässt sich der Koppelfaktor C_{KanalA} des Doppelrichtkopplers für den Kanal A aus der vom Hersteller angegebenen Koppeldämpfung $a_{\text{K,KanalA}}$ bestimmen:

$$C_{\text{KanalA}} = 10^{\left(\frac{-a_{\text{K,KanalA}}}{20 \text{ dB}}\right)} \quad (4.20)$$

Entsprechend gelten für den Transmissionsfaktor T_{RK} und die Durchgangsdämpfung a_{RK} :

$$T_{\text{RK}} = 10^{\left(\frac{-a_{\text{RK}}}{20 \text{ dB}}\right)} \quad (4.21)$$

sowie für den Richtfaktor D_{KanalA} und die Richtdämpfung $a_{\text{D,KanalA}}$:

$$D_{\text{KanalA}} = 10^{\left(\frac{-a_{\text{D,KanalA}}}{20 \text{ dB}}\right)} \quad (4.22)$$

Für das Leistungsmessgerät (Millivoltmeter URV5, Rohde & Schwarz) sind lt. Datenblatt mehrere Fehlerbeiträge zu unterscheiden:

- Maximaler Fehler des Grundgerätes bei der Messung der Spannung U_{KanalA} : 0,013 dB
- Nullpunktfehler: 0,08 dB
- Anzeigerauschen: 0,08 dB
- Frequenzgang des HF-Tastkopfes mit 50-Ω-Adapter: 0,59 dB
- Aussteuerungsabhängigkeit des HF-Tastkopfes: 0,026 dB

Der Gesamtfehler des Gerätes ergibt sich nach Herstellerangaben [75] als Summe dieser Fehlerbeiträge zu 0,8 dB.

Die Koppeldämpfung $a_{\text{K,KanalA}}$ und die Durchgangsdämpfung a_{RK} können lt. Kalibrierprotokoll mit einer Unsicherheit von 0,2 dB angegeben werden.

Bei Fehlanpassung (Reflexionsfaktor der Last $\rho \neq 0$) ergibt sich aufgrund der endlichen Richtdämpfung des Richtkopplers eine Rückwirkung der rücklaufenden Spannungswelle auf die zu messende Spannung der vorlaufenden Welle (Übersprechen). Dieses wird in Gl. (4.19) durch den Faktor $|1 + D_{\text{KanalA}} \cdot \rho|$ ausgedrückt.

Das Messgerät berechnet die Vorlaufleistung im Gegensatz zu den Gln. (4.18) und (4.19) aus

$$P_{\text{Vor}} = \frac{(U_{\text{KanalA}})^2}{50\Omega} \cdot \frac{1}{C_{\text{KanalA}} \cdot T_{\text{RK}}} \quad (4.23)$$

Die Rückwirkung durch Übersprechen wird hierbei durch das Messgerät nicht berücksichtigt. Sie ist maximal bei $\rho = 1$. Aufgrund der Richtdämpfung $a_{D,\text{KanalA}} = 25 \text{ dB}$ beträgt dann der Faktor $|1 + D_{\text{KanalA}} \cdot \rho| = 1,056$.

Daraus resultiert eine zusätzliche Unsicherheitskomponente von 0,5 dB (5,6 %).

- **Kalibrierung von Kabeln und Dämpfungsglied**

Die frequenzabhängigen Einfügungsdämpfungen der Kabel und des Dämpfungsgliedes werden durch Kalibrierungen mit einem Netzwerk-Analysator bestimmt und durch Korrektur bei den Messungen berücksichtigt (bekannte systematische Messabweichungen). Hierbei verbleiben Unsicherheiten durch zufällige sowie unbekannte systematische Messabweichungen, die mit 0,5 dB abgeschätzt werden.

- **Kalibrierung der Stromeinspeisungen**

Die Bestimmung der Einfügungsdämpfung der Stromeinspeisungen sowie die Kalibrierung der Prüfströme erfolgt in einer Kalibriereinrichtung durch Messung der Vorlauf- bzw. Nettoleistung sowie des Stromes im Kalibrierhalter.

Die Einfügungsdämpfung der Stromeinspeisungen wird von den Herstellern mit einer Unsicherheit von 1,5 dB angegeben.

Bei der Bestimmung des Strompegels im Kalibrierhalter durch den Spektrum-Analysator (HP8568B, Hewlett-Packard) ist nach Herstellerangaben eine Messunsicherheit von maximal 2 dB vorhanden. Diese vergleichsweise hohen Unsicherheiten würden die Gesamt-Messunsicherheit erheblich erhöhen. Deshalb werden zusätzlich Vergleichsmessungen mit dem Leistungsmessgerät sowie dem Spektrum-Analysator durchgeführt und die hierbei ermittelten systematischen Messabweichung des Spektrum-Analysators zur rechnerischen Korrektur herangezogen. Der Prüfgenerator wird hierzu ohne nachgeschaltete Verstärker betrieben.

Durch Zusammenfassung der entsprechenden Unsicherheitsbeiträge (Einzelkomponenten 2a, 3, 4, 5 und 7 in Tabelle 4.7) ergibt sich für die

Kalibrierung der Prüfströme sowie für die Bestimmung der Einfügungsdämpfung eine Unsicherheit von 1 dB.

- **Schwellwertdetektion durch den Prüfling**

Die Wiederholpräzision bei der Schwellwertdetektion beträgt 0,3 dB. Sie wird nach der Ermittlungsmethode A [20] bestimmt (vgl. Kapitel 4.4.2).

- **Messung des Stromes im Kabelbaum (CUT)**

Die Messung des Stromes im Kabelbaum erfolgt durch den Spektrum-Analysator in Verbindung mit einer Strommesszange. Die Unsicherheit bei der Bestimmung der Transferimpedanz der Strommesszange beträgt 1 dB. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit des Spektrum-Analysators von 2 dB ergibt sich für die Messung des Strompegels eine Unsicherheit von 2,2 dB.

Tabelle 4.7 zeigt eine Zusammenstellung der Einzelkomponenten x_i der Messunsicherheit bei der Bestimmung der frequenzabhängigen Störfestigkeitsschwelle des Prüflings. Angegeben sind die ermittelten Unsicherheiten, die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen (vgl. Stecher [81]) sowie die daraus resultierenden Standardunsicherheiten $u(x_i)$ der Einzelkomponenten.

Einzelkomponente x_i der Messunsicherheit		Fehler / Unsicherheit / Abweichung / Toleranz	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung	Standardunsicherheit $u(x_i)$
1.	Einstellung der Störgröße (Prüfgenerator)	0,1 dB	Rechteck	0,7 %
2.	Harmonische Oberwellen bei			
a)	Messungen im Bereich 0,1...400 MHz: -30 dBc (ohne Verstärker)	0,3 dB bzw.	Rechteck	2 % bzw.
b)	0,1...100 MHz: -15 dBc (Verstärker 150L)	1,5 dB bzw.		10,9 % bzw.
c)	1...400 MHz: -22 dBc (Verstärker 10W1000M7)	0,7 dB		4,8 %
3.	Leistungsmessgerät	0,8 dB	Rechteck	5,6 %

4.	Koppeldämpfung	0,2 dB	Rechteck	1,3 %
5.	Durchgangsdämpfung des Richtkopplers	0,2 dB	Rechteck	1,3 %
6.	Übersprechen zwischen den Messkanälen	0,5 dB	U-förmig	4,2 %
7.	Kalibrierung Kabel und Dämpfungsglied	0,5 dB	Rechteck	3,4 %
8.	Wiederholpräzision der Schwellwertdetektion durch den Prüfling	0,3 dB	Standardabweichung (nach Ermittlungsmethode A)	3,5 %
9.	Kalibrierung der Strom-einspeisezangen / Prüfströme	1 dB	Rechteck	7 %
10.	Messung des Stromes (Strommesszange und Spektrum-Analysator)	2,2 dB	Rechteck	16,6 %

Tabelle 4.7: Einzelkomponenten der Messunsicherheit

Die Gesamtunsicherheit bei der Bestimmung des Prüfstromes $i_{\text{Prüf,Vor}}$, der für die Auslösung einer Prüflingsreaktion erforderlich ist, ergibt sich mit Hilfe der Gln. (A5.7) bis (A5.9) aus den Einzelkomponenten 1 bis 9 in Tabelle 4.7.

Unsicherheit bei der Bestimmung des Prüfstromes $i_{\text{Prüf,Vor}}$		
Frequenzbereich	0,1...100 MHz (Messungen mit Verstärker 150L)	1...400 MHz (Messungen mit 10W1000M7)
Kombinierte Standardunsicherheit u_c	1,3 dB bzw. 16 %	1,0 dB bzw. 12 %
Erweiterte Unsicherheit U_p	2,4 dB bzw. 32 %	1,9 dB bzw. 24 %

Tabelle 4.8: Kombinierte Standardunsicherheit und erweiterte Unsicherheit bei der Bestimmung des Prüfstromes

Tabelle 4.8 zeigt die kombinierte Standardunsicherheit u_c sowie die erweiterte Unsicherheit U_p für $k_p=2$, d.h. für einen Grad des Vertrauens von ca. 95 %.

Für die Messung des Stromes im Kabelbaum bei Auftreten einer Prüflingsreaktion ist eine zusätzliche Komponente der Standardunsicherheit von 16,6 % (Einzelkomponente 10 in Tabelle 4.7) zu berücksichtigen.

Die resultierende kombinierte Standardunsicherheit und die erweiterte Unsicherheit ergibt sich nach Tabelle 4.9.

Unsicherheit bei der Messung des Stromes I_{CUT} im Kabelbaum (bei Auftreten einer Prüflingsreaktion)		
Frequenzbereich	0,1...100 MHz (Messungen mit Verstärker 150L)	1...400 MHz (Messungen mit 10W1000M7)
Kombinierte Standardunsicherheit u_c	1,8 dB bzw. 23 %	1,6 dB bzw. 21 %
Erweiterte Unsicherheit U_p	3,3 dB bzw. 46 %	3,0 dB bzw. 42 %

Tabelle 4.9: Kombinierte Standardunsicherheit und erweiterte Unsicherheit bei der Messung des Stromes im Kabelbaum

Die Prüfung der Störfestigkeit elektronischer Komponenten erfolgt nach den Normen u.a. mit einem amplitudenmodulierten Störsignal. Hierbei sind ggf. weitere Unsicherheiten bei der Leistungsmessung zu berücksichtigen. Diese wirken sich jedoch bei den hier durchgeführten Untersuchungen mit einem unmodulierten CW-Signal nicht aus.

4.9 Versuchsergebnisse

Für die Bezugsmessung mit den Einstellungen nach Kapitel 4.8 wird zunächst ermittelt, welche äußere Störgröße mit Stromeinspeisung eingekoppelt werden muss, um eine Prüflingsreaktion auszulösen.

Bild 4.23 zeigt den hierzu erforderlichen Prüfstrom $i_{\text{Prüf}}^{\circ}$ (Störfestigkeitsschwelle), berechnet nach Gl. (4.14). Prüflingsreaktionen erfolgen somit bei Prüfströmen $i_{\text{Prüf}} \geq i_{\text{Prüf}}^{\circ}$. 'Fenster'-Effekte (vgl. [91]) treten im Pegelbereich 60...120 dB(μ A) nicht auf.

Für die frequenzabhängigen Störfestigkeitsschwellen wird in den Diagrammen für den Prüfstrom eine 'inverse' Darstellung verwendet. Dadurch ergeben sich

Kurvenmaxima bei großer Störempfindlichkeit und Kurvenminima bei kleiner Störempfindlichkeit.

Die Störfestigkeitsschwellen $i_{\text{Prüf}^\circ}$ beziehen sich dabei generell auf das Gesamtsystem bestehend aus Prüfling, Kabelbaum und Zusatzgerät.

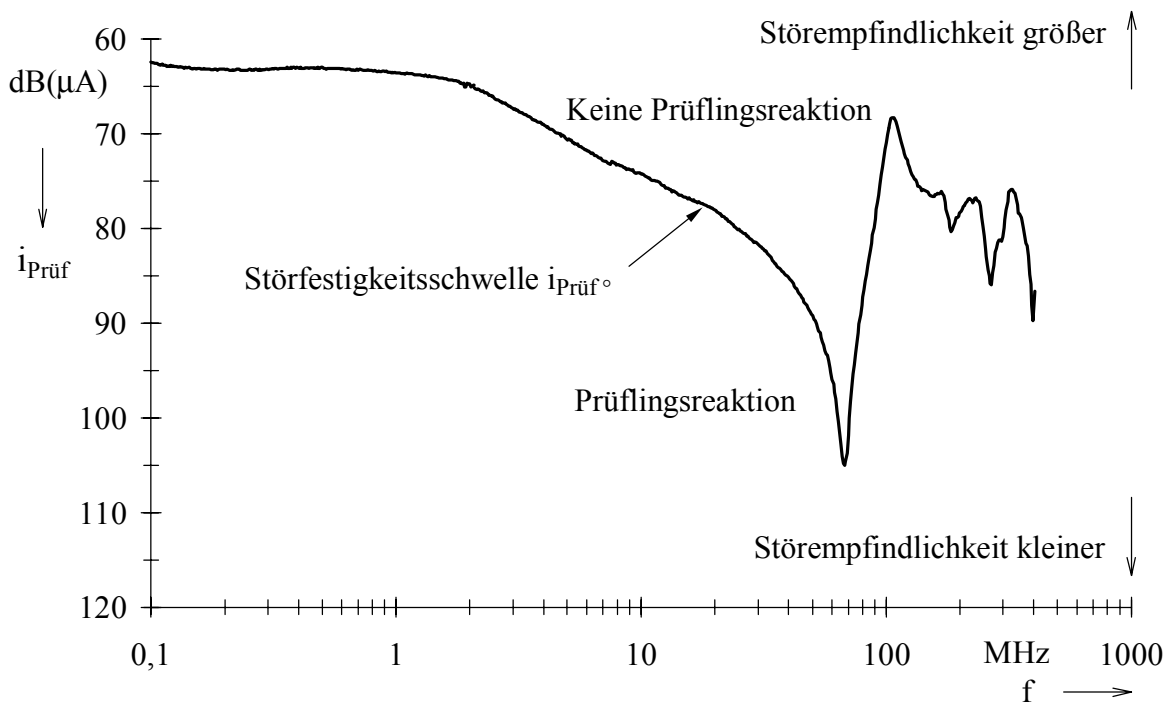


Bild 4.23: Störfestigkeitsschwelle des Gesamtsystems (Bezugsmessung)

Bei der Bezugsmessung (1-adriger Kabelbaum der Länge 1 m) zeigt sich eine starke Frequenzabhängigkeit der Störfestigkeitsschwelle mit einer ausgeprägten Resonanz bei 70 MHz sowie bei höheren Frequenzen. Unterhalb etwa 10 MHz besteht eine relativ große Störempfindlichkeit, so dass bereits bei einer niedrigen äußeren Störgröße (Prüfstrom) eine Prüflingsreaktion auftritt.

Im Frequenzbereich 60...80 MHz ist dagegen ein mehr als 20 dB größerer Prüfstrom erforderlich, damit eine Prüflingsreaktion ausgelöst wird. Ein Großteil der eingekoppelten Leistung wird hierbei im Kabelbaum bzw. im Zusatzgerät in Wärme umgesetzt, so dass das Gesamtsystem dadurch störunempfindlicher ist.

4.9.1 Anzahl der Adern im Kabelbaum

Die Störfestigkeitsschwellen $i_{\text{Prüf}}$ des Gesamtsystems bei unterschiedlicher Anzahl der Adern im Kabelbaum zeigt Bild 4.24. Die Eingangsimpedanzen der an die einzelnen Adern angeschlossenen Eingänge von Prüfling und Zusatzgerät sind hierbei gleich (symmetrische Last: $Z_{\text{EUT}} = Z_{\text{EUT},10}$ und $Z_{\text{AE}} = Z_{\text{AE},10}$).

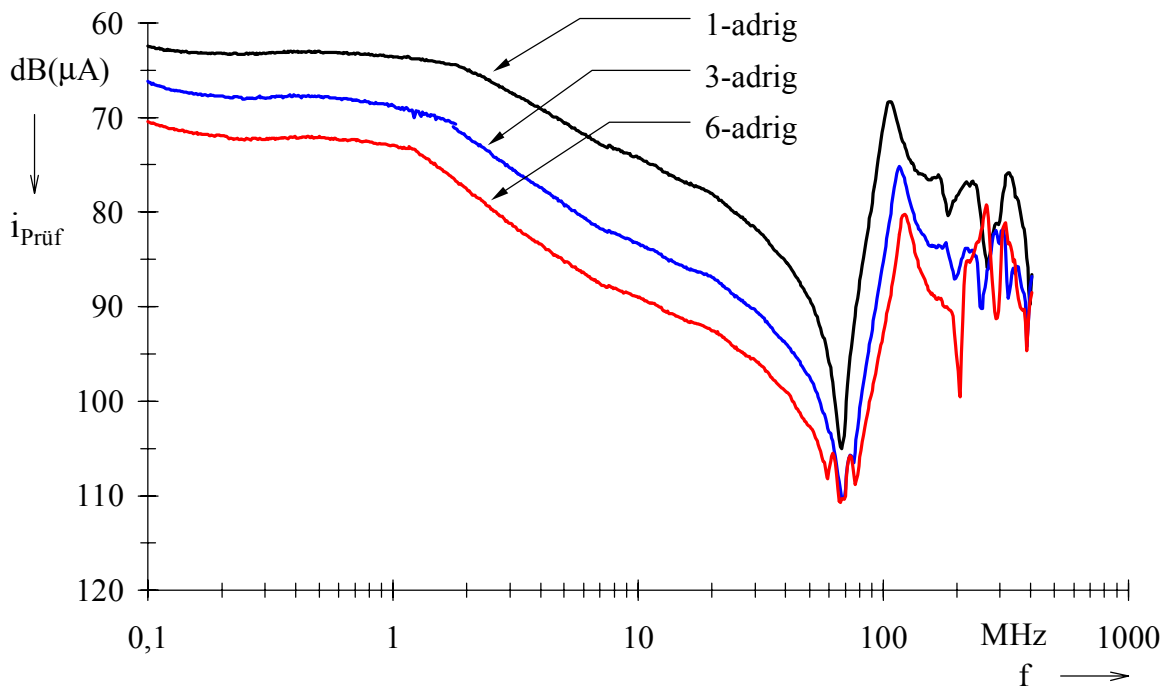


Bild 4.24: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlicher Anzahl der Adern im Kabelbaum

Die insgesamt in den Kabelbaum eingekoppelte Leistung teilt sich entsprechend der Impedanzverhältnisse auf die einzelnen Adern auf. In jeden Prüflingseingang fließt dabei nur ein Teil des gesamten Stromes im Kabelbaum. Mit zunehmender Aderzahl sind daher höhere Werte des Prüfstrompegels erforderlich, um eine Prüflingsreaktion (Schwellwertüberschreitung an einem Prüflingseingang) hervorzurufen.

Die Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen zwischen 6-adrigem und 3-adrigem bzw. 1-adrigem Kabelbaum im Frequenzbereich 1...70 MHz sind in Bild 4.25 dargestellt.

Es ergibt sich eine um 6 dB (+0 / -1 dB) höhere Störfestigkeitsschwelle des 6-adrigen Kabelbaumes gegenüber dem 3-adrigen Kabelbaum. Die doppelte Aderzahl führt näherungsweise zu einer Halbierung des Stromes in den einzelnen

Adern. Das bedeutet eine Verdopplung des Prüfstromes $i_{\text{Prüf}}^{\circ}$, der zum Erreichen der Störfestigkeitsschwelle erforderlich ist.

Größere Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bestehen zwischen dem 6-adrigen (Leitung YR 6 x 0,8) und dem 1-adrigen Kabelbaum (Draht). Aufgrund der Stromaufteilung auf die einzelnen Adern würde sich hierbei theoretisch ein Unterschied von 15,6 dB ergeben. Bedingt durch den unterschiedlichen Aufbau der beiden Kabelbäume und die daraus resultierenden unterschiedlichen Wellenwiderstände liegt die gemessene Differenz der Störfestigkeitsschwellen $i_{\text{Prüf}}^{\circ}$ nur im Bereich 9,5...13 dB.

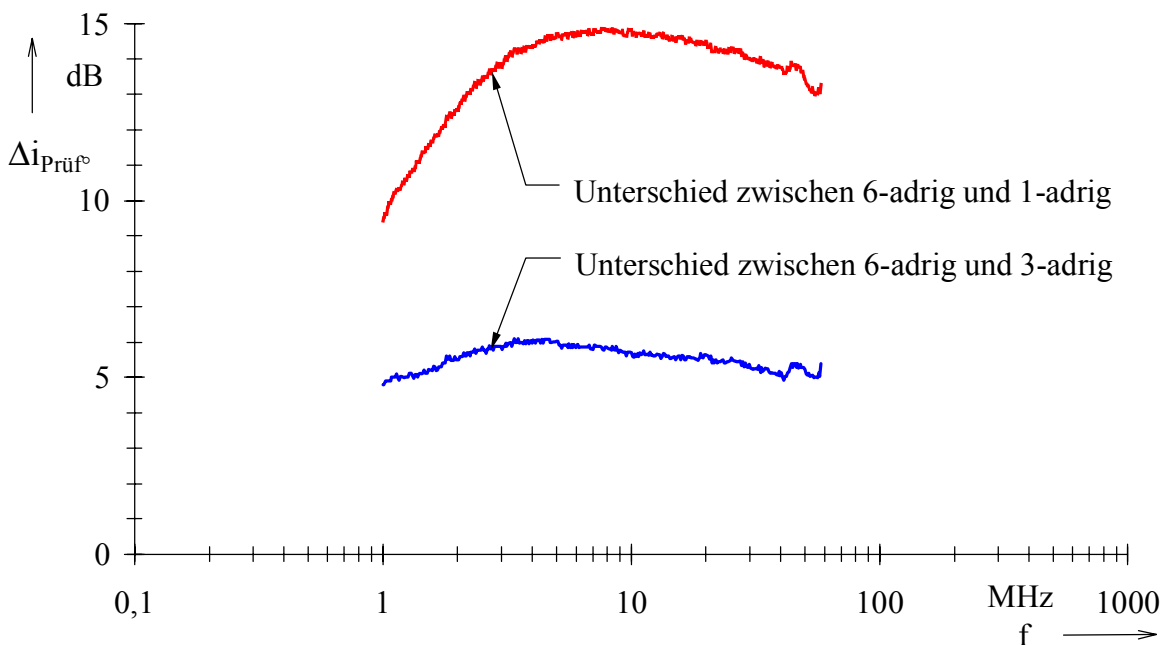


Bild 4.25: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlicher Anzahl der Adern im Kabelbaum

4.9.2 Länge des Kabelbaumes

In Angaben der Normen zur Stromeinspeisung bestehen erheblich Unterschiede bezüglich der Länge des Kabelbaumes, der bei der Prüfung verwendet werden soll. Daher wird im Folgenden der Einfluss der Länge des Kabelbaumes auf die Störfestigkeit des Gesamtsystems untersucht. Gegenüber der Bezugsmessung (siehe Kapitel 4.7) wird hierbei ein 6-adriger Kabelbaum verwendet, bei dem alle Adern die gleiche Länge l_{CUT} (vgl. Bild 4.2) haben:

- 0,4 m (entsprechend den Angaben in DIN EN 61000-4-6; die Leitungslänge zwischen Stromeinspeisenzange und Zusatzgerät soll möglichst klein sein, maximal 0,3 m)
- 1 m (entsprechend der Länge eines Prüfkabelbaums nach Richtlinie 95/54/EG und DIN ISO 11452-4)
- 3,5 m (Länge in der Größenordnung eines realen Kfz-Kabelbaums)

Das Bild 4.26 zeigt die gemessenen frequenzabhängigen Störfestigkeitsschwellen.

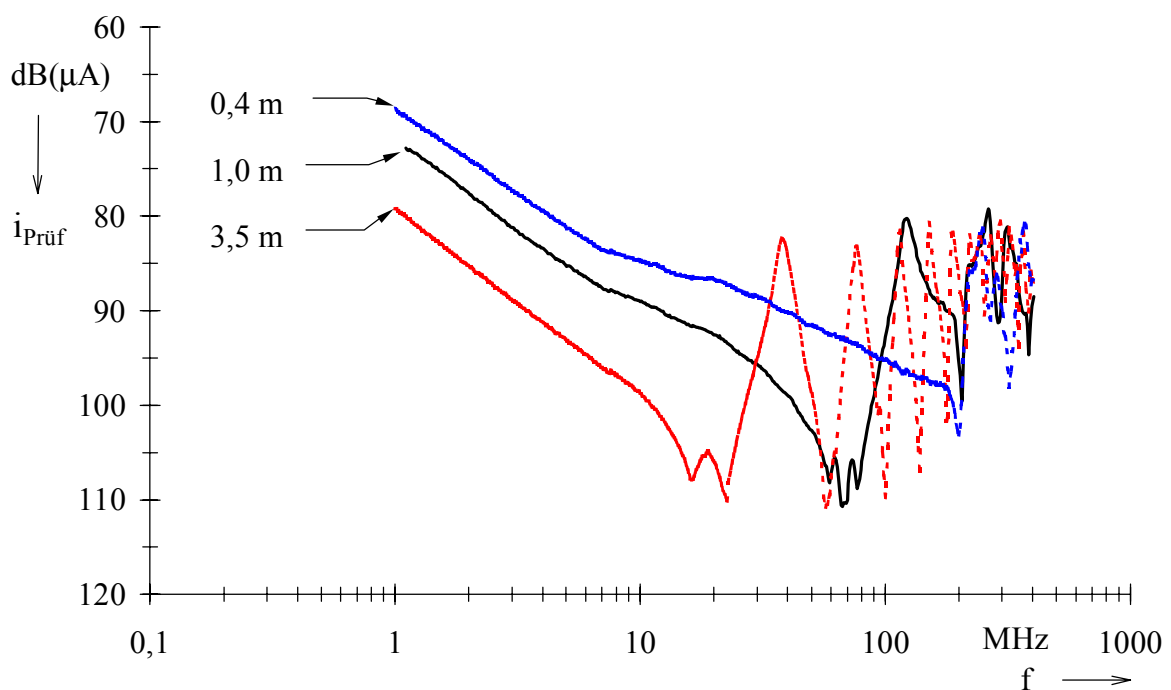


Bild 4.26: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Längen des Kabelbaumes

Die unterschiedliche Kabelbaumlänge führt zu einer erheblichen Veränderung der Störbeaufschlagung des Prüflings. Die Resonanzfrequenzen verlagern sich mit zunehmender Kabelbaumlänge hin zu niedrigeren Werten. Die untere Resonanzfrequenz f_{Res} kann hierbei überschlüssig durch

$$f_{\text{Res}} = \frac{c_0}{4 \cdot (l_{\text{CUT}} + 2 \cdot l_{\text{S}}) \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{r,eff}}}} \quad (4.24)$$

mit $\epsilon_{\text{r,eff}} \approx 1$ abgeschätzt werden (siehe Tabelle 4.10).

Länge des Kabelbaumes l_{CUT}	untere Resonanzfrequenz f_{Res} , berechnet nach Gl. (2.24)
0,4 m	159,5 MHz
1,0 m	70,0 MHz
3,5 m	21,0 MHz

Tabelle 4.10: Untere Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Länge des Kabelbaumes

Oberhalb von f_{Res} ergibt sich ein ausgeprägtes Resonanzverhalten. Die Beträge der Störfestigkeitsschwellen $i_{\text{Prüf}}$ liegen hier bei allen Kabelbaumängen in der gleichen Größenordnung zwischen 78 und 110 dB(μA).

4.9.3 Abstand des Kabelbaumes von der Massefläche

Als weitere Einflußgröße bei der Stromeinspeisung wird der Abstand des Kabelbaumes von der Massefläche betrachtet. In Bild 4.27 sind die Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Abstände h_{CUT} dargestellt. Die Kabelbaumlänge l_{CUT} beträgt einheitlich 1 m.

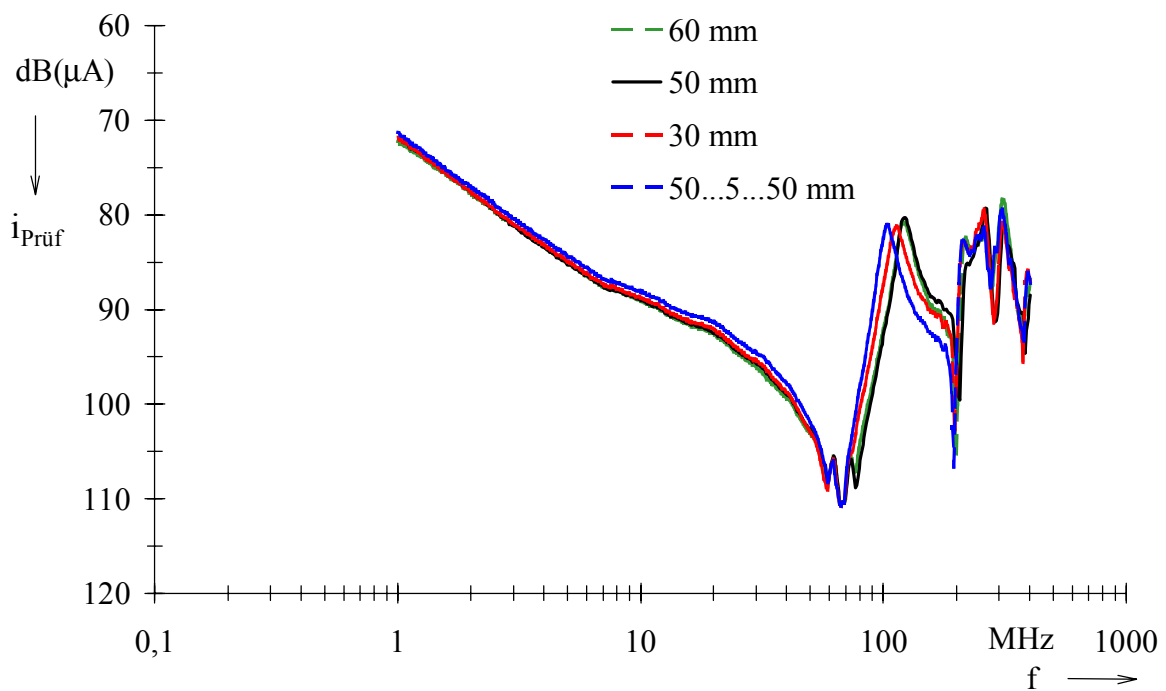


Bild 4.27: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Abständen des Kabelbaumes zur Massefläche

Große Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen treten nur bei den Resonanzfrequenzen auf. Bei einer Verringerung des Abstandes h_{CUT} verschieben sich die Resonanzfrequenzen zu niedrigeren Frequenzwerten hin.

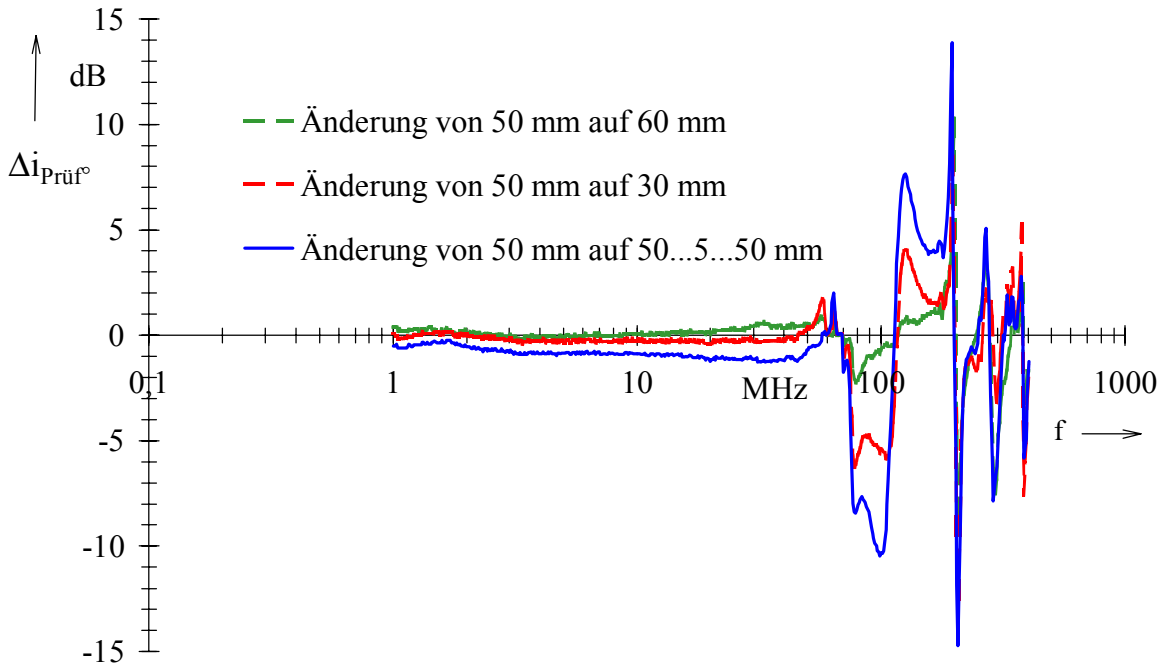


Bild 4.28: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei Änderung des Abstandes des Kabelbaumes zur Massefläche

Bild 4.28 zeigt die Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen (Differenzen des Prüfstromes $\Delta i_{Prüf^\circ}$) bei Änderungen des Abstandes von $h_{CUT} = 50$ mm auf 60 mm, 30 mm bzw. 50...5...50 mm. Die maximal auftretenden Unterschiede sind hierzu in Tabelle 4.11 angegeben.

Änderung des Abstandes h_{CUT} des Kabelbaumes von der Massefläche	Maximaler Unterschied des Prüfstromes $\Delta i_{Prüf^\circ}$ im Frequenzbereich	
	0,15...400 MHz	0,15 MHz... f_{Res}
...von 50 mm auf 60 mm	10,3 dB	0,9 dB
...von 50 mm auf 30 mm	14,1 dB	1,7 dB
...von 50 mm auf 50...5...50 mm	14,7 dB	2,0 dB

Tabelle 4.11: Maximale Unterschiede des Prüfstromes bei Änderung des Abstandes des Kabelbaumes von der Massefläche

4.9.4 Abstand der Stromeinspeisung vom Prüfling

Die Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Abständen der Stromspeisung vom Prüfling nach DIN ISO 11452-4 zeigt Bild 4.29. Die Norm legt einen Abstand von 150 mm zwischen dem Prüfling und der Mitte der Zange fest. Die Grenzen des Toleranzbereiches liegen bei 140 mm und 160 mm.

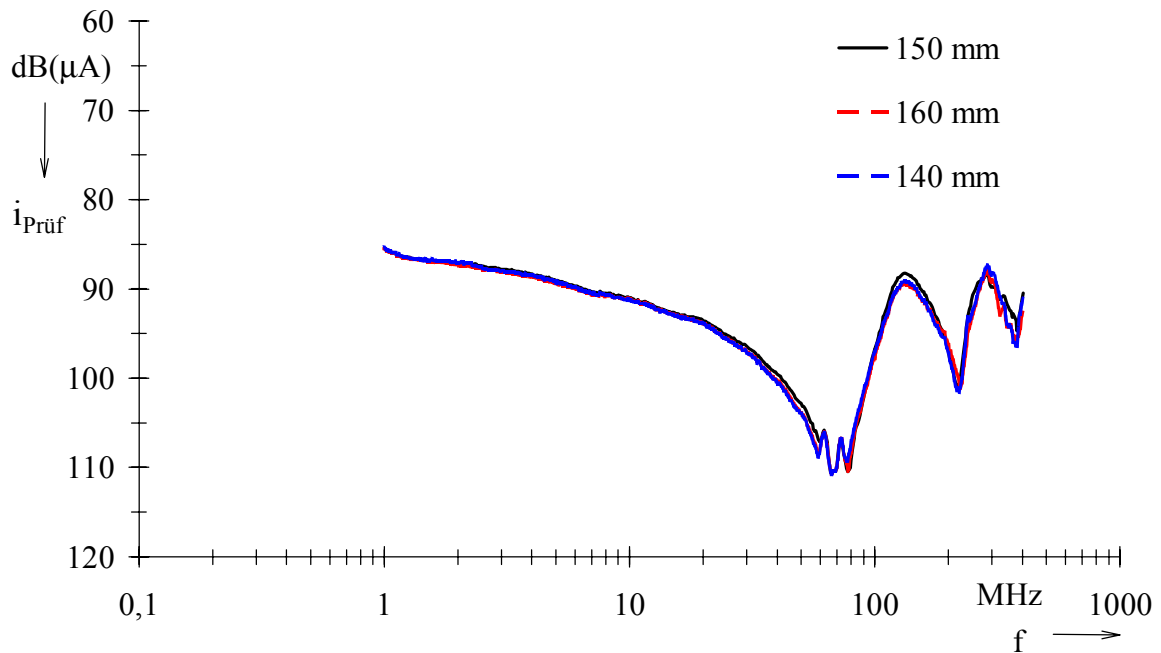


Bild 4.29: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Abständen der Stromspeisung vom Prüfling (Toleranzbereich nach DIN ISO 11452-4)

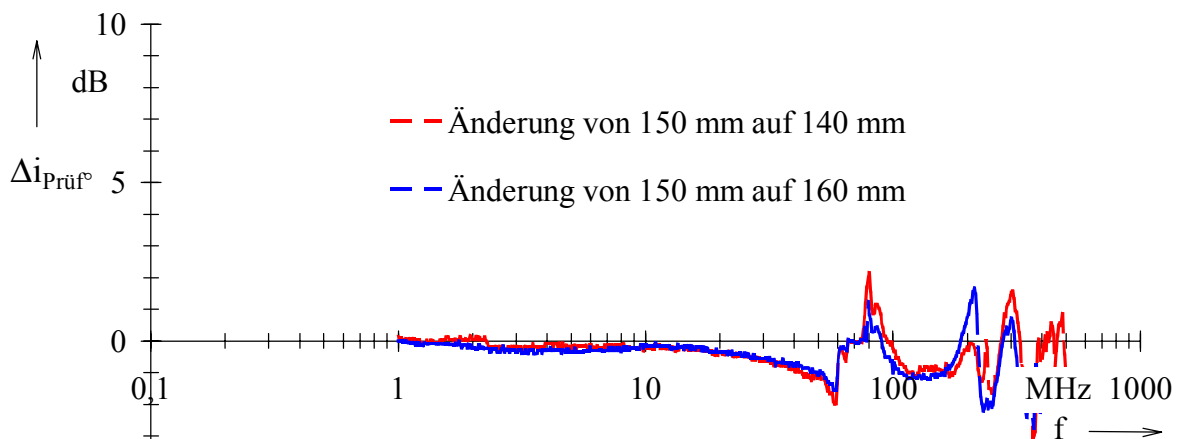


Bild 4.30: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei Änderung des Abstandes der Stromspeisung vom Prüfling (Toleranzbereich nach DIN ISO 11452-4)

Die Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen (Prüfstrom $i_{\text{Prüf}}$ bei Auftreten einer Prüflingsreaktion) bei Änderung des Abstandes von 150 mm um ± 10 mm ist über den gesamten betrachteten Frequenzbereich kleiner als 3 dB (siehe Bild 4.30). Die maximalen Unterschiede treten auch hier bei den Resonanzfrequenzen auf.

Die Norm DIN EN 61000-4-6 schreibt den Abstand der Stromeinspeisetzange zum Prüfling im Bereich 100...300 mm vor. Bild 4.31 zeigt die entsprechenden Störfestigkeitsschwellen für die Bereichsgrenzen sowie für 150 mm.

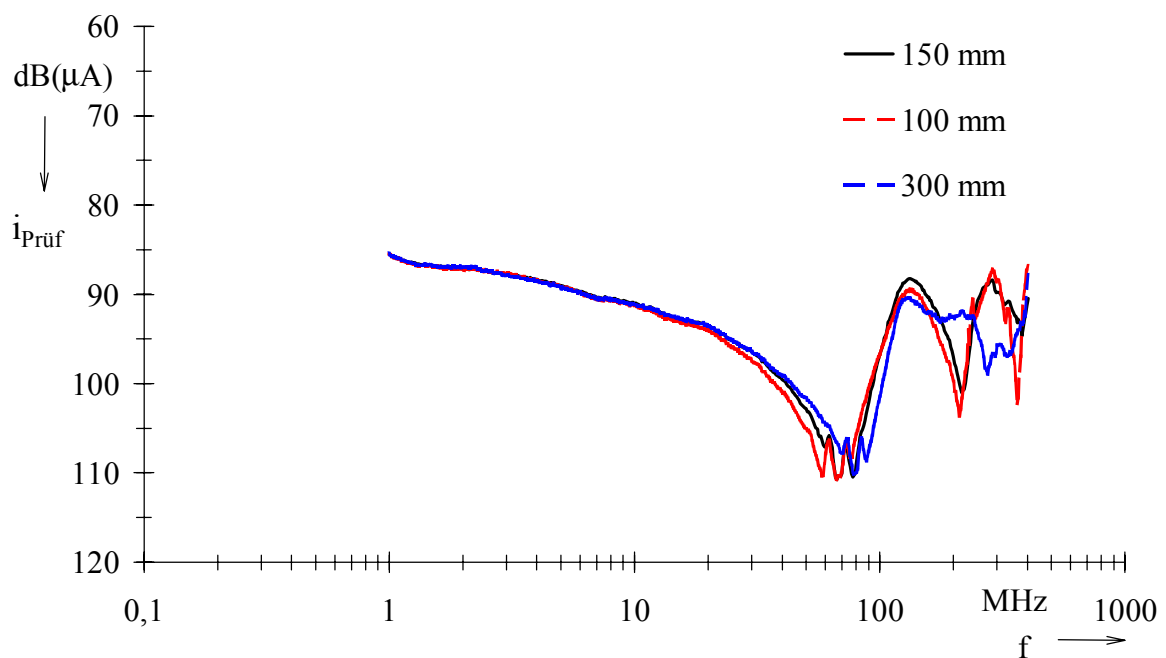


Bild 4.31: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Abständen der Stromeinspeisetzange vom Prüfling (Toleranzbereich nach DIN EN 61000-4-6)

Änderungen des Abstandes zwischen Stromeinspeisetzange und Prüfling von 150 mm um +150 / -50 mm führen bei Frequenzen bis 400 MHz zu Unterschieden der Störfestigkeitsschwellen bis 10 dB (siehe Bild 4.32 und Tabelle 4.12). Bei Frequenzen bis 80 MHz (obere Frequenzgrenze nach DIN EN 61000-4-6) betragen die Unterschiede bis zu 4,2 dB.

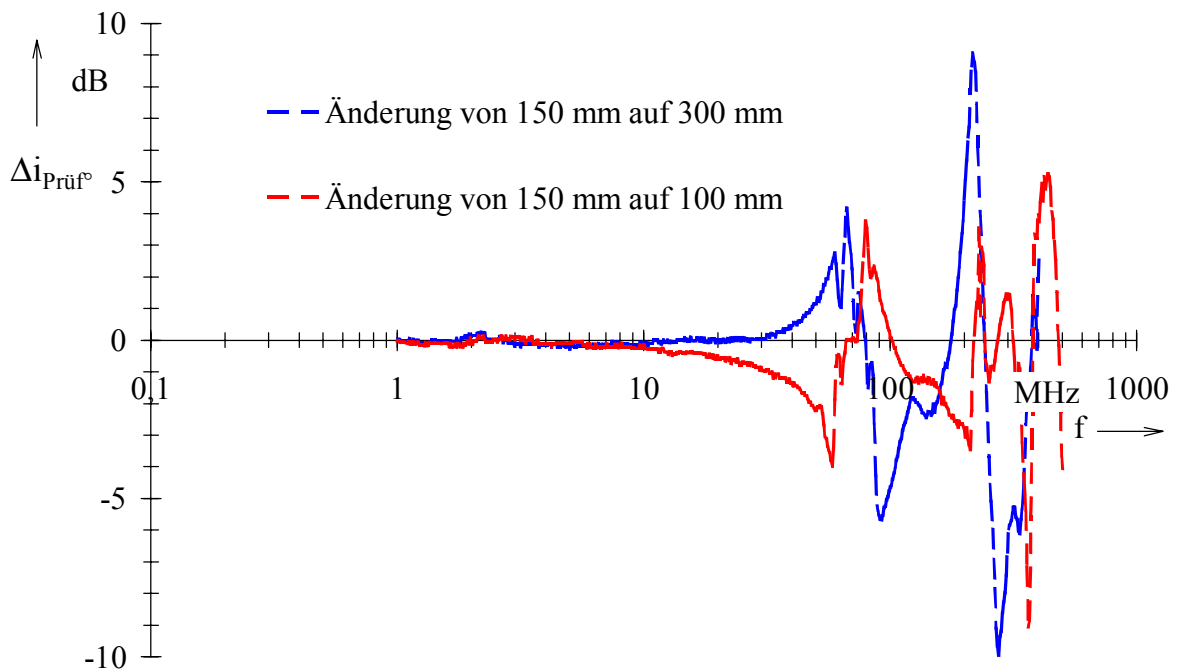


Bild 4.32: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei Änderung des Abstandes der Stromeinspeisetzange vom Prüfling (Toleranzbereich nach DIN EN 61000-4-6)

Änderung des Abstandes der Stromeinspeisetzange vom Prüfling $l_{Z,E}$	Maximale Unterschiede des Prüfstromes $\Delta i_{\text{Prüf}^\circ}$ im Frequenzbereich	
	0,15...400 MHz	0,15...80 MHz
...von 150 mm auf 300 mm	10,0 dB	4,2 dB
...von 150 mm auf 160 mm	2,2 dB	2,2 dB
...von 150 mm auf 140 mm	2,2 dB	2,2 dB
...von 150 mm auf 100 mm	9,1 dB	4,0 dB

Tabelle 4.12: Maximale Unterschiede des Prüfstromes bei Änderung des Abstandes der Stromeinspeisetzange vom Prüfling

4.9.5 Verwendung zusätzlicher Strommesszangen

In DIN EN 61000-4-6 ist die Überwachung des im Kabelbaum fließenden Stromes I_{CUT} bei der Störfestigkeitsprüfung vorgeschrieben. Hierzu wird eine Strommesszange um den Kabelbaum zwischen Prüfling und Stromeinspeisung montiert. Bei der Prüfung darf der maximal zulässige Strom I_{max} im Kabelbaum nach Gl. (3.3) nicht überschritten werden. DIN ISO 11451-4 und DIN ISO 11452-4 sehen die Verwendung einer Strommesszange zu Kontroll- und Überwachungszwecken lediglich optional vor. Der dabei gemessene Strom darf nicht dazu herangezogen werden, die Funktionsfähigkeit bzw. Störfestigkeit des Prüflings im System zu bewerten.

Bei der Einfügung einer Strommesszange wirkt sich die in den einzelnen Leitern des Kabelbaumes hervorgerufene Einfügeimpedanz Z_E auf die Impedanzverhältnisse im Stromkreis aus. Daraus ergeben sich Einflüsse auf die Störfestigkeit des Gesamtsystems.

In Bild 4.33 sind die Unterschiede der Störfestigkeitsschwelle (Differenzen der Prüfstrompegel $\Delta i_{\text{Prüf}^\circ}$) dargestellt, die sich bei Einfügung einer zusätzlichen Strommesszange F-61 bzw. 94196 jeweils gegenüber der Bezugsmessung ergeben. Der Abstand der Strommeßzange zum Prüfling beträgt $l_{Z,M} = (55 \pm 1)$ mm.

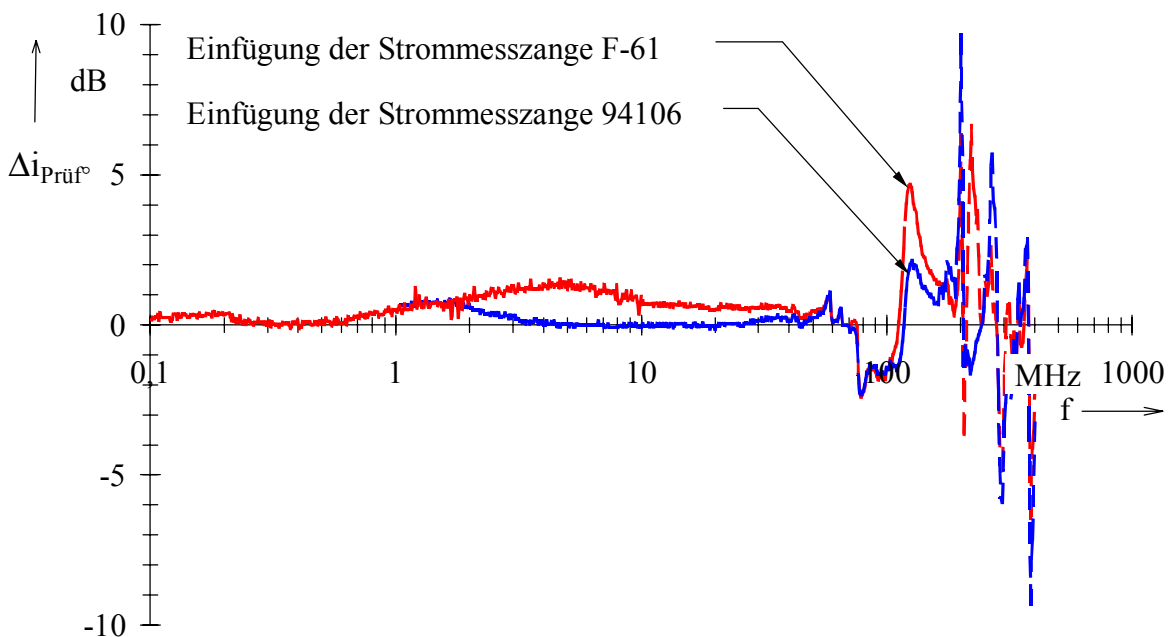


Bild 4.33: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei Einfügung einer zusätzlichen Strommesszange

Die Einfügung einer zusätzlichen Strommesszange führt zur Änderung der Störfestigkeitsschwelle des Gesamtsystems insbesondere bei den Resonanzfrequenzen bis zu 10 dB. Unterhalb von f_{Res} liegen die maximalen Änderungen mit 1,5 dB im Bereich der Messunsicherheiten (siehe Tabelle 4.13).

Einfügung einer zusätzlichen Strommesszange (zwischen Prüfling und Stromeinspeisetzange) im Abstand $l_{Z,M} = 55$ mm vom Prüfling	Maximale Unterschiede des Prüfstromes $\Delta i_{Prüf}$ im Frequenzbereich	
	0,15...400 MHz	0,15 MHz... f_{Res}
...Strommesszange F-61	6,6 dB	1,5 dB
...Strommesszange 94106	10,0 dB	1,0 dB

Tabelle 4.13: Maximale Unterschiede des Prüfstromes bei Einfügung einer zusätzlichen Strommesszange

4.9.6 Eingangsimpedanzen von Prüfling und Zusatzgerät

Das Bild 4.34 zeigt die Störfestigkeitsschwellen $i_{Prüf}$ für unterschiedliche Stufen der Eingangsimpedanz Z_{EUT} des Prüflings (vgl. Seite 80).

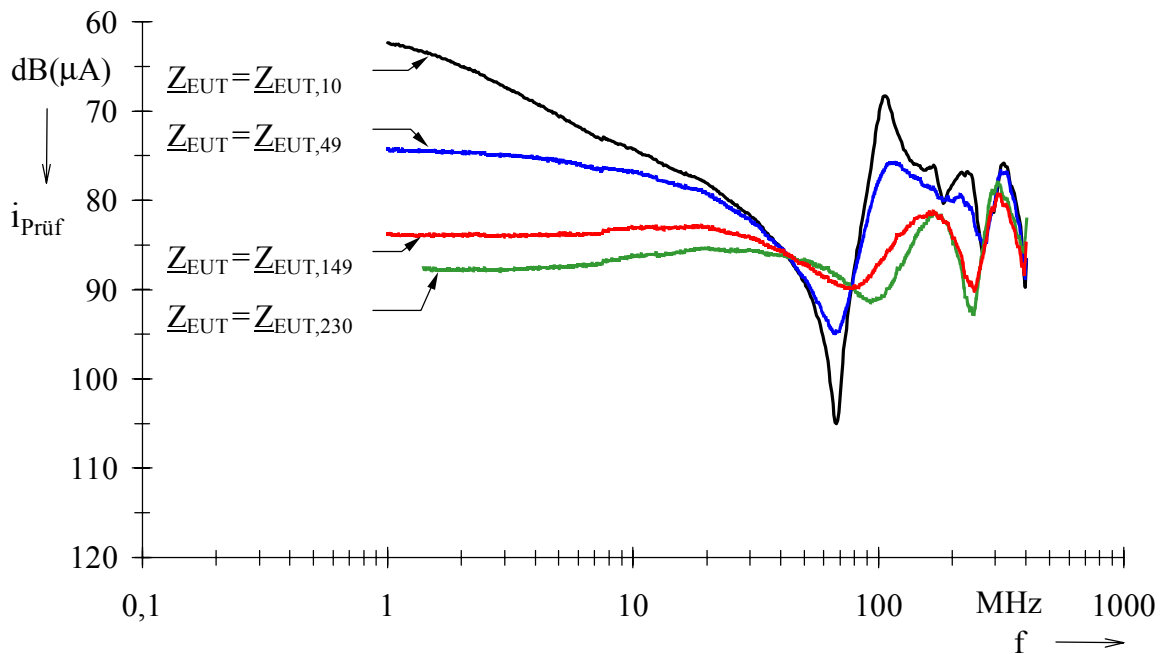


Bild 4.34: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Eingangsimpedanzen des Prüflings

Bei Frequenzen bis etwa 40 MHz erfordern höhere Eingangsimpedanzen des Prüflings einen entsprechend höheren Prüfstrom $i_{Prüf}$, um eine Prüflingsreaktion auszulösen. Dieses ist bedingt durch die zusätzlich eingefügten Serienimpedanzen bei den Stufen $Z_{EUT,49}$, $Z_{EUT,149}$, $Z_{EUT,230}$ (vgl. Bild 4.17).

Oberhalb von 40 MHz wirken sich insbesondere bei $Z_{EUT,10}$ parasitäre Kapazitäten und Induktivitäten stark auf den Frequenzgang der Eingangsimpedanz des Prüflings aus (vgl. Bild 4.18). Der Betrag der Eingangsimpedanz liegt hierbei im Bereich 10...1000 Ω . Dadurch ergibt sich eine starke Frequenzabhängigkeit der Störfestigkeitsschwelle $i_{Prüf}$ mit ausgeprägten Resonanzen.

Bei den Impedanzstufen $Z_{EUT,149}$ und $Z_{EUT,230}$ zeigt sich dagegen ein weniger stark ausgeprägtes Resonanzverhalten für $i_{Prüf}$. Die Beträge der Eingangsimpedanzen $Z_{EUT,149}$ und $Z_{EUT,230}$ sind über den gesamten Frequenzbereich bis 400 MHz relativ konstant und liegen im Bereich des Wellenwiderstandes Z_w der Anordnung. Der Wellenwiderstand kann hierbei abgeschätzt werden durch [68]:

$$Z_w \approx \frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_{r,eff}}} \cdot \operatorname{ar\,cosh}\left(\frac{2h_{CUT}}{d_{Ader}}\right) \approx 331 \, \Omega \tag{4.25}$$

Den Einfluss der Eingangsimpedanzen des Zusatzgerätes auf die Störfestigkeitsschwelle des Gesamtsystems zeigt Bild 4.35.

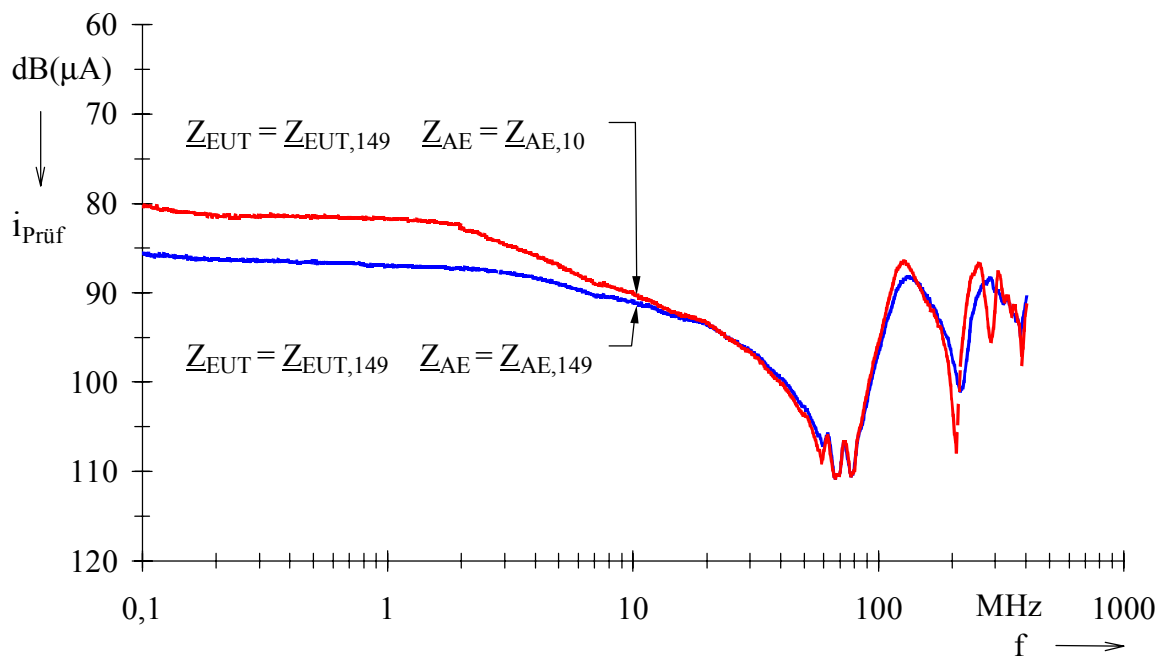


Bild 4.35: Störfestigkeitsschwellen bei unterschiedlichen Eingangsimpedanzen des Zusatzgerätes

Diese Untersuchungen erfolgten an einem 6-adrigen Kabelbaum der Länge 1 m bei unterschiedlichen Stufen $Z_{AE,10}$ und $Z_{AE,149}$ der Eingangsimpedanz des Zusatzgerätes. Die Eingangsimpedanz des Prüflings $Z_{EUT,149}$ blieb unverändert.

Änderungen der Störfestigkeitsschwelle ergeben sich hierbei insbesondere bei Frequenzen unterhalb von 10 MHz sowie bei den Resonanzfrequenzen.

4.9.7 Referenzparameter für die Einstellung des Prüfpegels

Für Einstellung des Prüfpegels bei der Störfestigkeitsprüfung werden in den Normen unterschiedliche Referenzparameter angegeben, die bei der Kalibrierung und bei der Prüfung konstant gehalten werden müssen (siehe Kapitel 3.4).

Bild 4.36 zeigt die Störfestigkeitsschwellen des Gesamtsystems bei den Eingangsimpedanzen $Z_{EUT} = Z_{EUT,10} = Z_{AE}$ bzw. $Z_{EUT} = Z_{EUT,149} = Z_{AE}$, wenn jeweils die Referenzparameter 'Vorlaufleistung' und 'Nettoleistung' für die Prüfpegelinstellung verwendet werden.

Hierbei ergeben sich Unterschiede bis zu 5 dB zwischen den entsprechenden Störfestigkeitsschwellen $i_{Prüf,Vor}^\circ$ und $i_{Prüf,Netto}^\circ$, insbesondere im Frequenzbereich 4...40 MHz (siehe Bild 4.37).

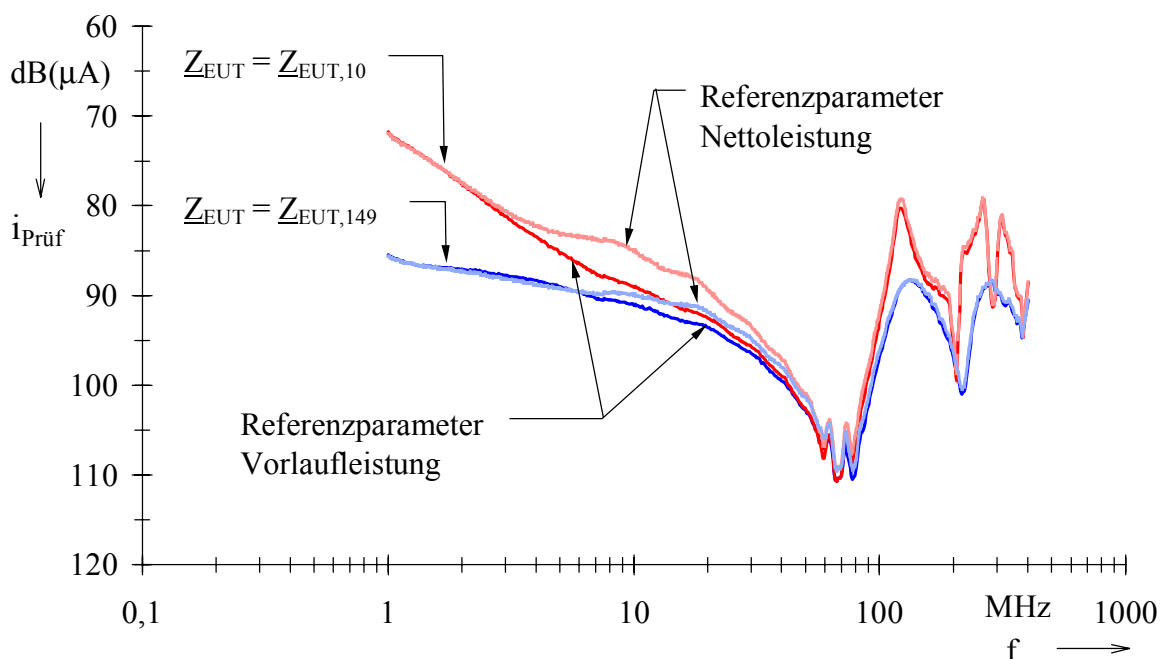


Bild 4.36: Störfestigkeitsschwellen bei Verwendung der Referenzparameter 'Vorlaufleistung' bzw. 'Nettoleistung'

Bei einer Störfestigkeitsprüfung dieses Systems ($Z_{EUT} = Z_{EUT,10} = Z_{AE}$) bei 10 MHz mit einem Prüfstrom von 88 dB(μ A) bzw. 25 mA würde eine Prüflingsreaktion auftreten, sofern die Einstellung des Prüfstromes mit dem Referenzparameter 'Nettoleistung' erfolgt. Eine Reaktion würde bei gleichem Prüfstrom jedoch nicht erfolgen, wenn der Referenzparameter 'Vorlaufleistung' verwendet wird.

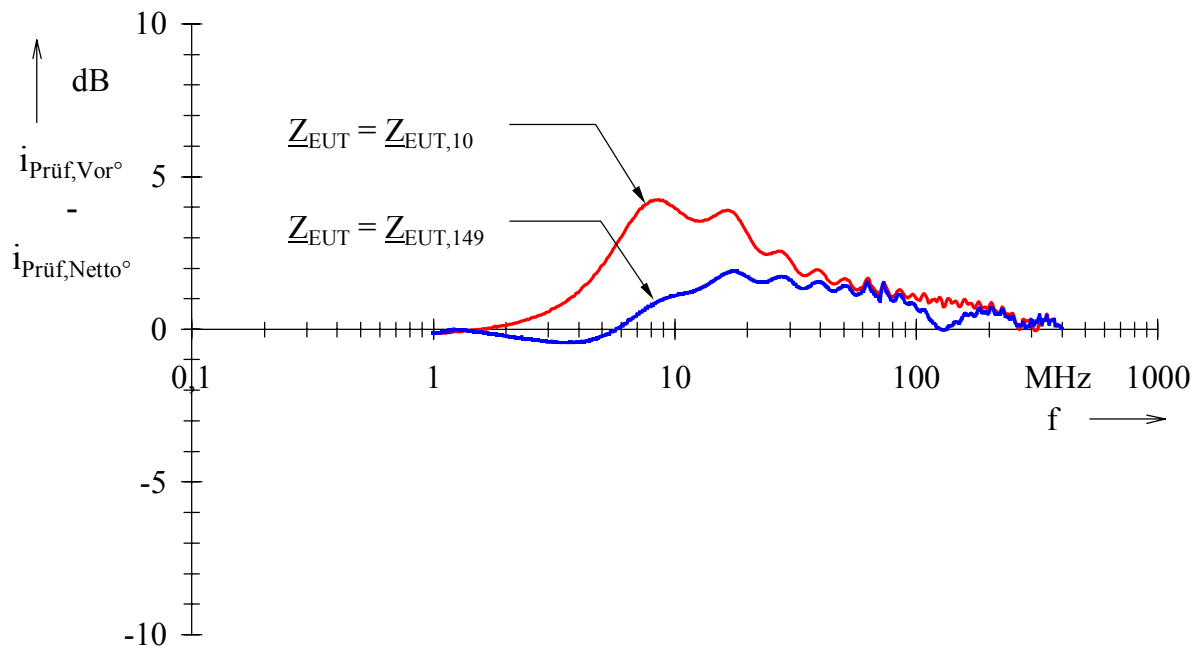


Bild 4.37: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei Verwendung der entsprechenden Referenzparameter 'Vorlaufleistung' bzw. 'Nettoleistung'

4.9.8 Unterschiedliche Stromeinspeisungen und Verstärker

Die verwendeten Stromeinspeisungen und Verstärker wurden bereits in Kapitel 4.8 bei der Bestimmung der Messunsicherheiten der Störfestigkeitsschwellen $i_{\text{Prüf,Vor}}$ betrachtet.

Das Bild 4.38 zeigt die Störfestigkeitsschwellen bei der Bezugsmessung (Stromeinspeisung 95242-1, Verstärker 10W1000M7) sowie bei einer Messung mit gleichem Prüfaufbau, jedoch unterschiedlicher Prüfeinrichtung (Stromeinspeisung F-120-9, Verstärker 150L). Die maximalen Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen im gemeinsamen Frequenzbereich 1...100 MHz betragen hierbei 2,5 dB (siehe Bild 4.39). Zum Vergleich: Für die einzelnen

Messungen wurden kombinierte Standardunsicherheiten von 1,3 dB (Stromeinspeisung F-120-9, Verstärker 150L) bzw. 1,0 dB (Stromeinspeisung 95242-1, Verstärker 10W1000M7) berechnet.

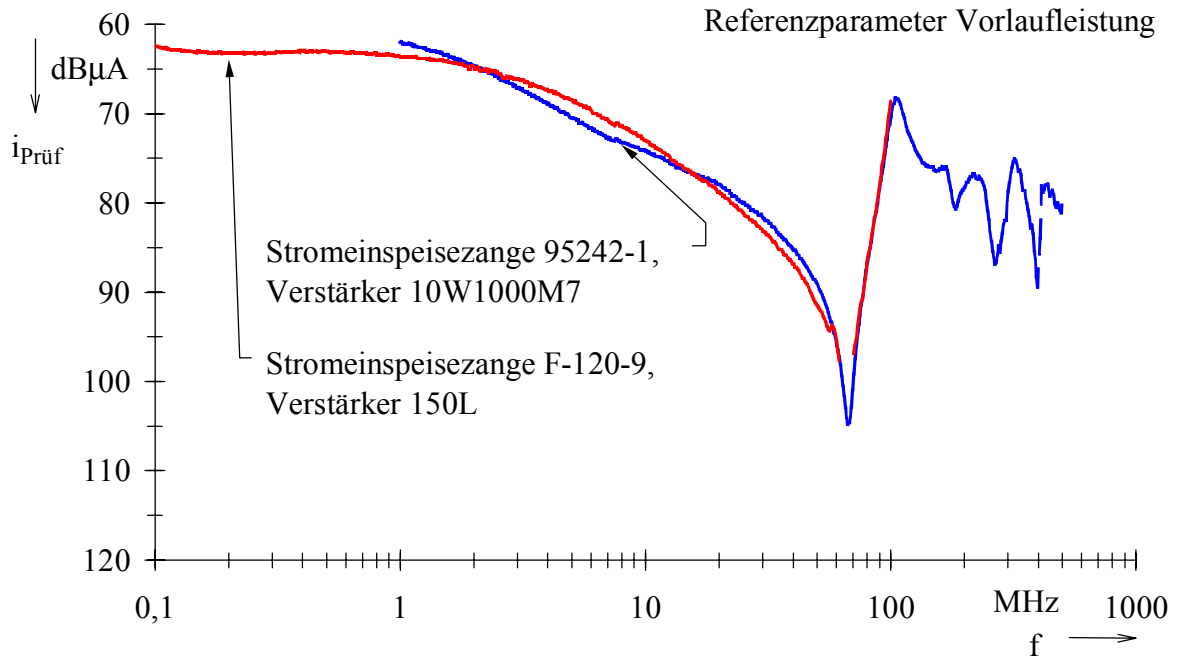


Bild 4.38: Störfestigkeitsschwellen bei Verwendung unterschiedlicher Stromeinspeisungen und Verstärker

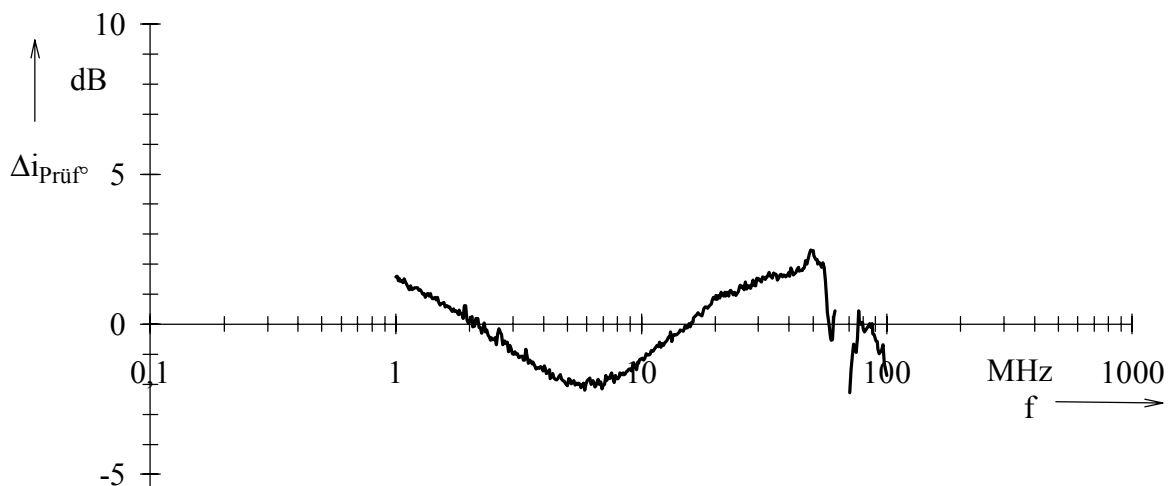


Bild 4.39: Unterschiede der Störfestigkeitsschwellen bei Verwendung unterschiedlicher Stromeinspeisungen und Verstärker

(Anmerkung: Bei der Stromeinspeisung mit der Zange F-120-9 reicht die verfügbare Leistung des Prüfgenerators im Frequenzbereich 61...70 MHz nicht aus, um den für eine Prüflingsreaktion erforderlichen Prüfstrom einzustellen.)

5 Hinweise zur Anwendung der Stromeinspeisung

Die Stromeinspeisung wird angewandt bei Störfestigkeitsprüfungen von Systemen und Anlagen, deren elektronische Geräte und Komponenten durch Kabelbäume verbunden sind. Die Beeinflussung erfolgt dabei durch leitungsgeführte Störgrößen.

Das Prüfergebnis gilt grundsätzlich für das Gesamtsystem, d.h. den Prüfling (EUT) zusammen mit angeschlossenen Kabelbäumen (CUT) und Zusatzgeräten (AE).

Die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen, die nach unterschiedlichen Normen zur Stromeinspeisung gewonnen wurden, ist nur möglich, wenn die jeweils eingekoppelte Prüfleistung auch die gleiche Störbelastung im Prüfling hervorruft.

Unterschiedliche Verfahren zur PrüfpegelEinstellung in den Normen DIN EN 61000-4-6 und DIN ISO 11452-4 führen zu unterschiedlichen Störbeaufschlagungen des zu prüfenden Systems.

Bei der Verwendung des Referenzparameters 'Vorlaufleistung' nach DIN EN 61000-4-6, MIL-STD-462D sowie DEF STAN 59-41 wird bei der Kalibrierung und bei der Prüfung die gleiche Leistung in die Stromeinspeisung eingekoppelt. Das zu prüfende System wird dadurch auch bei unterschiedlichen Impedanzverhältnissen mit dem gleichen Störpegel beaufschlagt.

Zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit der Mess- und Prüfergebnisse ist eine genaue Spezifizierung und Dokumentation der Prüfbedingungen notwendig. Die Prüfbedingungen sollen die realen Installationsbedingungen möglichst gut nachbilden, damit das Prüfergebnis eine Aussage über das tatsächliche Verhalten des Prüflings beim Betrieb im Gesamtsystem ermöglicht. Bei der Prüfung sind deshalb der Originalkabelbaum sowie realistische Lastimpedanzen (Prüfling und Zusatzgeräte) zu verwenden.

Der Betrieb des Prüflings an unterschiedlichen Kabelbäumen kann zu erheblichen Unterschieden der Störfestigkeit des Gesamtsystems führen. Die Länge des Kabelbaumes bzw. die Länge der einzelnen Adern bestimmt hierbei die untere Resonanzfrequenz f_{RES} .

Bei Kfz-Kabelbäumen liegt diese im Bereich von einigen 10 MHz, bei Nutzfahrzeugen und Flugzeugen bei wenigen MHz.

Unterschiedliche Abstände des Kabelbaumes von der Massefläche, unterschiedliche Abstände der Stromeinspeisezange vom Prüfling sowie die Verwendung zusätzlicher Strommesszangen führen bei Störfestigkeitsprüfungen mit Stromeinspeisung nach DIN ISO 11452-4, MIL-STD-462D sowie DEF STAN 59-41 unterhalb von f_{RES} nicht zu signifikanten Änderungen der Störfestigkeit des Gesamtsystems (maximal 2,2 dB), sofern hierbei die jeweiligen Toleranzbereiche eingehalten werden.

DIN EN 61000-4-6 legt den Abstand der Stromeinspeisezange vom Prüfling in einem relativ großen Toleranzbereich 100...300 mm fest. Daher ist hierbei eine genaue Dokumentation des Abstandes für die Reproduzierbarkeit des Prüfergebnisses erforderlich.

Bei Störfestigkeitsprüfungen oberhalb von f_{RES} können auch geringfügige Änderungen geometrischer und elektrischer Einflussgrößen des Prüfaufbaus Veränderungen der Störfestigkeitsschwelle des Gesamtsystems von mehr als 10 dB bewirken. Daher muss ein entsprechend größerer Prüfstrom verwendet werden, um die notwendige Störbeaufschlagung am Prüflingseingang sicherzustellen.

Um die Leistung angeben zu können, die bei der Prüfung über die Stromeinspeisezange an das Gesamtsystem (Prüfling, Kabelbaum, Zusatzgeräte) abgegeben wird, müssen die Übertragungseigenschaften (Transmissions- und Reflexionsverhalten) der Zange in der Prüfanordnung bekannt sein.

Die Angabe der Einfügungsdämpfung im Datenblatt des Herstellers liefert hierzu keine genaue Aussage, da in der Einfügungsdämpfung grundsätzlich auch die Übertragungseigenschaften der jeweils verwendeten Kalibriereinrichtung mit enthalten sind.

Die Anwendung eines Korrektionsverfahrens ('deembedding') mit Hilfe von Streuparametern (siehe Kapitel 2.5.1 und 2.5.2) ermöglicht die getrennte Bestimmung der Übertragungseigenschaften von Stromeinspeisezange und Kalibriereinrichtung.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Anwendung der Stromeinspeisung (Bulk-Current-Injection, BCI) zur Störfestigkeitsprüfung von elektronischen Komponenten, Betriebsmittel, Geräten und Systemen bei unterschiedlichen Prüfbedingungen in einem Frequenzbereich von 100 kHz bis 400 MHz untersucht.

Bei der Stromeinspeisung erfolgt eine transformatorische Einkopplung leitungsgeführter Störgrößen in Kabelbäume (Leitungsstränge) mit Hilfe von Stromeinspeisezangen, um die Wirkungen eingestrahelter elektromagnetischer Felder nachzubilden.

Hierbei wird von Leistungen ausgegangen, die auf das gesamte zu prüfende System bestehend aus Prüfling, Kabelbaum und Zusatzgeräten wirken. Durch eine Kalibrierung der Stromeinspeisezangen in einer Kalibriereinrichtung mit definierter Last wird der Zusammenhang zwischen der vom Prüfgenerator abgegebenen Leistung und der in die Kalibriereinrichtung (Kalibrierhalter) eingekoppelten Leistung ermittelt. In den Normen werden hierzu äquivalente Ströme oder Spannungen im Kalibrierhalter als Prüfschärfewerte für die Störfestigkeitsprüfung angegeben.

Bei der Kalibrierung sind auch die Einflüsse der verwendeten Kalibriereinrichtung in den Kalibrierdaten mit enthalten.

In der Arbeit wird ein Verfahren gezeigt, das eine getrennte Bestimmung der Eigenschaften der Stromeinspeisezangen und der Einflüsse der Kalibriereinrichtung mit Hilfe von Streuparametern ermöglicht. Dadurch lassen sich die während der Störfestigkeitsprüfung an das zu prüfende System abgegebene Leistung sowie die Verluste der Stromeinspeisezange genauer angeben.

Bei der Stromeinspeisung ergeben sich unterschiedliche Prüfbedingungen durch Änderungen der Eigenschaften des Prüfaufbaus, der Prüfeinrichtung, der Prüfumgebung, der Art der Prüfstörgröße sowie des Prüfablaufes. Diese Änderungen können durch die Wirkungen geometrischer und elektrischer Einflussgrößen beschrieben werden.

Um gleiche Prüfbedingungen mit reproduzierbaren Prüfergebnissen zu erhalten, sind die Verfahren zur Störfestigkeitsprüfung in Normen und Richtlinien detailliert festgelegt.

Eine Gegenüberstellung der Normen DIN EN 61000-4-6, DIN ISO 11452-4, DIN ISO 11451-4, Richtlinie 95/54/EG, MIL-STD-462D (CS114) und DEF STAN 59-41 (DCS02) zeigt Unterschiede hinsichtlich der jeweiligen Anwendungsbereiche, der elektrischen und geometrischen Daten des Prüfaufbaus, des Prüfablaufes, der Prüfgrößen und Prüfschärfewerte. Daher liefern die Prüfungen nach den verschiedenen Normen prinzipiell keine vergleichbaren Ergebnisse.

Bei der Untersuchung der Einflussgrößen ist der Zusammenhang zwischen den Störgrößen am Eingang der Stromeinspeisung und den Störgrößen am Prüflingseingang zu ermitteln.

In der Literatur angegebene experimentelle Untersuchungen von Einflussgrößen bei der Stromeinspeisung betrachten den Betrag des Stromes in den einzelnen Adern oder die Stromsumme im Kabelbaum jeweils in der Nähe des Prüflings. Die Messung des Stromes erfolgt dabei mit einer Strommesszange. Eine Trennung der Einflüsse durch die Strommesszange und andere Einflussgrößen erfolgt nicht.

Zur Trennung der Einflüsse wird in der vorliegenden Arbeit ein Prüfling mit genau bekanntem Störfestigkeitsverhalten verwendet. Der Prüfling dient als Indikator für das Erreichen eines bestimmten Störpegels an den Prüflingseingängen. Er besteht aus parallel arbeitenden Schwellwertdetektoren, die Überschreitungen fest eingestellter Schwellwerte des Stromes am entsprechenden Eingangstor des Prüflings detektieren.

Durch Stromeinspeisung wird das Gesamtsystem so beaufschlagt, dass der Prüfling eine Änderung des Funktionszustandes meldet. Die hierzu jeweils erforderliche äußere Störgröße wird am Prüfgenerator bzw. am Eingang der Stromeinspeisung gemessen. Die aufwendigere Messung der Störgrößen direkt am Prüflingseingang ist nicht erforderlich.

Der Einfluss elektrischer und geometrischer Einflussgrößen wird somit verglichen und bewertet anhand der äußeren Störgrößen (Leistungen bzw. Prüfströme), die – bei gleicher Prüflingsbelastung – zu einer Prüflingsreaktion (Schwellwertüberschreitung) führen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Einflussgrößen experimentell untersucht: Anzahl der Adern im Kabelbaum, Länge des Kabelbaumes, Abstand des Kabelbaumes von der Massefläche, Abstand der Stromeinspeisung vom Prüfling, Verwendung zusätzlicher Strommesszangen, Eingangsimpedanzen von Prüfling und Zusatzgerät, Referenzparameter bei der Prüfpegeleinstellung.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der zur Auslösung einer Prüflingsreaktion erforderliche Prüfstrom bei der Stromeinspeisung (Störfestigkeitsschwelle) hängt stark von den (asymmetrischen) Impedanzen des Prüflings und des Zusatzgerätes ab.
- Die Länge des Kabelbaumes bzw. die Länge der einzelnen Adern legt die untere Resonanzfrequenz des zu prüfenden Systems fest. Oberhalb dieser Frequenz können auch geringfügige Änderungen geometrischer und elektrischer Einflussgrößen des Prüfaufbaus Veränderungen der Störfestigkeitsschwelle des Gesamtsystems von mehr als 10 dB bewirken.
- Die Änderung des Abstandes des Kabelbaumes von der Massefläche im Bereich 30...60 mm (Angabe in DIN EN 61000-4-6) führt unterhalb der Resonanzfrequenz zu Unterschieden der Störfestigkeitsschwelle von 1,7 dB.
- Änderungen des Abstandes der Stromeinspeisetzange vom Prüfling von 150 mm \pm 10 mm (Angabe in DIN ISO 11452-4) bewirken bis 400 MHz Änderungen der Störfestigkeitsschwellen von max. 2 dB. Änderungen im Bereich 100...300 mm führen bereits bei 80 MHz (obere Frequenzgrenze nach DIN EN 61000-4-6) zu Unterschieden der Störfestigkeitsschwellen von 4 dB gegenüber der Position 150 mm.
- Die Einfügung einer zusätzlichen Strommesszange ruft unterhalb der Resonanzfrequenz eine Änderung der Störfestigkeitsschwelle von ca. 1,5 dB hervor. Oberhalb der Resonanzfrequenz beträgt die Änderung bis zu 10 dB.
- Unterschiedliche Referenzparameter 'Vorlaufleistung' bzw. 'Nettoleistung' bei der Einstellung des Prüfstromes führen zu Unterschieden der entsprechenden Störfestigkeitsschwellen bis zu 5 dB.

Die Unsicherheit beim Messen wird nach DIN 1319 durch die kombinierte Standardunsicherheit bzw. die erweiterte Unsicherheit angegeben. Diese beträgt bei den hier durchgeführten Untersuchungen maximal 1,3 dB bzw. 2,4 dB.

Bei der Anwendung der Stromeinspeisung für die Störfestigkeitsprüfung ist zu beachten, dass das Prüfergebnis grundsätzlich nur für den Prüfling in der jeweiligen Prüfanordnung gilt. Wird der Prüfling an einem anderen Kabelbaum betrieben, z.B. mit anderer Länge oder anderen Lastimpedanzen, so können sich erhebliche Änderungen der Störfestigkeit des Gesamtsystems ergeben.

Zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse bei der Stromeinspeisung ist daher eine sehr detaillierte Dokumentation der Prüfbedingungen notwendig.

Literaturverzeichnis

- [1] Adams, J.W. ; Cruz, J. ; Melquist, D.: *Comparison Measurements of Currents Induced by Radiation and Injection*. IEEE Transactions on EMC, Vol. 34, No. 3, August 1992, S. 360-362
- [2] Archambeault, B. ; Brench, C.E.: *Reducing measurement uncertainty in EMC test laboratories*. Interference Technical Engineers' Master (ITEM) 1999, S. 172-184,200
- [3] Audone, B. ; Ferrero, G. ; Giorcelli, L. ; Vecchi, G.: *Critical Examination of Bulk Current Injection Techniques: Theoretical Aspects*. 6th International Conference on EMC, York (UK), 12.-15.09.1988, Institution of Electronic and Radio Engineers, Publication No. 81, S. 109-115
- [4] Ball, R. ; Jennings, P. ; Lever, P.: *EMC Testing Rover Cars*. Engineering science and education journal, December 1992, S. 261-266 ; siehe auch: <http://www.warwick.ac.uk/~esrjo/iee.html>
- [5] Ball, R. ; Jennings, P.: *Warwick Manufacturing Group, Electronics Group*. <http://www.warwick.ac.uk/atc/electronics/emc.html>
- [6] Bates, T.: *A common test technique for vehicle and component manufactures*. I Mech E Conf. Publ., Vol. 12, London, 1985, S. 253-262
- [7] Bittinger, W.M.: *Die Meßtechnik der Elektromagnetischen Verträglichkeit im Kraftfahrzeug*. Dissertation, Technische Universität, Wien, 1990
- [8] Bittinger, W.M.: *Die Anwendung der Stromeinspeisung als Prüfmittel bei Störfestigkeitsuntersuchungen von elektronischen Regelungen für die Automobilindustrie*. Tagung 'Elektronik im Kfz' im Haus der Technik, Essen, 30.-31.05.1990
- [9] Bull, D.A. ; Carter, N.J.: *Testing Civil Aircraft and Equipment to the New External RF Environmental Conditions*. 7th International Conference on EMC, York (UK), 28.-31.08.1990, IEE Conf. Publ. 326, S. 194-203
- [10] Carter, N.J.: *The Application of Low Level Swept RF Illumination as a Technique to aid Aircraft EMC*. Interference Technical Engineers' Master (ITEM) 1990, S. 236-252
- [11] Carter, N.J.: *Bulk Current Injection (BCI): Its Past Present and Future? In Aerospace*.
http://ourworld.compuserve.com/homepages/nigel_carter/bci.htm
- [12] Carter, N.J.: *Low Cost Susceptibility Testing*. IEE Colloquium on 'Low Cost EMC Testing', Birmingham, 21.09.1993, S. 5/1-5/6

- [13] Carter, N.J. ; Bull, D.A.: *EMC Testing of Whole Aircraft*. IEE Colloquium on 'EMC in Large Systems', London, 01.02.1994, S. 4/1-4/5
- [14] Carter, N.J. ; Redman, M. ; Willis, P.E.: *Validation of New Aircraft Clearance Procedures*. 6th International Conference on EMC, York (UK), 12.-15.09.1988, Institution of Electronic and Radio Engineers, Publication No. 81, S. 117-124
- [15] Chao, S.F.: *Analysis of Current Injection Devices*. International Symposium on EMC, Nagoya, 08.-10.09.1989, S. 328-333
- [16] Coenen, M.: *Conducted RF emission and RF immunity testing*. Proceedings 11th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC, Zürich, 07.-09.03.1995, S. 225-230
- [17] Davies, O.J.; Doshi, R.B.; Nagenthiram, B.: *Correction of Microwave-Network-Analyser Measurements of 2-Port Devices*. Electronics Letters, Vol. 9, No. 23, 15.11.1973, S. 543-544
- [18] DEF STAN 59-41 (Part 3) Supplement H / Issue 5: *Electromagnetic Compatibility, Part 3: Technical Requirements / Test Methods and Limits, Supplement H: Test Method DCS02 Conducted Susceptibility, Power, Control and Signal Lines, 50 kHz - 400 MHz*. Defence Standard, Ministry of Defense, United Kingdom, 06.10.1995
- [19] DEF STAN 59-41 (Part 5) / Issue 2: *Electromagnetic Compatibility, Part 5: Performance Specification for Specialised EMC Test Equipment*. Defence Standard, Ministry of Defense, United Kingdom, 06.02.1998
- [20] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheiten beim Messen*. Deutsche Übersetzung des 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement', Beuth-Verlag, Berlin, 1. Auflage 1995
- [21] DIN 1319-1 : 1995-01: *Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*.
- [22] DIN 1319-3 : 1995-02: *Grundlagen der Meßtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit*.
- [23] DIN EN 61000-4-6 : 1997-04: *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4: Prüf- und Meßverfahren - Hauptabschnitt 6: Störfestigkeit gegen leitungsgeführte Störgrößen, induziert durch hochfrequente Felder*.
- [24] DIN ISO 11451-1 : 2000-03: *Straßenfahrzeuge - Elektrische Störungen durch schmalbandige gestrahlte elektromagnetische Energie – Fahrzeugprüfverfahren - Teil 1: Allgemeines und Definitionen*.

- [25] DIN ISO 11451-4 : 2000-03: *Straßenfahrzeuge - Elektrische Störungen durch schmalbandige gestrahlte elektromagnetische Energie – Fahrzeugprüfverfahren - Teil 4: Stromeinspeisung in den Kabelbaum (BCI)*.
- [26] DIN ISO 11452-1 : 2000-03: *Straßenfahrzeuge - Elektrische Störungen durch schmalbandige gestrahlte elektromagnetische Energie - Prüfverfahren für Komponenten - Teil 1: Allgemeines und Definitionen*.
- [27] DIN ISO 11452-4 : 2000-03: *Straßenfahrzeuge - Elektrische Störungen durch schmalbandige gestrahlte elektromagnetische Energie - Prüfverfahren für Komponenten - Teil 4: Stromeinspeisung (BCI)*.
- [28] Deutscher Kalibrierdienst (DKD): *Ermittlung von Meßunsicherheiten*. DKD-3, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, 1991
- [29] DO-160D : 1997-07: *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Electronic / Electrical Equipment and Instruments*. Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA), 29.07.1997
- [30] Dunker, L. ; Stecher, M.: *Berücksichtigung der Meßunsicherheit bei EMV-Messungen*. In: Schmeer, H.R. (Hrsg.) : *Elektromagnetische Verträglichkeit / EMV '96*, vde-verlag, Berlin, 1996, S. 883-890
- [31] EATON Corporation, Electronic Instrumentation Division: *Operations Manual for Bulk Current Injection Probes, Model 95242-1*.
- [32] Europäische Union: *Richtlinie 95/54/EG der Kommission vom 31. Oktober 1995 (EMV von Kraftfahrzeugen)*. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Brüssel, 08.11.1995
- [33] FCC Fischer Custom Communications, Inc.: *Bulk Current Injection Probes*. Technisches Datenblatt
- [34] FCC Fischer Custom Communications, Inc.: *Current Probes*. Technisches Datenblatt
- [35] Foegelle, M.D.: *A Statistical Approach to Measurement Uncertainty*. Interference Technical Engineers' Master (ITEM) 1998, S. 114-126
- [36] Goedbloed, J.J.: *Uncertainties in Standardized EMC Compliance Testing*. Proceedings 13th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC, Zürich, 16.-18.02.1999, S. 161-178
- [37] Göpel, K.D.: *Meßunsicherheiten bei Störfestigkeitsmessungen*. Kompendium EMC Journal 1997, KM Verlag & Kongreß, München, S. 271-274
- [38] Groll, H.: *Mikrowellen-Meßtechnik*. Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1969

- [39] Gudat, W. ; Oberjatzas G.: *Erfahrungen aus EMV-Tests zur Ermittlung der Einstrahlungsfestigkeit von Kfz-Elektroniksystemen*. VDI-Berichte, Heft 780, 1989, S. 295-306
- [40] Hahn, E.R.: *Improved Radio Frequency Conducted Susceptibility Test Method Development*. The Boeing Company, D6-15092-TN, Nov. 1967
- [41] Hill, D.A.: *Currents Induced on Multiconductor Transmission Lines by Radiation and Injection*. IEEE Transactions on EMC, Vol. 34, No. 4, November 1992, S. 445-450
- [42] ISO 11451-1 : 1995-12: *Road Vehicles - Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy - Vehicle test methods - Part 1: General and definitions*.
- [43] ISO 11451-4 : 1995-12: *Road Vehicles - Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy - Vehicle test methods - Part 4: Bulk current injection (BCI)*.
- [44] ISO 11452-1 : 1995-12: *Road Vehicles - Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy - Component test methods - Part 1: General and definitions*.
- [45] ISO 11452-4 : 1995-12: *Road Vehicles - Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy - Component test methods - Part 4: Bulk current injection (BCI)*.
- [46] Javor, K.: *The How and Why of Bulk Current Injection (Part 1)*. EMC Test & Design, September/October 1992, S. 35-40
- [47] Javor, K.: *The How and Why of Bulk Current Injection (Part 2)*. EMC Test & Design, November/December 1992, S. 37-42
- [48] Jennings, P. ; Ball, R.: *Risk Assessment for BCI Testing*. IEE Colloquium on 'Achieving an Acceptable Confidence Level in EMV Measurements', London. 04.06.1991, S. 7/1-7/5
- [49] Jennings, P. ; Ball, R. ; Lever, P.: *A Statistical Approach to System-Level Radiated Susceptibility Testing*. IEE Colloquium on 'The Role of Statistics in EMC Specification Design and Clearance', London, 13.05.1992, S. 5/1-5/5
- [50] Jennings, P. ; Ball, R. ; Lever, P.: *Using Statistics to Reduce the Uncertainty in System Level Susceptibility Testing*. IEEE International Symposium on EMC, Atlanta, 14.-18.08.1995, S. 47-50
- [51] Käs, G. ; Pauli, P.: *Mikrowellentechnik - Grundlagen, Anwendung, Meßtechnik*. Franzis-Verlag, München, 1991
- [52] Kessel, W.: *ISO / BIPM-Leitfaden: Meßunsicherheit*.

<http://www.metrodata.de/papers/waage.html>

- [53] Klingler, M. ; Zhang, Z. ; Heddebaut, M. ; Ficheux, S.: *Modelling and Simulation of Radiated or Conducted Immunity Tests*. Proceedings 12th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC, Zürich, 18.-20.02.1997, S. 645-650
- [54] Kuvedu-Libla, J.-R.: *Bulk-Current-Injection (BCI)-Methode als Prüfverfahren für die Elektronik von Kraftfahrzeugen*. Fortschrittsberichte VDI-Reihe 12, Nr. 317, VDI Verlag, Düsseldorf, 1997
- [55] Lever, P.H.: *Developing an automotive system level electromagnetic susceptibility test*. Proceedings 24th International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA), Florenz, 20.-24.5.1991, S. 639-648
- [56] Lever, P.H.: *Development of a system level bench test for the automotive industry*. 7th International IEE Conference on EMC, York, 28.-31.08.1990, IEE Conf. Publ. 326, S. 639-648
- [57] Maier, Th.: *Simulation des Reflexions- und Übertragungsverhaltens von n-Toren bei beliebigen Abschlußverhältnissen im HF-Bereich*. Mikrowellen & HF Telecommunications Magazin, Vol. 18, No. 2, 1992, S. 87-94
- [58] Marshall, R.C.: *Reproduceability and Relevance in Current Injection Testing*. IEE Colloquium on 'Achieving an Acceptable Confidence Level in EMC Measurements', London, 04.06.1991, S. 5/1-5/4
- [59] Meinke, H. ; Gundlach, F.W. ; Lange, K. (Hrsg.) ; Löcherer, K.-H. (Hrsg.): *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Studienausgabe Band 1: Grundlagen*. Springer-Verlag, Berlin , 4. Aufl. 1986
- [60] Millanta, L.M.: *Fundamentals of EMC Current Probes*. Proceedings 12th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC, Zürich, 18.-20.02.1997, S. 585-590
- [61] MIL-STD-461D : 1993-01: *Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Emissions and Susceptibility*. US-Department of Defense, 11.01.1993
- [62] MIL-STD-462D : 1993-01: *Test Method Standard for Measurement of Electromagnetic Interference Characteristics*. US-Department of Defense, 11.01.1993
- [63] Morgan, D.: *A handbook for EMC testing and measurement*. IEE Electrical Measurement Series 8

- [64] Oberjatzas, G.: *Sicherstellung der EMV von Kfz-Elektroniken durch leitungsgebundene Messungen*. In: Schmeer, H.R. (Hrsg.) : Elektromagnetische Verträglichkeit / EMV '92, vde-verlag, Berlin, 1992, S. 769-776
- [65] Oberjatzas, G.: *Strominjektion oder BCI-Methode, Ein Komponententestverfahren für Kraftfahrzeug-Elektroniksysteme*. GME-Fachbericht 12, Elektromagnetische Verträglichkeit in der Kraftfahrzeugtechnik, vde-Verlag, Berlin, 1993, S. 253-259
- [66] Oberjatzas, G.: *Prüfverfahren: Stromeinspeisung / BCI*. GMM-Fachbericht 20, Elektromagnetische Verträglichkeit in der Kraftfahrzeugtechnik, vde-Verlag, Berlin, 1997, S. 181-182
- [67] Oberto, G. ; Bolla, L. ; Rostagno, G. ; Barardo, R.: *Critical Examination of Bulk Current Injection Techniques: Experimental Comparison*. 6th International Conference on EMC, York (UK), 12.-15.09.1988, Institution of Electronic and Radio Engineers, Publication No. 81, S. 101-107
- [68] Paul, C.R.: *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc., New York, 1994
- [69] Perini, J.: *Radiated versus injected measurements: When are they equivalent ?* Proceedings 10th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC, Zürich, 09.-11.03.1993, S. 343-348
- [70] Perini, J. ; Cohen, L.S.: *Radiated and injected test: When are they equivalent ? - Part Two*. Proceedings 11th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC, Zürich, 07.-09.03.1995, S. 231-235
- [71] Perini, J. ; Cohen, L.S.: *On the equivalent of radiated and injected tests*. IEEE International Symposium on EMC, Atlanta, 14.-18.08.1995, S.77-80
- [72] Rippl, K.: *Meßunsicherheiten in der EMV-Meßtechnik*. Kompendium EMC-Journal 1996, KM Verlag & Kongreß, München, 1996, S. 248-252
- [73] Rippl, K.: *Störfestigkeitsmessungen*. In: Gonschorek, K.H. / Singer., H. (Hrsg.): Elektromagnetische Verträglichkeit - Grundlagen, Analysen, Maßnahmen. B.G. Teubner, Stuttgart, 1992
- [74] Rippl, K.: *Vergleichbarkeit des Stromzangen-Einkoppelverfahrens mit der Störfestigkeitsmessung gegen elektromagnetische Felder in Absorberhallen*. VDI-Berichte, Heft 893, 1991, S. 177-195
- [75] Rohde&Schwarz: *Millivoltmeter URV5, HF-Tastkopf URV-Z7, 50-Ω-Adapter URV5-Z50, Doppelrichtkoppler URV5-Z9*. Technische Datenblätter und Gerätebeschreibungen
- [76] Rohde&Schwarz: *Vector Analyzer ZPV*. Technisches Datenblatt

- [77] Scherz, H.: *59,5 dB - alles ok? - Zur Frage der Meßunsicherheiten bei EMV-Messungen*. EMC-Journal 4/1995, KM Verlag & Kongreß, München, 1995, S. 39-43
- [78] Schuon, E. ; Wolf, H.: *Die Darstellung von Mehrpolen durch die Streumatrix, Teil I und II*. Nachrichtentechnische Zeitung NTZ, Heft 7/1959, S. 361-366 und Heft 8/1959, S. 408-415
- [79] Smith, D.C.: *High Frequency Measurements and Noise in Electronic Circuits*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1993. - ISBN 0-442-00636-5
- [80] Souza, J.R. ; Talboys, E.C.: *S-parameter characterization of coaxial to microstrip transition*. IEE Proc., Vol. 129, Pt. H, No.1 February 1982, S. 37-40
- [81] Stecher, M.: *Meßunsicherheiten in der EMV*. Kompendium EMC Journal 1997, KM Verlag & Kongreß, München, S. 271-274
- [82] Stecher, M.: *Measurement Uncertainty in EMC*. Interference Technical Engineers' Master (ITEM) 1997, S. 58-64,246
- [83] Steinbuch, K. ; Rupprecht, W.: *Nachrichtentechnik, Band I: Schaltungstechnik*. Springer-Verlag, Berlin , 3. Aufl. 1982. - ISBN 3-540-11342-8
- [84] Stephan, T.: *Störfestigkeitsmessungen an Kfz-Komponenten*. EMC Kompendium 1998, KM Verlagsgesellschaft, München, 1998, S. 208-209
- [85] Stevens, K.G. ; Willis, P.E.: *Onboard Aircraft Measurement and Techniques for Whole Aircraft EMC Clearance*. 7th International Conference on EMC, York (UK), 28.-31.08.1990, IEE Conf. Publ. 326, S. 204-210
- [86] Sultan, M.F.: *Modeling of a Bulk Current Injection Setup for Susceptibility Threshold Measurements*. IEEE International symposium on EMC, San Diego, 16.-18.09.1986, S. 188-195
- [87] TEGAM Inc.: *Emission and Injection Current Probes - Application and Description*. Technisches Datenblatt
- [88] Ward, D.D.: *The Bulk Current Absorption Technique for Evaluation of Coupling Between Radiated Fields and Wiring Harnesses*. IEE Colloquium on 'EMC in Motor Vehicles', London, 09.03.1992, S. 3/1-3/3
- [89] Werner, H.: *Notwendigkeit von HF-Störfestigkeits-Untersuchungen am System. Erfahrungen mit der HF-Freifeld-Bestrahlungsanlage in Manching*. In: Schmeer, H.R. (Hrsg.) : *Elektromagnetische Verträglichkeit / EMV '96*, vde-verlag, Berlin , 1996, S. 111-118
- [90] Williams, T.: *EMC Amplifiers for Immunity Testing*. Interference Technical Engineers' Master (ITEM) 1997, S. 183-186, 284-286

- [91] Willis, P.E.: *Low Level Swept Frequency Coupling and Bulk Current Injection Techniques as used to aid the Control of EMI for the Automotive Industry*. IEE Colloquium on 'EMC in Motor Vehicles', London, 29.11.1990, S. 4/1-4/4
- [92] Zinke, O. ; Brunswig, H.: *Lehrbuch der HF-Technik, Band 1*. Springer-Verlag, Berlin , 3. Aufl. 1986.
- [93] Zwemke, T.: *Einflüsse unterschiedlicher Prüfbedingungen auf Störfestigkeitsprüfungen mit Stromeinspeisung (Bulk-Current-Injection)*. In: Schwab, A. (Hrsg.) : *Elektromagnetische Verträglichkeit / EMV '98*, vde-verlag, Berlin , 1998, S. 845-852

Zu dem in dieser Dissertation behandelten Themenkreis wurden unter Anleitung des Verfassers folgende Diplom- und Hausarbeiten am Institut für Steuerungstechnik und Fachdidaktik der Elektrotechnik der Universität Hannover angefertigt:

- [D1] Feise, J.: *Systemgrößen und Meßunsicherheiten bei EMV-Prüfungen nach der Bulk-Current-Injection-Methode*. Diplomarbeit, Universität Hannover, Institut für Steuerungstechnik und Fachdidaktik der Elektrotechnik, 1995.
- [H1] Gettner, K.: *Untersuchung der Einflüsse von Systemgrößen auf Störfestigkeitsprüfungen nach der Bulk-Current-Injection-Methode*. Hausarbeit, Universität Hannover, Institut für Steuerungstechnik und Fachdidaktik der Elektrotechnik, 1997.
- [H2] Otten, L.: *Aufbau eines IEC-Bus-Interface für einen Störfestigkeitsmeßplatz*. Hausarbeit, Universität Hannover, Institut für Steuerungstechnik und Fachdidaktik der Elektrotechnik, 1995.

Anhang

A1 Induktivität und Gegeninduktivität von Strommesszangen

Für die Berechnung der Induktivität und Gegeninduktivität von Strommesszangen wird die Anordnung nach Bild A1.1 (Ringkernspule) betrachtet. Hierbei umschließen die $N_0=N$ Windungen der Strommesszange (Sekundärseite) einen permeablen Ringkern mit der relativen Permeabilität μ_r , dem Außendurchmesser D_a , dem Innendurchmesser D_i und der Breite b_K . Bei den hier verwendeten Strommesszangen ('clamp-on current probes') besteht der Ringkern aus zwei Hälften, die durch Luftspalte der Breite δ voneinander getrennt sind ('gescherter Ringkern'). Durch den Ringkern führt ein vom Strom I_2 durchflossener Leiter ($N_2=1$).

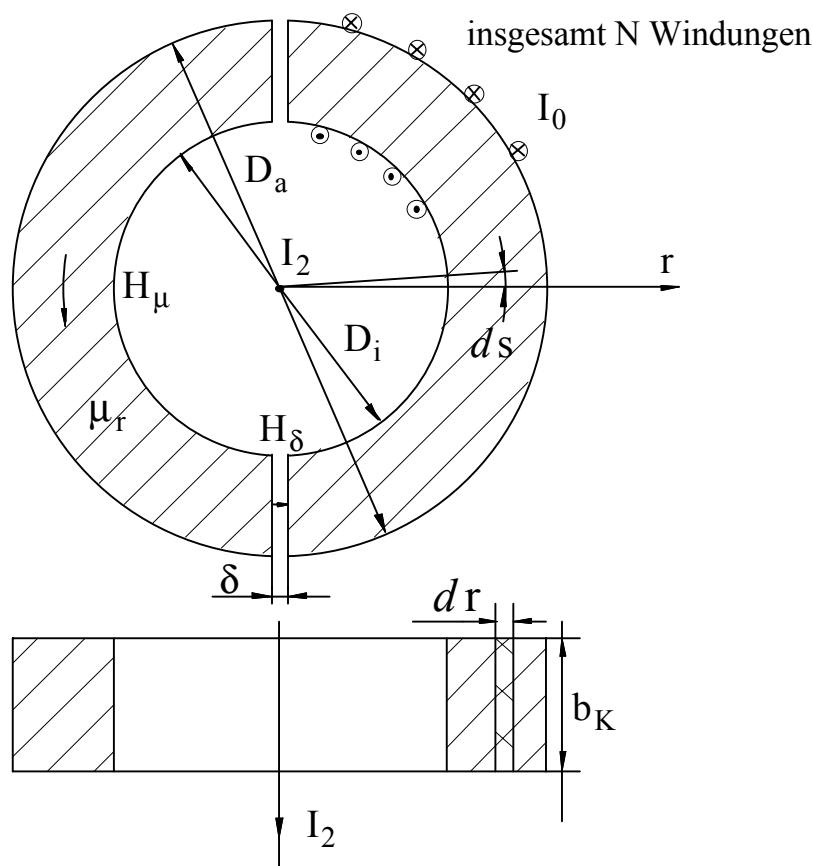


Bild A1.1: Strommesszange als Ringkernspule

Unter Anwendung des Durchflutungssatzes

$$\oint_s \vec{H} \cdot d\vec{s} = \Theta \quad (\text{A1.1})$$

ergibt sich für die magnetische Feldstärke H_μ im Ringkern und H_δ im Luftspalt in Abhängigkeit des radialen Abstandes r vom Mittelpunkt:

$$H_\mu \cdot (2\pi r - 2\delta) + H_\delta \cdot 2\delta = I_2 \quad (\text{A1.2})$$

Unter Vernachlässigung der tangentialen Komponente des magnetischen Feldes sowie der Voraussetzung homogenen Kernmaterials mit linearem Verhalten ($\mu_r = \text{const.}$)

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \quad (\text{A1.3})$$

ergibt sich:

$$B = \frac{I_2}{\frac{2\pi r - 2\delta}{\mu_r \cdot \mu_0} + \frac{2\delta}{\mu_0}} \quad (\text{A1.4})$$

Für den magnetischen Fluss Φ gilt:

$$\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (\text{A1.5})$$

Daraus folgt:

$$\Phi = \Phi(I_2) = \int_{\frac{D_i}{2}}^{\frac{D_a}{2}} \frac{I_2 \cdot b_K}{\frac{2\pi r - 2\delta}{\mu_0 \cdot \mu_r} + \frac{2\delta}{\mu_0}} \cdot dr = \int_{\frac{D_i}{2}}^{\frac{D_a}{2}} \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I_2 \cdot b_K}{2\pi r - 2\delta + \mu_r \cdot 2\delta} \cdot dr \quad (\text{A1.6})$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2\pi} \cdot I_2 \cdot b_K \cdot \ln \left(\frac{D_a + \frac{2\delta}{\pi} \cdot (\mu_r - 1)}{D_i + \frac{2\delta}{\pi} \cdot (\mu_r - 1)} \right) \quad (\text{A1.7})$$

In linearen magnetischen Kreisen gilt Umkehrbarkeit. Das bedeutet für die Gegeninduktivität M :

$$M = M_{02} = \frac{\Psi_{02}}{I_2} = \frac{k_0 \cdot N_0 \cdot \Phi(I_0)}{I_2} = M_{20} = \frac{\Psi_{20}}{I_0} = \frac{k_2 \cdot N_2 \cdot \Phi(I_2)}{I_0} \quad (\text{A1.8})$$

Für eine Näherungsbetrachtung wird angenommen, dass der magnetische Fluss sich streuungsfrei innerhalb des Kerns konzentriert ($k_0 = k_2 = 1$).

Es ergibt sich dann für die Gegeninduktivität M der Anordnung:

$$M = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2\pi} \cdot N \cdot b_K \cdot \ln \left(\frac{D_a + \frac{2\delta}{\pi} \cdot (\mu_r - 1)}{D_i + \frac{2\delta}{\pi} \cdot (\mu_r - 1)} \right) \quad (\text{A1.9})$$

und für die Induktivität L_0 bezüglich der Wicklungsseite (Sekundärseite der Strommesszange):

$$L_0 = \frac{\Psi_0}{I_0} = \frac{N_0 \cdot \Phi(I_0)}{I_0} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2\pi} \cdot N^2 \cdot b_K \cdot \ln \left(\frac{D_a + \frac{2\delta}{\pi} \cdot (\mu_r - 1)}{D_i + \frac{2\delta}{\pi} \cdot (\mu_r - 1)} \right) \quad (\text{A1.10})$$

Die Gegeninduktivität und Induktivität der Strommesszangen wird durch die Luftspalte stark reduziert. In den Datenblättern der Hersteller [31][34][87] finden sich keine Angaben zur Luftspaltbreite δ und zur relativen Permeabilität μ_r der Ringkerne. Beide Größen können zusammengefasst werden in der effektiven relativen Permeabilität $\tilde{\mu}_r$:

$$\tilde{\mu}_r = \mu_r \cdot \frac{\ln \left(\frac{D_a + \frac{2\delta}{\pi} \cdot (\mu_r - 1)}{D_i + \frac{2\delta}{\pi} \cdot (\mu_r - 1)} \right)}{\ln \left(\frac{D_a}{D_i} \right)} \quad (\text{A1.11})$$

Daraus ergibt sich entsprechend den Angaben von Millanta [60] (siehe auch Gln. (2.16) und (2.18)):

$$M = \frac{\mu_0 \cdot \tilde{\mu}_r}{2\pi} \cdot N \cdot b_K \cdot \ln \left(\frac{D_a}{D_i} \right) \quad (\text{A1.12})$$

und

$$L_0 = \frac{\mu_0 \cdot \tilde{\mu}_r}{2\pi} \cdot N^2 \cdot b_K \cdot \ln \left(\frac{D_a}{D_i} \right) \quad (\text{A1.13})$$

A2 Einfügeimpedanz von Strommesszangen

Eine analytische Beschreibung der Einfügeimpedanz von Strommesszangen gibt Millanta [60]. Hierbei werden parasitäre Kapazitäten vernachlässigt.

Die Einfügeimpedanz \underline{Z}_E setzt sich aus den beiden Anteilen $\underline{Z}_{E,Kern}$ und $\underline{Z}_{E,Refl}$ zusammen:

$$\underline{Z}_E = \underline{Z}_{E,Kern} + \underline{Z}_{E,Refl} \quad (A2.1)$$

Der Anteil $\underline{Z}_{E,Kern}$ beschreibt den Einfluss durch das Einbringen des permeablen Kerns (Breite b_K) der Strommesszange um den Leiter (CUT). Hierbei wird der magnetische Fluss Φ im Bereich des Kerns um den Faktor μ_r vergrößert. Die Induktivität der Anordnung erhöht sich damit primärseitig um

$$L_{Kern} = \frac{L - L'}{N^2} \quad (A2.2)$$

mit

$$\frac{L'}{N^2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot b_K \cdot \ln\left(\frac{D_a}{D_i}\right) \quad (A2.3)$$

Es ergibt sich für $\underline{Z}_{E,Kern}$:

$$\underline{Z}_{E,Kern} = j\omega L_{Kern} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot (\mu_r - 1) \cdot b_K \cdot \ln\left(\frac{D_a}{D_i}\right) \quad (A2.4)$$

Der Anteil $\underline{Z}_{E,Refl}$ berücksichtigt die durch die Strommesszange in den Leiter transformierte (reflektierte) Impedanz der Messschaltung (Sekundärseite).

$$\underline{Z}_{E,Refl} = \frac{(\omega M)^2}{\underline{Z}_M + j\omega L} = \frac{1}{N^2} \cdot \frac{(\omega L)^2}{\underline{Z}_M + j\omega L} \quad (A2.5)$$

Daraus folgt für die Einfügeimpedanz:

$$\underline{Z}_E = \frac{1}{N^2} \cdot \frac{\underline{Z}_M \cdot j\omega L}{\underline{Z}_M + j\omega L} - j\omega \frac{L'}{N^2} \quad (A2.6)$$

A3 Übertragungseigenschaften der Kalibriereinrichtung

Die Einfügungsdämpfung von Stromeinspeisungen entsprechend den Normenangaben wird durch die jeweils verwendete Kalibriereinrichtung beeinflusst.

Um die Einflüsse der Kalibriereinrichtung und die Eigenschaften der Stromzangen getrennt betrachten zu können, werden die Übertragungseigenschaften des leeren Kalibrierhalters (ohne montierte Stromzangen) ermittelt. Hierzu wird der Kalibrierhalter als Kettenschaltung der Zweitore A und B nach Bild A3.1 betrachtet.

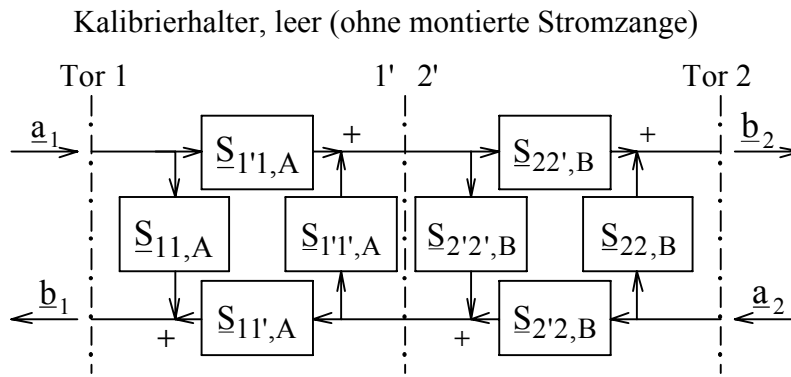


Bild A3.1: Flussdiagramm der Streuparameter des leeren Kalibrierhalters

Die Streuparameter $\underline{S}_{ij,K}$ des leeren Kalibrierhalters bezüglich der Tore 1 und 2 ($i, j = 1 \dots 2$) stehen mit den Streuparametern $\underline{S}_{ij,A}$ des Zweitores A (Tor 1 – Tor 1') sowie $\underline{S}_{ij,B}$ des Zweitores B (Tor 2' – Tor 2) in folgendem Zusammenhang :

$$\underline{S}_{11,K} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} = \underline{S}_{11,A} + \frac{\underline{S}_{1'1',A} \cdot \underline{S}_{11',A}}{1 - \underline{S}_{1'1',A} \cdot \underline{S}_{2'2',B}} \cdot \underline{S}_{2'2',B} \quad (\text{A3.1})$$

$$\underline{S}_{21,K} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} = \frac{\underline{S}_{1'1',A} \cdot \underline{S}_{22',B}}{1 - \underline{S}_{1'1',A} \cdot \underline{S}_{2'2',B}} \quad (\text{A3.2})$$

$$\underline{S}_{22,K} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} = \underline{S}_{22,B} + \frac{\underline{S}_{2'2',B} \cdot \underline{S}_{22',B}}{1 - \underline{S}_{1'1',A} \cdot \underline{S}_{2'2',B}} \cdot \underline{S}_{1'1',A} \quad (\text{A3.3})$$

$$\underline{S}_{12,K} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} = \frac{\underline{S}_{2'2',B} \cdot \underline{S}_{11',A}}{1 - \underline{S}_{1'1',A} \cdot \underline{S}_{2'2',B}} \quad (\text{A3.4})$$

Aufgrund der Umkehrbarkeit (Übertragungssymmetrie) des Kalibrierhalters gilt:

$$\underline{S}_{21,K} = \underline{S}_{12,K} \quad (\text{A3.5})$$

Außerdem ist der leere Kalibrierhalter reflexionssymmetrisch:

$$\underline{S}_{11,K} = \underline{S}_{22,K} \quad (\text{A3.6})$$

Die Streuparameter $\underline{S}_{ij,A}$ und $\underline{S}_{ij,B}$ der Zweitore A und B des leeren Kalibrierhalters ergeben sich dann zu:

$$\underline{S}_{11,A} = \frac{\underline{S}_{11,K}}{1 + \underline{S}_{21,K}} \quad (\text{A3.7})$$

$$\underline{S}_{11',A} = \sqrt{\underline{S}_{21,K} \cdot (1 - \underline{S}_{11,A}^2)} \quad (\text{A3.8})$$

sowie

$$\underline{S}_{11,A} = \underline{S}_{11',A} = \underline{S}_{22',B} = \underline{S}_{22,B} \quad (\text{A3.9})$$

$$\underline{S}_{11',A} = \underline{S}_{11',A} = \underline{S}_{22',B} = \underline{S}_{22',B} \quad (\text{A3.10})$$

Die Einfügungsdämpfung a_E ist allgemein definiert durch die (Wirk-)Leistung P_{Direkt} , die ein Generator direkt, d.h. ohne Zwischenschaltung eines Zweitors an einen Verbraucher liefern würde, bezogen auf die Leistung P_2 , die der Verbraucher tatsächlich aufnimmt. Das Zweitor besitzt hierbei die Streumatrix \underline{S} . P_{Direkt} ergibt sich, wenn man das Zweitor als direkte Verbindung auffasst ($\underline{S}_{11} = \underline{S}_{22} = 0$, $\underline{S}_{21} = \underline{S}_{12} = 1$) (siehe [78]).

$$\frac{a_E}{\text{dB}} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{Direkt}}}{P_2} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{|1 - \rho_1 \underline{S}_{11} - \rho_2 \underline{S}_{22} + \rho_1 \rho_2 \det \underline{S}|}{|\underline{S}_{21}| \cdot |1 - \rho_1 \rho_2|} \right) \quad (\text{A3.11})$$

Hierbei sind ρ_1 bzw. ρ_2 die Eingangsreflexionsfaktoren der Netzwerke, die generatorseitig (Tor 1) bzw. verbraucherseitig (Tor 2) an das Zweitor angeschlossen sind.

Die Einfügungsdämpfung des leeren Kalibrierhalters ergibt sich aufgrund des beidseitigen reflexionsfreien Abschlusses ($\rho_1 = \rho_2 = 0$) zu:

$$\frac{a_{E,K}}{\text{dB}} = 20 \cdot \log \left(\frac{1}{|\underline{S}_{21}|} \right) \quad (\text{A3.12})$$

A4 Einfügungsdämpfung einer Stromeinspeisetzange ohne Einfluss der Kalibriereinrichtung

Die Kalibrierung einer Stromeinspeisetzange erfolgt in der Kalibriereinrichtung bezüglich der Tore 0 (koaxialer Anschluss der Stromeinspeisetzange) und 2 (koaxialer Anschluss an einer Seite des Kalibrierhalters). Diese kann als Kettenschaltung der einzelnen Zweitore Z (Stromeinspeisetzange ohne Einfluss der Kalibriereinrichtung), V (Serien-Verzweigung) und B ("halber" Kalibrierhalter) betrachtet werden.

Das Flussdiagramm der Streuparameter der Stromeinspeisetzange in der Kalibriereinrichtung ist in Bild A4.1 dargestellt.

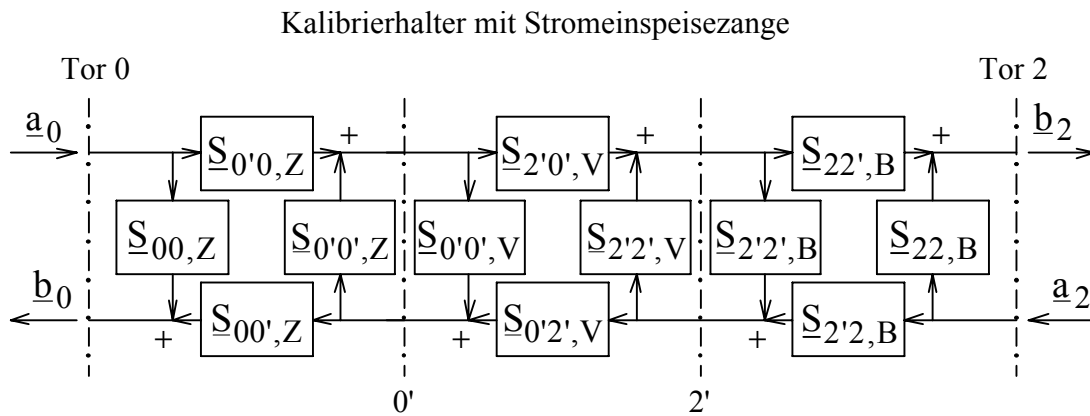


Bild A4.1: Flussdiagramm der Streuparameter einer Stromeinspeisetzange in der Kalibriereinrichtung

Die Streuparameter $\underline{S}_{ij,M}$ ($i, j \in \{0, 2\}$) bezüglich der Tore 0 und 2 stehen mit den Streuparametern $\underline{S}_{ij,Z}$ ($i, j \in \{0, 0'\}$) der Stromeinspeisetzange, $\underline{S}_{ij,V}$ ($i, j \in \{0', 2'\}$) der Serien-Verzweigung sowie $\underline{S}_{ij,B}$ ($i, j \in \{2', 2\}$) des Zweitores B in folgendem Zusammenhang (vgl. [17]):

$$\underline{S}_{00,M} = \underline{S}_{00,Z} + \frac{\underline{S}_{0'0',V} \underline{S}_{0'0,Z} \underline{S}_{00',Z} (1 - \underline{S}_{2'2',V} \underline{S}_{2'2',B}) + \underline{S}_{0'0,Z} \underline{S}_{00',Z} \underline{S}_{2'2',B} \underline{S}_{2'0',V} \underline{S}_{0'2',V}}{\underline{X}_1} \quad (\text{A4.1})$$

$$\underline{S}_{20,M} = \frac{\underline{S}_{0'0,Z} \underline{S}_{2'0',V} \underline{S}_{22',B}}{\underline{X}_1} \quad (\text{A4.2})$$

$$\underline{S}_{22,M} = \underline{S}_{22,B} + \frac{\underline{S}_{2'2',V} \underline{S}_{2'2',B} \underline{S}_{22',B} (1 - \underline{S}_{0'0',V} \underline{S}_{0'0',Z}) + \underline{S}_{2'2',B} \underline{S}_{22',B} \underline{S}_{0'0',Z} \underline{S}_{0'2',V} \underline{S}_{2'0',V}}{\underline{X}_1} \quad (\text{A4.3})$$

$$\underline{S}_{02,M} = \frac{\underline{S}_{0'0',Z} \underline{S}_{0'2',V} \underline{S}_{2'2',B}}{\underline{X}_1} \quad (\text{A4.4})$$

mit

$$\underline{X}_1 = (1 - \underline{S}_{0'0',Z} \cdot \underline{S}_{0'0',V}) \cdot (1 - \underline{S}_{2'2',B} \cdot \underline{S}_{2'2',V}) - \underline{S}_{2'0',V} \cdot \underline{S}_{0'2',V} \cdot \underline{S}_{0'0',Z} \cdot \underline{S}_{2'2',B} \quad (\text{A4.5})$$

Das Netzwerk bezüglich der Tore 0 und 2 sowie die Zweitore Z, V und B sind übertragungssymmetrisch (umkehrbar):

$$\underline{S}_{02,M} = \underline{S}_{20,M} \quad (\text{A4.6})$$

$$\underline{S}_{2'0',V} = \underline{S}_{0'2',V} \quad (\text{A4.7})$$

$$\underline{S}_{0'0',Z} = \underline{S}_{00',Z} \quad (\text{A4.8})$$

Mit den Gln. (A3.9), (A3.10), (A4.6) und (A4.7) ergeben sich die Streuparameter $\underline{S}_{ij,Z}$ der Stromeinspeisetzange ohne Einfluss der Kalibriereinrichtung zu:

$$\underline{S}_{0'0',Z} = \frac{(\underline{S}_{22,M} - \underline{S}_{22,B}) \cdot (1 - \underline{S}_{2'2',V} \underline{S}_{2'2',B}) - \underline{S}_{2'2',V} \cdot (\underline{S}_{2'2',B})^2}{\underline{X}_2} \quad (\text{A4.9})$$

$$\underline{S}_{0'0',Z} = \frac{\underline{S}_{20,M}}{\underline{S}_{2'0',V} \cdot \underline{S}_{22',B}} \cdot \underline{X}_1 \quad (\text{A4.10})$$

$$\underline{S}_{00,Z} = \underline{S}_{00,M} - \frac{\underline{S}_{0'0',V} \cdot (\underline{S}_{0'0',Z})^2 \cdot (1 - \underline{S}_{2'2',V} \underline{S}_{2'2',B}) + (\underline{S}_{0'0',Z})^2 \cdot (\underline{S}_{2'0',V})^2 \cdot \underline{S}_{2'2',B}}{\underline{X}_1} \quad (\text{A4.11})$$

mit

$$\underline{X}_2 = (\underline{S}_{2'2',B})^2 \cdot ((\underline{S}_{0'2',V})^2 - \underline{S}_{2'2',V} \underline{S}_{0'0',V}) + (\underline{S}_{22} - \underline{S}_{22,B}) \cdot (\underline{S}_{0'0',V} + \underline{S}_{2'2',B} (\underline{S}_{0'2',V})^2 - \underline{S}_{2'2',V} \underline{S}_{0'0',V} \underline{S}_{2'2',B}) \quad (\text{A4.12})$$

Das Flussdiagramm der Streuparameter der Stromeinspeisung zeigt Bild A4.2.

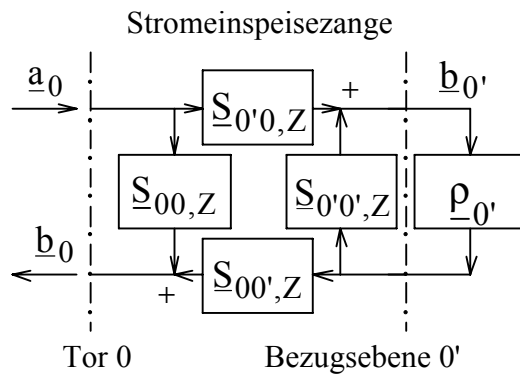


Bild A4.2: Flussdiagramm der Streuparameter der Stromeinspeisung

Der Eingangsreflexionsfaktor ρ_0 am Tor 0 und der Reflexionsfaktor $\rho_{0'}$ in der Bezugsebene 0' stehen hierbei in folgendem Zusammenhang:

$$\rho_0 = \frac{b_0}{a_0} = S_{00,Z} + \frac{S_{0'0,Z} \cdot S_{00',Z} \cdot \rho_{0'}}{1 - S_{0'0',Z} \cdot \rho_{0'}} \quad (\text{A4.13})$$

bzw.:

$$\rho_{0'} = \frac{\rho_0 - S_{00,Z}}{(S_{00,Z} - \rho_0) \cdot S_{0'0',Z} + S_{0'0,Z} \cdot S_{00',Z}} \quad (\text{A4.14})$$

Außerdem gilt für die Wellengrößen a_0 und $b_{0'}$:

$$\frac{b_{0'}}{a_0} = \frac{S_{0'0,Z}}{1 - S_{0'0',Z} \cdot \rho_{0'}} \quad (\text{A4.15})$$

A5 Kombinierte Standardunsicherheit und erweiterte Unsicherheit

Die Unsicherheit eines Messergebnisses wird i. Allg. durch viele einzelne Komponenten hervorgerufen. Diese können nach [20] entweder aus der statistischen Verteilung der Ergebnisse einer Messreihe ermittelt (Ermittlungsmethode A) oder aus den angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmt werden, die sich auf Erfahrung oder andere Informationen gründen (Ermittlungsmethode B). In beiden Fällen werden die Messunsicherheiten durch Standardabweichungen charakterisiert und daher als Standardunsicherheiten bezeichnet.

Zur Bestimmung der kombinierten Standardunsicherheit nach Ermittlungsmethode B werden folgende zusammengefassten Informationen herangezogen:

- Herstellerangaben,
- Daten von Kalibrierscheinen und anderen Zertifikaten,
- Unsicherheiten, die Referenzdaten aus Handbüchern zugeordnet sind,
- Daten aus früheren Messungen,
- Erfahrungen oder allgemeine Kenntnisse über das Verhalten und die Eigenschaften von Materialien und Messgeräten.

Wenn vom Hersteller die maximale Messabweichung mit $\pm e$ % bzw. $\pm e$ dB angegeben wird, so gilt:

$$e = |e_+| = |e_-| \quad (\text{A5.1})$$

Wenn keine speziellen Kenntnisse über die möglichen Werte der Messgröße X_i vorliegen, so wird angenommen, dass die Werte innerhalb der Schranken von $x_- = x_i - e_-$ bis $x_+ = x_i + e_+$ gleichwahrscheinlich sind (Gleich- oder Rechteckverteilung). Außerdem ist die Wahrscheinlichkeit gleich Null, dass X_i außerhalb dieser Schranken liegt. Als Messwert wird der arithmetische Mittelwert \bar{x} der beiden Schranken angesehen:

$$\bar{x} = \frac{x_- + x_+}{2} \quad (\text{A5.2})$$

Die Standardunsicherheit $u(x_i)$ hierbei beträgt (vgl. [81]):

$$u(x_i) = \frac{e_+ - e_-}{2\sqrt{3}} = \frac{e}{\sqrt{3}} \quad (\text{A5.3})$$

Bei einer Dreieckverteilung fällt die Wahrscheinlichkeit für den Wert einer Messgröße X_i linear vom Erwartungswert auf Null an den Bereichsschranken ab. Die zugehörige Standardunsicherheit $u(x_i)$ beträgt:

$$u(x_i) = \frac{e}{\sqrt{6}} \quad (\text{A5.4})$$

Für eine Normalverteilung mit einem Vertrauensniveau von 95 % gilt:

$$u(x_i) = \frac{e}{2} \quad (\text{A5.5})$$

Bei einer U-förmigen Wahrscheinlichkeitsverteilung besteht die größte Wahrscheinlichkeit für den Wert einer Messgröße direkt an den beiden Bereichsschranken. Hierfür gilt:

$$u(x_i) = \frac{e}{\sqrt{2}} \quad (\text{A5.6})$$

Die kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$ für den Schätzwert y der Messgröße Y berechnet sich dann zu:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)} \quad (\text{A5.7})$$

wobei alle m Einzelkomponenten $u(x_i)$ der Messgrößen X_i zunächst mit dem Umrechnungsfaktor c_i in die Messgröße Y konvertiert werden müssen:

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad (\text{A5.8})$$

Zur Angabe der erweiterten Unsicherheit U_p wird die kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$ mit dem Erweiterungsfaktor k_p multipliziert.

$$U_p = k_p \cdot u_c(y) \quad (\text{A5.9})$$

Dadurch wird ein Bereich $y \pm k_p \cdot u_c(y)$ um das Messergebnis y definiert, von dem erwartet werden kann, dass er einen großen Anteil der Verteilung von Werten umfasst, die der Messgröße sinnvollerweise zugeordnet werden können. Dieser Anteil wird als Überdeckungswahrscheinlichkeit bzw. Grad des Vertrauens p bezeichnet.

(Anmerkung: Die Begriffe 'Vertrauensbereich' und 'Vertrauensniveau' haben spezielle Definitionen in der Statistik und können auf U_p nur unter bestimmten Bedingungen angewendet werden. Sie werden daher entsprechend [20] in diesem Zusammenhang nicht verwendet.)

Um den Erweiterungsfaktor k_p für einen Bereich mit einem bestimmten Grad des Vertrauens eindeutig angegeben zu können, ist die Kenntnis der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Messgröße Y erforderlich. Die Tabelle A5.1 gibt den Erweiterungsfaktor k_p für unterschiedliche Grade des Vertrauens bei Rechteck- und Normalverteilung einer Messgröße an [20].

Grad des Vertrauens p in %	Erweiterungsfaktor k_p	
	Rechteckverteilung	Normalverteilung
57,74	1	
68,27		1
90		1,645
95	1,65	1,960
95,45		2
99	1,71	2,676
99,73		3
100	$> \sqrt{3}$	entfällt

Tabelle A5.1: Erweiterungsfaktor und Grad des Vertrauens für Rechteck- und Normalverteilung einer Messgröße

Lebenslauf des Verfassers

Persönliche Angaben

Name: Thomas Zwemke
Geburtsdatum: 31.08.1962
Geburtsort: Hamburg

Schulausbildung

1968 - 1972 Grundschule Schenefeld, Kreis Pinneberg
1972 - 1981 Gymnasium Schenefeld, Kreis Pinneberg
Juni 1981 Abschluss: Allgemeine Hochschulreife (Abitur)

Wehrdienst

Juli 1981 - September 1982 Grundwehrdienst

Hochschulausbildung

Oktober 1982 - Oktober 1990 Studium der Elektrotechnik/Nachrichtentechnik
an der Universität Hannover,
Studienschwerpunkt Hochfrequenztechnik
Oktober 1990 Abschluss: Diplom-Ingenieur

Industriepraktika

August 1984 - März 1985 Praktikum
bei der kabelmetal electro GmbH, Hannover

Berufstätigkeit

Januar 1991 - September 1997 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Institut für Steuerungstechnik und
Fachdidaktik der Elektrotechnik
der Universität Hannover
seit März 1998 EMVU-Beauftragter
bei der Mannesmann Mobilfunk GmbH,
Niederlassung Nord, Langenhagen