

Elektromagnetische Verträglichkeit (3): EMS

Vorlesungsskript WS 2010 / 2011

Prof. Dr. Manfred Schmidt
Fachbereich ET/IT



Dieses Material wurde ausschließlich für Lehrveranstaltungen am Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Fachhochschule Jena im WS 2003/04 konzipiert und zusammengestellt. In den Folgejahren erfolgten Modifikationen und Ergänzungen

Die verwendeten Abbildungen sind zum Teil aus den angegebenen Literaturstellen im Sinne von Zitaten entnommen.

Das Material ist nur für die Lehrveranstaltungen des Autors konzipiert. Jegliche Verwendung außerhalb dieses Rahmens ist unerwünscht. Das betrifft auch eine unerlaubte Verbreitung durch Kopieren und/oder elektronische Medien.



Grobgliederung

Stand WS 2003/2004

1. Einführung in die Probleme der Elektromagnetischen Verträglichkeit
2. EMV-Richtlinie und Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit, Normen (allgemein)
3. Störquellen, Störgrößen, Störsignale
4. Modelle und Koppelmechanismen
5. Emissionsmeßtechnik
- 6. Störfestigkeitsprüftechnik**
7. Theorie und Praxis elektromagnetischer Schirme
8. Entstörkomponenten und Entstörmittelmessung
9. EMV-gerechter Leiterplatten-Entwurf
10. Schutz von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (DIN VDE 0845)

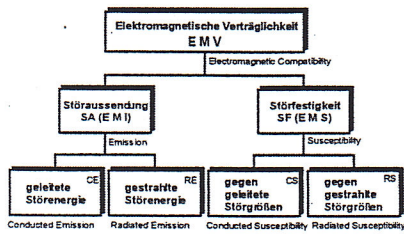


Störfestigkeits(messung) - Prüfung

- Allgemeine Forderungen: Messumgebung
- Simulation typischer Störphänomene
- Prüfschärfegrade
- Charakterisierung der Störfestigkeit:
Ausfälle / Störung erweist sich als
 - kurzzeitig
 - reversibel
 - irreversibel

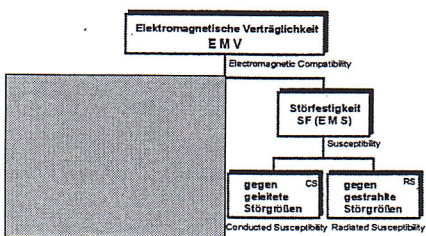
EMV

Störfestigkeitsprüfung: Störgrößen geleitet - gestrahlt

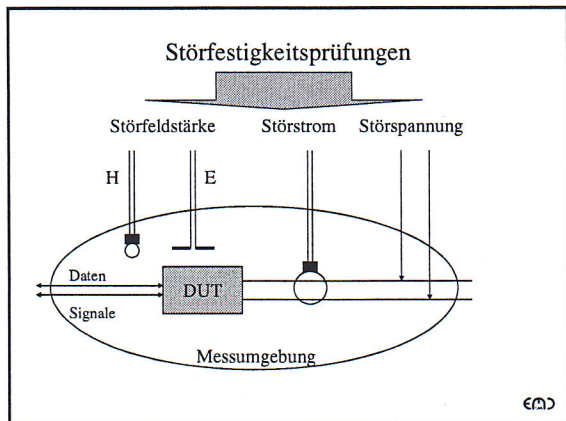


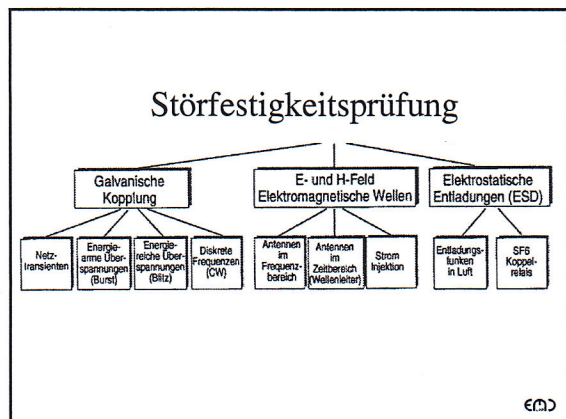
EMV

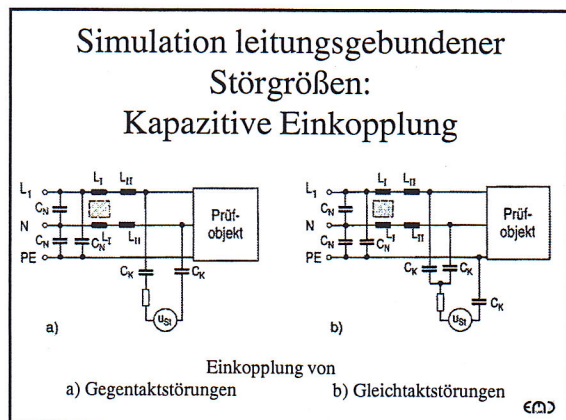
Störfestigkeitsprüfung: geleitet - gestrahlt



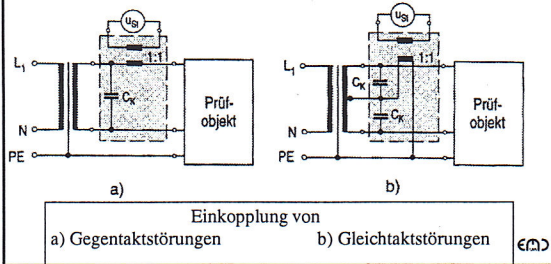
EMV







Simulation leitungsgebundener Störgrößen: Induktive Einkopplung



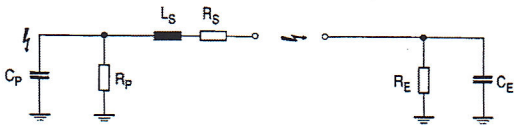
Störfestigkeitsprüfungen

- Breitbandige impulsförmige Störgrößen
- Schmalbandige hochfrequente Störgrößen
- Magnetfelder
- Oberwellen auf Stromversorgungsnetz
- Spannungseinbrüche auf Versorgungsnetz
- ...

Impulsförmige Störgrößen

- Entladung statischer Elektrizität - ESD
DIN EN 61000 - 4- 2
- Schnelle transiente Störgrößen - Burst
DIN EN 61000 4 - 4
- Energiereiche Stoßspannungen - Surge
DIN EN 61000 4 - 5

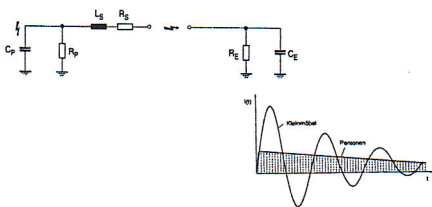
Electrostatic Discharge (ESD)



Ersatzschaltbild (Modell) für Entladung einer aufgeladenen Person oder eines aufgeladenen Gegenstandes
 Indizes: P - statisch aufgeladener Körper
 S - Serien-Ersatz-Bauelemente
 E - Erd-...

◊

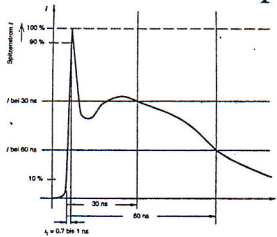
Electrostatic Discharge (ESD)



Personen: R_S ca. $1\text{ k}\Omega$ und
 Kleinföbeln: R_S ca. $10\Omega \dots 50\Omega$

◊

ESD: Impulsform

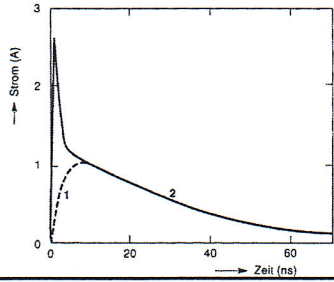


Doppelt exponentieller Impulsverlauf

Prüfsitzungszeit	Angelegte Spannung kV	Erste Entladung Stromstärke A	Anfangswert I_{pk} des Entladungsschauer ns	Strom bei 30 ns A ($\pm 30\%$)	Strom bei 60 ns A ($\pm 30\%$)
1	2	7,5	0,7 0ns 1	4	2
2	4	15	0,7 0ns 1	8	4
3	6	22,5	0,7 0ns 1	12	6
4	8	30	0,7 0ns 1	16	8

◊

ESD: Impuls im Zeit- und im Frequenzbereich)

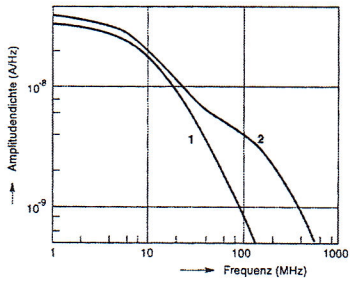


Doppelt exponentieller Impulsverlauf

1 - „langsamer“ Impuls
2 - Gesamtimpuls

EMD

ESD: Impuls im Zeit- und im Frequenzbereich)

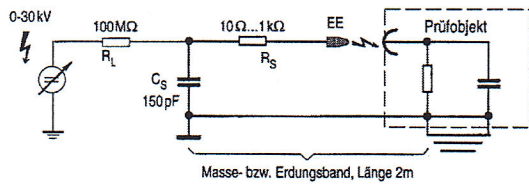


Doppelt exponentieller Impulsverlauf

1 - „langsamer“ Impuls
2 - Gesamtimpuls

EMD

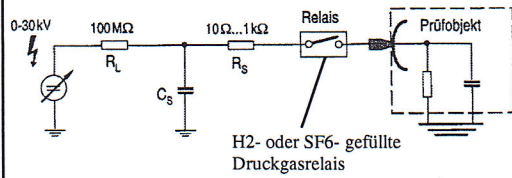
ESD: Luftentladung



Körperentladung: $R_S \leq 1 \text{ k}\Omega$
 Kleinmöbelentladung: $R_S \approx (10 \dots 50) \Omega$
 Messpraxis: $R_S = 330 \Omega$ (einheitlich)

EMD

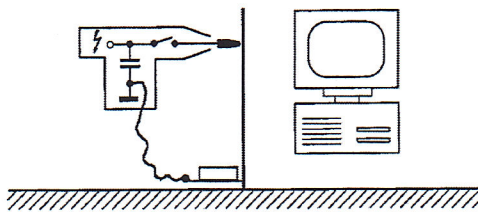
ESD: Kontaktentladung



Vermeidung von Umgebungseinflüssen:
 - Luftdruck, Raumtemperatur (Luftdichte)
 - Luftfeuchtigkeit

EMD

ESD: Koppelplatte



Prüfung vollisolierter Geräte mittels Kurzschlußschleife

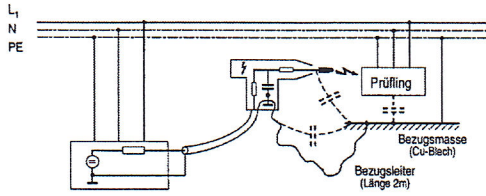
EMD

Electrostatic Discharge (ESD)

Grad	Prüfspannung	
	Kontakt-Entladung	Luft-Entladung
1	2 kV	2 kV
2	4 kV	4 kV
3	6 kV	8 kV
4	8 kV	15 kV
x(1)	Spezial	Spezial

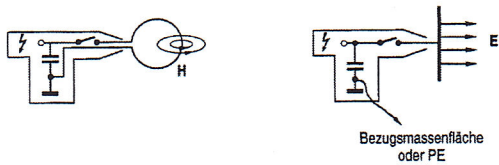
EMD

Electrostatic Discharge (ESD)



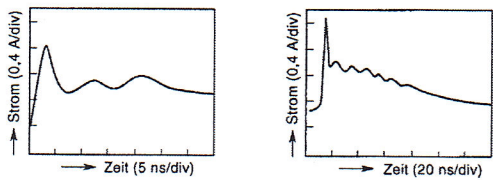
EMD

Electrostatic Discharge (ESD)



EMD

ESD: Typischer Entladestrom



a

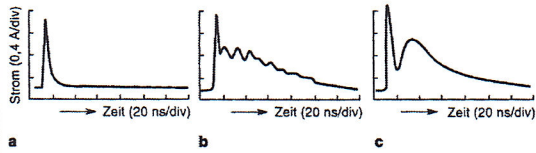
b

Person auf 3 kV aufgeladen, Entladung über einen
in der Hand gehaltenen Schraubendreher,
a) 5 ns/div b) 20 ns/div

Quelle: Richman und Taaker (1985), zit. bei Goodblood

EMD

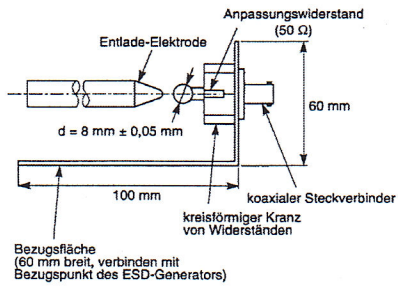
ESD: Typische Entladeströme



- a) keine direkte Verbindung zwischen genormten Messwertnehmer und Entladeelektrode, nur parasitäre Kapazität
- b) Verbindung ca. 30 cm zwischen den Bezugspotentialen
- c) Verbindung ca. 200 cm zwischen den Bezugspotentialen
Bezugsleiter beeinflusst nicht schnellen „Vorimpuls“.

EMD

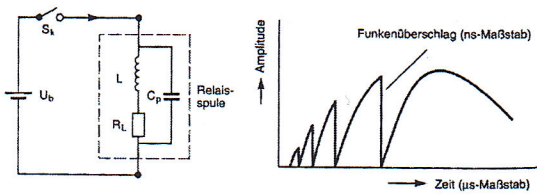
ESD: Normgerechte Kalibrierung



Bezugsfläche
(60 mm breit, verbinden mit Bezugspunkt des ESD-Generators)

EMD

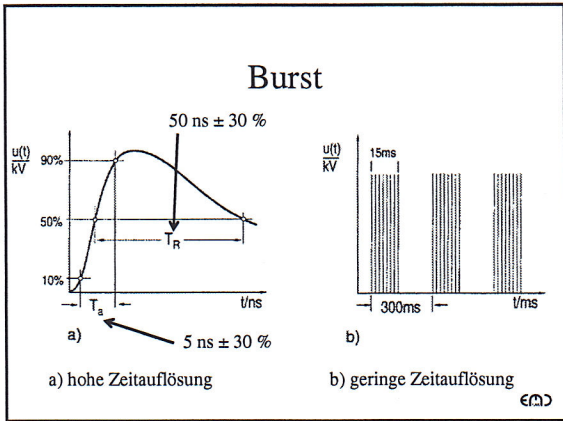
Burst

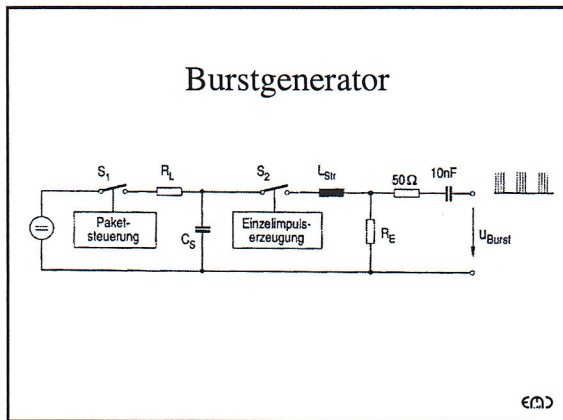


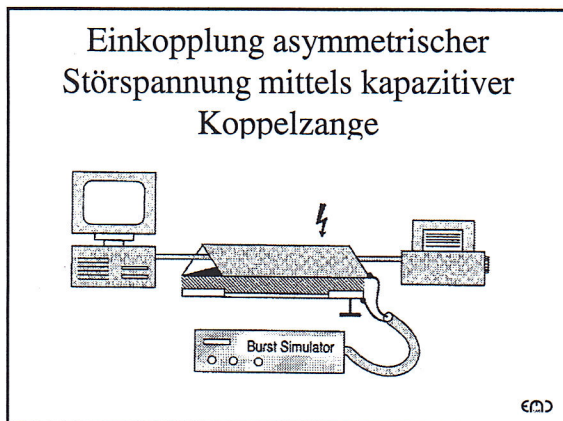
Unterbrechung des Stromes durch eine induktive Last

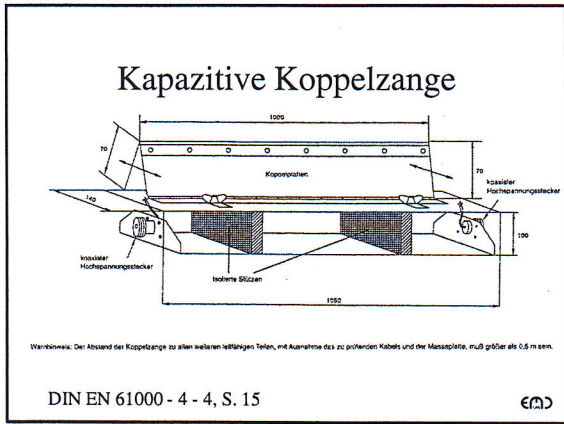
Funkenüberschlag bei Schalteröffnung

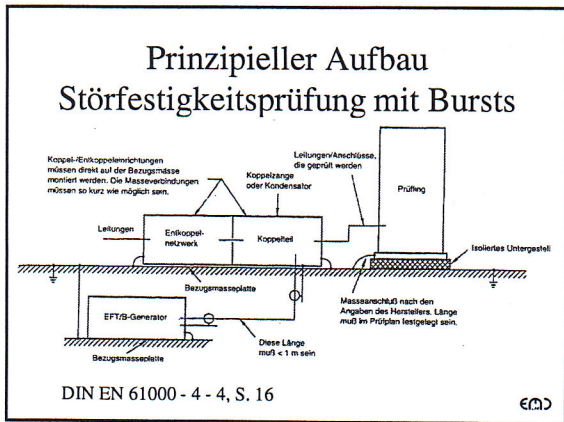
EMD











Burst

Prüfschärfe	Prüfspannung ± 10% (Stromversorgungsleitungen)	Prüfspannung ± 10% (Signal-, Datenleitungen)	Impulswiederhol- frequenz
1	0,5 kV	0,25 kV	5 kHz
2	1 kV	0,5 kV	5 kHz
3	2 kV	1 kV	5 kHz
4	4 kV	2 kV	2,5 kHz
x	n. Vereinbarung	n. Vereinbarung	n. Vereinbarung

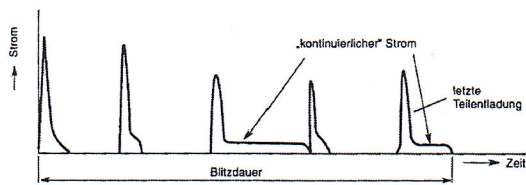
EMD

Breitbandige energiereiche Überspannungen (Surges)

- Einkopplung (galvanisch, induktiv) atmosphärischer Entladungen, Schaltvorgängen in Elektroenergiesystemen etc.
- Simulation mit klassischen genormten Kurvenformen der Hochspannungsprüftechnik (Blitz- und Schaltstoßspannungen)

EMD

Teilentladungen in einem Blitz



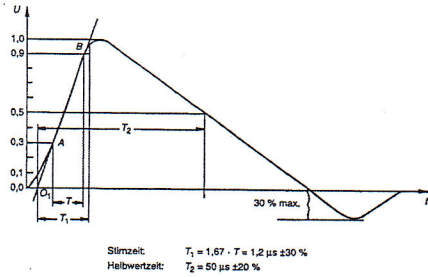
EMD

Natürliche elektrostatische Entladungen: Blitze

Parameter	Einheit	Minimum	Mittelwert	Maximum
Blitz				
Dauer	s	0,03	0,2	2
Ladung	C	1	35	300
Teilentladungen				
Anzahl pro Blitz	--	1	3	25
Wiederholdauer	ms	3	50	100
Spitzenstrom	kA	1	15	250
Anstiegszeit	µs	<0,5	2	30
Steilheit	kA/µs	<1	20	200
Halbwertszeit	µs	10	45	250
Kontinuierlicher Strom				
Dauer	ms	50	150	500
Amplitude	A	30	150	1600
Ladung	C	3	25	330

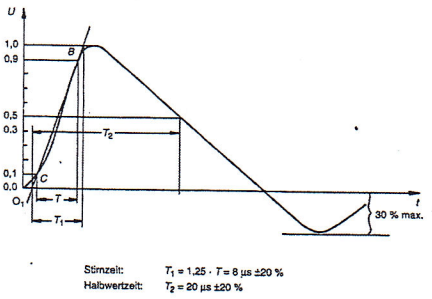
EMD

Surges: Kurvenformen



EMD

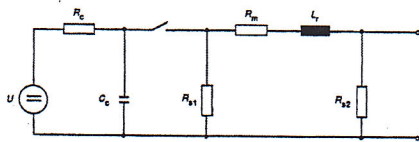
Surges: Kurvenformen



EMD

Surges: Hybridgenerator (CWG)

Seite 14
EN 61000-4-5:1995



- U Hochspannungsquelle
- R_1 Ladewiderstand
- C_c Energiespeicherkondensator
- R_2 Widerstand für die Impulsdauer
- R_m Anpasswiderstand
- L_r Induktivität für die Anstiegszeit

EMD

Surges: Hybridgenerator (CWG)

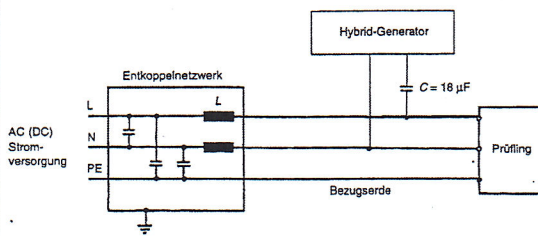
Definition	nach IEC 60-1		nach IEC 469-1	
	Stirnzeit μs	Halbwertzeit μs	Anstiegszeit (10%–90%) μs	Dauer (50%–50%) μs
Leerlaufspannung	1,2	50	1	50
Kurzschlußstrom	8	20	6,4	16

ANMERKUNG: In IEC-Normen sind die Impulsformen 1,2/50 μs und 8/20 μs im allgemeinen nach IEC 60-1, wie in den Bildern 2 und 3 dargestellt, angegeben. Andere IEC-Empfehlungen basieren auf der Impulsdefinition nach IEC 469-1, wie in Tabelle 2 angegeben.
Beide Definitionen gelten für diesen Hauptabschnitt der IEC 1000-4 und beziehen sich auf einen einzigen Generator.

Seite 14
EN 61000-4-5:1995



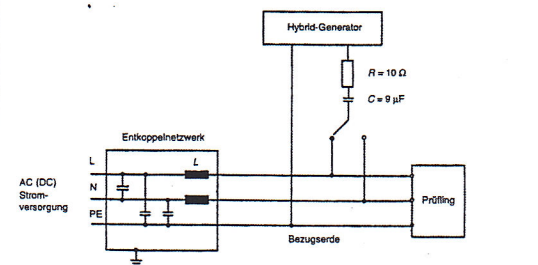
Surges: Beispiel Prüfaufbau (1)



Kopplung zwischen Leitung und Erde



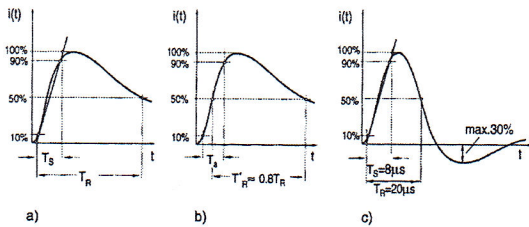
Surges: Beispiel Prüfaufbau (2)



Kopplung zwischen den Leitungen



Stoßströme



Nach SCHWAB: unterschiedliche Definitionen von Stirn- und Rückzeit sowie Anstiegszeit

EMD

Typische Testgrößen und Parameter

• Zeitparameter

- Blitzstoßspannung 1,2/50: $T_S = 1,2 \mu s \pm 30\%$, $T_R = 50 \mu s \pm 20\%$
- Schaltspannung 10/700: $T_S = 10 \mu s \pm 30\%$, $T_R = 700 \mu s \pm 20\%$

- hochohmige Prüfobjekte: genormte Stoßspannungen und Schaltspannungen
- niederohmige Prüfobjekte (nach Ansprechen des Überspannungsschutzes): genormter Kurzschlußstrom

EMD

Prüfschärfegrade

Prüfschärfe	Leerlaufspannung / kV $\pm 10\%$
1	0,5
2	1,0
3	2,0
4	4,0
x	nach Vereinbarung

EMD

Genormte Impulsprüfungen: Zusammenstellung der Merkmale

Merkmale	Elektrostatische Entladung	Schaltvorgänge	Blitz
Bezeichnung	ESD	Burst	Surge
Spannung U	< 15 kV	< 4 kV	< 6 kV
Energie bei U	< 10 mJ	< 300 mJ	< 300 J
Wiederholfrequenz	Einzelstöße	Mehrfachimpulse 5 kHz	max. 6 Stöße / Minute
Frequenzanteile f max	ca. 600 MHz	ca. 100 MHz	ca. 350 kHz
Anwendung auf Prüfobjekte	von Personen berührbare Metallteile	Netz-, Signal-, Meß- und Datenleitungen	Netz-, Signal-, Meß- und Datenleitungen

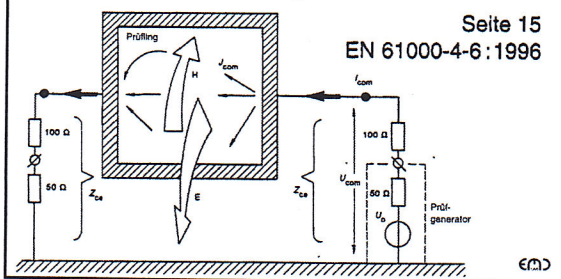
EMD

Störfestigkeitsprüfung: geleitete schmalbandige Störsignale

- Induziert in Gehäusen und Versorgungsleitungen durch elektromagnetische Felder
- Frequenzbereich 150 kHz - 80 MHz (230 MHz)
- hochfrequente amplitudenmodulierte Testsignale (1kHz, 80 %)

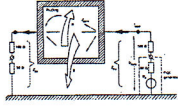
EMD

Störfestigkeitsprüfung: geleitete schmalbandige Störsignale



Störfestigkeitsprüfung: asymmetrische HF-Ströme

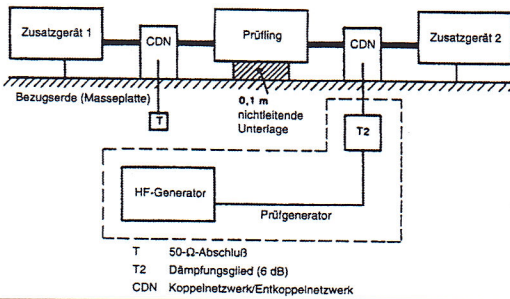
Seite 15
EN 61000-4-6:1996



- Z_a asymmetrischer Anschlußpunkt des Prüflings an das Koppelnetzwerk/Entkoppelnetzwerk, $Z_a = 150 \Omega$
 ANMERKUNG: Die $100\text{-}\Omega$ -Widerstände werden durch die Koppelnetzwerke/Entkoppelnetzwerke dargestellt. Der linke Eingang wird durch einen (passiven) $50\text{-}\Omega$ -Widerstand abgeschlossen, während der rechte Eingang durch den Prüfgenerator belastet wird.
- U_a Ausgangsspannung des Prüfgenerators (EMK)
 U_{sym} asymmetrische Spannung zwischen Prüfling und Bezugsgerde (Masseplatte)
 I_{sym} asymmetrischer Strom durch den Prüfling
 J_{sym} Stromdichte auf leitender Oberfläche oder Ströme auf anderen Leitern im Prüfling
 E, H Elektrische und magnetische Felder

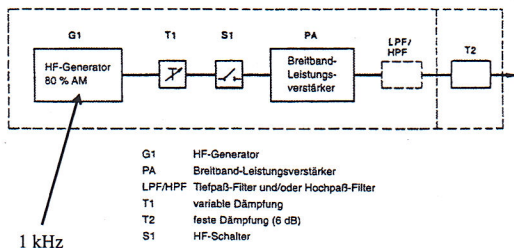
EMD

Leitungsgeführte HF-Störgrößen



Leitungsgeführte HF-Störgrößen

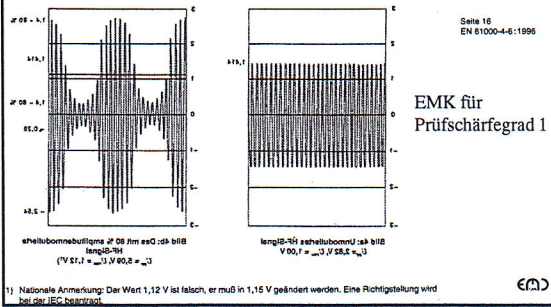
Seite 16
EN 61000-4-6:1996



EMD

Definition der Wellenform

(Ausgang des Prüflingsanschlusses eines Koppelnetzwerkes)



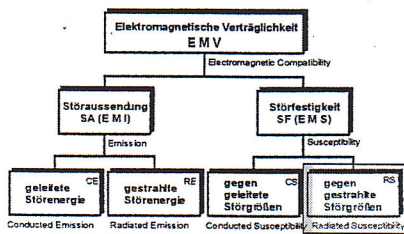
Leitungsgeführte HF-Störgrößen: Prüfschärfegrade

Frequenzbereich 150 kHz bis 80 MHz		
Schärfegrade	Spannung (EMK)	
	U_0 in dB(μ V)	U_0 in V
1	120	1
2	130	3
3	140	10
X ¹⁾	besonders festzulegen	

1) X ist ein offener Schärfegrad.

EMC

Störfestigkeitsprüfung: Gestrahlte Störgrößen



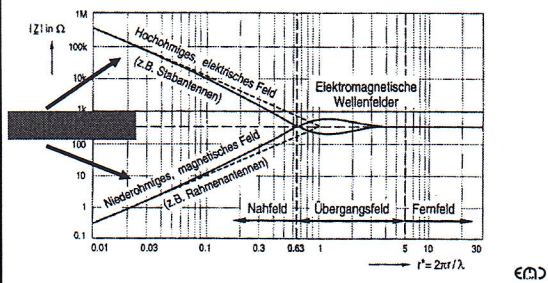
EMC

Störfestigkeitsprüfung: Gestrahlte Störgrößen

- Simulation schmalbandiger Störfelder
- Absorberräume
- Antennen
- Spezialantennen und Wellenleiter

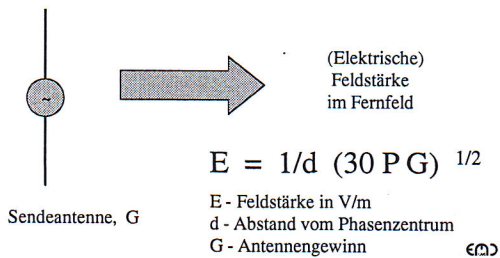
EMD

Theoretische Grundlagen: Nahfeld - Fernfeld



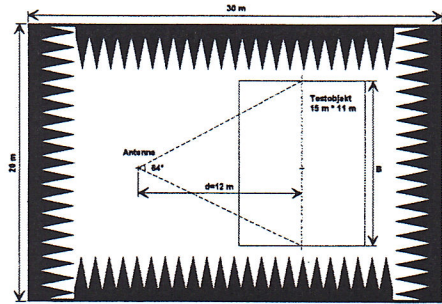
EMD

Messumgebung Freiraum



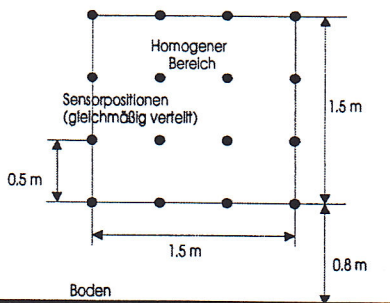
EMD

Antennen: „Ausleuchtung“ des Testobjektes



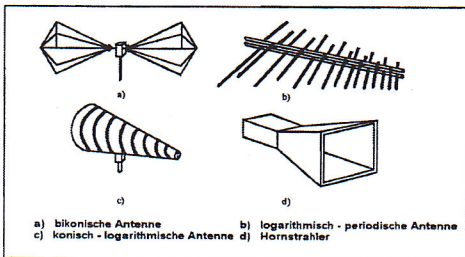
EMD

Uniform Area



EMD

Breitbandantennen



- a) bikonische Antenne
- b) logarithmisch - periodische Antenne
- c) konisch - logarithmische Antenne
- d) Hornstrahler

EMD

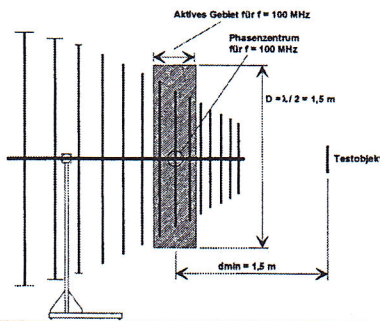
Breitbandantennen

Frequenzbereich	Antennentyp	typ. Gewinn
20 MHz bis 300 MHz	Bikonzische Antenne	-15 ... 2 dBi
20 MHz bis 220 MHz	log.-per. Antenne mit verkürzten Elementen	2 ... 6 dBi
20 MHz bis 1 GHz	Bllog-Antenne (Kombination aus Breitbanddipol und log.-per Antenne)	-15 ... 6 dBi
80 MHz bis 1 GHz	log.-per. Antenne	5.5 ... 7 dBi
200 MHz bis 1 GHz	log.-per. Antenne	6 ... 7 dBi
200 MHz bis 2 GHz	log.-per. Antennenarray	9 ... 10 dBi (2er) 12 ... 15 dBi (4er)
400 MHz bis 1 GHz	Double Ridged Horn	13 ... 16 dBi
1 GHz - 2 GHz 2 GHz - 4 GHz 4 GHz - 8 GHz 8 GHz - 18 GHz	Pyramidenhorn	13 ... 16 dBi
1 GHz - 18 GHz	Double Ridged Horn	13 dBi
18 GHz - 26,5 GHz 26 GHz - 40 GHz	Pyramidenhorn	13 ... 15 dBi



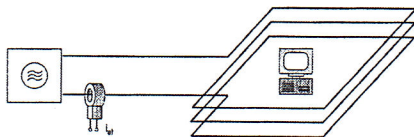
EMD

Logarithmisch-periodische Antennen



EMD

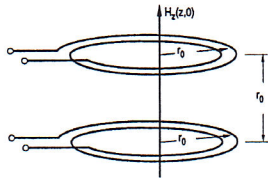
Simulation räumlich ausgedehnter Magnetfelder



$$H_{ef} = \frac{i_{ef} N}{l}$$

EMD

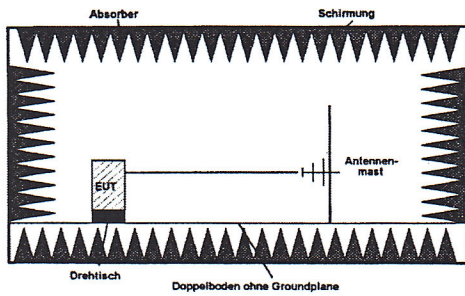
HELMHOLTZ - Spulenpaar



$$H_{z_{ef}}(z, 0) \approx H_z(z, r_0) = 0,715 \frac{i_{ef}}{r_0}$$

EMD

Prüfungsbau: Absorberraum



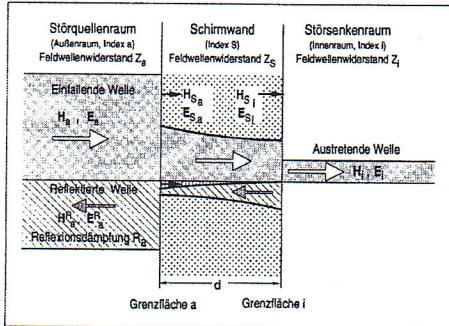
EMD

Absorberraum (semi-anechoic)



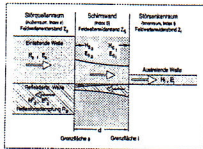
EMD

Schirmdämpfung



EMD

Schirmdämpfung



SCHELKUNOFF (1938):

Analogie zur Wanderwellenausbreitung auf elektrisch langer Zweidrahtleitung

Schirmwand quer zur Ausbreitungsrichtung

TEM - Wellen

EMD

Schirmdämpfung elektromagnetischer Schirme: Impedanzkonzept nach SCHELKUNOFF

$$S \equiv a = R + A + B$$

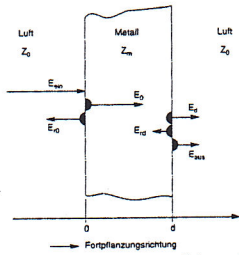
R die Reflexionsdämpfung an den Grenzflächen a und i

A die Absorptionsdämpfung durch die Abschwächung in der Schirmwand (Umwandlung elektromagnetischer Energie in Wärme durch Stromwärmeverluste)

B ein Korrekturterm, der die mehrfachen Reflexionen innerhalb der Schirmwand berücksichtigt (kann entfallen für $A > 10 \dots 15$ dB)

EMD

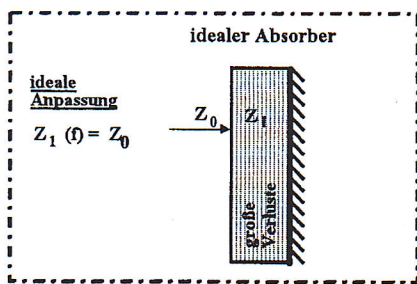
Dämpfungsmass



$$S(\text{dB}) = 20 \log_{10} \frac{\text{Feldstärke Quellenseite des Blechs}}{\text{Feldstärke Meßseite des Blechs}}$$

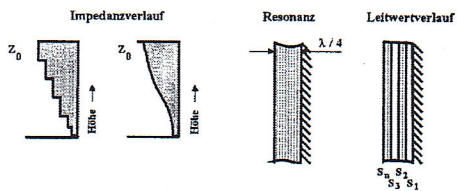
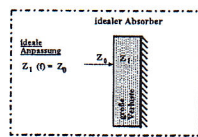
◀▶

Absorber



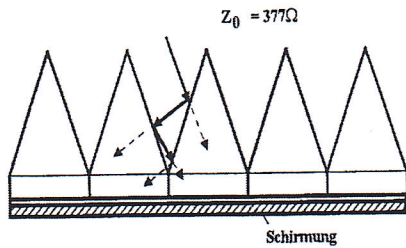
◀▶

Absorber



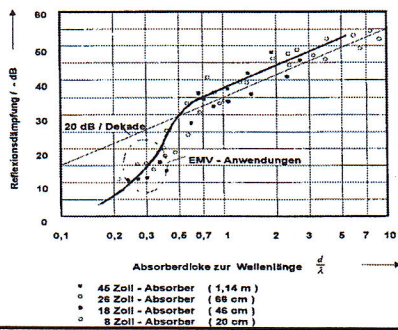
◀▶

Pyramiden-Absorber



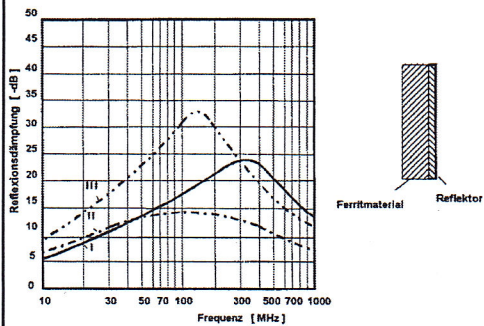
©

Absorber

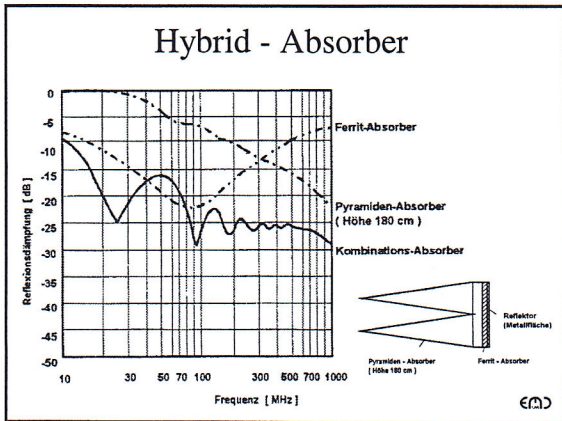


©

Ferrit - Absorber



©



- ### Prüfumgebung: Normen
- Referenz: Uniform Area
 - TEM - Wellenleiter
 - GTEM - Zelle (Spezieller Wellenleiter)
- €M

