

Dr.-Ing. Frank Sabath

Modellierung von Szenarien vorsätzlicher elektromagnetischer Beeinflussung

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
genehmigte Habilitationsschrift zur Erlangung
der *Venia Legendi* für das Fachgebiet Elektrotechnik

2. Oktober 2020

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik

*Der Kluge lernt aus allem und von jedem,
der Normale aus seinen Erfahrungen und
der Dumme weiß alles besser.*

*Sokrates
(470 - 399 v. Chr.)*

Geleitwort

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Vorlesung zum Thema EMI-Risikomanagement entstanden, die ich als Lehrbeauftragter am Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover gelesen habe. Neben den Erfahrungen dieser Lehrtätigkeit hat mich vor allem die praktische und theoretische Berufserfahrung aus meiner mehrjährigen Tätigkeit als Wissenschaftler am Wehrwissenschaftlichen Institut für Schutztechnologien - ABC-Schutz in Munster befähigt diese Arbeit zu verfassen.

Meinem Mentor und Freund Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe danke ich für die Begleitung dieser Arbeit. Unsere zahlreichen fachlichen Diskussionen über verschiedene Aspekte der vorsätzlichen elektromagnetischen Beeinflussung und deren Modellierung haben entscheidend zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen.

Den Herren Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Mathis, Prof. Dr. ir. ing. Frank Leferink (University of Twente) und Prof. Dr. rer. nat. habil. Frank Gronwald (Universität Siegen) danke ich für die Begutachtung dieser Arbeit.

Der Leitung des Wehrwissenschaftlichen Instituts für Schutztechnologien - ABC-Schutz danke ich dafür, dass mir stets der notwendige Freiraum für die notwendige wissenschaftliche Arbeit und die Tätigkeit als Lehrbeauftragter eingeräumt wurde. Meinen Kolleginnen und Kollegen, Vorgesetzten und Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern danke ich für fachliche Anregungen und die Bereitschaft, ausgesuchte Aspekte zu diskutieren. Mein besonderer Dank gilt Dr. rer. nat. Martin Schaarschmidt, Dr.-Ing. Sebastian Lange, Dr.-Ing. Daniel Nitsch und Dipl.-Ing. Andre Bausen für gemeinsam durchgeführte Experimente und zahlreiche Diskussionen.

Abschließend danke ich meiner Ehefrau Martina und meinen Kindern Peter und Pauline für ihre Geduld und ihr Verständnis sowie für die redaktionelle Mitwirkung an dieser Arbeit.

Garstedt, 2. Oktober 2020

Dr.-Ing. Frank Sabath

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundbegriffe	5
2.1	Kritische Infrastruktur	5
2.2	Elektromagnetische Beeinflussung	7
2.3	Risiko und Risikomanagement	9
2.4	Unsicherheit	11
2.5	Wahrscheinlichkeit	12
2.6	Bedrohung und Gefährdung	15
2.7	Zuverlässigkeit	16
2.8	Verfügbarkeit	17
3	Systemtechnische Beschreibung der elektromagnetischen Beeinflussung	19
3.1	Phasenmodell für den Produktlebenszyklus von Systemen	19
3.2	Elektromagnetische Beeinflussung elektrischer Systeme	22
3.2.1	Elektrische Systeme	22
3.2.2	Störmodell	25
4	Grundlagen des Risikomanagements	27
4.1	Grundsätze des Risikomanagements	27
4.1.1	Organisatorische Grundsätze	28
4.1.2	Methodische Grundsätze	30
4.2	Struktur des Risikomanagements	32
4.3	Risikomanagementprozess	34
4.3.1	Zusammenhangserstellung	35
4.3.2	Risikobeurteilung	36
4.3.3	Risikobewältigung	38
4.3.4	Risikoüberwachung und -kommunikation	39
4.4	Expertenteam	39
5	Methoden der EMI-Risikobeurteilung	41
5.1	Klassifikation der Methoden zur Risikobeurteilung	42
5.2	Methoden zur Risikoidentifikation	44
5.2.1	Preliminary Hazard List (PHL)	44
5.2.2	Preliminary Hazard Analysis (PHA)	46
5.3	Methoden zur Risikoanalyse	48
5.3.1	Scenario Analysis	48
5.3.2	Hazard and Operability Study (HAZOP)	50

5.3.3	Structured What-if Technique (SWIFT)	52
5.3.4	Threat Scenario, Effect and Criticality Analysis (TSECA)	54
5.3.5	Event Tree Analysis (ETA)	56
5.3.6	Bow Tie Analysis (BTA)	57
5.4	Methoden zur Risikobewertung	60
5.4.1	Risikoindex	60
5.4.2	Risikomatrix	62
5.4.3	Risikovektor	63
5.5	Vergleich der Methoden zur Risikobeurteilung	64
6	EMI-Szenarien	67
6.1	Definition der EMI-Szenarien	67
6.1.1	Datenblock Allgemeine Angaben	70
6.1.2	Datenblock Zielsystem	72
6.1.3	Datenblock Umgebung Zielsystem	73
6.1.4	Datenblock Potentielle Angreifer	74
6.1.5	Datenblock Störquelle	76
6.2	Generischer Angreifer	77
7	Baugruppen von EMI-Störquellen	85
7.1	Aufbau und Technologie elektromagnetischer Störer	86
7.2	Skalen zur Kategorisierung charakteristischer Daten	88
7.3	Charakteristische Daten von Hochleistungsimpulsquellen	90
7.3.1	Primärenergiequelle	90
7.3.2	Hochspannungsquelle	93
7.3.3	Hochleistungsimpulsquelle	94
7.4	Charakteristische Daten von RF-Modulatoren	103
7.4.1	Virtual Cathode Oscillator (VIRCATOR)	104
7.4.2	Magnetron	106
7.4.3	Magnetically Insulated Line Oscillator (MILO)	108
7.4.4	Klystron	110
7.4.5	Leitungsresonatoren	113
7.4.6	Switched Oscillator	115
7.4.7	Resonante Antennen (Antennenoszillatoren)	117
7.4.8	Vergleich RF-Modulatoren	118
7.5	Pulsformende Schaltungen für Impulsquellen (Hyperband) UWB-Störquellen	124
7.6	Charakteristische Daten von Antennensystemen	126
8	Abschätzung charakteristischer Daten potentieller Störquellen	133
8.1	Grundlagen der Modellbildung	133
8.2	Modellierung generischer Störquellen	138
8.3	Abschätzung der charakteristischen Daten ausgesuchter Störquellenklassen	145
8.3.1	Störquellen in sehr mobilen Trägerplattformen	146
8.3.2	Störquellen in hoch mobilen Trägerplattformen	152
9	Umgebung der Zielsysteme	157
9.1	Identifizierung möglicher Orte von IEMI-Störquellen	157
9.2	Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des IEMI-Szenarios	162
9.3	Spezifikation des IEMI-Bedrohungsszenarios	165

A	Fiktive Infrastruktur	167
A.1	Allgemeine Beschreibung	167
A.2	Zugänglichkeit	170
A.3	Energieversorgungsnetz	171
A.4	Informations- und Kommunikationsnetz	172
B	Anwendung ausgesuchter EMI-Risikobeurteilungsmethoden	175
B.1	Anwendung der Preliminary Hazard List (PHL)	175
B.2	Anwendung der Preliminary Hazard Analysis (PHA)	177
B.3	Anwendung der Hazard and Operability Study (HAZOP)	180
B.4	Anwendung der Structured What-if Technique (SWIFT)	183
B.5	Anwendung der Bow Tie Analysis (BTA)	185
C	Bewertung von RF-Modulatoren	189
C.1	Bewertung Virtual Cathode Oscillator (VIRCATOR)	189
C.2	Bewertung Magnetron	191
C.3	Bewertung Magnetically Insulated Line Oscillator (MILO)	193
C.4	Bewertung Klystron	195
C.5	Bewertung Leitungsresonatoren	201
C.6	Bewertung Switched Oscillator	203
C.7	Bewertung Resonante Antennen (Antennenoszillatoren)	205
C.8	Bewertung Pulsformende Schaltungen	206
D	Skalen zur Kategorisierung charakteristischer Daten	211
	Literaturverzeichnis	215
	Sachverzeichnis	223

Verwendete Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
AC	alternating current, auch Wechselstrom
Ant	Antenne
AntO	Antennenoszillator, Antennenresonator
AFRL	US Air Force Research Laboratory
BDF	Building Distribution Frame, Hausverteiler
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
BTA	Bow Tie Analysis
DC	direct current, auch Gleichstrom
DF	Distribution Frame, Verteiler
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSRD	Drift Step Recovery Dioden
EMI	Electromagnetic Interference
EMP	Elektromagnetischer Puls
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ETA	Event Tree Analysis, auch Ereignisbaumanalyse
EU	Europäische Union
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FAA	Federal Aviation Administration, US-amerikanische Luftfahrtaufsichtsbehörde
FHA	Fault Hazard Analyse
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
FTA	Fehlerbaumanalyse
FWHM	Halbwertsbreite eines impulsförmigen Signals (engl.: Full Width Half Max)
GIMLI	Générateur d' Impulsions Moduleés en Largeur et en Intensité)
HAZOP	Hazard and Operability Study
HE	Hyperband
HEM _{mn}	Hybrider Elektro-Magnetischer Mode, m bezeichnet die horizontale und n die vertikale Ordnung der Mode
HF	High-Frequency, Frequenzband
HO	Hypoband, auch Schmalband
HO-b-1, HO-b-2	Bezeichnung generischer Hypoband RF-Modulatoren, Eigenbau (b: bau), s. Tab. 7.27
HO-k-1, HO-k-2	Bezeichnung generischer Hypoband RF-Modulatoren, marktverfügbar (k: kauf), s. Tab. 7.27
HPEM	High-Power Electromagnetic

HPM	High-Power Microwave, auch Hochleistungsmikrowelle
HV	High Voltage, auch Hochspannung, Primärenergie und Hochspannungsquelle
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEMI	Intentional Electromagnetic Interference
IEC	International Electrotechnical Commission, auch Internationale Elektrotechnische Kommission
IG	Impulsquelle
IuK	Informations- und Kommunikation
IRA	Impulse Radiating Antenna, auch impulsabstrahlende Antenne
ISL	Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis, Frankreich
ISO	International Organization for Standardization, auch Internationale Organisation für Normung
IT	Informationstechnik
IT	Isolé Terre, Realisierungsart eines Niederspannungsnetzes
ITU	International Telecommunication Union, auch Internationale Fernmeldeunion
Kap.	Kapitel
LCO	Lithium-Kobalt-Oxid
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LKW	Lastkraftwagen
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
MB-b-1, HO-b-2	Bezeichnung generischer Meso- und Sub-Hyperband RF-Modulatoren, Eigenbau (b: bau), s. Tab. 7.29
MB-k-1	Bezeichnung generischer Meso- und Sub-Hyperband RF-Modulatoren, marktverfügbar (k: kauf), s. Tab. 7.29
ME	Mesoband
MDF	Main Distribution Frame, auch Hauptverteiler
MILO	Magnetically Insulated Line Oscillator
MIL-STD	United States Military Standard, auch US-amerikanischer Militärstandard
n/a	nicht anwendbar
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
NRL	US Naval Research Laboratory
PAAG	Prognose, Auffinden der Ursache, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen
PHL	Preliminary Hazard List, auch vorläufige Gefahrenliste
PHA	Preliminary Hazard Analysis, auch vorläufige Gefahrenanalyse
PKW	Personenkraftwagen
PRF	Pulswiederholfrequenz
PW	Binnencontainer (engl.: Pallet Wide)
RCM	Residual Current Monitor
RF	Radio Frequency, auch Hochfrequenz, RF-Modulator
RPZ	Risikoprioritätszahl
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition; Leittechnik
SDF	Site Distribution Frame
SDF 1, SDF 2	Site Distribution Frame 1, Site Distribution Frame 2
SH	Sub-Hyperband
SHF	Super-High-Frequency, Frequenzband
SOS	Semiconductor Opening Switch
SWIFT	Structured What-if Technique
SWO	Switched Oscillator
Tab.	Tabelle
TE _{mn}	Transversaler Elektrischer Mode, m bezeichnet die horizontale und n die vertikale Ordnung der Mode

TEM	Transversal Elektromagnetisch
TLO	Leitungsresonator (engl. Transmission Line Oscillator)
TSECA	Threat Scenario, Effect and Criticality Analysis
TM _{mn}	Transversal Magnetischer Mode, m bezeichnet die horizontale und n die vertikale Ordnung der Mode
TN-S Netz	Terre Neutre Séparé, Energieversorgungsnetz, bei dem Neutralleiter und Schutzleiter getrennt geführt werden
TP	Trägerplattform
UHF	Ultra-High-Frequency, Frequenzband
US	United States, auch Vereinigte Staaten von Amerika
USV	unterbrechungsfreien Stromversorgung
UWB	Ultra Wideband
VFI-USV	Voltage and Frequency Independent-Stromversorgungen
VHF	Very-High-Frequency, Frequenzband
VIRCATOR	Virtual Cathode Oscillator

Lateinische Notation

A	Ereignis
A_{ap}	Aperturfläche
AV_C	Verfügbarkeit der Komponenten
AV_S	Verfügbarkeit des Systems
$AV_{S,BauGrp}$	Verfügbarkeit einer Baugruppe
A_z	Zugänglichkeit
B	Ereignis
\vec{B}	magnetische Flussdichte
B	Bandbreite
B	Breite
B_F	fraktionale Bandbreite (engl.: Fractional Bandwidth)
b_r	Band Ratio
BauGrp	Baugruppe; BauGrp \in {TP, HV, IG, RF, Ant}
C	Kapazität
C	C-Faktor eines Akkumulators
c	(Vakuum-) Lichtgeschwindigkeit ($c = 2,99792458 \cdot 10^8$ m/s)
c, c_i	Auswirkung, Folge, Konsequenz
C_P	Ausgangskapazität der Primärenergiequelle
C_S	parasitäre Kapazität der Sekundärseite eines Tesla Transformators
C_T	Transferkapazität
C_N	Nennkapazität eines Akkumulators
C_{exp}	Kategorie Kosten, Kategorie finanzieller Ressourcen
$C_{exp,BauGrp}$	Kategorie Kosten einer Baugruppe
\vec{D}	elektrische Flussdichte
D_i	Diode
d_{Ant}	Durchmesser der kleinsten Kugel, welche die Antenne vollständig umschließt
D_0	Richtfaktor
$D_{0,max}$	maximaler Richtfaktor
d_{KA}	Kathoden-Anoden-Abstand
\vec{E}	elektrische Feldstärke
e	Elementarladung ($e = 1,60217653 \cdot 10^{-19}$ C)

e_{ap}	Aperturreffizienz
E_{max}	maximale abgestrahlte elektrische Feldstärke
ex	Exponent
f	Frequenz
F_{AG}	Frequenzagilität
f_{axial}	Resonanzfrequenz in einem axialen VIRCATOR
$f_{koaxial}$	Resonanzfrequenz in einem koaxialen VIRCATOR
f_c	Mittelfrequenz
f_h	obere Grenzfrequenz
f_l	untere Grenzfrequenz
f_{res}	Resonanzfrequenz
$f_{TE_{11}}$	cut-off-Frequenz der TE_{11} Mode
$f_{TE_{111}}$	cut-off-Frequenz der TE_{111} Mode
$f_{TM_{010}}$	cut-off-Frequenz der TM_{010} Mode
f_{π}	Frequenz des π -Mode
G_0	Antennengewinn
\vec{H}	magnetische Feldstärke
H	Höhe
I	Strom
I_c	Kathodenstrom
I_{cr}	kritischer Kathodenstrom
I_{max}	maximal zulässiger Endladestrom eines Akkumulators
I_L	Laststrom
I_P	Strom auf der Primärseite, Strom aus Primärquelle
K_A	Kategorie Fachwissen für den Bau einer Störquelle
K_D	Kategorie Fachwissen für Design und Auslegung einer Störquelle
$K_{D,BauGrp}$	Kategorie Fachwissen für Design und Auslegung einer Baugruppe
K_O	Kategorie Fachwissen für des Betrieb einer Störquelle
L	Induktivität
L	Länge, Baulänge
L_{BL}	Länge einer Blumlein Transmission Line
L_c	Länge eines Leitungsstücks
L_g	gesamte Baulänge eines RF-Modulators
L_{ges}	Länge eines Antennenresonators
L_L	Lastinduktivität
L_P, L_S	Induktivität der Primär-, Sekundärseite eines Tesla-Transformators
L_c	Länge eines Resonators
M	Mobilität
M_e	minimale erforderliche Mobilität
M_t	Mobilität der für die Verkehrsflächen und -wege typischen Systeme
M_{TP}	Mobilität der Trägerplattform
m_e	Ruhemasse eines Elektrons ($m_e = 9,1093826 \cdot 10^{-31}$ kg)
N	Anzahl
P	Wahrscheinlichkeit, Wahrscheinlichkeitskategorie
P	Leistung
P_A	Wahrscheinlichkeit, mit der ein generischer Angreifer Zugang zu einem Zugangsbereich bzw. Technologien hat
$P_{A,BauGrp}$	Wahrscheinlichkeit, mit der ein generischer Angreifer Zugang zu der Technologie einer Baugruppe hat
$P_{A,ex}$	Wahrscheinlichkeit, mit der ein generischer externer Angreifer Zugang zu einem Zugangsbereich hat

$P_{A,in}$	Wahrscheinlichkeit, mit der ein generischer interner Angreifer Zugang zu einem Zugangsbereich hat
P_C	Wahrscheinlichkeit, mit der ein generischer Angreifer über finanzielle Ressourcen einer gegebenen Kategorie verfügt
$P_{C,BauGrp}$	Wahrscheinlichkeit, mit der ein generischer Angreifer über finanzielle Ressourcen zur Beschaffung und Betrieb einer Baugruppe verfügt
P_{EMI}	Eintrittswahrscheinlichkeit eines EMI Szenarios
P_h	Durchschnittliche Impulsausgangsleistung einer Impulsquelle, hochentwickelte Technologie
P_K	Wahrscheinlichkeit, mit der ein generischer Angreifer über das Fachwissen einer gegebenen Kategorie verfügt
$P_{K,BauGrp}$	Wahrscheinlichkeit, mit der ein generischer Angreifer über das Fachwissen zum Bau und Betrieb einer Baugruppe verfügt
P_{lo}	Wahrscheinlichkeit, mit der eine EMI Störquelle an einen Ort verbracht werden kann
$P_{BauGrp}, P_{TP}, P_{HV}, P_{IG}, P_{RF}, P_{Ant}$	Wahrscheinlichkeit, mit der ein generischer Angreifer Zugang zu Baugruppen einer EMI Störquelle hat
P_t	Durchschnittliche Impulsausgangsleistung einer Impulsquelle, traditionelle Technologie
$P_{t,max}$	maximale Impulsausgangsleistung einer Impulsquelle, traditionelle Technologie
P_{CU}	Wahrscheinlichkeit, mit der ein generischer Angreifer über Zugang zu einer EMI Störquelle verfügt
P_{in}	Speiseleistung, Eingangsleistung
P_{out}	Ausgangsleistung
$P_{RF,out}$	Ausgangsleistung des RF-Modulators
P_{rad}	maximale Impulssendeleistung
Q	Gütefaktor einer Schwingung
R	elektrischer Widerstand
R, r	Abstand
r_a, r_i	Außen-, Innenradius eines RF-Modulators
r_a	Radius einer Anode
r_{ab}	Radius der Anodenbohrung
r_{ap}	Radius der Apertur einer Antenne
r_{ao}	Außenradius eines Antennenresonators
R_C	Ladewiderstand eines Marx-Generators
r_c	Radius der zylindrischen Kathode
R_L	Lastwiderstand
r_{lo}	Ort
r, r_i	Risiko
r_i	Innenradius eines Resonators
r_{min}	Radius der kleinsten Kugel, welche die Antenne vollständig umschließt
r_o	Radius der Oszillatoren
S_{max}	maximale Leistungsflussdichte
S_{iso}	Leistungsflussdichte eines isotropen Strahlers
s, s_i	(Bedrohungs-) Szenario
S_i	Schalter
S_{ty}	Typ einer Störquelle
t	Zeit
t_t	Verzögerungszeit
T	Periodendauer
$T_{I,max}$	Entladezeit eines Akkumulators
T_{FWHM}	Impulsdauer
u_N	Zellspannung einer Akkumulatorzelle
U_P	elektrische Ausgangsspannung der Primärenergiequelle

U_L	elektrische Spannung an der Lastimpedanz
U_0	Speisespannung
u_0	Schaltspannung eines Schalters
u, u_i	Unsicherheit
u_{in}	Eingangsspannung
u_{out}	Ausgangsspannung
V	Volumen
V_{Ant}	Volumen Antenne
v_{BL}	Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektromagnetischen Feldes in einer Blumlein Transmission Line
V_{HV}	Volumen Primärenergie- & Hochspannungsquelle
V_{IG}	Volumen Impulsgenerator
V_{RF}	Volumen RF-Modulator
V_{TP}	Nutzvolumen der Trägerplattform
v_{TEM}	Ausbreitungsgeschwindigkeit der TEM Mode
w_{max}	volumetrische Energiedichte
W_{ges}	gespeicherte Energie
Z, Z_i, Z_j	charakteristische Leitungsimpedanz
Z_0	Leitungswellenwiderstand, Feldwellenwiderstand des Vakuums ($Z_0 = 377 \Omega$)
Z_{Ant}	Eingangsimpedanz einer Antenne
Z_{SWO}	charakteristische Impedanz eines Switched Oscillators
\emptyset	Leere Menge

Griechische Notation

ε	Permittivität, auch Dielektrizitätskonstante
ε_0	Elektrische Feldkonstante des Vakuums ($\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c^2}$)
δ	Genauigkeitsschranke
η	Effizienz, Wirkungsgrad
η_{re}	Antennenwirkungsgrad
λ	Wellenlänge
λ_c	Wellenlänge der Mittenfrequenz
λ_π	Wellenlänge des π -Mode
μ	Permeabilität, magnetische Feldkonstante
μ_0	Magnetische Feldkonstante des Vakuums ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$)
π	Kreiszahl ($\pi = 3,14159$)
ρ_{max}	volumetrische Ladungsdichte
$\rho_{i \rightarrow j}$	Reflexionsfaktor am Übergang vom Bereich i zum Bereich j
τ_{BL}	Laufzeit in der Blumlein Transmission Line
$\tau_{i \rightarrow j}$	Transmissionsfaktor beim Übergang vom Bereich i zum Bereich j
ϕ	volumetrische Leistungsdichte
Ω	Ereignisraum

Zusammenfassung

Die Sicherheit und Zuverlässigkeit elektrischer und elektronischer Systeme werden in zunehmendem Maße durch die sie umgebenden elektromagnetischen Störumgebungen infrage gestellt. Die Wechselwirkung der Systeme mit den Störumgebungen besitzen das Potential, kritische Fehlerzustände, Funktionsstörungen und sogar Dauerschäden hervorzurufen. Insbesondere bei bewusst erzeugten Störumgebungen kann das erforderliche Niveau des Vertrauens in die Widerstandsfähigkeit elektrischer und elektronischer Systeme nur durch die Anwendung eines systematischen Risikomanagementprozesses in allen Phasen des Systemlebenszyklus erreicht werden. Hierbei stellt die Definition und Spezifikation des Bedrohungsszenarios einen kritischen Analyseschritt dar. Eine falsch modellierte Bedrohungsumgebung kann einerseits zu einer Überbewertung des vorhandenen Schutzniveaus oder andererseits zu einer überdimensionierten Schutzforderung führen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer *Methode zur Modellierung wahrscheinlicher elektromagnetischer Bedrohungsszenarien*. Ein Bedrohungsszenario ist in diesem Zusammenhang definiert als ein Datensatz, der das betrachtete Zielsystem, mögliche Störquellenklassen, deren räumliche Anordnung als auch relevante Informationen der Umgebung des Zielsystems beschreibt. Die Beschreibungen umfassen neben technischen Aspekten auch nicht-technische Aspekte (z.B. Zugänglichkeit, Mobilität, Verfügbarkeit und benötigtes Fachwissen) als auch die zugehörige Wahrscheinlichkeit. Ein Modell des möglichen elektromagnetischen Bedrohungsszenarios stellt den geeigneten Startpunkt für die Betrachtung des Risikos einer durch elektromagnetische Wechselwirkungen bedingte Fehlfunktion oder Ausfalls elektrischer und elektronischer Systeme dar. Die Vorgehensweise dieser Arbeit orientiert sich an den folgenden Fragestellungen:

1. Welche Klassen von Störquellen können unter realistischen Bedingungen in der Umgebung eines gegebenen Zielsystems auftreten?
2. Wie leistungsfähig sind diese Störquellen?
3. Mit welcher Wahrscheinlichkeit treten sie an Orten in der Umgebung des Zielsystems auf?

Um auf diese Fragestellungen adäquat eingehen zu können, ist ein gemeinsames Verständnis verwandter Grundbegriffe und der Randbedingungen elektromagnetischer Beeinflussungen als auch Kenntnis der grundlegenden Konzepte des Risikomanagements unerlässlich. Daher beginnt *Kapitel 2* mit der Einführung von Definitionen der wesentlichen Grundbegriffe der elektromagnetischen Beeinflussung und des Risikomanagements. Aufbauend hierauf werden in *Kapitel 3* das Phasenmodell für den Produktlebenszyklus von Systemen und das auf dem Gebiet der Elektromagnetischen Verträglichkeit gängige Störmodell vorgestellt und Zusammenhänge zum Risikomanagement aufgezeigt.

Da das klassische Risikomanagement auf den Gebieten der elektromagnetischen Verträglichkeit und der elektromagnetischen Wechselwirkungen nicht weit verbreitet ist, werden in *Kapitel 4* die Grundlagen des Risikomanagements eingeführt und auf elektromagnetische Interaktionen übertragen. Das EMI-Risikomanagement umfasst sämtliche Maßnahmen zur systematischen Erkennung, Analyse, Bewertung, Überwachung, Kontrolle und Abwehr der Risiken eines technischen Systems durch die Exposition durch eine elektromagnetische Umgebung. Wesentlich ist hierbei, dass das Risikomanagement in Form eines umfassenden, transparenten und strukturierten Prozesses abläuft, der fähig ist vorhandene Ungewissheiten und Humanfaktoren in die Betrachtungen mit einzubeziehen.

Durch die Vorgabe der elektromagnetischen Störquellen und das durch diese erzeugte elektromagnetische Feld als zu betrachtende Ursache sind induktive Methoden sehr gut für die EMI-Risikobeurteilung geeignet. In *Kapitel 5* werden ausgesuchte Methoden zur Beurteilung von EMI-Risiken vorgestellt. Neben der allgemeinen Vorgehensweise werden insbesondere die für die Betrachtung elektromagnetischer Beeinflussungen notwendigen Anpassungen und Erweiterungen diskutiert. So ist im Fall des EMI-Risikomanagements nicht nur das Zielsystem, sondern das gesamte Bedrohungsszenario, einschließlich Störquelle und Umgebung, zu definieren, zu modellieren und zu

analysieren. Anhand der hierzu notwendigen Anpassungen wurde aufbauend auf der Grundstruktur der Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) die Methode der *Threat Scenario, Effect and Criticality Analysis (TSECA)* formuliert. Zum Ende des Kapitels wird anhand einer vergleichenden Gegenüberstellung der vorgestellten Methoden eine verallgemeinerte Struktur bestehend aus acht Analyseschritten abgeleitet.

Die Spezifikation des EMI-Bedrohungsszenarios bildet hierbei den initialen Analyseschritt, auf den im *Kapitel 6* näher eingegangen wird. Hierbei zeigt sich, dass das bekannte Modell der elektromagnetischen Störkopplung erst durch die Erweiterung um eine menschliche Dimension alle für das EMI-Risikomanagement relevanten Aspekte abbilden kann. Die Untergliederung des so erweiterten Störkopplungsmodells in die Bereiche Angreifer, Störquelle, Störkanal, Zielsystem und Nutzer liefert eine Grundstruktur für das Modell eines IEMI-Szenarios. Für die Beschreibung des unbekanntes Angreifers wird das Modell des *generischen Angreifers* entwickelt. Hierfür werden auf der Basis von Expertenbefragungen und verfügbaren statistischen Daten Wahrscheinlichkeitsverteilungen hinsichtlich der Eigenschaften Fachwissen und finanzielle Ressourcen erstellt.

Der zweite unbekanntes Aspekt des IEMI-Szenarios, die vom Angreifer eingesetzte IEMI-Störquelle, wird im *Kapitel 7* betrachtet. Das Kapitel beginnt mit der Analyse des prinzipiellen Aufbaus elektromagnetischer Störquellen und der Identifikation notwendiger Baugruppen. Aufbauend hierauf werden mögliche technische Realisierungen der wesentlichen Baugruppen Hochleistungs-Impulsquelle, RF-Modulator und Antenne eingehender beschrieben. In diesem Zusammenhang werden das Funktionsprinzip dargelegt und die Abhängigkeit von Leistungs- und Betriebsparameter, wie der Ausgangsleistung und der Betriebsfrequenz, von dem Bauvolumen diskutiert. Neben den technischen Leistungs- und Betriebsparametern werden mit dem zum Bau und Betrieb benötigten Fachwissen, der Verfügbarkeit der Technologie und anfallende Kosten auch nicht-technische Aspekte mit einbezogen.

Die Modelle für die einzelnen Baugruppen werden im *Kapitel 8* zu *generischen Modellen möglicher Störquellen* zusammengefasst. Die Modellbildung beginnt mit der Untergliederung des nutzbaren Volumens möglicher Trägerplattformen in Teilvolumina für die jeweiligen Baugruppen. Mit Hilfe der Baugruppenmodelle werden aus den Teilvolumina die wesentlichen Leistungsdaten der jeweiligen Baugruppen und in einem nachfolgendem Modellierungsschritt die Leistungsdaten des Gesamtsystems abgeschätzt. Parallel hierzu werden durch Vergleich der Kenndaten der Baugruppen (benötigtes Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten) mit den Eigenschaften des generischen Angreifers die Auftrittswahrscheinlichkeit der betrachteten Störquelle in einer kriminellen Aktivität bestimmt. Die Anwendbarkeit der Methode wird am Beispiel der Modellierung einer existierenden Störquelle nachgewiesen. Die gute Übereinstimmung der aus dem erstellten Modell abgeschätzten Leistungsdaten mit den experimentell ermittelten Werten belegt die Gültigkeit der Modellannahmen.

Die Modellierung des elektromagnetischen Bedrohungsszenarios wird in *Kapitel 9* mit der *Abschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeit* abgeschlossen. Hierzu wird die Umgebung des Zielsystems hinsichtlich der Zugänglichkeit und der notwendigen Mobilität von Systemen bewertet. Anhand des Vergleiches mit der Mobilität betrachteter EMI-Quellenklassen wird anschließend die Wahrscheinlichkeit, mit der diese an einem Ort in der Umgebung des Zielsystems auftreten kann, abgeschätzt. In einem finalen Modellierungsschritt wird unter Berücksichtigung der Eigenschaften des generischen Angreifers und der Wahrscheinlichkeit mit der dieser Zugang zu der betrachteten IEMI-Störquelle hat die Auftrittswahrscheinlichkeit des gesamten Bedrohungsszenarios ermittelt.

Summary

The security and reliability of electric and electronic systems are increasingly jeopardised by their electromagnetic environment. The interactions of systems with the electromagnetic environment are capable to cause critical failure states, malfunctions and even permanent damages. In particular, if systems face intentionally generated electromagnetic fields, the required level of confidence in the robustness of electric and electronic systems can only be achieved by applying a systematic risk management process. On this occasion, the definition and specification of the threat scenario mark a critical analysis step. An inadequately modelled threat environment can result into an overestimation of the available level of protection or, however, an oversized protective demand.

The objective of the present work is the development of a method to modelling the most likely electromagnetic threat scenarios. In this context a threat scenario is defined as a data set, which describes the target system, possible classes of electromagnetic interference (EMI) sources as well as relevant information of the ambience of the target system. These descriptions include both technical and non-technical aspects (e.g., accessibility, mobility, availability and required knowledge) as well as the accompanying likelihood. A model of the electromagnetic threat scenario constitutes a suitable starting point for analysing the risk of a malfunctioning or failure of electric and electronic systems caused by interaction with its electromagnetic environment.

The approach of this work is orientated in the following questions:

1. Which classes of EMI sources can appear under realistic conditions in the vicinity of a given target system?
2. How efficient are these EMI sources?
3. With which likelihood do they appear at places in the vicinity of the target system?

An adequate discussion of these questions requires a common understanding of basic terms and conditions of electromagnetic interactions as well as knowledge of fundamental concepts of the risk management. Hence, *chapter 2* defines basic terms of the electromagnetic interference and the risk management. *Chapter 3* introduces the phase model for the product life cycle and the electromagnetic interaction model. Relationships with the risk management are presented and discussed.

As the classical risk management is not widely spread in the electromagnetic compatibility community, the fundamentals of the risk management are introduced in *chapter 4*. The EMI risk management encompasses all measures to systematically identify, analyse, assess, monitor, control, protect and migrate the risks of a technical system by the exposition to the electromagnetic environment. It is essential that the risk management is performed in a comprehensive, transparent and structured process. This risk management process shall be capable to consider existing uncertainties and human factors.

In particular inductive methods are suited very well for the assessment of EMI risks, as by default the sources of electromagnetic interferences are specified as cause for the risk to be analysed. Therefore selected methods for the EMI risk assessment are introduced in *chapter 5*. Beside the general approach of those methods necessary adaptations and modifications required for the analysis of electromagnetic interferences are discussed. In particular, the EMI risk management requires modelling and analysis of the whole scenario, including the target system as well as the environment and the source of interference. In this chapter the Threat Scenario, Effect and Criticality Analysis (TSECA) method was derived by implementing necessary modelling steps into the well known Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) method. At the end of the chapter a generalised structure consisting of eight analysis steps is derived by comparing the introduced methods.

Chapter 6 is dedicated to the initial analysis step, the specification of the intentional electromagnetic (IEMI) threat scenario. A detailed discussion shows that the well-known electromagnetic coupling model requires an extension by a human dimension to map all aspects, which are relevant

for an EMI risk management. The segmentation of the extended coupling model into the areas *offender*, *source*, *interference channel*, *target system* and *user* provides a basic structure for an IEMI scenario model. The model of a generic offender is developed to describe the unknown attacker. The model consists of probability distribution functions for the aspects expertise and financial resources, which are derived from statistical data and an experts survey.

The second unknown aspect of the IEMI scenario, the IEMI source used by the attacker, is considered in chapter 7. At the beginning of the chapter the principle structure of IEMI sources is analysed and necessary modules are identified. Possible realisations of the main modules *high-power impulse source*, *RF-modulator* and *antenna* are discussed in more detail. In this context the basic operating principles are explained and the dependence of the performance and operating parameters, such as output power and operating frequency, on the design size are discussed. In addition to the technical performance and operating parameters non technical aspects as expertise required for design and operation, availability of modules and components and related costs are also considered.

A generic model for possible IEMI sources is composed by merging the module models in chapter 8. The modelling procedure starts with the breakdown of the usable volume of possible carrier platforms into partial volumes for the modules. The main performance data of the modules are estimated from the partial volumes via the module models. In a subsequent modelling step the performance of the modules are combined into performance data for the overall system. The comparison of non technical characteristics (e.g. required expertise, availability and costs) with the capabilities of the generic offender enables the estimation of the probability that the considered IEMI source occurs in a criminal activity. The applicability of the introduced modelling method is demonstrated by modelling an existing IEMI source. The good agreement between the estimated performance data with the experimentally determined values proves the validity of the model assumptions and its usability for the EMI risk assessment.

The modelling of the electromagnetic threat scenario is completed in chapter 9 by estimating its likelihood. For this purpose, the environment of the target system is evaluated in terms of the accessibility and the necessary mobility. The probability that an EMI source of a considered type occurs at a given location in the surrounding of the target system is estimated by comparing the necessary mobility at the location with the mobility of the IEMI source.

Kapitel 1

Einleitung

Elektrische Systeme, spezielle Systeme zur Steuerung und Kommunikation, sind unverzichtbare Bestandteile moderner, leistungsfähiger Gesellschaften. Nahezu alle Bereiche des staatlichen, wirtschaftlichen und privaten Lebens sind mittelbar oder unmittelbar abhängig von der ungestörten Funktion elektrischer Systeme. Die bis zu einem Tag landesweit beobachtbaren Störungen des Bahnbetriebs durch den Ausfall eines Stellwerkes sind ein eindrucksvolles Beispiel für die bestehende Abhängigkeit. Entwicklungstrends wie *autonomes Fahren*, *Industrie 4.0*, *smart Systems* oder *Internet of Things* führen zu einer weiteren Verbreitung elektrischer Systeme.

Die zunehmende Verbreitung elektrischer Systeme und die ansteigende Zahl ungewollter Beeinflussungen hat zu der Entwicklung der Disziplin der *Elektromagnetischen Verträglichkeit* geführt. Ziel der Elektromagnetischen Verträglichkeit ist die Sicherstellung des Betriebs elektrischer Systeme, ohne dass diese durch ungewollte Beeinflussungen andere Systeme stören oder selber gestört werden [1, 2]. Hierbei wird ein Ansatz verfolgt, der die Last der notwendigen Maßnahmen auf störende Systeme (Störquellen) und gestörte Systeme (Störsenke) angemessen verteilt. In der praktischen Umsetzung bedeutet dies, dass ein elektrisches System nur in begrenzter Stärke elektromagnetische Energie an seine Umgebung abgeben darf (Begrenzung der Störaussendung) und in einer vorgegebenen elektromagnetischen Umgebung störungsfrei arbeiten muss (Mindestmaß an elektromagnetischer Störfestigkeit). Basierend auf diesem Ansatz wird die Einhaltung der EMV Schutzanforderung vermutet, wenn ein System die anwendbaren Normen für die Störaussendung und Störfestigkeit einhält.

Neben dem Lastenausgleich besteht ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes darin, dass jedes System für sich, unabhängig von etwaigen Störquellen oder Störsenken, beurteilt werden kann. Hierdurch ist der Nachweis der EMV Schutzanforderungen unter Einbeziehung vorhandener Störquellen und Störsenken auf wenige Spezialfälle (z.B. Anlagenbau, Marineschiffbau) begrenzt.

Zusätzlich zu den Störungen durch unbeabsichtigte Beeinflussungen ist in den letzten zwanzig Jahren die Gefährdung durch vorsätzlich hervorgerufene Beeinflussungen angestiegen. Bereits im Jahr 1999 hat die URSI in der *Resolution of Criminal Activities using Electromagnetic Tools* [3] auf die mögliche Nutzung elektromagnetischer Effekte und Wirksysteme durch kriminelle Gruppierungen hingewiesen. In den sich hieran anschließenden wissenschaftlichen Diskussionen [4, 5] wurde für diese Art der Bedrohung der Begriff der *absichtlichen elektromagnetischen Beeinflussung* (engl. Intentional ElectroMagnetic Interference (IEMI)) geprägt und in dem internationalen Standard IEC 61000-2-13 [6] definiert¹.

Parallel hierzu wurde weltweit in zahlreichen Forschungsprojekten Technologien zur Generierung elektromagnetischer Felder hoher Leistung [7, 8, 9, 10, 11], die physikalischen Mechanismen ihrer Wechselwirkung mit elektrischen Systemen [12, 13] und die hierdurch hervorgerufenen Effekte [14, 15] erforscht. Hierbei trat recht schnell das Problem der Vergleichbarkeit der erzielten

¹ IEMI: Intentional malicious generation of electromagnetic energy introducing noise or signals into electric and electronic systems, thus disrupting, confusing or damaging these systems for terrorist or criminal purposes.

Ergebnisse auf. Aufgrund der zunächst noch begrenzten Verfügbarkeit von IEMI-Prüfsendern führte jede Forschergruppe ihre Untersuchungen mit den vorhandenen IEMI-Prüfsendern und Wirksystemen durch. Da sich die abgestrahlten elektromagnetischen Feldsignale hinsichtlich ihrer Signalform als auch charakteristischer Parameter (z.B. Flankensteilheit, Amplitude, Energieinhalt, Dauer, Bandbreite) erheblich voneinander unterschieden, waren die beobachteten Effekte einer Forschergruppe nicht auf die anderer Gruppen übertragbar. Darüber hinaus war die Bewertung der beobachteten Effekte sowohl von dem Zielsystem als auch der gewählten Anwendung abhängig. So wiesen Nitsch und Sabath in ihrer Keynote auf der AMEREM 2006 [15] auf die Notwendigkeit einer einheitlichen Klassifizierung der Prüfumgebungen und der Effekte hin. Für die Klassifizierung der Effekte haben sich drei Skalen (Wirkmechanismus, Dauer, Kritikalität) [16, 17] etabliert und wurden in internationale Standards übernommen (z.B. IEC 61000-5-9 [18]).

Im Gegensatz hierzu ist die Spezifikation einer für den Nachweis der benötigten Widerstandskraft elektrischer Systeme gegen absichtlich erzeugte elektromagnetischer Umgebungen eine bis heute nicht gelöste Problemstellung. Seitens der URSI, des IEEE, des IEC [19, 6, 20], der ITU-T [21] und Cigré [22] wurde der Versuch unternommen, ähnlich wie bei der EMV, von dem Zielsystem unabhängige IEMI-Prüfumgebungen vorzugeben. In der IEC 61000-2-13 [6] werden die IEMI-Umgebungen in Bezug auf die Ausbreitungsform in leitungsgeführte und gestrahlte Umgebungen sowie in Bezug auf die Bandbreite in vier Kategorien² unterteilt. Für jede Klasse werden typische Signalformen sowie existierende Quellsysteme vorgestellt. Die IEC 61000-2-13 liefert somit einen Überblick über existierende Systeme und deren Leistungsfähigkeit, hinsichtlich deren Auftretswahrscheinlichkeit in realen Bedrohungssituationen als auch der durch sie hervorgerufenen Effekte werden nur sehr allgemeine oder keine Aussagen getroffen. Basierend auf der in der IEC 61000-2-13 eingeführten Klassifikation werden in der IEC 61000-4-36 [20] charakteristische Werte (z.B. Amplitude, Anstiegszeit, Pulsbreite, Mittenfrequenz, Bandbreite) generischer Testumgebungen spezifiziert. In Bezug auf die Auswahl der Testumgebung im Zuge des messtechnischen Nachweises der Widerstandskraft eines elektrischen Systems wird auf die Analyse und Bewertung des Bedrohungsszenarios verwiesen. Die spezifizierten Amplitudenwerte orientieren sich darüber hinaus an den in der Fachliteratur dokumentierten maximalen Werten experimenteller Systeme.

Dies führte in der Praxis dazu, dass vielfach die Amplitude der IEMI-Prüfumgebung in Bezug auf die geforderte Funktionssicherheit und Verfügbarkeit des betrachteten Systems gewählt wurden. Somit wurde für Systeme mit einer hohen geforderten Verfügbarkeit und Funktionssicherheit oftmals die in dem Standard angegebenen Maximalwerte als Prüfkriterium vorgegeben. In der vorgesehenen Umgebung der geprüften Systeme sind die spezifizierten IEMI-Prüfumgebungen in der Regel irrelevant, da diese nur durch stationäre Quellen generiert werden können. Als Folge wurden Systeme gegen unrealistische hohe Feldstärken gehärtet und getestet. Das Aufkommen mobilerer Störquellen, die zum Einen Schutzmaßnahmen unterwandern (z.B. durch Einbringung in einen geschirmten Raum), zum Anderen trotz Härtungsmaßnahmen Funktionsstörungen hervorrufen konnten führte dazu, dass dieses Vorgehen zunehmend kritischer hinterfragt wurde.

In 2009 wiesen Sabath und Garbe darauf hin, dass bei der Bewertung ob ein elektrisches System durch bewusst erzeugte elektromagnetische Umgebungen gestört werden kann im Sinne eines Risikomanagementes auch nicht technische Aspekte wie die Auftretswahrscheinlichkeit einer Störquelle und deren Fähigkeit in die Umgebung des Zielsystems zu gelangen berücksichtigt werden müssten [23]. In diesem Zusammenhang schlugen sie vor potentielle IEMI-Störquellen hinsichtlich ihrer Baugröße (bzw. Mobilität), des zum Bau und Betrieb benötigten Wissens und der Kosten zu bewerten. Die Bewertung der Mobilität und des benötigten Fachwissens wird ebenfalls von der ITU im Guide K.81 *High-power electromagnetic immunity guide for telecommunication systems* vorgeschlagen.

Der Ansatz die Störfestigkeit eines Systems nicht anhand eines Satzes generischer IEMI-Umgebungen sondern im Rahmen eines individuellen Risikomanagementprozess zu bewerten, wird erstmals von Sabath und Garbe in [24] und zusammen mit Genender in [25] eingehender diskutiert. Im Jahr 2012 startete die Europäische Kommission im Rahmen des 7. Forschungsrahmenprogramms

² Schmalbandig oder Hypoband, Mesoband, Sub-hyperband und Hyperband

die drei Forschungsprogramme HIPOW [26], STRUCTURES [27] und SECRET [28] zum Themenbereich des Schutzes kritischer Infrastrukturen gegen elektromagnetische Angriffe. Neben eingehenden theoretischen und experimentellen Untersuchungen zu den Wechselwirkungsmechanismen und der durch IEMI-Umgebungen hervorgerufenen Effekte betrachteten allen drei Projekten auch Ansätze einer Bewertung der IEMI-Gefährdung mit Methoden des Risikomanagements. Eine umfassender methodischer Ansatz zur Identifikation, Analyse und Beurteilung des Risikos der bewussten Störung kritischer Infrastrukturen durch elektromagnetische Felder wird in [29] formuliert.

Eine beobachtbare Gemeinsamkeit der in der frei zugänglichen Literatur veröffentlichten Verfahren zur Risikobeurteilung ist, dass die Verfahren bei der Analyse der elektromagnetischen Wechselwirkungen und der durch sie hervorgerufenen Effekte sehr ausgereift sind. Demgegenüber scheint der Schritt der Spezifikation der IEMI-Szenarien ein bisher ungelöstes Problem darzustellen. In Ermangelung ausreichender historischer Daten wurden in allen Projekten die Gefährdungsszenarien auf der Basis publizierter Daten existierender High-Power Electromagnetics (HPEM) Quellen definiert. Die Wahrscheinlichkeit, mit der die spezifizierten Quellen in der Umgebung des betrachteten Zielsystems auftreten können, wurde anhand der Mobilität, Fachwissen, Kosten und Verfügbarkeit mit Hilfe der von Sabath und Garbe in [30] vorgestellten Methode abgeschätzt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die bestehende Lücke bei der Spezifikation der Gefährdungsszenarien durch die Entwicklung einer *Methode zur Modellierung von Szenarien vorsätzlicher elektromagnetischer Beeinflussung* zu schließen.

Als Basis der nachfolgenden Ausführungen wird zu Beginn der Arbeit im *Kapitel 2* ein gemeinsames Verständnis der in der Arbeit verwandter Grundbegriffe und der Randbedingungen elektromagnetischer Beeinflussungen durch die Definitionen der wesentlichen Grundbegriffe geschaffen. Aufbauend hierauf werden in *Kapitel 3* das Phasenmodell für den Produktlebenszyklus von Systemen und das auf dem Gebiet der Elektromagnetischen Verträglichkeit gängige Störmodell vorgestellt und Zusammenhänge zum Risikomanagement aufgezeigt.

Da das klassische Risikomanagement auf den Gebieten der elektromagnetischen Verträglichkeit und der elektromagnetischen Wechselwirkungen nicht weit verbreitet ist, werden in *Kapitel 4* die Grundlagen des Risikomanagements eingeführt. Das IEMI-Risikomanagement umfasst sämtliche Maßnahmen zur systematischen Erkennung, Analyse, Bewertung, Überwachung, Kontrolle und Abwehr der Risiken eines technischen Systems durch die Exposition durch eine elektromagnetische Umgebung. Wesentlich ist hierbei, dass das Risikomanagement in Form eines umfassenden, transparenten und strukturierten Prozesses abläuft, der fähig ist vorhandene Ungewissheiten und Humanfaktoren in die Betrachtungen mit einzubeziehen.

Kapitel 5 ist der Vorstellung ausgesuchter Methoden zur Beurteilung von IEMI-Risiken gewidmet. Neben der allgemeinen Vorgehensweise liegt der Fokus hierbei auf den für die Betrachtung elektromagnetischer Beeinflussungen notwendigen Anpassungen und Erweiterungen der vorgestellten Methoden. So ist im Fall des IEMI-Risikomanagements nicht nur das Zielsystem, sondern das gesamte Bedrohungsszenario, einschließlich Störquelle und Umgebung zu definieren, zu modellieren und zu analysieren. Anhand der hierzu notwendigen Anpassungen wird aufbauend auf der Grundstruktur der Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) die Methode der *Threat Scenario, Effect and Criticality Analysis (TSECA)* formuliert. Zum Ende des Kapitels wird anhand einer vergleichenden Gegenüberstellung der vorgestellten Methoden eine verallgemeinerte Struktur bestehend aus acht Analyseschritten abgeleitet.

Die Spezifikation des IEMI-Bedrohungsszenarios bildet hierbei den initialen Analyseschritt, auf den im *Kapitel 6* näher eingegangen wird. In diesem Zusammenhang wird aufgezeigt, dass das bekannte Modell der elektromagnetischen Störkopplung erst durch die Erweiterung um eine menschliche Dimension alle für das IEMI-Risikomanagement relevanten Aspekte abbilden kann. Die Untergliederung des so erweiterten Störkopplungsmodells in die Bereiche Angreifer, Störquelle, Störkanal, Zielsystem und Nutzer liefert eine Grundstruktur für das Modell eines IEMI-Szenarios. Für die Beschreibung des unbekanntes Angreifers wird das Modell des *generischen Angreifers* entwickelt. Hierfür werden auf der Basis von Expertenbefragungen und verfügbaren statistischen Da-

ten Wahrscheinlichkeitsverteilungen hinsichtlich der Eigenschaften Fachwissen und finanzielle Ressourcen erstellt.

Das *Kapitel 7* widmet sich dem zweiten unbekannte Aspekt des IEMI-Szenarios, der vom Angreifer eingesetzte IEMI-Störquelle. Das Kapitel beginnt mit der Analyse des prinzipiellen Aufbaus elektromagnetischer Störquellen und der Identifikation notwendiger Baugruppen. Aufbauend hierauf werden mögliche technische Realisierungen der wesentlichen Baugruppen Hochleistungs-Impulsquelle, RF-Modulator und Antenne eingehender beschrieben. In diesem Zusammenhang werden für jeden betrachteten RF-Modulator das Funktionsprinzip dargelegt und die Abhängigkeit von Leistungs- und Betriebsparameter, wie der Ausgangsleistung und der Betriebsfrequenz, von dem Bauvolumen diskutiert. Neben den technischen Leistungs- und Betriebsparametern werden mit dem zum Bau und Betrieb benötigten Fachwissen, der Verfügbarkeit der Technologie und anfallende Kosten auch nicht-technische Aspekte mit einbezogen.

Die Modelle für die einzelnen Baugruppen werden im *Kapitel 8* zu *generischen Modellen möglicher Störquellen* zusammengefasst. Die Modellbildung beginnt mit der Untergliederung des nutzbaren Volumens möglicher Trägerplattformen in Teilvolumina für die jeweiligen Baugruppen. Mit Hilfe der Baugruppenmodelle werden aus den Teilvolumina die wesentlichen Leistungsdaten der jeweiligen Baugruppen und in einem nachfolgendem Modellierungsschritt die Leistungsdaten des Gesamtsystems abgeschätzt. Parallel hierzu wird durch Vergleich der Kenndaten der Baugruppen (benötigtes Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten) mit den Eigenschaften des generischen Angreifers die Auftrittswahrscheinlichkeit der betrachteten Störquelle in einer kriminellen Aktivität bestimmt. Das hergeleitete Modellierungsverfahren ist in der Lage aus den Eingangsparametern Baugröße und Klasse des RF-Modulators wesentliche technische Leistungsdaten und die Auftrittswahrscheinlichkeit einer Störquelle abzuschätzen. Die Anwendbarkeit der Methode wird am Beispiel der Modellierung einer existierenden Störquelle nachgewiesen. Die gute Übereinstimmung der aus dem erstellten Modell abgeschätzten Leistungsdaten mit den experimentell ermittelten Werten belegt die Gültigkeit der Modellannahmen.

Die Modellierung des elektromagnetischen Bedrohungsszenarios wird in *Kapitel 9* mit der *Abschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeit* abgeschlossen. Hierzu wird die Umgebung des Zielsystems hinsichtlich der Zugänglichkeit und der notwendigen Mobilität von Systemen bewertet. Anhand des Vergleiches mit der Mobilität betrachteter IEMI-Quellenklassen wird anschließend die Wahrscheinlichkeit, mit der diese an einem Ort in der Umgebung des Zielsystems auftreten kann, abgeschätzt. In einem finalen Modellierungsschritt wird unter Berücksichtigung der Eigenschaften des generischen Angreifers und der Wahrscheinlichkeit, mit der dieser Zugang zu der betrachteten IEMI-Störquelle hat, die Auftrittswahrscheinlichkeit eines IEMI-Szenarios ermittelt. Das im Rahmen eines IEMI-Risikomanagements zu betrachtende Bedrohungsszenario resultiert aus den technischen Leistungsdaten generischer Störquellenklassen und deren Auftrittswahrscheinlichkeit in Zugänglichkeitszonen in der Umgebung des Zielsystems. Mit dem Ziel einer Reduzierung des Umfangs und der Komplexität des Bedrohungsszenarios wird abschließend eine Methodik zur Identifizierung nicht relevanter Einzelszenarios vorgestellt.

Kapitel 2

Grundbegriffe

Zusammenfassung Als Grundlage für eine *Risikoanalyse bei elektromagnetischer Beeinflussung* sollen in diesem Kapitel die Gegenstände der nachfolgenden Betrachtungen näher charakterisiert und Grundbegriffe strukturiert dargestellt werden. Wesentliche Aspekte sind hierbei eine umfassende Definition der Begriffe *Kritische Infrastruktur*, *elektromagnetische Beeinflussung* und *Risiko*.

2.1 Kritische Infrastruktur

In seinem ursprünglichem Gebrauch bezeichnete der Begriff **Infrastruktur** die im Boden befindlichen Leitungen, wie Pipelines, Rohrleitungen und Kabel. Die heute gebräuchlichen Bedeutung umfasst die Infrastruktur alle Dienstleistungen und technischen Grundeinrichtungen, die für das Funktionieren einer Gesellschaft oder Volkswirtschaft notwendig sind [31, 32].

Bedingt durch die wachsende Gefährdung durch terroristische Anschläge und kriminelle Aktionen trat ab Mitte der 1990 Jahre zunehmend der Aspekt Schutz von Infrastrukturen in die politische Diskussion. Schnell zeigte sich, dass für einen umfassenden Schutz die vorstehende Definition zu weit gefasst ist. Als Folge wurden die Infrastruktur in Bezug auf ihre Kritikalität, d.h. die Bedeutung der Konsequenzen einer Störung oder eines Funktionsausfalls für die Versorgungssicherheit der Gesellschaft, klassifiziert. In diesem Zusammenhang führt die nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen [33] aus:

Eine Infrastruktur besitzt vor allem dann eine systemische Kritikalität, wenn sie aufgrund ihrer strukturellen, funktionellen und technischen Positionierung im Gesamtsystem der Infrastrukturbereiche von besonders hoher interdependenter Relevanz ist. Beispiele dafür sind die Elektrizitäts- sowie Informations- und Telekommunikationsinfrastrukturen, die aufgrund ihrer Vernetzungsgröße und Vernetzungsstärke besonders relevant sind und bei großflächigem und lange anhaltendem Ausfall zu gravierenden Störungen der gesellschaftlichen Abläufe sowie der öffentlichen Sicherheit führen können.

Kritische Infrastrukturen sind Organisationen und Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden. [33, 34]

In [33] werden die Kritische Infrastrukturen aufgrund ihrer charakteristischen Eigenschaften in unverzichtbare technische Basisinfrastrukturen und unverzichtbare sozioökonomische Dienstleistungsinfrastrukturen unterschieden. Zu den unverzichtbaren technischen Basisinfrastrukturen gehören:

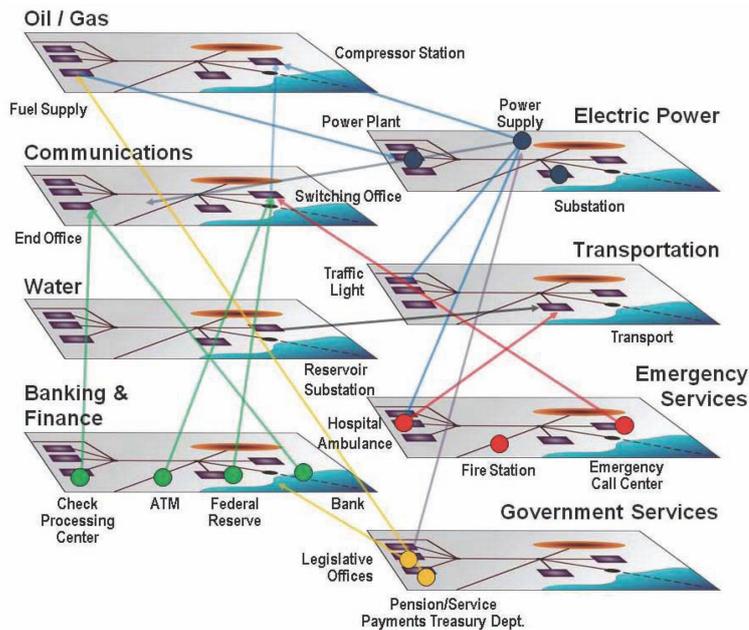


Abb. 2.1 Interdependenzen kritischer Infrastrukturbereichen (übernommen von [34])

- Energieversorgung,
- Informations- und Kommunikationstechnologie,
- Transport und Verkehr,
- (Trink-)Wasserversorgung und Abwasserentsorgung.

Die Gruppe der unverzichtbaren sozioökonomischen Dienstleistungsinfrastrukturen umfasst:

- Gesundheitswesen,
- Ernährung,
- Notfall- und Rettungswesen, Katastrophenschutz,
- Parlament, Regierung, öffentliche Verwaltung, Justizeinrichtungen,
- Finanz- und Versicherungswesen,
- Medien und Kulturgüter.

In der heutigen Gesellschaft sind die einzelnen Infrastrukturbereiche zunehmend voneinander abhängig. So benötigen nahezu alle Dienstleistungsinfrastrukturen eine ungestörte Energieversorgung und als auch funktionsfähige Informations- und Kommunikationstechnologien. Der hohe Grad gegenseitiger Abhängigkeiten kann im Störfall zu kaskadenartigen Ausfällen führen. In ihrem Report von 2008 [34] zeigt die US EMP Commission, dass als unmittelbare Folge eines Ausfalls der Energieversorgung auch das Telekommunikationsnetz ausfallen würde. Das Fehlen dieser beiden wesentlichen Bereiche würde im Weiteren zu erheblichen Störungen in den übrigen Infrastrukturbereichen führen. Die EMP Commission weist des weiteren darauf hin, dass viele Recovery Prozeduren annehmen, dass das Transportsystem funktioniert und Spezialisten, Techniker und Ersatzteile für Diagnosen und Reparaturen schnell zu den jeweiligen Orten gebracht werden können. Die aus [34] entnommene Abbildung 2.1 veranschaulicht die gegenseitigen Abhängigkeiten (Interdependenzen) ausgewählter Kritischer Infrastrukturen.

Da hinsichtlich des Risikos elektromagnetischer Beeinflussungen nur die technischen Basisinfrastrukturen von Bedeutung sind, werden im Rahmen dieser Arbeit die Dienstleistungsinfrastrukturen nicht weiter betrachtet. Für das EMI-Risikomanagement ist von Bedeutung, dass kritische Infrastrukturen in der Regel als vernetzte und verteilte Systeme aufgebaut sind. Nach [35] sind **verteilte**

Systeme (distributed systems) Systeme, deren Teilsysteme über große Entfernungen verteilt sind und entweder physikalisch oder durch Echtzeitkommunikationen miteinander verbunden sind. In diese Definition sind elektrische und elektronische Steuerungen des Systems explizit mit einbezogen. Die Verteilung des Systems über einen größeren räumlichen Bereich hat zur Folge, dass es in einem Test nicht als Gesamtsystem durch einer elektromagnetische Testumgebung ausgesetzt werden kann. Bei der Risikobetrachtung kann jedoch auch davon ausgegangen werden, dass abgesehen vom elektromagnetischen Felde einer Nuklearwaffendetonation ausserhalb der Atmosphäre, nahezu keine EMI-Störumgebung sich auf das komplette System erstreckt. Der Aufbau kritischer Infrastrukturen als **vernetztes System** beinhaltet die Möglichkeit von Redundanzen und alternativer Verbindungen. Dies kann zur Abschwächung der Auswirkungen (z.B. durch redundante Teilsysteme), zur Ausbreitung aufgetretener Störungen und zusätzlichen Einkopplungspfaden für das elektromagnetische Feld führen. Im Rahmen eines EMI-Risikomanagementes sind die genannten Aspekte sind zwingend und in geeigneter Weise zu berücksichtigen.

Eine weitere Gemeinsamkeit aller technischer Infrastrukturen ist, dass diese heute ein übergeordnetes **Steuerungs- und Datenerfassungssystem**¹ beinhalten [34]. Dieses SCADA System erfasst, überwacht und visualisiert Betriebsdaten und -zustände der jeweiligen Infrastruktur und steuert oder regelt diese. Wesentliche Elemente des SCADA Systems sind *digitale Steuerungssysteme*, *Speicherprogrammierbare Steuerungen* (SPS) und *Fernbedienungsterminals*². Die Steuerung und Überwachung der verteilten Systeme ist abhängig von einer funktionierenden Kommunikation, in Form eigener Punkt-zu-Punkt-Kommunikation, Feldbussystemen oder durch Nutzung der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur. Da alle technischen Infrastrukturen für ihre Funktion elektrische Energie benötigen ist ihr Zugang zum Energieversorgungssystem eine weitere wesentliche Ressource. Im Rahmen des EU-Förderprojektes STRUCTURES wurde gezeigt, dass technische Infrastrukturen für die Beurteilung ihrer Standfestigkeit gegenüber elektromagnetischen Beeinflussungen auf ein Informations- und Kommunikationsnetzwerk und ein Energieversorgungsnetzwerk abbilden lassen [36].

Hieraus folgt, dass die Standfestigkeit technischer Infrastrukturen gegenüber elektromagnetischen Beeinflussungen durch die elektromagnetische Härte der elektrischen Systeme des SCADA Systems, des Energieversorgungsnetzwerkes sowie des Informations- und Kommunikationsnetzwerkes bestimmt wird.

2.2 Elektromagnetische Beeinflussung

Die Vielzahl der Wechselwirkungen elektrischer und elektronischer Systeme mit benachbarten Systemen als auch ihrer elektromagnetischen Umgebung sind so vielfältig wie die Elektrotechnik selbst. Die durch diese Wechselwirkungen hervorgerufenen Effekte werden unter dem Begriff *elektromagnetische Beeinflussung*³ zusammengefasst. Bedingt durch die Vielfalt der betrachteten Systeme und ihrer Wechselwirkungen reicht das Spektrum der so bezeichneten Effekten von einem erhöhten Rauschniveau über verzerrte Displays, falsche Anzeigen, Signalstörungen, unmotivierter Aktionen regelungstechnischer Systeme bis hin zur Zerstörung von Bauteilen oder dem Totalverlust von Systemen.

Der Begriff **elektromagnetische Beeinflussung (EMI)** bezeichnet Effekte, die durch Wechselwirkung elektrischer und elektronischer Systeme mit ihrer elektromagnetischen Umgebung und anderen Systemen hervorgerufen werden.

¹ engl.: Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) System

² engl. Remote Terminal Unit (RTU)

³ engl. Electromagnetic Interference (EMI)

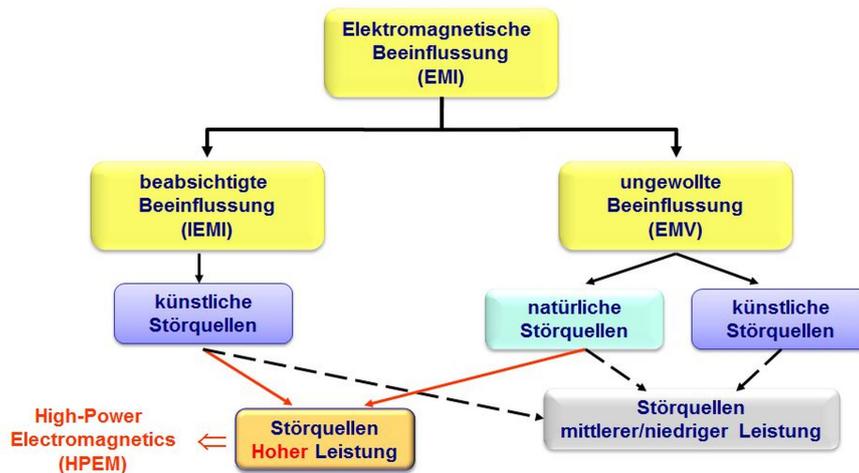


Abb. 2.2 Einteilung der elektromagnetischen Beeinflussung

In Bezug auf die der Beeinflussung zugrundeliegenden Motivation werden elektromagnetische Beeinflussungen unterteilt in

- *ungewollte* Beeinflussungen
- *beabsichtigte* Beeinflussungen

Mit dem Beginn der Nutzung elektrischer Systeme, insbesondere zur Kommunikation, wurden Störeffekte durch *ungewollte* Beeinflussungen⁴ beobachtet. Der zunehmende Umfang der Störungen führte dazu, dass 1892 im §12 des Gesetz über das Telegraphenwesen des Deutschen Reichs [37] eine erste Regelung zur Begrenzung ungewollter Beeinflussungen getroffen wurde. Mit der zunehmenden Verbreitung elektrischer und elektronischer Systeme in alle Bereiche des täglichen Lebens hat sich hieraus die Disziplin der *Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV)* entwickelt.

Die **Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)** bezeichnet die Fähigkeit eines technischen Gerätes, in seiner elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu arbeiten, ohne elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für andere in dieser Umgebung vorhandene Geräte unannehmbar wären [1]

Die EMV behandelt technische Fragen der *ungewollten* wechselseitigen Beeinflussung elektrischer und elektronischer Systeme. Im Gegensatz zu dem im §12 des Gesetzes über das Telegraphenwesen des Deutschen Reichs von 1892 festgelegten Grundsatz⁵, nachdem der Störer Maßnahmen zur Vermeidung auftretender Störungen zu treffen hat, besteht der Leitgedanke der heutigen EMV in einer ausgewogenen Lastenaufteilung zwischen potentiellen Störquellen und gestörten Systemen. So begrenzen die heutigen EMV Normen zum Einen die von einem Gerät ausgehenden leitungsgeführten und gestrahlten Störungen, zum Anderen fordern sie aber auch eine Festigkeit gegenüber einer definierten elektromagnetischen Umgebung. Die in den EMV Normen spezifizierten Umgebungen beinhalten neben den ungewollten Störaussendungen elektrischer Geräte⁶ auch

⁴ Beispielhaft seien hier die Störung des Telegraphendienstes und des Rundfunks durch Störfelder der elektrischen Zündung von Motorkraftwagen

⁵ ... auf Kosten desjenigen Theiles, welcher durch eine spätere Anlage oder durch eine später eintretende Änderung seiner bestehenden Anlage diese Störung oder die Gefahr derselben veranlaßt, ... [37]

⁶ In der Literatur werden diese auch als künstliche oder man-made Störumgebungen bezeichnet (s. Abb. 2.2)

natürliche Störumgebungen⁷. Hierbei besteht die allgemeine Grundannahme, dass kein EMV gerechtes Gerät eine elektromagnetische Umgebung generiert, die die in den EMV Normen spezifizierten Störumgebungen überschreitet.

Diese Grundannahme ist bei der Betrachtung *beabsichtigten* Beeinflussungen⁸ nicht mehr zutreffend, da hierzu bewusst elektromagnetische Umgebungen generiert werden, die zu Störungen elektrischer und elektronischer Systeme führen. Als unmittelbare Folge liegt bei der Sicherstellung der ungestörten Funktion elektrischer und elektronischer Systeme die gesamte Last auf den Schutz der betroffenen Systeme. Da ein potentieller Angreifer davon ausgehen kann, dass elektrische Geräte den in den EMV Normen definierten Störumgebungen standhalten, stellen diese Grenzwerte im Bereich der *beabsichtigten* Beeinflussungen eine untere Grenze für die zu erwartenden Störumgebungen dar.

Der Begriff **absichtliche elektromagnetische Beeinflussung (IEMI)** bezeichnet die absichtliche Störung, Beschädigung oder Zerstörung elektrischer und elektronischer Systeme durch die Erzeugung elektromagnetischer Energie und die Einkopplung von Störsignalen.

2.3 Risiko und Risikomanagement

Der Begriff Risiko wird in vielen Bereichen des täglichen Lebens und vielen wissenschaftlichen Disziplinen, z.B. Rechtswissenschaften, Ingenieurwissenschaften und Wirtschaftswissenschaften in den verschiedensten Zusammenhängen gebraucht. Zusammengesetzte Bezeichnungen wie Finanzierungsrisiko, Gewinnrisiko, Unfallrisiko, Realisierungsrisiko, Projektrisiko oder Risiko des allgemeinen Lebens deuten auf den Anwendungsbereich des Risikobegriffes hin. So vielfältig wie die Anwendungsbereiche des Begriffs Risiko, so vielfältig sind auch die genutzten Definitionen. Allen Definitionen gemeinsam ist jedoch, dass sich der Begriff Risiko auf einen möglichen (virtuellen) Sachverhalt in der Zukunft bezieht, der ungewiss ist und von dem eine gewisse Gefährdung für die Erreichung eines gewünschten Zieles ausgeht. Eine allgemeingültige und vom Anwendungsbereich unabhängige Definition des Begriffs Risiko ist in der ISO 31000:2009 [38] zu finden.

Das **Risiko** ist die Beschreibung eines künftigen Ereignisses mit der Möglichkeit negativer Auswirkungen.

Alternative Definitionen fassen den Begriff des Risikos weiter und lassen bei risikobehafteten Handlungen auch die Möglichkeit einer positiven Auswirkung, die meistens als *Chance* bezeichnet wird, zu. Auch in diesen Definitionen ist das Risiko ursächlich mit der Unsicherheit über den Ausgang verbunden.

Die *Unsicherheit* resultiert hierbei zum einen aus dem Mangel an Wissen über Systemzustände, Umgebungsbedingungen und Ereignisse (z.B. externe Entscheidungen), zum anderen aus der statistischen Natur von Phänomenen. Beim Fehlen der Unsicherheit wird üblicher Weise nicht mehr von Risiko sondern von (vollständig bekannten) *Konsequenzen* gesprochen. Im Falle vergangener Ereignisse ist es üblich von Sachverhalten mit bekannten oder unbekanntem Konsequenzen, bzw. Folgen, zu sprechen. Auch im Falle unbekannter (unbeobachteter) Folgen sind diese bereits eingetreten und somit gewiss. Negative Folgen eines Sachverhaltes in der Vergangenheit werden als *Schaden* bezeichnet.

Da die in der ISO 31000:2009 niedergeschriebene Definition sehr allgemein gefasst ist, muss diese vor der Anwendung weiter konkretisiert werden. In vielen ingenieurwissenschaftlichen An-

⁷ z.B. Elektrostatische Entladungen, Blitz

⁸ engl. Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)

wendungen (z.B. Zuverlässigkeitsbetrachtungen, Gefährdungsbeurteilungen) wird das Risiko als Kombination negativer Konsequenzen (c_i) und deren Eintrittswahrscheinlichkeit ($p(c_i)$) dargestellt [39, 40, 41, 42, 43, 44].

$$r = \{ \langle c_i, p(c_i) \rangle \}, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.1)$$

Bei Betrachtung finanzieller Risiken ist es üblich die negativen Konsequenzen mit dem finanziellen Schaden oder Verlust und die Wahrscheinlichkeit als prozentuelle Häufigkeit zu quantifizieren [43, 44]. Basierend auf dieser Quantifizierung kann das Risiko durch das Produkt aus Konsequenz und Wahrscheinlichkeit beschrieben werden. Diese sehr mathematische Definition hat jedoch den Nachteil, dass nicht finanziell quantifizierbare Konsequenzen (z.B. Verlust von Ansehen, Funktionseinschränkungen, Personenschäden) nur sehr schwer erfassbar sind. Des weiteren setzt diese Definition eine ausreichende Datenbasis zur Ermittlung der prozentualen Häufigkeit voraus.

Ein weiterer Nachteil der Definition des Begriffes Risiko über die Konsequenzen und deren Wahrscheinlichkeit besteht darin, dass diese ausschließlich auf die Folgen (Konsequenzen) fokussiert und die Ursachen, wie z.B. das zugrunde liegende Bedrohungsszenario, vernachlässigt. Insbesondere in Anwendungen wie bewusste elektromagnetische Beeinflussungen, kriminelle oder terroristische Angriffe ist die Bedrohung bzw. das Szenario ein wesentlicher Bestandteil des Risikos. Definitionen des Begriffes Risiko die nicht die Bedrohung, das (Angriffs-) Szenario und deren Auswirkungen beinhalten, werden nicht über die Fähigkeit verfügen die grundlegende Natur absichtlicher böswilliger, krimineller oder terroristischer Angriffe, die Motivation der Täter und den durch sie verursachten Schaden in geeigneter Weise zu erfassen und abzubilden [45]. Sie sind daher ungeeignet als Basis für ein entsprechendes Risikomanagement.

In [45] diskutieren Aven und Guikema die Begrifflichkeit und Definition des terroristischen Risikos. Zu Beginn des Artikels formulieren sie die Anforderung, dass im Zusammenhang absichtlicher böswilliger, krimineller oder terroristischer Angriffe der Begriff *Risiko* Informationen zu den Aspekten

1. Was kann schief gehen? (Welche Beeinflussungen können hervorgerufen werden?)
2. Wie wahrscheinlich kann dieser Fall eintreten?
3. Was sind die Auswirkungen (Konsequenzen) wenn dieser Fall eintritt?

beinhalten muss. Darüber hinaus weisen sie darauf hin, dass bei absichtlichen Beeinflussungen oder Angriffen das Risiko ein dynamischer Prozess ist, dessen Stärke wesentlich von der Motivation, den Kenntnissen und Fähigkeiten des Angreifers abhängt. So führen Berichte von erfolgreichen Angriffen zu einem Ansteigen dessen Eintrittswahrscheinlichkeit, da andere Täter die nun bekannte Systemschwäche ebenfalls nutzen werden. Anders als bei der Beurteilung rein technischer oder finanzieller Risiken verändert sich das Risiko absichtliche Beeinflussungen mit der dem potentiellen Angreifern zugänglichen Informationen und technischer Hilfsmittel. Für ein umfassendes Risikomanagement muss der Risikobegriff in der Lage sein diese Änderungen abzubilden.

Unter Berücksichtigung der vorstehenden Aspekte hat sich in der Fachliteratur [45, 29, 46] ein Risikobegriff für das Risiko absichtlichen Beeinflussungen oder krimineller/terroristischer Angriffen gebildet, bei dem das Risiko (r_i) als Kombination eines zukünftigen Bedrohungs- bzw. Angriffsszenarios (s_i), der aus diesem folgenden Auswirkungen (c_i) und der zugehörigen Unsicherheit (u_i) verstanden wird.

$$r_i = \langle s_i, c_i, u_i \rangle \quad (2.2)$$

In vielen Anwendungen wird die Unsicherheit durch die Eintrittswahrscheinlichkeit (p_i) ausgedrückt. Zunächst ist die Unsicherheit jedoch weiter gefasst als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Szenario s_i und die Auswirkungen c_i eintreten. Allgemein umfasst die Unsicherheit darüber hinaus auch die Unkenntnis bezüglich einzelner Parameter des Bedrohungsszenarios⁹.

⁹ wie z.B. Kenntnisse der Angreifers, Ort der Störquelle, Bau- und Betriebszustand des Zielsystems

Das **Risiko einer absichtlichen Beeinflussungen** oder von kriminellen / terroristischen Angriffen ist die Menge der Einzelrisiken, beschrieben durch das Tupel aus dem Bedrohungsszenario s_i , der aus diesem folgenden Konsequenzen c_i und der bestehenden Unsicherheiten u_i .

$$r = \{r_i\} = \{ \langle s_i, c_i, u_i \rangle \}, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.3)$$

Die Spezifikation von EMI-Szenarien wird eingehend im Kapitel 6¹⁰ vorgestellt und diskutiert.

Die Tätigkeiten zur Erfassung, Bewertung von und Milderung der Folgen wird unter dem Begriff *Risikomanagement* zusammengefasst. Im weitesten Sinne ist das Risikomanagement ein Entscheidungsprozess, da bei jedem Unternehmen oder Projekt Entscheidungen getroffen werden, aus denen sich technische, finanzielle oder organisatorische Risiken ergeben welche zum Teil das Erreichen des angestrebten Ergebnis oder die Existenz des Unternehmens bedrohen können. Ziel des Risikomanagements ist es das Risiko überschaubar zu und in einem angemessenen Verhältnis zum angestrebten Erfolg zu halten und nicht akzeptable Risiken¹¹ zu vermeiden. Ausgangspunkt des Risikomanagements bildet der Wunsch nach der Möglichkeit unter Abwägung bestehender Randbedingungen und Zielvorgaben die Wahrscheinlichkeit das sich ein Risiko realisiert als auch dessen negative Auswirkungen auf ein tolerierbares Maß zu begrenzen.

Risikomanagement umfasst sämtliche Maßnahmen zur systematischen Erkennung, Analyse, Bewertung, Überwachung und Kontrolle von Risiken.

Der Risikomanagementprozess umfasst:

- Identifikation der Gefährdungen, Beschreibung ihrer Art, der Ursachen und Auswirkungen
- Analyse der identifizierten Gefährdungen hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten und möglichen Auswirkungen
- Risikobewertung
- Risikomitigation durch Maßnahmen, die Gefährdungen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten reduzieren oder die Folgen beherrschbar machen
- Risiko Überwachung mit Hilfe von Risikoindikatoren
- Dokumentation aller Vorgänge, die im Zusammenhang der Risikoanalyse und -beurteilung durchgeführt wurden.

Die in der ISO 31000 beschriebenen allgemeinen Grundsätze und Vorgehensweisen des Risikomanagements werden in Kapitel 4¹² vorgestellt. Im Kapitel 5¹³ werden Grundzüge ausgesuchter Methoden zur Beurteilung von EMI-Risiken erläutert.

2.4 Unsicherheit

In der Entscheidungstheorie werden Entscheidungssituationen, bei denen der Eintritt von zukünftigen Umweltzuständen nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden kann als **Entscheidungen unter Unsicherheit** bezeichnet. Je nachdem, ob die Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Umweltzustände bekannt sind, wird hierbei zwischen drei Graden von Unsicherheit unterschieden [47, 48]:

¹⁰ ab Seite 67

¹¹ z.B. Personenschäden, Umweltschäden

¹² ab Seite 27

¹³ ab Seite 41

- Entscheidung unter **Risiko**: Dem Entscheider sind die von seiner Entscheidung abhängigen Eintrittswahrscheinlichkeiten $p_j(s_j)$ der Umweltzustände s_j objektiv oder subjektiv (aufgrund von Schätzungen oder von Vergangenheitswerten) bekannt.
- Entscheidung unter **Ungewissheit**: Dem Entscheider sind nur die von seiner Entscheidung abhängigen möglichen Umweltzustände s_j bekannt, er kann jedoch keine Aussage über die Wahrscheinlichkeiten treffen, mit denen diese Umweltzustände eintreten werden.
- Entscheidung unter **vollkommener Unsicherheit** (Knightsche Unsicherheit): Dem Entscheider sind weder die von seiner Entscheidung abhängigen Eintrittswahrscheinlichkeiten $p_j(s_j)$ der Umweltzustände s_j noch die von seiner Entscheidung abhängigen möglichen Umweltzustände s_j bekannt.

Im wissenschaftlichen Kontext wird einen bewusst wahrgenommenen Mangel an Reliabilität und Validität als **Unsicherheit** bezeichnet.

Im Risikomanagement ist eine Unterteilung in Ungewissheit und Risiko unüblich. Wie im vorstehenden Abschnitt dargelegt, beinhaltet der Begriff Risiko hier die gesamte Unsicherheit. Die Rechtfertigung hierfür ist, dass bei Situationen unter Ungewissheit Wahrscheinlichkeiten mit den jeweils bestverfügbaren Informationen geschätzt werden können, wodurch eine Überleitung zur Risikosituation vorgenommen wird [49].

2.5 Wahrscheinlichkeit

Der Begriff *Wahrscheinlichkeit* ist untrennbar verbunden mit dem Versuch der Beschreibung des Grades an Gewißheit von zukünftigen (ungewissen) Ereignissen. In der Mathematik hat sich mit der Wahrscheinlichkeitstheorie ein eigenes Fachgebiet entwickelt, das Wahrscheinlichkeiten als mathematische Objekte beschreibt, deren formale Eigenschaften im Alltag auch auf Vorhersagen, Aussagen und Urteile übertragen werden können. Bei der Einstufung von Vorhersagen nach dem Grad der Gewißheit (Sicherheit) kommt der *axiomatischen Definition der Wahrscheinlichkeit*, dem *objektivistischen* und dem *subjektivistischen Wahrscheinlichkeitsbegriff* eine besondere Bedeutung zu. In den nachstehenden Abschnitten sollen die Grundzüge dieser Begriffe kurz vorgestellt werden.

Axiomatische Definition der Wahrscheinlichkeit

Die *axiomatische Definition der Wahrscheinlichkeit* geht auf den russischen Mathematiker Andrej Kolmogorow zurück. Die Bedeutung der axiomatischen Definition nach Kolmogorow liegt vor allem darin begründet, dass diese den abstrakten mathematischen Rahmen für den Wahrscheinlichkeitsbegriff absteckt, aus dem mittels logischer Schlüsse Rechenregeln für Wahrscheinlichkeiten abgeleitet werden können.

Axiome von Kolmogorow [50, 51, 52]:

Ist $\Omega \neq \emptyset$ ein Ereignisraum und sind $A, B \subseteq \Omega$ zufällige Ereignisse, dann heißt eine auf den Teilmengen (Ereignissen) von Ω definierte reellwertige Funktion P Wahrscheinlichkeitsmaß und $P(A)$ Wahrscheinlichkeit des Ereignisses A , wenn folgende Axiome erfüllt sind:

1. **Nichtnegativitätsaxiom**: Die Wahrscheinlichkeit $P(A)$ eines Ereignisses $A \subseteq \Omega$ ist eine reelle Zahl, die stets nur gleich oder größer Null sein kann.

$$0 \leq P(A), P(A) \in \mathbf{R} \quad (2.4)$$

2. **Normierungsaxiom:** Die Wahrscheinlichkeit des sicheren Ereignisses Ω ist stets 1.

$$P(\Omega) = 1 \quad (2.5)$$

3. **Additionsaxiom:** Die Wahrscheinlichkeit einer Vereinigung abzählbar vieler disjunkter Ereignisse A_i ist gleich der Summe ihrer Wahrscheinlichkeiten.

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \dots) = \sum P(A_i) \quad (2.6)$$

(vergl. [50], Seite 190)

Anhand des Normierungsaxioms und des Nichtnegativitätsaxioms lässt sich die elementare Aussage:

Die Wahrscheinlichkeit eines zufälligen Ereignisses ist eine reelle Zahl, die stets größer oder gleich Null und stets kleiner oder gleich Eins ist.

$$0 \leq P(A) \leq 1 \quad (2.7)$$

ableiten. Die Kombination des Normierungsaxioms mit dem Additionsaxiom führt auf die Aussage:

Die Wahrscheinlichkeit des unmöglichen Ereignisses ist gleich Null

$$P(\emptyset) = 0 \quad (2.8)$$

Objektivistischer Wahrscheinlichkeitsbegriff

Objektivistische Wahrscheinlichkeitstheorien fassen die Wahrscheinlichkeit als eine meßbare physikalische Größe auf, die einen bestimmten Wert hat, der anhand eines Experimentes ermittelt werden kann [53]. Für die exakte Einführung des Wahrscheinlichkeitsbegriffes schlug Mises eine *explizite* Definition vor. Ausgehend von der Erfahrungstatsache, dass sich bei Massenversuchen die relative Häufigkeit verschiedener Merkmale mit zunehmender Zahl der Beobachtungen (Versuchsdurchführungen) immer weniger ändern, definierte er die objektive Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses A , das zu einer Versuchsvorschrift V gehört, als den *Grenzwert der relativen Häufigkeit* des Auftretens von A in einer unendlichen langen Reihe von Durchführungen von V [54, 53].

Diese Häufigkeitsdefinition weist eine hohe Übereinstimmung mit der Intention hinsichtlich des Wahrscheinlichkeitsbegriffes auf. Die Forderung nach einer strengen Konvergenz der relativen Häufigkeit der Ereignisse führt zu einer erheblichen Einschränkung der Anwendbarkeit dieses Wahrscheinlichkeitsbegriffes [55].

Im Hinblick auf die bis heute ungelösten Schwierigkeiten der expliziten Definition der Wahrscheinlichkeit wurde die *indirekte* Theorie der objektiven Wahrscheinlichkeit entwickelt, die in eingängiger Form von Hans Richter in [53] beschrieben wurde. In der indirekten Theorie wird die objektive Wahrscheinlichkeit zunächst durch die *Axiome von Kolmogorow* charakterisiert. Der nun noch fehlende Zusammenhang zwischen der Wahrscheinlichkeit und der realen Versuchsanordnung, bzw. der relativen Häufigkeit, wird durch das Prinzip der Häufigkeitsinterpretation gebildet.

Die **Häufigkeitsinterpretation** besagt, dass für wiederholbare Versuche bei genügend großer Versuchszahl n es *praktisch sicher* ist, dass die relative Häufigkeit *beliebig nahe* bei einer festen Zahl liegt, die nur von der Wahrscheinlichkeit des beobachteten Versuchsergebnisses liegt [53].

Durch die Formulierungen *praktisch sicher* ist die Häufigkeitsinterpretation deutlich weicher und weiter gefasst als die strenge Konvergenz der Häufigkeitsdefinition.

Klassische objektive Wahrscheinlichkeit [50]:

Ist $\Omega \neq \emptyset$ ein (nichtleerer) Ereignisraum und $A \in \Omega$ ein zufälliges Ereignis, eines LAPLACE-schen Ereignisfeldes, dann heißt der Quotient

$$P(A) = \frac{n(A)}{n(\Omega)} \quad (2.9)$$

aus der Anzahl $n(A)$ derjenigen gleichmöglichen Elementarereignisse $A_i = \{\omega_i \in \Omega, i = 1, 2, \dots, n\}$, die wegen $A_i \subseteq A$ das Ereignis A nach sich ziehen, und der endlichen Anzahl $n(\Omega)$ aller im Kontext eines Zufallsexperiments gleichmöglichen Elementarereignisse $A_i \in \Omega$ klassische Wahrscheinlichkeit $P(A)$ des zufälligen Ereignisses A .

(vergl. [50], Seite 191)

In Bezug auf die Definition über die Häufigkeitsinterpretation wird die *objektive* Wahrscheinlichkeit in der Literatur oft auch als *frequentistische* oder *statistische* Wahrscheinlichkeit bezeichnet. Durch diese Definition ist die objektive Wahrscheinlichkeit mathematisch einfach quantifizierbar. Die Definition mittels Häufigkeitsinterpretation schränkt die Anwendbarkeit der objektive Wahrscheinlichkeit jedoch auf wiederholbare Ereignisse ein, so dass diese zur Prognose von Einzelereignissen oder selten auftretenden Ereignissen nicht anwendbar ist.

Subjektiver Wahrscheinlichkeitsbegriff

Der *subjektive* Wahrscheinlichkeitsbegriff basiert auf Arbeiten von Thomas Bayes und wurde vor allem von Bruno de Finetti [56, 57, 58] weiter entwickelt. Er drückt die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses bzw. Sachverhaltes als den Überzeugungsgrad, mit dem eine Person an das Eintreten des Ereignisses bzw. Sachverhaltes glaubt, aus [59].

Der **subjektive Wahrscheinlichkeitsbegriff** versteht Wahrscheinlichkeit als Maß für die Sicherheit der persönlichen Einschätzung eines Sachverhaltes, z.B. auf der Basis von Expertenwissen, Erfahrungen und Intuition.

Der subjektive Wahrscheinlichkeitsbegriff hat den Vorteil, dass er auf künftige Einzelereignisse bzw. Sachverhalte anwendbar ist und die intuitive Handhabung der Wahrscheinlichkeit durch Menschen sehr gut beschreibt. Bei der alltäglichen Handhabung bilden Menschen ihr Urteil hinsichtlich der Sicherheit des Eintretens eines Ereignisses bzw. Sachverhaltes auf der Grundlage von vorhandenen Informationen, Kenntnissen, Erfahrungen und persönlichen Einschätzungen. Der so gebildete Überzeugungsgrad ist hierbei nicht unabänderbar, sondern kann sich bei Erlangung neuer Erkenntnisse ändern. Die subjektive Wahrscheinlichkeit ist somit keine feststehende Eigenschaft des beurteilten Sachverhaltes, sondern Funktion der zum Zeitpunkt der Einschätzung verfügbaren Erkenntnisse.

Die Definition der subjektiven Wahrscheinlichkeit über den persönliche Überzeugungsgrad einer Person beinhaltet die Herausforderung ihrer Messbarkeit und mathematischen Quantifizierung. Eine weitere mit der subjektiven Interpretation der Wahrscheinlichkeit verbundene Schwierigkeit ist der Nachweis, dass die Überzeugungen von (Test-)Personen die Axiome von Kolmogorow erfüllen.

Zur Lösung schlägt Finetti vor, die Wahrscheinlichkeit über das durch die Überzeugung hervorgerufene Verhalten zu messen, da dies nach seiner Auffassung der einzige beobachtbare und messbare Zugang zur Überzeugung einer Person sei [57]. Die wissenschaftliche Begriffsbildung als auch die Rechtfertigung, dass die subjektive Wahrscheinlichkeit die Axiome von Kolmogorow erfüllt wird in der Literatur anhand von Einsätzen in Wettspielen diskutiert [56].

Tabelle 2.1 Skala Wahrscheinlichkeit

P_O	Wahrscheinlichkeit		Beschreibung
0	unwahrscheinlich	< 0,5%	unwahrscheinliches Auftreten
1		0,5% – 1%	
2	gering	1% – 2%	geringes Auftreten
3		2% – 5%	
4	mittel	5% – 12%	gelegentliches Auftreten
5		12% – 25%	
6		25% – 50%	
7	hoch	50% – 75%	Auftreten in mehr als der Hälfte der Fälle
8		75% – 90%	
9	sehr hoch nahezu sicher	90% – 97%	Auftreten in fast allen Fällen
10		> 97%	

Wahrscheinlichkeitsbegriff in dieser Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung des Risikos einer Beaufschlagung durch eine vorsätzlich generierte elektromagnetische Umgebung (IEMI Angriffe). Da die im Fokus stehenden IEMI Attacken seltend auftretende Ereignisse sind deren Datenlage eine statistische Auswertung nicht ermöglichen schließt sich die Nutzung des objektivistischen Wahrscheinlichkeitsbegriff aus. In dieser Arbeit wird daher **ausschließlich der subjektive Wahrscheinlichkeitsbegriff** genutzt.

Die Wahrscheinlichkeit wird hierbei anhand von Expertenanalyse (z.B. Auswertung des Absicherungskonzeptes) oder Expertenschätzungen/-befragungen quantifiziert. Insbesondere bei der Expertenschätzung ist die Zuordnung einer reellen Zahl zwischen 0 und 1 nicht ganz unproblematisch. Unter Einbeziehung der mit einer Expertenschätzung ohnehin verbundenen Unsicherheit, hat sich die Vorgabe von **Wahrscheinlichkeitskategorien** als vorteilhaft erwiesen. In dieser Arbeit wird daher für die Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit die in Tabelle 2.1 aufgetragene Skala verwendet. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die in der linken Spalte aufgetragenen Indexwerte (P_O) nur die jeweilige Wahrscheinlichkeitskategorie bezeichnen, keine Zahlen im engeren mathematischen Sinne darstellen und folglich auch nicht die Axiome von Kolmogorow erfüllen.

2.6 Bedrohung und Gefährdung

Eine **Bedrohung** ist ganz allgemein ein Umstand oder Ereignis, durch den oder das ein Schaden entstehen kann. Übertragen auf elektromagnetische Wechselwirkungen (EMI) ist eine Bedrohung die Beaufschlagung eines Systems mit elektromagnetischer Energie, durch welche die Funktion des Systems beeinträchtigt oder gestört werden kann, wodurch dem Besitzer bzw. Benutzer des Systems ein Schaden entstehen kann. Beispiele für Bedrohungen sind höhere Gewalt, menschliche Fehlhandlungen, technisches Versagen oder vorsätzliche Handlungen. Trifft eine Bedrohung auf eine Schwachstelle (insbesondere technische oder organisatorische Mängel), so entsteht eine Gefährdung [60].

Im Rahmen des Risikomanagements werden potentielle Schadensquellen (Risikoursachen) als **Gefährdung** bezeichnet [61].

Eine Gefährdung als technischer Begriff bedeutet die Möglichkeit, dass ein Schutzgut räumlich und/oder zeitlich mit einer Gefahrenquelle zusammentreffen kann. Das Wirksamwerden der Gefahr führt zu einem Schaden, etwa zu Funktionseinbußen, Funktionsverlust, Verletzung, Erkrankung oder

Tod. Die vorsätzliche Erzeugung einer Gefährdung mit dem Ziel, sich einen Vorteil zu verschaffen oder einem Dritten zu schaden wird als **Angriff** bezeichnet.

2.7 Zuverlässigkeit

Zuverlässigkeit ist ein Begriff, der im Zusammenhang mit dem Risikomanagement, insbesondere der Risikoanalyse, häufig auftritt.

In der aktuellen Normung wird der Begriff Zuverlässigkeit mit zwei unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Zum einen ist die Zuverlässigkeit (engl.: dependability¹⁴) ein übergeordneter Ausdruck, mit dem die Aspekte Funktionszuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Sicherheit und Instandhaltbarkeit zusammengefasst werden. Zum anderen wird der Begriff **Zuverlässigkeit** als Eigenschaftsmerkmal genutzt, mit dem angegeben wird, wie verlässlich eine einem System zugewiesene Funktion in einem Zeitintervall erfüllt wird.

Die **Zuverlässigkeit** eines technischen Systems ist eine Eigenschaft, die angibt, wie verlässlich eine dem System zugewiesene Funktion in einem Zeitintervall erfüllt wird. [63, 64]

Der Zusammenhang zwischen der Zuverlässigkeitstechnik und dem Risikomanagement liegt in der historischen Entwicklung beider begründet. Bei der Entwicklung immer komplexerer und umfangreicherer technischer Systeme erkannte man, dass mit steigender Komplexität der Systeme ihre Fehleranfälligkeit ebenfalls anstieg. Insbesondere in der Luft- und Raumfahrttechnik, später auch in der Kerntechnik, bestand daher die Notwendigkeit der Entwicklung von Methoden zur Steigerung der Zuverlässigkeit der Geräte und Systeme. Basierend auf den hierbei gewonnenen Erfahrungen entwickelte sich zunächst die Risikoanalyse, die sich der Methoden der Zuverlässigkeitstechnik bedient und in letzter Konsequenz das Risikomanagement.

Inhaltlich betrachten die Zuverlässigkeitsanalyse und die Risikoanalyse die gleiche Systemeigenschaft unter komplementären Gesichtspunkten. Im Anwendungsfall der elektromagnetischen Beeinflussung (EMI) ist es das Ziel der Zuverlässigkeitsanalyse zu bestimmen, mit welcher Wahrscheinlichkeit das betrachtete System in der EMI-Umgebung seine Funktion fehler- und störungsfrei erbringen wird. Die Risikoanalyse hingegen ermittelt mit welcher Wahrscheinlichkeit die EMI-Umgebung in dem System Störungen hervorruft. Sie ist jedoch weitreichender als die Zuverlässigkeitsanalyse, da nicht nur die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Störung oder Fehlers bestimmt wird, sondern in einem weiteren Schritt auch dessen Auswirkungen (Konsequenzen). Die überlagerte Risikoanalyse greift diese Ergebnisse auf und bewertet die erkannten Auswirkungen hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und Schwere (Bedeutung) in Bezug auf vorgegebene Kriterien. In der zusammenfassenden Gegenüberstellung der Zuverlässigkeitsanalyse mit dem Risikomanagement, speziell der Risikoanalyse, ist festzuhalten, dass der Ansatz der Zuverlässigkeitsanalyse auf den Nachweis vorgegebener Kriterien hin ausgerichtet ist, wogegen die Risikoanalyse mehr das Ziel einer iterativen Optimierung des Systemverhaltens verfolgt.

¹⁴ IEC 60050, 191-02-06 [62]

2.8 Verfügbarkeit

Eine mit der Zuverlässigkeit im Zusammenhang stehendes Kriterium ist die **Verfügbarkeit** eines Systems.

Die **Verfügbarkeit** eines technischen Systems ist die Wahrscheinlichkeit oder das Maß, dass das System seine Funktion zu einem vorgegebenen Zeitpunkt bzw. innerhalb eines vereinbarten Zeitraumes erbringt. [64]

In einer Vielzahl von Anwendungen wird die Verfügbarkeit (AL) als Quotient aus verfügbarer Zeit und Gesamtzeit (t_{ges}) definiert.

$$AL = \frac{t_{ges} - t_a}{t_{ges}} \quad (2.10)$$

wobei t_a die Ausfallzeit des betrachteten Systems bezeichnet. Hierbei ist zu beachten, dass nur ungeplant auftretende Betriebsunterbrechungen (sog. Downtime) als Ausfallzeiten berücksichtigt werden, da geplante Betriebsunterbrechungen (z.B. Wartungszeiten) ausserhalb der vereinbarten Gesamtzeit liegen.

Im Hinblick auf das Risikomanagement ist die Verfügbarkeit des betrachteten Systems ein Leistungskriterium, mit dem die Stärke der Auswirkungen eines Störereignisses bewertet werden kann. Ein denkbare Bewertungskriterium ist, dass durch EMI-Störungen die Verfügbarkeit des Systems oder seiner Funktionalität nicht unter eine gegebene Schwelle (z.B. 95%) absinken darf.

Kapitel 3

Systemtechnische Beschreibung der elektromagnetischen Beeinflussung

Zusammenfassung Der Umfang und Detaillierungsgrad der für die Durchführung von Analysen im Rahmen der Risikobeurteilung verfügbaren Dokumente, wie z.B. Prozessdiagramme, technische Designunterlagen, Spezifikationen, unterscheiden sich erheblich in Abhängigkeit von der jeweiligen Phase des Produktlebenszyklus in der sich das betrachtete System befindet. Zum besseren Verständnis der hierdurch gegebenen Randbedingungen und Einschränkungen, aber auch bestehender Handlungsoptionen, wird zu Beginn dieses Kapitels das Phasenmodell für den Produktlebenszyklus von Systemen vorgestellt und Zusammenhänge zum Risikomanagement aufgezeigt werden. In der zweiten Hälfte des Kapitels wird die elektromagnetische Beeinflussung elektrischer Systeme hinsichtlich einer systematischen Betrachtung sowie der Kategorisierung der hervorgerufenen Effekte und Auswirkungen diskutiert.

3.1 Phasenmodell für den Produktlebenszyklus von Systemen

Projekte zum Bau von Anlagen, Infrastrukturen und komplexer Systeme werden in der Regel in sechs Projektabschnitte oder *Phasen* gegliedert. Jede Projektphase dient dazu, das Projekt oder System von einem planerischen und technischen Stand aus zu einem fortgeschrittenem Stand zu entwickeln. Hierzu sind die für die Projektphase charakteristischen Tätigkeiten erfolgreich abzuschließen. Eine Projektphase endet mit einem Meilenstein (z.B. Entscheidung über das weitere Vorgehen, Vorlegen von wesentlichen Zwischenergebnissen, Dokumentationen oder Prototypen, Abnahmen oder Nachweisen). Der Meilenstein ist ein Maß für den Fortschritt des Projektes und unterstützt den geordneten Übergang zwischen Projektphasen. Der erfolgreiche Abschluß eines Meilensteins ist im allgemeinen Bedingung für den Beginn der nachfolgenden Phase.

In Anlehnung an diese Vorgehensweise kann ein allgemeines Phasenmodell für den Produktlebenszyklus elektrischer und elektronischer Systeme aufgestellt werden (Abb. 3.1). Der Produktlebenszyklus lässt sich in aller Regel in die Phasen

- Konzeptphase,
- Definitionsphase,
- Entwurfsphase,
- Fertigungsphase,
- Betriebsphase (oder Nutzung),
- Verwertungsphase (Stilllegung, Verwertung und Entsorgung)

unterteilen [65].

Da mit dem Ende des Betriebes eines elektrischen oder elektronischen Systems auch das Risiko einer Beeinflussung durch elektromagnetische Wechselwirkungen nicht mehr besteht, ist die Verwer-

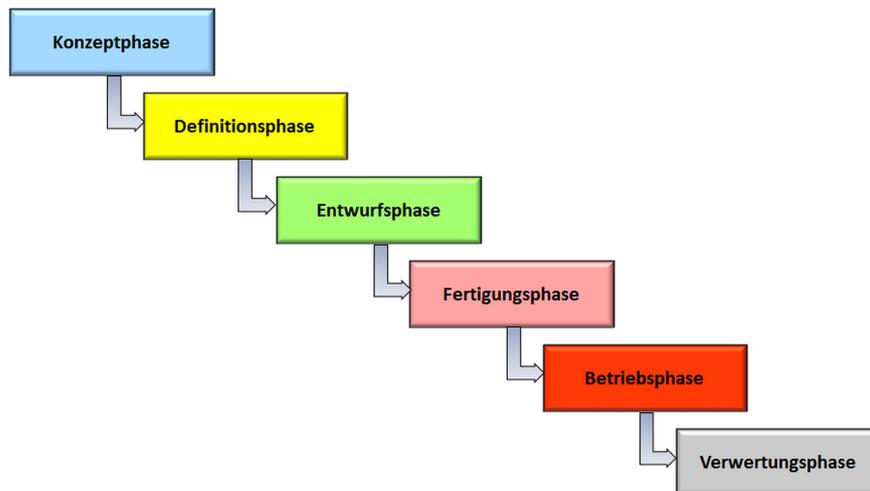


Abb. 3.1 Phasenmodell für den Produktlebenszyklus eines Systems

tungsphase für das EMI-Risikomanagement ohne Bedeutung. Aus diesem Grund wird diese Phase im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Zum besseren Verständnis sollen die für die einzelnen Projektphasen charakteristischen Tätigkeiten kurz vorgestellt und Zusammenhänge zum Risikomanagement aufgezeigt werden.

Konzeptphase

Ziel der Konzeptphase ist die Festlegung der durch das System zu erbringenden Funktionen und Leistungen, Formulierung von Zuverlässigkeits- und Sicherheitszielen, Erfassung von Umwelt- und Randbedingungen sowie die Erarbeitung und Bewertung technischer Lösungskonzepte. Die Konzeptphase beinhaltet insbesondere die Arbeitsschritte:

- Charakterisierung der gewünschten Funktionen und der erwarteten Leistung,
- Formulierung von Zuverlässigkeits- und Sicherheitszielen (z.B. Verfügbarkeit, kritische Funktionen),
- Erfassung und Bewertung der Umweltbedingungen (z.B. elektromagnetische Umgebung) und Betriebsbedingungen,
- Identifizierung und Charakterisierung kritischer Funktionen und Elemente,
- Erarbeitung verschiedener möglicher Systemkonzepte,
- Analyse und Bewertung der erarbeiteten Systemkonzepte durch Modellierung und numerische Analysen,
- Abschätzung der Realisierbarkeit,
- Durchführung erster Risikoanalysen, hinsichtlich der Realisierbarkeit als auch ausgesuchter Gefährdungen (z.B. IEMI).

Die Konzeptphase schließt mit der Festlegung der Funktionsspezifikation und der Auswahl eines Systemkonzepts.

In der Konzeptphase besteht für ein systematisches EMI-Risikomanagements das wesentliche Ziel in der Sicherstellung der frühzeitigen Berücksichtigung der EMI-Belange (EMV als auch IEMI) bei der Erarbeitung, Bewertung und Auswahl des Systemkonzeptes. Die notwendigen Analysen und Bewertungen können hierbei ausschließlich auf die Dokumentation durchgeführter konzeptioneller Systemanalysen, erster Vorhersagen als auch der erarbeiteten Systemkonzepte als Datenbasis zurückgreifen. Bedingt durch die noch sehr schemenhafte Systembeschreibung sind Mo-

dellierungen und numerische Simulationen auf die wesentlichen funktionalen Zusammenhänge beschränkt. Folglich ist die Betrachtung elektromagnetischer Beeinflussungen in der Konzeptphase auf die Erfassung der elektromagnetischen Umgebung, möglicher Störquellen und Kopplungspfade beschränkt. Neben der Auswertung bekannter Umwelt- und Betriebsbedingungen kann es sinnvoll sein bei EMI-Untersuchungen auf allgemeine Bedrohungsdaten und Erfahrungen aus ähnlichen Projekten zurückzugreifen.

Definitionsphase

Die Definitionsphase dient der Auswahl der technischen Lösungen für das in der Konzeptphase gewählte Systemkonzept und zur Erfüllung der zugehörigen Funktionsspezifikation. Die Auswahl der technischen Lösungen und die hiermit verbundene technische Präzisierung des Systemkonzepts umfasst die Arbeitsschritte:

- Ableitung der technischen Systemspezifikation (Leistungsparameter),
- Festlegung von Baugruppen und Schnittstellen,
- Spezifikation von Geräten,
- Bewertung und Auswahl von Integrationstechniken,
- Durchführung von Integrationstests,
- Vorentwicklungen (Demonstratoren, Machbarkeitsstudien) für kritische Technologien oder Systemkomponenten,
- Zuverlässigkeits- und Sicherheitsbewertung,
- Analyse und Bewertung der Umweltauswirkungen.

Die Designphase schließt mit der Festlegung der technischen Systemspezifikation.

Die in der Definitionsphase zunehmend verfügbaren Informationen bezüglich des technischen Systemdesigns ermöglichen eine detailliertere Systemanalyse, z.B. die numerische Analysen der Kopplung des Systems mit seiner elektromagnetischen Umgebung und hierauf aufbauender Abschätzungen eingekoppelter Störgrößen. Im Rahmen des EMI-Risikomanagements kann aus den so gewonnenen Daten das Risiko einer elektromagnetischen Beeinflussung des Systems oder seiner Teilsysteme abgeschätzt und alternative Integrationstechniken bewertet werden. Für die technische Spezifikation von Baugruppen, Geräten und Schnittstellen können aus den Kopplungsanalysen Vorgaben für EMI-Grenzwerte oder auch hinsichtlich notwendiger EMI-Gegenmaßnahmen abgeleitet werden.

Entwurfsphase

Die Umsetzung der technischen Systemspezifikation, einschließlich der Beschaffung bzw. der Herstellung von Baugruppen und Geräten erfolgt in der Entwurfsphase. Diese umfasst die Arbeitsschritte:

- Durchführung detaillierter technischer Untersuchungen der in der Definitionsphase gewählten Lösung,
- Entwicklung, Bau und Integration der Geräte und Baugruppen,
- Realisierung des Systemdesigns,
- Bau von Prototypen,
- technischer Nachweis (Verifikation und Qualifikation) der spezifizierten Leistungsparameter und Funktionen.

Die Entwurfsphase schließt mit einem Designreview, in dem die technische Konformität des Systemdesigns mit den Anforderungen (Designqualifikation) sowie der Gebrauchstauglichkeit für den vorgesehenen Betrieb (Betriebsqualifikation) festgestellt wird.

Mit der Herstellung von Geräten als auch dem Bau von Prototypen stehen in der Entwurfsphase, erstmals im Systemlebenszyklus, Geräte und Systeme für die messtechnische Verifikation des EMI-Verhaltens zur Verfügung. Als Folge sind die Tätigkeiten des EMI-Risikomanagements in der Entwurfsphase durch messtechnische Nachweise der spezifizierten EMI-Eigenschaften an Geräten und Prototypen als messtechnische Verifikation numerischer System- und Kopplungsanalysen geprägt. Mit der fortschreitenden technischen Realisierung des Systemdesign werden die Möglichkeiten zum Einfügen notwendiger EMI-Gegenmaßnahmen (z.B. EMI-Filter, Schirmung) zunehmend eingeschränkt. Zeigt sich bei der Bewertung von Messergebnissen, dass ein Gerät oder eine Baugruppe die vorgegebene EMI-Spezifikation nicht erreicht, kann dies oftmals nur durch die Anpassung der Gerätekonzeption und ein Redesign behoben werden.

Fertigungsphase

Die Fertigungsphase dient der Vorbereitung und Durchführung der Serienfertigung bzw. dem Aufbau des Systems an seinem Betriebsort. Im Hinblick auf die EMI-Risikoanalyse ist in der Fertigungsphase der tatsächliche Systemaufbau zu erfassen und zu dokumentieren als auch die Qualität des Herstellungsprozesses zu überwachen. Insbesondere bei Anlagen und Infrastrukturen sind in dieser Phase die tatsächlichen Umgebungsbedingungen (Schirmungen, EM-Umgebung, Zugänglichkeit) zu erfassen.

Die Fertigungsphase schließt mit der Inbetriebnahme des ersten Systems der Serienfertigung bzw. dessen Übergabe an den Betreiber.

Betriebsphase

Die Betriebsphase umfasst die gesamte Nutzungsdauer des Systems, von der Inbetriebnahme (bzw. Übergabe an den Betreiber) bis zur Außerbetriebnahme. Die Betriebsphase umfasst neben der Nutzung auch alle Tätigkeiten zur Instandhaltung, Modernisierung (Produktverbesserung) und Anpassung (z.B. Erweiterung der Funktionalität, Anpassung an neue Umgebungsbedingungen) des Systems.

Die Betriebsphase schließt mit der Außerbetriebnahme. Bei Serienprodukten endet die Betriebsphase mit der Außerbetriebnahme des letzten Systems.

Verwertungsphase

Die Verwertungsphase umfasst alle Tätigkeiten vom Ende der Nutzung (Außerbetriebnahme) bis zur endgültigen Entsorgung, Rückbau oder Verwertung des Systems.

3.2 Elektromagnetische Beeinflussung elektrischer Systeme

3.2.1 Elektrische Systeme

Nahezu alle Bereiche des heutigen Lebens sind in zunehmendem Maße durch die Verwendung elektrisch betriebener oder gesteuerter Systeme gekennzeichnet. In den **elektrischen Systemen** wird die elektrische Energie zur Bereitstellung von Bewegungsenergie (elektrische Antriebe), der Ansteuerung mechanischer Steuerungen (z.B. durch Stellmotoren) oder aber zur Erfassung von Prozessgrößen (Messgrößen), deren Umwandlung in digitale Daten, Verarbeitung (Steuer- und Regelungs-

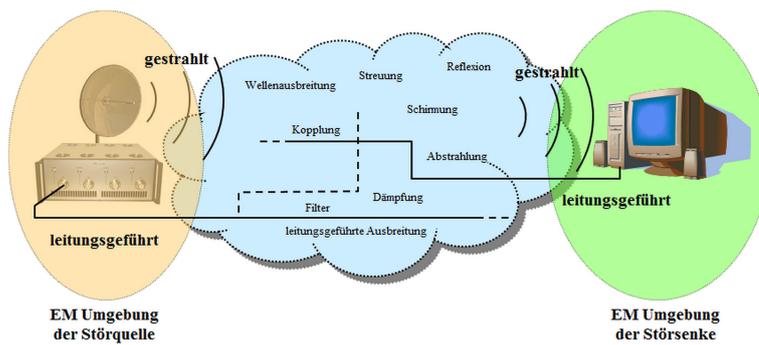


Abb. 3.2 Elektromagnetische Beeinflussung zwischen zwei elektrischen Systemen

elektronik) und Übertragung (Informations- und Kommunikationselektronik) genutzt. Im Rahmen technologischer Entwicklungen wie *Smart Systems*, *Internet of Things (IoT)* oder *Industrie 4.0* werden Systeme in zunehmendem Maße mit integrierten Sensoren und Aktuatoren ausgestattet, die über Ad-Hoc-Kommunikationsnetze untereinander und mit dem Internet verbunden sind. Die Ad-Hoc-Kommunikationsnetze werden typischerweise in Form von drahtloser Funkkommunikation¹ ausgeführt. Hierdurch kommt es zum einen zu einem rasanten Anstieg des Anteils an Informations- und Kommunikationselektronik, zum anderen sind die drahtlosen Ad-Hoc-Netzwerke anfälliger gegenüber elektromagnetischen Störumgebungen.

Elektrische Systeme sind Systeme, die zumindest anteilig durch elektrische Energie betrieben oder gesteuert werden.

Hinsichtlich der elektromagnetischen Beeinflussung stellen die elektrischen Systeme mögliche Verwundbarkeitspunkte für elektromagnetische Einkoppelungen und Beeinflussungen dar. Die elektromagnetische Energie kann, gewollt und/oder unbeabsichtigt, durch Sensoren, Antennen und Verbindungsleitungen in ein elektrisches System eindringen. In dem so beaufschlagten Teilsystem kann die Beeinflussung zu Effekten wie:

- Rauschen,
- Störung von Anzeigen und Displays (Flackern, Verzerrungen, Schwarze Bildschirme),
- Störsignale,
- falsche Signale von Sensoren und Systemen,
- Verfälschung oder Störung von (digitalen) Daten,
- Verschiebung von Arbeitspunkten,
- Signaloffsets,
- Ansprechen von Schaltelementen,
- Störung von Programmabläufen,
- Auslösen nicht beabsichtigter Systemreaktionen (z.B. Bewegung von Aktuatoren),
- Neustart von Reglern und Prozessoren oder
- Zerstörung von Bauteilen

führen. Aufgrund der großen Vielfalt der beobachteten Effekte ist für eine systematische Analyse und Bewertung eine Klassifikation, die die wesentlichen Informationen und Aspekte in geeigneter Form zusammenfasst, unerlässlich. In [16, 17] schlägt Sabath eine Klassifikation hinsichtlich der Aspekte

¹ z.B. WiFi

Tabelle 3.1 Kategorisierung der Dauer eines Effekts oder Fehlerzustandes einer Systemkomponente

D_{Eff}	Dauer	Beschreibung
U	unbekannt	Die Funktionalität der betrachteten Systemkomponente war aufgrund von Effekten in anderen Baugruppen/Subsystemen nicht beobachtbar.
N	keine Effekt	Die Exposition führte zu keinen Effekten.
E	nur während Exposition	Beobachtete Effekte und Fehler traten nur während der Exposition mit der HPEM Umgebung auf. Unmittelbar nach Beendigung der Exposition war die uneingeschränkte Funktionalität der betrachteten Systemkomponente wieder verfügbar.
T	zeitweise	Effekte und Fehler waren auch nach dem Ende der Exposition vorhanden. Die betrachtete Systemkomponente war in der Lage die vollständige Funktionalität ohne Eingreifen eines Bedieners wieder herzustellen.
H	bis zum Eingreifen durch Bediener	Innerhalb üblicher Recoverzeiten konnte die betrachtete Systemkomponente ihre Funktionalität nicht mehr herstellen. Die Wiederherstellung der Funktionalität erforderte das Eingreifen (z.B. Reboot) eines Bedieners.
P	dauerhaft oder bis zum Austausch von Hard- oder Softwarekomponenten	Es wurden Hard- oder Softwarekomponenten zerstört. Der Effekt oder Fehlerzustand bleibt bis zum Austausch der betroffenen Komponenten bestehen.

- Physikalischer Wirkungsmechanismus,
- Dauer des Effekts bzw. Fehlerzustandes und
- Schwere bzw. Kritikalität der Auswirkungen auf Systemebene

vor. Die Klassifikation hinsichtlich der physikalischen Wirkmechanismen beinhaltet Informationen für die Identifikation von Schutz- und Härtingungsmaßnahmen. In Bezug auf die Beurteilung von Risiken ist diese Klassifikation von untergeordneter Bedeutung und wird daher hier nicht weiter betrachtet.

Die Dauer eines Effektes hat für die Beurteilung und Klassifikation des Risikos auf Systemebene von größerer Bedeutung. Hierbei steht weniger die absolute Dauer in Sekunden sondern vielmehr die relative Dauer bezogen auf Systemzyklen und die Expositionsdauer im Mittelpunkt des Interesses. Die aktuell gängige Skala ist in Tabelle 3.1 aufgetragen. Konnte ein Effekt beobachtet werden, wird dieser danach bewertet ob dieser nur während der Exposition durch eine elektromagnetische Umgebung hoher Leistung auftritt oder noch nach dem Ende dieser Exposition noch vorhanden ist. Insbesondere bei fernbedienten Systemelementen ist es für die Bewertung der Auswirkung eines Effektes entscheidend, ob das System die volle Funktionalität ohne Eingreifen des Bedien- oder Wartungspersonals wieder herstellen kann. Die höchste Stufe umfasst permanente Störungen, bei denen die Funktionalität nur durch Austausch zerstörter oder Beschädigter Hard- oder Softwarekomponenten wiedererlangt werden kann.

Im Anwendungsfall des EMI-Risikomanagementes für kritische Infrastrukturen ermöglicht die Klassifikation der Dauer eine Bewertung, welchen Einfluss die beobachteten Effekte auf die geforderte Verfügbarkeit der Infrastruktur haben oder ob die Dauer kürzer als tolerierbare Ausfallzeiten liegen. Die Dauer eines EMI-Effektes kann bei einem Test unmittelbar erfasst werden. Sie ermöglicht jedoch nur in eingeschränktem Maße Rückschlüsse auf Auswirkungen hinsichtlich der geforderten Funktionalität des betrachteten Systems (bzw. der betrachteten Infrastruktur).

Zur Bewertung der Schwere der Auswirkungen des durch eine EMI-Exposition hervorgerufenen Effektes in Bezug auf die Funktionalität des betrachteten Systems wurde die in Tabelle 3.2 aufgetragene Skala abgeleitet. Die Bewertung beobachteter Effekte nach dieser Skala erfordert neben EMI-Fachwissen auch Kenntnisse hinsichtlich der Systemarchitektur und ihrer Prozessabläufe. Die Bewertung der Schwere der Auswirkungen ist daher nur durch ein Expertenteam, bestehend aus EMI-Experten und Systemanalysten oder Systemdesignern, möglich.

Tabelle 3.2 Kategorisierung der Schwere der Auswirkung auf Systemebene

S	Schwere der Auswirkungen / Schadensausmaß	Definition / Kriterien
U	unbekannt	Die Auswirkungen auf Systemebene bzw. der Schaden konnten nicht ermittelt werden
0	keine	Auf Systemebene treten keine Auswirkungen oder Schäden auf
1	sehr gering	Sehr geringe / kaum wahrnehmbare Auswirkungen
2	gering	geringe Funktionstörungen von Anzeigen und Komfortsystemen
3		Funktionseinschränkungen von Bedien- und Komfortsystemen, Arbeiterschwernis
4	störend	Funktionseinschränkungen von wichtigen Bedienelementen und Anzeigen
5		Leistungseinschränkungen von Teilsystemen,
6		Ausfall von Teilsystemen, Erschwerung der Arbeitsbedingungen, wesentliche Funktionen können noch ausgeführt werden
7	hoch / kritisch	Gefahr von Verletzung, Umweltbelastungen,
8		Funktionsfähigkeit des Systems eingeschränkt
9	katastrophal	Umweltschäden, Lebensgefahr einzelner Personen, Gefahr schwerer Verletzungen
10		schwere Umweltschäden, Totalverlust des Systems, Gefährdung von Personengruppen (Lebensgefahr)

Bei der Bewertung von EMI-Effekten ist zu bedenken, dass neben der Schwere der Auswirkungen immer auch die Dauer der hervorgerufenen Effekte eine gewisse Bedeutung hat. So ist in vielen Anwendungen ein zeitlich begrenzter Ausfall von Teilsystemen oder Funktionalitäten tolerierbar. In anderen Anwendungen kann eine sehr kurze Störung wichtiger Teilsysteme (zum falschen Zeitpunkt) zu einem Unfall mit katastrophalen Auswirkungen führen. Als Beispiel sei hier nur die kurzfristige Störung des Bremssystems eines Autos bei der Annäherung an ein Stauende auf der Autobahn erwähnt.

3.2.2 Störmodell

Im Bereich der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) wird bei der Analyse von unbeabsichtigten Wechselwirkungen und Störungen auf das in Abbildung 3.3 dargestellte Beeinflussungsmodell zurückgegriffen. In Anlehnung an Modelle der Informationstechnik besteht das Grundprinzip des Beeinflussungsmodells aus einer Störquelle und einem Zielsystem (Störsenke) die über einen Kopplungspfad miteinander Verbunden sind. Die Störenergie wird durch die Störquelle erzeugt und breitet sich über den Störkanal zur Störsenke hin aus, in dem sie dann unter Umständen einen beobachtbaren Störeffekt hervorruft.

Dem Prinzip der Verträglichkeit folgend werden in der EMV die Analyse der Störquelle von der Störsenke durch Definition elektromagnetischer Umgebungen am Anfang und am Ende des Störkanals entkoppelt. Die elektromagnetische Umgebung am Anfang des Störkanals dient der Begrenzung der Störaussendung der Störquelle, die am Ende des Störkanals zur Spezifikation der Störfestigkeit der Störsenke.

Wie bereits im vorstehenden Kapitel dargelegt wurde, ist das Prinzip der Verträglichkeit nicht auf den Anwendungsfall der bewussten elektromagnetischen Beeinflussung anwendbar. Dennoch eignet sich das Beeinflussungsmodell als Grundstruktur um die physikalischen Wirkungsmechanismen

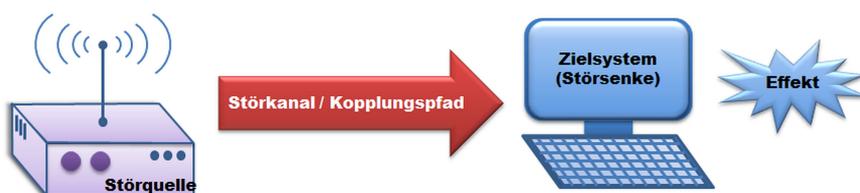


Abb. 3.3 Modell für die elektromagnetischen Störbeeinflussung

zu analysieren. So wurde in den letzten zwanzig Jahren die Störfestigkeit und Verwundbarkeit von elektrischen Systemen in einer Vielzahl von Studien [15, 66, 14, 67] als auch mögliche Einkopplungsmechanismen [68, 69, 12, 70] untersucht.

In Anlehnung an das Vorgehen im Bereich der EMV wurde in der Normung der Versuch unternommen eine generische elektromagnetische Umgebung zu definieren. Diese sollte die für die EMI-Effekte wesentlichen Eigenschaften der durch reale Störquellen erzeugten Umgebungen beinhalten. Als Ergebnis wurden in der ISO 61000-4-36 [20] für schmalbandige, breitbandige und ultrabreitbandige Störquellen die maximalen Amplituden durch existierende Störquellen erzeugten Felder zusammengetragen. Bei der Zusammenstellung dieser Werte wurde jedoch nicht berücksichtigt wie wahrscheinlich die zugehörigen Quellen in der Betriebsumgebung der zu schützenden Zielsysteme auftreten.

Ab Kapitel 6² dieser Arbeit wird die Spezifikation des Bedrohungsszenarios einschließlich der erzeugten elektromagnetischen Umgebung eingehender Betrachtung.

² Seite 67

Kapitel 4

Grundlagen des Risikomanagements

Zusammenfassung Die in der ISO 31000:2009 [38] beschriebenen allgemeinen Grundsätze und Vorgehensweisen des Risikomanagements werden vorgestellt und auf elektromagnetische Interaktionen übertragen. In diesem Rahmen werden insbesondere die Grundzüge, die Struktur und der Prozess des Risikomanagements betrachtet. Die theoretisch vorgestellten allgemeinen Grundzüge werden darüber hinaus in Bezug zur Behandlung des Risikos elektromagnetischer Wechselwirkungen im Rahmen des Entwurfs und der Nutzung eines elektronischen Systems gesetzt.

Unabhängig von dem jeweiligen Anwendungsbereich liegt dem Risikomanagement die Annahme zugrunde, dass das Risiko durch geeignete Maßnahmen in seiner Art, Umfang oder zeitlichem Auftreten beeinflusst - gesteuert - werden kann. Hierbei wird das Ziel verfolgt, die Wechselbeziehung zwischen Risiken (potentiellen Problemen oder Schaden) und Erfolg formalisiert zu erfassen und in anwendbare Prinzipien und Praktiken umzusetzen. In allen Anwendungsbereichen besteht die Aufgabe des Risikomanagements darin, Risiken zu identifizieren, anzusprechen und, so weit möglich, zu beseitigen, bevor sich das Risiko realisiert und ein Schaden entsteht. Das Risikomanagement umfasst daher sämtliche Maßnahmen zur systematischen Erkennung, Analyse, Bewertung, Überwachung, Kontrolle und Abwehr von Risiken einer Organisation, eines Prozesses oder eines technischen Systems.

Die allgemein geltenden Grundsätze und Verfahren des Risikomanagements sind in der Norm ISO 31000:2009 [38] beschrieben. Sie gliedert sich in die drei Bereiche:

- Grundsätze,
- Risikomanagementsystem und
- Risikomanagementprozess.

Da sich diese Gliederung für die allgemeine Darstellung des Risikomanagements bewährt hat, wurde sie als Grundstruktur dieses Kapitels übernommen.

4.1 Grundsätze des Risikomanagements

Die Norm ISO 31000:2009 führt 11 Grundsätze auf, die zur Sicherstellung eines wirksamen Risikomanagements von allen Organisationsebenen und allen Prozessbeteiligten beachtet und erfüllt werden müssen.

Grundsätze des Risikomanagements nach ISO 31000:2009 [38]:

- a. Risikomanagement schafft und schützt Werte.
- b. Risikomanagement ist integraler Bestandteil aller Organisationsprozesse.
- c. Risikomanagement ist Teil der Entscheidungsfindung.
- d. Risikomanagement betrachtet speziell Ungewissheiten.
- e. Risikomanagement ist systematisch, strukturiert und zeitgerecht.
- f. Risikomanagement stützt sich auf die besten verfügbaren Information.
- g. Risikomanagement ist angepasst und bedarfsgerecht.
- h. Risikomanagement berücksichtigt Human- und Kulturfaktoren.
- i. Risikomanagement ist transparent und umfassend.
- j. Risikomanagement ist dynamisch, iterativ und reagiert auf Veränderungen.
- k. Risikomanagement erleichtert kontinuierliche Verbesserungen der betrachteten Organisation und Prozesse.

Hinsichtlich der Anwendung auf ein elektronisches System, wie z.B. die generische Infrastruktur, lassen sich die Grundsätze in *Organisatorische Grundsätze* und *Methodische Grundsätze* unterteilen. Zu den *Organisatorische Grundsätze* zählen die Grundsätze a, b, c und k. Sie beschreiben die übergeordneten Ziele des Risikomanagements, das Risikomanagementsystem und dessen Einbindung in die Prozesse des Entwurfs und der Nutzung von Systemen.

4.1.1 Organisatorische Grundsätze

Risikomanagement schafft und schützt Werte

Das wesentliche Ziel des Risikomanagements ist es, bestehende Gefährdungen für das betrachtete System zu erkennen, den Grad der Gefährdung zu bewerten und durch geeignete Maßnahmen auf ein Minimum, bzw. ein tolerierbares Maß, zu reduzieren. Ein wirksames Risikomanagement trägt dazu bei, die **ungestörte Funktion des Systems sicherzustellen** und **Zerstörungen** von Teilsystemen, Baugruppen und Komponenten zu **verhindern**.

So besteht das Ziel des EMI-Risikomanagements in der Analyse, Bewertung und Abschwächung des Einflusses möglicher Störquellen, z.B. Störsender, auf die Funktion eines Zielsystemes, z.B. einen Steuerrechner eines Verkehrsleitsystems. Ergibt die Analyse, dass eine Störquelle im Zielsystem nicht tolerierbare Störungen, wie z.B. gleichzeitiges Grün-Schalten von Ampeln, hervorruft so gilt es das Zielsystem durch geeignete technische (Einbau von Filtern oder Schirmungen) und organisatorische Maßnahmen (Zugangsbeschränkungen) gegen die erkannten Störungen zu schützen und die fehlerfreie Funktion sicherzustellen.

Als mittelbare Folge werden darüber hinaus **Sekundärschäden**, z.B. durch Fehlfunktionen des Systems hervorgerufene **Gesundheitsschäden** von Bedienern, **Umweltschäden** oder die Beschädigung benachbarter Systeme, vermieden bzw. minimiert. Die Zusammenfassung dieser Ziele führt auf den Grundsatz *a - Risikomanagement schafft und schützt Werte*.

Risikomanagement ist integraler Bestandteil aller Organisationsprozesse

Der Grundsatz *b - Risikomanagement ist integraler Bestandteil aller Organisationsprozesse* beschreibt die Notwendigkeit der Einbindung des Risikomanagements in alle Phasen des Systementwurfs und der Nutzung. Würde das Risikomanagement als eigenständiger Prozessschritt in nur einer

Phase zu einem vorgegebenen Zeitpunkt durchgeführt, bestünde die Gefahr nicht alle Risiken zu erfassen, z.B. weil diese erst später auftreten, oder Maßnahmen nicht mehr umsetzen zu können.

Zur sicheren Erfassung aller auftretenden Risiken und bestehender Handlungsoptionen ist es notwendig mit dem Risikomanagement parallel zu den ersten Planungsschritten in der Konzeptionsphase eines Systems zu beginnen.

In der **Konzeptionsphase** wird das Risikomanagement nur konzeptionelle Risiken in sehr unscharfer und allgemeiner Form identifizieren können. In dieser Phase besteht jedoch die Chance Auswirkungen erkannter Risiken (Elektromagnetische Umgebung) durch konzeptionelle Festlegungen, z.B. Spezifikationen, zu Minimieren.

So können z.B. für einen neuen Steuerrechner eines Verkehrsleitsystems mögliche Aufstellungsorte, deren Zugänglichkeit und die elektromagnetische Umgebung erfasst und beschrieben werden. Da in der Konzeptionsphase der Aufbau und externe Verkabelung des Steuerrechners noch nicht geplant sind, ist eine Bestimmung eingekoppelter Störströme noch nicht möglich. Die potentiellen Aufstellungsorte lassen sich jedoch hinsichtlich ihrer elektromagnetischen Umgebung oder der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Störquellen bewerten. Diese Bewertung kann bei der Festlegung des Aufstellungsortes berücksichtigt werden.

Mit der Präzisierung des Systemkonzepts und der Detaillierung des Systemdesigns in den nachfolgenden Phasen des Systementwurfs (**Definitions-, Entwicklungs- und Fertigungsphase**) können auch immer detailliertere und genauere Risikoanalysen durchgeführt werden. Entscheidungen im Entwurfsprozess (z.B. Auswahl von Baugruppen, Festlegung von Leitungsverläufen bzw. Aufstellungsorte) können zum Auftreten neuer Risiken führen. Darüber hinaus ist die Wirksamkeit durchgeführter Maßnahmen zu evaluieren.

An dieser Stelle ist zu beachten, dass das Risikomanagement nicht am Ende der Fertigungsphase, mit der Übergabe des Systems an den Nutzer, endet. So sind zu Beginn der **Nutzung** die während des Systementwurfs gemachten Annahmen zu überprüfen und anhand der ermittelten Betriebsparameter das tatsächliche Risiko zu ermitteln und zu bewerten. Darüber hinaus darf nicht übersehen werden, dass sich während der Nutzung Betriebsprozesse, Betriebsparameter, Umgebungsbedingungen, das Nutzungsprofil aber auch die Bedrohungslage ändern können. Diese Änderungen können immer auch zu einer Änderung des Risikos führen. So können durch technische Anpassungen die Auswirkungen bestehender Gefährdungen verringert werden. Es besteht aber auch immer die Möglichkeit, dass technische Änderungen am System oder dessen Umgebung als auch der technische Fortschritt im Allgemeinen zu neuen Risiken führen.

Es ist unerlässlich in regelmäßigen Intervallen, spätestens jedoch nach Änderungen am System oder den Nutzungsprozessen, eine erneute Risikoanalyse durchzuführen.

Risikomanagement ist Teil der Entscheidungsfindung

Die im Rahmen des Risikomanagements gewonnenen Informationen über bestehende Gefährdungen, ihr Ausmaß, ihre Eintrittswahrscheinlichkeit sowie aufgezeigte Handlungsoptionen sind eine wesentliche Grundlage für Entscheidungen. So können z.B. die mit unterschiedlichen Designoptionen verbundenen Risiken als Entscheidungskriterium herangezogen werden. In einem anderen Fall kann das Aufzeigen eines nicht akzeptierbaren Risikos, z.B. eines Systemausfalls, durch eine durchgeführte Risikoanalyse Anlass für ein grundlegendes Überdenken des Systemkonzepts sein. Darüber hinaus lassen sich Maßnahmen anhand des durch sie behobenen Risikos oder aber ihres Einflusses

auf das Gesamtrisiko priorisieren. Die in den vorstehenden Beispielen verdeutlichte Erkenntnis ist im Grundsatz *c* - **Risikomanagement ist Teil der Entscheidungsfindung** festgehalten.

Risikomanagement erleichtert kontinuierliche Verbesserungen der betrachteten Organisation und Prozesse

Der letzte *Organisatorische Grundsatz* lautet *k* - **Risikomanagement erleichtert kontinuierliche Verbesserungen der betrachteten Organisation und Prozesse**. Die Beachtung der bisher dargelegten Grundsätze erfordert, dass Tätigkeiten des Risikomanagements kontinuierlich in allen Phasen des Entwurfs und der Nutzung eines elektrischen Systems durchgeführt werden. Hierdurch liefert das Risikomanagement in Bezug auf die betrachtete Gefährdung (z.B. elektromagnetische Beeinflussung) kontinuierlich Informationen über bestehende Risiken und somit Grundlagen für anstehende Entscheidungen.

Durch die kontinuierliche Durchführung des Risikomanagements werden bestehende Risiken neu bewertet, neue Risiken erkannt und Handlungsoptionen zur Risikominimierung identifiziert.

Zusammenfassend eröffnet die Implementierung eines kontinuierlichen Risikomanagementprozesses eine **zeitnahe Anpassung** auf Änderungen und eine **kontinuierliche Optimierung** des Systems einschließlich seiner Nutzung. Wie bereits erwähnt erfordert dies die Fortführung des Risikomanagements innerhalb der Nutzung, einschließlich der Entwicklung einer Risikomanagementstrategie und der Vorgabe von Risikokriterien.

Aus der Zuordnung der diskutierten Grundsätze zu der Klasse der *Organisatorischen Grundsätze* sollte nicht geschlossen werden, dass aus diesen keine Vorgaben hinsichtlich der anzuwendenden Methoden hervorgehen. Die Vorgabe, dass das Risikomanagement in allen Phasen des Systementwurfs und der Nutzung implementiert werden soll, folgt unmittelbar, dass für jede Phase Methoden verfügbar sein müssen, die auf die jeweiligen Rahmenbedingungen angepasst sind. Der Grundsatz *c* gibt klar vor, dass diese Methoden geeignet sein müssen um Entscheidungsgrundlagen zu liefern. Aus dem Grundsatz einer kontinuierlichen Implementierung des Risikomanagements lässt sich ableiten, dass die angewandten Methoden sowohl an die Entwurfs- und Nutzungsprozesse angepasst als auch aufeinander aufbauen sollten.

4.1.2 Methodische Grundsätze

In den *Methodischen Grundsätzen* sind weitere Anforderungen an und Rahmenbedingungen von Methoden des Risikomanagements als auch den Risikomanagementprozess beschreiben.

Risikomanagement betrachtet speziell Ungewissheiten

Die Norm ISO 31000:2009 [38] definiert den Begriff Risiko als Auswirkung der Ungewissheit auf Ziele. Der Grundsatz *d* - **Risikomanagement betrachtet speziell Ungewissheiten** greift unmittelbar diese wesentliche Eigenschaft des Risikos auf. Als unmittelbare Folge müssen die für das Risikomanagement eingesetzten Methoden über die Fähigkeit zur Behandlung von Ungewissheiten verfügen.

In dem betrachteten Anwendungsfall besteht das Risiko in der Möglichkeit negativer Auswirkungen (Schaden) als Folge einer elektromagnetischen Beeinflussung des betrachteten elektronischen Systems. Die Erfassung der im Anwendungsfall elektromagnetischer Beeinflussung eines elektronischen Systems erscheint zunächst trivial. Bei detaillierterer Betrachtung stellt sich dies jedoch als

vielschichtige Aufgabe heraus. Auf den ersten Blick bestehen im Bezug auf den Systementwurf Ungewissheiten in möglichen Parameterabweichungen von vorgegebenen Arbeitspunkten und Soll-Werten, Fertigungstoleranzen und Designvarianten. Diese Art der Ungewissheiten werden häufig mit statistischen Modellen (z.B. Mittelwert und Varianz oder Verteilungsdichtefunktionen) beschrieben. Bei eingehender Betrachtung der Modelle zeigt sich jedoch, dass die hierfür benötigten Parameter frühestens zum Ende der Entwicklungsphase verfügbar sind. In einer Vielzahl von Fällen werden diese jedoch nicht erfasst, bzw. dokumentiert und stehen somit für eine Modellbildung nicht zur Verfügung. Als Beispiel sei hier das Fehler- und Ausfallverhalten elektronischer Baugruppen gegenüber elektromagnetischen Beeinflussungen genannt. Die für die Modellbildung benötigten Werte, z.B. Ausfallsschwellen, werden derzeit weder erfasst noch in transparenter Weise gegenüber dem Nutzer dokumentiert. Die Modellierung ist hier auf die Durchführung spezieller Messreihen oder den Rückgriff auf Erfahrungswerte (oder Literaturwerte) angewiesen. Beide Vorgehensweisen beinhalten ihrerseits Ungewissheiten, die schwer in Zahlenwerten zu quantifizieren sind.

In den frühen Phasen des Systementwurfs (Konzeptphase und Definitionsphase) liegen nur Daten bezüglich der Funktionalität und des Systemkonzepts vor. Je nach Art des Systems sind ebenfalls keine Informationen hinsichtlich des Betriebsortes und dessen elektromagnetischer Umgebung bekannt. Trotz dieser erheblichen Ungewissheiten über das System, seiner Nutzung und seiner Umgebung ist es erforderlich auch in diesen frühen Entwurfsphasen erste (orientierende) Risikoanalysen durchzuführen. Hierfür werden Methoden benötigt, die eine Analyse des bestehenden Risikos ermöglichen und die bestehenden Unsicherheiten angemessen berücksichtigen.

Eine weitere Quelle der Unsicherheit besteht in der elektromagnetischen Umgebung. Während die Analysen des Systementwurfs vorgegebene Funktionen, funktionale Teilsysteme sowie spezifizierte Schnittstellen betrachten, muss die Analyse der elektromagnetischen Beeinflussung neben den spezifizierten Schnittstellen auch unbeabsichtigte und parasitäre Kopplungspfade mit berücksichtigen. Im Fall bewusster elektromagnetischer Beeinflussungen ist darüber hinaus die Störquelle als auch ihr Ort unbekannt. Der Umgang mit dieser Ungewissheit ist entscheidend für die Qualität und Aussagekraft des Risikomanagements.

Risikomanagement ist strukturiert, umfassend, bedarfs- und zeitgerecht

Trotz der bestehenden Ungewissheiten ist bei der Auswahl der Methoden der Grundsatz *e - Risikomanagement ist systematisch, strukturiert und zeitgerecht* zwingend zu beachten. Da das Risikomanagement Entscheidungen unterstützt, müssen die eingesetzten Methoden die benötigten Informationen zeitgerecht bereitstellen. Daten, die zum Zeitpunkt einer anstehenden Entscheidung nicht vorliegen führen zu Verzögerungen oder werden nicht berücksichtigt.

Das Ziel der Bereitstellung nutzbarer Entscheidungsgrundlagen liegt auch den beiden Grundsätzen *g - Risikomanagement ist angepasst und bedarfsgerecht*, sowie *i - Risikomanagement ist transparent und umfassend* zugrunde. Aus diesen Grundsätzen folgt, dass die angewandten Methoden den Randbedingungen und Bedürfnissen der jeweiligen Phase des Entwurfs- und Nutzungsprozesses angepasst sein müssen.

Angewandte Methoden müssen den Randbedingungen und Bedürfnissen der jeweiligen Phase des Entwurfs- und Nutzungsprozess angepasst sein.

Eine Erfassung und Auflistung möglicher EMI-Störquellen ist für die Konzeptionsphase ausreichend. In der Entwicklungsphase, in der Designvarianten bewertet werden müssen stellt eine reine Erfassung der Störquellen keine nutzbare Entscheidungsgrundlage dar. In dieser Phase des Systementwurfs werden vielmehr technische Detailanalysen benötigt. Demgegenüber haben die Bewertung von Designvarianten in der Nutzungsphase keinen Wert, da das elektrische System bereits gefertigt ist. In dieser Phase sind Bewertungen der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen gegen bestehende

EMI-Bedrohungen und der Abgleich des Risikoprofils mit aktuellen Zielvorgaben (Toleranzwerten) notwendig.

Die Bestimmung und Beurteilung von Risiken, insbesondere die hierauf aufbauende Diskussion über die Akzeptanz identifizierter Risiken stellt einen sehr komplexen und schwierigen Prozess dar. Deshalb wird im Grundsatz *i* gefordert, den Risikomanagementprozess und die hierbei eingesetzten Methoden für alle Beteiligten transparent und nachvollziehbar zu gestalten. Die Gestaltung eines transparenten und nachvollziehbaren Risikomanagementprozesses sind unabdingbare Voraussetzungen für die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse, ihrer Nutzbarkeit als Entscheidungsgrundlage, des Vertrauens in Aussagen zu bestehenden Risiken, z.B. der EMI Bedrohung eines Systems, und einer möglichen Risikoakzeptanz [71]. Hieraus folgt unmittelbar, dass neben den Ergebnissen (Risikoprofil, Risikozahl) auch die eingesetzten Methoden, gemachte Annahmen und die Qualität genutzter Parameter (z.B. Störschwellen) allen Beteiligten gegenüber transparent dargestellt werden müssen. Für das Risikomanagement bei elektromagnetischer Beeinflussung elektronischer Systeme bedeutet dies, dass **Schätzwerte, heuristische Erfahrungswerte** und **Annahmen** über das Systemverhalten als solche klar zu **kennzeichnen** sind. Nur so kann die Qualität, insbesondere die Verlässlichkeit, der gewonnenen Erkenntnisse nachvollzogen und berücksichtigt werden.

Risikomanagement berücksichtigt Human- und Kulturfaktoren

Im Rahmen des Risikomanagements eines technischen Systems erscheint der Grundsatz *h - Risikomanagement berücksichtigt Human- und Kulturfaktoren* zunächst etwas deplatziert. An dieser Stelle darf jedoch nicht vergessen werden, dass die Akzeptanz von Risiken neben den rein technischen Aspekten immer auch von der individuellen Wahrnehmung und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen beeinflusst wird. So wird in der heutigen Gesellschaft das Risiko durch einen Verkehrsunfall getötet zu werden (subjektiv) geringer bewertet, als einer Schädigung durch einen Unfall in einer kerntechnischen Anlage. Das Misstrauen gegenüber einigen technischen Bereichen geht zum Teil so weit, dass angewandte Methoden zur Analyse und Bewertung des Risikos in Frage gestellt werden. Neben diesen Kulturfaktoren bei der Bewertung des Risikos muss das Risikomanagement aber auch den Menschen als Risikoursache und Prozessbeteiligten berücksichtigen. In dem Anwendungsfall der bewussten elektromagnetischen Beeinflussung eines elektronischen Systems besteht die Risikoursache in der Absicht eines Angreifers das betrachtete System zu stören. Die Art und die Stärke der Störumgebung wird durch seine technischen Kenntnisse und Fähigkeiten als auch die ihm verfügbaren Ressourcen bestimmt. Schließlich beeinflussen Verhaltensweisen des Bedieners die Stärke der Kopplung des Systems mit der elektromagnetischen Umgebung (z.B. durch Öffnen oder Schließen von Türen, Fenstern oder Teilen der elektromagnetischen Schirmung) und die Standfestigkeit des Systems. Auch darf nicht vergessen werden, dass technisch wirksame Schutz- und Härtingsmaßnahmen nur implementiert werden können, wenn diese vom Nutzer des Systems (und zum Teil von seiner gesellschaftlichen Umgebung) akzeptiert werden. Maßnahmen, die aus kulturellen oder gesellschaftspolitischen Gründen auf Ablehnung stoßen, werden in der Praxis nicht umgesetzt werden können. Methoden eines wirkungsvollen Risikomanagements müssen auch solche, nichttechnischen, Aspekte mit berücksichtigen.

4.2 Struktur des Risikomanagements

Ein erfolgreiches Risikomanagement benötigt ein System das den organisatorischen Rahmen setzt. Dieses System dient der Umsetzung der in der Risikomanagementstrategie vorgegebenen Grundsätze und Ziele in allen Phasen des Entwurfs und der Nutzung eines elektrischen Systems als auch die Managementelemente der mit der Bewältigung von Risiken beauftragten Organisation. Die prinzipielle Struktur des Risikomanagements ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Als Bestandteil al-

ler Organisations- und Entscheidungsprozesse beschreibt es die Führungsaufgaben hinsichtlich der Aspekte Planung, Umsetzung, Überprüfung und Korrektur des Risikomanagementprozesses.

Strategie

Das Risikomanagement bei Elektromagnetischer Beeinflussung erstreckt sich auf alle Phasen des Entwurfs und der Nutzung eines elektrischen Systems. Hieraus folgt, dass im Regelfall mehrere Organisationen mit Aufgaben des Risikomanagements befasst sind. Da das Risiko einer elektromagnetischen Beeinflussung der Nutzungsphase des betrachteten Systems zuzuordnen ist, ist es Aufgabe des Nutzers, also der Organisation, Einrichtung, Institut, Behörde oder Unternehmen die das System betreibt und nutzt, das Risiko elektromagnetischer Beeinflussungen und dessen Folgen zu bewältigen. Im Sinne eines systematischen und durchgängigen Risikomanagements hat der Nutzer vor Beginn der Durchführung eine **Strategie** zu formulieren, in der

- die Ziele des Risikomanagements (z.B. Sicherstellung ausgesuchter Funktionalitäten, zu schützende Werte und Güter),
- die Methoden der Risikobeurteilung (Risikoidentifikation, -analyse und -bewertung),
- die Kriterien für die Bewertung und Einstufung von Risiken,
- die Vorgaben für die interne und externe Kommunikation über die identifizierten Risiken (Reporting),
- die Verantwortlichkeiten bei Risikoentscheidungen, sowie
- die erforderliche Qualifikationen, bzw. notwendige Fortbildungen des beteiligten Personals

festgelegt werden. Im Zuge der Durchführung ist diese Strategie kontinuierlich zu aktualisieren und anzupassen.

Die **Strategie** für das Risikomanagement muss vor Beginn der Durchführung durch den Nutzer formuliert werden.

Planung

Basierend auf der Strategie und dem sich hieraus ergebenden Gesamtauftrag beginnt der Zyklus des Risikomanagements mit der **Planung**. Diese umfasst die Verpflichtung der Projektleitung zur Umsetzung der Risikostrategie, die Definition der Rollen und Verantwortungen von Risikoeigner und Risikomanager sowie die Zuweisung und das Management der Ressourcen im Risikomanagement. Durch diese Vorgaben ist sicherzustellen, dass durch zeitgerechte und angemessene Bereitstellung von Informationen Aspekte des Risikomanagements in Entscheidungen (z.B. Festlegung des Systemdesigns) mit einbezogen werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass insbesondere in den Phasen des Systementwurfs die Verantwortung nicht beim Nutzer sondern beim Hersteller, bzw. bei komplexen Systemen oder Infrastrukturen beim Generalunternehmer, liegt. Mit der Beauftragung des



Abb. 4.1 Struktur des Risikomanagements (nach ISO 31000:2009 [38])

Herstellers sind daher zusätzlich zur technischen Spezifikation des Systems auch Vorgaben und Spezifikationen bezüglich des Risikomanagements festzuschreiben. Je nach Umfang und Bedeutung der beauftragten Tätigkeiten für das Risikomanagement können die Vorgaben von der Einrichtung eines eigenen (unterlagerten) Risikomanagementsystems, über durchzuführende Risikobeurteilungen bis hin zur Ermittlung und Dokumentation wesentlicher Parameter (z.B. Störfestigkeit) reichen. Im Zuge der Planung sind auch Kriterien für die Ermittlung und Dokumentation der Leistung des Risikomanagements festzulegen.

Umsetzung

In der **Umsetzung** wird der Risikomanagementprozess von allen am Entwurfs- und Nutzungsprozess beteiligten Organisationen als Teil ihrer Methoden und Prozesse implementiert. Die Umsetzung des Risikomanagements umfasst seine Einbindung in bestehende Entscheidungsprozesse, die Durchführung des Risikomanagementprozesses (siehe Unterkapitel 4.3) sowie die interne und externe Kommunikation bezüglich identifizierter Risiken. In dieser Phase des Risikomanagementsystems erfolgen die Risikobeurteilung, bestehend aus Risikoidentifizierung, -analyse und bewertung, und die Risikobewältigung. Abhängig von der Komplexität der Bedrohungslage als auch des betrachteten elektrischen Systems kann es notwendig sein den Risikomanagementprozess mehrfach zu durchlaufen und so eine iterative Risikominimierung durchzuführen.

Überprüfung und Korrektur

Die letzten beiden Schritte des Risikomanagements, **Überprüfung** und **Korrektur**, entsprechen den Schritten des Entscheidungsprozesses. In der Überprüfung wird die Wirksamkeit des Risikomanagements anhand der in der Planung festgelegten Leistungskriterien und des Risikomanagementplans durch Audits überprüft. Notwendige Korrekturen, erkannte Abweichungen sowie Anpassungen an Veränderungen der Rahmenbedingungen werden im Schritt Korrektur durchgeführt. [72]

4.3 Risikomanagementprozess

Im Risikomanagementprozess werden alle Aktivitäten zur Risikobeurteilung, Risikobewältigung und Risikokommunikation im Hinblick auf die Risikosteuerung und Risikoakzeptanz miteinander verknüpft. Er umfasst sowohl die Kernprozesse Risikobeurteilung und Risikobewältigung als auch die begleitenden Tätigkeiten der Zusammenhangserstellung, Risikokommunikation und Risikoüberwachung (siehe Abb. 4.2). Im Rahmen des Risikomanagementprozesses wird auch die Entscheidung getroffen, ob und unter welchen Bedingungen ein ermitteltes Risiko als vertretbar bzw. nicht vertretbar angesehen werden kann.

Bei der Betrachtung des Risikos der elektromagnetischen Beeinflussung eines elektronischen Systems sollte der Zyklus des Risikomanagementprozesses in jeder Phase des Systementwurfs und der Nutzung mindestens einmal durchlaufen werden. Im Sinne eines systematischen und umfassenden Prozesses sind die dokumentierten Ergebnisse eines früheren Prozessdurchlaufs als Startwerte zu nutzen. Dies bedeutet, dass bereits gewonnene Erkenntnisse nicht verworfen werden, sondern in einem erneuten Durchlauf (oder einer nachfolgenden Phase des Systementwurfs) überprüft (Anpassung an veränderte Randbedingungen) und auf der Basis neuerer Daten detailliert werden.

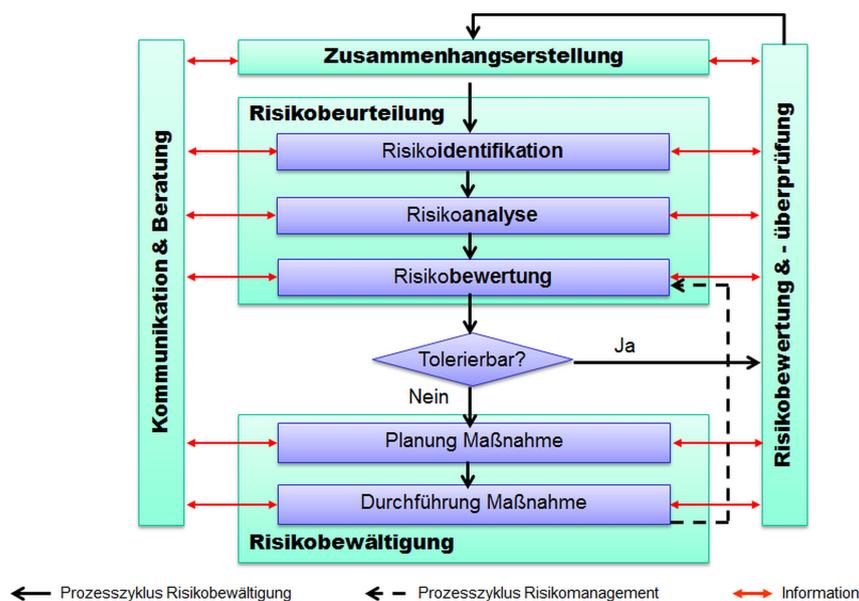


Abb. 4.2 Risikomanagementprozess (nach ISO 31000:2009 [38])

4.3.1 Zusammenhangserstellung

Die Erstellung des Zusammenhangs ist der erste Schritt des Risikomanagementprozess, in dem die Rahmenvorgaben definiert werden. Diese umfassen:

- die Zielvereinbarung (Definition der Ziele und Festlegung des Umfangs durchzuführender Untersuchungen),
- die Vorgaben für die Risikobeurteilung (Definition von Risikomerkmale, -bewertungsgrundlagen, Vorgehensweisen und Methoden),
- die Planung und Zuweisung von Personal und Ressourcen,
- die Systembeschreibung (Systemdokumentation, Schnittstellen, Umgebungsbedingungen, ...),
- Informationen über sicherheitsrelevante Systemanteile (Gefahrstoffe, sicherheitskritische Funktionen, Schutzeinrichtungen, technische und organisatorische Schutzmaßnahmen,...),
- Informationen über externe und interne organisatorische Zusammenhänge und Beziehungen (z.B. Verantwortlichkeiten, Beziehungen zum Entwurfs- und Nutzungsprozess).

Im Fall des EMI-Risikomanagements sind typische **Gesamtziele** die **Verbesserung der Härte** des Systems gegen EMI-Umgebungen, die **Verringerung von Ausfallzeiten** bzw. die **Erhöhung der Systemverfügbarkeit** und die Optimierung der Wartungskosten. Je nach Phase des Entwurfs- und Nutzungsprozess können weitere Ziele wie die Entscheidungsunterstützung, die Bewertung von Designalternativen oder die generelle Erfassung möglicher EMI-Gefährdungen (z.B. in der Konzept- oder der Nutzungsphase) hinzutreten. Im Falle umfangreicher und komplexer Systeme oder Infrastrukturen ist es sinnvoll, den Umfang der in einzelnen Phasen durchzuführenden Analysen und zu erreichenden Teilziele vorzugeben.

Im ersten Durchlauf des Risikomanagementzykluses sind die Rahmenvorgaben vollständig zu definieren. Bei erneuten Durchläufen sind die im jeweils vorherigen Durchlauf festgelegten Rahmenvorgaben hinsichtlich ihrer Gültigkeit und Aktualität hin zu überprüfen. Insbesondere die Systemdokumentation, Spezifikationen der Schnittstellen und funktionalen Blöcke (Baugruppen) und die Umgebungsbedingungen sind dem jeweils aktuellem Sachstand anzupassen.

Ingenieure und Systementwickler neigen dazu, ihre Aufmerksamkeit auf die stärker technisch geprägten Kernprozesse Risikobewertung und Risikobewältigung zu fokussieren. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass die, bei der Zusammenhangserstellung getroffenen, Festlegungen die Grundlage für den nachfolgenden Kernprozess der Risikobeurteilung bilden und somit wesentlich die Qualität und Zuverlässigkeit der Bewertungsergebnisse beeinflussen.

Ohne die Definition von Kriterien für die Risikobewertung (Akzeptanzkriterien) im Rahmen der Zusammenhangserstellung ist die Risikobeurteilung nicht möglich.

Als Beispiel seien hier die Systembeschreibung und die **Definition von Risikobewertungsgrundlagen** genannt. Eine fehlerhafte oder unvollständige Systembeschreibungen schränkt die Anwendbarkeit und Verlässlichkeit der Analyseergebnisse in erheblichem Umfang ein. Ohne die Definition von Risikobewertungsgrundlagen (z.B. Risikokriterien, Akzeptanzkriterien) kann zwar eine Risikoanalyse durchgeführt werden, eine systematische und transparente Bewertung der Ergebnisse ist in diesem Fall jedoch nicht möglich. Ohne diese ist jedoch der gesamte Risikomanagementprozess obsolet.

4.3.2 Risikobeurteilung

Nachdem die Rahmenvorgaben definiert wurden, folgt der erste Kernprozess, die Risikobeurteilung. Diese untergliedert sich in die drei Tätigkeiten:

- **Risikoidentifikation**,
- **Risikoanalyse** und
- **Risikobewertung**.

Je nach Phase des Entwurfs- und Nutzungsprozesses sind diese Tätigkeiten unterschiedlich umfangreich und untereinander gewichtet. So liegt bei einem ersten Durchlauf des Risikomanagementprozesses in der Konzeptphase der Schwerpunkt auf der Risikoidentifikation. Aufgrund noch nicht verfügbarer Daten über das Systemdesign als auch der Umgebungsbedingungen sind nur sehr grobe und tendenziöse Risikoanalysen und Risikobewertungen möglich. In nachfolgenden Durchläufen des Risikomanagementprozesses kann die Risikoidentifikation auf die Aktualisierung und Anpassung bereits erfasster Risiken beschränkt werden. Demgegenüber ermöglichen die, in späteren Entwurfsphasen in zunehmendem Maße verfügbaren, detaillierteren Daten bezüglich des Systemdesigns immer detailliertere Analysen und Bewertungen.

Risikoidentifikation

Die Risikobeurteilung startet mit der Risikoidentifikation, der Erfassung und Charakterisierung potentieller Risikoquellen (Gefährdungen) sowie der zugehörigen Koppelpfade und möglicher Einflussfaktoren.

Im Anwendungsfall des EMI-Risikomanagements besteht somit das Ziel der Risikoidentifikation in der Erzeugung einer Liste von (unbeabsichtigten oder beabsichtigten) **Störquellen**, einschließlich ihrer Parameter und **Auftrittswahrscheinlichkeiten**. Es ist sinnvoll, neben den Störquellen, auch mögliche EMI-Bedrohungsszenarien und **Umgebungsbedingungen** zu definieren. Hierbei ist zu beachten, dass eine möglichst vollständige Erfassung der Störquellen und ihrer Koppelpfade wesentlich für den Erfolg des Risikomanagements ist, da nicht erfasste Störquellen in den nachfolgenden Analysen keine Berücksichtigung finden.

Die Beschreibung der Störquellen über die generierte elektromagnetische Umgebung (das elektromagnetische Feld) sowie die Zusammenfassung ähnlicher bzw. vergleichbarer Störquellen zu EM-Umgebungskategorien (oder Störquellenklassen) verringert die Zahl der zu betrachtenden Störquellen und vereinfacht erheblich die vollständige Erfassung der Gefährdungen. Darüber hinaus eröffnet diese Vorgehensweise die Möglichkeit der Entkopplung der Risikobewertung von spezifischen Störquellen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass nach Abschluss der Risikobewertung das Risiko durch eine neue, noch nicht betrachtete Störquellen im Regelfall durch Zuordnung zu einer betrachteten EM-Umgebungskategorie bewertet werden kann. Erst wenn die neue Störquelle keiner EM-Umgebungskategorie zugeordnet werden kann ist die erneute Durchführung der Risikobewertung notwendig.

Risikoanalyse

In dem folgenden Schritt der Risikoanalyse werden die Auswirkungen der erfassten Gefährdungen auf das betrachtete System, insbesondere dessen Funktionalität und Leistungsparameter, ermittelt und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmt.

Hierzu ist zunächst die elektromagnetische Kopplung der Störquellen mit Systemkomponenten (z.B. Kabel, Leitungen, Baugruppen) und die in das System eingekoppelten Störgrößen (Strom, Spannung, Leistung) anhand geeigneter Modelle zu analysieren. In einer hierauf aufbauenden Analyse sind dann, anhand der bestimmten Störgrößen, mögliche Fehlfunktionen der betrachteten Systemkomponenten zu identifizieren. Mit Hilfe einer geeigneten Systembeschreibung (z.B. Blockmodell) sind abschließend die Folgen der Fehlfunktionen einzelner Systemkomponenten auf die Funktionalität und Leistungsparameter des Gesamtsystems zu ermitteln. Bei der Risikoanalyse ist zu beachten, dass Fehlerzustände nicht nur in Bezug auf ihre Qualität sondern immer auch hinsichtlich ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit analysiert werden müssen.

Der Umfang der Risikoanalyse, die Qualität der Ergebnisse als auch die eingesetzten Methoden und Modelle sind abhängig von der Phase des Entwurfs- und Nutzungsprozess und der in der jeweiligen Phase verfügbaren Informationen.

In der Konzeptionsphase sind in der Regel nur Systemkonzepte und Hauptfunktionen des Systems bekannt, so dass noch keine tiefgehenden Analysen der (noch unbekannt) elektromagnetischen Topologie oder des funktionalen Aufbaus des Systems durchgeführt werden. Für die in dieser Phase anstehenden konzeptionellen Entscheidungen und erster Vorgaben an die elektromagnetische Härte von Teilsystemen sind orientierende Analysen möglicher elektromagnetischer Umgebungsbedingungen und Bedrohungen ausreichend. Die zunehmende Detaillierung der verfügbaren Informationen in den nachfolgenden Phasen (Definitions-, Entwicklungs- und Fertigungsphase) gehen einher mit dem Bedarf an detaillierteren Analysen. So treten nach der Festlegung des Systemdesigns, in der späten Entwicklungsphase, neben der Bewertung von Designvarianten zunehmend Aspekte der Qualifikation des Systemverhaltens und Dokumentation bestehender Risiken in den Vordergrund. Aus dem Blickwinkel des Risikomanagements ist die Nutzungsphase gekennzeichnet durch die Bereitstellung von Daten für eine Risikoüberwachung und die Anpassung an veränderte Umgebungsbedingungen.

Aus dieser schemenhaften Übersicht lässt sich bereits ableiten, dass eine einzelne Methode nicht in der Lage sein wird, den jeweiligen Informationsbedürfnissen und Randbedingungen gerecht zu werden. In der Risikoanalyse werden daher verschiedene, auf die jeweiligen Randbedingungen angepasste Analysemethoden eingesetzt. Die Beschreibung dieser Verfahren ist thematischer Schwerpunkt des nachfolgenden Kapitels. Daher wird an dieser Stelle auf eine eingehende Betrachtung verzichtet.

Risikobewertung

Der Kernprozess der Risikobeurteilung schließt mit der Risikobewertung. Die wesentliche Aufgabe der Risikobewertung besteht in der Klassifizierung der identifizierten Risiken (einschließlich ihrer Auswirkungen und Auftretswahrscheinlichkeiten) in

- Risiken, die toleriert werden können,
- Risiken, die einer weiteren Analyse bedürfen und
- Risiken, die einer Risikomitigation (Vermeidung, Abschwächung, ...) unterzogen werden müssen.

Für Risiken, die einer Risikomitigation unterzogen werden müssen sollte die Risikobewertung zudem eine Bewertungsgröße (z.B. Stärke der Bedrohung) bereitstellen anhand derer die notwendigen Maßnahmen priorisiert werden können.

Grundlage der Klassifizierung der Risiken ist der Vergleich der, im Rahmen der Zusammenhangserstellung definierten, Risikokriterien mit den zugehörigen Merkmalen (Parameter) der identifizierten Risiken. Neben den vorgegebenen Risikokriterien sollten bei der Risikoklassifizierung aber auch übergeordnete Zusammenhänge und gesellschaftliche Aspekte, insbesondere die Toleranz der Gesellschaft gegenüber den auftretenden Risiken, berücksichtigt werden. Bei dem Vergleich von Risiken ist jedoch immer zu berücksichtigen, dass der Aussagegehalt der Risikobewertung von der eingesetzten Bewertungsmethodik und der jeweiligen Phase des Entwurfs- und Nutzungsprozess abhängt. Risikobewertungen sind nur unmittelbar miteinander vergleichbar, wenn sie in der selben Phase des Entwurfs- und Nutzungsprozesses und mit der selben Methode gewonnen wurden.

4.3.3 Risikobewältigung

Ergibt die Risikobewertung, dass ein identifiziertes Risiko in der vorliegenden Form nicht toleriert werden kann, ist der Kernprozess der Risikobewältigung zu initiieren. Die Risikobewältigung umfasst sämtliche (technische und organisatorische) Maßnahmen, die dazu geeignet sind, um:

- Risiken zu vermeiden,
- die Auftretswahrscheinlichkeit zu verringern,
- die Stärke bzw. Auswirkungen von Risiken zu vermindern (Risikoabschwächung),
- Risiken oder deren Auswirkungen in andere Teilsysteme zu verlagern oder
- die Auswirkungen von Risiken auf mehrere Teilsysteme zu verteilen.

Neben den Schritten Planung und Durchführung der Risikobewältigungsmaßnahmen beinhaltet der Prozess der Risikobewältigung immer auch eine erneute Durchführung der Schritte Risikoanalyse und Risikobewertung (siehe Abb. 4.2).

Im Anwendungsfall eines EMI-Risikomanagements für ein elektrisches System können die Maßnahmen zur Risikobewältigung sowohl auch den technischen Bereich, den organisatorischen Bereich als auch den Bereich des menschlichen Verhaltens beziehen. Grundsätzlich können diese Maßnahmen in jeder Phase des Entwurfs- und Nutzungszykluses geplant und umgesetzt werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die verfügbaren Freiheitsgrade zu späteren Phasen hin abnehmen. So besteht in der Konzeptions- und Definitionsphase immer die Möglichkeit durch Designvorgaben (z.B. über Leitungsverläufe) oder technische Schutzelemente (z.B. Spannungsbegrenzer) die Kopplung des Systems mit der elektromagnetischen Umgebung zu reduzieren oder dessen Auswirkungen zu begrenzen (Risikovermeidung). Demgegenüber sind derartige Maßnahmen in der späten Entwicklungsphase oder gar der Fertigungsphase gleichbedeutend mit einem umfassenden Redesign des Systems oder dessen Teilsysteme. In der Fertigungsphase besteht die Möglichkeit, Unsicherheiten der Risikobewertung durch technische Nachweise und Tests einzugrenzen und die betrachteten Risiken genauer zu bewerten.

Bei der Planung der Maßnahmen ist auf die Ausgewogenheit aller implementierten Maßnahmen zu achten. Insbesondere ist darauf zu achten, dass eine geplante Maßnahme zur Bewältigung eines

speziellen Risikos nicht zur Verstärkung eines anderen Risikos führt oder bereits implementierte Bewältigungsmaßnahmen ganz oder teilweise unwirksam macht.

Tritt der beim EMI-Risikomanagement der Fall ein, dass die implementierten Maßnahmen das betrachtete Risiko nicht auf ein tolerierbares Maß reduzieren und die Möglichkeiten für Maßnahmen zur Risikobewältigung ausgeschöpft sind, besteht die letzte Option darin, das betrachtete elektrische System nicht zu realisieren.

4.3.4 Risikoüberwachung und -kommunikation

Zur Sicherstellung der notwendigen Transparenz sind erkannte Risiken als auch die einzelnen Prozessschritte begleitend zum Durchlauf des Risikomanagementprozesses zu verfolgen und zu reviewen. Monitoring- und Reviewmaßnahmen sind im Zuge der Zusammenhangserstellung zu planen. Sie können in Abhängigkeit von der Komplexität des betrachteten Systems und vom übergeordneten Entwicklungsprozess periodisch oder anlassbezogen durchgeführt werden. Wesentliche Aspekte der Risikoüberwachung sind:

- die Sicherstellung, dass die durchgeführten Analysen und Bewertungen angemessen und umfassend sind,
- Sicherstellung, dass alle Risiken erfasst und in nachfolgenden Prozessschritten vollständig betrachtet werden,
- Gewinnung zusätzlicher Informationen für die Risikobewertung,
- Dokumentation und Aufbereitung von gemachten Erfahrungen für nachfolgende Durchläufe des Risikomanagementprozesses,
- Erkennen relevanter Änderungen der Rahmenvorgaben, insbesondere der Umgebungsbedingungen sowie der Vorgaben für die Risikobeurteilung.

Die Ergebnisse durchgeführter Risikoüberwachungsmaßnahmen (Reviews) sind zu dokumentieren, für nachfolgende Prozessschritte und Durchläufe des Risikomanagementprozesses aufzubereiten und in geeigneter Form zu kommunizieren.

Ziele der Risikokommunikation sind:

- transparente Information über die eingesetzten Methoden, Verfahren und Maßnahmen zur Risikobeurteilung und Risikobewältigung sowie
- eine objektive und vollständige Information über identifizierte und verbleibende Risiken.

4.4 Expertenteam

Das Risikomanagement, insbesondere die Risikobeurteilung, wird durch ein Expertenteam aus verschiedenen Fachgebieten durchgeführt. Unabhängig von der eingesetzten Methode erfolgt die Risikobeurteilung in turnusmäßigen Diskussionen, in die jeder Experte seine Sichtweise und Expertise einbringt.

Für die Durchführung eines EMI-Risikomanagements setzt sich das Experten aus den folgenden Experten zusammen:

- **Moderator oder Teamleiter**, leitet die Diskussionen und Koordiniert des Risikomanagementprozess
- **Systementwickler**, besitzt Detailkenntnisse zum Systemdesign, wesentliche Funktionsabläufe und dem Systemmodell
- **Nutzer**, besitzt Erfahrungen über die Umgebungsbedingungen und Nutzungssituationen
- **EMI oder EMV Experte**
- **Experten** zu weiteren wesentlichen Aspekten

Kapitel 5

Methoden der EMI-Risikobeurteilung

Zusammenfassung Zur Implementierung des Risikomanagementprozesses, insbesondere der Risikobeurteilung, wurde eine Vielzahl von Methoden für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche entwickelt. Dieses Kapitel dient der Vorstellung ausgesuchter Methoden zur Beurteilung von IEMI-Risiken. Neben einer Klassifizierung der Methoden und ihrer allgemeinen Vorgehensweise werden insbesondere die für eine Betrachtung elektromagnetischer Beeinflussungen notwendige Anpassungen und Erweiterungen vorgestellt. Zum Ende des Kapitels wird anhand einer vergleichenden Gegenüberstellung der betrachteten Methoden die Risikobewertung verallgemeinert und in acht Tätigkeitsschritte untergliedert.

Die im Kapitel 4 in allgemeiner Form vorgestellten Grundzüge des Risikomanagementprozesses sollen in diesem Kapitel weiter in Hinblick auf die EMI-Risikoanalyse eines elektrischen Systems konkretisiert werden. Hierzu werden die für die Bewertung des Risikos einer elektromagnetischen Beeinflussung des betrachteten Systems anwendbaren Analysemethoden vorgestellt. Wie bereits angesprochen wurde, ist keine der Methoden in der Lage, den jeweiligen Anforderungen der verschiedenen Phasen des Produktzyklusses von Systemen als auch allen drei Schritten der Risikobewertung gerecht zu werden. Für die Risikoanalyse wurden daher verschiedene, auf die jeweiligen Aufgabenstellungen und Randbedingungen angepassten, Analysemethoden entwickelt. Die einzelnen Analysemethoden betrachten jeweils unterschiedliche Aspekte der Risikobeurteilung, ergänzen sich zum Teil oder bauen sogar aufeinander auf. In ihrer Gesamtheit stellen sie die methodischen Werkzeuge zur Verfügung, die für eine umfassende Identifizierung, Analyse und Bewertung von Risiken benötigt werden. Eine Übersicht der gängigen Methoden ist im Annex B der IEC/ISO 31010:2009 aufgeführt [73]. Hinsichtlich der Betrachtung des Risikos einer elektromagnetischen Beeinflussung von Systemen sind teilweise Anpassungen der dargestellten Methoden notwendig. In diesem Kapitel werden daher die Grundzüge der Methoden, die im Rahmen einer EMI-Risikoanalyse eingesetzt werden können, als auch notwendige Anpassungen vorgestellt. Auf eine vollständige Beschreibung der Analysemethoden wurde zugunsten einer inhaltlich klaren Struktur verzichtet. Die Anwendung der vorgestellten Methoden wird im Anhang B am Beispiel einer fiktiven generischen Infrastruktur dargestellt.

5.1 Klassifikation der Methoden zur Risikobeurteilung

Die verfügbaren Methoden zur Risikoanalyse decken alle, im Rahmen eines Risikomanagementes auftretenden, Problemstellungen ab. Ihre methodische Vorgehensweise ist auf die Art der Problemstellung (z.B. Suche aller Ursachen eines Systemzustandes) angepasst. Die Wahl der geeigneten Methode kann durch die Untergliederung der Methoden in Klassen und Anwendungsbereiche systematisiert und vereinfacht werden.

Klassifizierung nach der Vorgehensweise

Nach ihrer grundlegenden Vorgehensweise können die Methoden zur Risikoanalyse unterteilt werden in:

1. **Deduktive Methoden:** Als deduktive oder Top-Down werden Methoden bezeichnet die die Wirkungsketten und funktionalen Zusammenhänge eines Prozesses oder Systems von einer Auswirkung auf Systemebene (z.B. Fehlfunktion, Ausfall des Systems) auf dessen Ursachen hin untersucht. Deduktive Methoden sind geeignet um alle Ursachen einer Auswirkung zu identifizieren und zu analysieren. Die Fehlerbaumanalyse (eng.: Fault Tree Analysis, FTA) ist eine häufig eingesetzte deduktive Methode.

Deduktive Methoden sind geeignet um alle Ursachen einer Auswirkung / eines Fehlerzustandes zu identifizieren und zu analysieren.

2. **Induktive Methoden:** Induktive oder Bottom-Up Methoden analysieren die Wirkungsketten und funktionalen Zusammenhänge in Wirkrichtung, von einer Ursache (z.B. Bauteilfehler, Elektromagnetische Störung) ausgehend schrittweise auf dessen Auswirkung bzw. Konsequenz auf Systemebene hin. Hierdurch sind sie befähigt alle Konsequenzen einer gegebenen (Fehler)Ursache zu erkennen und zu analysieren. Beispiele für induktive Methoden sind die Ereignisbaumanalyse¹ (eng. Event Tree Analysis, ETA), die Fault Hazard Analyse (FHA) und die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse² (engl.: Failure Mode and Effects Analysis, FMEA).

Induktive Methoden sind geeignet um alle Auswirkungen einer Ursache zu identifizieren und zu analysieren.

3. **Hybride Methoden:** Im Bereich der Sicherheits- und Zuverlässigkeitstechnik hat sich zur ganzheitlichen Erfassung und Analyse von komplexen Risikostrukturen ein hybrider Ansatz durchgesetzt, der deduktive und induktive Analyseprinzipien zusammenführt. Der Grundgedanke dieses Ansatzes basiert auf der Annahme, dass bei mehrmaliger alternierender Anwendung einer induktiven und deduktiven Methode alle vorhandenen Ursachen und deren Folgen erkannt und in Beziehung gebracht werden können.

Bei der Anwendung induktiver und deduktiver Methoden, als auch ihrer Mischformen, ist zu beachten, dass die Analyse immer einen bekannten Startpunkt benötigt. Bei einer deduktiven Methode ist dies eine bekannte Auswirkung auf Systemebene (Folge), bei den induktiven Methoden eine Ursache. Ohne einen solchen Ausgangspunkt kann keines der beiden Analyseprinzipien erfolgreich durchgeführt werden. In der praktischen Anwendung sind die ungewollte Auswirkungen (eines Systemfehlers oder einer Systemstörung) in der Regel durch die Anwendung oder

¹ siehe Abschnitt 5.3.5, Seite 56

² siehe Abschnitt 5.3.4, Seite 54

die Systemspezifikation (z.B. notwendige Funktionen, Mindestleistung). Die Identifikation aller möglichen Ursachen ist in der Praxis eine Herausforderung, die ein erhebliches Maß an Systemkenntnis erfordert. Der im Bereich der Sicherheits- und Zuverlässigkeitstechnik eingesetzte **hybride Ansatz** löst diese Problemstellung dadurch, dass zunächst mit Hilfe einer deduktiven Methode die Ursachen gegebener Folgen identifiziert werden. Ein hierzu alternativer Ansatz ist die Kombination induktiver Methoden, mit Verfahren zur Identifikation möglicher Ursachen.

Hybride Methoden wenden alternierend deduktive und induktive Methoden an, um alle Ursachen und deren Konsequenzen zu identifizieren und zu analysieren.

4. **Explorative Methoden:** Eine weitere Klasse von Analysemethoden sind explorative Methoden, die jede einzelne Komponente eines Systems, dessen Systemzustände und Prozessabläufe betrachten und auf mögliche Abweichungen vom ursprünglich erdachten Zustand bzw. Ablauf hin überprüfen. Für die dabei aufgedeckten Gefahren werden in einem weiteren Analyseschritt mögliche Ursachen und Folgen bestimmt. Das primäre Ziel explorativer Methoden ist es, möglichst alle denkbaren Gefahrenzustände, ihre Ursachen und Folgen zu finden. Eine wichtige Grundvoraussetzung für die Anwendung explorativer Methoden ist, dass bereits ein funktionales Modell (Ablaufmodell) des zu betrachtenden Systems oder Prozesses existiert. Die Hazard and Operability Study³ (HAZOP) ist ein Beispiel für explorative Methoden.

Explorative Methoden analysieren die Konsequenzen möglicher Abweichungen von Prozessparametern.

5. **Numerische Analysen:** In zunehmendem Umfang werden für die Risikoanalyse auch numerische Modelle und hierauf aufbauende numerische Analysen für die Risikoanalyse eingesetzt. Die Analyse der elektromagnetischen Feldkopplung mittels Momentenmethode oder die Betrachtung der Fehlerausbreitung mittels logischer Verhaltensmodelle sind Beispiele hierfür. Unsicherheiten und Parametervariationen werden im Rahmen numerischer Analysen durch Monte-Carlo-Simulation (sehr häufig durchgeführte Zufallssimulationen) oder geeigneter Approximationen (Generalized Polynomial Chaos (gPC), Wiener-Askey Polynominal Expansion) berücksichtigt. Da die numerischen Modelle die physikalische bzw. logische Wirkbeziehung abbilden sind sie für deduktive Analysen ungeeignet. In der Literatur werden sie daher oftmals als induktive oder auch als explorative Methoden klassifiziert. Bei dieser Klassifizierung ist zu bedenken, dass numerische Methoden von ihrem Ansatz her geeignet sind Systemzustände und Prozessabläufe unabhängig von vorhandenen Fehlerzuständen analysieren zu können. In Bezug auf elektromagnetische Beeinflussungen bieten numerische Methoden die Möglichkeit die Wechselwirkung eines betrachteten Systems mit verschiedenen elektromagnetischen Umgebungen zu betrachten und hierdurch hervorgerufene Systemstörungen zu erkennen. Diesem Gedankengang folgend, werden die numerischen Methoden im Rahmen dieser Arbeit der Gruppe der explorativen Methoden zugeordnet.

Methoden der EMI-Risikoanalyse: Im Rahmen der EMI-Risikoanalyse eines elektrischen Systems werden nur Systemstörungen und Fehlerzustände die durch Wechselwirkungen des Systems mit seiner elektromagnetischen Umgebung⁴ hervorgerufen werden betrachtet. Als unmittelbare Folge ist die elektromagnetische Umgebung bzw. deren Einkopplung in das System als mögliche Fehlerursache bekannt. Demgegenüber sind deren Auswirkungen auf Systemebene weitgehend unbekannt.

³ siehe Abschnitt 5.3.2, Seite 50

⁴ Im Allgemeinen werden bei der EMI-Risikoanalyse sowohl Feldkopplungen als auch leitungsgeführte Einkopplungen in das System berücksichtigt. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Betrachtung der Wechselwirkungen des Systems mit dem umgebenden elektromagnetischen Feld, einschließlich dessen Quellen.

Auch ist davon auszugehen, dass ungewollte Auswirkungen, z.B. Ausfall einer Baugruppe, Ursachen aufweisen kann, die außerhalb des Bereiches der elektromagnetischen Beeinflussung liegen (z.B. Fehlerhafte Bauelemente). Somit fehlt für die Anwendung deduktiver Methoden nicht nur der notwendige Ausgangspunkt, sie sind in Bezug auf die Aufgabenstellung nicht zielführend.

Durch die Vorgabe der elektromagnetischen Umwelt als zu betrachtende Fehlerursache sind induktive Methoden sehr gut für die EMI-Risikoanalyse geeignet.

Da durch die Vorgabe der elektromagnetischen Umwelt als zu betrachtende Fehlerursache induktive und explorative Methoden sehr gut für die EMI-Risikoanalyse geeignet sind, werden im Folgenden nur Methoden dieser beiden Klassen eingehender betrachtet.

Klassifizierung nach dem Anwendungsbereich

Eine weitere Klassifizierung unterteilt die Methoden zur Risikoanalyse nach ihrem Anwendungsbereich innerhalb des Risikoanalyseprozess [73].

- Methode zur **Risikoidentifikation**
- Methode zur **Risikoanalyse - Auswirkung** / Konsequenz
- Methode zur **Risikoanalyse - Häufigkeit** / Wahrscheinlichkeit
- Methode zur **Risikoanalyse - Stärke** / Auswirkung
- Methode zur **Risikobewertung**

Anhand dieses Klassifikationsschemas werden nachfolgend ausgesuchte Methoden für die Risikobeurteilung vorgestellt und hinsichtlich ihrer Anwendung auf die Beurteilung von elektromagnetischen Wechselwirkungen bewertet.

5.2 Methoden zur Risikoidentifikation

5.2.1 Preliminary Hazard List (PHL)

Die Preliminary Hazard List (PHL), auch vorläufige Gefahrenliste, ist eine induktive Methode zur **strukturierten Identifizierung möglicher Gefahrenquellen**. Grundgedanke der PHL ist die Auflistung aller möglichen Gefährdungen, von denen ein Risiko in Bezug auf die Zielerreichung⁵ ausgehen könnte. Die PHL kann bereits in den ersten Phasen des Produktlebenszykluses eines Systems erstellt werden, um frühzeitig mögliche Risiken bzw. Ansatzpunkte für detailliertere Risikoanalysen zu erkennen. In einer Vielzahl praktischer Anwendungen ist die PHL die Vorstufe zu einer Preliminary Hazard Analysis (PHA).

Im FAA System Safety Handbook [74] wird die Erstellung einer PHL als initiale Aktivität des Design und Pre-Design System Safety Engineering vorgegeben. In Bezug auf die EMI-Risikoanalyse sind in der Literatur keine Hinweise einer Anwendung der PHL zur Identifizierung möglicher Gefährdungen zu finden.

⁵ z.B. Funktionalität eines Systems

Durchführung

1. **Erfassung potentieller Störquellen:** Als induktive Methode setzt die Preliminary Hazard List bei der Ursache eines Risikos an und beginnt mit der **systematischen Erfassung aller möglichen Gefährdungsursachen**. Im Anwendungsfall der EMI-Risikoanalyse bedeutet dies die **Auflistung aller EMI-Quellen**, die in der Umgebung des betrachteten Systems vorkommen könnten, sowie **mögliche Orte ihres Auftretens**. Zur eindeutigen Identifizierung wird jeder EMI-Quelle eine Referenznummer zugewiesen. Um die EMI-Risikoanalyse umfassend zu gestalten, und nicht zu früh auf die Betrachtung einzelner spezieller EMI-Quellen einzuengen, empfiehlt es sich die EMI-Quellen zu Klassen zusammenzufassen und in der PHL die jeweiligen Quellenklassen zu betrachten. Die Klassifizierung der EMI-Quellen ist in Kapitel 8⁶ beschrieben. Auch in Bezug auf die Angabe möglicher Orte der EMI-Quellen ist die Angabe ausgesuchter Orte nur dann sinnvoll, wenn diese durch besondere Merkmale (z.B. besondere Zugänglichkeit, ausgesuchte Lage) gekennzeichnet ist. Im Allgemeinen, besonders in den frühen Phasen des Systemlebenszykluses, ist es zielführender die möglichen Orte als räumliche Bereiche (z.B. Parkplatz) anzugeben.
2. **Erfassung möglicher Koppelpfade:** Wenn Informationen über das Design und Aufstellungsorte des betrachteten Zielsystems vorliegen, werden in einem zweiten Schritt zu jeder EMI-Gefährdung **mögliche Koppelpfade** und hierdurch **betroffene Teilsysteme** erfasst. Basierend auf den verfügbaren Daten sind die Koppelpfade so zu spezifizieren, dass in einer nachfolgenden Analyse der Koppelpfad durch Abschätzungen (z.B. Dämpfung) oder numerische Analysen bewertet werden kann.
3. **Abschätzung möglicher Effekte:** Im dritten Arbeitsschritt sind für die betroffenen Teilsysteme durch die IEMI-Exposition betroffene Betriebszustände bzw. Systemzustände zu erfassen und abzuschätzen welche Effekte hierbei auftreten könnten.
4. **Dokumentation:** Zum Abschluss der PHL sind die Ergebnisse strukturiert, z.B. in einem **PHL Arbeitsblatt**, schriftlich zu dokumentieren. Ein Beispiel solch eines Arbeitsblattes ist in Tabelle 5.1 zu sehen. Bei der Anwendung der PHL ist zu beachten, dass in der Konzeptions- und der Definitionsphase die für eine vollständige Befüllung der PHL benötigten Daten bekannt und verfügbar sind. In diesen Fällen ist dennoch sinnvoll die verfügbaren Daten in der PHL einzutragen, da nicht jede nachfolgende Analyse den vollen Datensatz benötigt. Darüber hinaus können erfasste IEMI-Gefährdungen im Rahmen des Systementwurfs (z.B. im Rahmen der Spezifikation der elektromagnetischen Umwelt) berücksichtigt und hierdurch frühzeitig abgeschwächt oder eliminiert werden. Durch die Dokumentation erkannter IEMI-Gefährdungen wird auch sicher gestellt, dass diese bei der erneuten Anwendung der PHL in einer späteren Phase des Produktlebenszykluses betrachtet und die zugehörigen Datensätze vervollständigt werden.

Die Durchführung der PHL ist im Anhang B.1 anhand der Identifizierung möglicher IEMI-Gefährdungen für die im Gebäude 2A installierten Systemteile einer fiktiven Infrastruktur eingehender erläutert.

Tabelle 5.1 Beispiel eines PHL Arbeitsblattes

Ref. Nr.	EMI-Gefährdung/ EMI-Quelle	möglicher Ort	möglicher Koppelpfad	betroffenes Teilsystem	gefährdete Betriebsphase, Systemzustand	Be- möglicher Ef- fekt

⁶ Seite 133

Tabelle 5.2 Bewertung der Preliminary Hazard List (PHL)

Name	Preliminary Hazard List (PHL)				
Verfahren	induktiv +	deduktiv	explorativ		
Anwendung	Identifikation ++	Analyse Auswirkung	Analyse Stärke	Analyse Häufigkeit	Bewertung
Phase	Konzeptphase +	Definitionsphase +	Entwurfsphase +	Fertigungsphase +	Betriebsphase +

+: anwendbar; ++: sehr gut anwendbar

5.2.2 Preliminary Hazard Analysis (PHA)

Die Preliminary Hazard Analysis (PHA), auch vorläufige Untersuchung von Gefährdungen, ist eine induktive Methode zur **heuristischen Bewertung** identifizierter Gefährdungen und Risiken. Sie setzt auf die PHL auf und bewertet die identifizierten Risiken qualitativ hinsichtlich möglicher Auswirkungen, deren Stärke (Schwere) und Häufigkeit, sowie möglicher Ansatzpunkte für Maßnahmen zur Risikobewältigung. Aufgrund der methodischen Überlappung beider Methoden werden sie in der Literatur oftmals auch unter dem Begriff PHA zusammengefasst, wobei die PHL dann als erste Stufe der PHA bezeichnet wird.

Durchführung

1. **Erfassung potentieller Störquellen:** Wie die PHL, beginnt auch die PHA mit der Erfassung der potentiellen Gefährdungen. Im Rahmen der EMI-Risikoanalyse sind in diesem ersten Anayneschritt potentielle Störquellen (Quellen-Klassen) einschließlich möglicher Orte ihres Auftretens zu erfassen. Im Rahmen der PHA sind die Quellen-Klassen detaillierter zu spezifizieren als für eine PHL. Daher ist aus den bekannten charakteristischen Parametern der Störquellen-Klassen (z.B. Baugröße, Signalform, Frequenzbereich) mit Hilfe bekannter Daten, heuristischer Formeln⁷, Erfahrungswerte oder generischer Literaturwerte, die Stärke des abgestrahlten Feldes abzuschätzen. In analoger Weise sind dann die Auftrittshäufigkeit für die möglichen Orte der Störquellen zu bestimmen.
2. **Erfassung möglicher Koppelpfade:** In dem zweiten Analyseschritt ist zunächst das betrachtete Zielsystem zu spezifizieren. Hierbei sind insbesondere die vorhandenen Systembeschreibungen (z.B. Funktionalitäten, Teilsysteme, Aufstellungsorte, Systemzustände, eingesetzte Technologie) zu dokumentieren. Aus diesen Informationen und den möglichen Orten des Auftretens der potentiellen Störquellen sind **mögliche Koppelpfade** und hierdurch **betroffene Teilsysteme** zu identifizieren. Basierend auf den verfügbaren Daten sind die Koppelpfade so zu spezifizieren, dass in dem nachfolgenden Analyseschritt der Koppelpfad durch Abschätzungen (z.B. Dämpfung) oder numerische Analysen bewertet werden kann.
3. **Gewichtung möglicher Koppelpfade:** Für die in dem vorherigen Schritt (bzw. im Rahmen einer PHL) erfassten Koppelpfade sind die zugehörige Kopplungsdämpfung abzuschätzen. Je nach Phase des Produktlebenszykluses kann die Störkopplungsdämpfung über heuristische Daten oder Schätzformeln (Konzept- und Definitionsphase), mit Hilfe numerischer Modelle (Entwicklungs- und Fertigungsphase) oder messtechnisch (Fertigungs- und Betriebsphase) er-

⁷ Im Kapitel 8 (ab Seite 133) sind zur Einteilung und Charakterisierung möglicher Störquellen heuristische Formeln für die Abschätzung der Stärke einer EMI-Quelle und ihre Auftrittswahrscheinlichkeit angegeben.

Tabelle 5.4 Bewertung PHA

Name	Preliminary Hazard Analysis (PHA)				
Verfahren	induktiv +	deduktiv	explorativ		
Anwendung	Identifikation ++	Analyse Auswirkung +	Analyse Stärke	Analyse Häufigkeit	Bewertung
Phase	Konzeptphase	Definitionsphase +	Entwurfsphase +	Fertigungsphase +	Betriebsphase +

+: anwendbar; ++: sehr gut anwendbar

beschränkt werden. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass aufgrund der unvollständigen Datenbasis in Kombination mit heuristischen Bewertungen die PHA nur eine vorläufige Bewertung mit geringem Detaillierungsgard liefert, die darüber hinaus unvollständig sein kann.

Die Anwendung der hier abstrakt vorgestellten Durchführung der PHA ist im Anhang B.2 anhand der Bewertung der möglichen IEMI-Gefährdung für die im Gebäude 2A installierten Systemteile einer fiktiven Infrastruktur eingehender erläutert.

5.3 Methoden zur Risikoanalyse

5.3.1 Scenario Analysis

Die Methode der Scenario Analysis ist eine **explorative Methode** die die Betrachtung von Risiken und Gefährdungen möglicher zukünftiger Entwicklungen, einschließlich der Analyse ihrer Auswirkungen, ermöglicht [73]. Vor dem Hintergrund der wesentlichen technologischen und gesellschaftlichen Veränderungen der letzten 50 Jahre zeigt sich die Stärke der Scenario Analysis. Die Methode ist zwar nicht in der Lage, die Eintrittswahrscheinlichkeit künftiger Änderungen vorherzusagen, mit ihrer Hilfe können jedoch deren Auswirkungen frühzeitig in Risikobetrachtungen mit einbezogen und Maßnahmen zur Risikovermeidung und -bewältigung entwickelt und implementiert werden.

Durchführung

1. **Vorbereitung:** In dem initialen Arbeitsschritt der Scenario Analysis werden
 - die bestehende **IST-Situation analysiert**,
 - das zu analysierenden **Systems (Gestaltungsfeld)** spezifiziert und
 - die zu berücksichtigenden **Entwicklungstendenzen (Szenariofeld) abgegrenzt**.
2. **Analyse:** Im zweiten Arbeitsschritt, der Analyse, werden technologische und organisatorische **Einflussfaktoren** (Technologien, Betriebs- und Umgebungsbedingungen), die wahrscheinlich das künftige **Betriebsverhalten** des betrachtete Zielsystem beeinflussen, identifiziert und Informationen über deren mögliche Entwicklungstendenzen gesammelt. Im Anwendungsfall EMI-Risikoanalyse sind hier insbesondere technologischer Trends bei der Entwicklung und Verfügbarkeit von EMI-Störquellen als auch Tendenzen hinsichtlich der Störempfindlichkeit des betrachteten Zielsystems zu betrachten.
Die wesentliche Herausforderung in diesem Arbeitsschritt besteht in der Identifikation und Vorhersage von Entwicklungen und technologischen Trends. In Bezug auf technologische Entwick-

lungen stellen von Fachverbänden veröffentlichte Roadmaps nützliche Informationsquellen dar. Häufig angewandte Methoden zur Identifikation von Trends sind Experteninterviews, Brainstorming und Visual-Roadmapping [75].

Hinsichtlich des Erfolges, der Objektivität und Vollständigkeit der Scenario Analysis stellt die Analyse einen **kritischen Arbeitsschritt** dar. Da hier harte Kriterien fehlen können einzelne Mitglieder des Expertenteams grundsätzlich Einfluß auf die Auswahl der Einflussfaktoren sowie der Bewertung ihrer Auswirkungen auf das Betriebsverhalten des Zielsystems nehmen.

3. **Vorhersage:** Der Arbeitsschritt der Vorhersage beginnt mit der Operationalisierung der im vorherigen Arbeitsschritt identifizierten Einflussfaktoren. Anschließend wird mit Hilfe der ausgewählten Erhebungsmethode die IST-Situation bewertet und mögliche Projektionen (Entwicklungsmöglichkeiten) entwickelt. Anschließend werden die Einflussfaktoren hinsichtlich der Kriterien Bedeutung und Ungewissheit in Beziehung zueinander gesetzt und mögliche Vernetzungen identifiziert. Die nachfolgenden Analyseschritte fokussieren sich auf die Einflussfaktoren mit der größten Bedeutung und der höchsten Unsicherheit.
4. **Entwicklung Szenarien:** Anhand der gewichteten Einflussfaktoren und Tendenzen werden nun mögliche Szenarien entwickelt. Die entwickelten Szenarien werden durch Ausschluss inkonsistenter Szenarien, Zusammenfassen ähnlicher Szenarien sowie der Auswahl bedeutsamer Szenarien verdichtet. Mit dem Ziel einer umfassenden Analyse bietet es sich hierbei an, neben dem auf den wahrscheinlichsten Entwicklungen basierenden **Regel-Szenario** auch ein **Bestes-Szenario** unter Berücksichtigung hauptsächlich positiver Entwicklungen sowie ein **Schlechtestes-Szenario** unter Berücksichtigung hauptsächlich negativer Entwicklungen auszuarbeiten. In die ausgearbeiteten Szenarien werden nun EMI-Störquellen eingebracht, das Risiko hierdurch hervorgerufener Störbeeinflussungen abgeschätzt und bewertet und mögliche Gegenmaßnahmen erarbeitet. In Abhängigkeit des Umfangs und Detaillierungsgrad vorhandener Daten (Informationen über das System bzw. Parameter des Szenarios) kann die Abschätzung und Bewertung des Risikos von Störbeeinflussungen mit Hilfe generischer Modelle, analytischer Näherungen oder numerischer Modelle erfolgen. Sobald ein Vorentwurf des Systems, einschließlich seiner Prozessabläufe, verfügbar ist, kann für die Risikobetrachtung auch eine HAZOP Studie⁸ durchgeführt werden.
5. **Transfer:** Für jedes der verbleibenden Szenare werden die Auswirkungen auf das Verhalten des Zielsystems unter angenommener IEMI-Exposition prognostiziert und Strategien zu Risikomitigation beim Eintritt bestimmter Entwicklungen erarbeitet.
6. **Dokumentation:** Zum Anschluss der Scenario Analysis werden die Ergebnisse in geeigneter Form dokumentiert.

Tabelle 5.5 Bewertung Scenario Analysis

Name	Scenario Analysis				
Verfahren	induktiv	deduktiv	explorativ +		
Anwendung	Identifikation ++	Analyse Auswirkung ++	Analyse Stärke +	Analyse Häufigkeit +	Bewertung +
Phase	Konzeptphase	Definitionsphase	Entwurfsphase +	Fertigungsphase +	Betriebsphase +

+: anwendbar; ++: sehr gut anwendbar

⁸ siehe Abschnitt 5.3.2

Bewertung

Die Scenario Analyse kann in allen Schritten der Risikobeurteilung (Abschnitt 4.3) eingesetzt werden. Im Kontext der EMI-Risikoanalyse kann die Scenario Analysis bereits in den frühen Phasen des Produktzyklusses (z.B. in der Konzeptionsphase) angewandt werden, in denen nur wenige Detailinformationen über das zu betrachtende System und seine Betriebsumgebung bekannt sind. Darüber hinaus ist sie geeignet, zum Zeitpunkt der Risikoanalyse noch nicht existente (mögliche künftige) EMI-Bedrohungen und die Auswirkung sich abzeichnender technologischer Trends zu berücksichtigen.

Für die erfolgreiche Durchführung der Scenario Analysis ist neben der fachlichen Expertise der Mitglieder des durchführenden Expertenteams deren Fähigkeit technologische Tendenzen und künftige Entwicklungen realistisch abzuschätzen von entscheidender Bedeutung.

5.3.2 Hazard and Operability Study (HAZOP)

Die Methode HAZard and OPERability study (HAZOP), auch PAAG-Verfahren⁹, ist eine explorative Methode die im Bereich der Gefährdungsanalyse zur Untersuchung und Bewertung der Sicherheit von technischen Anlage eingesetzt wird [76].

Das Grundprinzip der HAZOP besteht darin, Gefahren und Probleme beim Betrieb eines Systems dadurch aufzudecken, dass auf systematische Weise anhand eines Modells nach möglichen Abweichungen vom vorgesehenen Betriebszustand gesucht wird und diese hinsichtlich ihres Gefährdungspotentials bewertet werden.

Das HAZOP-Verfahren kann auch für die Risikoanalyse von elektronischen und elektrischen Systeme genutzt werden. Sie wurde bisher noch nicht für die Betrachtung von EMI-Risiken eingesetzt.

Durchführung

Bei der Durchführung der HAZOP wird schrittweise in Form einer moderierten Diskussion jede einzelne Komponente eines Prozesses anhand von Leitworten auf mögliche Gefährdungen hin überprüft. Bei der Diskussion sind folgende Arbeitsschritte zu durchlaufen:

Tabelle 5.6 Auswahl allgemeiner Leitworte für HAZOP Studien [76]

Leitwort	allgemeine Bedeutung
Nein, nicht	Sollfunktion erfolgt nicht oder wird negiert
Mehr	Quantitativer Zuwachs, es geschieht zu viel
Weniger	Quantitative Abnahme, es geschieht zu wenig
Sowohl als auch	Zusätzlich passiert etwas anderes
Teilweise	Sollfunktion erfolgt unvollständig
Umkehrung	Es geschieht das Gegenteil
Früher / Später	Nicht erwarteter Zeitpunkt
Schneller / Langsamer	Nicht erwartete Änderung der Geschwindigkeit

⁹ PAAG: Prognose, Auffinden der Ursache, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen

1. **Vorbereitung:** Vor Beginn der Analyse erstellt der Moderator eine Liste aus Leitworten¹⁰, die dem zu betrachtendem System angepasst sind und mit denen er die Analyse leiten kann. Eine Auswahl allgemeiner Leitworten ist in Tabelle 5.6 beispielhaft dargestellt.
2. **Auswahl eines Prozessschritts:** Anhand der Entwurfsdokumente, z.B. Prozessdiagramme, Datenflussdiagramme, Schaltpläne oder Entity-Diagramme, wird der zu betrachtende Prozessschritt ausgewählt.
3. **Attributisierung des Prozessschritts:** Jedem Prozessteil (Parameter, Prozessvariablen) werden bestimmte Attribute, z.B. Spannung, Strom oder Zeit, und Soll-Werte zugeordnet.
4. **Kombination jedes Attributs eines Prozessteils mit Leitworten:** Möglichen Abweichungen der Attribute (Systemparameter) werden durch geeignete Leitworte bezeichnet.
5. **Risikoidentifikation:** Ausgehend von den gewählten Leitworten diskutiert das Expertenteam ob das Leitwort in Zusammenhang mit dem betrachteten Systemparameter ein Problem oder eine Gefahr für den gewählten Prozessschritt darstellt.
6. **Diskussion möglicher Ursachen und Folgen:** Im Zuge der Diskussion werden mögliche Ursachen hinterfragt, Risiken identifiziert und mögliche Auswirkungen (Konsequenzen) die Systemfunktion, die Nutzer und die Umwelt ermittelt.
7. **Entwicklung von Abstellmaßnahmen** Erkannte nicht tolerierbare Risiken werden in einer Tabelle (sog. HAZOP-Tabelle) erfasst (s. Tabelle 5.7) und Maßnahmen zur Risikomitigation entwickelt.
8. **Fortsetzung der Analyse mit einem anderen Leitwort, Attribut oder Prozessteil**

Die Anwendung der Hazard and Operability Study auf ein konkretes Anwendungsbeispiel ist im Anhang B.3 Anhand der Erfassung möglicher EMI-Gefährdungen der im Gebäude 5 einer fiktiven Infrastruktur installierten Systemanteile dargestellt.

Bewertung

Das HAZOP Verfahren ermöglicht eine systematische und umfassende Risikoanalyse eines Systems und seiner Prozessabläufe auf qualitativer Basis. Es kann ohne Vorkenntnisse über mögliche Risiken bzw. EMI-induzierte Funktionsstörungen durchgeführt werden und liefert für die identifizierten Risiken Ansätze zur Risikobewältigung. Diesen Stärken steht der hohe Aufwand des Verfahrens gegenüber. Für die Durchführung einer HAZOP-Studie wird ein Expertenteam benötigt, das sich turnusmäßig trifft und diskutiert. Der Erfolg der HAZOP-Studie hängt zudem von dem Fachwissen und den Fähigkeiten der teilnehmenden Experten ab. So besteht eine Aufgabe der Teammitglieder darin zu prüfen, ob die diskutierten Systemparameter alle Vorgänge und Prozesse des Systems vollständig abbilden und alle relevanten EMI-Szenarien erkannt und berücksichtigt wurden. Insbesondere bei verteilten Systemen und elektronischen Anteilen kritischer Infrastrukturen kann aufgrund der hohen Komplexität eine vollständige Systemanalyse sehr aufwendig und langwierig sein. Aus

Tabelle 5.7 Beispiel einer HAZOP-Tabelle für eine EMI-Risikoanalyse

Systembestandteil	Komponente	Prozessvariable	Leitwort	mögliche Ursache			Folge	mögliche Maßnahme
				EMI-Quelle	Ort	Koppelpfad		

¹⁰ Im Zusammenhang mit der HAZOP hat sich der Terminus *Leitwort* als Bezeichnung für die genutzten Schlüsselwörter zur Lenkung der Diskussion etabliert.

Tabelle 5.8 Bewertung HAZOP

Name	Hazard and Operability Study (HAZOP)				
Verfahren	induktiv	deduktiv	explorativ +		
Anwendung	Identifikation ++	Analyse Auswirkung ++	Analyse Stärke +	Analyse Häufigkeit +	Bewertung +
Phase	Konzeptphase	Definitionsphase	Entwurfsphase +	Fertigungsphase +	Betriebsphase +

+: anwendbar; ++: sehr gut anwendbar

diesem Grund ist es von entscheidender Bedeutung, dass in der Vorbereitungsphase der Umfang der Risikoanalyse als auch der hierbei zu betrachtende Detaillierungsgrad in geeigneter Weise festgelegt wird.

Im Vergleich zur PHA liegt bei der Anwendung des HAZOP Verfahrens im Anwendungsfall EMI-Risikoanalyse der Schwerpunkt der Betrachtungen weniger auf der EMI-Quelle und ihres Ortes sondern auf den durch Wechselwirkungen mit der EMI-Umgebung hervorgerufenen Abweichungen der Systemparameter. Das HAZOP-Verfahren setzt somit am Zielsystem, der IEMI-Störsenke, an und ermittelt zunächst die aus den betrachteten (möglichen) Störeinflüssen folgenden Auswirkungen. Im HAZOP-Verfahren werden die Abweichungen der Systemparameter als auch ihrer Auswirkungen und mögliche Ursachen (EMI-Quellen, Koppelpfade) nur qualitativ betrachtet. Für die Ermittlung der Auftretswahrscheinlichkeit und die Bewertung der elektromagnetischen Einkopplung sind weitere Analysen mit anderen Methoden notwendig.

5.3.3 Structured What-if Technique (SWIFT)

Eine auf dem Prinzip des HAZOP Verfahrens aufbauende explorative Methode ist die Structured What-if Technique (SWIFT). Sie wurde ursprünglich als eine einfachere und effizientere alternative Technik zum HAZOP Verfahren entwickelt. Kernelement beider Methoden ist die Diskussion möglicher Risiken und ihrer Konsequenzen durch ein Expertenteam. Bei der SWIFT erfolgt die Analyse des betrachtete System jedoch auf einem höherem Abstraktionslevel. So werden mögliche Abweichungen der Systemparameter vom regulären Betriebszustand anhand von Fragen der Form „Was wäre, wenn ...?“, „Was würde geschehen, wenn ...?“ oder „Wie könnte ...?“ erörtert. [73]

Durchführung

Der generelle Ablauf der SWIFT gleicht dem des HAZOP Verfahrens:

1. **Vorbereitung:** Vor Beginn der Analyse erstellt der Moderator eine Liste aus Schlüsselworten und Frage, die dem zu betrachtendem System angepasst sind.
2. **Systembeschreibung und Vorgaben:** Zu Beginn der Analyse werden die Betriebsbedingungen des Systems und deren Randbedingungen, mögliche Änderungen als auch die Aufgabenstellung für die Risikoanalyse besprochen und festgelegt.
3. **Erfassung vorbekannter Risiken:** Durch den Moderator werden vorbekannte Risiken, frühere Erfahrungen und IEMI-Ereignisse, bekannte Steuerungs- und Schutzelemente sowie Einschränkungen erfragt.

4. **Auswahl eines Prozessschritts:** Anhand der Entwurfsdokumente, z.B. Prozessdiagramme, Datenflussdiagramme, Schaltpläne oder Entity-Diagramme, wird der zu betrachtende Prozessschritt ausgewählt.
5. **Diskussion von Abweichungen** Die Expertendiskussion wird durch Fragen gelenkt, die anhand von „Was wäre, wenn ...?“-Phrasen und Schlagworten gebildet werden. Die üblicherweise genutzten Phrasen sind „Was wäre, wenn ...?“, „Was würde geschehen, wenn ...?“, „Wie könnte ...?“, „Könnte jemand oder etwas ...?“ oder „Hat jemand oder irgendetwas jemals ...?“. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, das Expertenteam anzuregen, potentieller Szenarien (Bedrohungsszenarien), einschließlich der hierbei hervorgerufenen Effekte und deren Auswirkungen zu diskutieren.
6. **Risikoidentifikation:** Zum Ende jeder Expertendiskussion werden erkannte Risiken zusammengefasst und vorhandene Steuerungsmöglichkeiten betrachtet.
7. **Evaluation von Abstellmaßnahmen** Abschließend prüft das Expertenteam, ob die voraussichtlichen Steuerungen geeignet und wirksam sind und fasst das Beratungsergebnis in einer Stellungnahme zur Wirksamkeit der Risikosteuerung zusammen. Ist das verbleibende Risiko zu hoch bzw. nicht tolerierbar, sollte das Expertenteam darüber hinaus weitere Maßnahmen zur Risikobehandlung betrachten.
8. **Dokumentation:** Die Beschreibung erkannte Risiken, Bedrohungsszenarien, deren Auswirkungen als auch voraussichtliche Steuerungen werden dokumentiert.

Ein Beispiel für die Anwendung der SWIFT¹¹ befindet sich im Anhang B.4.

Bewertung

Wie bei dem HAZOP Verfahren ist der Erfolg der SWIFT sehr stark von dem Fachwissen und den Fähigkeiten der teilnehmenden Experten abhängig. Da eine SWIFT Studie auf die Systemebene ausgerichtet ist, wird ein gegenüber dem HAZOP-Verfahren **geringerer Detaillierungsgrad** benötigt. Für die Durchführung einer SWIFT im Rahmen einer EMI-Risikoanalyse werden im einfachsten Fall Informationen über mögliche Aufstellungsorte von EMI-Quellen und des betrachteten Zielsystems sowie eine funktionale Beschreibung des Zielsystems benötigt. Da die Diskussion der Experten konsequenter auf Abweichungen des Systemverhaltens (Effekte auf der Systemebene) fokussiert, unterbleibt in der Regel die Detailbetrachtung des Verhaltens bzw. Ausfalls von Teilsystemen, Baugruppen oder Bauteilen. Auch können die wesentlichen EMI-Gefährdungen sowie Maßnahmen zu ihrer Reduktion schneller identifiziert werden. Das wesentliche Ergebnis einer SWIFT Studie ist die Erstellung einer qualitativ gewichteten Liste bestehender EMI-Risiken.

Tabelle 5.9 Bewertung SWIFT

Name	Structured What-if Technique (SWIFT)				
	Verfahren	induktiv	deduktiv	explorativ	
				+	
Anwendung	Identifikation ++	Analyse Auswirkung ++	Analyse Stärke ++	Analyse Häufigkeit ++	Bewertung ++
Phase	Konzeptphase	Definitionsphase	Entwurfsphase +	Fertigungsphase +	Betriebsphase +

+: anwendbar; ++: sehr gut anwendbar

¹¹ Erfassung möglicher IEMI-Gefährdungen der im Gebäude 1 einer fiktiven Infrastruktur installierten Systemanteile.

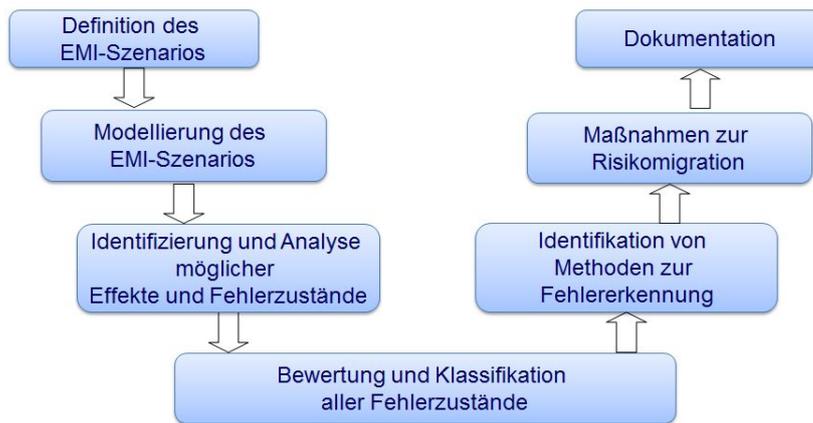


Abb. 5.1 Struktur der TSECA

5.3.4 Threat Scenario, Effect and Criticality Analysis (TSECA)

Die Threat Scenario, Effect and Criticality Analysis (TSECA) ist eine induktive Methode zur EMI-Risikoanalyse, die auf der Methodik der Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) aufbaut. Die Grundstruktur der TSECA gleicht der Struktur der FMECA, wie sie im MIL-STD-1629A [77] beschrieben ist.

Bei der FMECA werden mit Hilfe von formalisierten Arbeitsblättern und Ursache-Wirkungs-Diagrammen die Auswirkung einzelner Fehlerereignisse auf die Gesamtfunktion des betrachteten Systems untersucht und dessen Kritikalität bewertet. Die FMECA findet in vielen Industriebereichen (z.B. Automobilindustrie, Luft- u. Raumfahrt) Anwendung im Rahmen von Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalyse.

Im MIL-STD-1629A [77] wird der Ablauf einer FMECA in folgende, logische Analyseschritte unterteilt:

1. Definition des Systems,
2. Erstellen eines Strukturmodells des Systems,
3. Identifizierung möglicher Fehlerzustände und ihrer Ursachen,
4. Bewertung und Klassifikation aller Fehlerzustände,
5. Identifikation von Methoden zur Fehlererkennung,
6. Identifikation von Vermeidungsmaßnahmen,
7. Dokumentation der Analyse.

Der im MIL-STD-1629A beschriebene Prozess fokussiert auf interne Fehlerzustände eines Systems und deren Auswirkungen auf das Systemverhalten. In dieser Form berücksichtigt die FMECA Umwelteinflüsse nur im Schritt 3 als mögliche Fehlerursachen. Trotz dieser Einschränkungen ist die Grundstruktur der FMECA geeignet, EMI-Szenarien hinsichtlich ihres Risikos zu analysieren, wenn diese um die Betrachtung elektromagnetischer Umgebungsbedingungen (Threat Scenarios) erweitert werden.

Im Anwendungsfall der EMI-Risikoanalyse ist das gesamte Bedrohungsszenario (Threat Scenarios), bestehend aus EMI-Quelle (bzw. IEMI-Umgebung), räumlicher Anordnung und betrachtetem Zielsystem, Gegenstand der Analyse. Als unmittelbare Folge muss im ersten Analyseschritt nicht nur das betrachtete System sondern das **gesamte Bedrohungsszenario definiert** und beschrieben werden. Aus der Erweiterung des Untersuchungsobjekts folgt für den zweiten Analyseschritt die Notwendigkeit der Modellierung des gesamten betrachteten Bedrohungsszenarios. Im Vergleich zur klassischen FMECA sind bei der EMI-Risikoanalyse neben dem Strukturmodell (bzw. Prozessmodell) des betrachteten Systems auch die EMI-Umgebungen und die elektromagnetische Feldkopp-

lung der EMI-Umgebung mit dem System zu modellieren. Die Modifikation des dritten Analyseschrittes ergibt sich aus der Natur des analysierten Bedrohungsszenarios. In diesem ist die EMI-Umgebung als Ursache möglicher Fehlerzustände fest vorgegeben. Der dritte Analyseschritt kann daher auf die Ermittlung möglicher durch die EMI-Umgebung hervorgerufene Fehlerzustände begrenzt werden. Die beschriebenen Anpassungen führen zu der Threat Scenario, Effect and Criticality Analysis (TSECA) Methode, die speziell auf die Analyse des EMI-Risikos angepasst ist.

Durchführung

Die TSECA besteht aus den Analyseschritten:

1. **Definition des EMI-Szenarios:** Die EMI-Risikoanalyse nach der TSECA Methode startet mit der Definition des zu analysierenden EMI-Szenarios. Diese umfasst die räumliche Anordnung möglicher EMI-Quellen, des betrachteten Zielsystems als auch Objekte, welche die Ausbreitung des elektromagnetischen Feldes beeinflussen. Je nach Phase des Systemlebenszyklusses beinhaltet die Beschreibung des Zielsystems die geforderte Funktionalität, Block- und Prozessdiagramme, Betriebszustände sowie Umweltbedingungen. Hinsichtlich der Beschreibung der EMI-Quellen empfiehlt sich die Verwendung von EMI-Quellenklassen (siehe Abschnitt 6.1). Die Ergebnisse einer PHL (Abschnitt 5.2.2) beziehungsweise PHA (Abschnitt 5.2.2) stellen eine gute Ausgangsbasis für die Definition des EMI-Szenarios dar.
2. **Modellierung des EMI-Szenarios:** Im zweiten Analyseschritt sind für die festgelegten Bedrohungsszenarios Modelle für die EMI-Quellenklassen, die elektromagnetische Kopplung (Kopplung EMI-Quelle mit Zielsystem) und das Zielsystem zu erstellen. Im Allgemeinen sind zwei Typen von Modellen zu erstellen, elektromagnetische Kopplungsmodelle (EMI-Quelle, EMI-Umgebung, Zielsystem) sowie Prozess- und Blockdiagramme (Zielsystem).
3. **Identifizierung und Analyse möglicher Effekte und Fehlerzustände:** Im dritten Analyseschritt werden mit Hilfe des elektromagnetischen Kopplungsmodells die durch die EMI-Quelle im Zielsystem eingekoppelten Störgrößen (Störspannungen und Störströme) berechnet. Durch Vergleich der Störgrößen mit bekannten Störfestigkeitsdaten der Teilsysteme, Baugruppen oder Komponenten werden mögliche Effekte und Fehlerzustände auf Baugruppenebene ermittelt.
4. **Bewertung und Klassifikation aller Fehlerzustände:** Anhand der Prozess- und Blockdiagramme des Zielsystems werden die Auswirkungen der identifizierten Effekte und Fehlerzustände auf die Gesamtfunktion des Systems bestimmt. Im Rahmen dieses Analyseschrittes müssen die Auswirkungen aller erkannten Effekte von der Ebene ihres Auftretens bis auf die Systemebene (Gesamtsystem - top-level) oder einer Ebene auf der der betrachtete Fehlerzustand kompensiert wird (z.B. durch Redundanzen) nachverfolgt werden. Die ermittelten Auswirkungen auf die Funktion des Systems sind hinsichtlich ihrer Schwere (Kritikalität) und der Häufigkeit ihres Auftretens zu

Tabelle 5.10 Bewertung der TSECA Methode

Name	Threat Scenario, Effect and Criticality Analysis (TSECA)				
Verfahren	induktiv +	deduktiv	explorativ		
Anwendung	Identifikation ++	Analyse Auswirkung ++	Analyse Stärke ++	Analyse Häufigkeit ++	Bewertung ++
Phase	Konzeptphase	Definitionsphase	Entwurfsphase +	Fertigungsphase +	Betriebsphase +

+: anwendbar; ++: sehr gut anwendbar

bewerten. Ein anwendbares Schema zur Klassifikation der Schwere der Effekte und Auswirkungen wird in [16, 17] vorgestellt.

5. **Identifikation von Methoden zur Fehlererkennung:** Im fünften Analyseschritt startet die Maßnahmenanalyse, in der den erkannten Risiken Maßnahmen zur Entdeckung des zugrunde liegenden Fehlerzustandes zugeordnet werden. Entdeckungsmethoden können zum Beispiel visuelle oder akustische Warnsignale oder Konsistenzprüfungen sein.
6. **Identifikation von Vermeidungsmaßnahmen:** Im sechsten Analyseschritt werden für die erkannten Risiken Maßnahmen zur Risikobewältigung erarbeitet und deren Wirksamkeit abgeschätzt. Diese Maßnahmen können sowohl technischer (Schirmung, Filterung, redundantes Design, Designmaßnahmen) als auch organisatorischer (Zugangsbeschränkungen) Natur sein.
7. **Dokumentation der Analyse:** Zum Anschluss der TSECA sind die Ergebnisse (erkannte Fehlerzustände und Risiken, Bewertung, Risikobewältigungsmaßnahmen) in geeigneter Form zu dokumentieren.

Zur Unterstützung der systematischen Durchführung und Dokumentation der TSCEA, kann ein TSCEA-Formblatt erstellt werden. Ein Beispiel für die Durchführung der TSECA in [78] wiedergegeben.

5.3.5 Event Tree Analysis (ETA)

Die Event Tree Analysis (ETA), auch Ereignisbaumanalyse, ist eine induktive Methode der Systemanalyse. Die ETA wird oft eingesetzt, wenn der betrachtete Funktionsablauf von einem **chronologischen Ereignisablauf** abhängt, da **zeitliche Abfolgen**, Abhängigkeiten und Dominoeffekte dargestellt werden können [79].

Durchführung

Üblicherweise wird der Ereignisbaum (Event Tree) von oben nach unten oder von links nach rechts aufgebaut, jeweils mit Entscheidungsknoten (Abzweigungen) für zwei Alternativen (Abbildung 5.2). Ganz links bildet das **initiiierende Ereignis** den **Wurzelknoten**. Von dem Wurzelknoten ausgehend wird der Ereignisbaum über **Verzweigungsknoten** weiterentwickelt. Die Verzweigungsknoten stellen **Entscheidungssituationen** dar, in denen ein Ereignis eintreten kann oder nicht. Die Situation

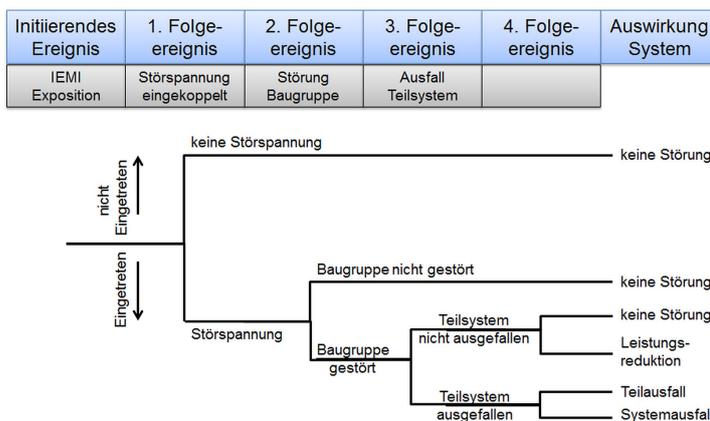


Abb. 5.2 Beispiel für einen Ereignisbaum (Event Tree)

Tabelle 5.11 Bewertung der Event Tree Analysis (ETA)

Name	Event Tree Analysis (ETA)				
Verfahren	induktiv +	deduktiv	explorativ		
Anwendung	Identifikation +	Analyse Auswirkung ++	Analyse Stärke +	Analyse Häufigkeit +	Bewertung
Phase	Konzeptphase	Definitionsphase	Entwurfsphase +	Fertigungsphase +	Betriebsphase +

+: anwendbar; ++: sehr gut anwendbar

des jeweils betrachteten Knotens (K) ist dabei Folge des Ereignisses des vorhergehenden Knotens (K-1).

Im Anwendungsfall der EMI-Risikoanalyse besteht das initiiierende Ereignis in dem Auftreten einer EMI-Umgebung (EMI-Exposition) im Umfeld des betrachteten (Ziel-)Systems. Die Entscheidungsknoten entsprechen dem Auftreten von Störgrößen (z.B. Störspannungen), die von diesen abgehenden Kanten stellen die korrekte oder gestörte Funktion eines Teilsystems oder den Ausfall von Funktionseinheiten dar.

Beispiel

In Abbildung 5.2 ist ein Beispiel für einen EMI-Ereignisbaum dargestellt. Die EMI-Exposition (Wurzelknoten) kann zu einer Störspannung im System führen (1. Folgeereignis). Verfügt die mit der Störspannung beaufschlagte Baugruppe über eine ausreichende Störfestigkeit, so führt die Störspannung nicht zu deren Ausfall. Im entgegengesetzten Fall kommt es zu einer Störung der Baugruppe. In diesem Beispiel kann die Störung der Baugruppe zu einem Systemausfall führen. Die zu dem jeweiligen Endzustand des Systems führenden Teilzustände (Ereignisse) können entlang des Pfades vom Wurzelknoten zum jeweiligen Endknoten abgelesen werden. Werden die an jedem Knoten abgehenden Kanten mit der Wahrscheinlichkeit der Ereignisse gewichtet, lässt sich die Eintrittswahrscheinlichkeit der Endzustände mithilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung und den Gewichten aller zum Pfad gehörigen Verbindungskanten berechnen.

Bewertung

Eine Stärke der ETA besteht darin, dass sie mögliche Zustände und Ereignisse als auch die Wirksamkeit von Risikobewältigungsmaßnahmen auf eine übersichtliche, strukturierte, graphische Weise darstellt. Auch ermöglicht sie die Darstellung der Abfolge von Ereignissen und berücksichtigt hierdurch mögliche Dominoeffekte. Da im ETA nur das Eintreten bzw. Ausbleiben eines Ereignisses (Erfolg- oder Misserfolgzustände) dargestellt werden, können Verzögerungseffekte oder Erholungseffekte nur sehr eingeschränkt in die Analyse mit einbezogen werden.

5.3.6 Bow Tie Analysis (BTA)

Die Bow Tie Analyse ist eine qualitative Analyseverfahren, die in graphischer Weise den **Wirkungspfad eines Risikos** von seiner Ursache hin zur Auswirkung darstellt. Kernstück der Bow Tie Analy-

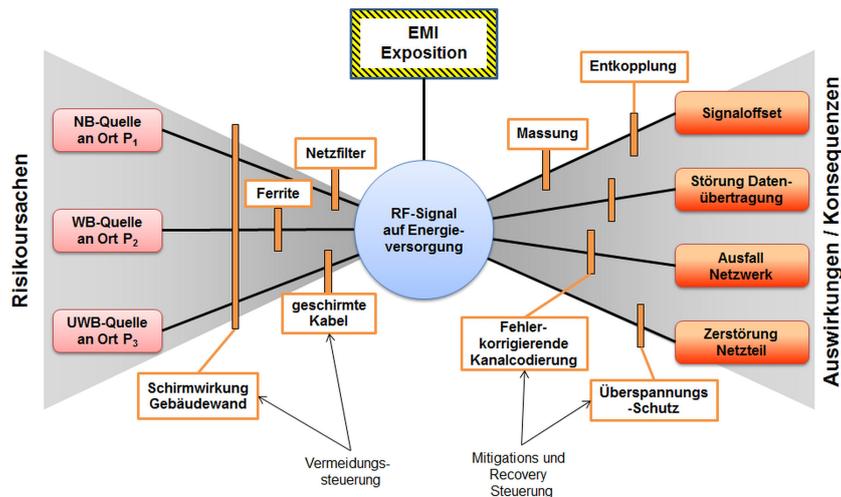


Abb. 5.3 Beispiel eines Bow Tie Diagramm

sis ist ein **Risikodiagramm** (Abbildung 5.3), in dem das betrachtete Fehlerereignis (sog. Top-Event) mit seinen Ursachen und Auswirkungen in Beziehung gesetzt wird. Das Bow Tie Diagramm gleicht von seiner Struktur einer Kombination eines Fehlerbaumes (vom Fehlerereignis auf seine Ursachen zu) und eines Ereignisbaums (zur Analyse der Auswirkungen). Der Name der Analyse ist von der sich hierbei ergebenden Diagrammform, die einer Frackschleife ähnelt, abgeleitet. Anders als bei der Fehlerbaumanalyse und der Ereignisbaumanalyse liegt der Fokus der Analyse stärker auf den Steuerungselementen (Barrieren) zwischen den Ursachen und dem Fehlerereignis bzw. dem Fehlerereignis und dessen Auswirkungen.

Die Stärke der Bow Tie Analyse liegt in der einfachen graphischen Darstellung der grundlegenden Wirkungszusammenhänge sowie bestehender Steuerungsmöglichkeiten.

Durchführung

1. **Definition Top Event - Fehlerereignis:** Startpunkt einer Bow Tie Analyse ist eine **Gefährdung** - im Falle der EMI-Risikoanalyse, die Exposition des Systems durch eine IEMI-Umgebung. Den **zentralen Knoten** des Bow Tie Diagramms bildet ein **Fehlerereignis (Top Event)**, das aus der Gefährdung folgt und das es zu kontrollieren gilt, um Schaden abzuwenden. Der Eintritt des Top Events stellt an sich noch keinen Schaden dar, dieser tritt aber ein, wenn die aus dem Top Event folgenden Auswirkungen nicht begrenzt oder in geeigneter Weise verhindert werden. **Das Top Event markiert somit die Grenze zwischen Effekten und Schadensereignissen.** Die Wahl des Top Events erfolgt in der Regel anhand subjektiver Bewertungen und pragmatischer Entscheidungen. Da während der gesamten Analyse die Möglichkeit besteht, die Beschreibung des Top Events weiter zu detaillieren oder aufgrund gewonnener Erkenntnisse neu zu formulieren, empfiehlt es sich, mit einer allgemein gefassten Beschreibung zu beginnen.
2. **Identifikation Ursachen:** Nach der Definition des betrachteten Fehlerereignisses werden im zweiten Analyseschritt **mögliche Ursachen** (EMI-Gefährdungen) **links** von dem Fehlerereignis aufgetragen und mit dem Top Event verbunden. Die Beschreibung der Ursachen sollte hierbei so detailliert erfolgen, dass eine Beurteilung möglicher Schutzmaßnahmen hinsichtlich ihrer Relevanz gegenüber den Gefährdungen erfolgen kann. So reicht die Angabe EMI-Exposition als

Tabelle 5.12 Bewertung der Bow Tie Analysis (BTA)

Name	Bow Tie Analysis (BTA)				
Verfahren	induktiv +	deduktiv	explorativ		
Anwendung	Identifikation	Analyse Auswirkung +	Analyse Stärke ++	Analyse Häufigkeit ++	Bewertung +
Phase	Konzeptphase	Definitionsphase x	Entwurfsphase +	Fertigungsphase +	Betriebsphase +

+: anwendbar; ++: sehr gut anwendbar

Beschreibung einer Gefährdung nicht aus. Zur Beurteilung der Wirksamkeit möglicher Schutzmaßnahmen ist die Angabe weiterer Parameter, z.B. Frequenzbereich, Signalform, Amplitude, Mobilität, Baugröße, notwendig.

- Auswirkungen:** Rechts von Top Event werden alle **möglichen Auswirkungen** aufgetragen, die ohne Mitigationsmaßnahmen aus dem betrachteten Fehlerereignis folgen können. Auch hier sollte die Beschreibung so spezifisch erfolgen, dass eine Identifikation und Bewertung von Mitigations- und Schutzmaßnahmen möglich ist.
- Barrieren und Maßnahmen:** Der nun folgende Analyseschritt bildet das Kernelement der Bow Tie Analyse. Auf den Verbindungslinien zwischen den EMI-Gefährdungen und dem Fehlerzustand werden **Schutzmaßnahmen** (z.B. Filter, Schirmung) als Barrieren eingetragen. Analog werden auf den Verbindungslinien zwischen dem Fehlerzustand und den Auswirkungen **Mitigations- und Recoverymaßnahmen** als Barrieren vermerkt. Die Barrieren können sowohl organisatorisch-prozeduralen Maßnahmen als auch technischen Maßnahmen umfassen. Das sich nun ergebende Diagramm stellt die wesentlichen Wirkungspfade zwischen den Gefährdungen (Auftreten einer EMI-Umgebung) dem Schlüsselereignis und dessen Auswirkungen als auch bestehende Steuerungselemente (Barrieren bzw. Schutzmaßnahmen) zur Verhinderung bzw. Abschwächung nicht tolerierbarer Auswirkungen dar.

Im Anhang B.5 wird anhand der Erfassung und Darstellung möglicher IEMI-Gefährdungen der im Gebäude 1 einer fiktiven Infrastruktur installierten Systemanteile die Durchführung der BTA eingehender erläutert.

Bewertung

Wesentliche Vorteile dieser Darstellung sind seine relativ einfache Struktur und die Fokussierung der Analyse auf Steuerelemente. Das Bow Tie Diagramm eignet sich daher sehr gut als Ausgangspunkt für die Identifizierung geeigneter Mitigationsmaßnahmen. Bei komplexeren Wirkungszusammenhängen kann sich diese Stärke jedoch auch nachteilig auswirken, da die Gefahr besteht die Wirkungszusammenhänge zu sehr zu vereinfachen. Da im Bow Tie Diagramm zeitliche Zusammenhänge nicht abgebildet werden, können die Überlagerungseffekte mehrerer, zeitgleich auftretender Gefährdungen nicht dargestellt werden.

5.4 Methoden zur Risikobewertung

Der Kernprozess der Risikobeurteilung schließt mit der Risikobewertung (s. Abschnitt 4.3). Die wesentliche Aufgabe der Risikobewertung besteht in der Klassifizierung der identifizierten Risiken (einschließlich ihrer Auswirkungen und Auftretswahrscheinlichkeiten) in

- Risiken, die toleriert werden können,
- Risiken, die einer weiteren Analyse bedürfen, und
- Risiken, die einer Risikomitigation (Vermeidung, Abschwächung, ...) unterzogen werden müssen.

Darüber hinaus soll die Risikobewertung Grundlagen für eine Priorisierung notwendiger Maßnahmen zur Risikobewältigung liefern.

Methoden zur Bewertung basieren meist auf einem Vergleich identifizierter Risiken, z.B. durch die Bestimmung von Risikomaßen. Eine gängige Methode der Risikobewertung ist die Gewichtung der Risiken mit dem Produkt aus Auftretswahrscheinlichkeit und Kosten des zu erwartenden Schadens. Je nach Anwendungsbereich und Zielsetzung können die Kosten neben dem Schaden im engeren Sinne (z.B. Verlust, Reparaturkosten, Wiederbeschaffungskosten) auch Kosten für dessen Bewältigung (Recovery) oder Folgekosten (z.B. Strafen für Umweltschäden) umfassen. Der herausragende Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Gewichtung der Risiken anhand objektiver Parameter, da weder die Auftretswahrscheinlichkeit noch die ermittelten Kosten von (subjektiven) Bewertungen beeinflusst werden.

Aufgrund fehlender historischer Erfahrungswerte mit bewusst hervorgerufenen elektromagnetischen Beeinflussungen lässt sich im Anwendungsfall EMI-Risikoanalyse die Auftretswahrscheinlichkeit der betrachteten Gefährdungen (EMI-Umgebungen) nur sehr stark eingeschränkt oder gar nicht in Form einer dezidierten Prozentzahl beziffern. In den meisten Fällen ist es daher praktikabler die Auftretswahrscheinlichkeit anhand, unscharf gefasster, Wahrscheinlichkeitskategorien anzugeben. Diese sind Ergebnis einer subjektiven Bewertung durch Experten und für eine reine Produktbildung weniger gut geeignet.

Ein weiterer Aspekt, der gegen die Anwendung der gängigen Bewertung spricht, ist der Umstand, dass sich in vielen Fällen der Schaden nur schwer in einem monetären Wert ausdrücken lässt. So spiegelt der Geldwert nicht immer die Schwere des Schadens wieder. Zum anderen lassen sich der Verlust der Reputation, eine schwere Verletzung oder der Tod eines Menschen oder die eingeschränkte Versorgung von Bereichen mit Wasser oder elektrischer Energie nur eingeschränkt mit einem finanziellen Wert beziffern.

Für die Bewertung des EMI-Risikos werden daher Methoden benötigt, die die aufgezeigten Aspekte berücksichtigen können.

5.4.1 Risikoindex

Die Bewertung eines Risikos mit Hilfe eines Risikoindex ist eine halb-qualitative Methode die auf einer Ordinalskalierung der betrachteten Kriterien basiert. Im einfachsten Anwendungsfall werden die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Schwere des Schadens anhand vorgegebener Skalen eingeteilt. Hierauf aufbauend lässt sich, im Sinne des im ISO Guide 73 [41] definierten technischen Risikobegriffs, ein Risikoindex durch Verknüpfung der beiden Skalenwerte (z.B. durch Multiplikation) ableiten. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Multiplikation der ordinal skalierten Merkmale streng mathematisch nicht definiert ist.

Bei Verwendung der in Tabelle 5.13 und 5.14 dargestellten Skalen ergibt sich für den Risikoindex ein Wertebereich von

$$RI = A \cdot S \in \{1, 100\}. \quad (5.1)$$

Tabelle 5.13 Skala der Eintrittswahrscheinlichkeit / Häufigkeit

A	Eintrittswahrscheinlichkeit/ Häufigkeit	Kriterien	
1	unwahrscheinlich	$A \leq 1\%$	Auftreten des Schadens / Ereignisses ist unwahrscheinlich
2 - 3	gering	$1\% \leq A < 5\%$	Auftreten des Schadens / Ereignisses ist gering
4 - 6	mittel / mäßig	$5\% \leq A < 50\%$	gelegentlich auftretender Schaden / Ereignis
7 - 8	hoch	$50\% \leq A < 90\%$	tritt in mehr als der Hälfte der Expositionen auf
9 - 10	sehr hoch / nahezu sicher	$90\% \leq A$	tritt bei fast jeder Exposition auf

Tabelle 5.14 Skala der Schwere des Schadens

S	Auswirkung/ Schadensausmaß	Kriterien
1	sehr gering	Sehr geringe / kaum wahrnehmbare Auswirkungen
2 - 3	gering	Funktionseinschränkungen von Bedien- und Komfortsystemen, Arbeiterschwernis
4 - 6	mittel / störend	Funktionseinschränkungen von wichtigen Bedienelementen, Leistungseinschränkungen von Teilsystemen, Erschwerung der Arbeitsbedingungen
7 - 8	hoch / kritisch	Gefahr von Verletzung, Umweltbelastungen, Funktionsfähigkeit des Systems eingeschränkt
9 - 10	katastrophal	Lebensgefahr, Gefahr schwerer Verletzungen, Umweltschäden, Totalverlust des Systems

Tabelle 5.15 Skala der Entdeckungswahrscheinlichkeit

E	Risikoerkennung	Kriterien
1	sicher	IEMI-Exposition (Fehlerursache) wird sicher entdeckt. Primärfehler wird sicher (vor dem Auftreten von Folgefehlern) entdeckt.
2 - 3	hoch	Entdecken der auftretenden IEMI-Exposition / Primärfehler ist sehr wahrscheinlich.
4 - 6	mittel	IEMI-Exposition / Primärfehler wird wahrscheinlich entdeckt.
7 - 8	gering	Entdecken der IEMI-Exposition / Primärfehler ist unwahrscheinlich.
9 - 10	nicht feststellbar	Die Exposition / Primärfehler kann aus technischen und / oder wirtschaftlichen Gründen nicht festgestellt werden

Tabelle 5.16 Beispiel einer Skalierung der Risikoprioritätszahl

RPZ	Kategorie	Maßnahmen zur Risikominimierung
$1 \leq RPZ < 200$	gering	möglich aber nicht erforderlich
$200 \leq RPZ < 500$	mittel	erforderlich
$500 \leq RPZ < 750$	hoch	dringend erforderlich
$750 \leq RPZ < 1000$	sehr hoch	dringend erforderlich

Bei der Risiko- und Gefährdungsanalyse von technischen Anlagen und Systemen werden Risiken häufig mit Hilfe der Risikoprioritätszahl (RPZ) bewertet. Bei der Bildung der Risikoprioritätszahl werden neben der Eintrittswahrscheinlichkeit (A) und der Schwere (S) der Auswirkungen auch die Entdeckbarkeit (E) von Risiken bzw. Primäreffekten berücksichtigt.

$$RPZ = A \cdot S \cdot E \in \{1, 1000\} \quad (5.2)$$

Dieser Vorgehensweise liegt die Überlegung zugrunde, dass bei rechtzeitiger (vor Eintritt von Sekundärfolgen) Erkennung des Auftretens einer Fehlerursache, z.B. IEMI-Exposition, die Möglichkeit besteht schwere Auswirkungen durch Warnungen oder Abwehrmaßnahmen zu verhindern. In Tabelle 5.16 ist beispielhaft auf der Risikoprioritätszahl basierende Bewertungsskala dargestellt.

Häufigkeit (A)	sehr hoch / nahezu sicher	10	III	III	IV	IV	IV	IV	V	V	V	V
		9	III	III	III	IV	IV	IV	V	V	V	V
	hoch	8	III	III	III	III	IV	IV	IV	IV	V	V
		7	II	III	III	III	III	IV	IV	IV	V	V
	mittel	6	II	II	III	III	III	III	IV	IV	IV	IV
		5	II	II	II	III	III	III	III	IV	IV	IV
		4	II	II	II	II	III	III	III	III	IV	IV
	gering	3	I	II	II	II	II	III	III	III	III	IV
		2	I	I	II	II	II	II	III	III	III	III
	unwahrscheinlich	1	I	I	I	II	II	II	II	III	III	III
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
		sehr gering	gering		mittel / störend			hoch / kritisch		katastro- phal		
		Schadensausmaß/ Auswirkung (S)										

Abb. 5.4 Beispiel einer Risikomatrix

Abb. 5.5 Skalierung des Risikos

Risiko	Kategorie		Maßnahmen zur Risikominimierung
I	vernachlässigbar	tolerierbar	nicht erforderlich
II	gering	tolerierbar	möglich aber nicht erforderlich
III	mittel	bedingt tolerierbar	erforderlich
IV	hoch	nicht tolerierbar	dringend erforderlich
V	sehr hoch	nicht tolerierbar	dringend erforderlich

Die Bewertung mittels Risikoindizes ist nicht auf die bisher genannten Merkmale Häufigkeit, Schadensausmaß und Erkennbarkeit beschränkt. In die Methode können, bei Bedarf, weitere Merkmale einbezogen werden. Dies erfordert jedoch ein gutes Verständnis hinsichtlich Art (Wirkungsmechanismus) und Umfang in dem das betrachtete Merkmal zu dem Gesamtrisiko beiträgt.

Durch die Zusammenfassung verschiedenster Merkmale in eine Kennzahl ermöglichen Risiko Indizes den Vergleich und die Priorisierung von Risiken unterschiedlicher Ausprägung. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Wahl der ordinalen Skalen willkürlich erfolgt. Daher ist in jedem Fall die Anwendbarkeit und Validität der verwendeten Skalen im jeweiligen Anwendungsfall nachzuweisen. Unterbleibt dies, besteht die Gefahr, dass das erhaltene Ergebnis nicht interpretierbar ist.

5.4.2 Risikomatrix

Im mathematischen Sinne ist die Bildung eines Risikoindex (z.B. RPZ) durch Multiplikation der skalierten Einzelmerkmale problematisch, da zum einen die verwendeten Rangskalen nicht zwingend äquidistant sind und eine Multiplikation der ordinal skalierten Merkmale streng mathematisch nicht definiert ist. Eine in vielen Normen angewandte Alternative ist die Risikobeurteilung mit einer Risikomatrix.

Bei der Methode der Risikomatrix werden zunächst, wie bei der Bestimmung des Risikoindex, die Merkmale Auswirkung (Risikostärke) und Auftretswahrscheinlichkeit anhand von Skalen eingeteilt. Die Skalen der Merkmale werden in einer Zuordnungsmatrix, der Risikomatrix, gegeneinander

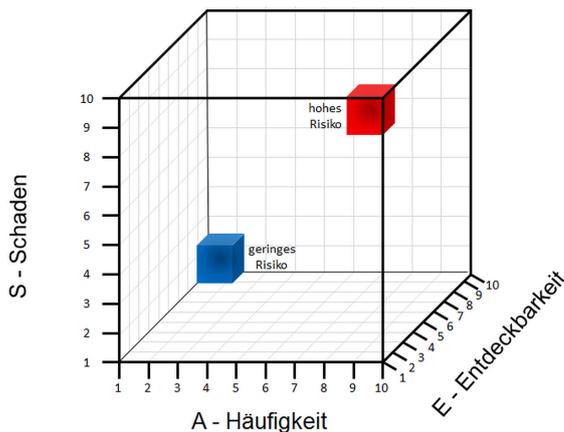


Abb. 5.6 Beispiel für eine mehrdimensionale Risiko Bewertung mittels Risikowürfel

aufgetragen (Bild 5.4). In einem weiteren Schritt, werden den einzelnen Matrixelementen (Zellen) Skalenergebnisse für das Risiko zugewiesen. Eine häufig angewandte Skalierung unterteilt die Risikomatrix in die drei Bereiche *Risiko tragbar*, *Handlungsbedarf* und *Risiko nicht tragbar*. Grundsätzlich ist auch eine detailliertere Abgrenzung möglich.

Den Vorteilen eines schnellen und einfachen Verfahrens stehen die Notwendigkeit der Erstellung geeigneter Skalen als auch einer eindeutigen Risikomatrix gegenüber. Darüber hinaus wird das Ergebnis entscheidend von dem Detaillierungsgrad der vorhergehenden Risikoanalyse abhängig. Mit steigender Zahl betrachteter EMI-Szenarien wird die Häufigkeit jedes einzelnen EMI-Szenarios abnehmen. Als Folge kann es zu einer Unterschätzung des tatsächlichen Risikos kommen.

In Anlehnung an die Risikobewertung mit der Risikoprioritätszahl lässt sich die Risikomatrix, unter Einbeziehung des Merkmals Erkennbarkeit, auf einen Risikowürfel¹² erweitern (siehe Bild 5.6).

5.4.3 Risikovektor

In Abschnitt 2.3¹³ wird das Risiko absichtlicher Beeinflussungen als Menge der Einzelrisiken beschrieben durch das Tupel aus dem Bedrohungsszenario s_i , der aus diesem folgenden Konsequenzen c_i und der bestehenden Unsicherheiten u_i .

$$r = \{r_i\} = \{(s_i, c_i, u_i)\}, \quad i = 1, \dots, N \quad (5.3)$$

Hierbei beschreibt die Unsicherheit die Wahrscheinlichkeit, dass ein Szenario s_i und die Auswirkungen c_i eintreten.

In Bezug auf die Bewertung des Einzelrisikos hinsichtlich der zu Beginn dieses Abschnittes genannten Kriterien beinhaltet das Einzelszenario s_i keinen Beitrag, da es sich hierbei ausschließlich um die Beschreibung des Szenarios handelt. Somit verbleiben für die Bewertung die Aspekte Konsequenzen c_i und Unsicherheit u_i . Basierend auf den vorstehenden Erörterungen bietet es sich an, für die Bewertung die Unsicherheit in die Einzelaspekte

- Eintrittswahrscheinlichkeit p_{s_i} des Einzelszenarios s_i ,
- Eintrittswahrscheinlichkeit p_{c_i} der Konsequenz c_i und

¹² engl.: Risk Cube

¹³ Seite 9

- Wahrscheinlichkeit $p_e(s_i, c_i)$, mit die Beeinflussung oder der Primäreffekt in dem Szenario s_i vor dem Eintreten der Konsequenz c_i entdeckt werden kann

zu unterteilen. Durch diese Unterteilung ergibt sich für jedes Einzelrisiko der Risikovektor

$$r_i = [s_i, c_i, p_{s_i}, p_{c_i}, p_e(s_i, c_i)] \quad (5.4)$$

In diesem Risikovektor können die Merkmale *Konsequenz* und *Wahrscheinlichkeit* über die bekannten Skalen¹⁴ quantifiziert werden. Anhand der quantifizierten Merkmale kann abschließend das Risiko den in Tabelle 5.5 aufgetragenen Risikoklassen zugeordnet werden.

Im Allgemeinen entsprechen die Bewertungsregeln einer mehrdimensionalen Risikomatrix. Durch die detaillierter Untergliederung der Wahrscheinlichkeiten lassen sich bei dem Risikovektor jedoch sehr selten eintretende Szenarien mit Hilfe geeigneter Bewertungsregeln bereits vor der Betrachtung der möglichen Konsequenzen einer niedrigen Risikoklasse zuordnen. Ein weiterer Vorteil des Risikovektors besteht darin, dass vorgegebene Konsequenzen (z.B. Personenschäden) sicher als nicht tolerierbar kategorisiert werden können. Dem höheren Detaillierungsgrad bei der Risikobewertung steht jedoch ein erhöhter Aufwand bei der Formulierung und Anwendung der benötigten Bewertungsregeln gegenüber.

5.5 Vergleich der Methoden zur Risikobeurteilung

Alle betrachteten Methoden zeichnen sich dadurch aus, dass die Risikobeurteilung durch eine Expertengruppe durchgeführt wird. Im Allgemeinen ist der Erfolg der Risikobeurteilung abhängig von der geeigneten Zusammensetzung der Gruppe, sowohl im Hinblick auf die Fachgebiete, dem Grad der Expertise als auch der Fähigkeit der Fachleute alle betroffenen Systembereiche kritisch zu hinterfragen. Neben Spezialisten für elektromagnetische Wechselwirkungen sind immer auch Experten des Systementwurfs sowie des Nutzers mit einzubeziehen. Im Vergleich zu den meisten Bewertungen z.B. der Elektromagnetischen Verträglichkeit erfordert die EMI-Risikobeurteilung somit einen interdisziplinären und systemorientierten Ansatz.

Die in Tabelle 5.17 aufgetragene Gegenüberstellung der Anwendungsbereiche der vorgestellten Methoden zur Risikobeurteilung zeigt, dass die Scenario Analysis, die HAZOP, die SWIFT und die TSECA für alle Anwendungsbereiche der Risikobeurteilung anwendbar sind. Demgegenüber sind die übrigen Methoden auf einen Anwendungsbereich (Identifikation, Analyse oder Bewertung)

Tabelle 5.17 Vergleich der Anwendungsbereiche der Methoden zur Risikobeurteilung

Abschnitt	Methode	Identifikation	Anwendungsbereich			Bewertung
			Auswirkung	Stärke	Häufigkeit	
5.2.1	PHL	++				
5.2.2	PHA	++	+			
5.3.1	Scenario Analysis	++	++	+	+	+
5.3.2	HAZOP	++	++	+	+	+
5.3.3	SWIFT	++	++	++	++	++
5.3.4	TSECA	++	++	++	++	++
5.3.5	Event Tree Analysis	+	++	+	+	
5.3.6	Bow Tie Analysis		+	++	++	+
5.4.1	Risiko Indizes					++
5.4.2	Risiko Matrix					++

+: anwendbar; ++: sehr gut anwendbar

¹⁴ Tabelle 5.13 (S. 61) und Tabelle 5.14 (S. 61)

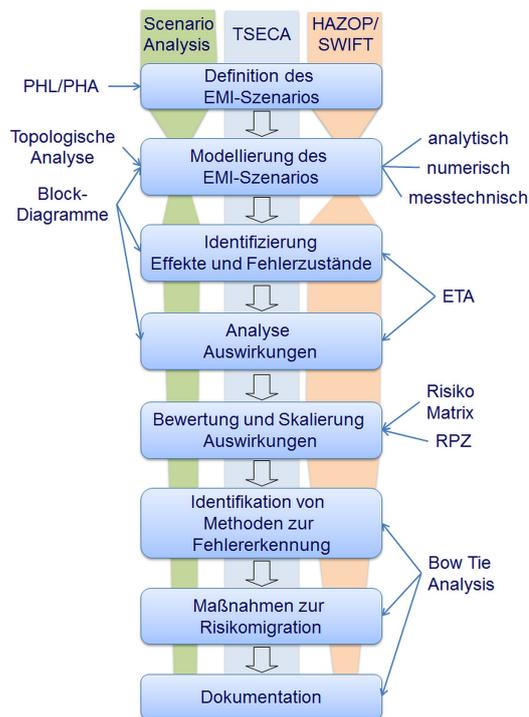


Abb. 5.7 Arbeitsschritte der Methoden zur Risikobeurteilung

optimiert. In diesem sind sie sehr gut anwendbar und zum Teil den mehr universiellen Methoden überlegen.

Der Vergleich der in allen Bereichen der Risikobeurteilung anwendbaren Methoden durchgeführten Tätigkeiten, zeigt das in diesen Methoden die Tätigkeitsschritte:

1. Definition des EMI-Szenarios,
2. Modellierung des EMI-Szenarios,
3. Identifizierung der Effekte und Fehlerzustände,
4. Analyse der Auswirkungen,
5. Bewertung und Skalierung der Auswirkungen,
6. Identifikation von Methoden zur Fehlererkennung,
7. Maßnahmen zur Risikomigration,
8. Dokumentation.

durchlaufen werden. Die einzelnen Tätigkeitsschritte sind bei den verschiedenen Verfahren unterschiedlich stark ausgeprägt und formalisiert. In der graphischen Darstellung (Bild 5.7) ist dies durch die Breite der farbigen Säulen angedeutet. Die durchgehend gleichbleibende Breite der blauen Säule deutet somit an, dass die TSECA die Abarbeitung aller Tätigkeiten in gleicher Intensität erfordert. Als qualitative Verfahren ist bei der HAZOP, der SWIFT und der Scenario Analysis die Tätigkeit Modellierung des EMI-Szenarios weniger stark ausgebildet¹⁵. Bei diesen Verfahren steht die Expertendiskussion im Vordergrund, so dass eine formale Modellierung der betrachteten EMI-Szenarien im Rahmen der Expertendiskussion möglich, jedoch nicht explizit gefordert ist. Hierbei ist zu beachten, dass die formale Forderung der Modellbildung in einer späteren Phase des Produktlebenszyklus die Gefahr einer zu starken Fokussierung auf Details beinhaltet.

¹⁵ Die grüne als auch die rote Säule sind daher an dieser Stelle dünner.

Wie in Bild 5.7 angedeutet ist, kann eine umfassende Methode (z.B. TSECA) bei der Bearbeitung der einzelnen Tätigkeiten auf spezialisierte (partikuläre) Methoden zurückgreifen. So ist es empfehlenswert bei der systematischen Definition des EMI-Szenarios die PHL oder die PHA anzuwenden. Gleichsam kann es sinnvoll sein zur Identifizierung von Effekten und deren Auswirkungen eine Ereignisbaumanalyse (ETA) durchzuführen.

Die in Bild 5.7 aufgetragenen Tätigkeitsschritte stellen die, von Methoden unabhängige, Grundstruktur der Risikobeurteilung dar.

Kapitel 6

EMI-Szenarien

Zusammenfassung Die Risikobeurteilung beginnt in allen Analysemethoden mit der Spezifikation der zu betrachtenden EMI-Szenarien. Mit dem Ziel der systematischen Erfassung und Darstellung aller relevanten EMI-Szenarien wird in diesem Kapitel eine Datenstruktur für EMI-Szenarien spezifiziert. Zuerst wird der Begriff des EMI-Szenarios näher abgegrenzt und das bekannte Störkopplungsmodell um eine menschliche Dimension erweitert. Durch die Untergliederung des so erweiterten Störkopplungsmodells in seine wesentlichen Bereiche resultiert die Grundstruktur des Datenmodells für EMI-Szenarien. In der zweiten Hälfte des Kapitels werden einzelne Aspekte der abgeleiteten Datenstruktur diskutiert und, wo möglich, Bewertungsskalen eingeführt. Abschließend wird als Alternative zur individuellen Expertenbefragung das Modell eines generischen Angreifers abgeleitet. Basierend auf einer Auswertung dokumentierter IEMI-Attacken in Kombination mit verfügbaren statistischen Daten sowie einer umfassenden Befragung einschlägiger Experten werden für die einem generischen Angreifer verfügbaren Kenntnisse, finanzielle Ressourcen und Zugang Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmt.

Nach der im vorherigen Kapitel herausgearbeiteten Grundstruktur beginnt die Risikobeurteilung mit dem Tätigkeitsschritt *Definition des EMI-Szenarios*. Allgemein stellt ein EMI-Szenario eine Situation dar, in der das betrachtete Zielsystem einer bewusst gewollten oder unbeabsichtigten elektromagnetischen Exposition ausgesetzt ist. Im Sinne eines umfassenden Risikomanagements¹ ist es nicht ausreichend, nur ein Szenario zu analysieren. Vielmehr muss eine repräsentative Stichprobe der möglichen EMI-Szenarien erfasst, analysiert und bewertet werden. Präzise formuliert, sind im ersten Tätigkeitsschritt die zu beurteilenden EMI-Szenarien zu spezifizieren.

In diesem Zusammenhang tritt unmittelbar die Fragestellung auf, welche Parameter notwendig sind, um die Szenarien hinreichend zu charakterisieren. Der erste Abschnitt dieses Kapitels befasst sich daher mit der Definition eines Schemas zur systematischen Erfassung und Darstellung der EMI-Szenarien.

6.1 Definition der EMI-Szenarien

In seiner allgemeinen Bedeutung beschreibt der Begriff EMI-Szenario die angenommenen Umstände, in denen das betrachtete Zielsystem einer elektromagnetischen Exposition ausgesetzt ist und das

¹ Abschnitt 4.1, Grundsatz i: *Risikomanagement ist transparent und umfassend.*

Risiko einer hierdurch hervorgerufenen Funktionsstörung oder Zerstörung besteht. In Abbildung 6.1 ist ein fiktives Beispiel eines EMI-Szenarios dargestellt. In diesem Beispiel wird angenommen, dass ein Zielsystem in einer höheren Etage eines Bürohochhauses durch eine HPEM Quelle, die sich auf dem Parkplatz vor dem Bürohochhaus befindet, bestrahlt wird. Es ist leicht ersichtlich, dass die in der Abbildung enthaltenen Informationen nicht ausreichen um eine Risikoanalyse durchzuführen. Im Sinne eines systematischen und transparenten Risikomanagements ist es vielmehr notwendig, die benötigten (technischen) Daten systematisch und geordnet zu erfassen und zu strukturieren.

In seiner Dissertation [44] definiert Genender ein Szenario als Kombination der Parameter *Quelle*, *Ort der Quelle* und *maximale Dauer der Exposition*. Diese Definition ist sehr stark auf die IEMI-Störquelle bezogen und enthält keinerlei Information über das Zielsystem sowie dessen Umgebung. Umwelteinflüsse, z.B. Reflexionen, Schirmungen sowie die Dämpfung durch Gebäude oder Vegetation, müssen bei der Modellbildung getrennt erfasst werden. Vorgegebene Funktionsanforderungen an das Zielsystem als auch dessen Betriebszustände, welche durch unterschiedlichen Störfestigkeitslevel charakterisiert sein können, sind ebenfalls nicht erfassbar. Darüber hinaus liegt der Wahl des Parameters *Abstand* die Annahme eines räumlich begrenzten (punktförmigen) Zielsystems zugrunde. Bei der Betrachtung kritischer Infrastrukturen ist in der Regel mit vernetzten und räumlich ausgedehnten Systemen zu rechnen, so dass ein Abstand zwischen Zielsystem und Störquelle nicht mehr eindeutig definierbar ist.

Bei der Beschreibung der TSECA² wurde eine umfassendere Definition für das EMI-Szenario angewandt:

Das **EMI-Szenario** umfasst die Beschreibung und räumliche Anordnung möglicher EMI-Quellen, des betrachteten Zielsystems als auch von Objekten, welche die Ausbreitung des elektromagnetischen Feldes beeinflussen. (siehe Abschnitt 5.3.4)

Diese Definition basiert auf dem im Abschnitt 2.2 vorgestellte Modell der elektromagnetischen Störbeeinflussung. Aus dieser, weiter gefassten, Definition folgt, dass bei der Spezifikation eines



Abb. 6.1 Fiktives Beispiel eines IEMI-Szenarios

² Abschnitt 5.3.4

EMI-Szenarios die Elemente Störquelle (EMI-Störer), Kopplungskanal und Senke (Zielsystem) zu beschreiben sind. Bei der Risikobeurteilung sind jedoch nicht nur die elektromagnetische Kopplung zwischen einer Störquelle und dem Zielsystem, sondern auch die Wahrscheinlichkeit des betrachteten EMI-Szenarios als auch die Auswirkungen der auftretenden Effekte mit zu berücksichtigen. Die Motivation des Angreifers, seine Fähigkeiten und die ihm zugänglichen Ressourcen beeinflussen in erheblichem Umfang die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Störquelle in der Umgebung des betrachteten Zielsystems auftritt. Der Nutzer gibt durch die von ihm erwartete Funktionalität und dem Anwendungskontext vor, ob und welche Störungen bzw. Auswirkungen tolerierbar sind. Die Schwere der Auswirkungen auftretender Effekte ergibt sich erst aus der Bewertung der Effekte in Bezug auf die vom Nutzer erwartete Funktionalität unter Berücksichtigung der Randbedingungen des jeweiligen Anwendungskontextes. Wird z.B. ein Computer für Büroanwendungen genutzt, führen Signalstörungen in der Regel nur zu einer Verringerung der Datenübertragungsrate, Textfehlern oder Störungen bei der Darstellung. Durch die Nutzung des gleichen Computers zur Steuerung chemischer Prozesse können auftretende Signalstörungen katastrophale Folgen haben. Die soeben diskutierten Aspekte führen unmittelbar zu der Definition:

Bei der EMI-Risikobeurteilung sind neben den **technischen Aspekte** eines EMI-Szenarios (elektromagnetisches Verhalten der Störquelle, elektromagnetische Modellierung des Kopplungspfades und Reaktion des Zielsystems) auch **nicht-technische Aspekte** (Zugänglichkeit des Zielsystems, Mobilität und Verfügbarkeit der Störquelle, Fähigkeiten des Angreifers, ...) sowie die zugehörigen **Wahrscheinlichkeiten gleichwertig zu berücksichtigen**.

Aus dieser Definition folgt, dass das Modell der elektromagnetischen Störbeeinflussung³ um eine menschliche Dimension erweitert werden muss. Das so erweiterte Modell (Abbildung 6.2) beinhaltet alle Aspekte die im Zuge eines EMI-Risikomanagements zu erfassen und zu betrachten sind. In der *technischen Dimension* sind dies die Elemente des bekannten Störmodells (Störquelle, Störkanal und Störse/nke/Zielsystem) erweitert um die auftretenden (Stör-)Effekte. Orthogonal hierzu sind in der *menschlichen Dimension* der *Angreifer*, mit seiner Motivation, seinen Ressourcen und Fähigkeiten und der *Nutzer*, mit seinen Erwartungen hinsichtlich Funktionalität und Leistungsfähigkeit des Zielsystems, dargestellt.

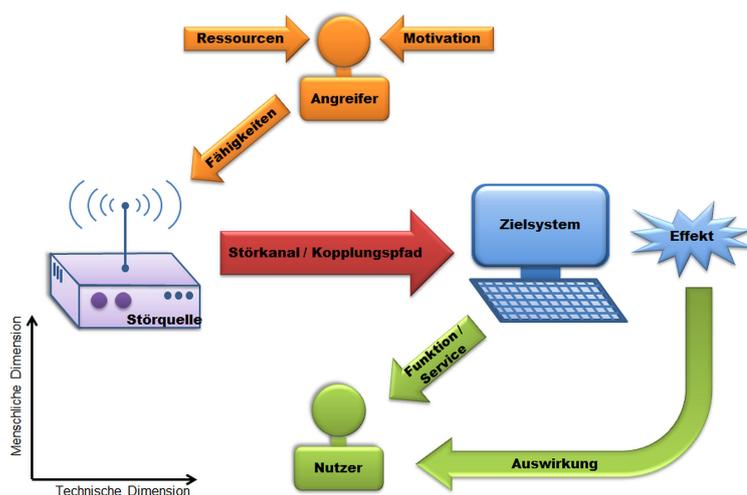


Abb. 6.2 Erweitertes Modell eines EMI-Szenarios

³ siehe Abschnitt 3.2.2, Seite 25

In Abbildung 6.2 ist das erweiterte Modell durch die farbliche Gestaltung in die fünf Bereiche:

- Nutzer,
- Zielsystem,
- Störkanal / Kopplungspfad,
- Störquelle und
- Angreifer.

untergliedert. Bei der Spezifikation von EMI-Szenarien sind Informationen zu diesen fünf Bereichen zu erfassen bzw. im Zuge der Risikobeurteilung zu ermitteln. Im Sinne eines systematischen, transparenten und umfassenden EMI-Risikomanagements ist es daher sinnvoll, das Informationsdatenschema eines EMI-Szenarios auf die, durch diese fünf Bereiche gebildete, Grundstruktur aufzubauen.

In der Regel beinhaltet die Spezifikation elektrischer und elektronischer Systeme eine Beschreibung ihrer Funktionalität, der wesentlichen Leistungsparameter und Betriebsbedingungen. Da sich in diesen Daten die Anwendung als auch die Erwartungen des Nutzers hinsichtlich Funktionalität und Leistungsfähigkeit widerspiegeln ist es sinnvoll, zur Vermeidung einer Doppelung von Informationen, die Bereiche Nutzer und Zielsystem zusammenzufassen. Im Gegensatz hierzu lässt sich der Bereich Störkanal / Kopplungspfad nicht oder nur sehr schwer in einem Datenblock erfassen, da der Kopplungspfad den Ort der Störquelle, die räumliche Anordnung des Zielsystems als auch die Umgebung des Zielsystems umfasst. Zur klareren Strukturierung des Schemas sollten der Ort der Störquelle dem Datenblock *Störquelle*

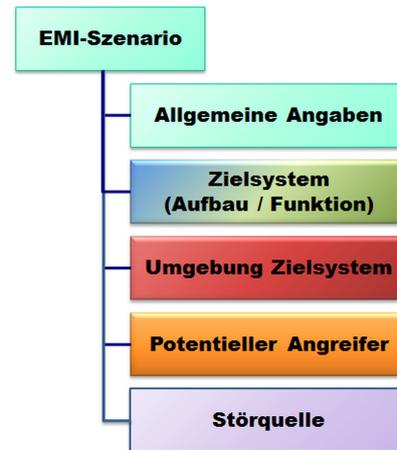


Abb. 6.3 Grundstruktur eines EMI-Szenarios

und die räumliche Anordnung des Zielsystems dem Datenblock *Zielsystem* zugeordnet werden. Aus dem Bereich Störkanal / Kopplungspfad verbleibt somit die Beschreibung der Umgebung des Zielsystems als eigenständiger Datenblock. Aus den dargelegten Erwägungen ergibt sich die in Abbildung 6.3 dargestellte Grundstruktur eines EMI-Szenarios.

Die inhaltlichen Datenblöcke (ohne *Allgemeine Angaben*) lassen sich in zwei inhaltliche Bereiche unterteilen. Der Teil I (Tabelle 6.1, Seite 71) umfasst die Datenblöcke *Zielsystem* und *Umgebung Zielsystem*. Da der Nutzer als auch das zu betrachtende Zielsystem in der Regel zum Zeitpunkt der Risikobetrachtung bekannt sind, sind die im Rahmen der Definition des EMI-Szenarios zu erfassenden Aspekte dokumentiert (z.B. Blockschaltbild, Prozessablaufpläne, Baupläne, etc.) oder können im Rahmen einer Begehung des zu analysierenden Zielsystems / Bereiches erfasst werden. Im Gegensatz hierzu sind die Aspekte der im Teil II (Tabelle 6.4, Seite 75) zusammengefassten Datenblöcke *Potentieller Angreifer* und *Störquelle* vollständig unbekannt. Bei der Erstellung des EMI-Szenarios können daher bezüglich des Angreifers und der von diesem eingesetzte Störquelle nur allgemeinere Annahmen getroffen werden.

6.1.1 Datenblock *Allgemeine Angaben*

Der Datenblock *Allgemeine Angaben* beinhaltet mit der *Referenznummer* und der *Bezeichnung* Angaben die der Identifizierung und Nachverfolgung des jeweiligen Szenarios innerhalb des Risikomanagementprozesses dienen. Diese werden bei der Definition des EMI-Szenarios durch das bearbei-

Tabelle 6.1 Aspekte eines EMI-Szenarios (Teil I - Zielsystem & Umgebung Zielsystem)

Aspekt	Definition	Hinweis
Allgemeine Angaben		
Referenznummer	Nummer zur Identifikation des EMI-Szenarios	Wird zu Beginn der Definition des EMI-Szenarios
Bezeichnung	Bezeichnung des EMI-Szenarios	durch Expertenteam festgelegt.
Zielsystem		
Bezeichnung	Bezeichnung des zu analysierenden Zielsystems	Angabe durch Nutzer bzw. Auswertung Betriebshandbuch.
geforderte Funktion	Beschreibung der Haupt- und ggf. wichtigen Nebenfunktionen	Auswertung Systemspezifikation und technische
geforderte Leistungsfähigkeit	Angabe der Soll-Leistung als auch tolerierter Leistungsgrenzen (-einbrüche) oder geforderte Mindestleistung	Betriebsunterlagen.
Betriebszustände	Beschreibung der zu untersuchenden Betriebszustände (z.B. Betrieb, Wartung, Reparatur)	Auswertung technischer Dokumentation, insbesondere Prozessablaufpläne
Betriebsbedingungen	Beschreibung der wesentlichen Betriebsbedingungen (z.B. Umwelt, Stressfaktoren)	und Betriebshandbuch. Hinsichtlich Betriebsbedingungen ggf. Befragung des Nutzers.
Technologie	Charakterisierung des Technologielevel bzw. der Technologie	Auswertung der Systemdokumentation, Baupläne.
Gliederung bzw. Aufbau des Systems	Beschreibung der Untergliederung des Systems (z.B. Teilsysteme, Baugruppen, funktionale Einheiten) sowie deren funktionalen Zusammenhänge und Schnittstellen	Erfassung anhand <ul style="list-style-type: none"> • Baupläne • Blockschaltbilder • Prozessablaufpläne und Prozessbeschreibungen
Störfestigkeit	Angabe von Störpegeln und auftretende Effekte sowie betroffene Baugruppen	Erfassung soweit bekannt, ansonsten Schätzung oder Ermittlung im Rahmen der Risikoanalyse
Ort / räumliche Verteilung	räumliche Anordnung bzw. Verteilung des Zielsystems	Erfassung anhand <ul style="list-style-type: none"> • Baupläne • Lagepläne
Umgebung des Zielsystems		
Zugänglichkeit	Beschreibung der Zugänglichkeit zum Zielsystem / Zugangszonen / ggf. Zeichnung oder Abbildung	Erhebung der Daten durch Begehung. Klassifizierung der Bereiche nach Tabelle 6.3.
mögliche Koppelpfade	Beschreibung möglicher Einkopplungspfade elektromagnetischer Energie	Erhebung der Informationen durch Begehung sowie Auswertung von Lageplänen und Photos.
Streuobjekte	Streuobjekte in der Umgebung des Zielsystems	

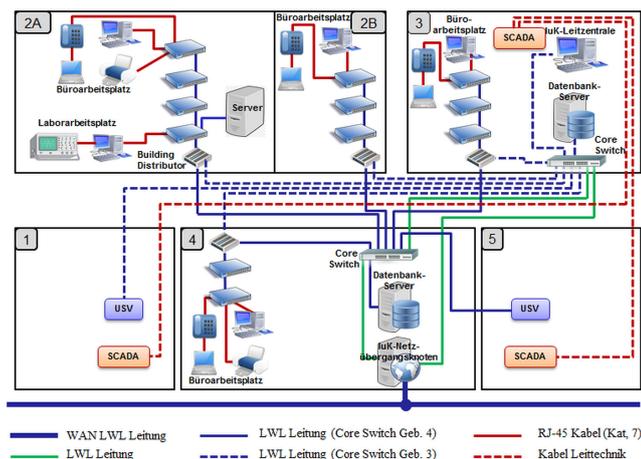
tende Expertenteam festgelegt. Durch diese Daten ist es möglich ein Szenario Phasen und Analyseschritt übergreifend nachzuverfolgen und einzelne Erkenntnisse sowie durchgeführte Maßnahmen den jeweiligen Szenarien zuzuordnen.

6.1.2 Datenblock Zielsystem

In dem Datenblock *Zielsystem* sind die Aspekte zur Beschreibung des zu analysierenden Zielsystems zusammengefasst. Der Datenblock beginnt mit der *Bezeichnung* des Zielsystems (zur Identifikation), gefolgt von einer Beschreibung der vom Nutzer geforderten *Haupt- und wichtigen Nebenfunktionen*. In Vorbereitung der Risikobetrachtung können auch Hinweise auf mögliche Auswirkungen bei Störung bzw. Ausfall der jeweiligen Funktion in die Beschreibung mit aufgenommen werden. Zur Bewertung eventuell auftretender Beeinträchtigung der beschriebenen Funktionen sind für diese die *geforderten Leistungsfähigkeiten* zu spezifizieren. Diese Angaben sollten die gewünschten SOLL-Parameter, die tolerierbaren Abweichungen und, wenn gefordert, die mindestens zu erbringenden Leistungen umfassen. In Abhängigkeit von der betrachteten Lebenszyklusphase, den verfügbaren Unterlagen als auch der Funktionalität selber kann die Beschreibung der geforderten Leistungsfähigkeit sowohl in Textform als auch anhand charakteristischer Prozessparameter erfolgen. Darüber hinaus sind die zu betrachtenden *Betriebszustände* (einschließlich Wartung und Reparatur) sowie allgemeine und für die jeweiligen Betriebszustände spezifischen *Betriebsbedingungen* (z.B. Umgebungstemperaturen, Umwelt, elektromagnetische Umwelt) zu erfassen. In der Regel können die hierzu benötigten Informationen der Systemdokumentation, wie z.B. der Systemspezifikation, dem Betriebshandbuch oder den Bauplänen, entnommen werden.

Die letzten vier Aspekte *Technologie, Aufbau und Gliederung des Zielsystems, Störfestigkeit* sowie *Ort und räumliche Verteilung* dienen der Sammlung von Informationen, die für die Erstellung des elektromagnetischen Einkopplungsmodells, des Störmodells (Verhaltensmodell der Teilsysteme/Komponenten) und des funktionalen Blockmodells benötigt werden. Hierbei ist das Zielsystem so in Teilsysteme zu untergliedern, dass für jedes Teilsysteme eine Abbildung der Umgebungsbedingungen (Feldsignale, Spannungen oder Ströme) auf Funktionsstörungen, Fehlerbilder und Zerstörungen möglich ist. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Begrenzung des Analyseaufwandes sollte für diese Teilsysteme und Baugruppen keine weitere Untergliederung vorgenommen werden. In vielen Fällen sind hinsichtlich der Störfestigkeit des Zielsystems und seiner Baugruppen keine Daten vorhanden. Diese sind dann im Zuge der Risikoanalyse in geeigneter Weise abzuschätzen, z.B. mit Hilfe generischer Daten, Erfahrungswerten oder anhand von Messungen zu ermitteln.

Die Beschreibung der Untergliederung des Zielsystems, dessen funktionalen Zusammenhänge, Prozessabläufe, Schnittstellen und die räumliche Anordnung sollte die textlichen Beschreibung



SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition System

Abb. 6.4 Informations- und Kommunikationsetz einer fiktiven Infrastruktur

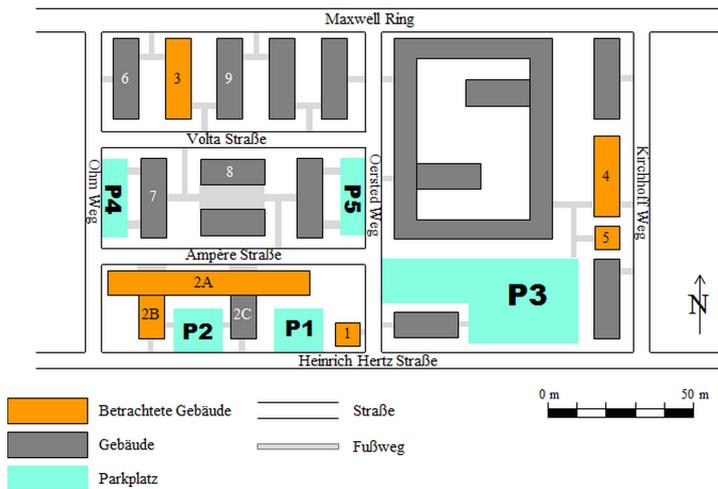


Abb. 6.5 Lageplan fiktiven Infrastruktursystems

Tabelle 6.2 Beispiel: Aufbau und räumliche Verteilung einer fiktiven Infrastruktur

Gebäude	Bauweise	Zugänglichkeit	Teilsystem / Baugruppe
1	Einstöckig, Backstein gemauert	beschränkter Zugang ($A_z = 4i$)	Campus Energieversorgung (SDF) und Leittechnik
2A	Vierstöckig, aussen Stahlbeton, innen Trockenbau	Erdgeschoss & 1. Stock: frei zugänglich in einem Gebäude ($A_z = 1i$) 3. & 4. Stock: überwachter Zugang in einem Gebäude ($A_z = 2i$)	Büro- und Laborgebäude Server und PCs
2B	Dreistöckig, aussen Stahlbeton, innen Trockenbau	frei zugänglich in einem Gebäude ($A_z = 1i$)	Bürogebäude
3	Dreistöckig, Massivbau, Kalksandstein gemauert	kontrollierter Zugang in einem Gebäude ($A_z = 3i$)	Datenbankserver II, technische Leitzentrale
4	Zweistöckig, Stahlskelett mit Glas/Metallfassade, innen Trockenbau	beschränkter Zugang ($A_z = 4i$)	Anschaltknoten des IT-Netzes, Campus Distributor, Datenbankserver I, Rechenzentrum

Hinweis: Skala der Zugänglichkeit (A_z) siehe Tabelle 6.3, Seite 74

(s. Tab. 6.2) durch zugehörige graphische Darstellungen, wie Prozessablaufpläne, Blockschaltbilder (s. Abb. 6.4), Bau- und Lagepläne (s. Abb. 6.5), hinterlegt werden.

6.1.3 Datenblock Umgebung Zielsystem

Die im Datenblock *Umgebung Zielsystem* aufgetragenen Aspekte beschreiben die Umgebung des Zielsystems. Unter dem Aspekt *Zugänglichkeit* sind die baulichen (Wände, Zäune, ...) und organisatorischen (Überwachungen, Zugangskontrollen bzw. Zugangsbeschränkungen) Umgebungsbedingungen zu erfassen. In Tabelle 6.2 sind die *Zugänglichkeit* als auch die *bauliche Umgebung* beispielhaft für eine fiktive Infrastruktur aufgetragen. In [80] schlägt Mansson vor, Zielsysteme und ihre Umgebung hinsichtlich der Zugänglichkeit zu bewerten und Orte gleicher Zugänglichkeiten zu Zonen zusammenzufassen. Genender greift diese Idee in [44, 25] auf und verknüpft die Zugänglichkeit mit der Mobilität von EMI-Störquellen. Basierend hierauf kann er im Zuge der Risikoanalyse durch

Tabelle 6.3 Kategorisierung der Zugänglichkeit (A_z)

A_z	Zugänglichkeit	im Freien	im Gebäude	Definition
1o	frei	x		Bereich der allgemeinen Öffentlichkeit (im Freien) der jeder Person ohne besonderen Aufwand oder Überwachung zugänglich ist.
1i	frei		x	Bereich in einem Gebäude der jeder Person ohne besonderen Aufwand oder Überwachung zugänglich ist.
2o	überwacht	x		Bereich der allgemeinen Öffentlichkeit, dessen Zugang jedoch überwacht (beobachtet) wird oder werden kann.
2i	überwacht		x	Bereich in einem Gebäude, dessen Zugang jedoch überwacht (beobachtet) wird oder werden kann.
3o	kontrolliert	x		Bereich im Freien, der nur nach einer Identitätskontrolle betreten werden kann
3i	kontrolliert		x	Bereich in einem Gebäude, der nur nach einer Identitätskontrolle betreten werden kann
4o	beschränkt	x		Kontrollbereich im Freien, der nur von autorisierten Personen oder nach einer Taschenkontrolle betreten werden kann.
4i	beschränkt		x	Kontrollbereich in einem Gebäude, der nur von autorisierten Personen oder nach einer Taschenkontrolle betreten werden kann.

den Vergleich der Zugänglichkeit mit der Mobilität⁴ einer betrachteten Störquelle abgeschätzt werden bis zu welchem Abstand sich die Störquelle dem Zielsystem nähern kann.

Die von Genender vorgeschlagene Skala berücksichtigt jedoch nicht, ob der betrachtete Bereich im Freien oder innerhalb eines Gebäudes liegt. Die Lage eines betrachteten Bereiches innerhalb eines Gebäudes stellt eine wesentliche Einschränkung hinsichtlich der Baugröße der Störquelle bzw. ihrer Mobilität dar. In Tabelle 6.3 ist ein erweitertes Kategorisierungsschema dargestellt, welches diesen Aspekt mit berücksichtigt. Dieses wurde bei der Bewertung der Zugänglichkeit im Beispiel einer fiktiven Infrastruktur (Tab. 6.2, S. 73) bereits angewandt. In diesem Beispiel müssten für eine vollständige Datenerfassung die ausgewiesenen Parkflächen (P1 - P5 in Abb. 6.5, Seite 73) noch hinsichtlich ihrer Zugänglichkeit bewertet sowie die Entfernungen zu den betrachteten Gebäuden ermittelt werden.

Neben der Zugänglichkeit sind erkannte *mögliche Koppelpfade* (zwischen Störquelle und Zielsystem) zu erfassen und zu charakterisieren. Diese sind bei der Erstellung des elektrodynamischen Einkopplungsmodells zwingend zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind Objekte in der Umgebung des Zielsystems, die für die Ausbreitung des elektromagnetischen Feldes bedeutsam sind (z.B. Wände, Abschirmungen, Fahrzeuge, ...), unter dem Aspekt *Streueobjekte* zu dokumentieren. Bei der Bewertung der Dämpfung durch sowohl die bauliche Umgebung des Zielsystems als auch die durch benachbarter Gebäude kann, soweit keine aktuellen Daten vorliegen, auf öffentlich zugängliche Daten zurückgegriffen werden. Eine nützliche Literaturquelle ist in diesem Zusammenhang die vom BSI herausgegebene Technische Richtlinie *Elektromagnetische Schirmung von Gebäuden* [81].

6.1.4 Datenblock Potentielle Angreifer

Im Gegensatz zum betrachtenden Zielsystem und dessen Umgebung sind zum Zeitpunkt der Durchführung der Risikobeurteilung der potentielle Angreifer und die von diesem eingesetzte Störquellen vollständig unbekannt. Aufgrund der geringen Zahl dokumentierter IEMI-Attacken kann das mit der Risikobeurteilung beauftragte Expertenteam zudem nicht auf historische Daten zurückgreifen. Bei der Erstellung des EMI-Szenarios können bezüglich des Angreifers daher nur allgemeinere Annahmen, auf der Basis der Expertenmeinung [73, 82], getroffen werden. Wesentliche zu treffende

⁴ Ein Kategorisierungsschema für die Baugröße und die Mobilität einer IEMI-Störquelle ist in Tabelle 7.3 auf Seite 89 aufgetragen.

Tabelle 6.4 Aspekte eines EMI-Szenarios (Teil II - Angreifer & Störquelle)

Aspekt	Definition	Hinweis
Potentieller Angreifer		
Typ	interner Angreifer; externer Angreifer	Festlegung durch Auftraggeber bzw. Expertengruppe
Kenntnisse	Kenntnisse des Angreifers in Bezug auf den Bau und den Betrieb der Störquelle	Schätzung durch die Expertengruppe bzw. Übernahme der Daten des generischen Angreifer (s. Abschnitt 6.2, Seite 77)
finanzielle Ressourcen	Abschätzung des Umfangs der Finanzmittel über die der Angreifer verfügt oder zu denen dieser Zugang hat.	
Zugang	Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, mit der der potentielle Angreif Zugang zu einem Bereich hat.	
Störquelle		
Bezeichnung	Bezeichnung der Störquelle bzw. der Störquellenklasse	Festlegung durch die Expertengruppe
Signalform / Bandbreite	Signalform bzw. Bandbreite des von der Störquelle abgestrahlten Feldsignals	Festlegung durch die Expertengruppe bei der Definition des EMI-Szenarios, unter Berücksichtigung der Eigenschaften bekannter Störquellen (Abschn. 8, Seite 133)
Frequenzbereich	Frequenzband in dem die Mittenfrequenz liegt	
Frequenzagilität	Durchstimmbarkeit der Quelle	
Leistung	Abgestrahlte Leistung	
Pulslänge	Länge des abgestrahlten Feldsignals	
Anstiegszeit (Impulsquelle)	Impulsanstiegszeit des abgestrahlten Feldsignals	
PRF	Wiederholfrequenz des des abgestrahlten Feldsignals	
Baugröße	Gesamte Baugröße der Störquelle	
Verfügbarkeit der Technologie	Die Verfügbarkeit charakterisiert den Aufwand für die Beschaffung der Störquelle oder ihrer Komponenten	
Benötigtes Fachwissen	Abschätzung des benötigten Fachwissens für Design, Bau und Betrieb der Störquelle	
Kosten	Abschätzung der Kosten für den Kauf oder den Bau der Störquelle	
Wahrscheinlichkeit P_{CU}	Wahrscheinlichkeit dass der generische Angreifer Zugang zu der Störquelle hat.	
mögliche Orte	Angabe von Orten an denen die Störquelle betrieben werden könnte	Bestimmung durch die Expertengruppe im Zuge der Risikoanalyse. (s. Kapitel 9, Seite 157)
Wahrscheinlichkeit P_{Io}	Auftrittswahrscheinlichkeit der Störquelle an den betrachteten Ort.	
Wahrscheinlichkeit P_{EMI}	Wahrscheinlichkeit mit der das betrachtete EMI-Szenario eintritt.	s. Abschnitt 9.2, Seite 162

Annahmen sind hierbei der *Typ*, also die Information ob es sich um einen internen oder externen Angreifer handelt, die *fachlichen Kenntnisse* des Angreifers, sowie die ihm verfügbaren *finanziellen Ressourcen*. Hierbei ist es in den meisten Fällen ausreichend die fachlichen Kenntnisse und die finanziellen Ressourcen anhand der in den Tabellen 6.6 und 6.7 aufgetragenen Skalen grob abzuschätzen.

Aus den technischen Fähigkeiten des potentiellen Angreifers als auch den ihm verfügbaren Ressourcen (Geld, technische Einrichtungen, Geräte, Zeit, etc.) lassen sich im Zuge der Risikoanalyse weitere Aspekte des EMI-Szenarios ableiten. Aus den einem Angreifer verfügbaren Ressourcen und seinen technischen Fähigkeiten lässt sich abschätzen, zu welchen Technologien dieser Zugang hat und welche Störquellentypen er wahrscheinlich einsetzen wird. Basierend auf dem genutzten Tech-

nologielevel der Störquelle ist es möglich Anhaltspunkte für die erzeugte Störleistung als auch die Baugröße der Störquelle abzuleiten.

In Sinne eines systematischen und umfassenden EMI-Risikomanagements sollte sich die Expertenmeinung auf mehr als einen Experten abstützen. In der Regel dürften aber nur sehr wenige Mitglieder des mit der Risikobeurteilung beauftragten Expertenteams über die hierfür nötige Expertise verfügen. Um nicht bei jeder Risikobeurteilung eine aufwändige Befragung externer Experten durchführen zu müssen wurde das Modell eines generischen Angreifers entwickelt. Das Generische Modell basiert auf einer Befragung einschlägiger Experten und umfasst Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Aspekte des Datenblocks *potentieller Angreifer*. Das Modell des generischen Angreifers stellt somit eine Alternative zur individuellen Expertenbefragung dar. Eine eingehende Vorstellung des generischen Angreifers erfolgt in Abschnitt 6.2.

6.1.5 Datenblock Störquelle

Aus den bereits dargelegten Gründen ist es praktisch nicht möglich, bei der Definition des EMI-Szenarios die Störquelle exakt zu spezifizieren. Darüber hinaus ist eine zu genaue Spezifizierung auch nicht erstrebenswert, da hierdurch die Aussage der Risikobeurteilung zu sehr auf eine einzelne Störquelle eingegrenzt würde. Bei der Definition des EMI-Szenarios sollte die potentielle Störquelle vielmehr so spezifiziert werden, dass die nachfolgenden Schritte Risikoanalyse und -bewertung mit hinreichender Genauigkeit durchgeführt und die hierbei gewonnenen Ergebnisse auf ähnliche Störquellen übertragen werden können. Wie bereits bei der Vorstellung der TSECA im Abschnitt 5.3.4⁵ diskutiert wurde, empfiehlt sich die die Zusammenfassung ähnlicher Störquellen zu EMI-Quellenklassen und deren Charakterisierung anhand eines generischen (Klassen-) Modells. Ein EMI-Szenario beinhaltet dabei jeweils nur eine EMI-Quellenklasse, bzw. nur einen *EMI-Szenario - Teil II*.

Sollen im Zuge des Risikomanagements mehrere EMI-Quellenklassen berücksichtigt werden, ist jede EMI-Quellenklassen ein *EMI-Szenario - Teil II* (Tabelle 6.4) zu erstellen, welches mit in Kombination mit dem unveränderten *EMI-Szenario - Teil I* (Tabelle 6.1) ein eigenständiges EMI-Szenario ergibt.

Die für eine Störquelle bzw. EMI-Quellenklasse spezifizierten Daten dienen dazu, im nachfolgenden Schritt der Risikoanalyse

- ein Modell der erzeugten elektromagnetischen Umgebung (abgestrahlte Feldstärke) zu erstellen,
- die Wahrscheinlichkeit, mit der der angenommen Angreifer (z.B. Generische Angreifer) Zugang zu der Störquelle hat, zu ermitteln und
- abzuschätzen, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Störquelle an die potentiellen Betriebsorte verbracht werden kann.

Die Aspekte *Signalform / Bandbreite, Frequenzbereich, Frequenzagilität, Leistung, Pulslänge* bzw. *Impulsanstiegszeit* sowie die *Pulswiederholfrequenz (PRF)* dienen der Modellierung der erzeugten elektromagnetischen Umgebung. Die *Baugröße* bestimmt entscheidend die Mobilität der Störquelle und somit die Wahrscheinlichkeit, mit der eine betrachtete Störquelle an einem Ort in der Umgebung des Zielsystems auftreten kann. Durch die Angabe *möglicher Orte* der Störquelle kann der Umfang der Risikobeurteilung eingeschränkt bzw. auf wesentliche Gefährdungspunkte fokussiert werden. Durch die *Verfügbarkeit der Technologie*, das *benötigte Fachwissen* und die *Kosten* lässt sich die Wahrscheinlichkeit, mit der der angenommen Angreifer (z.B. generische Angreifer) Zugang zu der Störquelle hat, bestimmen.

In Kapitel 7 werden charakteristische Eigenschaften von Technologien zum Bau von EMI-Störquellen diskutiert und hierauf aufbauend typische Werte für die im *EMI-Szenario-Teil II* auf-

⁵ Seite 54

geführten Aspekte abgeleitet. Weiterhin werden anhand der Technologie, dem Frequenzbereich sowie der Baugröße Leistungsgrenzen für mobile EMI-Störquellen abgeschätzt. Als erster Schritt einer Zusammenfassung zu EMI-Quellenklassen⁶ werden die jeweiligen Aspekte mit Hilfe der im Abschnitt 7.2 (Seite 88) vorgestellten Skalen klassifiziert.

6.2 Generischer Angreifer

Im Gegensatz zum *Nutzer*, der in der Regel zum Zeitpunkt der Analyse bekannt oder gut beschrieben ist, ist das zweite, in der menschlichen Dimension des erweiterten Störmodells (s. Abb. 6.3) aufgeführte, Element, der *Angreifer*, praktisch unbekannt. Bei der Spezifikation des IEMI-Szenarios müssen daher bezüglich seiner Beweggründe, Fähigkeiten und Ressourcen durch das Expertenteam Annahmen getroffen werden. Da in Bezug auf die meisten Aspekte historische Daten nicht im erforderlichen Umfang verfügbar sind, verbleibt bei der Definition des angenommenen potentiellen Angreifers nur der Rückgriff auf Expertenmeinungen. Bedingt durch die sehr begrenzte Zahl weltweit verfügbarer Experten, die über die notwendige Fachexpertise verfügen, ist eine umfassende Expertenbefragung mit erheblichen Aufwänden verbunden. Im Gegensatz hierzu ist die Konsultation weniger Experten mit geringem Aufwand verbunden, führt aber zu einem deutlichen Anstieg der Unsicherheit. Mit dem Ziel der Bereitstellung hinreichend abgesicherter Basisdaten für die Definition angenommenen potentiellen Angreifers wird in diesem Abschnitt das Modell eines *Generischen Angreifers* abgeleitet. Hierzu werden, basierend auf einer Auswertung dokumentierter IEMI-Attacks [83] als auch einer umfassenden Befragung einschlägiger Experten, für die im EMI-Szenario - Teil II⁷ aufgeführten Ressourcen *Kenntnisse*, *finanzielle Ressourcen* und *Zugang* Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmt. Das Modell des generischen Angreifers stellt somit eine Alternative zur individuellen Expertenbefragung dar.

Die für eine IEMI-Attacke ursächliche Eigenschaft des Angreifers ist seine Motivation. Eine diesbezügliche Auswertung der in der offenen Literatur dokumentierten IEMI-Attacks [83] ergab, dass in der überwiegenden Zahl der Angreifer mit seinem IEMI-Angriff (der IEMI Exposition) ein Ziel verfolgte, dass in einem inhaltlichem Zusammenhang mit der Anwendung (z.B. Störung eines Sicherungssystems) oder dem Nutzer (z.B. Schaden einer Firma bzw. Person) des beaufschlagten Zielsystems stand. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Diskussion hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Angreifer beabsichtigt eine IEMI-Attacke auf das betrachtete Zielsystem durchzuführen, eher dem Bereich der Sozialwissenschaften zuzuordnen ist und den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde. Da sich diese Arbeit auf technischer Aspekte des Risikomanagements fokussiert, wird auf die Beurteilung der Motivation des Angreifers nicht weiter eingegangen. Für die nachfolgenden Betrachtungen wird von dem Vorliegen einer IEMI-Attacke, als initiales Element des Szenarios, ausgegangen.

Im Rahmen des EMI-Risikomanagements wird eine (I)EMI-Attacke als initiales Element des EMI-Szenarios angenommen.

Neben der Motivation stellt der *Typ* des Angreifers, externer Angreifer (betriebsfremde Person) oder interner Angreifer (Mitarbeiter), eine weitere für die Risikobeurteilung wesentliche Eigenschaft dar. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass ein Betriebsfremder (externer Angreifer) kritische Betriebsparameter des Zielsystems (z.B. empfindliche Frequenzbereiche) auf der Basis offener Informationsquellen abschätzen muss. Insbesondere bei der Realisierung von Informations- und Kommunikationsnetzen führt die geringe Diversität marktverfügbarer Baugruppen in Kombi-

⁶ Eine Auswahl an EMI-Quellenklassen wird in Abschnitt 8.3 ab Seite 145 beschrieben.

⁷ Tabelle 6.4, Seite 75

Tabelle 6.5 Angenommene Wahrscheinlichkeiten, mit denen der Generische Angreifer Zugang zu Zugangsbereichen (Zonen) hat (s. Tab. 6.3)

Zugänglichkeit		interner Angreifer			externer Angreifer		
A_Z	Zugänglichkeit	$P_{A,in}$	Kategorie	Wahrscheinlichkeit	$P_{A,ex}$	Kategorie	Wahrscheinlichkeit
1o	frei	10	nahezu sicher	> 97 %	10	nahezu sicher	> 97 %
1i	überwacht	9	sehr hoch	90 % – 97 %	8	hoch	75 % – 90 %
2i							
3o	kontrolliert	7	hoch	50 % – 75 %	6	mittel	25 % – 50 %
3i							
4o	beschränkt	5	mittel	12 % – 25 %	3	gering	2 % – 5 %
4i							

Die Skala für die Wahrscheinlichkeiten ist in Tabelle 2.1 auf Seite 15 angegeben.

Tabelle 6.6 Kategorisierung der (Fach-) Kenntnisse

K_D	Kategorie Fachwissen	Beschreibung	Beispiel
1	Allgemeinwissen	ohne Fachkenntnisse	Laie
2	Grundverständnis	angelern	Hobbyelektroniker
3	Fachkenntnisse	Fachkraft mit abgeschlossener technischer Berufsausbildung	Handwerker, Elektroniker
4	Akademisches Wissen	Akademische Ausbildung und Berufserfahrung	Ingenieur
5	Expertenwissen	Experten mit profunder praktischer Erfahrung	Promotion

Tabelle 6.7 Kategorisierung der finanziellen Ressourcen / Kosten

C_{exp}	finanzielle Ressourcen	Beispiel	Kategorie Kosten
1	gering	< 1.000 €	geringe Kosten
2	durchschnittlich	1.000 - 10.000 €	moderate Kosten
3	überdurchschnittlich	10.000 - 100.000 €	erhöhte Kosten
4	hoch	0,1 - 1 Mio €	hohe Kosten
5	sehr hoch	> 1 Mio €	extreme Kosten

nation mit der zunehmenden Nutzung standardisierter Systeme dazu, dass ein informierter externer Angreifer Grundannahmen bezüglich des Aufbaus des Zielsystems treffen kann. Insgesamt betrachtet ist jedoch die Wahrscheinlichkeit begrenzt, dass die von ihm eingesetzte Störquelle die kritischen Parameter (Signalform, Frequenz, räumliche Anordnung) gezielt anspricht. Demgegenüber kann bei einem internen Angreifer angenommen werden, dass diesem kritische Parameter bekannt sind und durch die von ihm eingesetzte Störquelle mit hoher Wahrscheinlichkeit gezielt angesprochen werden.

Darüber hinaus hat ein Betriebsangehöriger (interner Angreifer) im Vergleich zum Betriebsfremden (externer Angreifer) mit einer höheren Wahrscheinlichkeit Zugang zu überwachten und kontrollierten Bereichen sowie Sperrzonen. In einem konkreten Fall sind die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten, mit denen ein interner bzw. externer Angreifer Zugang zu einem betrachteten Bereich (Zone) hat, durch Auswertung des Absicherungskonzeptes der betrachteten Infrastruktur (bzw. des Betriebes) zu ermitteln. In Tabelle 6.5 sind beispielhaft allgemeine Annahmen für die Wahrscheinlichkeit des Zugangs interner und externer Angreifer aufgelistet.

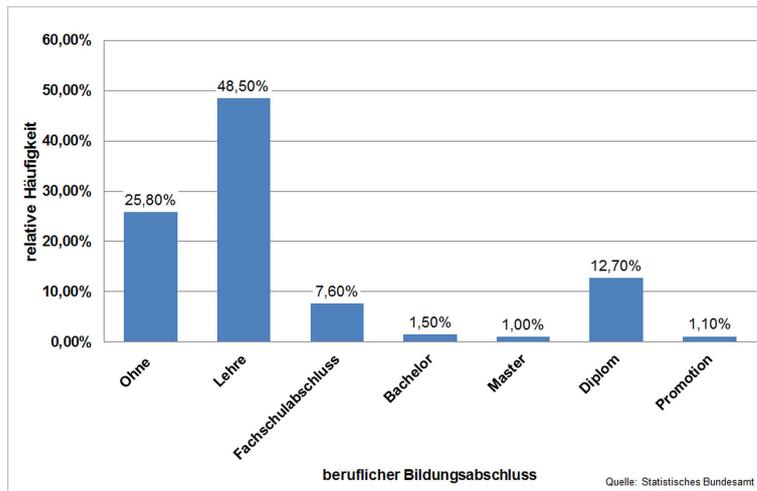


Abb. 6.6 Bevölkerung nach beruflichem Bildungsabschluss in Deutschland 2015 [84]

Wie bereits bei der Beschreibung des *Datenblocks potentieller Angreifer*⁸ angesprochen wurde, wird die bei einer IEMI-Attacke eingesetzte Technologie wesentlich durch das dem Angreifer verfügbare fachliche Wissen und Können sowie finanzielle Ressourcen bestimmt.

Zur Bewertung des, einem Angreifer verfügbaren, Fachwissens hat sich die in Tabelle 6.6 wiedergegebene Skala etabliert [20, 21]. In dem nachfolgenden Kapitel 7⁹ wird anhand ausgesuchter IEMI-Störquellen aufgezeigt, dass für den Entwurf, den Bau und den Betrieb dieser Quellen unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich des Fachwissens bestehen. Hierbei stellt der Entwurf und die Auslegung einer IEMI-Störquelle die höchsten und der Betrieb in aller Regel die niedrigsten Anforderungen hinsichtlich des Fachwissens und fachspezifischer Fertigkeiten. Mit Ausnahme des Wissens für den Betrieb einer Störquelle, muss der Angreifer jedoch nicht persönlich über das notwendige Fachwissen verfügen. Für den Einsatz einer Quelle höherer technologischer Stufe reicht es aus, wenn der Angreifer für die Beschaffung oder den Bau der Störquelle durch weitere Personen, die über die notwendigen Kenntnisse verfügen, unterstützt wird.

Die durch das Statistische Bundesamt veröffentlichte Verteilung unterschiedlicher Bildungsabschlüsse innerhalb der Bundesrepublik Deutschland [84] ist eine gute Ausgangsbasis für die Abschätzung mit welcher Wahrscheinlichkeit der generische Angreifer Zugang zu unterschiedlichen Stufen des Fachwissens haben könnte. Die Verteilung der beruflichen Bildungsabschlüsse in Deutschland für das Jahr 2015 ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Der Anteil ohne beruflichen Bildungsabschluss wird hierbei der Kategorie *Allgemeinwissen* ($K_D = 1$) zugeordnet. Die Kategorie *Grundverständnis* ($K_D = 2$) umfasst mit Hobbyelektroniker und angeleitete Kräfte ein Fachwissen, das keinem formalen beruflichen Bildungsabschluss entspricht. Dementsprechend enthält die Aufstellung des Statistischen Bundesamtes keine entsprechenden Angaben. Der Bevölkerungsanteil mit Lehre und der mit Fachschulabschluss werden in der Kategorie *Fachkenntnisse* ($K_D = 3$) zusammengefasst. Da die Übersicht des Statistischen Bundesamtes keine Angaben hinsichtlich der entsprechenden Berufserfahrungen enthalten, werden die Abschlüsse Bachelor, Master und Diplom der Kategorie *Akademisches Wissen* ($K_D = 4$) und die einschlägige Promotion der Kategorie *Expertenwissen* zugeordnet. Bei der Zuordnung wird innerhalb der beruflichen Bildungsabschlüsse nicht in Bezug auf technische und nicht-technische Ausbildungen unterschieden. Bei einer detaillierteren Betrachtung müssten zudem auch noch Aspekte wie fachliche Spezialisierung und Dauer der Berufserfahrung differenziert werden. Die getroffene Zuordnung stellt jedoch einen ersten Ansatz

⁸ siehe Seite 74

⁹ ab Seite 85

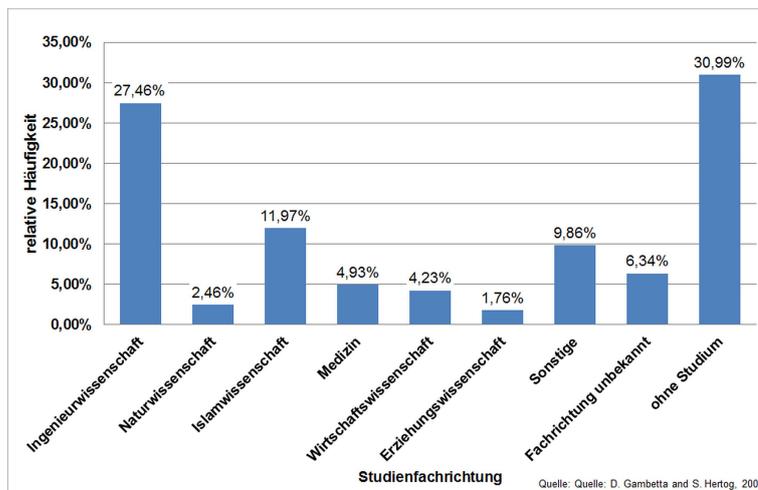


Abb. 6.7 Bildungshintergrund potentieller Angreifer [85]

hinsichtlich der einem Angreifer zugänglichen Fachkenntnisse dar. Wird nun vereinfachend angenommen, dass die höhere Kategorien des Fachwissens (z.B. Akademisches Fachwissen) das Wissen einer niedrigeren Kategorie (z.B. Allgemeinwissen oder Fachkenntnisse) beinhaltet, lassen sich die in Abbildung 6.8¹⁰ mit Dreiecken gekennzeichneten kumulierten Wahrscheinlichkeiten bestimmen.

Im Einzelfall kann die Verteilung des Fachwissens innerhalb der Gruppe potentieller Angreifer jedoch von der Verteilung in der Gesamtbevölkerung erheblich abweichen. So haben Gambetta und Hertog bei einer Studie zum Bildungsabschluss islamistischer Terroristen [85] herausgefunden, dass 60 % der analysierten Gruppe über einen akademischen Abschluss und nahezu die Hälfte hiervon (27 %) über einen Abschluss in Ingenieurwissenschaften verfügten (s. Abb. 6.7). Demgegenüber zeigte die Studie von Lochner und Moretti [86], dass die Mehrheit der Insassen in US Gefängnissen über keinen oder einen sehr niedrigen Bildungsabschluss verfügt.

In Bezug auf das, für den Bau und Betrieb von IEMI-Störquellen, benötigte Fachwissen sind die, hier nur schlaglichtartig, aufgezeigten statistischen Daten und soziologischen Studien nicht weit genug ausdifferenziert, um als alleinige Grundlage für eine Spezifikation potentieller IEMI-Bedrohungsszenarien zu dienen. Die statistischen Daten und Ergebnisse soziologischer Studien liefern jedoch Anhaltspunkte zur Verifikation der Expertenmeinung.

Da der Normungsausschuss *IEC SC 77C - High power transient phenomena* mit der Erarbeitung von Standards zum Schutz ziviler Geräte, Systeme, Einrichtungen und Infrastrukturen vor Gefährdungen durch IEMI-Umgebungen befasst ist, wurden dessen Mitglieder als geeignete Expertengruppe ausgewählt. Zur Ermittlung der Expertenmeinung wurden dessen Mitglieder gebeten, den in Tabelle 6.6 aufgeführten Wissenskategorien (K_D) einen Index P_K der kumulierte Wahrscheinlichkeit zuzuordnen. Von den angeschriebenen 23 Experten haben 10 auf die Umfrage geantwortet.

Die Ergebnisse der Expertenbefragung sind in Abbildung 6.8 dargestellt. Die grauen Balken bezeichnen hierbei den Bereich in dem die Antworten der Experten lagen. Die arithmetischen Mittelwerte der Expertenantworten sind mit Kreuzen gekennzeichnet. Die Dreiecke kennzeichnen die kumulierten Häufigkeiten, die aus den Angaben des Statistischen Bundesamtes bestimmt wurden. Hierbei ist leicht ersichtlich, dass die aus den statistischen Daten bestimmten Häufigkeiten sehr nahe an den Mittelwerten und ausnahmslos im Bereich der Expertenmeinung liegen. Der vergleichsweise hohe Antwortbereich bei der Wissenskategorie *Fachkenntnisse, Lehre* sind darin begründet, dass ausserhalb Europas die Ausbildung von Facharbeitern weniger formal geregelt ist, und somit nicht-europäische Experten diesbezüglich weniger Erfahrungen haben.

¹⁰ Seite 81

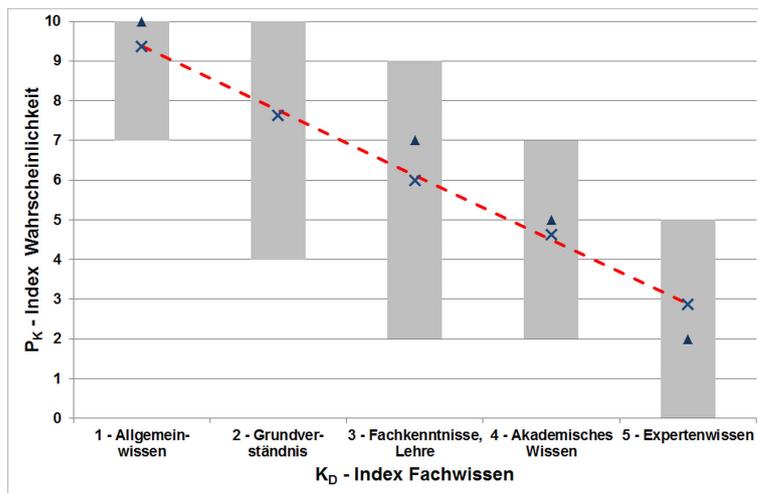


Abb. 6.8 Wahrscheinlichkeit, mit der ein durchschnittliche Angreifer über Kenntnisse der jeweiligen Kategorien verfügt. (Gestrichelte Linie: approximierte Wahrscheinlichkeitsverteilung des Generischen Angreifers (Gl. 6.2); graue Balken: Einschätzung durch Experten, Kreuze: arithmetische Mittelwerte, Dreiecke: kumulierte Häufigkeit des zugehörigen beruflichem Bildungsabschluss in Deutschland im Jahr 2015)

Aufgrund der Lage der arithmetischen Mittelwerte der Expertenschätzung wurde der Versuch unternommen, diese mit Hilfe einer linearen Funktion zu approximieren. Hierzu wurden der Index der Wissenskategorie als auch der Index der kumulierten Wahrscheinlichkeit als gewöhnliche Zahlen aufgefasst¹¹. Die Approximation der Mittelwerte führte auf die lineare Funktion:

$$P_K = 11 - \frac{13}{8}K_D \quad (6.1)$$

Der Verlauf dieser Funktion ist in Abbildung 6.8 durch die gestrichelte Linie wiedergegeben. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Gleichung 6.1 die Mittelwerte der Schätzung eines internationalen Expertenteams nachbildet, ist die Übereinstimmung mit den Daten für die Bundesrepublik Deutschland sehr gut. Im Rahmen des Risikomanagements kann die Gleichung 6.2 als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für das dem Angreifer zugänglichen Fachwissens genutzt werden. Eine hierzu alternative Form der Abbildung der kumulierten Wahrscheinlichkeit auf die Wissenskategorien ist die in Tabelle 6.8 aufgetragene Zuordnungstabelle. Die Tabelle 6.8 als auch die Funktion 6.2 beschreiben das dem generischen Angreifer verfügbare Fachwissen als Wahrscheinlichkeitsfunktion.

Bei der Nutzung der Gleichung 6.1 bzw. der Tabelle 6.8 sollte jedoch berücksichtigt werden, dass es sich hierbei um die Modellierung soziologischer Verhältnisse handelt, die sehr stark von kulturellen und regionalen Aspekten abhängen. Da die Verifikation mit statistischen Daten aus der Bundesrepublik Deutschland erfolgte, kann angenommen werden, dass die Gleichung 6.1 für Risikoanalysen innerhalb Europas anwendbar ist. Das Expertenteam bestand zum überwiegenden Teil aus Wissenschaftlern aus Europa und Nordamerika. Daher bedarf es vor einer Übertragung auf andere Regionen einer weiteren Verifikation mit regionalen statistischen Daten. Trotz dieser Einschränkungen ist es mit dem vorgestellten Ansatz erstmalig gelungen, soziologische Aspekte zu modellieren und in das EMI-Risikomanagement in geeigneter Form einzubringen.

Der letzte zu betrachtende Aspekt des generischen Angreifers sind die finanziellen Ressourcen, die er zur Vorbereitung und Durchführung eines IEMI-Angriffs einsetzen kann. Die Antworten der

¹¹ Im mathematisch strengen Sinne können Indizes und Skalen nicht über arithmetische Funktionen miteinander verknüpft werden, da es sich hierbei mathematisch nicht um Zahlen sondern nur um willkürlich gewählte Bezeichnungen handelt.

Tabelle 6.8 Kumulierte Wahrscheinlichkeiten, mit denen ein generische Angreifer über Fachwissen verfügt oder hierzu Zugang hat (s. Abb. 6.8)

Fachwissen	Fachwissen Kategorie	K_D	kumulierte Wahrscheinlichkeit		
			P_K	Kategorie	Wahrscheinlichkeit
Allgemeinwissen	ohne Fachkenntnisse	1	9	sehr hoch	90 % – 97 %
Grundverständnis	angelernt	2	7	hoch	50 % – 75 %
Fachkenntnisse	Fachkraft abgeschlossene tech- nische Berufsausbildung	3	6	mittel	25 % – 50 %
Akademisches Wissen	Akademische Ausbildung und Berufserfahrung	4	4	mittel	5 % – 12 %
Expertenwissen	Experte mit und profunder praktischer Erfahrung	5	3	gering	2 % – 5 %

Tabelle 6.9 Kumulierte Wahrscheinlichkeiten, mit denen ein generische Angreifer über finanzielle Ressourcen, für einen IEMI-Angriff, verfügt oder hierzu Zugang hat (s. Abb. 6.9)

finanzielle Ressourcen	finanzielle Ressourcen Kategorie	C_{FIN}	kumulierte Wahrscheinlichkeit		
			P_C	Kategorie	Wahrscheinlichkeit
< 1.000 €	gering	1	9	sehr hoch	90 % – 97 %
> 1.000 €	durchschnittlich	2	6	mittel	25 % – 50 %
> 10.000 €	überdurchschnittlich	3	4	mittel	5 % – 12 %
> 0,1 €	hoch	4	2	gering	1 % – 2 %
> 1 Mio €	sehr hoch	5	1	unwahr- scheinlich	< 0,5 %

Experten auf die Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Angreifer über finanzielle Mittel der verschiedenen Kategorien verfügt, sind in Abbildung 6.9 aufgetragen. In dieser Darstellung bezeichnen die grauen Balken wiederum den Bereich in dem die Antworten der Experten lagen. Die Kreuze kennzeichnen die arithmetischen Mittelwerte der Expertenantworten. Im Vergleich zu der Frage nach dem Fachwissen, fällt in dieser Darstellung die recht hohe Schwankungsbreite der Antworten bezüglich der ersten drei Kategorien auf. Offensichtlich ist sich die befragte Expertengruppe in Bezug auf diesen nicht-technischen Aspekt uneinig. Bei den höheren Kategorien der finanziellen Ressourcen sind sich die Experten einig, dass diese in der Praxis nur vereinzelt oder gar nicht auftreten. Entsprechend der Lage der Mittelwerte wurden diese über die quadratische Funktion

$$P_C = \frac{(5,5 - C_{EXP})^2}{2,1} \quad (6.2)$$

approximiert.

Zur Verifizierung der Expertenschätzung wurde die in Abbildung 6.10 dargestellte Verteilung des Bruttogeldvermögens¹² privater Haushalte im Jahr 2013 herangezogen [87]. Für den Vergleich mit der Expertenschätzung wurde davon ausgegangen, dass ein potentieller Angreifer maximal 5 % der ihm verfügbaren Barmittel für die Durchführung eines IEMI-Angriffes einsetzen würde. Basierend auf dieser Annahme wurde die kumulierte Häufigkeit für die betrachteten Vermögenskategorien be-

¹² Das Bruttogeldvermögen umfasst Bausparguthaben, Sparguthaben, Wertpapiere, Versicherungsguthaben und sonstige Anlagen bei Banken und Sparkassen.

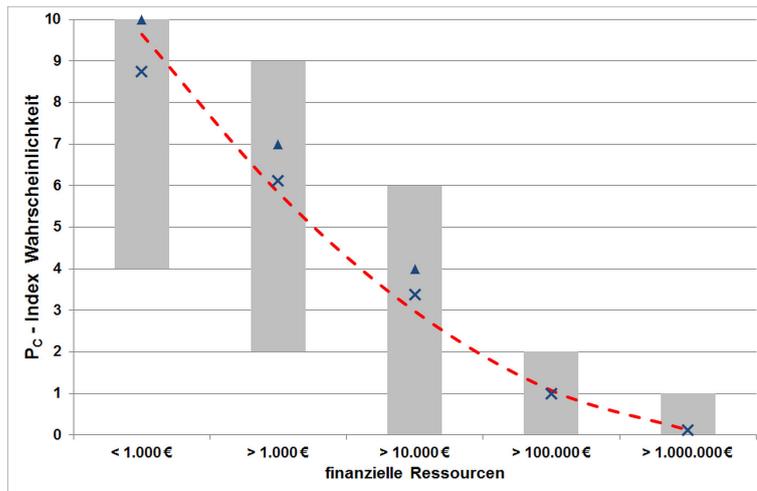


Abb. 6.9 Wahrscheinlichkeit, mit der ein durchschnittliche Angreifer Zugang zu finanziellen Ressourcen zur Durchführung einer IEMI-Angriffs der jeweiligen Kategorie hat (Gestrichelte Linie: approximierte Wahrscheinlichkeitsverteilung eines generischen Angreifers (Gl. 6.2); graue Balken: Einschätzung durch Experten, Kreuze: Arithmetische Mittelwerte, Dreiecke: Kumulierte Häufigkeit des Vermögens in Deutschland im Jahr 2013)

stimmt und in Abbildung 6.9 mit Dreiecken markiert. Aufgrund der Nähe der Dreiecke zu den mit Kreuzen markierten arithmetischen Mittelwerte der Expertenschätzung kann das Resultat der Expertenschätzung als valides Modell betrachtet werden. Die sich hieraus ergebenden Indizes der kumulierten Wahrscheinlichkeiten für die betrachteten Kategorien der finanziellen Ressourcen sind in Tabelle 6.9 aufgetragen. Die Gleichung 6.2 bietet erstmals die Möglichkeit ökonomische Aspekte im Rahmen des EMI-Risikomanagements zu berücksichtigen. Bei der Anwendung ist auch hier zu berücksichtigen, dass das Modell auf der Meinung von Experten aus Europa und Nordamerika basiert. Vor einer Anwendung auf andere Regionen ist es daher notwendig, das Modell anhand einer Expertenbefragung oder statistischer Daten an die regionalen Gegebenheiten anzupassen.

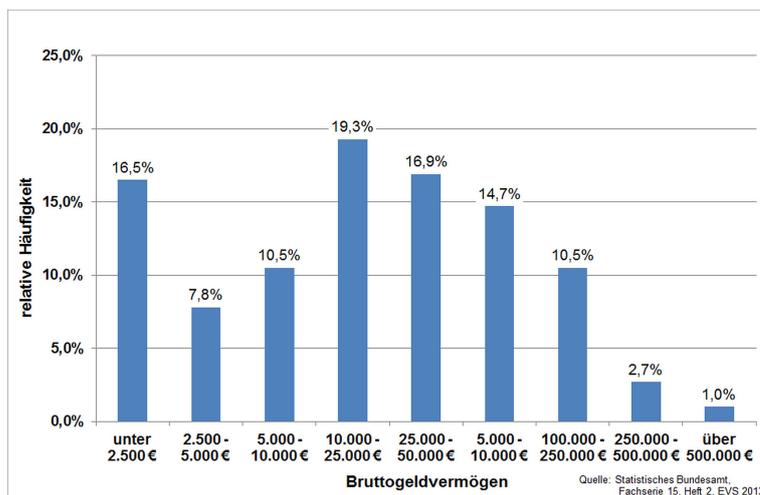


Abb. 6.10 Bruttogeldvermögen in Deutschland 2013 [87]

Durch das Modell eines generischen Angreifers (Gl. 6.1 und Gl. 6.2) können sozioökonomische Aspekte im EMI-Risikomanagement berücksichtigt werden.

Das Modell eines generischen Angreifers ist durch die in den Tabellen 6.5, 6.8 und 6.9 wiedergegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen beziehungsweise durch Gleichung 6.1 und Gleichung 6.2 hinreichend charakterisiert. Durch Gegenüberstellung der dem generischen Angreifer verfügbaren Ressourcen mit den für den Bau bzw. der Beschaffung einer IEMI-Störquelle notwendigen Ressourcen kann in einem nachfolgenden Analyseschritt die Wahrscheinlichkeit, mit der die betrachtete IEMI-Störquelle in einem IEMI-Angriff Verwendung findet, ermittelt werden.

Kapitel 7

Baugruppen von EMI-Störquellen

Zusammenfassung Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der Charakterisierung möglicher EMI-Störquellen. Das Kapitel startet mit der Analyse des prinzipiellen Aufbaus elektromagnetischer Störer, sowie der Identifikation notwendiger Baugruppen. Aufbauend hierauf werden mögliche technische Realisierungen der Baugruppen Hochleistungsimpulsquelle, RF-Modulator und Antenne betrachtet und Leistungsgrenzen abgeschätzt. Die jeweiligen Technologien werden darüber hinaus hinsichtlich des zum Bau und Betrieb benötigten Fachwissens, der Marktverfügbarkeit, anfallender Kosten sowie der Baugröße bewertet.

Wie der potentielle Angreifer, ist die von diesem eingesetzte EMI Störquelle zum Zeitpunkt der Risikoanalyse weitestgehend unbekannt. Bei der Definition des EMI Szenarios müssen daher aus lokalen Gegebenheiten, z.B. Zugänglichkeit, den Ressourcen des Angreifers sowie den charakteristischen Eigenschaften der verfügbaren Technologien die Auftrittswahrscheinlichkeit und die Leistungsparameter der EMI Störquellen abgeschätzt werden. In diesem Abschnitt sollen mit der Charakterisierung möglicher Technologien von EMI Störquellen die Grundlagen für diese Abschätzung gelegt werden.

Im Rahmen des von der EU geförderten Forschungsprojekt STRUCTURES¹ haben Mora et al. die in Produktdatenblättern und wissenschaftlichen Publikationen veröffentlichten Leistungsdaten von Hochspannungspulsern (HV-Pulser) und feldabstrahlenden HPEM-Störquellen (HPEM Radiator) zusammengetragen und ausgewertet [88]. Im Rahmen dieser Marktsichtung hat das Forscherteam die betrachteten Störquellen anhand der in der Literatur diskutierten Aspekte Verfügbarkeit bzw. Zugänglichkeit, Mobilität, technologisches Level und Kosten klassifiziert. Hierbei bestand das Ziel in der Identifizierung technologischer Trends sowie der Abschätzung bestehender technologischer Grenzen. Im Rahmen der Marktstudie [88] haben Mora et al. 21 Störquellen für leitungsgebundene Störsignale und 55 feldabstrahlende HPEM-Störquellen erfasst, klassifiziert und bewertet.

Da für HPEM-Störquellen kein offener Markt existiert, wurden durch die Marktstudie Laborsysteme zum Test der Störfestigkeit elektrischer und elektronischer Systeme sowie in Veröffentlichungen beschriebene Forschungsprototypen erfasst. Bei der Bewertung dieser Systeme ist zu berücksichtigen, dass kommerziell angebotene Laborsysteme in Bezug auf Lebensdauer, Flexibilität, Breite des Anwendungsbereiches und Kosteneffizienz hin optimiert wurden. Als Folge werden die verwendeten Technologien nicht bis zu ihrer Leistungsgrenze, sondern mit einem gewissen Sicherheitsabstand betrieben. Bei der Bewertung der Forschungsprototypen ist zu beachten, dass die überwiegende

¹ STRUCTURES: Strategies for the Improvement of Critical Infrastructures Resilience to Electromagnetic Attacks, Grant Agreement: FP7-SEC-2011-285257

Zahl der veröffentlichten Forschungsprototypen Programmen zur Nutzbarmachung von HPEM-Technologien für staatliche Sicherheitsorganen (z.B. Polizei, Militär) entstammen. Durch diese Zielsetzung basieren die Prototypen auf technologische Lösungen, die in die entsprechenden Einsatzszenarien integriert werden können. Die eingesetzten Technologien unterliegen somit einer (tendenziösen) Vorauswahl und stellen nicht zwingend eine representative Stichprobe der verfügbaren Technologien dar. Bedingt durch die beabsichtigte Anwendung durch Sicherheitskräfte unterliegen viele staatlich geförderte und industrielle Forschungsprogramme der Geheimhaltung. Als unmittelbare Folge wurden die hierbei erzielten Ergebnisse nicht in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht.

Die von Mora et al. durchgeführte Marktstudie gibt einen guten Überblick über marktverfügbare HPEM-Systeme und die in diesen eingesetzten Technologien. In Bezug auf in IEMI-Szenarien potentiell auftretenden Störquellen muss die der Marktstudie zugrunde liegende Datenbasis als unvollständig und unausgewogen betrachtet werden. Eine hierauf aufbauende Abschätzung technologischer Leistungsgrenzen als auch der Leistungsdaten möglicher Störquellen wird ein Bedrohungsbild ergeben, in dem nicht vermarktbar Design- und Technologieansätze nicht oder nur unzureichend berücksichtigt sind. Neben diesen technologischen Problemstellungen erscheint die geringe Zahl auswertbarer Systeme ungeeignet für die Ableitung repräsentativer Bedrohungsdaten. Berücksichtigt man, dass viele der ausgewerteten Prototypen von der gleichen Forschungsgruppe bzw. miteinander verbundener Forschungsgruppen gebaut wurden, stellt sich die Frage, ob diese als voneinander unabhängige Daten betrachtet werden dürfen.

Vor dem Hintergrund der diskutierten Probleme bei der Auswertung existierender (und bekannter) HPEM-Störquellen wird in dieser Arbeit ein hierzu alternativer Ansatz zur Abschätzung der Leistungsparameter potentieller Störquellen verfolgt. Diese starten mit der Analyse des Aufbaus elektromagnetischer Störer, sowie der Identifikation notwendiger Baugruppen. In weiteren Schritten werden aus den Technologien der einzelnen Baugruppen zunächst Leistungsgrenzen der Baugruppen und hierauf aufbauend für komplette Störquellen abgeschätzt. Laufende Forschungsarbeiten und sich abzeichnende technologische Entwicklungen in benachbarten Gebieten² werden bei der Abschätzung möglicher Leistungsdaten mit berücksichtigt. Wo möglich und sinnvoll werden Störquellen zu EMI-Quellenklassen zusammengefasst und generische Modelle abgeleitet.

7.1 Aufbau und Technologie elektromagnetischer Störer

Bei der Auswertung der in der Literatur vorhandenen Beschreibungen von High-Power Electromagnetics (HPEM) Quellen als auch Störquellen allgemein zeigt sich, dass alle Störquellen den in Abbildung 7.1 dargestellten prinzipiellen Aufbau aufweisen. Jede HPEM-Quelle besteht aus den Baugruppen *Hochleistungsimpulsquelle*, *Hochfrequenzmodulator* und *Antennensystem*. Dieser Aufbau ist durch die wesentliche Funktion der Erzeugung und schnellen Abstrahlung elektromagnetischer Feldsignale hoher Leistung vorgegeben. Bei den einzelnen (konkreten) Realisierungen sind die jeweiligen Baugruppen unterschiedlich stark ausgeprägt, aber unabhängig von der jeweiligen Technologie immer vorhanden.

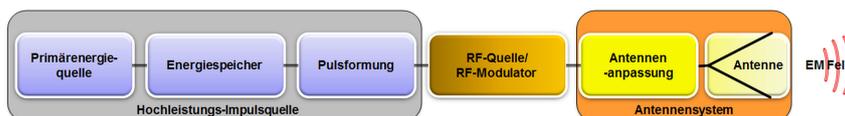


Abb. 7.1 Prinzipieller Aufbau einer elektromagnetischen Störquelle (nach [7, 89])

² z.B. Die Entwicklung leistungsstärkerer Akkumulatoren für die E-Mobility

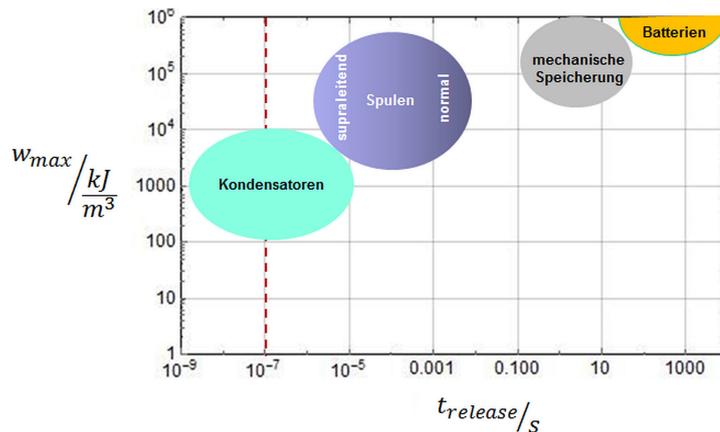


Abb. 7.2 Volumetrische Energiedichte (w_{max}) und Entladezeit ($t_{release}$) von Energiespeichern für Hochleistungsquellen (nach [90])

Die Hochleistungsimpulsquelle besteht in den meisten Fällen aus einer Primärenergiequelle, einer Hochspannungs- oder Hochstromquelle mit Energiespeicher sowie einer nachgeschalteten Pulsformung. Durch die Primärenergiequelle wird die für die Erzeugung des abgestrahlten elektromagnetischen Feldes benötigte Energie bereitgestellt. Bei Laborgeräten wird in aller Regel die Primärenergie durch ein Netzgerät realisiert. Streng genommen ist hierbei die Primärenergiequelle durch das Energieversorgungsnetz gegeben. Das Hochspannungsnetzteil dient der Erzeugung der benötigten Hochspannung (bzw. des Hochstroms) zur Ladung des Energiespeichers. Bei mobilen Anwendungen ist die Primärenergiequelle in Form von Akkumulatoren, in wenigen Fällen auch durch Hochspannungskondensatoren realisiert. In vielen Fällen wird durch die Primärenergiequelle eine Spannung im Bereich 24 – 230 V bereitgestellt. Diese wird durch Gleichspannungswandler, Transformatoren oder Wandlerschaltungen zu einer Hochspannung von 1 – 100 kV transformiert. Da der auf der Hochspannungsseite verfügbare Strom für den Betrieb des Hochfrequenzmodulators zu gering ist, wird die elektrische Energie in einem Energiespeicher zwischengespeichert. Bei dem Aufbau einer Hochleistungsimpulsquelle sind wesentliche Auslegungsparameter für den Energiespeicher eine hohe volumetrische Energiedichte sowie eine sehr kurze Entladezeiten (energy release time). Aufgrund der für HPEM-Quellen benötigten Entladezeiten im Bereich bis 100 ns, werden hierbei vorwiegend kapazitive Energiespeicher (Kondensatoren) eingesetzt (s. Abb. 7.2).

Wenn der Energiespeicher geladen ist, wird dieser in den Hochfrequenzmodulator entladen. In vielen Fällen entspricht die Signalform der Entladespannung nicht den Anforderungen des Hochfrequenzmodulators, so dass das Spannungssignal in einer pulsformenden Schaltung (z.B. Blumlein, Crowbar, ...) angepasst wird [91, 92, 93]. Gängige Maßnahmen der Pulsformung sind die Aufsteilung der ansteigenden Spannungsflanke sowie die Verkürzung der Signaldauer.

In dem Hochfrequenzmodulator wird das abzustrahlende Hochfrequenzsignal hoher Leistung erzeugt und über das nachgeschaltete Antennensystem abgestrahlt. Abhängig vom Technologielevel wird die Antenne über eine Anpassungsschaltung an den Ausgang des Hochfrequenzmodulators angepasst. Bei Störquellen, die impulsförmige Feldsignale im Basisband abstrahlen³ kann der Hochfrequenzmodulator entfallen. Das Eingangssignal für das Antennensystem wird in diesen Fällen in der pulsformenden Schaltung erzeugt.

Bei der Bewertung der Baugröße und Effizienz ist zu beachten, dass bei der Realisierung einer Störquelle weitere, nicht in der Prinzipdarstellung (Abb. 7.1) enthaltene, Baugruppen benötigt werden. So erfordern viele Mikrowellenquellen hoher Leistung eine Kühlung oder Vakuumpumpen. In einigen Fällen werden darüber hinaus Pumpen zur Umwälzung von Isolationsmedien (Gas, Öl)

³ Sogenannte Impulsabstrahlende Systeme (engl.: impulse radiating systems)

benötigt. Diese zusätzlichen Baugruppen erhöhen die Komplexität des Systems hinsichtlich Aufbau und Betrieb, die gesamte Baugröße einer Störquelle als auch ihr Gewicht. Die für den Betrieb dieser unterstützenden Baugruppen benötigte Energie sollte bei der Diskussion und Bewertung des Energiebedarfs und der Effizienz der Störquelle nicht vernachlässigt werden.

7.2 Skalen zur Kategorisierung charakteristischer Daten

In den nachfolgenden Abschnitten werden nun charakteristische Daten einzelner Baugruppen vorgestellt und im Hinblick auf mögliche technologische Grenzen als auch eine Klassifizierung der Störquellen bewertet. Neben dem Aufbau und dem Funktionsprinzip der einzelnen Baugruppen liegt der Schwerpunkt auf den im *Datenblock Störquelle*⁴ angesprochenen Aspekten.

Hierbei wird das für das Design und die Auslegung, den Bau sowie den Betrieb benötigte Fachwissen mit Hilfe der in Tabelle 6.6⁵ wiedergegebenen Skala bewertet. Die Verfügbarkeit einzelner Komponenten als auch der gesamten betrachteten Baugruppe (z.B. eines RF-Modulators) werden anhand der in Tabelle 7.1 aufgelisteten Skala kategorisiert.

Leitgedanke der Untergliederung der Baugröße, sowie der hieraus folgenden Mobilität, war die Bewertung, wie gut die betrachtete IEMI-Störquelle in Plattformen (z.B. Fahrzeuge) oder Transportbehältnisse (z.B. Container, Koffer, Taschen) integriert werden kann. In Tabelle 7.2 sind typische Nutzvolumina ausgesuchter Plattformen und Transportbehältnisse zusammengestellt. Das Ladevolumen des 45' PW Containers entspricht in etwa dem eines klassischen Sattelauflegers und stellt die obere Grenze an Nutzvolumen dar, dass im normalen Verkehr auf europäischen Straßen transportiert werden kann⁶. Eine IEMI-Quelle mit einem größerem Bauvolumen müsste als Außnahmetransport⁷ oder Baugruppenweise transportiert werden. IEMI-Quellen mit einer Baugröße von mehr als 77 m³ werden daher als stationär betrachtet, da sie nicht ohne erheblichen logistischen Aufwand transportiert und während des Transports nicht betrieben werden können.

Systeme mit einem Bauvolumen von mehr als 10 m³ bis zu 77 m³ können in handelsübliche Transportcontainer (z.B. Seecontainer), Sattelaufleger oder Lastkraftwagen (z.B. mit Kofferaufbau

Tabelle 7.1 Kategorisierung der Verfügbarkeit

AV _C	Verfügbarkeit	Definition
0	nicht angeboten	Wird auf dem Markt nicht angeboten
1	marktübliche	Gebrauchsgegenstand der für jedermann frei auf dem Markt (z.B. Supermarkt) erhältlich ist
2	marktverfügbar	Kann ohne Beschränkungen von jedermann in Fachgeschäften erworben werden.
3	(gewerblicher) Fachhandel	Gegenstand ist nur in Fachgeschäften und für gewerbliche Unternehmen erhältlich
4	beschränkter Erwerb	Erwerb unter Auflagen für registrierte Käufer; Spezialanfertigungen
5	Stark eingeschränkte Verfügbarkeit	Verbot des Handels oder Besitz durch Gesetz

⁴ siehe Tabelle 6.4 auf Seite 75

⁵ Seite 78

⁶ Bei Einsatz sogenannter verlängerten Sattelaufleger können auch Container mit einer Länge von 48' und einem Nutzvolumen von 98,9 m³ im europäischen Straßennetz bewegt werden. Die verlängerten Sattelaufleger dürfen jedoch nur auf ausgewiesenen Strecken befristet bis zum 31.12.2023 getestet werden. Aus diesem Grund werden sie im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

⁷ In Deutschland werden Frachtguttransporte, die nicht maß- und/oder gewichtsgerecht sind, als Großraum- und Schwertransporte bezeichnet.

Tabelle 7.2 Typische Nutzvolumina ausgesuchter Plattformen und Transportbehältnisse

Plattform	Nutzvolumen	Bem.
45' PW Container	77 m ³	DIN ISO 668 [94]
40' Container	67 m ³	DIN ISO 668 [94]
20' Container	33 m ³	DIN ISO 668 [94]
10' Container	16 m ³	DIN ISO 668 [94]
Fernmeldekabine II	15 m ³	
LkW 7,5t	9 – 42 m ³	
Van	2 – 6 m ³	
Koffer	< 0,2 m ³	
Aktenkoffer	< 0,02 m ³	

Tabelle 7.3 Kategorisierung der Baugröße und Mobilität

M	Mobilität	Baugröße	Beispiel
1	stationär	> 77 m ³	Gebäude oder ortsfeste Anlage
2	transportabel	10 – 77 m ³	Container, Fernmeldekabine, Lkw
3	mobil	0,2 – 10 m ³	PKW, Van, Kleinlaster
4	sehr mobil	0,02 – 0,2 m ³	Koffer, Rucksack
5	hoch mobil	< 0,02 m ³	Aktenkoffer

oder Plane Spiegel) integriert und daher ohne besonderen logistischen Aufwand transportiert werden. Die überwiegende Zahl der in dieser Baugröße bisher aufgebauten IEMI-Störquellen können zudem nicht während des Transports betrieben werden. Aufgrund ihrer Baugröße würde ihr Auftreten in Wohngebieten oder Gebieten mit Bürogebäuden ein gewisses Maß an Aufmerksamkeit erregen. In Industrie- und Gewerbegebieten sowie auf den zugehörigen Zufahrtsstraßen würden Systeme der Mobilitätsklasse *transportabel* im Allgemeinen nicht weiter auffallen.

Die nächst höhere Mobilitätsklasse *mobil* beinhaltet IEMI-Störsysteme die handelsübliche Autos, Vans und Kleinlaster eingebaut werden können. Da diese Trägerplattformen in allen Bereichen des Straßenverkehrs auftreten, verfügen sie über die Fähigkeit die in sie integrierten Störquellen verdeckt in die Nähe des Zielsystems zu verbringen. Abgesehen von militärischen Anwendungen, sind die Plattformen dieser Mobilitätsklasse bodengebundene Landsysteme, so dass im Rahmen der Risikoanalyse von einem bodennahen Standort ausgegangen werden kann. Die Störsysteme der Mobilitätsklasse *mobil* verfügen üblicher Weise über die Fähigkeit des Betriebes während des Transportes.

Die beiden höchsten Mobilitätsklassen *sehr mobil* und *hoch mobil* beinhalten Störquellen, die in Transportbehältnisse wie Koffer, Rucksäcke und Aktenkoffer eingebaut werden können. Aufgrund der hierdurch gegebenen Mobilität ist davon auszugehen, dass derartige Systeme an nahezu jeden frei zugänglichen Ort verbracht werden und in unmittelbarer Nähe des Zielsystems auftreten können.

Für die Einteilung des elektromagnetischen Spektrums in Teilbereiche, sogenannte Frequenzbänder, sind international verschiedene Bezeichnungen im Gebrauch, deren Grenzen oft willkürlich und nach Gesichtspunkten der jeweiligen Nutzung festgelegt wurden. In dem *IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands* [95] werden die Frequenzbändeinteilungen und -

Tabelle 7.4 Bezeichnung der Frequenzbänder (Tabelle 2 in [95])

Radar Nomenklatur		ITU Nomenklatur		
Band (Radar)	Frequenzbereich	Frequenzbereich	Band Nr.	Band (ITU)
HF	3 MHz < f ≤ 30 MHz	3 MHz < f ≤ 30 MHz	7	HF
VHF	30 MHz < f ≤ 300 MHz	30 MHz < f ≤ 300 MHz	8	VHF
UHF	0,3 GHz < f ≤ 1 GHz	0,3 GHz < f ≤ 3 GHz	9	UHF
L	1 GHz < f ≤ 2 GHz			
S	2 GHz < f ≤ 4 GHz	3 GHz < f ≤ 30 GHz	10	SHF
C	4 GHz < f ≤ 8 GHz			
X	8 GHz < f ≤ 12 GHz			
Ku	12 GHz < f ≤ 18 GHz			
K	18 GHz < f ≤ 27 GHz			

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Frequenzbänder nach der Radar Nomenklatur bezeichnet.

Tabelle 7.5 Kategorisierung der Bandbreite nach [6]

Bandbreite		Fractional Bandwidth $B_F = 2 \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l}$	Band Ratio $b_r = \frac{f_h}{f_l}$	Beispiel
Hypoband Schmalband	/HO	$0,00 < B_F \leq 0,01$	$0,00 < b_r \leq 1,01$	Sinusquelle, pulsmodierte Sinusquelle
Mesoband	ME	$0,01 < B_F \leq 1,00$	$1,01 < b_r \leq 3,0$	gedämpfter Sinus
Sub-Hyperband	SH	$1,00 < B_F \leq 1,63$	$3,00 < b_r \leq 10,0$	Chirp
Hyperband	HE	$1,63 < B_F \leq 2,00$	$10,00 < b_r \leq \infty$	Gaußpuls, Bipolarer Puls, Doppelt-Exponentieller Puls,

Tabelle 7.6 Kategorisierung der Frequenzagilität

F_{AG}	Frequenzagilität	Definition	Beschreibung
1	Festfrequenz	$\Delta f = 0$	Die Quelle arbeitet auf einer festen (Mitten-) Frequenz und ist nicht durchstimmbar.
2	gering	$ \Delta f / f_c \leq 1 \%$	Die (Mitten-) Frequenz kann bis zu $\pm 1 \%$ verstimmt werden.
3	mittel	$1 \% < \Delta f / f_c \leq 10 \%$	Die (Mitten-) Frequenz kann bis zu $\pm 10 \%$ verstimmt werden.
4	hoch	$10 \% < \Delta f / f_c \leq 25 \%$	Die (Mitten-) Frequenz kann bis zu $\pm 25 \%$ verstimmt werden.
5	sehr hoch	$ \Delta f / f_c \geq 25 \%$	Die (Mitten-) Frequenz kann um mehr als $\pm 25 \%$ verstimmt werden.

bezeichnungen der derzeit gebräuchlichsten Frequenzband Nomenklaturen für Radar- und Kommunikationsanwendungen einander vergleichend gegenübergestellt. Der für die Bewertung von IEMI-Störquellen relevante Frequenzbereich ist in Tabelle 7.4 aufgetragen. In der ITU Nomenklatur umfassen die Frequenzbänder immer eine Dekade. Hierdurch fällt die Mehrzahl der im Zusammenhang mit IEMI betrachteten Störquellen in das UHF-Band. Daher erscheint die ITU Nomenklatur für die Charakterisierung der IEMI-Störquellen als zu grob. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb die in dem IEMI relevanten Frequenzbereich feiner untergliederte Radar Nomenklatur zur Klassifizierung des abgestrahlten elektromagnetischen Spektrums genutzt.

Bei der Bewertung einer Störquelle ist neben der Mittenfrequenz bzw. dem Frequenzband des abgestrahlten Feldsignals auch die von diesem belegte Bandbreite von Bedeutung. Die Signalbandbreite von Radar- und Kommunikationssystemen als auch IEMI-Störquellen wurde in der Literatur eingehend diskutiert [96]. Für die Charakterisierung gestrahlter elektromagnetischer (Stör-) Umgebungen wurde in der IEC 61000-2-13 [6] die in Tabelle 7.5 dargestellte Bewertungsskala festgelegt.

Die Frequenzagilität beschreibt, wie weit eine Quelle in ihrer Mittenfrequenz ohne Umbau bzw. Designänderung verstimmt werden kann. Nicht verstimmbare Störquellen sind darauf angewiesen, dass ihre baulich vorgegebenen (Fest-)Frequenz empfindliche Frequenzbereiche des Zielsystems treffen. Demgegenüber könnte eine frequenzagilere Störquelle während des Betriebes ihre Sendefrequenz ändern und so quasi empfindliche Frequenzen des Zielsystems suchen. Störquellen mit einer höheren Frequenzagilität besitzen daher ein höheres Bedrohungspotential. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Skala zur Bewertung der Frequenzagilität ist in Tabelle 7.6 dargestellt.

7.3 Charakteristische Daten von Hochleistungsimpulsquellen

7.3.1 Primärenergiequelle

Im Anwendungsfall der Bedrohung kritischer Infrastrukturen durch absichtlich herbeigeführte elektromagnetischer Störungen (IEMI-Bedrohungen) sind mobile, vom Energieversorgungsnetz unabhängige Störquellen von herausragender Bedeutung. Aus diesem Grund bilden diese den Schwerpunkt der nachfolgenden Betrachtungen. Als Primärenergiequellen mobiler Störquellen sind neben

Akkumulatorsystemen und Hochspannungskondensatoren auch aktive Energiequellen wie Stromerzeugungsaggregate oder Brennstoffzellen möglich und denkbar. Aufgrund ihrer Baugröße als auch ihrer Schall- und Wärmeemission werden Stromerzeugungsaggregate und Brennstoffzellen nur sehr selten und vorwiegend in größeren Systemen eingesetzt. Die überwiegende Zahl der mobilen Störquellen bezieht ihre Primärenergie aus Akkumulatorsystemen⁸.

Aufgrund ihrer gegenüber Akkumulatoren deutlich geringeren Energiedichte finden Hochspannungskondensatoren in HPEM-Störquellen nur in wenigen Sonderanwendungen als Primärenergiequelle Verwendung. Viel häufiger werden diese als Energiespeicher, Transferenergiespeicher oder bei der Pulsformung eingesetzt.

Lithium-Ionen-Akkumulatorsysteme werden heute in nahezu allen Bereichen von Konsumerelektronik über mobile IT-Systeme, Elektronikwerkzeuge bis hin zu stationären Energiespeichern und Systemen der Elektromobilität genutzt. Aufgrund der hiermit verbundenen hohen Marktverfügbarkeit, als auch ihrer hohen Energiedichte werden Lithium-Ionen-Akkumulatorsysteme zunehmend als Primärenergiequellen von mobilen IEMI-Störquellen verwendet.

Grundelement der Akkumulator-Systeme sind die Akkumulator-Zellen, die in verschiedenen Formen angeboten werden. In der Literatur werden die Leistungsparameter der verschiedenen Technologien⁹ anhand einer zylindrischen Rundzelle mit 18 mm Durchmesser und 65 mm Höhe¹⁰ dargestellt (Abbildung 7.3)



Abb. 7.4 Akkumulator-Pack

Bezogen auf diese Referenzzelle erreichen heutige Lithium-Ionen Akkumulatoren Spannungen von 2,2 V bis 4,2 V pro Zelle [97]. Da diese Zellspannung als auch der Entladestrom einer einzelnen Akkumulator-Zelle bei den meisten Anwendungen nicht für den praktischen Einsatz ausreicht, werden die Akkumulator-Zellen durch Serien- und Parallelschaltung zu Akkumulator-Modulen¹¹ (Abb. 7.4) zusammengesaltet. Neben den Akkumulator-Modulen bestehen marktverfügbare Akkumulator-Systeme aus weiteren Baugruppen, wie Gehäuse, Befestigungssystem, Isolierung, Kühlung und Akkumulator-Management-System. In Abhängigkeit der gewünschten Betriebsdauer einer IEMI-Störquelle können bei ihrem Bau Akkumulator-Module (kurze Betriebsdauer) oder Akkumulator-Systeme (lange Betriebsdauer) genutzt werden. Die Akkumulator-Module bieten den Vorteil eines geringeren Gewichtes und einer kompakteren Bauform, bei gleicher Energieausbeute. Akkumulator-Systeme sind gegenüber äußeren Umweltbedingungen und mechanischer Belastungen stabiler.

Der modulare Aufbau der Akkumulator-Module ermöglicht es aus den Parametern einer Referenzzelle und der Baugröße des Akkumulator-Moduls (bzw. des Akkumulator-Systems) dessen Leistungsparameter abzuschätzen. Wesentlicher Parameter ist hierbei die, durch die Technologie vorgegebene, volumetrische Energiedichte w_{\max} (in Wh/m³). Diese ist ein Maß für das Energiespeichervermögen der Akkumulator-Zelle und berechnet sich aus dem Produkt der Zellspannung u_N und der volumetrischen Ladungsdichte ρ_{\max} (in Ah/m³).

$$w_{\max} = u_N \cdot \rho_{\max} \quad (7.1)$$

⁸ Bleigel-, Nickel-Cadmium- (NiCd), Nickel-Metallhydrid- (NiMH) und Lithium-Ionen-Akkus

⁹ Gemeint ist hier die Zellchemie, insbesondere die auf der positiven Elektrode aufgebraute Lithium-Metalloxidschicht.

¹⁰ Referenzzelle der Bauform 18650

¹¹ auch Akkumulator-Pack genannt

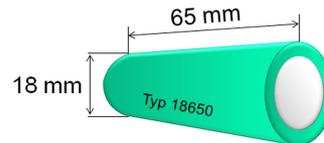


Abb. 7.3 Abmasse einer zylindrischen Referenzzelle (Bauform 18650)

Wie der Tabelle 7.7 zu entnehmen ist, decken heutige Lithium-Ionen Akkumulator-Zellen ein weites Spektrum der volumetrischen Energiedichte ab. Je nach Zellentechnologie erreichen die Referenzzellen eine Energiedichte von ca. $0,16 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^3$ bis zu $0,67 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^3$. Getrieben durch die aktuellen Entwicklungen in Bezug auf die Elektromobilität werden für künftige Lithium-Ionen-Akkumulatoren Energiedichten bis zu $0,87 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^3$ erwartet [97].

Bei der Verwendung als Primärenergiequelle ist neben einer hohen Energiedichte auch die Hochstromfähigkeit der Batteriezelle von Bedeutung. Die Größe des Entladestroms einer Batterie wird üblicherweise, unabhängig von der Nennkapazität C_N , in Form des C-Faktors angegeben. Die C-Faktor ist definiert als Quotient des maximal zulässigen Entladestroms I_{\max} und der Nennkapazität C_N .

$$C = \frac{I_{\max}}{C_N} \quad (7.2)$$

Der C-Faktor entspricht dem Kehrwert der Zeit, für die eine Batteriezelle der genannten Kapazität mit dem maximalen Entladestrom I_{\max} entladen werden kann.

$$T_{I_{\max}} = \frac{I}{C} \quad (7.3)$$

Die Division der volumetrischen Energiedichte w_{\max} (Gl. 7.1) durch die Entladezeit $T_{I_{\max}}$, (Gl.7.3) ergibt die volumetrischen Leistungsdichte ϕ (in W/m^3):

$$\phi = \frac{w_{\max}}{T_{I_{\max}}} = w_{\max} \cdot C \quad (7.4)$$

Die mit dem maximal zulässigen Entladestrom aus einem Akkumulator-Modul des Bauvolumens V entnehmbaren Gesamtleistung ist über die Gleichung

$$P_{I_{\max}} = \phi \cdot V = V \cdot w_{\max} \cdot C \quad (7.5)$$

bestimmbar. Analog lässt sich die gespeicherte Energie über

$$W_{\text{ges}} = V \cdot w_{\max} \quad (7.6)$$

abschätzen.

Die über diese Beziehung abgeschätzten Werte der gespeicherten Energie ausgesuchter marktverfügbare Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind in Tabelle 7.9 den Datenblattangaben vergleichend gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, dass die abgeschätzten Werte bei den meisten Systemen doppelt so hoch sind, wie im Datenblatt angegeben. Der Grund für diese Überschätzung liegt darin, dass für die Abschätzung nach Gleichung 7.6 das Bauvolumen des Gesamtsystems herangezogen wurde. Hierin sind neben den Akkumulatoren-Modulen auch das Volumen für das Gehäuse und die Steuerelektronik enthalten. Im Rahmen des EMI-Risikomanagements ist diese konservative Abschätzung

Tabelle 7.7 Typische Leistungsparameter marktverfügbarer Lithium-Ionen-Akkumulatoren (nach[97])

Technologie		LCO	LMO	NMC	NCA	LFP
Nennspannung	$u_N/1 \text{ V}$	3,7	3,7	3,7	3,6	3,3
vol. Energiedichte	$\frac{w_{\max}}{10^6 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3}}$	0,32 - 0,50	0,29 - 0,34	0,49 - 0,58	0,48 - 0,67	0,16 - 0,26
C-Faktor	C	1 - 2	3 - 20	1 - 10	1 - 10	10 - 50
Anwendungsbereiche		High Energy	High Power	High Energy + Power	High Energy + Power	High Power

Technologie: LCO: Lithium-Cobalt-Oxid; LMO: Lithium-Mangan-Oxid; NMC: Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid; NCA: Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid; LFP: Lithium-Eisen-Posphat

Tabelle 7.8 Bewertung Primärenergiequellen

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		Lithium-Ionen-Akkumulatorsysteme werden zunehmend als Primärenergiequellen von mobilen IEMI-Störquellen eingesetzt.
Benötigtes Fachwissen - Design und Auslegung	$K_D = 2$	Das Design und die Auslegung einer Primärenergiequelle bestehend aus Lithium-Ionen-Zellen erfordert Kenntnisse auf dem Niveau eines versierten Hobbyelektrikers .
- Bau	$K_A = 2$	Der Bau einer Primärenergiequelle erfordert Kenntnisse auf dem Niveau eines versierten Hobbyelektrikers .
- Betrieb	$K_O = 1$	Für den Betrieb von Primärenergiequelle bestehend aus Lithium-Ionen-Zellen ist nur allgemeines Grundverständnis erforderlich.
Verfügbarkeit - der Komponenten	$AV_C = 2$	Die benötigten Baugruppen (Lithium-Ionen-Zellen) sind im Fachhandel erhältlich.
- der Primärenergiequelle	$AV_S = 1 - 3$	Lithium-Ionen-Akkumulatoren unterschiedlicher Ausgangsspannung und Kapazität sind im freien Handel, Fachhandel und gewerblichen Fachhandel erhältlich.
Kosten	$C_{exp} = 1$	Einfache Lithium-Ionen-Akkumulatoren können für weniger als 100 € realisiert werden. Im gewerblichen Fachhandel werden leistungsstarke Lithium-Ionen-Akkumulatoren für bis zu 1.000 € angeboten.

der maximal in einem vorgegebenen (bzw. angenommenen) Volumen speicherbaren (Primär-) Energie hinreichend genau.

7.3.2 Hochspannungsquelle

Die in Tabelle 7.9 aufgetragenen Daten belegen darüber hinaus, dass die marktüblichen Akkumulatorsysteme Nennspannungen im niedrigen Voltbereich bereitstellen. Die auf dem freien Markt gängigen Akkumulatorsysteme weisen Nennspannungen von 3 V, 12 V, 24 V und 48 V auf. Beim Bau mobiler Störquellen ist es unumgänglich diese geringen Spannungen auf ein deutlich höheres Spannungsniveau im kV-Bereich zu überführen. Hierzu sind im Elektrohandel Gleichspannungswandler mit einer Speisespannung von 24 V (DC), Ausgangsspannungen von bis zu 60 kV (DC) und einem Wirkungsgrad von ca. 80 % verfügbar. Typische Leistungsparameter marktverfügbarer Gleichspannungswandler sind in Tabelle 7.10 aufgetragen.

Tabelle 7.9 Vergleich der abgeschätzten und im Datenblatt angegebenen Energie ausgesuchter Lithium-Akkumulatoren

Typ	Technologie	Spannung	Kapazität		Volumen V 10^{-3} m^3	Energie	Gl. 7.6 W_{ges} Wh
		U_N V	C_N Ah	C 1/h		W_N Wh	
InnoPower-LFMP200AH	LFP	3,2	200	3	3,926	640	628
SL-FHW12.4S2P_BMS	LFP	12,8	22	10	2,752	282	440
HE-12V-10Ah-LiMn	LMO	11,1	10	1	0,736	111	213
HE-24V-10Ah-LiMn	LMO	25,9	10	1	1,673	259	485
CP 012-00004GF	LFP	24	100	1	29,762	2.400	4.761

Der Vergleich dieser Daten zeigt, dass die Gleichspannungswandler eine volumetrische Leistungsdichte im Bereich $100 - 200 \text{ W}/10^{-3} \text{ m}^3$ aufweisen. Im Gegensatz zu den Primärenergiequellen ist die Leistungsdichte der Gleichspannungswandler nicht durch die Fähigkeit des Materials elektrische Energie zu speichern, sondern durch Aspekte wie Spannungsfestigkeit und thermische Stabilität der Bauelemente bzw. Abfuhr der Verlustleistung bestimmt. Als Folge besteht kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Nennleistung und der Baugröße. Über die bestimmte volumetrische Leistungsdichte kann daher die zu erwartende Baugröße nur tendentiell abgeleitet werden. Die Genauigkeit der aus dieser Abschätzung resultierenden Werte für die Baugröße ist ausreichend für die Erstellung von Modellen für generische EMI-Störquellen. Im Sinne einer konservativen Abschätzung (Worst-Case Annahme) kann die volumetrische Leistungsdichte eines generischen Gleichspannungswandlers von $100 \text{ W}/10^{-3} \text{ m}^3$ angenommen werden. Die Baugröße der Hochspannungsquelle ergibt sich durch Addition der Baugrößen für die Primärenergiequelle und des nachgeschalteten Gleichspannungswandlers.

7.3.3 Hochleistungsimpulsquelle

Durch den Gleichspannungswandler wird die geringe Spannung der Primärenergiequelle in den kV-Bereich überführt. Da die Leistung gleich bleibt, wird der Strom auf der Ausgangsseite in dem selben Verhältnis gegenüber dem Eingangsstrom reduziert. Nach dem Gleichspannungswandler liegt somit eine Spannung im kV-Bereich und ein maximaler Strom in mA-Bereich vor. Für den Betrieb eines RF-Modulators ist es daher notwendig die elektrische Energie in einer oder mehrerer Kompressionsstufen zwischenzuspeichern und dann in Form eines kurzen Impulses mit hoher Spannung und hohem Strom an den RF-Modulator abzugeben. Die Kompressionsstufen bestehen im wesentlichen aus einem Energiespeicher und einem Schalter. Die elektrische Energie kann hierbei kapazitiv im elektrischen Feld oder induktiv im magnetischen Feld gespeichert werden [98]. Die Kompressionsstufen lassen sich nach ihrem Funktionsprinzip einteilen in

- Kompressionsstufe mit kapazitivem Energiespeicher und schließendem Schalter
- Kompressionsstufe mit induktivem Energiespeicher und öffnendem Schalter
- hybride Kompressionsstufe mit kapazitivem Energiespeicher und nachgeschaltetem induktivem Energiezwischenspeicher
- hybride Kompressionsstufe mit induktivem Energiespeicher und nachgeschaltetem kapazitivem Energiezwischenspeicher

Die einfachste Realisierung einer Kompressionsstufe mit kapazitivem Energiespeicher und schließendem Schalter ist ein Hochspannungskondensator, der durch den Gleichspannungstransformator geladen und dann über einen schnellen Schalter über den RF-Modulator entladen wird. In dieser Realisierung entspricht die Ausgangsspannung des Gleichspannungswandlers der Arbeitsspannung des RF-Modulators. Um eine höhere Ausgangsspannung zu erhalten ist es notwendig mehrere Kompressionsstufen hintereinander zu verschalten.

Tabelle 7.10 Typische Leistungsparameter marktverfügbarer Gleichspannungswandler (DC-DC-Converter)

Speise- spannung V(DC)	max. Ausgangs- spannung kV(DC)	Leistung W	Effi- zienz	Volumen 10^{-3} m^3	vol. Leistungsdichte $\text{W}/10^{-3} \text{ m}^3$
			%		
24	30 - 35	15 / 30	80	0,210	142,55
24	40	15 / 30	80	0,300	100,12
24	8 - 30	60 / 125	80	0,654	191,23
24	8 - 30	250	80	1,405	177,90
24	40 - 60	60 / 125 / 250	80	2,620	95,41

Tabelle 7.11 Bewertung Hochspannungsquellen

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		Hochspannungsquellen , besteht üblicher Weise aus Gleichspannungswandlerschaltungen, die die Spannungen der Primärenergiequellen in Ausgangsspannungen im kV-Bereich transformieren.
Benötigtes Fachwissen - Design und Auslegung	$K_D = 2$	Das Design und die Auslegung einfacher Gleichspannungswandlerschaltungen erfordert Kenntnisse auf dem Niveau eines versierten Hobbyelektrikers . Erfahrungen und vertiefende Kenntnisse auf den Gebieten (1) Hochspannungstechnik sind hilfreich aber nicht zwingend notwendig.
- Bau	$K_A = 2-3$	Der Bau einer Hochspannungsquelle erfordert Kenntnisse auf dem Niveau eines versierten Hobbyelektrikers bis zu dem einer ausgebildeten Fachkraft .
- Betrieb	$K_O = 1-2$	Für den Betrieb von Hochspannungsquellen ist nur allgemeines Grundverständnis erforderlich.
Verfügbarkeit - der Komponenten - der Hochspannungsquelle	$AV_C = 2$ $AV_S = 2-3$	Die benötigten Baugruppen sind im Fachhandel erhältlich. Gleichspannungswandler sind im Fachhandel und gewerblichen Fachhandel für Ausgangsspannungen bis in den kV-Bereich erhältlich.
Kosten	$C_{exp} = 1-2$	Gleichspannungswandler können für weniger als 1.000 € realisiert werden. Im gewerblichen Fachhandel werden leistungsstarke Gleichspannungswandler für bis zu 10.000 € angeboten.

Beim Bau von EMI-Störquellen häufig eingesetzte Hochleistungsimpulsquellen sind:

- Marx-Generator,
- Tesla-Transformator,
- XRAM Generator und
- Halbleiter-Pulsgeneratoren.

Der **Marx-Generator** besteht aus mehreren Kompressionsstufen mit kapazitivem Energiespeicher und schließendem Schalter. Seine Funktionsweise (Abb. 7.5) basieren auf der Idee, mehrere Kondensatorstufen (C) parallel mit Gleichspannung auf die sogenannte Stufenspannung aufzuladen und diese dann in Serienschaltung zu entladen. Durch die Entladung in Serienschaltung addieren sich die Spannungen der Kondensatorstufen. Der Marx-Generator sammelt also Ladung über eine längere Zeit bei geringer Spannung und gibt die Ladung in kurzer Zeit und bei hoher Spannung wieder ab. Bei einem Marx-Generator mit N Kondensatorstufen ist theoretische eine Ausgangsspannung realisierbar die das N-fache der Ladespannung beträgt. Zur praktischen Umsetzung dieses Prinzips

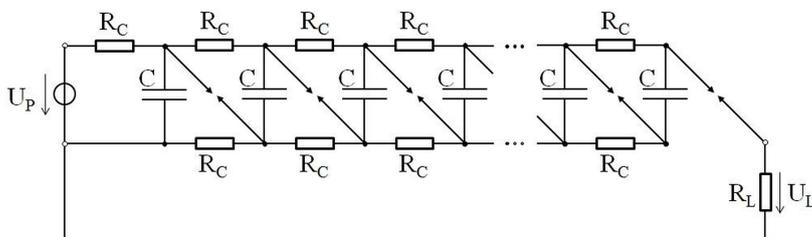
**Abb. 7.5** Marx Generator

Tabelle 7.12 Bewertung Marx-Generator

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		Der Marx-Generator ist eine Hochspannungsimpulsquelle , besteht aus mehreren Kompressionsstufe mit kapazitivem Energiespeicher und schließendem Schalter .
Benötigtes Fachwissen - Design und Auslegung	$K_D = 2$	Das Design und die Auslegung eines Marx-Generators erfordert Kenntnisse auf dem Niveau eines versierten Hobbyelektrikers . Erfahrungen und vertiefende Kenntnisse auf den Gebieten (1) Hochspannungstechnik und (2) Funkenstrecken sind hilfreich aber nicht zwingend notwendig.
- Bau	$K_A = 2$	Der Bau eines Marx-Generators erfordert Kenntnisse auf dem Niveau eines versierten Hobbyelektrikers .
- Betrieb	$K_O = 1 - 2$	Für den Betrieb eines Marx-Generators sind nur eine Einweisung in die Handhabung notwendig. (Allgemeinwissen bis Grundverständnis)
Verfügbarkeit - der Komponenten - der Impulsquelle	$AV_C = 2$ $AV_S = 3$	Die benötigten Baugruppen sind im Fachhandel erhältlich. Marx-Generatoren sind im gewerblichen Fachhandel für Ausgangsspannungen bis in den MV-Bereich erhältlich.
Kosten	$C_{exp} = 1 - 3$	Einfache Marx-Generatoren können für weniger als 1.000 € realisiert werden. Im gewerblichen Fachhandel werden leistungsstarke Marx-Generatoren für bis zu 100.000 € angeboten.

werden die Kondensatorstufen (C) mittels Ladewiderstände (R_C) in Reihe verschaltet und mit der Ausgangsspannung der Primärenergiequelle (bzw. des Gleichspannungswandlers) aufgeladen. Die schlagartige Umschaltung in Serienschaltung erfolgt in den meisten Anwendungen mittels Funkenstrecken. Zunehmend werden anstelle der Funkenstrecken auch Halbleiterschalter verwendet. Aufgrund von Leitungsverlusten sowie Spannungsabfällen über die Funkenstrecken bzw. Halbleiterschalter wird der theoretische Wert der Ausgangsspannung des Marx-Generators in der Praxis nicht ganz erreicht. Streuinduktivitäten der Kondensatorstufen, der Funkenstrecken als auch der Leitungen begrenzen zudem den Anstieg des Ausgangsstromes. Generell zeichnen sich Marx-Generatoren durch ihren einfachen und robusten Aufbau aus. Marx-Generatoren sind im gewerblichen Fachhandel für Ausgangsspannungen bis in den MV-Bereich erhältlich. Mit geringen Fachkenntnissen kann ein Marx-Generator aber auch mit handelsüblichen Bauelementen von einem versierten Hobbyelektroniker selber aufgebaut werden.

Der **Tesla-Transformator**¹² ist eine hybride Kompressionsstufe mit kapazitivem Energiespeicher und nachgeschaltetem induktivem Energiewischenspeicher. Sein Funktionsprinzip (Abb. 7.6) basiert auf der Resonanz magnetisch lose gekoppelter elektrischer Schwingkreise [91].

In ihrer üblichen Bauform ist die Sekundärspule als eine, meist einlagige, lange Zylinderspule mit einigen 100 bis 2000 Windungen aufgebaut. Diese liegt im Magnetfeld der kurzen Primärspule

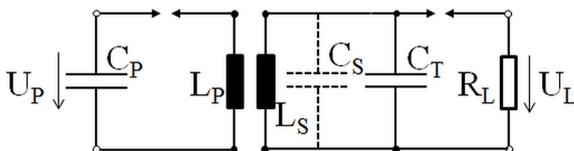


Abb. 7.6 Impuls-Tesla-Transformator

¹² Der Tesla-Transformator wird oftmals auch als Teslaspule bezeichnet.

Tabelle 7.13 Bewertung Tesla-Transformator

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		Der Tesla-Transformator ist eine Hochspannungsimpulsquelle , mit induktiver Energieübertragung und nachgeschaltetem kapazitivem Energiespeicher.
Benötigtes Fachwissen - Design und Auslegung	$K_D = 2$	Das Design und die Auslegung eines Tesla-Transformator erfordert Kenntnisse auf dem Niveau eines versierten Hobbyelektrikers . Erfahrungen und vertiefende Kenntnisse auf den Gebieten (1) Hochspannungstechnik, (2) Schwingkreise und (3) Funkenstrecken sind hilfreich aber nicht zwingend notwendig.
- Bau	$K_A = 2$	Der Bau eines Tesla-Transformators erfordert Kenntnisse auf dem Niveau eines versierten Hobbyelektrikers .
- Betrieb	$K_O = 1 - 2$	Für den Betrieb von eines Tesla-Transformators sind nur eine Einweisung in die Handhabung notwendig. (Allgemeinwissen bis Grundverständnis)
Verfügbarkeit - der Komponenten - der Impulsquelle	$AV_C = 2$ $AV_S = 2 - 3$	Die benötigten Baugruppen sind im Fachhandel erhältlich. Im Fachhandel sind einfache Bausätze für Tesla-Transformatoren für Ausgangsspannungen bis in den kV-Bereich erhältlich.
Kosten	$C_{exp} = 2 - 3$	Einfache Tesla-Transformatoren können für weniger als 1.000 € realisiert werden. Im gewerblichen Fachhandel werden leistungsstarke Tesla-Transformatoren für bis zu 100.000 € angeboten.

mit größeren Durchmessers mit wenigen (≤ 10) Windungen. Da die Primär- und Sekundärspule des Tesla-Transformators magnetisch lose gekoppelt sind, wird in der Praxis kein gemeinsamer Eisenkern benötigt. In der Anwendung als Impuls-Tesla-Transformator bildet die Primärspule (L_P) mit der Ausgangskapazität (C_P) der Primärenergiequelle bzw. einer zwischengeschalteten Transferkapazität den Primärschwingkreis. Analog wird die Sekundärspule (L_S) mit einer Transferkapazität (C_T) bzw. Lastkapazität zum Sekundärschwingkreis verschaltet. Primär- und Sekundärschwingkreis werden dabei so dimensioniert, dass sie die gleiche Resonanzfrequenz (f_{res}) aufweisen.

$$2\pi f_{res} = \frac{1}{\sqrt{L_P \cdot C_P}} = \frac{1}{\sqrt{L_S \cdot C_T}} \quad (7.7)$$

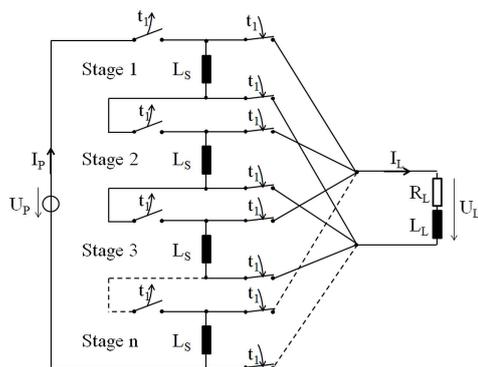
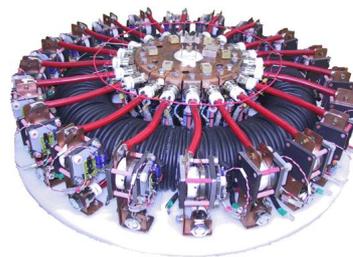
Bedingt durch die hohe Induktivität (L_S) der Sekundärspule ist in der Praxis ihre Streukapazität (C_S) ausreichend um den Sekundärschwingkreis mit dem Primärschwingkreis in Resonanz zu bringen. In der gängigsten Bauform des Tesla-Transformators, ist daher die Transferkapazität (C_T) oftmals nicht vorhanden oder als torusförmige (Kopf-)Elektrode ausgeführt. Neben dem hohen Windungsverhältnis zwischen Primär- und Sekundärspule führt die in der (gekoppelten) Sekundärspule auftretende Resonanzüberhöhung zu den, an der Sekundärseite entnehmbaren, hohen Spannungen. Durch die induktive Energiespeicherung besitzt der Tesla-Transformator eine höhere Energiedichte als der Marx-Generator [99, 100]. Sein auf Resonanz beruhendes Funktionsprinzip ermöglicht einen Betrieb mit einer, im Vergleich zum Marx-Generator, höheren Pulswiederholfrequenz. Als Einschränkung ist jedoch anzumerken, dass aufgrund der induktiven Energiespeicherung die elektrische Energie im Tesla-Transformator nur für kurze Zeit zwischengespeichert werden kann. Im Fachhandel sind einfache Bausätze für Tesla-Transformatoren für Ausgangsspannungen bis in den kV-Bereich erhältlich. Mit geringen Fachkenntnissen kann aber auch ein versierter Hobbyelektroniker einen Tesla-Transformator mit handelsüblichen Bauelementen aufbauen.

Der **XRAM-Generator** [101, 102] ist das induktive Äquivalent zum Marx-Generator. Seine Funktionsweise (Abb. 7.7) basiert auf der Idee, mehrere, in Serie verschaltete, Spulen (L_S) mit einem

Tabelle 7.14 Bewertung XRAM-Generator

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		Der XRAM-Generator ist eine Hochstromsimpulsquelle , mit induktivem Energiespeicher.
Benötigtes Fachwissen - Design und Auslegung	$K_D = 4$	Das Design und die Auslegung eines XRAM-Generators erfordert akademische Kenntnisse auf den Gebieten (1) Hochstromspulen und (2) schnelle Öffnungsschalter.
- Bau	$K_A = 3$	Für den Bau eines XRAM-Generators werden Kenntnisse auf dem Niveau einer Fachkraft (z.B. Handwerker oder Techniker) benötigt
- Betrieb	$K_O = 1 - 2$	Für den Betrieb eines XRAM-Generators sind nur eine Einweisung in die Handhabung notwendig. (Allgemeinwissen bis Grundverständnis)
Verfügbarkeit - der Komponenten	$AV_C = 2$	Die benötigten Baugruppen sind nur zum Teil im Fachhandel erhältlich. Die übrigen Baugruppen können aber mit überschaubarem Aufwand von einer Fachkraft selbst angefertigt werden.
- der Impulsquelle	$AV_S = 0$	XRAM-Generatoren werden derzeit auf dem Markt nicht angeboten.
Kosten	$C_{exp} = 2 - 3$	Die Kosten für der Bau von XRAM-Generatoren liegt im Bereich 10.000 - 100.000 €.

Gleichstrom zu durchfließen und in den Spulen die elektrische Energie induktiv zu speichern. Zum Zeitpunkt $t = t_1$ wird durch das Öffnen von Schaltern der Ladekreis unterbrochen und durch zeitgleiches Schließen weiterer Schalter werden die Spulen parallel mit der Lastimpedanz verbunden. In diesem Entladekreis addieren sich die Ströme durch die einzelnen Spulen (induktiven Stufen) zum Laststrom (I_L). Bei angenommener idealer Umschaltung zwischen Lade- und Lastkreis beträgt der Laststrom eines N-Stufigen XRAM Generator das N-fache des Ladestroms. Gleichzeitig führt der Wechsel von der Reihen- in die Parallelschaltung der induktiven Stufen zu einer Reduzierung der Ausgangsspannung auf $1/N$ -tel der Ladespannung. Als Hochstromquelle müsste der XRAM

**Abb. 7.7** XRAM Generator [101, 102]**Abb. 7.8** Toroidal XRAM generator with 20 stages (© 2013 IEEE. Reprinted, with permission, from O. Liebfried, et al., Development of XRAM generators as inductive power sources for very high current pulses, 2013 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC), June 2013 [101].)

Generator für den Einsatz in EMI-Störquellen mit einer nachgeschalteten Transferkapazität versehen werden, da die meisten RF-Modulatoren eine hohe Speisespannung erfordern. Das synchrone Schalten von N öffnenden und $2N$ schließenden Schaltern stellt eine erhebliche technische Herausforderung dar. Darüber hinaus sind schnelle Öffnungsschalter wesentlich schwieriger zu bauen als gleichschnelle Schließschalter. Diese technischen Herausforderungen als auch die Eigenschaft der nur kurzzeitigen Energiespeicherung stehen dem Vorteil der höheren Energiedichte der induktiven Energiespeicherung gegenüber. Das Prinzip des XRAM Generators ist derzeit Objekt laufender Forschungsarbeiten und wurde in EMI-Störquellen bisher nur sehr vereinzelt eingesetzt. Sie sind bisher noch nicht auf dem freien Markt erhältlich. Vor dem Hintergrund der erheblichen technologischen Herausforderungen ist davon auszugehen, dass ihr Bau derzeit nur durch Experten erfolgen kann.

Die bisher vorgestellten Hochleistungsimpulsquellen, insbesondere im GW Leistungsbereich, verwenden derzeit weitestgehend Funkenstrecken als Schließschalter und Drahtexplosionsschalter als Öffnungsschalter. Diese sind zwar in der Lage hohe Spannungen und Ströme zu schalten, sind jedoch zum Teil für den repetierenden Betrieb ungeeignet und weisen in ihrem Schaltverhalten einen recht hohen Jitter auf. Basierend auf der technologischen Entwicklung von Hochleistungshalbleiterschaltern, wird zunehmend versucht diese Schalter durch Halbleiterschalter zu ersetzen. Als Folge dieser Entwicklung sind heute **Halbleiter-Pulsgeneratoren** auf dem Markt verfügbar, in denen schnelle schließende Schalter durch Avalanche-Dioden, Avalanche-Transistoren oder Fast-Ionisation-Dynistoren [103] und schnelle öffnende Schalter durch Drift Step Recovery Dioden (DSRD), Semiconductor Opening Switch (SOS) Dioden oder SOS Transistoren realisiert sind.

Das Funktionsprinzip der **Avalanche-Pulser** beruht auf dem Lavinendurchbruch (Avalanche-Durchbruch) einer in Sperrichtung geschalteten Diode. Durch ein entsprechendes Dotierungsprofil wird in der Avalanche-Diode ein Bereich hoher elektrischer Feldstärke erzeugt, in der sich die Anzahl der freien Ladungsträger durch Stoßionisation vervielfältigt, und bei Überschreiten der Durchbruchspannung lawinenartig ansteigt. Als unmittelbare Folge wird die Diode oberhalb der Durchbruchspannung sehr schnell niederohmig und es fließt ein hoher transienter Strom. Abbildung 7.9 zeigt das Schaltprinzip eines mehrstufigen Avalanche-pulsers. Im Ausgangszustand sind die Avalanche-Dioden durch die Kondensatorstufen bis fast an ihre Durchbruchspannung (ca. 1 kV) vorgespannt. Durch schließen des Schalters S_1 entlädt sich der Kondensator C_1 und über der Diode D_1 liegt eine Spannung oberhalb der Durchbruchspannung (von bis zu 2 kV) an. Die Diode D_1 bricht durch und wird niederohmig. Hierdurch entlädt sich der Kondensator C_2 und als Folge bricht die Diode D_2 durch. Dieser Prozess setzt sich bis zum Durchbrechen der letzten Diode D_4 und dem Entladen der letzten Kondensatorstufe C_4 fort. Die schnelle Entladeflanke des letzten Kondensators wird über die Transferkapazität C_T an die Last weitergekoppelt [105]. Avalanche-Dioden (oder Transistoren) eignen sich auch als schließende Schalter bei dem Aufbau von Marx-Generatoren¹³

Im Fachhandel werden heute Halbleiter-Pulsgeneratoren mit Ausgangsspannungen bis zu 1 MV und Pulswiederholungsfrequenzen im kHz-Bereich kommerziell angeboten. In [105] berichtet Ehlen den erfolgreichen Aufbau eines 5 kV Avalanche-pulsers mit einer dreistufigen Marxstruktur und unter Verwendung handelsüblicher Bauelemente.

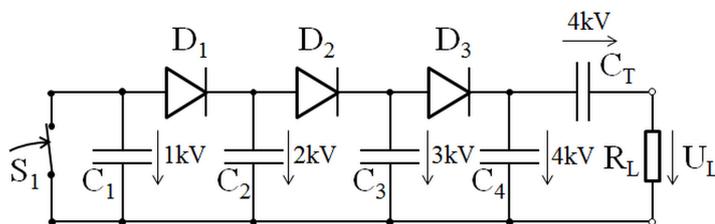


Abb. 7.9 Mehrstufiger Avalanche-pulser [104, 105]

¹³ Halbleiterbasierte Marx-Generatoren

Tabelle 7.15 Bewertung Halbleiter-Pulsgeneratoren

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		Halbleiter-Pulsgeneratoren sind Hochspannungsimpulsquelle , auf der Basis schneller öffnender und/oder schließender Halbleiterschalter .
Benötigtes Fachwissen	$K_D = 4$	Das Design und die Auslegung eines Halbleiter-Pulsgenerators erfordert eine akademische Ausbildung (z.B. Bachelor).
- Design und Auslegung		
- Bau	$K_A = 2 - 3$	Der Bau eines Halbleiter-Pulsgenerators erfordert Kenntnisse auf dem Niveau einer Fachkraft oder eines erfahrenen Hobbyelektrikers .
- Betrieb	$K_O = 1 - 2$	Für den Betrieb eines Halbleiter-Pulsgenerators sind nur eine Einweisung in die Handhabung notwendig. (Allgemeinwissen bis Grundverständnis)
Verfügbarkeit		
- der Komponenten	$AV_C = 2$	Die benötigten Komponenten und Baugruppen, insbesondere die Halbleiterschalter, sind im Fachhandel erhältlich.
- der Impulsquelle	$AV_S = 3$	Im gewerblichem Fachhandel sind einfache Halbleiter-Pulsgeneratoren für Ausgangsspannungen bis zu 50 kV und Pulswiederholraten bis zu 1 MHz erhältlich.
Kosten	$C_{exp} = 1 - 3$	Einfache Halbleiter-Pulsgeneratoren können für weniger als 1.000 €realisiert werden. Im gewerblichen Fachhandel werden leistungsstarke Halbleiter-Pulsgeneratoren für bis zu 100.000 € angeboten.

In [106] schlugen Grekhov und Mesyats vor, Halbleiterdioden als Öffnungsschalter zur Erzeugung von Hochleistungsimpulsen einzusetzen. Um den Strom zu unterbrechen wird die Diode zuerst durch einen Impuls in Durchlassrichtung mit Ladungsträgern gepumpt, die anschließend während des Arbeitsimpulses aus der Basis entfernt werden. Hierdurch kommt es zu einer starken Verringerung der Leitfähigkeit der Diode und zur Energieübergabe an die Last. Unter Ausnutzung dieses Prinzips wurden sogenannte Drift Step Recovery Dioden (DSRD) als schnelle Öffnungsschalter (mit Schaltzeiten im ns-Bereich) entwickelt. Beim Einsatz von DSRD in Hochleistungsimpulsgeräten besteht ein Problem darin, dass die maximal schaltbare Stromdichte auf ca. 200 A/cm^2 begrenzt ist. Zum Schalten höherer Stromdichten wird daher nach alternativen Technologiensätzen gesucht. 1991 entwickelten Forscher des Institut of Electrophysics der Russian Academy of Science in Ekaterinburg, Russland, Halbleiterdioden mit denen unter ausgesuchten Betriebsbedingungen eine schnelle Unterbrechung sehr hoher Stromdichten realisiert werden konnte. Die Forscher bezeichneten den hierbei auftretenden Effekt als **Semiconductor Opening Switch (SOS)** [107]. Bei den Untersuchungen konnten Stromdichten von bis zu $6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ in ca. 10 ns abgeschaltet werden. In Abbildung 7.10 ist die Prinzipschaltung eines SOS-Moduls dargestellt. Auf diesem Prinzip basierende Halbleiterimpulsquellen mit Ausgangsspannungen bis zu 0,5 MV, einer Ausgangsleistungen bis zu 0,4 GW und Pulswiederholraten im kHz-Bereich sind im Handel erhältlich.

In [90] vergleichen Schamiloglu et al. verschiedene Hochleistungsimpulsquellen anhand ihrer volumetrischen Leistungsdichte. Hierzu haben sie die Impulsleistung ausgesuchter Hochleistungsimpulsquellen als Funktion des Bauvolumens¹⁴ aufgetragen (s. Abb. 7.11(a)). Da die meisten Hochleistungsimpulsquellen, aus ähnlichen Bauelementen (z.B. Funkenstrecken, Spulen, Kondensatoren) und Materialien aufgebaut sind, liegen sie in dieser Darstellung näherungsweise entlang zweier Ge-

¹⁴ ohne Primärenergiequelle

raden. Die Gerade mit der geringeren Steigung beschreibt hierbei Systeme, die aus traditionellen Materialien aufgebaut sind, die Gerade mit der größeren Steigung charakterisiert Systeme die explosionsgetrieben sind oder aus hochentwickelten (high-energy-density) Materialien aufgebaut wurden.

Da die meisten Hochleistungsimpulsquellen, unabhängig von ihrem jeweiligen Funktionsprinzip, aus ähnlichen Bauelementen und Materialien aufgebaut sind, weisen sie vergleichbare volumetrische Leistungsdichten auf.

In [90] wird diese Eigenschaft nicht weiter diskutiert. Diese kann jedoch im Rahmen der Modellierung eines IEMI-Szenarios zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit einer Störquelle gegebener (oder angenommener) Baugröße nutzen. In der doppelt-logarithmischen Darstellung lassen sich Geraden durch die Funktionsgleichung

$$f(x) = x^m \cdot 10^{ex} \quad (7.8)$$

beschreiben. Aus den in [90] dargestellten Werten ergeben sich die in Tabelle 7.16 aufgetragenen Parameter bzw. die Funktionsgleichungen:

$$P_t(V) = \left(\frac{V}{\text{m}^3}\right)^{0,878} \cdot 10^{0,75} \text{ GW, für traditionellen Technologie} \quad (7.9)$$

$$P_h(V) = \left(\frac{V}{\text{m}^3}\right)^{2,75} \cdot 10^8 \text{ GW, für hochentwickelte Technologie} \quad (7.10)$$

Tabelle 7.16 Parameter der Trendlinien (nach [90])

Parameter	traditionelle Technologie	hochentwickelte Technologie
m (Steigung)	0,875	2,75
ex (Offset)	0,75	8

Die durch Gleichung (7.9) und Gleichung (7.10) beschriebenen Funktionen nähern den Mittelwert der Impulsleistung von Impulsgeneratoren der jeweiligen Technologie an. Die Leistungswerte der Systeme, die der hochentwickelten Technologie zugeordnet sind, liegen recht nahe an den durch Gleichung (7.10) abgeschätzten Mittelwerten (s. Abb. 7.11(a)). Demgegenüber ist bei der traditionellen Technologie eine deutliche Streuung beobachtbar, die im Rahmen des EMI-Risikomanagements zu einer erheblichen Unterschätzung der betrachteten Bedrohung führen kann. Mit dem Ziel einer konservativen (worst case) Abschätzung der Leistungsfähigkeit der Impulsgeneratoren bietet es sich hier an, anstelle des Mittelwertes ($P_t(V)$) eine obere Grenzfunktion ($P_{t,max}(V)$) zu verwenden. In der Abbildung 7.11(a) ist die gesuchte obere Grenzfunktion für die traditionelle Technologie durch die Beziehung gegeben:

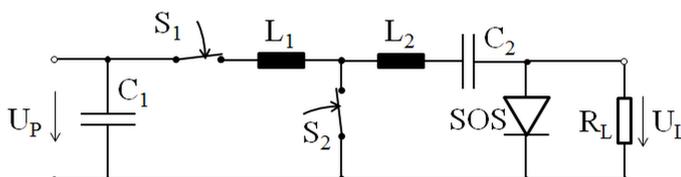
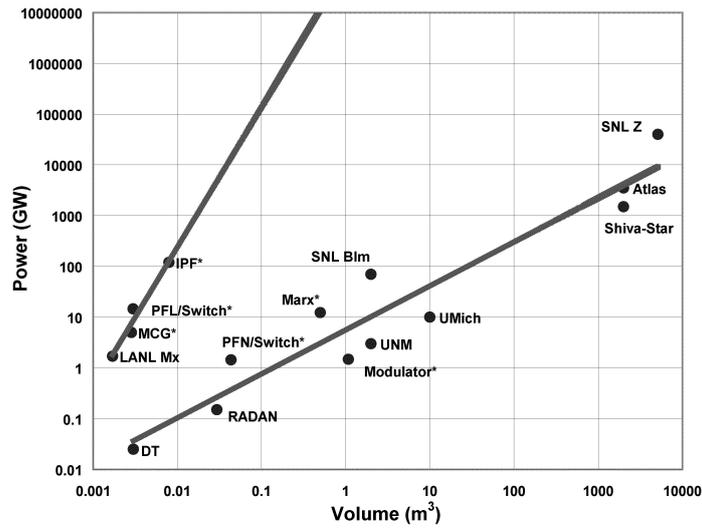
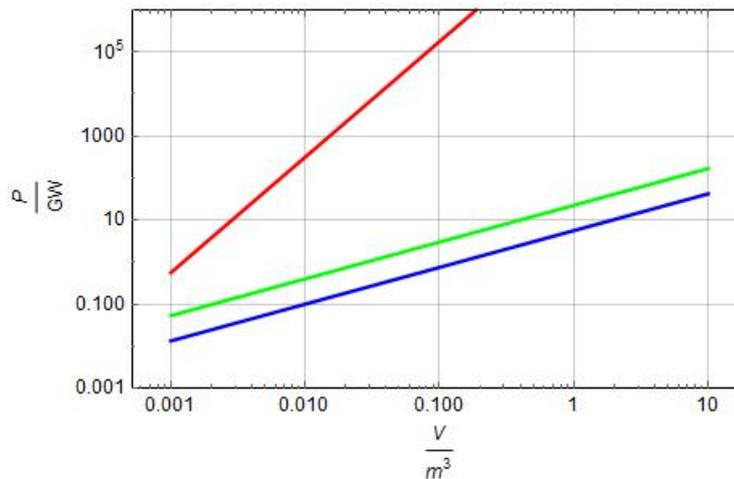


Abb. 7.10 Semiconductor Opening Switch (SOS)-Modul [98]



(a)

(© 2010 IEEE. Reprinted, with permission, from E. Schamiloğlu, et al., Modern Pulsed Power: Charlie Martin and Beyond, Proceedings of the IEEE, 92(7):1015, July 2010 [90].)



(b)

Abb. 7.11 Impulsausgangsleistung von Hochleistungsimpulsquellen (a: Originalabbildung in [90]; b: analytische Nachbildung der Trendlinien); blaue Linie: Durchschnittswert traditionelle Technologie (Gl. 7.9), grüne Linie: worst case Abschätzung traditionelle Technologie (Gl. 7.11), rote Linie: hochentwickelte Technologie (Gl. 7.10)

$$P_{t,\max}(V) = \left(\frac{V}{\text{m}^3}\right)^{0,878} \cdot 4 \cdot 10^{0,75} \text{ GW} \quad (7.11)$$

Unter Anwendung der Gleichungen (7.9) bis (7.11) wurden die maximalen Impulsleistungen für Impulsgeneratoren vorgegebener Bauvolumina abgeschätzt und in Tabelle 7.17 aufgetragen.

Bei der überwiegenden Zahl an Impulsgeneratoren weist der Zeitverlauf der Ausgangsspannung und/oder des Ausgangsstromes die Form einer doppelt exponentiellen Funktion auf.

$$u(t) = k\hat{u} \left(e^{-\frac{t}{T_{\text{FWHM}}}} - e^{-\frac{t}{\tau_{10\% - 90\%}}} \right), \text{ für } t \geq 0 \quad (7.12)$$

Tabelle 7.17 Maximale Impulsleistung von Impulsgeneratoren ausgesuchter Baugröße

Mobilität	Bauvolumen V_{bau} m^3	Impulsleistung		
		P_t GW	$P_{t,max}$ GW	P_h GW
Technologie		traditionelle		hochentwickelte
		Durchschnitt Gl. 7.9	worse case Gl. 7.11	Gl. 7.10
transportabel	77,00	254,882	1.019,527	
	43,50	154,38	617,524	
	25,67	97,146	388,524	
mobil	10,00	42,462	169,848	
	5,10	23,510	94,039	
	3,33	16,184	64,736	
sehr mobil	0,20	1,369	5,475	1,20E+06
	0,11	0,810	3,239	2,31E+05
	0,07	0,522	2,087	5,83E+04
hoch mobil	0,02	0,181	0,725	2,13E+03
	0,010	0,099	0,395	316,23
	0,007	0,069	0,276	103,69

Tabelle 7.18 Generische Impulsgeneratoren

Technologie		traditionell Durchschnitt	traditionell Worse Case	hochentwickelt
Leistung		Gl. (7.9)	Gl. (7.11)	Gl. (7.10)
Benötigtes Fachwissen für				
- Design	$K_{D,IG}$	2-3	3	4-5
- Bau	$K_{A,IG}$	2	2	4
- Betrieb	$K_{O,IG}$	1-2	1-2	3
Verfügbarkeit				
- Komponenten	$AV_{C,IG}$	2	2	3-4
- Impulsgenerator	$AV_{S,IG}$	3	3	4
Kosten	$C_{exp,IG}$	1-2	2-3	3-4

In einigen Anwendungsfällen genügt dieser Zeitverlauf nicht den Anforderungen der Eingangsgrößen des nachgeschalteten Hochfrequenzmodulators oder der Antenne, so dass die Impulsdauer (T_{FWHM}), die Dauer der ansteigenden Signalfanke ($\tau_{10\% - 90\%}$) oder die Pulsform durch pulsformende Schaltungen angepasst werden müssen. Die pulsformenden Schaltungen sind eine wesentliche Baugruppe von Impulsquellen und UWB-Quellen. Ihre Funktionsweise und charakteristischen Eigenschaften werden im Abschnitt 7.5 eingehender betrachtet.

7.4 Charakteristische Daten von RF-Modulatoren

In der Regel kann das von dem Hochspannungs Impulsgenerator bereitgestellte (Basisband) Signal nur mit einem sehr schlechten Wirkungsgrad über eine Antenne direkt abgestrahlt werden. Darüber hinaus überdeckt das Signalspektrum nicht den verwundbaren Frequenzbereich des Zielsystems. Es ist daher notwendig, das abzustrahrende Hochfrequenzsignal hoher Leistung zunächst in einem RF-Modulator zu erzeugen.

Im Bereich der bewussten elektromagnetischen Wechselwirkungen häufig eingesetzte RF-Modulatoren sind:

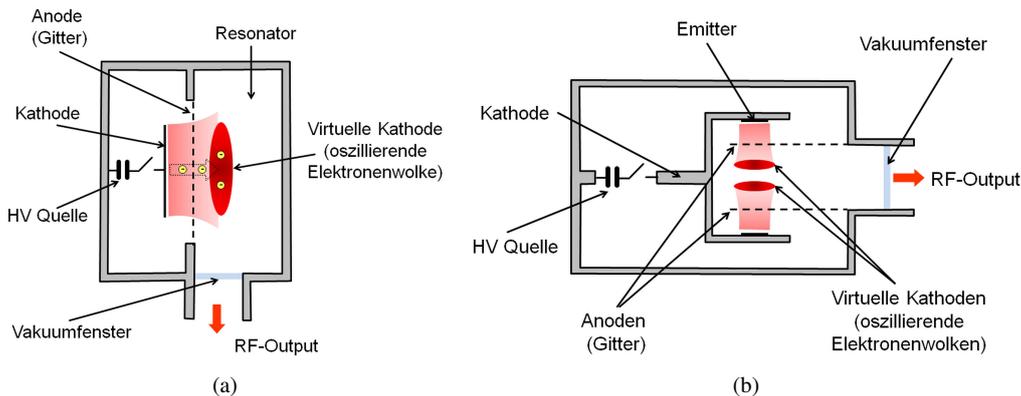


Abb. 7.12 Prinzip eines Virtual Cathode Oscillator (VIRCATOR), (a) axiale Bauform, (b) coaxiale Bauform

- Virtual Cathode Oscillator (VIRCATOR)¹⁵
- Magnetron¹⁶
- Magnetically Insulated Line Oscillator (MILO)¹⁷
- Klystron¹⁸
- Leitungsresonatoren¹⁹
- Switched Oscillator²⁰
- Resonante Antennen²¹

In den nachfolgenden Abschnitten sollen das Funktionsprinzip, die Eigenschaften der jeweiligen RF-Modulatoren sowie das für das Design und den Bau notwendige Fachwissen kurz vorgestellt werden.

7.4.1 Virtual Cathode Oscillator (VIRCATOR)

Der Prinzipielle Aufbau eines **Virtual Cathode Oscillator** (VIRCATOR) ist in Abbildung 7.12 dargestellt. Durch Anlegen einer Hochspannung werden Elektronen aus der Kathode emittiert und auf das Anodengitter hin beschleunigt. Nach Durchtritt durch das Anodengitter bremsen das Potential zwischen den Elektronen und der Anode die Elektronen ab, so dass diese in einem Abstand hinter der Anode, der näherungsweise dem Kathoden-Anoden-Abstand entspricht, gestoppt werden und sich eine Elektronenwolke, die sogenannte **virtuelle Kathode**, bildet.

Durch die nachfolgenden Elektronen des Elektronenstrahls wächst sowohl der Raumbereich als auch die Raumladungsdichte der virtuellen Kathode weiter an. Die ansteigende Raumladungsdichte führt dazu dass auch Elektronen mit höherer Geschwindigkeit abgebremst werden und die virtuelle Kathode sich der Anode nähert. Die virtuelle Kathode löst sich auf, sobald die virtuelle Kathode einen Bereich erreicht, in dem die Geschwindigkeit der Elektronen ausreicht um sie zu durchfliegen. In dem nun ungestörten Elektronenstrahl bildet sich erneut eine virtuelle Kathode aus, die ebenfalls den beschriebenen Prozess durchläuft. Die periodische Bildung und Auflösung der virtuellen

¹⁵ Abschnitt 7.4.1, Seite 104 und Anhang C.1, Seite 189

¹⁶ Abschnitt 7.4.2, Seite 106 und Anhang C.2, Seite 191

¹⁷ Abschnitt 7.4.3, Seite 108 und Anhang C.3, Seite 193

¹⁸ Abschnitt 7.4.4, Seite 110 und Anhang C.4, Seite 195

¹⁹ Abschnitt 7.4.5, Seite 113 und Anhang C.5, Seite 201

²⁰ Abschnitt 7.4.6, Seite 115 und Anhang C.6, Seite 203

²¹ Abschnitt 7.4.7, Seite 117 und Anhang C.7, Seite 205

Tabelle 7.19 Bewertung VIRCATOR

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		VIRCATOREN sind Vakuum-Elektronenröhren .
Benötigtes Fachwissen - Design und Auslegung	$K_D = 4$	Das Design und die Auslegung eines VIRCATORS erfordert eine akademische Ausbildung (z.B. Ingenieur) mit Erfahrung auf den Gebieten (1) Erzeugung und Steuerung eines Elektronenstrahls, (2) Plasmaphysik und (3) RF-Resonatoren
- Bau	$K_A = 3$	Für den Bau eines VIRCATORS werden Kenntnisse in (1) Vakuumtechnologie, (2) Hochspannungstechnik sowie der zugehörigen Fertigungstechniken auf dem Niveau einer Fachkraft (z.B. Handwerker oder Techniker) benötigt
- Betrieb	$K_O = 1 - 2$	In Abhängigkeit von dem Reifegrad des aufgebauten VIRCATORS sind für dessen Betrieb nur eine Einweisung in die Handhabung notwendig. (Allgemeinwissen bis Grundverständnis)
Verfügbarkeit - der Komponenten	$AV_C = 2 - 3$	Die benötigten Baugruppen sind zum größten Teil im Fachhandel erhältlich. Die Fertigung der übrigen Komponenten erfordert nicht mehr als eine abgeschlossenen Berufsausbildung.
- des RF-Modulators	$AV_S = 0$	VIRCATOREN werden derzeit nicht im Handel angeboten.
Baugröße / Mobilität	$M = 3$ $M = 3$ $M = 5$	für UHF-Band VIRCATOR für L-Band VIRCATOR für S- und C-Band VIRCATOR Als Daumenregel ist der Aussendurchmesser eines axialen VIRCATORS größer als die Wellenlänge des erzeugten elektrischen Feldes ($r_a \geq \lambda/2$; In der coaxialen Bauform liegt der Durchmesser des VIRCATORS im Bereich des zweifachen der Wellenlänge ($r_a \approx \lambda$).
Kosten	$C_{exp} \leq 2$	Die Kosten für den Bau eines VIRCATORS liegt bei ca. 5.000 €
Frequenzbereich	UHF, L, S, C	0,3 - 10 GHz
Bandbreite		Schmalband / Hypoband
Frequenzagilität	$F_{AG} = 1 - 2$	Die meisten Virkatoren arbeiten auf einer festen Frequenz, es gibt aber Bauvarianten die bis zu 1 % durchstimmbare sind. [108]
Pulslänge		$T_{FWHM} = 25 - 140$ ns
Pulswiederholfrequenz (PRF)	$PRF \leq 10$ Hz	In der Literatur wird nur der Einzelpulsbetrieb beschrieben, theoretisch sollte aber ein repetierender Betrieb bis zu einer PRF von 10 Hz möglich sein.
Leistung	≤ 1 GW	[109]
Effizienz	$\eta \leq 15$ %	[109, 110]

Kathode resultiert in eine Oszillation der Raumladungsdichte, welche einen Teil der im VIRCATOR erzeugten RF-Energie generiert. Die Zeit zwischen der Bildung zweier virtueller Kathoden entspricht der Periodendauer der erzeugten RF-Felder.

Nicht alle Elektronen des Elektronenstrahls tragen zur Bildung der virtuellen Kathode bei. Ein Teil wird durch die virtuelle Kathode reflektiert, durchfliegt das Anodengitter und wird erneut an der Kathode reflektiert. Diese Schwingung von Elektronen zwischen der Kathode und der virtuellen Kathode erzeugt einen weiteren Teil des RF-Feldes. Im Allgemeinen werden durch die beschriebenen Prozesse in VIRCATOREN zwei unterschiedliche Frequenzen angeregt. Als unmittelbare Folge weisen die VIRCATOREN, im Vergleich zu anderen RF-Modulatoren, eine relativ geringe

Effizienz auf. Aus diesem Grund werden sie derzeit nicht industriellen Anwendungen eingesetzt und es existiert für sie auch kein kommerzieller Anbieter oder Markt. Das für die Dimensionierung benötigte Fachwissen ist in Literaturdatenbanken oder aber dem Internet frei zugänglichen Fachliteratur [111, 108, 112] hinreichend detailliert beschrieben.

VIRCATORen zeichnen sich durch einen sehr einfachen und relativ robusten mechanischen Aufbau aus. Sie werden aktuell vorwiegend im Zusammenhang von Anwendungen des Elektronischen Kampfes oder HPEM-Wirksamkeiten erforscht. In Tabelle 7.19 ist die Bewertung des VIRCATORs zusammenfassend dargestellt. Eine detaillierte Diskussion der Bewertung, insbesondere dessen Baugröße, ist in Anhang C.1²² zu finden.

7.4.2 Magnetron

Ein sehr weit verbreiteter RF-Modulator ist das **Magnetron**. Es besteht aus einem massiven Anodenblock den eine zentrisch angebrachte Kathode umgibt. Parallel zur Kathode liegt ein statisches Magnetfeld, das je nach Bauart durch einen Permanentmagneten oder einen Elektromagneten erzeugt wird. Bei Magnetrons im niedrigen Leistungsbereich ist die Kathode beheizt, um so die Emission von Elektronen zu begünstigen. Neben der zentrischen Bohrung für die Kathode, den Laufräumen, sind in den Anodenblock weitere Hohlräume eingearbeitet, die über eine schmale Apertur Verbindung zum Laufräumen haben (Abb. 7.13 (a)). Die Hohlräume stellen Hohlraumresonatoren dar, welche durch ihre Form²³ und Dimension die Frequenz des Magnetrons bestimmen.

Wird zwischen Anode und Kathode eine Spannung angelegt, führt das hierdurch hervorgerufene elektrische Feld zur Emission von Elektronen aus der Kathode. Diese werden durch das statische magnetische Feld auf Kreisbahnen abgelenkt. In Abhängigkeit von der anliegenden Spannung und der Stärke des Magnetfeldes umkreisen die Elektronen die Kathode oder bewegen sich auf kreisförmig gebogenen Bahnen von der Kathode zur Anode (Abb. 7.13 (b)). Da die Elektronen auf diesen Bewegungsbahnen eine Beschleunigung erfahren erzeugen sie ein, zu ihrer Flugbahn tangentiales, elektrisches Feld. Dieses Feld regt die umgebenen Hohlraumresonatoren zur Resonanzschwingung an.

Magnetrons werden derzeit als stabile und robuste RF-Quellen in Haushaltsmikrowellen, Medizingeräten, Radargeräten und Industrieanwendungen eingesetzt. Als unmittelbare Folge haben sie eine sehr gute Verbreitung im kommerziellen Elektronikmarkt. Hierdurch sind Magnetrons bis in den MW-Leistungsbereich sehr gut auf dem freien Markt erhältlich. So ist z.B. das in Abbildung 7.14 dargestellte Magnetron als Ersatzteil für Küchenmikrowellen im freien Handel für weniger als 60 € erhältlich. In dieser Bauform wird das benötigte Magnetfeld durch zwei Dauermagnete erzeugt und der Laufräumen ist fest vakuumversiegelt, so dass zusätzliche Vakuumarmaturen entfallen.

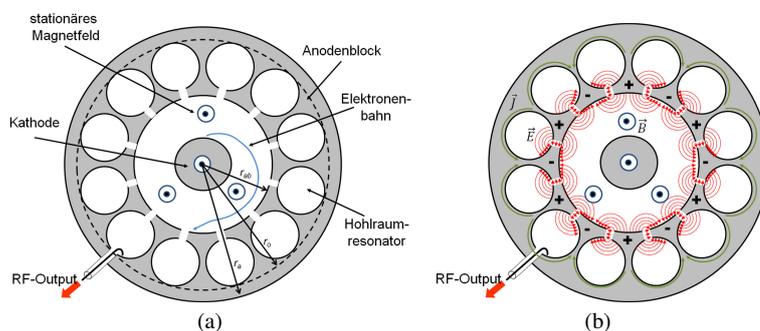


Abb. 7.13 Prinzip eines Magnetron, (a) prinzipielle Bauform, (b) Feldverteilung

²² ab Seite 189

²³ übliche Resonatorenformen sind (a) der Loch-Typ, (b) der Schlitz-Typ, (c) der Steg-Typ, und (d) der Rising Sun-Typ

Tabelle 7.20 Bewertung Magnetron

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		Das Magnetron ist eine Kreuzfeld (Laufzeit) Vakuum-Elektronenröhren .
Benötigtes Fachwissen - Design und Auslegung - Bau - Betrieb	$K_D = 4$	Das Design und die Auslegung eines Magnetrons erfordert eine akademische Ausbildung (z.B. Ingenieur) mit Erfahrung auf den Gebieten (1) Plasmaphysik und (2) RF-Resonatoren
	$K_A = 3$	Für den Bau eines Magnetrons werden Kenntnisse in (1) Vakuumtechnologie, (2) Hochspannungstechnik sowie der zugehörigen Fertigungstechniken auf dem Niveau einer Fachkraft (z.B. Handwerker oder Techniker) benötigt
	$K_O = 1 - 2$	Für den Betrieb von Magnetrons sind in der Regel nur eine Einweisung in die Handhabung notwendig. (Allgemeinwissen bis Grundverständnis)
Verfügbarkeit - der Komponenten - des RF-Modulators	$AV_C = 2$	Die benötigten Baugruppen sind im Fachhandel erhältlich.
	$AV_S = 1 - 2$	Magnetrons bis in den MW-Leistungsbereich sind sehr gut auf dem freien Markt erhältlich.
Baugröße / Mobilität	$M = 3 - 4$	für UHF-Band Magnetron
	$M = 5$	für L-, S- und C-Band Magnetron
		Als Daumenregel beträgt der Aussendurchmesser eines Magnetron das 1,5-fache der Wellenlänge des erzeugten Feldes ($r_a = 0,75 \lambda$); Die Höhe des Magnetrons liegt im Bereich des 0,6 - 2 fachen der Wellenlänge (s. Tabellen C.2 und C.3)
Kosten	$C_{exp} = 1 - 3$	Niedrige Leistungslevel sind als Baugruppen für Haushaltsmikrowellen für ca. 100 € erhältlich.
Frequenzbereich	UHF, L, S, C, X, ...	0,3 - 300 GHz
Bandbreite		Schmalband / Hypoband
Frequenzagilität	$F_{AG} = 1 - 2$	Die meisten Magnetrons arbeiten auf einer festen Frequenz, es gibt aber konventionelle Bauvarianten die bis zu 5 % durchstimmbare sind.
	$F_{AG} = 1 - 3$	relativistisches Magnetron [113]
Pulslänge	$T_{FWHM} \leq \text{ms}$	konventionelles Magnetron [113]
	$T_{FWHM} \leq 100 \text{ ns}$	relativistisches Magnetron [113]
Pulswiederholfrequenz (PRF)	$PRF \leq 100 \text{ Hz}$	
Leistung	$\leq 10 \text{ MW}$	konventionelles Magnetron [113]
	$\leq 1 \text{ GW}$	relativistisches Magnetron [113]
Effizienz	$\eta \leq 80 \%$	konventionelles Magnetron niedriger Leistung
	$\eta \leq 50 \%$	konventionelles Magnetron hoher Leistung [113]
	$\eta \leq 40 \%$	relativistisches Magnetron [113]

Mit seinem Bauvolumen von $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ ist es in der Lage dauerhaft ein Mikrowellenfeld von 0,9 kW bei einer Frequenz von 2,45 GHz (S-Band) zu erzeugen.

Im Vergleich hierzu zeichnet sich das in Abbildung 7.15 abgebildete Industriemagnetron mit $1,18 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ ein doppelt so großes Bauvolumen, erzeugt jedoch mit einer Dauerleistung von 4,0 kW eine mehr als vierfache RF-Leistung. Im gepulsten Betrieb kann die Spitzenleistung bis zu 3,1 MW gesteigert werden. Hierzu ist es jedoch notwendig das Magnetfeld mittels eines starken Elektromagneten zu generieren und die Kathode als auch den Anodenblock mit Wasser zu kühlen. Auch der Preis liegt um mehrere Zehnerpotenzen über dem eines Haushaltsmagnetrons. Neben den standardisierten Typen werden von Herstellern²⁴ *Customized Magnetrons* angeboten, die speziell,

²⁴ z.B.: e2v technologies (www.e2v.com) oder muegge (www.muegge.de)

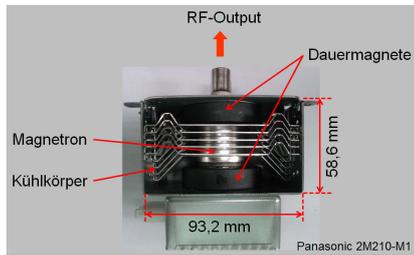


Abb. 7.14 Haushaltsgeräte-Magnetron vom Typ Panasonic 2M210-M1; ($f_c = 2,45$ GHz, $P_{out} = 0,9$ kW, $\eta = 72$ %)

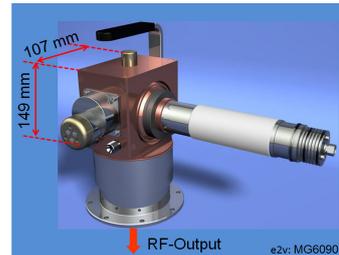


Abb. 7.15 3 MW S-Band Magnetron; $f_c = 3$ GHz, $P_{out} = 1$ GW (From e2v technologies Magnetron Datasheet Part No. MG6090, www.e2v.com. With permission)

nach der Spezifikation des Kunden entworfen und gefertigt werden. In Tabelle 7.20 ist die Bewertung des Magnetron zusammenfassend dargestellt. Eine detaillierte Diskussion der Bewertung, insbesondere dessen Baugröße, ist in Anhang C.2²⁵ zu finden.

7.4.3 Magnetically Insulated Line Oscillator (MILO)

Der **Magnetically Insulated Line Oscillator** (MILO) ist vom Funktionsprinzip ein linear aufgebautes Magnetron. Die Hohlraumresonatoren werden durch konzentrisch um die Kathode angeordneten Blenden (Stege) gebildet (Abb. 7.16). Der wesentlicher Unterschied des MILO zum Magnetron besteht darin, dass beim MILO die emittierten Elektronen nicht mit einem externen Magnetfeld, sondern durch das Magnetfeld des Kathodenstromes auf die Kathode hin umlenkt werden. Diesem Mechanismus, der einen Kurzschluss zwischen Kathode und Anode unterbindet, verdankt der MILO auch seinen Namen. Zu Erzeugung des isolierend wirkenden Magnetfeldes, und somit für den Betrieb des MILOs, werden jedoch Spannungen von mehr als 500 kV benötigt. Da keine Vorrichtung zur Erzeugung eines externen Magnetfeldes, z.B. Dauermagnet oder Elektromagnet, benötigt wird, ist der MILO ein relativ leichter und kompakter RF-Modulator.

In Abbildung 7.16 ist der prinzipielle Aufbau eines klassischen MILO dargestellt. Die zwischen Anode und Kathode anliegende Hochspannung führt zur Emission von Elektronen aus dem mit einem Emitter²⁶ überzogenen Teil der Kathode. Ein Teil der emittierten Elektronen wird durch den Kollektor²⁷ eingefangen und über Verbindungsstege (Stubs) zur Anode hin abgeführt. Der zu die-

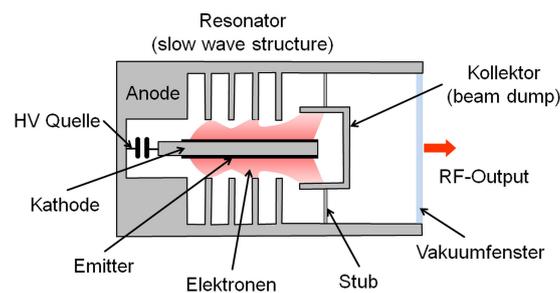


Abb. 7.16 Prinzip eines Magnetically Insulated Line Oscillator (MILO)

²⁵ ab Seite 191

²⁶ Zur Verbesserung der Elektronenemission wird die Kathode mit Samt oder Seide überzogen. In neueren Arbeiten wurden auch Kohlenstoff-Nanotubes als Emitter eingesetzt.

²⁷ Der Kollektor wird in der Literatur oftmals auch als Last (engl.: Load) bezeichnet.

Tabelle 7.21 Bewertung MILO

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		Der MILO ist eine Kreuzfed (Laufzeit) Vakuum-Elektronenröhren .
Benötigtes Fachwissen - Design und Auslegung	$K_D = 4$	Das Design und die Auslegung eines MILO erfordert eine akademische Ausbildung (z.B. Ingenieur) mit Erfahrung auf den Gebieten (1) Erzeugung und Steuerung eines Elektronenplasmas und (2) RF-Resonatoren.
- Bau	$K_C = 3$	Für den Bau eines MILO werden Kenntnisse in (1) Vakuumtechnologie, (2) Hochspannungstechnik sowie der zugehörigen Fertigungstechniken auf dem Niveau einer Fachkraft (z.B. Handwerker oder Techniker) benötigt
- Betrieb	$K_A = 1 - 2$	In Abhängigkeit von dem Reifegrad des aufgebauten MILOs sind für dessen Betrieb nur eine Einweisung in die Handhabung notwendig. (Allgemeinwissen bis Grundverständnis)
Verfügbarkeit - der Komponenten	$AV_C = 2 - 3$	Im Fachhandel sind Komponenten erhältlich, die für den Bau eines MILO verwendet werden können. Der überwiegende Teil der Baugruppen müssen speziell angefertigt werden. Die hierfür benötigten Kenntnisse und Fertigkeiten entsprechen denen eines erfahrenen Facharbeiters mit abgeschlossener Berufsausbildung.
- des RF-Modulators	$AV_S = 0$	MILOs werden derzeit nicht im Handel angeboten .
Baugröße / Mobilität	$M = 3 - 4$ $M = 4 - 5$ $M = 5$	für L-Band MILO für S-Band MILO für C- und X- Band MILO
		Als Daumenregel lassen sich der Aussenradius eines MILO über die Beziehung $r_a \approx 0,6\lambda_c$ und die Baulänge über $L_{ges} \approx 6\lambda_c$ abschätzen. Als Schätzwert für das Bauvolumen folgt $V_{RF} \approx 7\lambda_c^3$.
Kosten	$C_{exp} \leq 2$	Die Kosten für den Bau eines MILO liegt bei ca. 5.000 €
Frequenzbereich	L, S, C, X	1 - 12 GHz
Bandbreite		Schmalband / Hypoband
Frequenzagilität	$F_{AG} = 1 - 2$	Aufgrund ihrer Bauform arbeiten MILOs nur auf einer festen Arbeitsfrequenz
Pulslänge	$T_{FWHM} \leq 600$ ns	[114]
Pulswiederholfrequenz (PRF)	$PRF \leq 10$ Hz	In der Literatur wird nur der Einzelpulsbetrieb beschrieben, theoretisch sollte aber ein repetierender Betrieb bis zu einer PRF von 10 Hz möglich sein.
Leistung	$P_{max} \leq 7$ GW	[115, 109]
Effizienz	$\eta_{max} \leq 15$ %	[116]

sem Elektronenfluss zugehörige Strom I_c in der Kathode erzeugt ein, die Kathode umschließendes, tangenciales Magnetfeld. Dieses Magnetfeld lenkt die radial aus dem Emitter austretenden Elektronen axial, entgegen der Stromflussrichtung (in Abb. 7.16 nach rechts) ab. Beim Erreichen des kritischen Katodenstromes I_{cr} werden die Elektronen soweit abgelenkt, dass sie in axialer Richtung driften und die Anodenstruktur nicht mehr erreichen können. In diesem Zustand ist die Kathode durch ihr Magnetfeld isoliert und der Stromfluss erfolgt nahezu vollständig über den Elektronenfluss zum Kollektor.

Wie beim Magnetron wird auch im MILO durch die Ablenkung der Elektronen ein axial polarisiertes, elektrisches Feld erzeugt, das in der Resonatorstruktur der Anode Resonanzschwingungen

angregt. In den meisten Fällen werden die Resonatoren²⁸ so dimensioniert, dass der TM_{00} Mode angeregt wird [117]. Durch bewusst oder unbewusst eingebrachte Unsymmetrien in der Resonatorstruktur können dazu führen, dass der hybride HEM_{11} Mode als dominanter Mode angeregt wird [118]. Da benachbarte Resonatoren über das Potential der sie trennenden Blende miteinander gekoppelt sind, schwingen diese mit einer Phasenverschiebung von π an. In axialer Richtung bilden die Resonatorstruktur eine im longitudinalen π Mode oszillierende Verzögerungsleitung. Im Raum zwischen der Resonatorstruktur und der Kathode wirkt die elektrische Feldstärke der Resonatoren auf die driftenden Elektronen. Je nach Phasenlage werden diese in axialer Richtung beschleunigt oder verzögert und hierdurch die Dichte des Elektronenplasmas moduliert. Diese Dichtemodulation des Elektronenplasmas führt zu einer Verstärkung der in axialer Richtung fortschreitenden elektromagnetischen Welle. Diese wird hinter dem Kollektor in den TM_{01} Mode²⁹ eines Hohlleiters gleichen Durchmessers eingekoppelt und über eine angeschlossene Antenne abgestrahlt.

Steigt der Kathodenstrom und das durch ihn erzeugte Magnetfeld weiter an, werden die Elektronen früher und stärker auf die Kathode hin umgelekt. Hierbei wird das Elektronenplasma so dicht um die Kathode konzentriert, dass die Elektronen sich nicht mehr nahe genug an der Resonatorstruktur bewegen um in dieser Feldresonanzen anzuregen und mit ihnen in Wechselwirkung zu treten. Als Folge kommt die Erzeugung des RF-Feldes zum Erliegen. Die Stärke des Kathodenstroms wird neben der anliegenden Spannung durch die Breite des Spaltes zwischen Kathode und Kollektor, die Länge des axialen Überstandes³⁰ des Kollektors über die Kathode sowie das Material des Kollektors beeinflusst.

Insgesamt betrachtet ist der MILO ein kompakter und leichter RF-Modulator mit dem elektromagnetische Felder im Gigawattbereich erzeugt werden können. Da der MILO im Vergleich zu anderen RF-Modulatoren eine relativ geringe Effizienz aufweist, wird er derzeit nicht in industriellen Anwendungen eingesetzt. Aus diesem Grund existieren für MILOs derzeit auch keine kommerziellen Anbieter. Die Bewertung des MILO ist in Tabelle 7.21 zusammenfassend dargestellt. Eine detaillierte Diskussion der Bewertung, insbesondere dessen Baugröße, ist in Anhang C.2³¹ zu finden.

7.4.4 Klystron

Das **Klystron** ist eine Laufzeitröhre, deren Funktionsprinzip auf der Geschwindigkeitsmodulation des Elektronenstrahls durch ein elektromagnetisches Streufeld beruht. Das Funktionsprinzip des Klystrons läßt sich anschaulich am Beispiel des in Abbildung 7.17 abgebildeten Zweikammer-Klystron erläutern [119]. Durch Anlegen einer Hochspannung werden die Elektronen aus der Kathode emittiert und auf das Anodengitter hin beschleunigt. Hierdurch bildet sich hinter der Anode ein Elektronenstrahl mit annähernd konstanter Dichte in dem sich Elektronen mit einer der Beschleunigungsspannung entsprechenden Driftgeschwindigkeit von dem Anodengitter weg bewegen.

Durch Einspeisung eines RF-Signals in die *Buncher Cavity* wird in dieser eine elektromagnetische Schwingung angeregt, deren elektrische Komponente im Zentrum des Resonators mit dem Elektronenstrahl in Wechselwirkung tritt. Je nach Phasenlage des Resonanzfeldes werden die Elektronen beschleunigt (Elektrische Feldstärke entgegen der Bewegungsrichtung des Elektrons orientiert) oder abgebremst (Elektrische Feldstärke in Bewegungsrichtung des Elektrons orientiert). Die Auswirkung dieser Geschwindigkeitsmodulation auf die Elektronendichte im Elektronenstrahl lässt sich anschaulich anhand des in Abbildung 7.18 dargestellten Applegate-Diagramms erläutern. Das Applegate-Diagramm stellt die Trajektorien von Elektronen als Driftstrecke über der Zeit dar. In die-

²⁸ Im MILO sind die Resonatoren die konzentrischen Hohlräume zwischen den Blenden.

²⁹ Wird die Resonatorstruktur im HEM_{11} Mode angeregt, ist es günstiger die axial fortschreitende Welle in den TE_{11} Mode des angeschlossenen Hohlleiters einzukoppeln [118].

³⁰ Load-Length

³¹ ab Seite 189

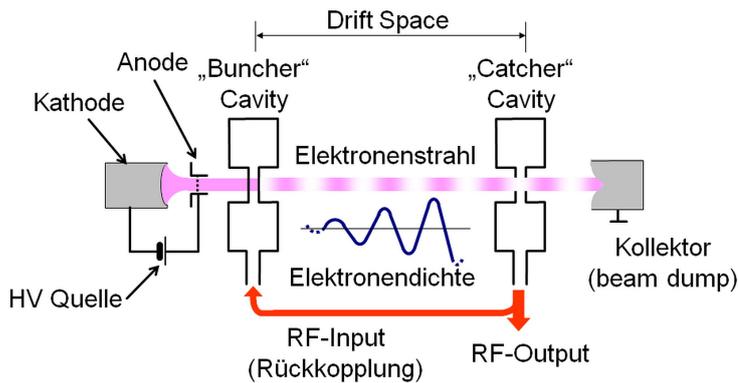


Abb. 7.17 Prinzip eines Zweikammer-Klystron Oszillators

ser Darstellung zeichnen sich Elektronen mit einer höheren Driftgeschwindigkeit durch eine steilere Trajektorie aus. Durch ihre höhere Driftgeschwindigkeit nähern sich die beschleunigten Elektronen den früher ausgesendeten, langsameren Elektronen und entfernen sich gleichzeitig von den später emittierten langsamen Elektronen. Nach einer bestimmten Laufzeit befinden sich gebremste, unbeeinflusste und beschleunigte Elektronen an derselben Stelle so dass sich Elektronenpakete, sogenannte Bunches, bilden. Da sich die Elektronen weiterhin mit unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegen, zerfließen die Bunches wieder, um sich später erneut zu formen. Die Geschwindigkeitsmodulation der Elektronen in der *Buncher Cavity* erzeugt somit entlang des Laufweges des Elektronenstrahls eine periodischen Dichtemodulation. Das erste Maximum der Dichtemodulation (gestrichelte Linie) kennzeichnet die optimale Position für die *Catcher Cavity*.

Beim Durchtritt des dichtemodulierten Elektronenstrahls durch die *Catcher Cavity*, wird in dieser ein elektromagnetisches Resonanzfeld angeregt. Der Lenzschen Regel folgend ist die elektrische Feldstärke in der *Catcher Cavity* so orientiert, dass sie die Elektronenpakete abbremst und ein Teil der kinetischen Energie der Elektronen an das elektromagnetische Feld übertragen wird. Ein Teil des Resonanzfeldes der *Catcher Cavity* kann als RF-Signal (Ausgangssignal) ausgekoppelt werden. Dieses Ausgangssignal besitzt die gleiche Frequenz wie das in die *Buncher Cavity* eingespeiste

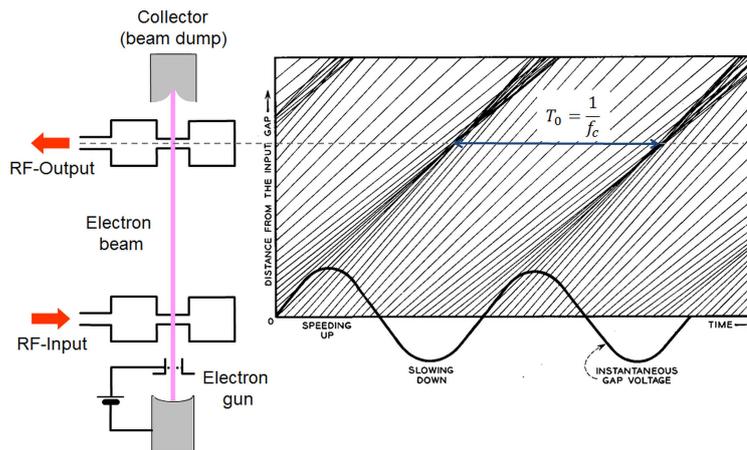


Abb. 7.18 Applegate Diagramm eines Zweikammer-Klystron Verstärkers (Applegate Diagramm from J. W. Garwotowski and H. A. Watson, Principles of Electron Tubes: Including Grid-Controlled Tubes, Microwave Tubes and Gas Tubes, p. 295, May 1965, Van Nostrand Company [120].)

Tabelle 7.22 Bewertung Klystron

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		Das Klystron ist eine Laufzeit Vakuum-Elektronenröhren (drift tube).
Benötigtes Fachwissen für - Design und Auslegung	$K_D = 4$	Das Design und die Auslegung eines Klystron erfordert eine akademische Ausbildung (z.B. Ingenieur) mit Erfahrung auf den Gebieten (1) Plasmaphysik und (2) RF-Resonatoren
- Bau	$K_A = 3 - 4$	Für den Bau eines Klystron werden eine akademische Ausbildung (z.B. Bachelor) oder Kenntnisse auf dem Niveau eines erfahrenen Technikers in (1) Vakuumtechnologie, (2) Hochspannungstechnik und (3) RF-Resonatoren sowie der zugehörigen Fertigungstechniken benötigt
- Betrieb	$K_O = 1 - 2$	Für den Betrieb von Klystrons sind in der Regel nur eine Einweisung in die Handhabung notwendig. (Allgemeinwissen bis Grundverständnis)
Verfügbarkeit - der Komponenten	$AV_C = 2$	Die benötigten Baugruppen sind im Fachhandel erhältlich.
- des RF-Modulators	$AV_S = 3$	Klystrons bis in den MW-Leistungsbereich für Rundfunk- oder industrielle Anwendungen werden im gewerblichen Fachhandel angeboten.
Baugröße / Mobilität	$M = 4$ $M = 5$	für UHF- und L-Band Klystron für S- und C-Band Klystron Als Daumenregel lassen sich der Aussenradius eines Klystrons über die Beziehung $r_a \approx \frac{\lambda_c}{2}$ und die Länge $L_g \approx 3\lambda_c$ zu abschätzen.
Kosten	$C_{exp} = 3$	Im Handel sind Klystrons für 10.000 € - 100.000 € erhältlich.
Frequenzbereich	L, S, C,X	0,3 - 30 GHz
Bandbreite		Schmalband / Hypoband
Frequenzagilität	$F_{AG} = 1 - 4$	Die meisten Klystrons arbeiten auf einer festen Frequenz. Es gibt Bauvarianten, die durchstimbar sind.
Pulslänge	Dauerbetrieb $T_{FWHM} \geq 300 \text{ ns}$	konventionelle Klystrons niedriger und mittlerer Leistung Klystrons hoher Leistung
Pulswiederholfrequenz (PRF)	$PRF \geq 10 \text{ Hz}$	
Leistung	$\leq 500 \text{ MW}$ $\leq 1 - 10 \text{ GW}$	konventionelles Klystron relativistisches Klystron
Effizienz	$\eta \leq 70 \%$ $\eta \leq 60 \%$ $\eta \leq 50 \%$	konventionelles Klystron niedriger Leistung konventionelles Klystron hoher Leistung relativistisches Klystron / Reltron

Das Funktionsprinzip des Reltron wird im Anhang C auf Seite 199 beschrieben.

Eingangssignal und hat zu diesem eine durch die Bauform bestimmte konstante Phasenlage. Durch die Energieübertragung aus dem Elektronenstrahl besitzt das Ausgangssignal eine höhere Amplitude als das Eingangssignal, das Klystron wirkt als Verstärker.

Das Klystron kann als Oszillator wirken, wenn an Stelle eines externen Eingangssignal ein Teil des Ausgangssignals in die *Buncher Cavity* zurückgekoppelt wird. In diesem Betriebsmodus werden in beiden Cavities (Buncher als auch Catcher) durch die Front des Elektronenstrahls Eigenschwingungen angeregt. Wie bereits dargelegt wurde sind das Resonanzfeld der *Buncher Cavity* und das in der *Catcher Cavity* über den Elektronenstrahl phasenkohärent miteinander gekoppelt. Wird nun

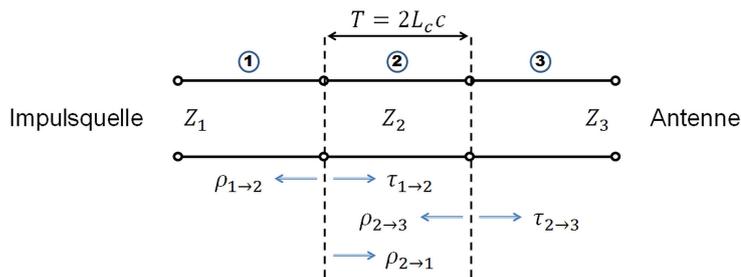


Abb. 7.19 Prinzip eines Leitungsresonators bestehend aus einer fehlangepassten Leitung

ein Teil des Ausgangssignals in Phase mit dem Resonanzfeld der *Buncher Cavity* zurückgekoppelt verstärkt das rückgekoppelte Signal das elektromagnetische Feld in der *Buncher Cavity*. Dies führt zu einer stärkeren Modulation des Elektronenstrahls, die ihrerseits in ein stärkeres Feld in der *Catcher Cavity* resultiert. Der Klystron Oszillator schwingt an und hält das Signal bis zum Abschalten des Elektronenstrahls.

Die Bewertung des Klystron ist in Tabelle 7.22 zusammenfassend dargestellt. Eine detaillierte Diskussion der Bewertung, insbesondere dessen Baugröße, ist in Anhang C.4³² zu finden.

7.4.5 Leitungsresonatoren

Der Betrieb der bisher betrachteten RF-Modulatoren setzt voraus, dass das speisende Hochspannungssignal über eine Dauer von mehr als 100 ns (bis zum Dauerbetrieb) anliegt. Schnelle Hochspannungsimpulsquellen (z.B. Halbleiterpulsler), die Ausgangssignale mit einer Halbwertsbreite (T_{FWHM}) von einigen 10 ns oder weniger liefern, sind somit als Hochspannungsquellen für Elektronenstrahlröhren ungeeignet. In der Praxis werden schnelle Hochspannungsimpulse oftmals ohne weitere RF-Modulatoren direkt auf den Anenneneingang gegeben. Dieser Impuls- bzw. UWB-Betrieb wird im Abschnitt 7.5 eingehender diskutiert. Gegenüber einem Betrieb mit einem RF-Modulator ist dieser Betrieb durch eine deutlich größere Bandbreite des Sendesignals gekennzeichnet.

Für die Erzeugung von Betriebsstörungen ist es vielfach jedoch wünschenswert, das Zielsystem mit Impulszügen zu beaufschlagen, deren Pulswiederholfrequenz (PRF) im Bereich bekannter oder vermuteter Arbeitsfrequenzen des Zielsystems liegt. Eine technische Möglichkeit aus einem sehr kurzen impulsförmigen Signal einen Impulszug aus mehreren Impulsen mit einer PRF im MHz-Bereich (VHF- und UHF-Band) zu generieren, besteht in der Verschaltung von **Leitungsresonatoren**. Diese bestehen aus einem an beiden Enden fehlangepassten Abschnitt einer RF-Leitung [121].

Eine Bauform des Leitungsresonators ist die in Abbildung 7.19 dargestellte fehlangepasste Leitung. Im Allgemeinen weisen die drei Leitungsabschnitte (1 - Anschlussleitung and die Impulsquelle, 2 - Fehlangepasste Leitung, 3 - Anschlussleitung and die Antenne) unterschiedliche charakteristische Impedanzen auf. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Anschlussleitung an die Impulsquelle an die Ausgangsimpedanz der Impulsquelle und die Anschlussleitung an die Antenne auf die Eingangsimpedanz der Antenne angepasst sind.

Der Reflexionsfaktor an dem Übergang vom Leitungsabschnitt i nach j beträgt:

$$\rho_{i \rightarrow j} = \frac{Z_j - Z_i}{Z_j + Z_i} \quad (7.13)$$

³² ab Seite 195

Tabelle 7.23 Bewertung Leitungsresonator

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		Leitungsresonatoren sind Laufzeitoszillatoren, bestehend aus fehlangepassten RF-Leitungsstücken.
Benötigtes Fachwissen für - Design und Auslegung	$K_D = 2 - 3$	Das Design und die Auslegung eines Leitungsresonators erfordert Fachkenntnisse auf dem Niveau einer gelernten Fachkraft auf den Gebieten RF-Leitungen und Hochspannungstechnik.
- Bau	$K_A = 2 - 3$	Für den Bau eines Leitungsresonators werden Fachkenntnisse auf dem Niveau einer gelernten Fachkraft auf den Gebieten RF-Leitungen und Hochspannungstechnik sowie der zugehörigen Fertigungstechniken benötigt
- Betrieb	$K_O = 1 - 2$	Für den Betrieb von Leitungsresonatoren sind in der Regel nur eine Einweisung in die Handhabung notwendig. (Allgemeinwissen bis Grundverständnis)
Verfügbarkeit - der Komponenten	$AV_C = 2$	Die benötigten Baugruppen sind im Fachhandel erhältlich.
- des RF-Modulators	$AV_S = 1 - 2$	Leitungsresonatoren (z.B. Topfkreise) bis in den kW-Leistungsbereich für Anwendungen im Rundfunk oder Amateurfunk werden im gewerblichen Fachhandel angeboten.
Baugröße / Mobilität	$M = 3 - 4$ $M = 5$	für VHF-Band Leitungsresonatoren für UHF- und L-Band Leitungsresonatoren Als Daumenregel lassen sich die Länge eines Leitungsresonators über die Beziehung $L_c = \lambda_c/4$ und ihr Außenradius $r_{ausßen} \approx \lambda_c/10$ abschätzen. Hierbei ist zu beachten, dass die Abmasse durch die Verwendung von dielektrischem Isolationsmaterials (z.B. Trafoöl, Polypropylen, Glycerin) verkürzt werden können.
Kosten	$C_{exp} = 1 - 2$	bis zu 10.000 € für handelsübliche Leitungsresonatoren.
Frequenzbereich	VHF, UHF, (L)	0,03 - 1 GHz (in Ausnahmefällen 2 GHz)
Bandbreite		Mesoband
Frequenzagilität	$F_{AG} = 1 - 4$	Die meisten Leitungsresonatoren arbeiten auf einer festen Grundfrequenz. Es gibt Bauvarianten, die dinstimmbar sind.
Pulslänge	$N \geq 10$	
Pulswiederholffrequenz (PRF)		Die Pulswiederholffrequenz wird durch die Hochspannungsimpulsquelle vorgegeben.
Leistung	≤ 500 kW	
Effizienz	$\eta \leq 60$ %	

der zugehörige Transmissionsfaktor berechnet sich zu:

$$\tau_{i \rightarrow j} = 1 + \rho_{i \rightarrow j} = \frac{2Z_i}{Z_j + Z_i} \quad (7.14)$$

Bei Speisung der Anordnung mit einem Spannungssignal $u_{in}(t)$, wird ein Teil des Signals von dem Leitungsstück 1 durch das fehlangepasste Leitungsstück 2 in das Leitungsstück 3 transmittiert. Am Übergang vom Leitungsstück 2 nach 3 wird ein Teil dieses Spannungssignals in die Leitung 2 zurückreflektiert. Dieses rücklaufende Spannungssignal wird ebenfalls an dem Übergang vom Lei-

tungsstück 2 zum Leitungsstück 1 reflektiert und erreicht nach einer Verzögerungszeit

$$T = \frac{2L_c}{c} = 2L_c\sqrt{\epsilon\mu} \quad (7.15)$$

erneut den Übergang der Leitungsstücke 2 nach 3. Als Folge des beschriebenen Verhaltens ergibt sich die Ausgangsspannung (im Leitungsstück 3) zu:

$$u_{\text{out}}(t) = \tau_{1 \rightarrow 2} \tau_{2 \rightarrow 3} \sum_{n=0}^N u_{\text{in}} \left(t - \left(n + \frac{1}{2} \right) T \right) (\rho_{2 \rightarrow 3} \rho_{2 \rightarrow 1})^n \quad (7.16)$$

Ist der einlaufende Spannungsimpuls $u_{\text{in}}(t)$ kürzer als die halbe Verzögerungszeit T , so besteht das Ausgangssignal aus einer Folge gewichteter Einzelimpulse, die gegeneinander um T verzögert sind. Die Amplitude zweier aufeinander folgender Impulse sind jeweils um den Faktor $|\rho_{2 \rightarrow 3} \rho_{2 \rightarrow 1}|$ gedämpft. Für praktische Anwendungen ist es ausreichend nur die ersten N Pulse bis zum Unterschreiten einer gegebenen Genauigkeitsschranke δ zu betrachten.

$$N = \left\lceil \frac{\ln(\delta)}{\ln |\rho_{2 \rightarrow 3} \rho_{2 \rightarrow 1}|} \right\rceil \quad (7.17)$$

Üblicher Weise wird die Schranke $\delta = 0,05$ gewählt, d.h. es werden alle Pulse bis zu einer Amplitude von 5 % des ersten Impulses betrachtet.

Eine detaillierte Diskussion der Bewertung der Leitungsresonatoren, insbesondere deren Baugröße, ist in Anhang C.5³³ zu finden. Eine Zusammenfassung dieser Bewertung ist in Tabelle 7.23 aufgetragen.

7.4.6 Switched Oscillator

In [122] schlägt Baum die Erzeugung von Mesoband Signalen mit Hilfe von **Switched Oscillators**³⁴ (SWO) vor. Das Funktionsprinzip der Switched Oscillators stellt eine Weiterentwicklung der im vorherigen Abschnitt betrachteten Leitungsresonatoren dar. Der in Abbildung 7.20 dargestellte Bauprinzip besteht aus einer RF-Leitung deren Länge (L_c) einem Viertel der Wellenlänge (λ_c) der Operationsfrequenz (f_c) entspricht. Diese Leitung ist am einen Ende mit der Antenne verschaltet, deren Eingangsimpedanz (Z_{Ant}) größer ist als die charakteristische Impedanz der Leitung (Z_{SWO}) ist.

$$Z_{\text{SWO}} \ll Z_{\text{Ant}} \quad (7.18)$$

An ihrem anderen Ende ist die Leitung mit einem schnellen schließendem Schalter (z.B. Funkenstrecke) abgeschlossen. In der ersten Phase wird die RF-Leitung (als auch die angeschlossene Antenne) als Kapazität betrieben und durch eine (langsame) Hochspannungsquelle aufgeladen. Überschreitet die Spannung am Beginn der Leitung die Schaltschwelle (u_0) des Schalters (bzw. wird der Schalter getriggert) schließt dieser und erzeugt auf der Leitung eine negative Spannungswelle³⁵ $u(t)$ mit der Amplitude $-u_0$, die von dem Schalter auf die Antenne zuläuft und den Antenneneingang nach einer Verzögerungszeit von $t_t = L_c/c$ erreicht. Bedingt durch die Fehlanpassung zwischen dem Antenneneingang und der Leitung wird die Spannungswelle am Antenneneingang mit dem Reflexionsfaktor

³³ ab Seite 201

³⁴ de: geschaltete Resonatoren

³⁵ Im theoretischen Fall eine Sprungfunktion. In der Praxis wird diese durch die endliche Schaltzeit des schließenden Schalters und dessen parasitären Induktivität hiervon abweichen.

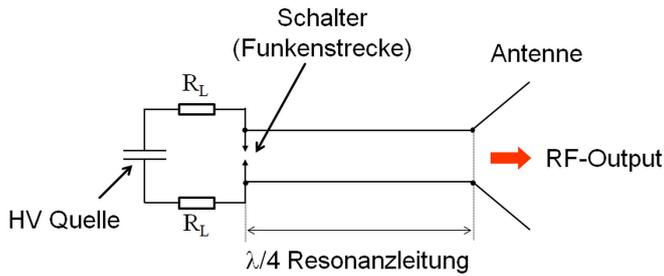


Abb. 7.20 Prinzip eines Switched Oszillators [122]

$$\rho_{\text{SWO} \rightarrow \text{Ant}} = \frac{Z_{\text{Ant}} - Z_{\text{SWO}}}{Z_{\text{Ant}} + Z_{\text{SWO}}} \quad (7.19)$$

reflektiert. Aus der Bedingung (Gl. 7.18) folgt, dass der Reflexionsfaktor am Antenneneingang positiv und näherungsweise gleich 1 ist. Die Bedingung 7.18 führt ebenfalls dazu, dass der Transmissionsfaktor von der Leitung in die Antenne

$$\tau_{\text{SWO} \rightarrow \text{Ant}} = \frac{2Z_{\text{Ant}}}{Z_{\text{Ant}} + Z_{\text{SWO}}} \approx 2 \quad (7.20)$$

näherungsweise 2 ist. Beim Übergang von der Leistung zur Antenne kommt es somit zu einer Spannungsüberhöhung.

Die zurüchlaufende Welle wird an dem geschlossenen Schalter (Kurzschluss) mit einer Polarisationsumkehr ($\rho = -1$) reflektiert. Analog dem Leitungsresonator entsteht so am Ausgang des Switched Oscillator ein Spannungssignal bestehend aus einer Folge zeitverzögerter und gedämpfter Spannungssignale mit alternierendem Vorzeichen der Amplitude. Zwei Einzelsignale gleicher Polarität sind hierbei um eine (Perioden-) Dauer von

$$T_c = \frac{1}{f_c} = 4L_c \cdot c \quad (7.21)$$

verzögert und um den Faktor $\rho_{\text{SWO} \rightarrow \text{Ant}}^2$ gegeneinander gedämpft. Der Gütefaktor dieses oszillierenden Spannungssignals beträgt:

$$Q = \frac{\pi f_c}{2 \ln(\rho_{\text{SWO} \rightarrow \text{Ant}})} = \frac{\pi}{8L_c \cdot c \cdot \ln\left(\frac{Z_{\text{Ant}} - Z_{\text{SWO}}}{Z_{\text{Ant}} + Z_{\text{SWO}}}\right)} \quad (7.22)$$

Durch die vernachlässigten parasitären und nicht idealen Eigenschaften des Ladekreises, des Schalters, der Resonanzleitung und der Antenne wird bei einem realen Switched Oscillator das Signal am Antenneneingang verschliffen. Das messbare Ausgangssignal eines Switched Oscillators kann in guter Näherung durch ein gedämpftes Sinussignal der Frequenz f_c und dem Gütefaktor Q beschrieben werden.

Eine Bewertung der Leitungsresonatoren, insbesondere deren Baugröße, ist in Anhang C.6³⁶ zu finden.

³⁶ ab Seite 203

Tabelle 7.24 Bewertung Switched Oscillator

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		Switched Oscillator sind Laufzeitoszillatoren, bestehend aus einer fehlangepassten RF-Leitung.
Benötigtes Fachwissen für - Design und Auslegung	$K_D = 2 - 3$	Das Design und die Auslegung eines Switched Oscillator erfordert Fachkenntnisse auf dem Niveau einer gelernten Fachkraft auf den Gebieten RF-Leitungen, Hochspannungstechnik und Funkenstrecken.
- Bau	$K_A = 2 - 3$	Für den Bau eines Switched Oscillator werden Fachkenntnisse auf dem Niveau einer gelernten Fachkraft auf den Gebieten RF-Leitungen und Hochspannungstechnik sowie der zugehörigen Fertigungstechniken benötigt
- Betrieb	$K_O = 1 - 2$	Für den Betrieb von Switched Oscillator sind in der Regel nur eine Einweisung in die Handhabung notwendig. (Allgemeinwissen bis Grundverständnis)
Verfügbarkeit - der Komponenten	$AV_C = 2$	Die benötigten Baugruppen sind im Fachhandel erhältlich.
- des RF-Modulators	$AV_S = 4$	Switched Oscillator werden derzeit nur eingeschränkt im gewerblichen Fachhandel angeboten.
Baugröße / Mobilität	$M = 3 - 4$ $M = 5$	für VHF-Band Switched Oscillator für UHF- und L-Band Switched Oscillator Als Daumenregel lassen sich die Länge eines Switched Oscillators über die Beziehung $L_c = \lambda_c/4$ und ihr Auslenradius $r_a \approx \lambda_c/10$ abschätzen. Hierbei ist zu beachten, dass die Abmasse durch die Verwendung von dielektrischem Isolationsmaterials (z.B. Teflon, Polypropylen, Glycerin) verkürzt werden können.
Kosten	$C_{exp} = 1 - 3$	bis zu 100.000 € für handelsübliche Switched Oscillator Systeme.
Frequenzbereich	VHF, UHF, L	0,03 - 2 GHz
Bandbreite		Mesoband
Frequenzagilität	$F_{AG} = 1 - 4$	Die meisten Switched Oscillatoren arbeiten auf einer festen Grundfrequenz. Es gibt Bauvarianten, die drehstimmbar sind.
Pulslänge	$N \geq 10$	
Pulswiederholfrequenz (PRF)		Die Pulswiederholfrequenz wird durch die Hochspannungsimpulsquelle vorgegeben.
Leistung	$\leq 1 \text{ GW}$	
Effizienz	$\eta \leq 60 \%$	

7.4.7 Resonante Antennen (Antennenoszillatoren)

Die bisher vorgestellten RF-Modulatoren basierten auf einer funktionalen Trennung des RF-Modulators von der Antenne. Unter Berücksichtigung der sich ergebenden Baugröße resonant angesteuerter Antennen für das VHF- und UHF-Band ist bei den Switched Oscillatoren die Tendenz beobachtbar, den Oszillator und die Hochspannungsquelle in die Antennenstruktur zu integrieren. Diese Integration betrifft aber nur die mechanische Integration der jeweiligen Baugruppen, funktional werden die einzelnen Baugruppen noch getrennt entworfen und optimiert.

Mit dem Ziel einer kompakten EMI-Störquelle für Mesoband-Signale mit einer Mittenfrequenz im VHF-Band wurde das Konzept der **Antennenoszillatoren** abgeleitet [123]. In diesem Konzept

wird die Systemintegration auf die Funktionalen Baugruppen erweitert, so dass die Antennenstruktur neben ihrer eigentlichen Funktion als Antenne auch als Energiespeicher und pulsformende Schaltung genutzt wird.

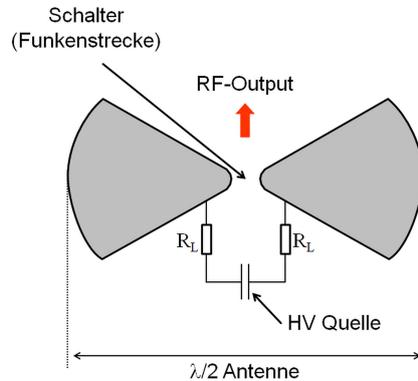


Abb. 7.21 Prinzip des Antennenoszillators

Ausgleichsströme zwischen den beiden Konussen. Die sich ausbildenden Ströme resonieren mit der Resonanzfrequenz der Antennenstruktur und erzeugen das von der Antenne abgestrahlte elektromagnetische Feld [124]. Der Antennenoszillator schwingt an, wenn die Schaltzeit des schließenden Schalters (z.B. Funkenstrecke) kürzer ist als ein Fünftel der Periodendauer seiner Resonanzfrequenz. Da das abgestrahlte elektrische Feld dem resonierenden Strom Energie entzieht, hat das Langzeitsignal der Feldstärke die Form eines gedämpften Sinussignals. Die Frequenz f_c des Langzeitsignals ist durch die Länge L_{ges} der Antennenstruktur festgelegt. Bei massiven Bauweisen gilt:

$$L_{ges} \approx \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f_c} \quad (7.23)$$

Eine Bewertung der Antennenoszillatoren, insbesondere deren Baugröße, ist in Anhang C.7³⁷ zu finden. Eine Zusammenfassung dieser Bewertung ist in Tabelle 7.25 aufgetragen.

7.4.8 Vergleich RF-Modulatoren

Auch wenn an dieser Stelle noch nicht alle Baugruppen elektromagnetischer Störquellen betrachtet wurden, ist dennoch ersichtlich, dass diese wesentlich durch die eingesetzten RF-Modulatoren charakterisiert werden. So lassen sie die Störquellen allgemein in die drei Klassen:

- a.) schmalbandige (Hypoband) Störquellen
- b.) breitbandige (Meso- und Sub-Hyperband) Störquellen
- c.) Impulsabstrahlende (Hyperband) Störquellen

einteilen. Die ersten beiden Klassen verwenden die zugehörigen schmal- bzw. breitbandigen RF-Modulatoren wogegen die dritte Klasse der Impulsabstrahlenden Störquellen³⁸ ohne RF-Modulatoren aufgebaut sind.

Mit dem Ziel allgemeine technologische Tendenzen zu erkennen und hieraus Ansatzpunkte für die Definition von generischen EMI-Quellenklassen zu gewinnen werden in diesem Abschnitt die charakteristischen Daten der bisher betrachteten schmalbandigen und breitbandigen RF-Modulatoren vergleichend gegenübergestellt.

³⁷ ab Seite 205

³⁸ siehe Abschnitt 7.5 auf Seite 124

Tabelle 7.25 Bewertung Antennenoszillator

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		Antennenoszillatoren sind resonante Antennen in deren Zentrum (Speisepunkt) ein schneller Schalter verschaltet ist.
Benötigtes Fachwissen für - Design und Auslegung	$K_D = 1 - 3$	Das Design und die Auslegung eines Antennenoszillators erfordert Fachkenntnisse auf dem Niveau einer gelernten Fachkraft auf den Gebieten RF-Antennen und Funkstrecken.
- Bau	$K_A = 2 - 3$	Für den Bau eines Antennenoszillators werden Fachkenntnisse auf dem Niveau einer gelernten Fachkraft auf den Gebieten RF-Antennen und Hochspannungstechnik sowie der zugehörigen Fertigungstechniken benötigt
- Betrieb	$K_O = 1 - 2$	Für den Betrieb von Antennenoszillatoren sind in der Regel nur eine Einweisung in die Handhabung notwendig. (Allgemeinwissen bis Grundverständnis)
Verfügbarkeit - der Komponenten	$AV_C = 2$	Die benötigten Baugruppen sind im Fachhandel erhältlich.
- des RF-Modulators	$AV_S = 0$	Antennenoszillatoren werden derzeit nicht im Handel angeboten.
Baugröße / Mobilität	$M = 2 - 4$ $M = 5$	für VHF-Band Antennenoszillator für UHF-Band Antennenoszillator Als Daumenregel lassen sich die Länge eines Antennenoszillators über die Beziehung $L_{ges} = \lambda_c/2$ und ihr Aussenradius $r_a \approx \lambda_c/8$ abschätzen. Hierbei ist zu beachten, dass die Abmasse durch die Verwendung von dielektrischem Isolationsmaterials (z.B. Teflon, Polypropylen, Glycerin) als auch alternative Antennensigns verkürzt werden können.
Kosten	$C_{exp} = 1 - 3$	bis zu 100.000 € für handelsübliche Antennenoszillatoren.
Frequenzbereich	VHF, UHF	0,03 - 1 GHz
Bandbreite		Mesoband
Frequenzagilität	$F_{AG} = 1 - 4$	Die meisten Antennenoszillatoren arbeiten auf einer festen Grundfrequenz. Es gibt wenige Bauvarianten, die durchstimmbare sind.
Pulslänge	$N \geq 10$	
Pulswiederholfrequenz (PRF)		Die Pulswiederholfrequenz wird durch die Hochspannungsimpulsquelle vorgegeben.
Leistung	≤ 10 MW	
Effizienz	$\eta \leq 50$ %	

a.) Schmalbandige (Hypoband) RF- Modulatoren

Die charakteristischen Daten der betrachteten schmalbandigen RF-Modulatoren sind in Tabelle 7.26 aufgelistet und einander vergleichend gegenübergestellt. In dieser Gegenüberstellung ist klar ersichtlich, dass sich die schmalbandigen RF-Resonatoren nur unwesentlich hinsichtlich des für Design, Bau und Betrieb benötigten Fachwissens unterscheiden. Alle Technologien erfordern für das Design und die Auslegung der RF-Resonatoren eine akademische Ausbildung sowie für den Bau mindestens eine Ausbildung als Facharbeiter mit entsprechender Erfahrung. Demgegenüber können die aufgebauten Resonatoren nach Einweisung in den Betrieb und die Handhabung von nahezu jeder Person

betrieben werden. Diese Gemeinsamkeiten sind unmittelbare Folge des grundlegenden Funktionsprinzips der Elektronenstrahlröhren. Unabhängig vom speziellen Funktionsprinzip werden für das Design vertiefende Kenntnisse über die Erzeugung und Steuerung eines Elektronenstrahls, hochfrequenten elektromagnetischen Feldern und die Wechselwirkung zwischen beiden zwingend benötigt. Für generische schmalbandige RF-Modulatoren kann daher hinsichtlich des benötigten Fachwissens folgende Werte angenommen werden:

- Design: 4 - akademisches Wissen
- Bau: 3 - Fachkenntnisse / Facharbeiter
- Betrieb: 1-2 - Allgemeinwissen bis Grundverständnis

Bei dem Vergleich der Verfügbarkeit ergibt sich ein geteiltes Bild. Die für den Bau aller schmalbandiger RF-Modulatoren benötigten Komponenten und Baugruppen sind marktverfügbar ($AV_C = 2$) oder zumindestens im Fachhandel ($AV_C = 3$) erhältlich. Für einen generischen schmalbandigen RF-Modulator kann daher hinsichtlich der Verfügbarkeit der Komponenten $AV_C = 2 - 3$ angenommen werden. Bei der Verfügbarkeit der kompletter RF-Modulatoren sind nur konventionelle Magnetrons und konventionelle Klystrons marktverfügbar bzw. im Fachhandel erhältlich. Für die übrigen Technologien werden die einzelnen Systeme derzeit nur als HPEM-Quellen betrachtet und im Einzelfall durch Spezialfirmen bzw. Forschungsguppen auftragsbezogen gebaut. Da die marktverfügbaren RF-Resonatoren in der Regel gegenüber den Spezialanfertigungen geringere Leistungen aufweisen, empfiehlt es sich, die generischen Modelle in die zwei Gruppen

- marktverfügbare RF-Modulatoren und
- Spezialanfertigungen und Eigenbauten

zu unterteilen.

Bei der Bewertung der in Abbildung 7.22 graphisch dargestellten Impulsleistungen und des minimalen Bauvolumens der betrachteten schmalbandigen RF-Modulatoren zeigt sich, dass das konventionelle Magnetron die geringste Impulsleistung, jedoch auch die geringste Baugröße aufweist. Aufgrund der uneingeschränkten Marktverfügbarkeit konventionelle Magnetrons sind diese das Leitbild für die erste Klasse marktverfügbarer schmalbandiger RF-Modulatoren (HO-k-1)³⁹. In Bezug auf die marktverfügbaren RF-Modulatoren müssen nun nur noch die konventionellen Klystrons,

Tabelle 7.26 Vergleich schmalbandige (Hypoband) RF- Modulatoren

Typ	VIRCATOR	Magnetron		MILO	Klystron	
		konv.	rel.		konv.	rel.
Referenz	Tabelle 7.19	Tabelle 7.20		Tabelle 7.21	Tabelle 7.22	
Frequenzband	UHF, L, S, C	UHF, L, S, C, X		L, S, C, X	UHF, L, S, C, X	
Leistung	≤ 1 GW	≤ 10 MW	≤ 1 GW	≤ 7 GW	≤ 0,5 GW	≤ 10 GW
Effizienz	≤ 15 %	≤ 80 %	≤ 40 %	≤ 15 %	≤ 70 %	≤ 50 %
Pulslänge	≤ 140 ns	> 200 ns		≤ 40 ns	> 300 ns	
PRF	≤ 10 Hz	≤ 100 Hz		≤ 10 Hz	≥ 100 Hz	
Benötigtes Fachwissen für						
- Design	4	4		4	4	
- Bau	3	3		3	3-4	
- Betrieb	1-2	1-2		1-2	1-2	
Verfügbarkeit						
- Komponenten	2-3	2	3	2-3	2	3
- Modulator	0	1-2	3-4	0	3	4
Mobilität	3-5	3-5		3-5	4-5	
Baugröße	≈ 2,5λ ³	≈ 1,4λ ³	≈ 4,5λ ³	≈ 8,6λ ³	≈ 4λ ³	

³⁹ HO-k-1: Hypoband, kauf, Zählnummer

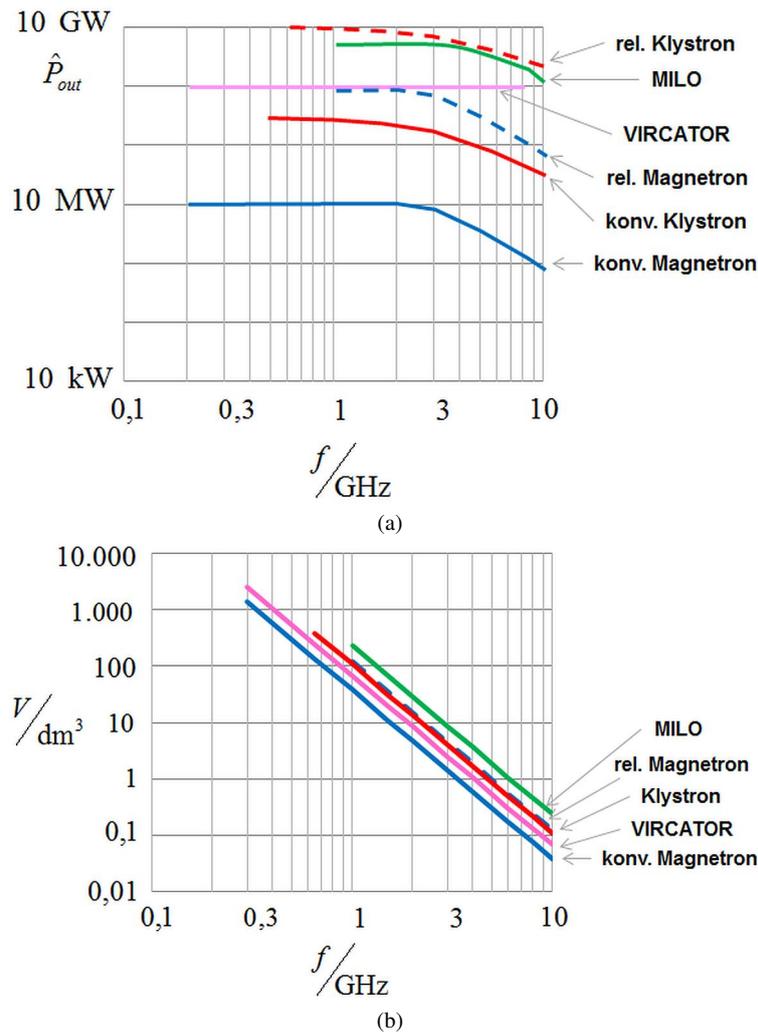


Abb. 7.22 Vergleich der Impulsleistung (a) und des minimalen Bauvolumens (b) der betrachteten RF-Modulatoren als Funktion der Frequenz.

die gegenüber den konventionellen Magnetrons eine deutlich höhere Impulsleistung aber auch ein höheres Bauvolumen aufweisen, in einer generischen Klasse (HO-k-2) abgebildet werden (siehe Tabelle 7.27).

In der Gruppe der Spezialanfertigungen und Eigenbauten sind mit dem relativistischen Klystron⁴⁰ und dem MILO über den gesamten Frequenzbereich die höchsten Wert für die maximal erreichbare Impulsleistung zu erzielen (s. Abbildung 7.22). Gegenüber dem relativistischen Klystron besitzt der MILO jedoch ein doppelt so großes Bauvolumen und seine Effizienz ist mit maximal 15 % nur halb so hoch (s. Tabelle 7.26). Aufgrund der höheren Effizienz als auch des geringeren Bauvolumens wird das relativistische Klystron als Grundlage für die Spezifikation der generischen Klasse (HO-b-2)⁴¹ genutzt. Die generische Klasse HO-b-2 modelliert Hypoband RF-Modulatoren mit der höchsten Impulsleistung und stellt so für die EMI-Risikobewertung die stärkste Bedrohung dar. Un-

⁴⁰ s. Anhang C.4, Seite 195

⁴¹ HO-b-2: Hypoband, bau, Zählnummer

Tabelle 7.27 Generische Klassen schmalbandige (Hypoband) RF- Modulatoren

Typ	HO-k-1	HO-k-2	HO-b-1	HO-b-2
Frequenzband	UHF, L, S, C, X	L, S, C, X	UHF, L, S, C, X	L, S, C, X
Leistung	≤ 10 MW	≤ 0,5 GW	≤ 1 GW	≤ 10 GW
Effizienz	≤ 80 %	≤ 70 %	≤ 30 %	≤ 40 %
Pulslänge	> 200 ns	> 300 ns	≤ 200 ns	> 300 ns
PRF	> 100 Hz		≤ 100 Hz	
Benötigtes Fachwissen für				
- Design			4	
- Bau			3	
- Betrieb			1-2	
Verfügbarkeit				
- Komponenten	n/a		2-3	
- Modulator	1-2	3	n/a	
Mobilität	3-5			
Baugröße	≈ 1,4λ ³	≈ 4λ ³	≈ 4,5λ ³	≈ 4λ ³

n/a : nicht anwendbar

ter Berücksichtigung der Tatsache, dass es sich hierbei in der Regel um Eigenbauten handelt wurde die Effizienz auf 40 % reduziert.

Der bisher gebildete Satz an generischen Klassen schmalbandiger RF-Modulatoren deckt den Bereich der marktverfügbaren RF-Modulatoren mit einer Impulsleistung bis zu 0,5 GW ab und enthält leistungsstarke Spezialanfertigungen bzw. Eigenbauten mit einer Impulsleistung bis zu 10 GW. Gerade im Bereich der Eigenbauten ist es unwahrscheinlich, dass potentielle Angreifer mit ihren Eigenbauten in diesen extremen Bereich vordringen. Eigenbauten, deren Leistungsparameter denen handelsüblicher RF-Modulatoren entsprechen, sind bei der EMI-Risikobewertung durch die generischen Klassen für marktverfügbare RF-Modulatoren erfasst. Hinsichtlich der Bewertung der Bedrohung fehlt somit eine generische Klasse schmalbandiger RF-Modulatoren, in die Eigenbauten mit Impulsleistungen höher als die marktverfügbaren RF-Modulatoren aber unterhalb der in der Klasse HO-b-2 erfassten RF-Modulatoren liegt. Ein Blick in die Abbildung 7.22.a zeigt, dass der VIRCATOR und relativistische Magnetrons den genannten Kriterien entsprechen. Im Vergleich beider Technologien zeichnet sich der VIRCATOR durch ein geringeres Bauvolumen und das relativistische Magnetron durch eine höhere Effizienz sowie eine höhere Pulswiederholrate aus. Der VIRCATOR bietet sich durch seinen relativ einfachen und robusten Aufbau für als Technologie für die Realisierung eines RF-Modulators im Eigenbau an. In der Systembetrachtung muss seine geringere Effizienz durch eine leistungsstärkere und somit voluminösere Impulsquelle kompensiert werden. Aus den vorgenannten Erwägungen wurde das relativistische Magnetron als Grundlage bei der Spezifikation der generischen Klasse HO-b-1 genutzt. Unter Berücksichtigung des Aspekts des Eigenbaus wurde hier die Effizienz auf 30 % reduziert.

Zusammenfassend ergibt sich der in Tabelle 7.27 (siehe Seite 122) aufgetragene Satz generischer Klassen schmalbandiger (Hypoband) RF-Modulatoren. In den nachfolgenden EMI-Risikobetrachtungen kann die Diskussion der Realisierungswahrscheinlichkeit sowie charakteristischer Parameter anhand dieser generischen Klassen, ohne Kenntnis der jeweiligen Technologie, geführt werden.

b.) Breitbandige (Meso- und Sub-Hyperband) RF- Modulatoren

Die charakteristischen Daten der betrachteten breitbandigen (Meso- und Sub-Hyper-band) RF-Modulatoren sind in Tabelle 7.28 aufgelistet und einander vergleichend gegenübergestellt. In dieser Gegenüberstellung zeigt sich, dass die breitbandige RF- Modulatoren sich hinsichtlich des für

Design, Bau und Betrieb benötigten Fachwissens nur unwesentlich unterscheiden. Eine ähnliche Tendenz konnte bereits bei den schmalbandigen RF-Modulatoren beobachtet werden. Alle betrachteten Technologien für breitbandige RF-Resonatoren erfordern für das Design, die Auslegung und den Bau Grundverständnis bis hin zu Fachkenntnissen eines Facharbeiters. Die aufgebauten Resonatoren nach Einweisung in den Betrieb und die Handhabung von nahezu jeder Person betrieben werden. Diese Gemeinsamkeiten sind unmittelbare Folge des grundlegenden Funktionsprinzips der Laufzeitresonatoren. Unabhängig vom speziellen Funktionsprinzip werden für das Design nur das Grundverständnis über der Ausbreitung transientser elektromagnetischer Signale auf Leitungsstrukturen und ein Grundverständnis über Hochspannungsschaltungen benötigt.

Für generische breitbandige RF-Modulatoren kann daher hinsichtlich des benötigten Fachwissens folgende Werte angenommen werden:

- Design: 2-3 -Grundverständnis bis Fachkenntnisse / Facharbeiter
- Bau: 2-3 -Grundverständnis bis Fachkenntnisse / Facharbeiter
- Betrieb: 1-2 - Allgemeinwissen bis Grundverständnis

In Bezug auf die Verfügbarkeit der breitbandigen RF-Modulatoren ergibt sich ebenfalls eine Unterteilung in

- marktverfügbare RF-Modulatoren und
- Spezialanfertigungen und Eigenbauten

Leitungsresonatoren sind als Bauteile für Amateurfunkanlagen gut im freien Handel erhältlich. Derzeit sind die Switched Oscillatoren und Antennenresonatoren nur sehr eingeschränkt im spezialisierten Fachhandel oder als Spezialanfertigung verfügbar. Somit sind die Leitungsresonatoren die Grundlage für die Spezifikation des generischen Klasse der marktverfügbaren breitbandigen RF-Resonatoren (MB-k-1) dar.

Die verbleibende Gruppe der Spezialanfertigungen und Eigenbauten untergliedern sich ihrerseits in Bezug auf die Leistung. Dieser Unterteilung folgend lässt sich aus den Daten der Antennenresonatoren die generische Klasse der Eigenbauten moderater Leistung (MB-b-1) und aus den Daten der Switched Oscillatoren die generische Klasse der Eigenbauten hoher Leistung (MB-b-2) ableiten. Zusammenfassend ergibt sich der in Tabelle 7.27 aufgetragene Satz generischer Klassen breitbandige (Meso- und Sub-Hyperband) RF- Modulatoren. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass der Antennenresonator bereits die Antennenstruktur beinhaltet, wogegen die übrigen RF-Modulatoren noch mit einer geeigneten Antennenstruktur verschaltet werden müssen.

Tabelle 7.28 Vergleich breitbandige (Meso- und Sub-Hyperband) RF- Modulatoren

Typ	Leitungsresonator	Switched Oscillator	Antennenoszillator
Referenz	Tabelle 7.23	Tabelle 7.24	Tabelle 7.25
Frequenzband	VHF, UHF, (L)	VHF, UHF, L	VHF, UHF, L
Leistung	$\leq 0,5$ MW	≤ 1 GW	≤ 10 MW
Effizienz	≤ 60 %	≤ 60 %	≤ 50 %
Pulslänge	$N > 10$	$N > 10$	$N > 10$
Benötigtes Fachwissen für			
- Design	2-3	2-3	1-3
- Bau	2-3	2-3	2-3
- Betrieb	1-2	1-2	1-2
Verfügbarkeit			
- Komponenten	2	2	2
- Modulator	1-2	4	0
Mobilität	3-5	3-5	3-5
Baugröße	$0,01\lambda^3$	$0,01\lambda^3$	$0,03\lambda^3$

Tabelle 7.29 Generische Klassen breitbandige (Meso- und Sub-Hyperband) RF- Modulatoren

Typ	MB-k-1	MB-b-1	MB-b-2
Referenz	TLO	AntO	SWO
Frequenzband	VHF, UHF	VHF, UHF	VHF, UHF, L
Leistung	$\leq 0,5$ MW	≤ 10 MW	≤ 1 GW
Effizienz	≤ 60 %	≤ 50 %	≤ 60 %
Pulslänge	$N > 10$	$N > 10$	$N > 10$
Benötigtes Fachwissen für			
- Design		2-3	
- Bau		2-3	
- Betrieb		1-2	
Verfügbarkeit			
- Komponenten	n/a		2
- Modulator	1-2		n/a
Mobilität		3-5	
Baugröße	$0,01\lambda^3$	$0,03\lambda^3$	$0,01\lambda^3$

7.5 Pulsformende Schaltungen für Impulsquellen (Hyperband) UWB-Störquellen

Als impulsabstrahlende (Hyperband) UWB-Störquellen werden Störquellen bezeichnet, die ein impulsförmiges⁴² Feldsignal abstrahlen. Beim Aufbau der impulsabstrahlender Störquellen wird das Ausgangssignal des Hochspannungsimpulsgenerators, ohne Verwendung eines RF-Modulators, entweder direkt oder über eine pulsformende Schaltung auf den Antenneneingang verschaltet. Durch den Verzicht auf einen RF-Modulator weisen impulsabstrahlende Störquellen einen mechanisch einfacheren Aufbau auf und das Spektrum des abgestrahlten Feldsignals umfasst einen erheblich größeren Frequenzbereich. Unter Bezug auf den sehr großen Spektralbereich des abgestrahlten Feldsignals werden diese Störquellen oftmals auch als Hyperband oder UWB⁴³-Störquellen bezeichnet.

Um die sehr große Signalbandbreite im Feldsignal zu erhalten, werden in impulsabstrahlenden Störquellen breitbandige Antennen verwendet, die ein differenzierendes Übertragungsverhalten aufweisen.

$$E(t) \sim \frac{\partial u(t)}{\partial t} \quad (7.24)$$

Dieses Übertragungsverhalten führt dazu, dass eine Verkürzung der an- und abfallenden Flanken des Spannungssignals in eine Erhöhung der Impulsfeldstärke bzw. der Impulsleistung und der Bandbreite des abgestrahlten Feldes resultiert. In vielen impulsabstrahlenden Störquellen wird daher das Ausgangssignal des Hochspannung Impulsgenerators mit Hilfe **pulsformender Schaltungen** beeinflusst um die gewünschten Leistungsparameter des abgestrahlten Feldes zu erhalten. Im übertragenen Sinne entsprechen die Pulsformenden Schaltungen in UWB-Störquellen den RF-Modulatoren der schmal- und breitbandigen Störquellen.⁴⁴

In ihrer allgemeinen Form bestehen pulsformende Schaltungen aus den Baugruppen:

- einem oder mehrerer Peaking Circuit,
- einer Crowbar und

⁴² In der Regel weisen die von einer impulsabstrahlende Störquellen abgestrahlten Feldersignale Zeitverläufe in Form einer Gauß-Kurve, einer differenzierten Gauß-Kurve, eines differenzierten Doppelt-Exponentiellen Pulses oder eines bipolaren Pulses auf.

⁴³ engl: Ultra-Wide Band

⁴⁴ Im engeren Sinne ist dieser Vergleich nicht korrekt, da auch in schmal- und breitbandigen Störquellen pulsformende Schaltungen zur Anpassung der Impulsgeneratoren an die RF-Modulatoren eingesetzt werden.

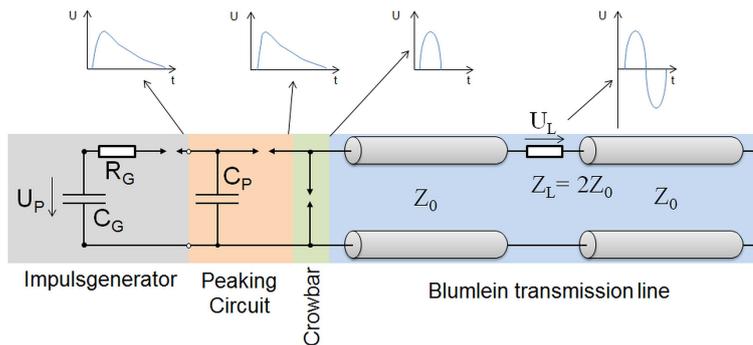


Abb. 7.23 Prinzipieller Aufbau einer Pulsformenden Schaltung

- einer Blumlein Transmission Line.

Die Pulsformenden Schaltungen müssen nicht immer alle Baugruppen beinhalten, je nach Anwendungsfall kann auf einzelne Baugruppen verzichtet werden.

Der **Peaking Circuit** (s. Abbildung 7.23) dient der Verkürzung (Aufsteilung) der ansteigenden Signalfanke. In seiner einfachsten Form besteht ein Peaking Circuit aus einer impedanzarmen Transferkapazität (C_P) und einem nachgeschalteten schnellen schließenden Schalter (Funkenstrecke). Das Funktionsprinzip des Peaking Circuits basiert darauf, dass während der ansteigenden Flanke des Ausgangssignals der Impulsquelle zunächst die Transferkapazität geladen wird. Bei Erreichen einer vorgegebenen Schaltspannung schließt der Schalter und die geringe Streuimpedanz der Transferkapazität ermöglicht einen schnellen Anstieg des Entladestromes. Hierdurch kommt es in der nachgeschalteten Last zu einem schnellen Spannungsanstieg. Idealerweise wird durch diesen Vorgang die Zeit zum Erreichen des maximalen Entladestroms der Impulsquelle überbrückt, so dass die abfallende Signalfanke (weiterhin) durch die Eigenschaften der Ausgangsstufe der Impulsquelle bestimmt wird. Die Dimensionierung der Transferkapazität ist zum Einen auf die Ausgangsstufe der Impulsquelle, zum Anderen auf die gewünschten Eigenschaften der Ansteigenden Signalfanke abzustimmen. Können die gewünschten Eigenschaften nicht mit einem Peaking Circuit erreicht werden können mehrere Peaking Circuits kaskadiert eingesetzt werden.

Die lange abfallende Signalfanke des Spannungssignals kann durch einen schnellen Kurzschluss-Schalter, einer sogenannten **Crowbar**, abgeschnitten werden. In der überwiegenden Zahl der High-Power UWB-Störquellen wird die Crowbar als Funkenstrecke ausgeführt (s. Abbildung 7.23). Bei UWB-Störquellen niedrigere Leistung können auch Thyristoren oder Trioden-Schaltungen als Crowbar eingesetzt werden. Die Crowbar wird so eingestellt, dass sie beim Erreichen von 75 – 80 % der Impulsspannung zünden. Die schnelle ansteigende Spannungsflanke führt in Kombination mit der Schaltzeit der Crowbar dazu, dass diese erst nach dem Überschreiten des Maximalwertes durchschaltet und den nachfolgenden Signalzug kurzschließt. Hierdurch wird das Spannungssignal gegenüber dem Ausgangssignal der Impulsgenerators deutlich verkürzt. Die Dauer der abfallenden Flanke wird durch das dynamische Schaltverhalten der Crowbar bestimmt. In erster Näherung entspricht die Form des Spannungssignals nach der Crowbar der einer Gauß-Kurve.

Zur Optimierung der Abstrahlungseffizienz kann dieses monopolare Spannungssignal mit Hilfe einer **Blumlein Transmission Line** in ein bipolares Spannungssignal transformiert werden. Hierbei bestimmt die Laufzeit in der Blumlein Transmission Line den Abstand der beiden Extrema.

$$\tau_{BL} = \frac{2L_{BL}}{v_{BL}} \quad (7.25)$$

Aktuell werden auf dem kommerziellen Markt Prüfquellen (HP-EM-Störquellen) angeboten, bei denen die pulsformende Schaltung unter Verwendung von hochleistungs Halbleiterschaltern rea-

Tabelle 7.30 Bewertung pulsformende Schaltungen

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		pulsformende Schaltungen
Benötigtes Fachwissen für - Design und Auslegung	$K_D = 2$	Das Design und die Auslegung einer pulsformende Schaltungen erfordert Fachkenntnisse auf dem Niveau eines versierten Hobbyelektronikers.
- Bau	$K_A = 2$	Für den Bau einer pulsformende Schaltung werden Fachkenntnisse auf dem Niveau eines Hobbyelektronikers benötigt
- Betrieb	$K_O = 1 - 2$	Für den Betrieb von pulsformende Schaltungen sind in der Regel nur eine Einweisung in die Handhabung notwendig. (Allgemeinwissen bis Grundverständnis)
Verfügbarkeit - der Komponenten	$AV_C = 2$	Die benötigten Baugruppen sind im Fachhandel erhältlich.
- des RF-Modulators	$AV_S = 0$	pulsformende Schaltungen werden derzeit nicht im Handel angeboten.
Baugröße / Mobilität	$M = 4$	
Kosten	$C_{exp} = 1$	Die Kosten für den Bau einer pulsformende Schaltungen liegen bei bis zu 1.000 €.
Bandbreite		Hyperband
Leistung	$\leq 2 \text{ GW}$	Impulsleistung
Effizienz	$\eta \leq 70 \%$	

lisiert wurde. Diese zeichnen sich gegenüber der in dieser Arbeit diskutierten Technologie durch schnellere und besser steuerbare Schaltzeiten aus. In Bezug auf die maximale Spannung und die Baugröße sind beide Ansätze jedoch vergleichbar. Daher wird an dieser Stelle auf einer eingehende Betrachtung der halbleiterbasierten Pulsformenden Schaltungen verzichtet.

7.6 Charakteristische Daten von Antennensystemen

Die letzte zu betrachtende Baugruppe von EMI-Störquellen (s. Abbildung 7.1) ist die Antenne. Wesentliche Funktion der Antenne ist es, die auf Leitungen oder in Hohlleitern geführten RF-Signale in elektromagnetische Freiraumwellen umzuwandeln und abzustrahlen. Die einfachste Bauform einer Antenne besteht aus einem Draht. Durch eine angepasste Formgebung (z.B. als elektrischer Dipol) und Abstimmung der Länge auf das abzustrahlende RF-Signal (z.B. $\lambda/2$) kann die Effizienz der Antenne und somit auch die Reichweite des EMI-Störers gesteigert werden. Für Anwendungen in den Bereichen Funkkommunikation, Radar, Telemetrie und Mobilfunk wurden eine Vielzahl an Antennentypen entwickelt, die für den Bau von EMI-Störern genutzt werden können. In diesem Bereich häufig eingesetzte Antennentypen sind (s. Abbildung 7.24)

- Dipolantennen,
- Konusantennen,
- Hornantennen,
- Reflektorantennen,
- Impulsabstrahlende Reflektor-Antennen (IRA),
- TEM-Hornantennen und
- Slotted Waveguide Antennen.

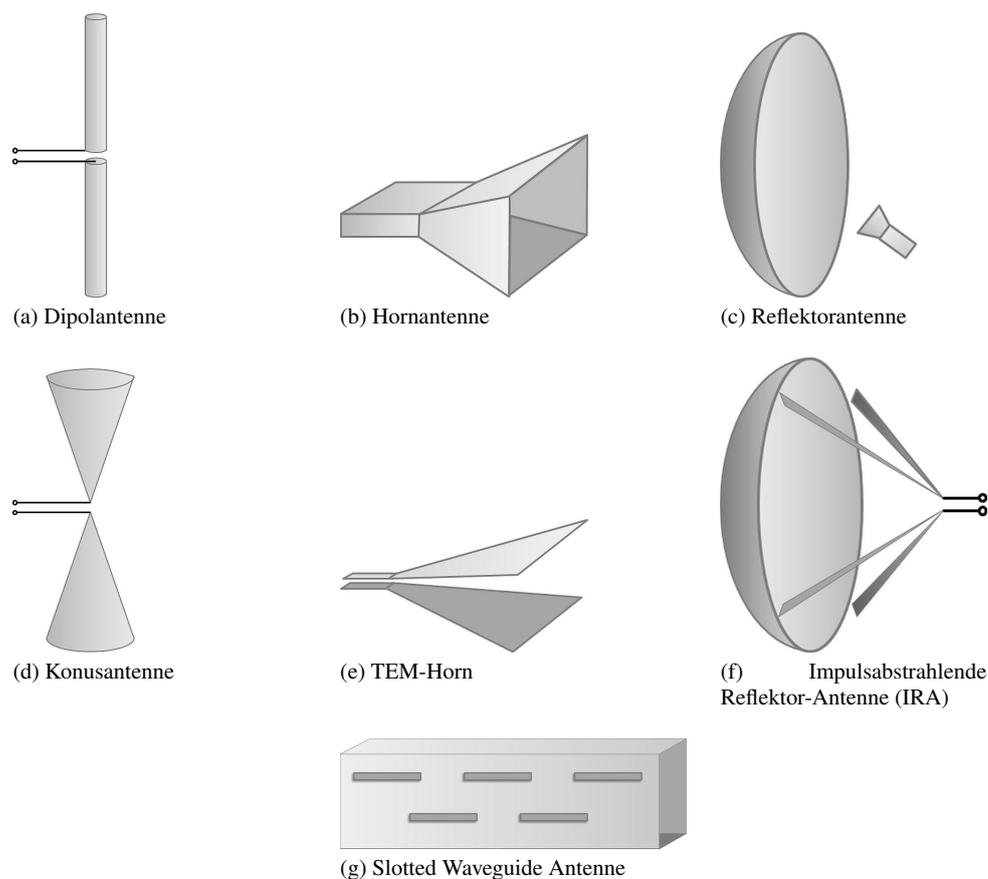


Abb. 7.24 Beispiele häufig für EMI-Störquellen eingesetzte Antennentypen

Darüber hinaus können Einzelantennen zu Gruppenantennen oder Arrayantennen zusammengefasst und so ihre Richtwirkung erhöht werden. Da die genannten Antennentypen hinreichend in der Literatur beschrieben und diskutiert wurden [125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134] wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine eingehende Darstellung der Antennenbauformen verzichtet.

Bedingt durch ihr einfaches Design erfordert die Auslegung einer Dipolantenne, einer Konusantenne oder eines hierauf aufbauenden Arrays nur Grundkenntnisse im Bereich Hochfrequenztechnik. Da diese Antennenformen zudem sehr häufig im Bereich des Amateurfunks eingesetzt wird existiert hinreichende Literatur zum Design auf dem Niveau von versierten Hobbyelektronikern und Amateurfunkern (s. Tabelle 7.31). Bedingt durch ihre Bauform eignen sich Dipolanennen und Dipolarrays nur für RF-Modulatoren, aus denen RF-Signal leitungsgeführt ausgekoppelt wird (z.B. Leitungsresonatoren, Switched Oscillator, Impulsquellen). Konusantennen zeichnen sich gegenüber Dipolantennen durch eine bessere Anpassung an die speisende Quelle, hieraus resultierend geringere Eingangsreflexionen und höhere Abstrahlungseffizienz aus. Werden Dipol- und Konusantennen in Resonanz betrieben weisen sie sehr schmalbandige Abstrahlungseigenschaften auf. Sie können jedoch im Bereich unterhalb eines Zehntels ihrer ersten Resonanzfrequenz als **elektrisch kurze Antennen** breitbandig, aber mit geringem Richtfaktor, betrieben werden.

Die Bauform von Hornantennen ist sehr gut geeignet für eine Speisung durch RF-Modulatoren, die die RF-Signale über Hohlleiter bereitstellen (z.B. Elektronenstrahlquellen). Im Vergleich zu Dipolantennen erfordert das Design von Hornantennen ein tieferes Verständnis der Hochfrequenztechnik, insbesondere der Wellenausbreitung in Hohlleitern. Die frei verfügbare Literatur spricht daher auch vorwiegend Akademiker mit einem abgeschlossenen Hochschul- oder Universitätsstudium an.

Tabelle 7.31 Benötigtes Fachwissen für das Design und die Auslegung von Antennen

Antennentyp		benötigtes Fachwissen	Literatur
Dipolantenne Abb. 7.24.a	$K_D = 2$	Das Design und die Auslegung einer Dipolantenne erfordert Fachkenntnisse auf dem Niveau eines versierten Hobbyelektronikers (z.B. Amateurfunker).	[128] Kap. 5.1 [126] Kap. 4
Konusantenne Abb. 7.24.d	$K_D = 2$	Das Design und die Auslegung einer Konusantenne mittlerer Güte erfordert Fachkenntnisse auf dem Niveau eines versierten Hobbyelektronikers (z.B. Amateurfunker).	[135] [126] Kap. 9.2
Aperturantenne Abb. 7.24.g	$K_D = 4$	Das Design und die Auslegung einer Aperturantenne erfordert akademisches Wissen .	[128] Kap. 5.4 [126] Kap. 12
Hornantenne Abb. 7.24.b	$K_D = 4$	Das Design und die Auslegung einer Hornantenne erfordert akademisches Wissen .	[128] Kap. 8 [126] Kap. 13
Reflektorantenne Abb. 7.24.c	$K_D = 4$	Das Design und die Auslegung einer Reflektorantenne erfordert akademisches Wissen .	[128] Kap. 9 [126] Kap. 15
Array-Antenne Abb. 7.24.g	$K_D = 4$	Das Design und die Auslegung einer Array-Antenne erfordert akademisches Wissen .	[128] Kap. 10 [126] Kap. 6
TEM-Horn Antenne Abb. 7.24.e	$K_D = 3$	Das Design und die Auslegung einer TEM-Horn Antenne erfordert Fachkenntnisse auf dem Niveau eines Technikers.	[136, 137]
IRA Abb. 7.24.f	$K_D = 4$	Das Design und die Auslegung einer IRA erfordert akademisches Wissen .	[138, 132, 134]

Demgegenüber erfordert die Umsetzung eines vorliegenden Designs sowie der Betrieb einer Hornantenne nur handwerkliche Fähigkeiten, über die jeder versierte Hobbyelektroniker bzw. Fachhandwerker verfügt. Für den Anwendungsbereich der EMV-Prüftechnik werden Hornantennen für den Frequenzbereich bis zu 10 GHz mit einem Gewinn von bis zu 20 dBi kommerziell angeboten. Da diese Hornantennen mit Standardanschlüssen versehen sind und nur bis zu einer Eingangsleistung von bis zu 10 kW (Impulsleistung) ausgelegt sind, ist davon auszugehen, dass diese nur in geringem Umfang für den Bau von EMI-Störern verwendet werden.

Durch die Kombination von Dipol-, Konus- und Hornantennen mit einem Reflektor⁴⁵ kann die Richtwirkung und der Gewinn der Antennen weiter gesteigert werden. Die Auslegung der Reflektorantennen, einschließlich der speisenden Antenne, erfordert wiederum ausgewiesenes akademisches Wissen auf dem Gebiet der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Eine Optimierung einer solchen Antenne erfolgt in der Regel unter Einsatz numerischer Analysemethoden. Gleiches gilt für die Kombination mehrerer Antennen zu Antennenarrays. Hierbei ist insbesondere die (phasenrichtige) Ansteuerung der Einzelantennen von entscheidender Bedeutung.

Im Bereich der Antennen nehmen die TEM-Horn Antennen und die Impulsabstrahlenden Reflektorantennen (IRA) eine Sonderstellung ein, da diese in der Lage sind impulsförmige Feldsignale abzustrahlen. Die Signalform der abgestrahlten elektrischen Feldstärke entspricht hierbei in guter Näherung dem differenzierten Spannungssignal, mit dem die Antenne gespeist wurde.

In Tabelle 7.31 ist für die betrachteten Antennenformen das für ihr Design notwendige Fachwissen als auch Literaturstellen, in denen das Design und die Auslegung der Antennen umfassend beschrieben wird, aufgetragen.

Neben dem benötigtem Fachwissen und der Marktverfügbarkeit der Antennen bzw. der für ihren Bau benötigten Materialien sind der Richtfaktor D_0 und der sich hieraus ergebende Antennengewinn G_0 wichtige Parameter. Der Richtfaktor einer Antenne beschreibt den Quotienten der in Hauptstrahlrichtung im Fernfeld abgestrahlten Leistungsdichte S_{\max} zu der eines angenommenen Isotropen Strahlers (Kugelstrahler) S_{iso} , bei gleicher abgestrahlter Leistung und gleicher Entfernung [139].

⁴⁵ Plan-, Korner- oder Parabolreflektor

Tabelle 7.32 Richtfaktoren ausgesuchter Antennentypen

Antennentyp	Richtfaktor D_0	Referenz	Hinweis
Hertz'scher Dipol	$D_0 = 1,5$	[126], S. 142	
$\frac{\lambda}{2}$ -Dipol	$D_0 = 1,643$	[126], S. 163	
$\frac{\lambda}{2}$ -Konusantenne	$D_0 = 1,643$	[126], S. 163	
Aperturantenne (Rechteck)	$D_0 = 4\pi \frac{A_{ap}}{\lambda^2}$	[126], S. 597	gleichförmige Apertur- belegung
	$D_0 = 0,81 \cdot 4\pi \frac{A_{ap}}{\lambda^2}$	[126], S. 597	TE ₁₀ -Mode
Aperturantenne (Kreis)	$D_0 = 4\pi \frac{A_{ap}}{\lambda^2} = (2\pi \frac{r_{ap}}{\lambda})^2$	[126], S. 609	gleichförmige Apertur- belegung
	$D_0 = 0,836 \cdot 4\pi \frac{A_{ap}}{\lambda^2} = 0,836 (2\pi \frac{r_{ap}}{\lambda})^2$	[126], S. 609	TE ₁₁ -Mode
Maximum Gain Horn	$D_0 = 4\pi \frac{L}{\lambda}$, mit $L = 1,1 \cdot \frac{r_{ap}}{\lambda}$	[128], S. 291	
Hornantenne (allg.)	$D_0 = e_{ap} \cdot 4\pi \frac{A_{ap}}{\lambda^2}$	[126], S. 695	$e_{ap} \geq 0,8$
Parabolreflektor (Kreis)	$D_0 = e_{ap} \cdot 4\pi \frac{A_{ap}}{\lambda^2} = e_{ap} \cdot \left(\frac{2\pi r_{ap}}{\lambda}\right)^2$	[128], S. 313	$e_{ap} \approx 0,5 - 0,7$

r_{ap} - Radius der Apertur, Horn-Apertur, Reflektor-Apertur

A_{ap} - Aperturfläche, e_{ap} - Apertureffizienz

$$D_0 = \frac{S_{\max}}{S_{\text{iso}}} \quad (7.26)$$

Der IEEE Standard 145-2013 [139] definiert den Antennengewinn als das Verhältnis der durch eine Antenne in Hauptstrahlrichtung im Fernfeld abgestrahlte Energieflußdichte zur Energieflußdichte, die erzeugt würde, wenn die durch die Antenne aufgenommene Leistung isotropisch abgestrahlt würde. Der Antennengewinn berechnet sich somit als Produkt aus dem Richtfaktor D_0 und dem Wirkungsgrad η_{re} der Antenne.

$$G_0 = \eta_{re} \cdot D_0 \quad (7.27)$$

Der Wirkungsgrad der Antenne bestimmt sich somit aus dem Verhältnis der von der Antenne abgestrahlten Leistung zu der von ihr aufgenommenen Leistung und kennzeichnet die elektrischen Verluste innerhalb der Antenne, z.B. durch endliche Leitfähigkeit des Materials oder dielektrische Verluste. Der Wirkungsgrad der Antenne beinhaltet nicht die Reflexionsverluste am Antenneneingang durch eine Fehlanpassung der Antenne an die Zuleitung bzw. an den speisenden RF-Modulator. Im Sinne einer konservativen Abschätzung kann weiterhin davon ausgegangen werden, dass bei der Auslegung der Antenne durch einen Akademiker deren Anpassung an die speisende Leitung bzw. den RF-Modulator in angemessener Form berücksichtigt wird und somit nur vernachlässigbare Verluste durch Fehlanpassung auftreten.

Im Rahmen der Modellierung eines IEMI-Szenarios kann die von einer Antenne maximal abgestrahlte Leistungsdichte über die Beziehung

$$S_{\max} = \frac{P_{\text{in}} G_0}{4\pi R^2} \quad (7.28)$$

bestimmt werden. Hierbei kann in erster Näherung der Wirkungsgrad der Antenne mit $\eta_{re} \approx 1$ und folglich $G_0 \approx D_0$ angenommen werden. In Tabelle 7.32 sind die Richtfaktoren ausgesuchter Antennentypen aufgetragen. Bei dem Vergleich der Formeln ist der bei allen Flächenantennen gemeinsam auftretende Quotient aus Antennenfläche (Aperturfläche) und dem Quadrat der Wellenlänge ($\frac{A_{ap}}{\lambda^2}$) erkennbar. Durch größere Antennenflächen lässt sich eine höhere Richtwirkung der Antenne realisieren. In IEMI-Szenarios lassen sich so größere Reichweiten erzielen. Die hierbei auftretende Bündelung des abgestrahlten Feldes in Hauptstrahlrichtung erfordert jedoch auch eine genauere

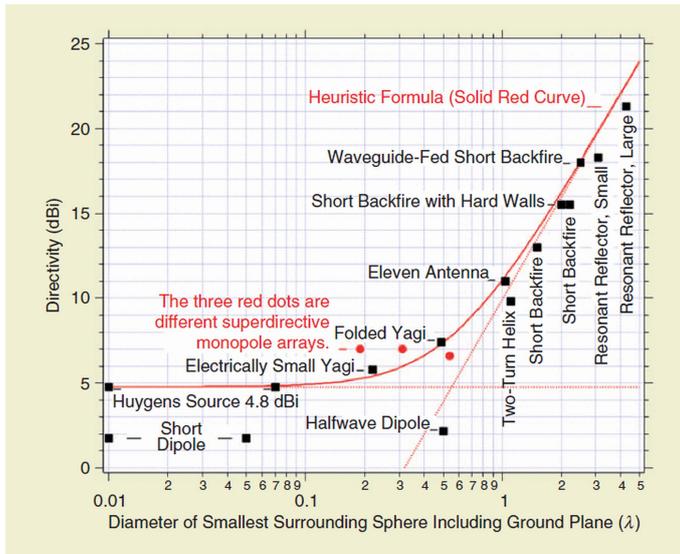


Abb. 7.25 Grundsätzliche Grenze des Richtfaktors einer Antenne als Funktion des Durchmessers der kleinsten, sie umschließenden Kugel. (© 2017 IEEE. Reprinted, with permission, from P. S. Kildal, et al., Degrees of Freedom and Maximum Directivity of Antennas: A bound on maximum directivity of nonsuperreactive antennas, IEEE Antennas and Propagation Magazine, 59(4):24, August 2017 [140].)

Kenntnis über den Ort des Zielsystems. Ist dem Angreifer der genaue Aufstellungsort des Zielsystems nicht bekannt, dürfte dieser mit hoher Wahrscheinlichkeit Antennen mit einer geringeren Richtwirkung und damit auch einer geringeren Baugröße bevorzugen.

In [141] hat Harrington für elektrisch große Antennen, basierend auf dem Äquivalenzprinzip, eine Schätzformel für den maximal möglichen Richtfaktor hergeleitet. Auf Basis heuristischer Daten hat Kildal diesen Ansatz für elektrisch kleinere Antennen erweitert [142, 140, 128]. Die sich hierbei ergebende heuristische Schätzformel für die grundsätzliche Grenze des Richtfaktors einer Antenne lautet:

$$D_{0,max} = \left(\pi \cdot \frac{2 \cdot r_{min}}{\lambda} \right)^2 + 3 \tag{7.29}$$

In dieser Schreibweise bezeichnet r_{min} den Radius der kleinsten Kugel, welche die Antenne vollständig umschließt (s. Abb. 7.26). In Abbildung 7.25 sind die mit Hilfe der Gleichung (7.29) ermittelten Werte (rote Kurve) den Richtfaktoren verschiedener Antennen vergleichend gegenübergestellt [140].

Die Darstellung belegt, dass die heuristische Schätzformel für die überwiegende Anzahl an Antennen den Richtfaktor mit einer Abweichung von weniger als 2 dB abschätzt. Die größten Abwei-



Abb. 7.26 Verdeutlichung der Bemessung von r_{min} anhand zweier Antennentypen.

Tabelle 7.33 Bewertung Antennen

Kriterium	Level	Beschreibung
Technologie		Antennen
Benötigtes Fachwissen für - Design und Auslegung - Bau - Betrieb	$K_D = 2 - 4$	siehe Tabelle 7.31
	$K_A = 2$	Für den Bau einer Antenne werden Fachkenntnisse auf dem Niveau eines Hobbyelektronikers benötigt
	$K_O = 1 - 2$	Für den Betrieb von Antennen sind in der Regel nur eine Einweisung in die Handhabung notwendig. (Allgemeinwissen bis Grundverständnis)
Verfügbarkeit - der Komponenten - des RF-Modulators	$AV_C = 2$	Die benötigten Baugruppen sind im Fachhandel erhältlich.
	$AV_S = 2$	Verschiedene Antennen sind derzeit im Fachhandel erhältlich.
Baugröße / Mobilität	$M = 3 - 5$	Die Baugröße ist abhängig von dem Frequenzbereich und der erwünschten Richtwirkung der Antenne. (s. Gl. 7.29 und Tab. 7.32)
Kosten	$C_{exp} = 1 - 2$	Die Kosten für den Bau einer Antenne liegen bei bis zu 1.000 €. Handelsübliche Antennen können, je nach Baugröße bis zu 10.000 € kosten.

chungen treten im Bereich der elektrische kurzen Antennen mit -5 dB für den $\lambda/2$ -Dipol und mit -3 dB für den elektrisch kurzen Dipol auf. Da zum Zeitpunkt der Modellierung des IEMI-Szenarios weder die Integration der Antennen in das Gesamtsystem Störsender noch deren genauer Aufstellungsort bekannt sind, ist die durch Gleichung (7.29) erzielbare Genauigkeit ausreichend.

In konsequenter Anwendung des Äquivalenzprinzips lässt die Gleichung (7.29) den Rückschluss zu, dass alle Antennen die in eine Kugelschale mit dem Radius r_{\min} hineinpassen einen Richtfaktor $D_0 \leq D_{0,\max}$ aufweisen. Der Durchmesser der Kugelschale ($d_{\text{Ant}} = 2r_{\min}$) bezeichnet zudem die größte Dimension der Antenne (z. B. die Länge einer Hornantenne oder den Durchmesser einer Reflektorantenne). Aus dieser Information lassen sich Rückschlüsse auf die Baugröße der Antenne ziehen. So ist die Länge einer Hornantenne üblicher Weise zwei bis vier mal so lang wie die größte Kantenlänge bzw. der Durchmesser der Aperturöffnung. Bei vielen parabolischen Reflektorantennen liegt die Brennweite und der Radius der Apertur im selben Bereich.

Kapitel 8

Abschätzung charakteristischer Daten potentieller Störquellen

Zusammenfassung Basierend auf den im vorherigen Kapitel abgeleiteten generischen Modellen für die einzelnen Baugruppen von Störquellen werden in diesem Kapitel generische Modelle für das *Gesamtsystem Störquelle* hergeleitet. Die Modellbildung beginnt mit der Untergliederung des nutzbaren Volumens einer möglichen Trägerplattformen in Teilvolumina für die jeweiligen Baugruppen. Anhand der bekannten generischen Modelle werden dann aus den Teilvolumina die wesentlichen Leistungsdaten der jeweiligen Baugruppen ermittelt. In einem abschließenden Schritt werden aus den bestimmten Leistungsdaten der Baugruppen die Leistungsdaten des Gesamtsystems abgeschätzt. Parallel hierzu werden basierend auf den Kenndaten der Baugruppen (benötigten Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten) durch Vergleich mit den Eigenschaften des generischen Angreifers die Auftrittswahrscheinlichkeit der betrachteten Störquelle in einer kriminellen Aktivität ermittelt. Diese Modellbildung wird zunächst theoretisch eingeführt und dann anhand ausgesuchter Beispiele verdeutlicht.

8.1 Grundlagen der Modellbildung

In der Vorbereitung einer IEMI-Attacke wird der Angreifer zunächst versuchen Zugang zu den in Abschnitt 7.1 beschriebenen Baugruppen (Abb. 8.1) zu erlangen und aus diesen eine elektromagnetische Störquelle¹ aufzubauen. In der Regel wird er diese Störquelle erst nach einem Funktionstest, gegebenenfalls der Ermittlung der Leistungsdaten und einiger Optimierungen, in eine geeignete Trägerplattform integrieren (Abb. 8.2). Die bisher nicht betrachtete Trägerplattform dient zum einem dem Schutz der Störquelle und ihrer Baugruppen vor Umgebungseinflüssen² als auch ihres Transports, zum anderen der Tarnung der Störquelle um ihr Auffinden möglichst zu verhindern oder herauszuzögern. Der erste Aspekt führt zu Trägersystemen, die eine einfache Handhabung und Transport ermöglichen. Unter Bezug auf den zweiten Aspekt wird der Angreifer eine Trägerplattform wählen die typisch für die Umgebung des Zielsystems ist oder in dieser nicht auffällt.

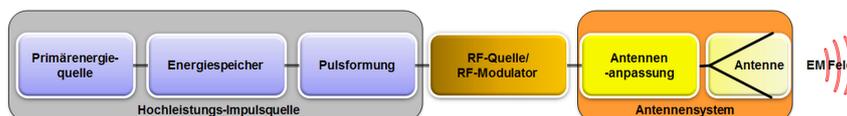


Abb. 8.1 Prinzipieller Aufbau einer elektromagnetischen Störquelle (nach [7, 89])

¹ siehe auch Abbildung 7.1 auf Seite 86

² z.B. Staub und Feuchtigkeit

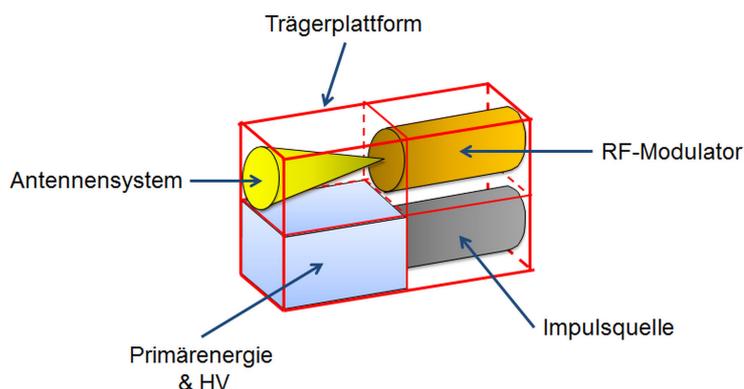


Abb. 8.2 Beispielhafte Integration einer generischen Störquelle in eine Trägerplattform

Für das EMI-Risikomanagement definiert die Größe der Trägerplattform die Mobilität des Gesamtsystems Störquelle. Der Vergleich der Mobilität mit der bekannten Zugänglichkeit der Umgebung des zu schützenden Zielsystems ermöglicht die Abschätzung mit welcher Wahrscheinlichkeit die betrachtete Störquelle in diese Umgebung verbracht werden kann. So ist es äußerst unwahrscheinlich, dass ein Trägersystem der Mobilität³ 3 (PKW) in einer höheren Etage eines Bürogebäudes auftritt, wogegen der Einbringung einer hoch mobilen Trägerplattform der Mobilität 5 (Aktenkoffer) keine technische Herausforderung darstellt.

Wie in diesem Beispiel leicht ersichtlich ist, lässt sich die Mobilität und somit die Baugröße der an einem gegebenen Ort in der Umgebung des Zielsystems auftretender möglicher EMI-Störquellen aus bekannten Merkmalen der Umgebung abschätzen. Darüber hinaus konnten im Abschnitt 7.3.3⁴ Schätzformeln für Zusammenhang zwischen der Baugröße und der Impulsausgangsleistung von Hochleistungsimpulsquellen und im Abschnitt 7.4⁵ heuristische Gleichungen für die Baugröße als Funktion der Wellenlänge aufgestellt werden. Die Mobilität stellt somit einen geeigneten Startpunkt für die Erstellung von generische Modelle möglicher Störquellen dar.

Als Grundlage für die Ableitung generischer Modelle für mobile EMI-Störquellen wurden für die Mobilitätsklassen 3 bis 5 die in Tabelle 8.1 aufgeführten 11 generischen Trägerplattformen definiert. Die Größen der generischen Plattformen wurden so gewählt, dass der Bereich der Baugrößen der jeweiligen Mobilitätsklasse gut abgedeckt wird und die Abmaße denen typischer realer Trägerplattformen entsprechen. In der Spalte Beispiel sind typische Vertreter der generischen Plattformen angegeben.

Nachdem durch die generischen Trägerplattformen die verfügbare Baugröße der EMI-Störquelle bekannt ist, muss diese in dem nun folgenden Modellierungsschritt in Teilvolumina für die vier Baugruppen:

- Primärenergie- & Hochspannungsquelle (HV),
- Impulsquelle,
- RF-Modulator und
- Antennensystem

unterteilt werden (Abb. 8.2). Hierbei ist zu beachten, dass ...

1. ... das Volumen der Primärenergie- & Hochspannungsquelle die verfügbare Energie und somit die Betriebsdauer des Systems vorgibt.

³ Tabelle 7.3 , Seite 89 oder Anhang D, Seite 211

⁴ Seite 94

⁵ Seite 103

Tabelle 8.1 Generische Trägerplattformen (Die Nennung der Werte für die Innen- und Außenmaße erfolgt beispielhaft in Bezug zu realen Plattformen)

generische Plattform	Mobilität M	Nutzvolumen 10^{-3}m^3	Innenmaße			Außenmaße			Beispiel
			L mm	B mm	H mm	L mm	B mm	H mm	
M5-1	5	2	110	250	75	125	265	80	Karteikasten, Kaffeedose, Box
M5-2		11	400	295	95	455	330	120	Aktenkoffer
M4-1	4	25	415	190	315	460	205	350	Pilotenkoffer, kleine Transportbox
M4-2		45	500	200	450	520	220	470	ATX midi tower PC-Gehäuse, kleiner Koffer
M4-3		90	550	550	300	600	600	330	Transportbox, großer Koffer
M4-4		195	780	480	520	830	530	550	Transportbox
M3-1	3	320	1.150	750	370	1200	800	400	große Transportbox
M3-2		650	1.150	750	770	1200	800	800	große Transportbox, PKW
M3-3		1.000	1.150	750	1.170	1200	800	1200	große Transportbox, VAN
M3-4		2.000	2.040	1.040	1.000	-/-	-/-	-/-	Einachs PKW-Anhänger
M3-5		7.000	2.700	1.400	1.800	-/-	-/-	-/-	Transporter

- ... das Volumen der Impulsquelle eine obere Schranke für die Impulsleistungsleistung (und somit für die Impulseingangsleistung des RF-Modulators) bestimmt (siehe Gleichungen 7.9 und 7.10).
- ... die maximale Impulsleistungsleistung der generischen RF-Modulatoren nur mit erheblichem technischem Aufwand überschritten werden kann.
- ... durch das Volumen für den RF-Modulator eine untere Grenze für dessen Operationsfrequenz vorgegeben wird.
- ... der Richtfaktor einer Antenne proportional dem Quadrat des Verhältnisses aus charakteristischer Dimension der Antenne zur Wellenlänge ist (siehe Tabelle 7.32 und Gleichung 7.29).

Das Volumen hoch mobiler ($M = 5$) und sehr mobiler ($M = 4$) Trägerplattformen reicht in der Regel nicht aus um eine Impulsquelle zu integrieren, die einen Betrieb des RF-Modulators bei maximaler Ausgangsleistung ermöglichen würde. Bei derart mobilen Störsendern kann zudem davon ausgegangen werden, dass die realisierbare Sendeleistung für Zerstörungen von Baugruppen des Zielsystems nicht ausreicht. Daher ist ein repetierender Betrieb über einen gewissen Zeitraum erstrebenswert. Ein in der Praxis sehr häufig gewählter Lösungsansatz des hieraus folgenden Optimierungsproblems zwischen Betriebsdauer (Größe der Primärenergiequelle) und Impulsleistung (Größe der Impulsquelle) besteht darin, die Primärenergie- & Hochspannungsquelle und die Impulsquelle so auszugestalten, dass sie die gleiche Baugröße aufweisen.

Im Hinblick auf die Aspekte 2 und 3 wurden für die generischen RF-Modulatoren⁶ die Baugröße der Impulsquelle abgeschätzt⁷ die benötigt würde um die Modulatoren mit maximaler Impulsleistungsleistung zu betreiben. Unter Anwendung des Ansatzes der Verwendung einer ebenso großen Primärenergie- & Hochspannungsquelle folgt aus den in Tabelle 8.2 dargestellten Werten, dass der Betrieb der leistungsstarken RF-Modulatoren HO-k-2, HO-b-1, HO-b-2 und MB-b-2 bei maximaler Impulsleistungsleistung aufgrund der Baugröße der Energieversorgung eine Trägerplattform der Mobilität $M \leq 3$ erfordert. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei Störquellen, die unter Verwendung der vorgenannten generischen RF-Modulatoren aufgebaut wurden, das Volumen der Baugruppen Primärenergie- & Hochspannungsquelle und Impulsquelle nicht durch die benötigte Impulsleistungsleistung sondern vielmehr durch die Anpassung an das beschränkte Volumen des Trägersystems bestimmt wird. Bei Verwendung der übrigen leistungsschwächeren RF-Modulatoren können bei Integration der Störquelle in eine Trägerplattform der Mobilität $M \leq 4$ die Impulsquelle auf die maximale Impulsleistungsleistung des RF-Modulators ausgelegt werden.

⁶ Tabelle 7.27, Seite 122 und Tabelle 7.29, Seite 124

⁷ Gl. 7.9, Seite 101

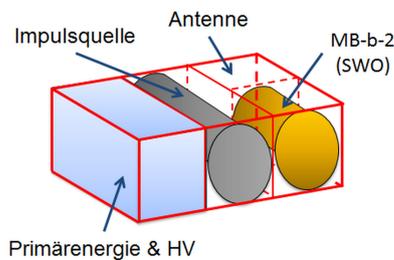
Tabelle 8.2 Baugröße der Impulsquelle für Betrieb der generischen RF-Modulatoren bei maximaler Impulsleistungsleistung

Typ RF-Modulator	Ausgangsleistung $P_{RF,out}$ GW	Effizienz η	Eingangsleistung $P_{RF,in}$ GW	Volumen Impulsgenerator V_{IG} $10^{-3}m^3$
HO-k-1	0,01	80 %	0,013	0,95
HO-k-2	0,5	70 %	0,714	95,36
HO-b-1	1	30 %	3,333	551,21
HO-b-2	10	40 %	25	5.469,82
MB-k-1	0,0005	60 %	0,0008	0,04
MB-b-1	0,01	50 %	0,02	1,62
MB-b-2	1	60 %	1,67	250,30

Basierend auf den dargelegten Abwägungen sowie der aufgeführten Randbedingungen ergeben sich hinsichtlich der Untergliederung des nutzbaren Volumens einer Trägerplattform in die einzelnen Volumina für die Baugruppen nachfolgende Strategien:

A) Mobilität $M > 3$ und RF-Modulatoren HO-k-2, HO-b-1 oder HO-b-2: Wie bereits dargelegt wurde, reicht das verfügbare Nutzvolumen der Trägerplattform nicht aus, um die für einen Betrieb des RF-Modulators bei maximaler Leistung benötigten Impulsgenerator, Hochspannungsquelle und Primärenergiequelle zu integrieren. Der in der Praxis häufig gewählte Optimierungsansatz besteht darin, für die vier Baugruppen gleich große Volumina ($= 1/4$ des Nutzvolumens) vorzusehen. Beispielhaft ist dieser Ansatz in Abbildung 8.2⁸ dargestellt. Die niedrigste Operationsfrequenz des RF-Modulators kann über die in Tabelle 7.27⁹ angegebene Beziehung zwischen Baugröße und Wellenlänge abgeschätzt werden.

B) Mobilität $M > 3$ und RF-Modulator MB-b-2: Der generische RF-Modulator MB-b-2 bildet die Klasse der Switched Oscillator¹⁰ ab. Die Besonderheit dieses RF-Modulator Typs ist, dass die Antennenstruktur (in der Regel eine Dipol- oder Konusantenne) auf den RF-Resonator zurückwirkt und die Resonanzfrequenz zu niedrigeren Frequenzen hin verschiebt. In der Paraxis werden daher RF-Resonator und Antenne als eine Baueinheit zusammen entworfen und aufgebaut. Durch diese Zusammenfassung verringert sich die Zahl der Baugruppen auf drei, zwischen denen das Nutzvolumen der Trägerplattform zu gleichen Teilen aufgeteilt wird (s. Abb. 8.3). Werden RF-Modulator und Antenne weiterhin getrennt betrachtet sind dem RF-Modulator und der Antenne je ein Sechstel des Nutzvolumens zuzuordnen. Eine typische Realisierung dieser Störquellen-Klasse ist der HPMcaseTM der Firma Diehl Defence [143].

**Abb. 8.3** Beispielhafte Integration einer generischen Störquelle vom Typ MB-b-2 in eine Trägerplattform

C) RF-Modulator MB-b-1: Die generische Klasse MB-b-1 der Mesobandquellen moderater Leistung basiert auf der Gruppe der Antennenresonatoren. Bei diesen bildet die Antennenstruktur den RF-Resonator. Die Klasse MB-b-1 wird zudem vorwiegend für Frequenzen unterhalb 1 GHz im VHF und UHF Band eingesetzt. Bedingt durch die niedrigen Frequenzen belaufen sich die

⁸ Seite 134⁹ Seite 122¹⁰ s. Abschnitt 7.4.6 auf Seite 115

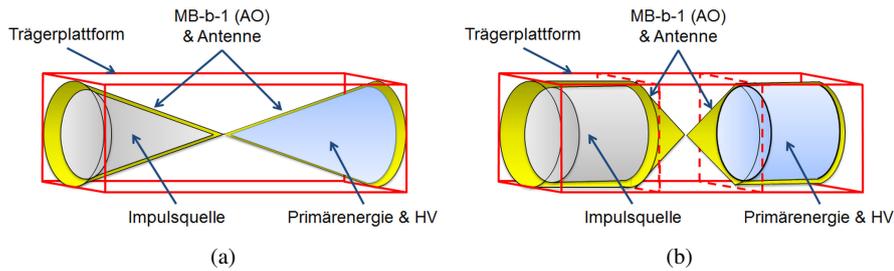


Abb. 8.4 Beispiele für die Integration generischer Störquelle vom Typ MB-b-1 in Trägerplattformen

Baulängen der Konusantennen von 30 cm ($f_o = 1$ GHz) bis hin zu 2 m ($f_o = 150$ MHz). In Kombination mit der geringen Ausgangsleistung ($P_{\text{out}} \leq 10$ MW) sind die Baugrößen des Impulsgenerators sowie der Primärenergie- und Hochspannungsquelle klein genug um in die Arme der Konusantenne integriert zu werden (s. Abb. 8.4). Als begrenzender Faktor verbleibt somit die Resonanzlänge der Antenne.

Der technisch einfachste Ansatz der Integration eines RF-Resonators Typ MB-b-1 ist die Ausführung in Form einer klassischen Bikonischen Antenne und Integration der Baugruppen Impulsquelle und Primärenergie- und Hochspannungsquelle in je einen Antennenarm. Wie in Abbildung 8.4.a deutlich erkennbar ist, wird hierbei das nutzbare Volumen der Trägerplattform nur zu ca. 25 % genutzt (vergleiche Tabelle 8.3). Eine in der Praxis häufig genutzte alternative Bauform, die das Volumen der Trägerplattform bis zu 60 % nutzt, ist in Abbildung 8.4.b dargestellt. In dieser Bauform werden die Arme der Antenne ab einem bestimmten Radius nur noch zylindrisch ausgeführt. In mobilen Systemen ($M \geq 3$) beträgt die Länge der zylindrischen Teile näherungsweise ein Drittel der Antennenlänge.

Unabhängig von der Ausführung der Antenne bieten bei Systemen einer Mobilität von $M \leq 4$ die Antennenarme ausreichend Volumen für die Integration einer Impulsquelle, die den Betrieb des RF-Modulators bei maximaler Leistung ermöglicht. Nur bei Systemen der höchsten Mobilitätsklasse ist es notwendig die Leistung der Impulsquelle aus dem verfügbaren Volumen abzuleiten.

D) Mobilität $M > 3$ und RF-Modulator HO-k-1 oder MB-k-1: Aufgrund ihrer geringen Ausgangsleistung und ihres recht hohen Wirkungsgrads können die RF-Modulatoren HO-k-1 und MB-k-1 durch Impulsgeneratoren und Primärenergie- und Hochspannungsquellen geringer Baugröße betrieben werden. Die in Tabelle 8.2 aufgelisteten Volumina der für einem Betrieb mit maximaler Ausgangsleistung notwendigen Impulsgeneratoren belegen, dass deren Integration in hoch mobile ($M = 5$) Plattformen sehr leicht möglich ist. Für ein generisches Modell kann daher das Volumen der Baugruppen Primärenergie- und Hochspannungsquelle als auch des Impulsgenerators mit den in Ta-

Tabelle 8.3 Volumina der Baugruppen generischer Störquellen

Fall	Trägerplattform		RF-Modulator		Primärenergie & HV V_{HV}	Impulsquelle V_{IG}	Antenne V_{Ant}	
	M_{TP}	V_{TP}	Typ	V_{RF}				
A	$M > 3$	$\leq 0,2 \text{ m}^3$	HO-k-2	$1/4V_{\text{TP}}$	$1/4V_{\text{TP}}$	$1/4V_{\text{TP}}$	$1/4V_{\text{TP}}$	Abb. 8.2
			HO-b-1					
			HO-b-2					
B	$M > 3$	$\leq 0,2 \text{ m}^3$	MB-b-2	$1/6V_{\text{TP}}$	$1/3V_{\text{TP}}$	$1/3V_{\text{TP}}$	$1/6V_{\text{TP}}$	Abb. 8.3
C			MB-b-1	$1/4V_{\text{TP}}$	$\leq 1/8V_{\text{TP}}$	$\leq 1/8V_{\text{TP}}$	$1/4V_{\text{TP}}$	Abb. 8.4.a
				$7/12V_{\text{TP}}$	$\leq 1/4V_{\text{TP}}$	$\leq 1/4V_{\text{TP}}$	$7/12V_{\text{TP}}$	Abb. 8.4.b

belle 8.2 angegebenen Werten angenommen werden. Das verbleibende Volumen der Trägerplattform kann in gleichen Teilen dem RF-Resonator und dem Antennensystem zugeordnet werden.

E) Mobilität $M \leq 3$: Ab einer Operationsfrequenz von $f_c = 150$ MHz sind alle generischen Meso- und Sub-Hyperband RF-Modulatoren ohne Größenbeschränkungen in die generischen Trägerplattformen einer Mobilität $M = 3$ integrierbar. Für die generischen Hypoband RF-Modulatoren ist dies ab einer Operationsfrequenz von $f_c = 1$ GHz der Fall. Unterhalb der genannten Frequenzen ist bei der Modellierung die für den verwandten RF-Modulator angemessene vorgenannte Vorgehensweise anzuwenden.

Oberhalb der genannten Frequenzen ist für die Erstellung des generischen Modells ist das Volumen des RF-Modulators aus der Betriebsfrequenz abzuleiten. Das Volumen für die Primärenergie- und Hochspannungsquellen als auch des Impulsgenerators sind für den Betrieb mit maximaler Ausgangsleistung, jedoch für jede Baugruppe nicht mehr als ein Viertel des Nutzvolumens der Trägerplattform, vorzusehen. Das verbleibende Volumen ist dem Antennensystem zuzuordnen.

Insbesondere bei RF-Modulatoren mit Ausgangsleistungen von $P_{\text{RF,out}} \geq 1$ GW¹¹ ist bei der Modellbildung zu berücksichtigen, dass der Betrieb im Bereich der maximalen Ausgangsleistung nur unter Verwendung zusätzlicher Hilfsaggregate, z.B. Kühlung und Leistungssteuerung, möglich ist. Das zusätzlich zu berücksichtigende Volumen dieser Hilfsaggregate kann in erster Näherung mit der Größe des RF-Modulators angenommen werden.

8.2 Modellierung generischer Störquellen

Das Ziel der Modellierung generischer Störquellen ist es, ausgehend von den im vorstehenden Abschnitt definierten generischen Trägerplattformen¹² mit Hilfe der im Kapitel 7 vorgestellten charakteristischen Eigenschaften der Baugruppen von EMI-Störquellen die Parameter

- Arbeitsfrequenz f_c ,
- maximale Impulssendeleistung P_{rad} ,
- normierte abgestrahlte elektrische Feldstärke $E_{\text{max}} \cdot r$, und
- Auftrittswahrscheinlichkeit

einer generischen EMI-Störquelle abzuschätzen. Die Modellierung orientiert sich an den in Tabelle 8.4 und Tabelle 8.5 dargestellten Schemata und umfasst die Modellierungsschritte:

1. **Auswahl Trägerplattform:** Auswahl einer generischen Trägerplattform (s. Tabelle 8.1¹³) und Eintragung der zugehörigen Werte der Abmaße, Verfügbarkeit, Kosten und Mobilität.
2. **Auswahl RF-Modulator:** Auswahl eines generischen RF-Modulators (Tabelle 7.27¹⁴, Tabelle 7.29¹⁵ oder Tabelle 7.30¹⁶) und Eintragung der zugehörigen Werte des Typs, des benötigten Fachwissens, der Verfügbarkeit, der Kosten und der Effizienz.
3. **Untergliederung Nutzvolumen:** Aufteilung des Nutzvolumens in Bereiche für die Primärenergie- und Hochspannungsquelle, die Impulsgenerator, den RF-Modulator und die Antenne nach der zugehörigen Strategie A bis E.
4. **Parametrisierung Primärenergie- und Hochspannungsquelle:** Übernahme der Werte für benötigtes Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten für die Primärenergie- und Hochspannungsquelle (Abschnitt 7.3.1 und Abschnitt 7.3.2).

¹¹ HO-b-1, HO-b-2 und MB-b-2

¹² Tabelle 8.1, Seite 135

¹³ Seite 135

¹⁴ Seite 122

¹⁵ Seite 124

¹⁶ Seite 126

Tabelle 8.4 Schema für die Modellierung von generischen Störquellen

Trägerplattform		
Typ		
Abmaße	L, B, H	
Nutzvolumen	V_{TP}	nutzbares Volumen in 10^{-3} m^3
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,TP}$	benötigte Fachwissen zur Integration der Störquelle in die Trägerplattform
Verfügbarkeit	$AV_{S,TP}$	Verfügbarkeit der Trägerplattform
Kosten	$C_{exp,TP}$	Kosten für die Beschaffung der Trägerplattform
Mobilität	M_{TP}	Mobilität der Trägerplattform
Primärenergie & HV		
Abmaße	L, B, H oder r, H	Abmasse in mm
Volumen	V_{HV}	aus dem Abmaßen bestimmtes Volumen in 10^{-3} m^3
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,HV}$	
Verfügbarkeit	$AV_{S,HV}$	
Kosten	$C_{exp,HV}$	
Impulsquelle		
Abmaße	L, B, H oder r, H	Abmasse in mm
Volumen	V_{IG}	aus dem Abmaßen bestimmtes Volumen in 10^{-3} m^3
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,IG}$	Tabelle 7.12, Seite 96
Verfügbarkeit	$AV_{C,IG}$	
Kosten	$C_{exp,IG}$	
Impulsleistung	$P_{out,t}$	Aus dem Volumen mit Gleichung 7.9, Seite 101 abgeschätzte Impulsleistung
	$P_{out,h}$	Aus dem Volumen mit Gleichung 7.10, Seite 101 abgeschätzte Impulsleistung
RF-Modulator		
Typ		Typ des generischen RF-Modulators, s. Tabelle 7.27, Seite 122 oder Tabelle 7.29, Seite 124
Abmaße	L, B, H oder r, H	Abmasse in mm
Volumen	V_{RF}	aus dem Abmaßen bestimmtes Volumen in 10^{-3} m^3
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,RF}$	s. Tabelle 7.27, Seite 122 oder Tabelle 7.29, Seite 124
Verfügbarkeit	$AV_{C,RF}$	
Kosten	$C_{exp,RF}$	Tabelle 7.24, Seite 117
Arbeitsfrequenz	f	
Effizienz	η	
Antenne		
Typ		
Abmaße	L, B, H oder r, H	Abmasse in mm
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,Ant}$	
Verfügbarkeit	$AV_{C,Ant}$	
Kosten	$C_{exp,Ant}$	
Richtfaktor	D_0	Tabelle 7.32, Seite 129
Impulsleistung	P_{rad}	
	$S_{max} \cdot r^2$	
normierte abgestrahlte elektrische Feldstärke	$E_{max} \cdot r$	

5. **Parametrisierung Impulsgenerator:** Übernahme der Werte für benötigtes Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten für den Impulsgenerator (Abschnitt 7.3.3). Abschätzung der maximalen Impulsleistung mit Hilfe der Gleichungen 7.9¹⁷ für traditionelle Technologien bzw. Gleichung 7.10¹⁸ für hochentwickelte Technologien.
6. **Abschätzung Arbeitsfrequenz:** Abschätzung der Arbeitsfrequenz aus dem verfügbaren Volumen mit Hilfe der Abschätzformeln für das Bauvolumen (s. Tabelle 7.27 und Tabelle 7.29; nur für HO und MB Resonatoren).
7. **Parametrisierung Antenne:** Übernahme der Werte für benötigtes Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten für die Antenne aus Tabelle 7.33¹⁹. Abschätzung des Richtfaktors mit Hilfe der Gleichung 7.29²⁰ oder den in Tabelle 7.32²¹ aufgelisteten Antennentypen spezifischen Beziehungen.
8. **Abschätzung Impulsendeleistung:** Abschätzung der abgestrahlten Impulsleistung aus der Impulsleistung (P_{out}) des Impulsgenerators und der Effizienz (η) des RF-Modulators über die Beziehung:

$$P_{\text{rad}} = P_{\text{out}} \cdot \eta \quad (8.1)$$

9. **Abschätzung normierte abgestrahlte elektrische Feldstärke:** Unter Annahme einer verlustfreien Antenne ($\eta_{re} = 1$) sowie Einsetzen der abgeschätzten Werte für die abgestrahlte Impulsleistung und den Richtfaktor der Antenne in Gleichung 7.28²² berechnet sich die normierte maximale (in Hauptstrahlrichtung) abgestrahlte Energieflussdichte zu:

$$S_{\text{max}} \cdot r^2 = \frac{P_{\text{rad}} \cdot D_0}{4 \cdot \pi} \quad (8.2)$$

Im Fernfeld der Antenne kann über die Beziehung

$$E_{\text{max}} \cdot r = \sqrt{S_{\text{max}} \cdot r^2 \cdot Z_0} \quad (8.3)$$

die maximale von der Störquelle abgestrahlte elektrische Feldstärke abgeschätzt werden.

Insbesondere bei hoch mobilen Störquellen ist zu beachten, dass diese oftmals sehr nahe am Zielsystem platziert werden. In diesen Fällen befindet sich das Zielsystem nicht im Fernfeld der Antenne, so dass die vorstehenden Abschätzungen nicht anwendbar sind. Befindet sich das Zielsystem im reaktiven Nahfeld der Antenne treten neben der hier betrachteten gestrahlten Feldkopplung auch zusätzlich kapazitive oder induktive Kopplungsmechanismen auf, die die Störeinkopplung verstärken können. Im Rahmen des EMI-Risikomanagements liefern die vorstehenden Beziehungen jedoch einen guten Anhalt für das Gefährdungspotential der betrachteten EMI-Störquelle.

Die nachfolgenden Modellierungsschritte dienen der Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, mit der die betrachtete generische Störquelle in einer kriminellen Aktivität auftritt. Hierzu werden zunächst die Aspekte Fachwissen, Verfügbarkeit der Technologien bzw. Baugruppen und Kosten der einzelnen Baugruppen getrennt bewertet. Die sich hierbei ergebenden Wahrscheinlichkeitsindizes werden in einem Zwischenschritt für die jeweiligen Baugruppen und in einem abschließendem Modellierungsschritt für das Gesamtsystem zusammengefasst.

10. **Bewertung Fachwissen:** Zuordnung der in den vorhergehenden Modellierungsschritten erfassten Werten des für den Aufbau und den Betrieb der jeweiligen Baugruppen benötigten Fachwissens

¹⁷ Seite 101

¹⁸ Seite 101

¹⁹ Seite 131

²⁰ Seite 130

²¹ Seite 129

²² Seite 129

Tabelle 8.5 Schema zur Bestimmung des Index für die Auftrittswahrscheinlichkeiten einer Störquelle

Index der Wahrscheinlichkeit, mit der der generische Angreifer ...	Parameter	Referenz
Trägerplattform		
... über das benötigte Fachwissen zur Integration der Störquelle in die Trägerplattform verfügt.	$P_{K,TP}(K_{D,TP})$	Gleichung 6.1, Seite 81 bzw. Tabelle 6.8, Seite 82
... Zugang zu der Trägerplattform hat.	$P_{A,TP}(AV_{S,TP})$	Gleichung 8.4 bzw. Tabelle 8.6
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen zum Kauf der Trägerplattform verfügt.	$P_{C,TP}(C_{exp,TP})$	Gleichung 6.2, Seite 82 bzw. Tabelle 6.9, Seite 82
... über die Trägerplattform verfügt.	$P_{TP} = \min \{P_{K,TP}, P_{A,TP}, P_{C,TP}\}$	
Primärenergie & HV		
...über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,HV}(K_{D,HV})$	Gleichung 6.1, Seite 81 bzw. Tabelle 6.8, Seite 82
...Zugang zu den benötigten Komponenten hat	$P_{A,HV}(AV_{C,HV})$	Gleichung 8.4 bzw. Tabelle 8.6
...über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,HV}(C_{exp,HV})$	Gleichung 6.2, Seite 82 bzw. Tabelle 6.9, Seite 82
...über eine Primärenergie- und Hochspannungsquelle verfügt.	$P_{HV} = \min \{P_{K,HV}, P_{A,HV}, P_{C,HV}\}$	
Impulsquelle		
...über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,IG}(K_{D,IG})$	Gleichung 6.1, Seite 81 bzw. Tabelle 6.8, Seite 82
... Zugang zu den benötigten Komponenten hat.	$P_{A,IG}(AV_{C,IG})$	Gleichung 8.4 bzw. Tabelle 8.6
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,IG}(C_{exp,IG})$	Gleichung 6.2, Seite 82 bzw. Tabelle 6.9, Seite 82
... über die Impulsquelle verfügt.	$P_{IG} = \min \{P_{K,IG}, P_{A,IG}, P_{C,IG}\}$	
RF-Modulator		
... über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,RF}(K_{D,RF})$	Gleichung 6.1, Seite 81 bzw. Tabelle 6.8, Seite 82
... Zugang zu den benötigten Komponenten hat.	$P_{A,RF}(AV_{C,RF})$	Gleichung 8.4 bzw. Tabelle 8.6
über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,RF}(C_{exp,RF})$	Gleichung 6.2, Seite 82 bzw. Tabelle 6.9, Seite 82
... über den RF-Modulator verfügt.	$P_{RF} = \min \{P_{K,RF}, P_{A,RF}, P_{C,RF}\}$	
Antenne		
... über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,Ant}(K_{D,Ant})$	Gleichung 6.1, Seite 81 bzw. Tabelle 6.8, Seite 82
... Zugang zu den benötigten Komponenten hat.	$P_{A,Ant}(AV_{C,Ant})$	Gleichung 8.4 bzw. Tabelle 8.6
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,Ant}(C_{exp,Ant})$	Gleichung 6.2, Seite 82 bzw. Tabelle 6.9, Seite 82
... über eine geeignete Antenne verfügt.	$P_{Ant} = \min \{P_{K,Ant}, P_{A,Ant}, P_{C,Ant}\}$	
Gesamtsystem		
... über die Störquelle verfügt.	$P_{CU} = \min \{P_{TP}, P_{HV}, P_{IG}, P_{RF}, P_{Ant}\}$	

mit Hilfe des im Abschnitt 6.2²³ beschriebenen Modells des *generischen Angreifers* zu Wahrscheinlichkeitskategorien²⁴. Hierzu können die Wahrscheinlichkeitskategorien entweder aus Tabelle 6.8²⁵ abgelesen oder über die Gleichung 6.1²⁶ berechnet werden. (siehe auch Tabelle 8.5)

11. **Bewertung finanzieller Ressourcen/Kosten:** Zuordnung der für die Beschaffung bzw. den Aufbau und den Betrieb der jeweiligen Baugruppen anfallenden Kosten zu der Wahrscheinlichkeitskategorie, mit der der generische Angreifer Zugang zu den entsprechenden finanziellen Ressourcen

²³ Seite 77

²⁴ s. Tabelle 2.1 auf Seite 15 oder Anhang D

²⁵ Seite 82

²⁶ Seite 81

cen hat (s. Abschnitt 6.2). Hierzu können die Wahrscheinlichkeitskategorien entweder aus Tabelle 6.9²⁷ abgelesen oder über die Gleichung 6.2²⁸ berechnet werden. (siehe auch Tabelle 8.5)

12. **Bewertung Verfügbarkeit der Technologie/Baugruppe:** In Bezug auf die Abschätzung, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Angreifer Zugang zu einer Technologie einer gegebenen Verfügbarkeit hat, sind in der frei zugänglichen Literatur praktisch keine nutzbaren Daten vorhanden. Auch gibt es zu diesem Aspekt bisher keine Studien, die als Grundlage dienen könnten. Somit verbleibt für die Bewertung der Verfügbarkeit der Technologien und Baugruppen nur der Rückgriff auf die Meinung von Experten.

Im Rahmen der Erstellung des Modells des *generischen Angreifers*²⁹ wurde eine Expertenbefragung durchgeführt, die auch Fragen hinsichtlich des Aspekts der Verfügbarkeit beinhaltete. Die Ergebnisse der Expertenbefragung sind in Abbildung 8.5 dargestellt. Die grauen Balken bezeichnen hierbei den Bereich in dem die Antworten der Experten lagen. Die arithmetischen Mittelwerte der Expertenantworten sind mit Kreuzen gekennzeichnet. Aufgrund der Lage der arithmetischen Mittelwerte der Expertenschätzung wurde der Versuch unternommen, diese mit Hilfe einer linearen Funktion zu approximieren. Hierzu wurden der Index der Wissenskategorie als auch der Index der kumulierten Wahrscheinlichkeit als gewöhnliche Zahlen aufgefasst³⁰. Die Approximation der Mittelwerte führte auf die lineare Funktion:

$$P_{A,BauGrp} = 10 - 1,9 \cdot AV_{BauGrp} \quad (8.4)$$

Der Verlauf dieser Funktion ist in Abbildung 8.5 durch die gestrichelte Linie wiedergegeben. Die Beziehung 8.4 kann im Rahmen der Risikoanalyse im Sinne einer Wahrscheinlichkeitsfunktion zur Bestimmung der Auftrittswahrscheinlichkeit einer IEMI-Störquelle genutzt werden. Eine hierzu alternative Form der Abbildung der kumulierten Wahrscheinlichkeit auf die Wissenskategorien ist die in Tabelle 8.6 aufgetragene Zuordnungstabelle.

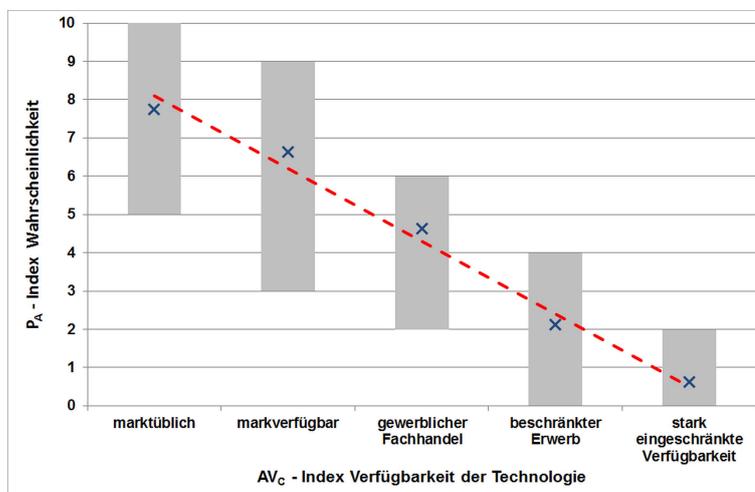


Abb. 8.5 Wahrscheinlichkeit, mit der ein durchschnittliche Angreifer Zugang zu einer Technologie der jeweiligen Verfügbarkeitskategorie hat. (Gestrichelte Linie: approximierte Wahrscheinlichkeitsverteilung (Gl. 8.4); graue Balken: Einschätzung durch Experten, Kreuze: arithmetische Mittelwerte)

²⁷ Seite 82

²⁸ Seite 82

²⁹ siehe Abschnitt 6.2 ab Seite 77

³⁰ Im mathematische strengen Sinne können Indizes und Skalen nicht über arithmetische Funktionen miteinander verknüpft werden, da es sich hierbei mathematisch nicht um Zahlen sondern nur um willkürlich gewählte Bezeichnungen handelt.

Tabelle 8.6 Kumulierte Wahrscheinlichkeiten, mit der ein durchschnittliche Angreifer Zugang zu einer Technologie der jeweiligen Verfügbarkeitskategorie hat. (s. Abb. 8.5)

Verfügbarkeit	Verfügbarkeit Definition	AV_C	kumulierte Wahrscheinlichkeit		
			P_A	Kategorie	Wahrscheinlichkeit
marktübliche	Gebrauchsgegenstand der für jedermann frei auf dem Markt (z.B. Supermarkt) erhältlich ist	1	8	hoch	75 % – 90 %
marktverfügbar	Kann ohne Beschränkungen von jedermann in Fachgeschäften erworben werden.	2	6	mittel	20 % – 50 %
(gewerblicher) Fachhandel	Gegenstand ist nur in Fachgeschäften und für gewerbliche Unternehmen erhältlich	3	4	mittel	5 % – 12 %
beschränkter Erwerb	Erwerb unter Auflagen für registrierte Käufer; Spezialanfertigungen	4	2	gering	2 % – 5 %
Stark eingeschränkt	Verbot des Handels oder Besitz durch Gesetz	5	1	unwahrscheinlich	0,5 % – 1 %

13. **Auftrittswahrscheinlichkeit Baugruppen:** Nachdem für jede Baugruppe die Aspekte Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten einem Wahrscheinlichkeitsindex zugeordnet wurden, müssen diese zu einem Index (P_{BauGrp}) für die Wahrscheinlichkeit zusammengefasst werden, mit der ein generischer Angreifer über die jeweilige Baugruppe verfügt [30].

$$P_{\text{BauGrp}} = f(P_{K,\text{BauGrp}}, P_{A,\text{BauGrp}}, P_{C,\text{BauGrp}}) \quad (8.5)$$

Wie bereits erwähnt wurde, können im mathematisch strengen Sinne die Indizes $P_{K,\text{BauGrp}}$, $P_{A,\text{BauGrp}}$ und $P_{C,\text{BauGrp}}$ nicht über arithmetische Funktionen miteinander verknüpft werden, da es sich hierbei nicht um Zahlen, sondern um willkürlich gewählte Bezeichnungen einer nicht äquidistanten Skala handelt. Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus der Tatsache, dass es sich bei den Aspekten Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten um miteinander korrelierte Größen handelt. Als unmittelbare Folge können deren Wahrscheinlichkeiten nicht durch Multiplikation zu einer Gesamtwahrscheinlichkeit zusammengefasst werden. Da die Einzelwahrscheinlichkeiten $P_{K,\text{BauGrp}}$, $P_{A,\text{BauGrp}}$ und $P_{C,\text{BauGrp}}$ Ergebnis einer Expertenschätzung sind, ist eine mathematische Modellierung der bestehenden Korrelationen nicht möglich.

Vor dem Hintergrund der in den Wahrscheinlichkeitsindizes enthaltenen Unsicherheiten (Expertenschätzung, generische Trägerplattform und generische Baugruppen) ist es im Rahmen der EMIRisikoanalyse ausreichend den gesuchten Wahrscheinlichkeitsindex P_{BauGrp} durch eine geeignete mathematische Operation anzunähern. Die mathematische Operation muss hierbei folgende Eigenschaften aufweisen:

- Der Wertebereich der Definitions- und Zielmenge ist die in Tabelle 2.1³¹ angegebene Skala für Wahrscheinlichkeit. ($0 \leq P_{\text{BauGrp}} \leq 10$)
- Der Gesamtindex entspricht der niedrigsten Stufe ($P_{\text{BauGrp}} = 0$), wenn der Wert einer Teilgröße $P_{K,\text{BauGrp}}$, $P_{A,\text{BauGrp}}$ und $P_{C,\text{BauGrp}}$ in der niedrigsten Stufe liegt.
- Wenn die Teilgrößen gleich sind ($P_{K,\text{BauGrp}} = P_{A,\text{BauGrp}} = P_{C,\text{BauGrp}} = k$) hat der Gesamtindex den gleichen Wert ($P_{\text{BauGrp}} = k$).
- Alle Teilgrößen $P_{K,\text{BauGrp}}$, $P_{A,\text{BauGrp}}$ und $P_{C,\text{BauGrp}}$ haben den gleichen Beitrag zum Gesamtindex P_{BauGrp} .

³¹ Seite 15

Ein Operator der die vorgenannten Eigenschaften aufweist ist der Schnittmengen- oder UND-Operation der Fuzzylogik [144, 145]:

$$P_{\text{BauGrp}} = P \{ K_{D,\text{BauGrp}} \cap A_{V_{C,\text{BauGrp}}} \cap C_{\text{exp},\text{BauGrp}} \} \quad (8.6)$$

$$= \min \{ P_{K,\text{BauGrp}}, P_{A,\text{BauGrp}}, P_{C,\text{BauGrp}} \} \quad (8.7)$$

Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser Operator zur Zusammenfassung der Indizes von Wahrscheinlichkeiten zu einer Gesamtwahrscheinlichkeit genutzt.

14. **Auftrittswahrscheinlichkeit Gesamtsystems:** Die Modellierung der generischen Störquelle schließt mit der Zusammenfassung der Wahrscheinlichkeiten, mit denen der Angreifer Zugang zu den einzelnen Baugruppen³² hat zu der Wahrscheinlichkeit, dass ein Angreifer über die generische Störquelle verfügt:

$$P_{\text{CU}} = \min \{ P_{\text{TP}}, P_{\text{HV}}, P_{\text{IG}}, P_{\text{RF}}, P_{\text{Ant}} \} \quad (8.8)$$

Das vorgestellte Modellierungsverfahren ist in der Lage aus der **Baugröße (Mobilität)** der Trägerplattform sowie einer angenommenen **generischen RF-Modulator** Klasse die untere Grenze der **Betriebsfrequenz**, die abgestrahlte **Feldstärke** sowie die **Wahrscheinlichkeit** mit der ein generischer Angreifer Zugang zu der Störquelle abzuschätzen.

Unter Anwendung des vorgestellten Modellierungsverfahrens kann nun für jede der in den Tabellen 8.7 und 8.8 aufgetragenen generischen Störquellenklassen der beschreibende Datensatz bestimmt werden. Dieser besteht aus:

- der Bezeichnung,
- der Mobilität der generischen Trägerplattform,
- dem Typ generischer RF-Modulator,
- der unteren Grenze der Betriebsfrequenz,
- der Stärke des abgestrahlten elektrischen Feldes und
- der Wahrscheinlichkeit, mit der ein angenommener generischer Angreifer Zugang zu einer Störquelle dieser Klasse hat.

Tabelle 8.7 Generische Störquellenklassen (Hypoband)

generische Plattform	Typ RF-Modulator (Hypoband)			
	HO-k-1	HO-k-2	HO-b-1	HO-b-2
M5-1	M5-1:HO-k-1	M5-1:HO-k-2	M5-1:HO-b-1	M5-1:HO-b-2
M5-2	M5-2:HO-k-1	M5-2:HO-k-2	M5-2:HO-b-1	M5-2:HO-b-2
M4-1	M4-1:HO-k-1	M4-1:HO-k-2	M4-1:HO-b-1	M4-1:HO-b-2
M4-2	M4-2:HO-k-1	M4-2:HO-k-2	M4-2:HO-b-1	M4-2:HO-b-2
M4-3	M4-3:HO-k-1	M4-3:HO-k-2	M4-3:HO-b-1	M4-3:HO-b-2
M4-4	M4-4:HO-k-1	M4-4:HO-k-2	M4-4:HO-b-1	M4-4:HO-b-2
M3-1	M3-1:HO-k-1	M3-1:HO-k-2	M3-1:HO-b-1	M3-1:HO-b-2
M3-2	M3-2:HO-k-1	M3-2:HO-k-2	M3-2:HO-b-1	M3-2:HO-b-2
M3-3	M3-3:HO-k-1	M3-3:HO-k-2	M3-3:HO-b-1	M3-3:HO-b-2
M3-4	M3-4:HO-k-1	M3-4:HO-k-2	M3-4:HO-b-1	M3-4:HO-b-2
M3-5	M3-5:HO-k-1	M3-5:HO-k-2	M3-5:HO-b-1	M3-5:HO-b-2

³² TP - Trägerplattform, HV - Primärenergie und Hochspannungsquelle, IG - Impulsquelle, RF - RF-Modulator und Ant - Antenne

Tabelle 8.8 Generische Störquellenklassen (Meso- und Sub-Hyperband)

generische Plattform	Typ		
	RF-Modulator(Meso- und Sub-Hyperband)		
	MB-k-1	MB-b-1	MB-b-2
M5-1	M5-1:MB-k-1	M5-1:MB-b-1	M5-1:MB-b-2
M5-2	M5-2:MB-k-1	M5-2:MB-b-1	M5-2:MB-b-2
M4-1	M4-1:MB-k-1	M4-1:MB-b-1	M4-1:MB-b-2
M4-2	M4-2:MB-k-1	M4-2:MB-b-1	M4-2:MB-b-2
M4-3	M4-3:MB-k-1	M4-3:MB-b-1	M4-3:MB-b-2
M4-4	M4-4:MB-k-1	M4-4:MB-b-1	M4-4:MB-b-2
M3-1	M3-1:MB-k-1	M3-1:MB-b-1	M3-1:MB-b-2
M3-2	M3-2:MB-k-1	M3-2:MB-b-1	M3-2:MB-b-2
M3-3	M3-3:MB-k-1	M3-3:MB-b-1	M3-3:MB-b-2
M3-4	M3-4:MB-k-1	M3-4:MB-b-1	M3-4:MB-b-2
M3-5	M3-5:MB-k-1	M3-5:MB-b-1	M3-5:MB-b-2

Die Mobilität der Trägerplattform und der Typ des RF-Modulators dienen hierbei sowohl zur Bezeichnung als auch als Eingangsparameter der Modellierung.

Die in den Tabellen 8.7 und 8.8 aufgetragenen 77 generischen Störquellenklassen decken das gesamte Spektrum möglicher Störquellen ab. Bei der Bewertung der abgeschätzten Wahrscheinlichkeiten ist zu berücksichtigen, dass durch diese nur die Aussage gemacht wird, ob ein generischer Angreifer Zugang zu einer Störquelle der betrachteten Klasse hat. Die Bewertung, ob und mit welcher Wahrscheinlichkeit der Angreifer diese in die Umgebung des Zielsystems verbringen und betreiben kann, erfolgt erst in dem nachfolgenden Modellierungsschritt. Aufgrund der Unkenntnis hinsichtlich eines möglichen Betriebsortes und somit der Entfernung zwischen der Störquelle und dem Zielsystem ist eine Bewertung hinsichtlich der Stärke des abgestrahlten elektrischen Feldes (z.B. ob diese zur Störung des Zielsystems ausreicht) noch nicht möglich. Aus den vorgenannten Gründen sind alle 77 generischen Störquellenklassen zu modellieren und bei der Risikobetrachtung zu berücksichtigen.

8.3 Abschätzung der charakteristischen Daten ausgesuchter Störquellenklassen

Die im vorstehenden Abschnitt beschriebene Methode zur Modellierung generischer Störquellen soll nun am Beispiel ausgesuchter Störquellenklassen verdeutlicht und die Anwendbarkeit des sich hierbei ergebenden Modells durch den Vergleich mit Messdaten existierender Störquellen aufgezeigt werden. Die ausgewählten modellierenden generischen Störquellenklassen sind:

1. **Typ M4-2:MB-b-2:** als Beispiel einer SWO basierten Störquelle, die in einen Transportkoffer integriert wurde.
2. **Typ M4-1:HO-k-1:** als Beispiel einer handelsüblichen Magnetron-Quelle, die in einen Aktenkoffer bzw. Pilotenkoffer integriert wurde.
3. **Typ M5-1:MB-b-1:** als Beispiel eines selbst gebauten Antennenoszillators, der in eine Dose (z.B. Kaffeedose) integriert wurde.

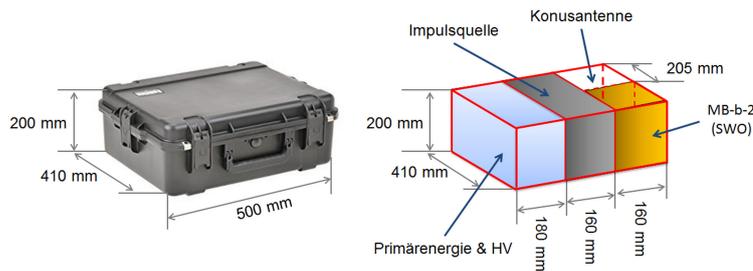


Abb. 8.6 Beispiel einer in einen Transportkoffer (Plattform Typ M4-2) integrierte Störquelle vom Typ MB-b-2 (z.B. SWO).

8.3.1 Störquellen in sehr mobilen Trägerplattformen

Beispiel 8.1: EMI-Störquelle vom Typ M4-2:MB-b-2

- Auswahl Trägerplattform:** Die erste betrachtete sehr mobile Störquelle basiert auf einem Transportkoffer aus Kunststoff, der im Handel frei erhältlich ist. In Abbildung 8.6 ist eine in der Industrie übliche Ausführung, die dem generischen Typ M4-2 entspricht, abgebildet. Die in dieser Abbildung angegebenen Abmaße entsprechen dem Datenblatt eines realen Transportkoffers und sind etwas geringer als die in Tabelle 8.2 aufgelisteten Abmaße für eine generische Plattform vom Typ M4-2.
- Auswahl RF-Modulator:** Als RF-Modulator wird ein generischer RF-Modulator vom Typ MB-b-2 (SWO) gewählt.
- Untergliederung Nutzvolumen:** Aus dem Typ der Trägerplattform und des Typs des RF-Modulators folgt, dass das Nutzvolumen nach der Strategie B zu untergliedern ist. Dieser Strategie folgend werden der Primärenergie- und Hochspannungsquelle als auch der Impulsquelle je ein Drittel ($13,67 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$), dem RF-Modulator und der Antenne je ein Sechstel ($6,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$) des Nutzvolumens zugeordnet. (Abb. 8.6)
- Parametrisierung Primärenergie- und Hochspannungsquelle:** Die Werte für das benötigte Fachwissen zur Auslegung der Primärenergiequelle, ihre Verfügbarkeit und die Kosten können in Tabelle 7.8³³ abgelesen werden. Die Werte für die Hochspannungsquelle sind in Tabelle 7.11³⁴ aufgetragen. Zusammenfassend ergeben sich die in Tabelle 8.9 aufgeführten Werte.
- Parametrisierung Impulsgenerator:** Bei dem Impulsgenerator wird ein System angenommen, dass mit traditioneller Technologie aufgebaut ist und die maximale Leistung liefert. Folglich werden für das benötigte Fachwissen, die Verfügbarkeit und die Kosten die in der mittleren Spalte (*traditionell - worse case*) der Tabelle 7.18³⁵ aufgelisteten Werte übernommen. Einsetzen des Bauvolumens von $V_{IG} = 13,67 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ in die Gleichung (7.11)³⁶ führt auf eine maximale Impulsleistungsleistung von

$$P_{\text{out,IG}} \leq 4 \cdot \left(\frac{V_{IG}}{\text{m}^3} \right)^{0,878} \cdot 10^{0,75} \text{ GW} = 4 \cdot \left(\frac{13,67}{10^3} \right)^{0,878} \cdot 10^{0,75} \text{ GW} = 519 \text{ MW} \quad (8.9)$$

- Abschätzung Arbeitsfrequenz:** Umstellen der in Tabelle 7.29³⁷ angegebenen Schätzformel für das Bauvolumen eines RF-Modulators vom Typ MB-b-2 nach der Wellenlänge und einsetzen des abgeschätzten Bauvolumens führt auf:

³³ Seite 93

³⁴ Seite 95

³⁵ Seite 103

³⁶ Seite 102

³⁷ Seite 124

Tabelle 8.9 Charakteristische Daten der Baugruppen der in einen Transportkoffer integrierte Störquelle vom Typ M4-2:MB-b-2

Trägerplattform		
Typ	M4-2	Universal Transportkoffer
Abmaße	$L = 500 \text{ mm}, B = 410 \text{ mm}, H = 200 \text{ mm}$	Abbildung 8.6
Nutzvolumen	$V_{TP} = 41 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,TP} = 1$	
Verfügbarkeit	$AV_{S,TP} = 1$	marktüblich
Kosten	$C_{exp,TP} = 1$	ca. 300 €
Mobilität	$M_{TP} = 4$	sehr mobil
Primärenergie & HV		
Abmaße		Abbildung 8.6
Volumen	$V_{HV} = 13,67 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	$V_{HV} = 1/3V_{TP}$; Strategie B
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,HV} = 2$	
Verfügbarkeit	$AV_{S,HV} = 3$	
Kosten	$C_{exp,HV} = 2$	
Impulsquelle		
Abmaße		Abbildung 8.6
Volumen	$V_{IG} = 13,67 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	$V_{IG} = 1/3V_{TP}$; Strategie B
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,IG} = 3$	Tabelle 7.18 , Seite 103
Verfügbarkeit	$AV_{C,IG} = 3$	
Kosten	$C_{exp,IG} = 2$	
Impulsleistung	$P_{out,IG} \leq 519 \text{ MW}$	Gleichung 7.11, Seite 102
RF-Modulator		
Typ	MB-b-2 (z.B. SWO)	Tabelle 7.29, Seite 124
Abmaße		Abbildung 8.6
Volumen	$V_{RF} = 6,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	$V_{RF} = 1/6V_{TP}$; Strategie B
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,RF} = 2 - 3$	Tabelle 7.29 , Seite 124
Verfügbarkeit	$AV_{C,RF} = 2$	
Kosten	$C_{exp,RF} = 2$	Tabelle 7.24 , Seite 117
Arbeitsfrequenz	$f \geq 340 \text{ MHz}$	Tabelle 7.29, Seite 124
Effizienz	$\eta \leq 60 \%$	
Impulsleistung	$P_{out,RF} = 311 \text{ MW}$	
Antenne		
Typ	$\lambda/4$ -Konusantenne	
Abmaße	$r_{Konus} = 80 \text{ mm}, H_{Konus} = 205 \text{ mm}$	Abbildung 8.6
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,Ant} = 2$	Tabelle 7.31 , Seite 128
Verfügbarkeit	$AV_{C,Ant} = 2$	
Kosten	$C_{exp,Ant} = 1$	
Richtfaktor	$D_0 = 1,643$	Tabelle 7.32, Seite 129
Impulsleistung	$P_{rad} = 311 \text{ MW}$	
	$S_{max} \cdot r^2 = 41 \text{ MW}$	
	$E_{max} \cdot r = 124 \text{ kV}$	
	$E_{max}^{Ref} \cdot r = 227 \text{ kV}$	mit einem 5,3 dB Reflektor

$$\lambda \leq \sqrt[3]{V_{RF} \cdot 10^2} = \sqrt[3]{0,683 \text{ m}^3} = 0,881 \text{ m} \quad (8.10)$$

Die zugehörige Arbeitsfrequenz des RF-Modulators berechnet sich zu:

$$f \geq \frac{c}{\sqrt[3]{V_{RF} \cdot 10^2}} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\sqrt[3]{0,683 \text{ m}^3}} = 340 \text{ MHz} \quad (8.11)$$

7. **Parametrisierung Antenne:** Die Antenne wird als $\lambda/4$ -Konusantenne angenommen. Für die tiefste Arbeitsfrequenz von 340 MHz wäre diese mit einer Länge von 220 mm zwar länger als der

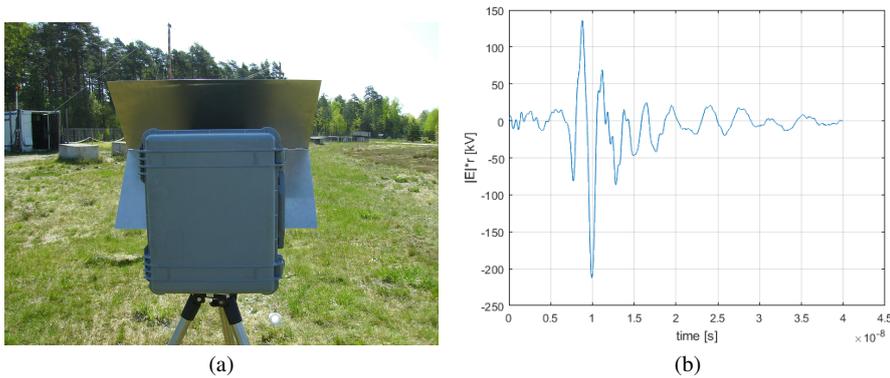


Abb. 8.7 Diehl Defence HPMcase™ Standard F als Beispiel einer Störquelle vom Typ M4-2:MB-b-2 (a - HPMcase™ Standard F mit Reflektor, b - gemessene normierte elektrische Feldstärke in Hauptstrahlrichtung).

in Abbildung 8.6 ausgewiesene Raum. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass (1) die Kapazität des RF-Modulators die wirksame Antennenlänge verlängert und somit die geometrische Länge der Antenne geringfügig kürzer als ein Viertel der Wellenlänge auszulegen ist und (2) die tatsächliche räumliche Anordnung der Baugruppen gegenüber der Prinzipdarstellung in Abb. 8.6 abweichen kann. Der Wert für das Fachwissen kann aus Tabelle 7.31³⁸ und der Richtfaktor ($D_0 = 1,643$) aus Tabelle 7.32³⁹ entnommen werden. Die zum Bau benötigten Materialien und Komponenten sind im Fachhandel ($AV_{C,Ant} = 2$) für geringe Kosten erhältlich ($C_{exp,Ant} = 1$).

8. **Abschätzung Impulssendeleistung:** Einsetzen der Werte für die Effizienz des RF-Modulators und der maximalen Impulsausgangsleistung der Impulsquelle in Gleichung (8.1) führt auf eine Impulssendeleistung von:

$$P_{rad} = P_{out} \cdot \eta \leq 519 \text{ MW} \cdot 0,6 = 311 \text{ MW} \quad (8.12)$$

9. **Abschätzung normierte abgestrahlte elektrische Feldstärke:** Einsetzen der Impulssendeleistung und des Richtfaktors der Antenne in Gleichung (8.2) ergibt eine (in Hauptstrahlrichtung) abgestrahlte normierte Leistungsflussdichte von:

$$S_{max} \cdot r^2 = \frac{P_{rad} \cdot D_0}{4 \cdot \pi} = \frac{311 \text{ MW} \cdot 1,643}{4 \cdot \pi} = 41 \text{ MW} \quad (8.13)$$

Diese entspricht im Fernfeld der Antenne einer normierten elektrischen Feldstärke von:

$$E_{max} \cdot r = \sqrt{S_{max} \cdot r^2 \cdot Z_0} = \sqrt{41 \text{ MW} \cdot 377 \Omega} = 124 \text{ kV} \quad (8.14)$$

Ein Beispiel einer EMI-Störquelle vom Typ M4-2:MB-b-2 ist der in Abbildung 8.7.a abgebildete HPMcase™ Standard F der Firma Diehl Defence [143]. Die Abmaße der in diesem Beispiel betrachteten Trägerplattform wurden bewusst so gewählt, dass diese mit denen des HPMcase™ Standard F übereinstimmen. In Abbildung 8.7.b ist das in Hauptstrahlrichtung des Systems abgestrahlte Signal der normierten elektrischen Feldstärke abgebildet. Das dargestellte Signal wurde im Freifeld des Wehrwissenschaftlichen Instituts für Schutztechnologien - ABC-Schutz in Munster auf der Höhe der EMI-Störquelle in einer Entfernung von $r = 20 \text{ m}$ (Fernfeld) gemessen.

Die in Abbildung 8.7.b ablesbare maximale Amplitude liegt mit $|E_{mess}| \cdot r \approx 210 \text{ kV}$ deutlich über der abgeschätzten normierten elektrischen Feldstärke von $E_{max} \cdot r = 124 \text{ kV}$. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass der HPMcase™ Standard F bei der Messung mit einem Reflektor versehen war.

³⁸ Seite 128

³⁹ Seite 129

Tabelle 8.10 Auftretswahrscheinlichkeiten der Baugruppen und Gesamtsystems er in einen Transportkoffer integrierte Störquelle vom Typ M4-2:MB-b-2

Index der Wahrscheinlichkeit, mit der der generische Angreifer ...	Parameter	Wert
Trägerplattform		
... über das benötigte Fachwissen zur Integration der Störquelle in die Trägerplattform verfügt.	$P_{K,TP}(K_{D,TP})$	9
... Zugang zu der Trägerplattform hat.	$P_{A,TP}(AV_{S,TP})$	8
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen zum Kauf der Trägerplattform verfügt.	$P_{C,TP}(C_{exp,TP})$	9
... über die Trägerplattform verfügt.	P_{TP}	8
Primärenergie & HV		
...über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,HV}(K_{D,HV})$	7
...Zugang zu den benötigten Komponenten hat	$P_{A,HV}(AV_{C,HV})$	5
...über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,HV}(C_{exp,HV})$	6
...über eine Primärenergie- und Hochspannungsquelle verfügt.	P_{HV}	5
Impulsquelle		
...über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,IG}(K_{D,IG})$	6
... Zugang zu den benötigten Komponenten hat.	$P_{A,IG}(AV_{C,IG})$	5
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,IG}(C_{exp,IG})$	6
... über die Impulsquelle verfügt.	P_{IG}	5
RF-Modulator		
... über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,RF}(K_{D,RF})$	6
... Zugang zu den benötigten Komponenten hat.	$P_{A,RF}(AV_{C,RF})$	6
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,RF}(C_{exp,RF})$	6
... über den RF-Modulator verfügt.	P_{RF}	6
Antenne		
... über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,Ant}(K_{D,Ant})$	7
... Zugang zu den benötigten Komponenten hat.	$P_{A,Ant}(AV_{C,Ant})$	8
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,Ant}(C_{exp,Ant})$	9
... über eine geeignete Antenne verfügt.	P_{Ant}	7
Gesamtsystem		
... über die Störquelle verfügt.	P_{CU}	5

Durch die Berücksichtigung des Richtfaktors des Reflektors von $D_0^{Reff} = 3,37$ (5,3 dB) in der Modellierung der generischen Störquelle vom Typ M4-2:MB-b-2, erhöht die abgeschätzte normierte Feldstärke auf $E_{max}^{Reff} \cdot r = 227$ kV (Tabelle 8.9). Die im Datenblatt genannte Betriebsfrequenz von 350 MHz liegt im Bereich des abgeschätzten Wertes von 340 MHz.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die charakteristische Daten der generischen EMI Störquelle nur anhand der Information über die Baugröße abgeschätzt wurden, ist die hierbei erzielte Übereinstimmung als gut und für die Risikobewertung ausreichend zu bewerten.

Die Modellierungsschritte 10 - 14 zur Bewertung des Fachwissens, der Kosten und der Verfügbarkeit sowie die Abschätzung der Auftretswahrscheinlichkeit der Baugruppen und des Gesamtsystems wurden anhand des in Tabelle 8.5⁴⁰ dargestellten Schemas durchgeführt und die Ergebnisse in Tabelle 8.10 aufgelistet. Die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Teilaspekte wurden über die Gleichungen (8.7) zu einer Wahrscheinlichkeit für die jeweilige Baugruppe und diese mit Hilfe von Gleichung (8.8) zu einer Gesamtwahrscheinlichkeit zusammengefasst.

In der Systemsicht zeigt sich, dass der angenommene generische Angreifer mit einer mittleren Wahrscheinlichkeit Zugang zu einer Störquelle des Typs M4-2:MB-b-2 haben wird. Dies bedeutet, dass in etwas weniger als einem Viertel der Angriffe von einer Störquelle dieses Typs ausgegangen

⁴⁰ Seite 141

werden kann⁴¹. Als größtes Hindernis stellt sich hierbei der Zugang zu den benötigten Baugruppen für die Impulsquelle (traditionelle Technologie hoher Leistung) heraus.

Beispiel 8.2: EMI-Störquelle vom Typ M4-1:HO-k-1

Im zweiten Beispiel wird eine Störquelle bewertet, bei der ein handelsüblicher schmalbandiger RF-Modulator vom Typ HO-k-1 (z.B. Magnetron) in einen Aktenkoffer bzw. Pilotenkoffer integriert wurde (Abb. 8.8). Die Besonderheit dieses Beispiels liegt in der Verwendung des handelsüblichen RF-Resonators. Hierdurch entfällt die Notwendigkeit den RF-Modulator zu entwerfen und aufzubauen. Der Erwerb und Einbau erfordert nur Kenntnisse auf dem Niveau eines versierten Hobbyelektrikers ($K_{D,RF} = 2$). Darüber hinaus zeichnen sich die handelsüblichen RF-Resonatoren durch eine sehr hohe Effizienz von bis zu 80 % ($\eta \leq 80\%$) aus. Diese Vorteile werden jedoch durch eine geringe maximale Ausgangsleistung von $P_{out,RF} \leq 10$ MW erkaufte.

Die Vorgehensweise bei der Modellierung und Bewertung gleicht dem des vorherigen Beispiels. Bei der Betrachtung dieses Beispiels werden daher nur die abweichenden Schritte dargestellt und diskutiert. Die Resultate sind in den Tabellen 8.11 und 8.12 aufgetragen.

Als Folge der geringen Ausgangsleistung fällt die Baugröße der Primärenergie- und Hochspannungsquelle als auch der Impulsquelle so gering aus, dass der RF-Modulator mit maximaler Leistung angesteuert werden kann. Als unmittelbare Folge ist im Modellierungsschritt **3. Untergliederung Nutzvolumen** die Strategie D anzuwenden. Die Volumina für die Primärenergie- und Hochspannungsquelle als auch der Impulsquelle werden mit den in Tabelle 8.2 für einen RF-Modulator vom Typ HO-k-1 aufgeführten Wert von

$$V_{HV} = V_{IG} = 0,95 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (8.15)$$

angenommen. Das verbleibende Nutzvolumen wird zu gleichen Teilen auf den RF-Modulator und die Antenne aufgeteilt (Abb. 8.8):

$$V_{RF} = V_{Ant} = 15,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (8.16)$$

Basierend auf der Annahme, dass die betrachtete Störquelle durch einen versierten Hobbyelektroniker aufgebaut werden kann, werden im Arbeitsschritt **5. Parametrisierung Impulsgenerator** die Werte für traditionelle Technologie (Durchschnitt) übernommen. Aus der Größe des RF-Modulators folgt im Modellierungsschritt **6. Abschätzung Arbeitsfrequenz** eine untere Arbeitsfrequenz von $f_1 = 1,34$ GHz. Im Arbeitsschritt **7. Parametrisierung Antenne** kann die Antenne als Hornantenne angenommen und ihr Richtfaktor zu $D_0 = 11,3$ bestimmt werden. Mit diesen Werten berechnet

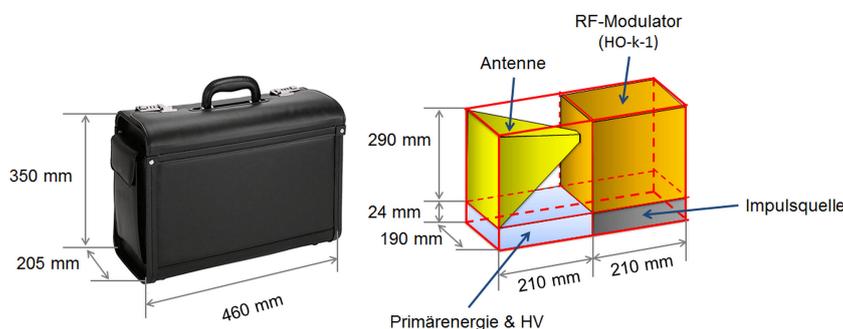


Abb. 8.8 Beispiel einer in einen Pilotenkoffer (Trägerplattform M4-1) integrierte Störquelle vom Typ HO-k-1.

⁴¹ vergleiche Tabelle 2.1 auf Seite 15 oder Anhang D

Tabelle 8.11 Charakteristische Daten der Baugruppen der in einen Pilotenkoffer (Trägerplattform M4-1) integrierte Störquelle vom Typ HO-k-1

Trägerplattform		
Typ	Pilotenkoffer (M4-1)	
Abmaße	$L = 460 \text{ mm}, B = 350 \text{ mm}, H = 205 \text{ mm}$	Abbildung 8.8
Nutzvolumen	$V_{TP} = 33 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,TP} = 1$	
Verfügbarkeit	$AV_{S,TP} = 1$	marktüblich
Kosten	$C_{exp,TP} = 1$	50 - 300 €
Mobilität	$M_{TP} = 4$	sehr mobil
Primärenergie & HV		
Abmaße		Abbildung 8.8
Volumen	$V_{HV} = 0,95 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	Strategie D; Tabelle 8.2
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,HV} = 2$	
Verfügbarkeit	$AV_{S,HV} = 2$	
Kosten	$C_{exp,HV} = 2$	
Impulsquelle		
Abmaße		Abbildung 8.8
Volumen	$V_{IG} = 0,95 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	Strategie D; Tabelle 8.2
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,IG} = 2$	Tabelle 7.12 , Seite 96
Verfügbarkeit	$AV_{C,IG} = 2$	
Kosten	$C_{exp,IG} = 2$	
Impulsleistung	$P_{out,t} \leq 12,5 \text{ MW}$	Gleichung 7.9, Seite 101
RF-Modulator		
Typ	HO-k-1 (z.B. Magnetron)	Tabelle 7.27, Seite 122
Abmaße		Abbildung 8.8
Volumen	$V_{RF} = 15,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	Strategie D
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,RF} = 2$	Tabelle 7.27 , Seite 122
Verfügbarkeit	$AV_{C,RF} = 2$	
Kosten	$C_{exp,RF} = 2$	
Arbeitsfrequenz	$f \geq 1,34 \text{ GHz}$	Tabelle 7.27, Seite 122
Effizienz	$\eta \leq 80 \%$	
Impulsleistung	$P_{out,RF} = 10 \text{ MW}$	maximale Impulsleistung
Antenne		
Typ	Hornantenne (Rechteck)	
Abmaße	$a_{Ap} = 290 \text{ mm}, b_{Ap} = 190 \text{ mm}$	Abbildung 8.8
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,Ant} = 2$	Tabelle 7.31 , Seite 128
Verfügbarkeit	$AV_{C,Ant} = 1$	
Kosten	$C_{exp,Ant} = 1$	
Richtfaktor	$D_0 = 11,3$	Tabelle 7.32, Seite 129
Impulssendeleistung	$P_{rad} = 10 \text{ MW}$	
	$S_{max} \cdot r^2 = 9 \text{ MW}$	
	$E_{max} \cdot r = 58 \text{ kV}$	

sich im Arbeitsschritt **9. Abschätzung normierte abgestrahlte elektrische Feldstärke** die abgestrahlte Feldstärke zu $E_{max} \cdot r = 58 \text{ kV}$. Die Bewertung der Störquelle vom Typ M4-1:HO-k-1 in Hinblick auf die Auftrittswahrscheinlichkeit führt auf die Wahrscheinlichkeitskategorie **6 -mittel** (s. Tabelle 8.12).

Im Vergleich der Störquellen Typ M4-2:MB-b-2 (Beispiel 8.1) und Typ M4-1:HO-k-1 (Beispiel 8.2) zeigt sich, dass durch die Verwendung eines handelsüblichen RF-Resonators die Störquelle M4-1:HO-k-1 gegenüber der vom Typ M4-2:MB-b-2 eine um den Faktor 31 geringere Ausgangsleistung hat. Durch das erheblich geringere Bauvolumen der hierfür benötigten Energieversorgung (Primärenergie- und Hochspannungsquelle, Impulsgenerator) als auch die um den Faktor vier höhere Arbeitsfrequenz kann die Störquelle mit einer stärker richtenden Antenne verschaltet werden. Im Endergebnis ist die von einer Störquelle Typ M4-1:HO-k-1 in etwa halb so stark wie die des Typ

Tabelle 8.12 Auftrittswahrscheinlichkeiten der Baugruppen und Gesamtsystems der in einen Pilotenkoffer integrierte Störquelle vom Typ HO-k-1

Index der Wahrscheinlichkeit, mit der der generische Angreifer ...	Parameter	Wert
Trägerplattform		
... über das benötigte Fachwissen zur Integration der Störquelle in die Trägerplattform verfügt.	$P_{K,TP}(K_{D,TP})$	9
... Zugang zu der Trägerplattform hat.	$P_{A,TP}(AV_{S,TP})$	8
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen zum Kauf der Trägerplattform verfügt.	$P_{C,TP}(C_{exp,TP})$	9
... über die Trägerplattform verfügt.	P_{TP}	8
Primärenergie & HV		
...über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,HV}(K_{D,HV})$	7
...Zugang zu den benötigten Komponenten hat	$P_{A,HV}(AV_{C,HV})$	6
...über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,HV}(C_{exp,HV})$	6
...über eine Primärenergie- und Hochspannungsquelle verfügt.	P_{HV}	6
Impulsquelle		
...über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,IG}(K_{D,IG})$	7
... Zugang zu den benötigten Komponenten hat.	$P_{A,IG}(AV_{C,IG})$	6
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,IG}(C_{exp,IG})$	6
... über die Impulsquelle verfügt.	P_{IG}	6
RF-Modulator		
... über das benötigte Fachwissen zur Integration und Betrieb verfügt.	$P_{K,RF}(K_{D,RF})$	7
... Zugang zum RF-Modulator hat.	$P_{A,RF}(AV_{C,RF})$	6
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,RF}(C_{exp,RF})$	6
... über den RF-Modulator verfügt.	P_{RF}	6
Antenne		
... über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,Ant}(K_{D,Ant})$	7
... Zugang zu den benötigten Komponenten hat.	$P_{A,Ant}(AV_{C,Ant})$	6
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,Ant}(C_{exp,Ant})$	9
... über eine geeignete Antenne verfügt.	P_{Ant}	6
Gesamtsystem		
... über die Störquelle verfügt.	P_{CU}	6

M4-2:MB-b-2. Hierbei ist zu beachten, dass die hohe Richtwirkung eine stärkere Konzentration des abgestrahlten elektromagnetischen Feldes auf einen geringeren Raumwinkel bedeutet. Als Folge muss die Störquelle genauer auf das Zielsystem ausgerichtet werden.

8.3.2 Störquellen in hoch mobilen Trägerplattformen

Beispiel 8.3: EMI-Störquelle vom Typ M5-1:MB-b-1

Nachdem in den vorherigen Beispielen die Integration von Störsendern in sehr mobile Trägerplattformen betrachtet wurden, wird in diesem dritten Beispiel die Mobilität der Trägerplattform auf **sehr mobil** ($M = 5$) gesteigert. Zur Unterstützung der sehr hohen Mobilität wurde mit einer Kaffeedose als Trägerplattform ein Gegenstand des täglichen Lebens gewählt. Als Folge ist die Störquelle im normalen Büroalltag unauffällig, so dass sie unbemerkt in der unmittelbaren Umgebung eines potentiellen Zielsystems platziert werden kann.

Da darüber hinaus das erforderliche Fachwissen das Niveau eines versierten Hobbyelektrikers nicht übersteigen ($K \leq 2$) sollte, wurde als RF-Modulator ein Antennenoszillator (Typ MB-b-1) gewählt. Dieser zeichnet sich durch eine kompakte Bauform, eine Ausgangsleistung von bis zu 10 MW und einen Wirkungsgrad von 50 % aus. Unter Berücksichtigung des begrenzten verfügbaren

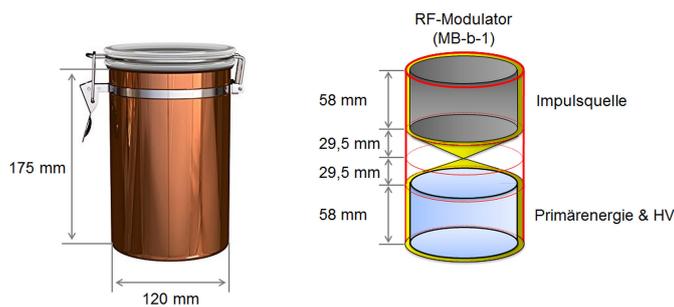


Abb. 8.9 Beispiel einer in eine Kaffeedose integrierte Störquelle vom Typ MB-b-1 (Antennenresonator).

Fachwissens wurde die Technologie des Impulsgenerators als Traditionell (Durchschnitt)⁴² angenommen.

Aus der Wahl des RF-Modulators folgt unmittelbar, dass das Nutzvolumen der Trägerplattform der Strategie C folgend untergliedert wird (s. Abb. 8.9). Für die Primärenergie- und Hochspannungsquelle sowie die Impulsquelle ergibt sich ein Bauvolumen von je $V = 0,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. Mit Hilfe von Gleichung (7.9) kann die maximale Ausgangsleistung der Impulsquelle zu $P_{\text{out,t}} \leq 7 \text{ MW}$ abgeschätzt werden. Bei einer angenommenen Effizienz des RF-Modulators von $\eta \leq 50 \%$ bestimmt sich die Impulsleistung des RF-Modulators zu $P_{\text{out,RF}} = 3,5 \text{ MW}$. Dieser Wert beträgt nur ca. ein Drittel der maximal möglichen Impulsleistung des RF-Modulators vom Typ MB-b-1 und ist dem begrenzten verfügbaren Nutzvolumen der Trägerplattform geschuldet. Die abgeschätzte von der Störquelle abgestrahlte maximale normierte Feldstärke hat einen Wert von $E_{\text{max}} \cdot r = 13 \text{ kV}$.

Sie liegt damit ca. eine Zehnerpotenz unterhalb der im ersten Beispiel betrachteten Störquelle vom Typ M4-2:MB-b-2. Hieraus folgt, dass die Störquelle vom Typ M5-1:MB-b-1 bezogen auf eine gegebenes Zielsystem nur ein Zehntel der Wirkreichweite der Störquelle vom Typ M4-2:MB-b-2 aufweist. Durch ihre höhere Mobilität und der Wahl der Trägerplattform verfügt sie über die Eigenschaft unbemerkt in die unmittelbare Nähe eines Zielsystems zu gelangen.

Eine Besonderheit des RF-Modulators vom Typ MB-b-1 besteht darin, dass die Antennenstruktur initialer Bestandteil des RF-Modulators⁴³ ist. Aus diesem Grunde entfällt bei der Abschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeit die Betrachtung der Antenne (s. Tab. 8.14).

Bei der Bewertung der Auftrittswahrscheinlichkeit zeigt sich, dass ein generischer Angreifer mit einer mittleren Wahrscheinlichkeit über die einzelnen Baugruppen verfügt. Aus dem geringen Nutzvolumen der Trägerplattform resultiert jedoch gegenüber den Beispielen 1 und 2 eine erhöhte Anforderung an das Fachwissen und fachlichen Fertigkeiten bei der Integration der Baugruppen in die Trägerplattform. Dieser Umstand führt dazu, dass ein generischer Angreifer nur mit mittlerer Wahrscheinlichkeit ($P_{\text{CU}} = 4$) über diese sehr mobile Störquelle verfügt.

⁴² Tabelle 7.18, Seite 103

⁴³ Die generische Klasse MB-b-1 umfasst Antennenoszillatoren.

Tabelle 8.13 Charakteristische Daten der Baugruppen der in eine Kaffeedose (Trägerplattform M5-1) integrierten Antennenresonator (Störquelle Typ MB-b-1)

Trägerplattform		
Typ	Kaffeedose (M5-1)	
Abmaße	$r = 60 \text{ mm}, h = 175 \text{ mm}$	Abbildung 8.9
Nutzvolumen	$V_{TP} = 1,98 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,TP} = 2$	Die Integration des EMI-Störer erfordert Wissen und Fertigkeiten auf dem Niveau eines Hobbyelektronikers .
Verfügbarkeit	$AV_{S,TP} = 1$	marktüblich
Kosten	$C_{exp,TP} = 1$	$\leq 50 \text{ €}$
Mobilität	$M_{TP} = 5$	hoch mobil
Primärenergie & HV		
Abmaße		Abbildung 8.9
Volumen	$V_{HV} = 0,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	$V_{HV} = 1/4V_{TP}$; Strategie C
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,HV} = 2$	
Verfügbarkeit	$AV_{S,HV} = 2$	
Kosten	$C_{exp,HV} = 2$	
Impulsquelle		
Abmaße		Abbildung 8.9
Volumen	$V_{IG} = 0,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	$V_{IG} = 1/4V_{TP}$; Strategie C
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,IG} = 2$	Tabelle 7.12, Seite 96
Verfügbarkeit	$AV_{C,IG} = 3$	
Kosten	$C_{exp,IG} = 2$	
Impulsleistung	$P_{out,t} \leq 7 \text{ MW}$	Gleichung 7.9, Seite 101
RF-Modulator		
Typ	MB-b-1 (AntO)	Tabelle 7.29, Seite 124
Abmaße		Abbildung 8.9
Volumen	$V_{RF} = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	$V_{RF} = 7/12V_{TP}$; Strategie C
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,RF} = 2$	Tabelle 7.29, Seite 124
Verfügbarkeit	$AV_{C,RF} = 2$	
Kosten	$C_{exp,RF} = 2$	Tabelle 7.20, Seite 107
Arbeitsfrequenz	$f \geq 0,857 \text{ GHz}$	Tabelle 7.27, Seite 122
Effizienz	$\eta \leq 50 \%$	Tabelle 7.27, Seite 122
Impulsleistung	$P_{out,RF} = 3,5 \text{ MW}$	
Antenne		
Typ	Konusantenne	
Abmaße	$r_{Ap} = 60 \text{ mm}, H_{Ap} = 175 \text{ mm}$	Abbildung 8.9
Benötigtes Fachwissen	$K_{D,Ant}$	Nicht anwendbar, da die
Verfügbarkeit	$AV_{C,Ant}$	Antenne Bestandteil des
Kosten	$C_{exp,Ant}$	RF-Modulators ist.
Richtfaktor	$D_0 = 1,64$	Tabelle 7.32, Seite 129
Impulssendeleistung	$P_{rad} = 3,5 \text{ MW}$	
	$S_{max} \cdot r^2 = 0,46 \text{ MW}$	
	$E_{max} \cdot r = 13 \text{ kV}$	

Tabelle 8.14 Auftrittswahrscheinlichkeiten der Baugruppen und Gesamtsystems des in eine Kaffeedose (Trägerplattform M5-1) integrierten Antennenresonators (Störquelle Typ MB-b-1)

Index der Wahrscheinlichkeit, mit der der generische Angreifer ...	Parameter	Wert
Trägerplattform		
... über das benötigte Fachwissen zur Integration der Störquelle in die Trägerplattform verfügt.	$P_{K,TP}(K_{D,TP})$	7
... Zugang zu der Trägerplattform hat.	$P_{A,TP}(A_{V_S,TP})$	8
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen zum Kauf der Trägerplattform verfügt.	$P_{C,TP}(C_{exp,TP})$	9
... über die Trägerplattform verfügt.	P_{TP}	7
Primärenergie & HV		
...über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,HV}(K_{D,HV})$	7
...Zugang zu den benötigten Komponenten hat	$P_{A,HV}(A_{V_C,HV})$	6
...über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,HV}(C_{exp,HV})$	6
...über eine Primärenergie- und Hochspannungsquelle verfügt.	P_{HV}	6
Impulsquelle		
...über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,IG}(K_{D,IG})$	7
... Zugang zu den benötigten Komponenten hat.	$P_{A,IG}(A_{V_C,IG})$	4
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,IG}(C_{exp,IG})$	5
... über die Impulsquelle verfügt.	P_{IG}	4
RF-Modulator		
... über das benötigte Fachwissen zur Integration und Betrieb verfügt.	$P_{K,RF}(K_{D,RF})$	7
... Zugang zum RF-Modulator hat.	$P_{A,RF}(A_{V_C,RF})$	6
...über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,RF}(C_{exp,RF})$	6
... über den RF-Modulator verfügt.	P_{RF}	6
Antenne		
... über das benötigte Fachwissen zum Aufbau und Betrieb verfügt.	$P_{K,Ant}(K_{D,Ant})$	
... Zugang zu den benötigten Komponenten hat.	$P_{A,Ant}(A_{V_C,Ant})$	
... über die notwendigen finanziellen Ressourcen verfügt.	$P_{C,Ant}(C_{exp,Ant})$	
... über eine geeignete Antenne verfügt.	P_{Ant}	
Gesamtsystem		
... über die Störquelle verfügt.	P_{CU}	4

Kapitel 9

Umgebung der Zielsysteme

Zusammenfassung Dieses Kapitel schließt die Modellierung der IEMI-Szenarien ab. Hierzu wird zunächst die Umgebung des Zielsystems hinsichtlich der Zugänglichkeit und der notwendigen Mobilität von Systemen bewertet. Anhand des Vergleiches mit der Mobilität betrachteter IEMI-Quellenklassen wird dann die Wahrscheinlichkeit, mit der diese an einem Ort in der Umgebung des Zielsystems auftreten kann, abgeschätzt. Basierend hierauf wird in einem finalen Modellierungsschritt unter Berücksichtigung der Ressourcen eines möglichen Angreifers und der Wahrscheinlichkeit mit der dieser Zugang zu der betrachteten IEMI-Störquelle hat die Auftrittswahrscheinlichkeit des IEMI-Szenarios abgeschätzt. Die praktische Anwendung der theoretischen Betrachtungen wird am Beispiel einer fiktiven Infrastruktur aufgezeigt.

Die Stärke des Störfeldes am Ort des Zielsystems wird neben der Impulssendeleistung mit der die Störquelle strahlt entscheidend durch den Abstand und dämpfende Elemente (z.B. Mauern, Störkörper) zwischen dem Zielsystem und dem Ort der Störquelle beeinflusst. Die charakteristischen Eigenschaften, einschließlich der abgestrahlten Impulsleistung, potentieller Störquellen lassen sich mit Hilfe der im vorstehenden Kapitel beschriebenen Modellierung generischer Störquellenklassen gut beschreiben. Für eine vollständige Beschreibung eines IEMI-Szenarios¹ sind somit nur noch die Aspekte

- Identifizierung möglicher Betriebsorte der Störquelle (im Umfeld des Zielsystems) und
- Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, mit der die Störquelle von einem Angreifer an diesem Ort eingesetzt wird (Wahrscheinlichkeit des IEMI-Szenarios)

zu betrachten.

9.1 Identifizierung möglicher Orte von IEMI-Störquellen

Im Abschnitt 6.1.3² wurde bei der Zusammenstellung des Datenblocks *Umgebung Zielsystem* die Umgebung des Zielsystems hinsichtlich ihrer Zugänglichkeit bewertet. In diesem Zusammenhang wurden bereits der von Mansson [80] vorgeschlagene und von Genender [44] weiterentwickelte

¹ siehe Abschnitt 6.1, Tabelle 6.4 auf Seite 75

² Seite 73

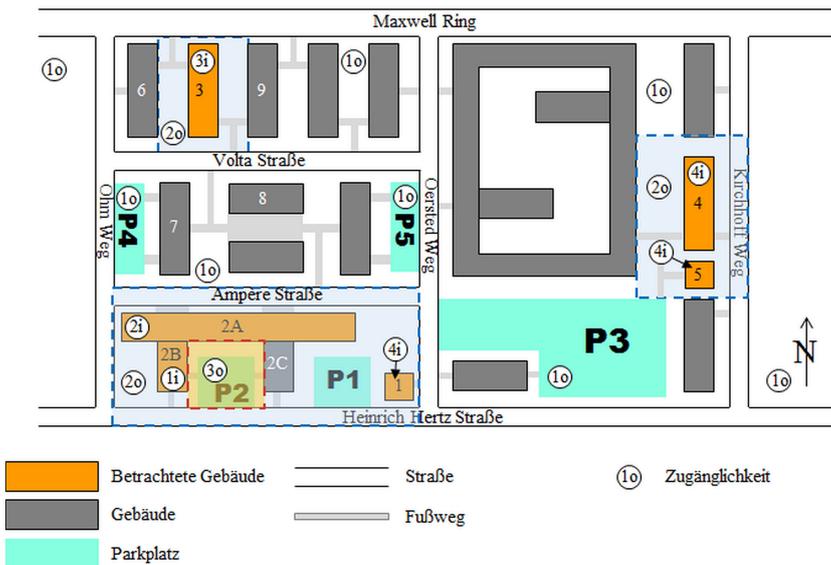


Abb. 9.1 Beispiel: Lage der Zugänglichkeitszonen einer fiktiven Infrastruktur

Ansatz, Orte gleicher Zugänglichkeit zu Zonen zusammenzufassen, diskutiert. So schlägt Genender vor, für jede Zugänglichkeitszone und jede Mobilität eine Zugangswahrscheinlichkeit bzw. eine Wahrscheinlichkeitskategorie zuzuweisen. Hierbei besteht die generelle Annahme, dass nur Quellen mit einer Mobilitätsklasse die höher als die Zugänglichkeit ist, in die Zugänglichkeitszone gelangen können. Darüber hinaus steigt die Zugangswahrscheinlichkeit mit einer höheren Differenz zwischen der Mobilitätsklasse und der Zugänglichkeitsklasse an.

In [29] teilen Oaks et al. die Umgebung des Zielsystems anhand von Barrieren (z.B. Wände, Zäune) in Zonen ein. Den Barrieren ordnen sie hierbei Ressourcen (z.B. Mobilität) zu, die benötigt werden um diese zu überwinden und in die von ihnen abgegrenzten Zonen zu gelangen. Die Identifikation ob eine Störquelle innerhalb einer Zone auftreten und betrieben werden kann erfolgt durch Vergleich der für die Überwindung der Barriere benötigten Ressourcen mit den vorhandenen Ressourcen der Störquelle bzw. des Angreifers. Verfügt die Störquelle bzw. der Angreifer über die erforderlichen Ressourcen, so kann die Störquelle in der Zone auftreten, andernfalls wird sie sicher von der Barriere abgehalten.

Das von Genender vorgeschlagene Bewertungsschema für die Zugänglichkeit der Umgebung des Zielsystems wurde im Abschnitt 6.1.3 bereits dahingehend erweitert, dass die Zugänglichkeitskategorien³ bezüglich ihrer Lage im Freien bzw. in einem Gebäude unterteilt wurden. Die sich durch die Anwendung dieser erweiterten Skala ergebenden Zugänglichkeitszonen sind in Abbildung 9.1 am Beispiel einer fiktiven Infrastruktur beispielhaft dargestellt.

In diesem Anwendungsbeispiel wurde die Zugänglichkeit (A_z) der jeweiligen Gebäude und ihrer Umgebung anhand vorhandener Unterlagen (s. Tab. 6.2, Seite 73) sowie einer Ortsbegehung bewertet. Um jedes Gebäude mit einer Zugänglichkeit von 2i (überwacht) und höher ergibt sich ein Bereich der allgemeinen Öffentlichkeit in dem die Möglichkeit der Überwachung (Monitoring) besteht. Durch die Beobachtung dieser in Abbildung 9.1 durch eine hellblaue Schattierung gekennzeichneten Zonen besteht die Möglichkeit einer rechtzeitigen Erkennung großer oder für die Umgebung untypischer Störssysteme bzw. Trägerplattformen.

In der fiktiven Infrastruktur kann der Zugang zum Parkplatz P2 nur nach Identifikation des Fahrers bzw. mit Hilfe einer Zugangskarte erfolgen (kontrollierter Bereich). Hierbei erfolgt jedoch keine

³ 1 - allgemeine Öffentlichkeit, 2 - überwacht, 3 - kontrolliert und 4 - beschränkt, siehe Tabelle 6.3 auf Seite 74 oder Tabelle 9.1

Tabelle 9.1 Kategorisierung der Zugänglichkeit (A_z)

A_z	Zugänglichkeit	im Freien	im Gebäude	Definition
1o	frei	x		Bereich der allgemeinen Öffentlichkeit (im Freien) der jeder Person ohne besonderen Aufwand oder Überwachung zugänglich ist.
1i	frei		x	Bereich in einem Gebäude der jeder Person ohne besonderen Aufwand oder Überwachung zugänglich ist.
2o	überwacht	x		Bereich der allgemeinen Öffentlichkeit, dessen Zugang jedoch überwacht (beobachtet) wird oder werden kann.
2i	überwacht		x	Bereich in einem Gebäude, dessen Zugang jedoch überwacht (beobachtet) wird oder werden kann.
3o	kontrolliert	x		Bereich im Freien, der nur nach einer Identitätskontrolle betreten werden kann
3i	kontrolliert		x	Bereich in einem Gebäude, der nur nach einer Identitätskontrolle betreten werden kann
4o	beschränkt	x		Kontrollbereich im Freien, der nur von autorisierten Personen oder nach einer Taschenkontrolle betreten werden kann.
4i	beschränkt		x	Kontrollbereich in einem Gebäude, der nur von autorisierten Personen oder nach einer Taschenkontrolle betreten werden kann.

Identitätskontrolle aller Insassen eines Fahrzeuges. In diesem Beispiel ist das nördlich der Ampère Straße zwischen dem Ohm Weg und dem Oerstedt Weg liegende Gelände aufgrund von Hecken und Sträuchern aus den Gebäuden 2A und 3 nur sehr eingeschränkt oder nicht einsehbar. Die auf diesem Gelände befindlichen Parkplätze P4 und P5 sind der allgemeinen Öffentlichkeit zugeordnet, die jeder Person zugänglich ist. Aufgrund ihrer Bauform können sie jedoch nur von Fahrzeugen bis zu der Größe eines Kleintransporters befahren werden. Demgegenüber wird der Parkplatz P3 regelmäßig auch von LKW genutzt.

Diese Beschreibung verdeutlicht, dass die Zugänglichkeit (A_z) alleine nicht ausreicht um potentielle Störquellen genau genug zu charakterisieren. Bei der im Kapitel 8 vorgestellte Modellierung wurde die Mobilität (M_{TP}) der Störquellen als wesentlicher Parameter genutzt. Es bietet sich an, die Umgebung des Zielsystems auch hinsichtlich dieses Parameters zu bewerten. Die sich für Verkehrsflächen und -wege in der Umgebung der fiktiven Infrastruktur ergebene Bewertung ist in Abbildung 9.2 abgebildet. In dieser Darstellung ist in den grauen Kästen die minimale erforderliche Mobilität (M_e) angegeben. Mobile Systeme mit einer geringeren Mobilität ($M_{TP} < M_e$) können aufgrund von baulichen Eigenheiten (z.B. Barrieren, Breite des Weges) oder Kontrollen nicht als Gesamtsystem in die zugehörigen Verkehrsflächen und -wege eingebracht werden. Weicht die Mobilität (M_t) der für die Verkehrsflächen und -wege typischen Systeme von der minimal erforderlichen Mobilität (M_e) ab, ist diese in den blauen Kästen vermerkt. Zum Beispiel wird der Kirchhoff Weg üblicher Weise nur von Systemen mit einer Mobilität $M \geq 3$ (PKW, Van, Kleinlastler) befahren. Aufgrund ihrer Bauform könnte diese Straße jedoch auch von einem LKW oder Sattelaufzieger genutzt werden. Die Mobilität typischer Systeme ist insbesondere in überwachten Bereichen bedeutsam, da in diesem Bereichen nur für die Umgebung untypische Störssysteme bzw. Trägerplattformen erkannt werden können. Ihr Auftreten kann durch die Überwachung jedoch nicht verhindert werden.

Eine ähnliche Einschränkung muss bei der Bewertung bezüglich der Lage im Freien bzw. im Gebäude (Tabelle 9.1) beachtet werden. Diese Unterteilung basiert auf der Annahme, dass mobile Systeme mit einer Mobilität von 3 (mobil) oder weniger nur mit großen Einschränkungen als System in ein Gebäude gelangen können. Bei einer umfassenden Bewertung ist jedoch zu bedenken, dass Komponenten und Baugruppen von IEMI-Störquellen in die betrachtete Zone eingebracht und die Gesamtquelle vor Ort zusammengebaut werden könnte. Auf diese Weise besteht allgemein die Möglichkeit, dass sich IEMI-Störquellen geringer Mobilität an nicht permanent überwachten Orten innerhalb einer Zugänglichkeitszone befinden und betrieben werden. Ebenso besteht diese Möglichkeit an Orten in benachbarten Gebäuden und Gebäudeteilen (Räumen) zu denen nicht die

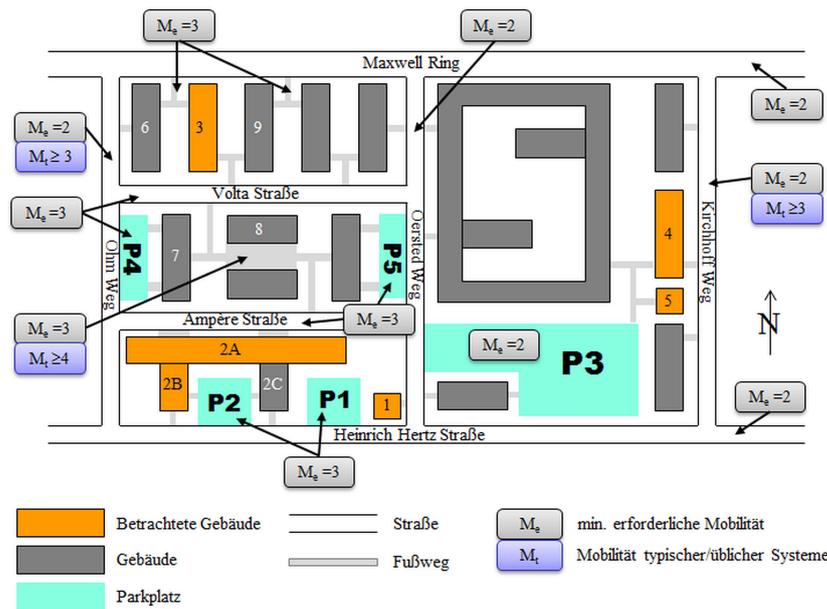


Abb. 9.2 Beispiel: Mobilität der Verkehrsflächen und -wege in der Umgebung einer fiktiven Infrastruktur

Möglichkeit einer regelmäßigen Überwachung besteht⁴. Im Beispiel der fiktiven Infrastruktur sind unter diesem Aspekt das zwischen den Parkplätzen P1 und P2 gelegene Nebengebäude von Gebäude 2A als auch die Nachbargebäude des Gebäudes 3 zu betrachten.

Als Folge der vorstehend diskutierten Aspekte kann die Identifizierung möglicher Betriebsorte einer betrachteten Störquelle nicht, wie in der Literatur [44, 29] vorgeschlagen, anhand einer einfachen Sprungfunktion in Bezug auf die Mobilität der Störquellen bzw. der Zugänglichkeit einer Zone modelliert werden. Vielmehr sind bei der zusammenfassenden Bewertung der Umgebung die verschiedenen Aspekte (Zugänglichkeit, Mobilität, Überwachbarkeit, ...) für die jeweiligen Zonen (Bereiche) und Mobilitätsklassen in Form von Auftretswahrscheinlichkeiten zu bewerten.

Die **Auftretswahrscheinlichkeit** (P_{10}) einer Störquelle vom Typ S_{Ty} am Ort r_{10} bestimmt sich als Funktion der Mobilität der Störquelle $M_{TP}(S_{Ty})$, der Zugänglichkeit $A_z(r_{10})$ des betrachteten Ortes, der erforderlichen Mobilität $M_e(r_{10})$ beziehungsweise der Mobilität ortstypischer Systeme $M_t(r_{10})$ am Ort r_{10} .

$$P_{10}(r_{10}, S_{Ty}) = f(M_{TP}(S_{Ty}), A_z(r_{10}), M_e(r_{10}), M_t(r_{10})) \quad (9.1)$$

In einem speziellen Anwendungsfall ist die Auftretswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung aller lokaler Gegebenheiten und der vorstehend diskutierten Aspekte durch eine Expertengruppe zu bestimmen. Aus der vorstehenden Diskussion lassen sich jedoch allgemeine Grundsätze und Tendenzen ableiten, die als Grundregeln für die Bestimmung der Auftretswahrscheinlichkeit durch eine Expertengruppe dienen können.

Für Orte der **allgemeinen Öffentlichkeit** ($A_z \in \{1o, 1i\}$) kann angenommen werden, dass Systeme:

1. deren Mobilität der erforderliche Mobilität entspricht ($M_{TD} = M_e$) mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von über 75% ($P_{10} = 8$) auftreten können.

⁴ z.B. weil diese zu einem anderen Betrieb gehören

Tabelle 9.2 Auftrittswahrscheinlichkeit (P_{lo}) einer Störquelle der Mobilität M_{TP} an frei zugänglichen Orten ($A_z \in \{1o, 1i\}$) in Abhängigkeit der erforderlichen Mobilität M_e

P_{lo}		$A_z = 1o$					$A_z = 1i$				
		M_{TP}					M_{TP}				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
M_e	2	5	8	9	10	10	6	8	9	10	10
	3	3	5	8	9	10	4	6	8	9	10
	4	1	3	5	8	9	2	4	6	8	10
	5	0	1	3	5	8	1	2	4	6	8

- deren Mobilität höher ist als die erforderliche Mobilität ($M_{TD} > M_e$) leichter an den betrachteten Ort verbracht werden können. Daher kann die Wahrscheinlichkeitsklasse um die Differenz der Mobilitätsklassen ($M_{TD} - M_e$) erhöht werden (s. Tab. 9.2).
- deren Mobilität unterhalb der erforderlichen Mobilität liegen ($M_{TD} < M_e$) nur als Baugruppen oder Komponenten an den betrachteten Ort verbracht werden können und an diesem zum System zusammengesetzt werden müssen. Der erforderliche Aufwand steigt hier mit zunehmender Differenz der Mobilitätsklassen ($M_e - M_{TD}$). Die Auftrittswahrscheinlichkeit ist dem erforderlichen Aufwand entsprechend zu reduzieren. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass im Freien gegenüber Orten in Gebäuden die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung der Störquelle während der Phase des Zusammenbau höher und daher die Auftrittswahrscheinlichkeit geringer anzusetzen ist.

Die sich aus diesen Grundregeln ergebenden Wahrscheinlichkeitsklassen für die Auftrittswahrscheinlichkeit einer Störquelle gegebener Mobilität M_{TP} an frei zugänglichen Orten sind in Tabelle 9.2 aufgelistet.

Für Orte im **überwachten Bereich** ($A_z \in \{2o, 2i\}$) besteht für den Betreiber des Zielsystems⁵ die Möglichkeit den Zugang zu diesem Bereich bzw. Systeme innerhalb des Bereiches zu beobachten (Monitoring). Hierdurch wird er in die Lage versetzt ortsuntypische Systeme zu erkennen, deren Zugang zu dem überwachten Bereich wird er jedoch nicht verhindern können. Die wesentliche Hürde beim Zugang stellt somit weiterhin die minimal erforderliche Mobilität der Systeme dar. Im Sinne einer worst case Abschätzung kann die Festlegung der Auftrittswahrscheinlichkeiten weiterhin anhand der in Tabelle 9.2 aufgetragenen Werte erfolgen.

Da der Angreifer eine möglichst langen Exposition des Zielsystems anstrebt, liegt es in seinem Interesse, dass die Störquelle möglichst unerkannt betrieben werden kann. Als Folge dieser Überlegung kann angenommen werden, dass der Angreifer im überwachten Bereich mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit ortsuntypische Trägersysteme einsetzen wird. Dies setzt jedoch voraus, dass er Kenntnisse über die Lage der überwachten Bereiche und der ortstypischen Mobilität hat. Wenn dieses mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen werden kann, kann an Stelle der minimal erforderliche Mobilität (M_e) die Mobilität ortstypischer Systeme (M_t) herangezogen werden.

Das wesentliche Merkmal der **kontrollierten Bereiche** ($A_z \in \{3o, 3i\}$) besteht darin, dass diese nur nach einer Identitätskontrolle betreten werden können⁶. Hinsichtlich der Mobilität von Systemen innerhalb kontrollierten Bereiche kann angenommen werden, dass Systeme mit einer ortsuntypischen Mobilität ($M_{TP} < M_t$) in Zuge der Identitätskontrolle erkannt und ihnen der Zugang zum kontrollierten Bereich verwehrt wird. Die Festlegung der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Störquellen in kontrollierten Bereichen kann anhand der in Tabelle 9.2 aufgetragenen Werte erfolgen, wenn die Mobilität ortstypischer Systeme (M_t) als Vergleichskriterium⁷ genutzt wird.

Der Zugang zu Kontrollbereichen mit einer **beschränkter Zugänglichkeit** ($A_z \in \{4o, 4i\}$) erfordert das Passieren einer eingehenden Kontrolle aller Personen und Inspektion aller Gegenstände. Abhängig von dem Schutzlevel des Kontrollbereiches kann die Inspektion der Gegenstände in Form

⁵ z.B. einer kritischen Infrastruktur

⁶ siehe Tabelle 9.1

⁷ an Stelle der minimal erforderliche Mobilität (M_e)

Tabelle 9.3 Auftrittswahrscheinlichkeit (P_{io}) einer Störquelle der Mobilität M_{TP} in Bereichen beschränkter Zugänglichkeit ($A_z \in \{4o, 4i\}$) in Abhängigkeit der Mobilität M_t ortsüblicher Systeme

P_{io}		$A_z = 4o$					$A_z = 4i$				
		M_{TP}					M_{TP}				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
M_t	2	3	7	8	9	10	4	7	8	9	10
	3	2	4	7	8	9	3	5	7	8	9
	4	0	2	4	7	8	1	3	5	7	8
	5	0	1	2	4	7	0-1	1	3	5	7

einer einfachen Sichtkontrolle, einer Inhaltskontrolle⁸ bis hin zum Durchleuchten und der Inbetriebnahme erfolgen. Die Inspektion stellt somit nicht nur eine Mobilitätsbarriere dar sondern beinhaltet auch die Möglichkeit einer Entdeckung von IEMI-Störquellen. Als Folge sind die Auftrittswahrscheinlichkeiten auf der Basis der Mobilität ortstypischer Systeme (M_t) neu zu bewerten. Die sich hierbei ergebenden Auftrittswahrscheinlichkeit für Störquellen gegebener Mobilität sind in Tabelle 9.3 aufgetragen.

9.2 Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des IEMI-Szenarios

Der letzte Schritt der Beschreibung eines IEMI-Szenarios besteht in der Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit. In der Literatur sind hierzu verschiedene Ansätze zu finden, die sich zum Einen in der Modellierung des Szenarios und zum Anderen in der Vorgehensweise bei der Ermittlung der Auftrittswahrscheinlichkeit voneinander unterscheiden.

In [29] ordnen Oaks et al. den jeweiligen Störquellen Ressourcen zu, mit deren Hilfe diese die Barrieren der einzelnen Zugänglichkeitszonen überwinden kann. Zur Ermittlung des am wahrscheinlichsten eintretenden Szenarios reihen Oaks et al. die betrachteten Szenarien nach aufsteigendem Aufwand (Ressourcenbedarf). Das Szenario mit dem geringsten Bedarf an Ressourcen betrachten sie am plausibelsten bzw. am wenigsten unwahrscheinlich. Bei dieser Vorgehensweise wird hauptsächlich die Mobilität der Quelle bewertet. Dem Aufwand zum Bau bzw. zur Beschaffung der Störquelle kommt eine vergleichsweise geringe Bedeutung zu. Der Aspekt, ob und mit welcher Wahrscheinlichkeit der Angreifer Zugang zu dem Ort der Störquelle (bzw. der Zugänglichkeitszone) hat wird hierbei gänzlich vernachlässigt.

Genender modelliert das IEMI-Szenario unter Anwendung der im Abschnitt 5.3.5 (s. Seite 56) beschriebenen Event Tree Analysis (ETA) [44]. Ausgehend von der Wahl der IEMI-Quellenklasse (Entscheidungsknoten) durchläuft für jede betrachtete IEMI-Quellenklasse die Zugänglichkeit zu den Zonen in aufsteigender Klassifizierung der Zugänglichkeit. An jedem Entscheidungsknoten bewertet er die Wahrscheinlichkeit mit der die IEMI-Störquelle von einer Zone in die nächst höhere Zone gelangen kann. An dem letzten Entscheidungsknoten wird bewertet, mit welcher Wahrscheinlichkeit die IEMI-Quellenklasse länger als eine vorgegebene Expositionsdauer unerkannt betrieben werden kann. Die aus diesem Verfahren resultierenden Szenarien besteht aus dem Tupel {IEMI-Quellenklasse, Zugänglichkeitszone, Expositionsdauer, Auftrittswahrscheinlichkeit}. Die Auftrittswahrscheinlichkeit berechnet sich aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten entlang des jeweiligen Entscheidungsweges. Analog der Vorgehensweise von Oaks et al. bildet auch bei Genender der Zugang der IEMI-Störquelle zu einem Ort in der Umgebung des Zielsystems den Schwerpunkt der Modellierung. Zusätzlich gewichtet Genender jedoch betrachteten IEMI-Quellenklassen mit der Wahrscheinlichkeit ihrer Existenz sowie der Wahrscheinlichkeit einer Betriebsdauer. Wesentlicher Nachteil der von Genender gewählten Vorgehensweise ist, dass die Anwendung der ETA die Beschreibung der Wahrscheinlichkeit in Form konkreter Zahlenwerte (im Sinne einer Häufigkeit) voraussetzt. Wie

⁸ Taschenkontrolle

bereits dargelegt wurde, sind für den hier betrachteten Anwendungsfall bewusster elektromagnetischer Störungen nicht genügend historische Daten verfügbar um diese mit ausreichender Präzision bestimmen zu können. Ebenso wie Oaks et al. vernachlässigt auch Genender die Eigenschaften des Angreifers.

Peikert greift die in [24] dargelegte Modellierung der IEMI-Störquellen hinsichtlich ihrer Mobilität, der Verfügbarkeit der Baugruppen, des benötigten Wissens und der entstehenden Kosten auf und erweitert das von Genender beschriebene Verfahren durch Integration von Ansätzen der Fuzzylogik [146, 147, 144]. Gegenüber Genender zeichnet sich der Ansatz von Peikert dadurch aus, dass die Wahrscheinlichkeiten nicht als konkreter Zahlenwert sondern in Form von Zugehörigkeitsfunktionen beschrieben werden. Hierdurch können Expertenschätzungen und unscharfe Werte berücksichtigt werden. Darüber ersetzt Peikert die FTA durch eine mehrstufige UND-Verknüpfung der gewichteten Aspekte der Störquelle⁹, des Zielsystems¹⁰ und seiner Umgebung¹¹. Peikert trennt hierbei nicht das (Bedrohungs-)Szenario von dessen Wirkung im Zielsystem, sondern er modelliert die Quelle, deren Kopplung zum Zielsystem und die Wirkung im Zielsystem als Gesamtszenario. Die in dieser Arbeit beabsichtigte getrennte Modellierung potentieller Bedrohungsszenarios ist hierdurch nicht möglich. Wie bei den bisher diskutierten Ansätzen berücksichtigt der Ansatz von Peikert nicht die Fähigkeiten des Angreifers (Vernachlässigung der *menschlichen Dimension*).

Hinsichtlich der Abschätzung der Wahrscheinlichkeit mit der ein IEMI-Szenario auftritt bietet das von Peikert vorgestellte Verfahren Ansätze, die auf die in dieser Arbeit betrachtete Modellierung übertragen werden können. So gruppiert Peikert die betrachteten Aspekte in einer ersten Stufe hinsichtlich:

- Mobilität und Zugänglichkeit,
- Wahrscheinlichkeit der Existenz und Detektierbarkeit und
- Technologische Herausforderung.

Der erste Aspekt dient der Beantwortung der Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit die IEMI-Quelle an dem betrachteten Ort in der Umgebung des Zielsystems auftritt bzw. an diesen gelangen kann. Dieser Aspekt wurde in dem vorstehendem Abschnitt 9.1 eingehend betrachtet. Die letzten beiden Aspekte beschreiben im Wesentlichen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein System der betrachtete IEMI-Quellenklasse existiert. Auch dieser Aspekt wurde in dieser Arbeit bereits modelliert und diskutiert (s. Abschnitt 8). Während Peikert nur die reine Existenz einer IEMI-Quelle betrachtet, wurde im Rahmen dieser Arbeit der Aspekt um die Fragestellung, ob ein generischer Angreifer Zugang zu dieser hat, erweitert. Diese Erweiterung führt auf einen weiteren Gesichtspunkt der menschlichen Dimension des IEMI-Szenarios. In der Literatur wird ausschließlich bewertet, ob die IEMI-Störquelle an den betrachteten Betriebsort verbracht werden kann. Die rein hypothetische Möglichkeit reicht für das Zustandekommen des Szenarios jedoch nicht aus. Vielmehr muss, bis auf wenige Spezialfälle¹², der Angreifer selbst über die Möglichkeit des Zuganges zum Betriebsort verfügen, um die Störquelle an diesen zu verbringen zu können. Wenn zum Beispiel der Angreifer durch eine Identitätskontrolle der Zugang zu einem Gebäude verwehrt ist, so kann er die Störquelle nicht in dieses einbringen.

Basierend auf der in den vorstehenden Kapiteln vorgestellten und diskutierten Modellierung und unter Einbeziehung der aufgezeigten Aspekte der menschlichen Dimension ist das Eintreten eines Szenarios abhängig von den Bedingungen:

1. Die IEMI-Quelle der betrachteten Klasse existiert und der generische Angreifer hat Zugang zu dieser.

⁹ z.B. Mobilität, erforderliches Wissen, Kosten, Verfügbarkeit

¹⁰ z.B. Störemfindlichkeit

¹¹ z.B. Zugänglichkeit, Überwachung

¹² In diesem Zusammenhang stellen Frachtzentren, in denen die Störquelle als Frachtgut getarnt eingebracht werden könnte, Spezialfälle dar, die gesondert zu bewerten sind.

2. Der generische Angreifer hat Zugang zu dem betrachteten Ort in der Umgebung des Zielsystems.
3. Die IEMI-Quelle der betrachteten Klasse kann an diesen Ort verbracht werden.

Die einzelnen Bedingungen beschreiben hierbei je eine Ereignismenge, der im Rahmen der Modellierung des zugehörigen Aspektes des IEMI-Szenarios eine Wahrscheinlichkeitskategorie zugeordnet wurde. So wurde in Kapitel 8¹³ die Wahrscheinlichkeit P_{CU} , mit der der generische Angreifer über IEMI-Störquellen einer gegebenen Klasse verfügt, bestimmt. Die Wahrscheinlichkeit P_A , mit der der generische Angreifer Zugang zu dem betrachteten Ort in der Umgebung hat, ist in Tabelle 6.5¹⁴ in Abhängigkeit vom Typ des Angreifers und der Zugänglichkeit aufgetragen. Im Abschnitt 9.1¹⁵ wurde die Wahrscheinlichkeit P_{I_0} , mit der eine IEMI-Störquelle an einen Ort in der Umgebung des Zielsystems verbracht werden kann, abgeschätzt.

Da alle genannten Bedingungen für das Eintreten des IEMI-Szenarios erfüllt sein müssen, stellt dies die Schnittmenge der durch die Einzelaspekte beschriebenen Ereignismengen dar. Die Eintrittswahrscheinlichkeit P_{EMI} des IEMI-Szenarios kann daher über den UND-Operation der Fuzzylogik [144, 145] zu

$$P_{EMI} = \min \{P_{CU}, P_A, P_{I_0}\} \quad (9.2)$$

bestimmt werden.

Beispiel 9.1: IEMI-Störquelle vom Typ M4-1:HO-k-1 im Gebäude 4

Die theoretischen Betrachtungen sollen nun beispielhaft auf ein IEMI-Szenario im Bereich einer fiktiven Infrastruktur¹⁶ angewandt werden.

Es ist zu bewerten mit welcher Wahrscheinlichkeit eine IEMI-Störquelle vom Typ M4-1:HO-k-1 (z.B. eine handelsüblichen Magnetron-Quelle, die in einen Pilotenkoffer integriert wurde) von dem generischen Angreifer in das Gebäude 4 (am Kirchhoff Weg) eingebracht und betrieben werden kann. Bei der Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit ist sowohl ein Inntäter als auch ein betriebsfremder Angreifer zu betrachten.

Da die Quellenklasse bereits im Abschnitt 8.3.1 betrachtet wurde, wurden die benötigten Kenngrößen aus Tabelle 8.11 und Tabelle 8.12 entnommen und in die Tabelle 9.4 übernommen. Die Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit ergab, dass der generische Angreifer in mehr als einem Viertel bis zu der Hälfte aller Angriffe ($P_{CU} = 6$) Zugang zu einer IEMI-Störquelle vom Typ M4-1:HO-k-1 hat.

Im Kapitel 6¹⁷ wurde das Gebäude 4 als ein zweistöckiges Büro- und IT-Gebäude mit beschränktem Zugang beschrieben. Basierend hierauf kann angenommen werden, dass durch die typischen Nutzer des Gebäudes nur Aktentaschen oder Koffer in das Gebäude eingebracht werden können¹⁸. Für die betrachtete IEMI-Störquelle ergibt sich aus den in Tabelle 9.3 aufgetragenen Werten, dass die Störquelle mit hoher Wahrscheinlichkeit ($P_{I_0} = 7$) in das Gebäude eingebracht werden kann.

Die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten, mit denen ein interner bzw. externer Angreifer Zugang zu dem Gebäude 4 bzw. einer Zone der Zugänglichkeit $A_z = 4i$ hat, muss durch Auswertung des Absicherungskonzeptes der betrachteten Infrastruktur (bzw. des Betriebes) ermittelt werden. Im Ab-

¹³ ab Seite 133

¹⁴ siehe Abschnitt 6.2, Seite 78

¹⁵ Seite 157

¹⁶ siehe Abbildung 9.1

¹⁷ Seite 73

¹⁸ $M_e = M_t = 4$

schnitt 6.2¹⁹ wurden in der Tabelle 6.5 beispielhaft allgemeine Annahmen für die Wahrscheinlichkeit des Zugangs interner und externer Angreifer aufgetragen. Basierend auf diesen Werten hätte ein interner Angreifer mit mittlerer Wahrscheinlichkeit ($P_A = 5$) und ein externer Angreifer mit geringer Wahrscheinlichkeit ($P_A = 3$) Zugang zum Gebäude 4.

Bei Vernachlässigung der (beschränkten) Fähigkeit des generischen Angreifers Zugang zum Gebäude 4 zu erhalten, würde das gesamte Szenario als mittel (25% - 50%) bewertet. Bei Berücksichtigung der menschlichen Dimension und der hierin enthaltenen Fähigkeiten des Angreifers reduziert sich diese Eintrittswahrscheinlichkeit auf eine mittlere Wahrscheinlichkeit (12% - 25%) für den internen Angreifer und sogar auf weniger als 5% der Angriffe für den externen Angreifer. In dem betrachteten Beispiel stellt der Angreifer deutlich das begrenzende Element des IEMI-Szenarios dar. Verfahren, die diese Dimension nicht in die Betrachtungen mit einbeziehen, können zu einer erheblichen Überschätzung der bestehenden Gefährdung führen.

9.3 Spezifikation des IEMI-Bedrohungsszenarios

Zur Spezifikation des vollständigen IEMI-Bedrohungsszenarios ist zunächst, wie in Abschnitt 9.1 dargelegt wurde, die Umgebung des Zielsystems in Zugänglichkeitszonen zu unterteilen. Aufbauend hierauf ist für jede der in den Tabellen 8.7²⁰ und 8.8²¹ aufgelisteten 77 generischen Störquellenklassen mit Hilfe des in Abschnitt 9.2 beschriebenen Verfahrens abzuschätzen, mit welcher Wahrscheinlichkeit P_{Io} diese in die jeweilige Zugänglichkeitszone eingebracht werden kann. Zusammen mit der Wahrscheinlichkeit des Zuganges eines generischen Angreifers (Tabelle 6.5, Seite 78) kann für jedes der so gebildeten IEMI-Einzelszenarios der in Tabelle 9.4 dargestellte Datensatz erstellt werden.

Grundsätzlich besteht das IEMI-Bedrohungsszenario aus der vollständigen Gesamtheit der erstellten Einzelszenarios. Im Sinne einer umfassenden Risikobetrachtung müssten somit auch alle Einzelszenarios in der nachfolgenden Risikoanalyse betrachtet werden. Es ist jedoch leicht ersichtlich, dass hierbei der notwendige Analyseaufwand schnell sehr groß werden würde. So sind z.B. bei der

Tabelle 9.4 Datensatz eines IEMI-Einzelszenarios; IEMI-Störquelle vom Typ M4-1:HO-k-1 im Gebäude 4 einer fiktiven Infrastruktur (s. Abb 9.1)

IEMI-Störquelle			
Typ	M4-1:HO-k-1		Tabelle 8.11, Seite 151
M_{TP}	4		
f	$\geq 1,34$ GHz		
$E_{max} \cdot r$	58 kV		
P_{CU}	6		Tabelle 8.12, Seite 152
Ort der IEMI-Störquelle			
Gebäude	4		Tabelle 6.2, Seite 73
A_z	4i		
M_e	4		
M_t	4		Tabelle 9.3, Seite 162
P_{Io}	7		
Angreifer			
Typ	interner Angreifer	externer Angreifer	Tabelle 6.5, Seite 78
P_A	5	3	
Szenario			
P_{EMI}	5	3	Gleichung (9.2)

¹⁹ Seite 77

²⁰ Seite 144

²¹ Seite 145

Betrachtung von nur 10 Zugänglichkeitszonen und der Beschränkung auf externe Angreifer bereits 770 Einzelszenarien zu analysieren und zu bewerten.

Zur Reduzierung der Zahl der weiterhin zu betrachtenden Einzelszenarien bietet es sich an, die von der Störquelle am Ort des Zielsystems erzeugte Feldstärke grob abzuschätzen. Ist diese so gering, dass eine Beeinträchtigung des Zielsystems mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann, kann das zugehörige Einzelszenario aus dem IEMI-Bedrohungsszenario gestrichen werden. In den meisten Anwendungsfällen kann auch auf eine weitere Betrachtung von Einzelszenarien mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von $P_{\text{EMI}} \leq 3$ verzichtet werden. Grundsätzlich ist die Vorgabe einer solchen Mindestwahrscheinlichkeit von den Randbedingungen des Anwendungsfalles abhängig und sollte bei der Zusammenhangserstellung festgelegt werden.

Die verbleibenden Einzelszenarien sind Bestandteil des IEMI-Bedrohungsszenarios, welches im Rahmen der Risikobetrachtung zu analysieren und zu bewerten ist.

Anhang A

Fiktive Infrastruktur

Es liegt in der Natur der EMI-Bedrohung, dass die Betreiber kritischer Infrastrukturen im Rahmen des EMI-Risikomanagements erstellter Dokumente und gewonnene Erkenntnisse vertraulich behandelt und diese daher nicht als Beispiele verfügbar sind. Als Beispiel zur Diskussion und Verdeutlichung der Methoden des EMI-Risikomanagements als auch einzelner Arbeitsschritte bei der Modellierung des Bedrohungsszenarios wurde daher eine fiktive Infrastruktur erstellt. Diese beinhaltet alle für das EMI-Risikomanagement relevanten Systemelemente ohne zu spezifisch auf eine einzelne technische Infrastruktur eingegrenzt zu sein.

A.1 Allgemeine Beschreibung

Leitmotiv bei der Erstellung der fiktiven Infrastruktur war das Steuerzentrum einer technischen Versorgungsinfrastruktur, wie

- Netz eines Energieversorgungsunternehmens,
- Wasserversorgungsnetz,
- Verkehrsleitung oder
- eines überregionalen Logistiknetzwerkes.

Die fiktive Infrastruktur ist in einem Industriegebiet oder einem Technologiepark angesiedelt (s. Abb. A.1). Das Gebiet, in dem sich die fiktive Infrastruktureinrichtung befindet, liegt südlich des *Maxwell Ring*, einer Bundesstraße, und nördlich der *Heinrich Hertz Straße*, einer Hauptverkehrsstraße. Der *Ohm Weg* bildet die östliche Grenze des Gebietes, der *Kirchhoff Weg* die westliche Grenze. Die in Nord-Süd-Richtung zwischen dem *Maxwell Ring* und der *Heinrich Hertz Straße* verlaufenden Straßen werden regelmäßig von LKW befahren. Demgegenüber sind die in Ost-West-Richtung zwischen dem *Ohm Weg* und dem *Oersted Weg* verlaufenden Straßen verkehrsberuhigt und können nur von Fahrzeugen bis zur Größe eines Transporters befahren werden. Wie dem in Abbildung A.1 abgebildeten Lageplan entnommen werden kann, sind die Systemelemente der fiktiven Infrastruktur auf sechs Gebäude verteilt.

Gebäude 1 - Netzstation 1:

- **Lage:** Das Gebäude 1 liegt am südlichen Rand des betrachteten Gebietes, an der Einmündung des *Oersted Weg* in die *Heinrich Hertz Straße*.
- **Bauweise:** Die Netzstation 1 ist ein einstöckiges aus Backstein gemauertes Gebäude. An der Nordseite befinden sich eine Zugangstür aus Stahl und eine mit einem Wabengitter geschirmte Lüftungsöffnung. Der Anschluss an das Energieversorgungsnetz erfolgt in Form eines Erdkabels.

- **Zugänglichkeit:** Das gesamte Gebäude ist für die allgemeine Öffentlichkeit frei zugänglich ($A_z = 1i$, frei zugänglich in einem Gebäude).
- **Funktion:** Das Gebäude 2B wird als Bürogebäude genutzt.

Gebäude 3:

- **Lage:** Das Gebäude 3 liegt am nördlichen Rand des betrachteten Gebietes, zwischen dem *Maxwell Ring* und der *Volta Straße*. Das Gebäude ist Teil einer aus fünf gleichartigen Gebäuden bestehenden Häuserzeile. Zwischen den Gebäuden befinden sich Rasenflächen und Fußwege.
- **Bauweise:** Das Gebäude ist in Form eines dreistöckigen aus Kalksandstein gemauerten Massivbaus ausgeführt.
- **Zugänglichkeit:** Der Zugang zum Gebäude kann nur nach Identifikation mittels einer Zugangskarte erfolgen ($A_z = 3i$, kontrollierter Zugang in einem Gebäude).
- **Funktion:** In dem Gebäude 3 sind neben der IuK-Netzleitzentrale, der Leitung der Gebäudeleittechnik für die gesamte Infrastruktur und Büroarbeitsplätzen auch das Rechenzentrum II, bestehend aus einem Core-Switch und einer Datenbankserver Farm, untergebracht.

Gebäude 4:

- **Lage:** Das Gebäude 4 liegt am östlichen Rand des betrachteten Gebietes, nördlich des Gebäudes 5, in der Mitte des *Kirchhoff Weg*. Südwestlich des Gebäudes liegt der Parkplatz P3, der frei zugänglich ist und regelmäßig auch von LKWs genutzt wird.
- **Bauweise:** Das Gebäude 4 wurde als Stahlskelettbau mit kombinierter Glas/Metallfassade gebaut. Der Innenausbau erfolgte in Trockenbauweise.
- **Zugänglichkeit:** Der Zugang zum Gebäude 4 ist auf die Mitarbeiter der IuK-Betriebstechnik beschränkt. Diese können nach Identifizierung mittels Zugangskarte das Gebäude durch eine Zugangsschleuse (Drehtür) betreten. Alle übrigen Mitarbeiter sowie betriebsfremdes Personal erhält nur nach Identitäts- und Taschenkontrolle begleiteten Zugang. ($A_z = 4i$, beschränkter Zugang)
- **Funktion:** Im Gebäude 4 befindet sich neben Büroarbeitsplätzen das Rechenzentrum I, mit einem Core-Switch, einer Datenbankserver Farm und dem Netzübergangsknoten des IuK-Netzes an das Internet.

Gebäude 5 - Netzstation 2:

- **Lage:** Das Gebäude 5 liegt am östlichen Rand des betrachteten Gebietes, südlich des Gebäudes 4, in der Mitte des *Kirchhoff Weg*. Südwestlich des Gebäudes liegt der Parkplatz P3, der frei zugänglich ist und regelmäßig auch von LKWs genutzt wird.
- **Bauweise:** Die Netzstation 2 ist ein einstöckiges aus Backstein gemauertes Gebäude. An der Nordseite befinden sich eine Zugangstür aus Stahl und eine mit einem Wabengitter geschirmte Lüftungsöffnung. Der Anschluss an das Energieversorgungsnetz erfolgt in Form eines Erdkabels.
- **Zugänglichkeit:** Der Zugang zum Gebäude erfolgt durch eine verschlossene Stahltür. Nur das Betriebspersonal verfügt über einen Schlüssel zum Öffnen der Tür. ($A_z = 4i$, beschränkter Zugang)
- **Funktion:** In dem Gebäude befindet sich die Netzstation 2 (SDF 2) einschließlich einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV 2) und der zugehörigen Leittechnik (SCADA).



Abb. A.2 Lage der Zugänglichkeitszonen einer fiktiven Infrastruktur (Unter Verwendung der in Tabelle 6.3 (Seite 74) aufgetragenen Skala.)

A.2 Zugänglichkeit

Die Zugänglichkeit (A_z) der jeweiligen Gebäude und ihrer Umgebung ist in Abbildung A.2 dargestellt. Um jedes Gebäude mit einer Zugänglichkeit von 2i (überwacht) und höher ergibt sich ein Bereich der allgemeinen Öffentlichkeit in dem die Möglichkeit der Überwachung (Monitoring) besteht. Durch die Beobachtung dieser in Abbildung A.2 durch eine hellblaue Schattierung gekennzeichneten Zonen besteht die Möglichkeit einer rechtzeitigen Erkennung großer oder für die Umgebung untypische Störsysteme bzw. Trägerplattformen.

Der Zugang zum Parkplatz P2 erfordert die Identifikation des Fahrers mit Hilfe einer Zugangskarte (kontrollierter Bereich). Das nördlich der *Ampère Straße* zwischen dem *Ohm Weg* und dem *Oersted Weg* liegende Gelände ist aufgrund von Hecken und Sträuchern aus den Gebäuden 2A und 3 nur sehr eingeschränkt oder nicht einsehbar. Die auf diesem Gelände befindlichen Parkplätze P4 und P5 sind der allgemeinen Öffentlichkeit zugeordnet, die jeder Person zugänglich ist. Aufgrund ihrer Bauform können sie jedoch nur von Fahrzeugen bis zu der Größe eines Kleintransporters befahren werden. Demgegenüber wird der Parkplatz P3 regelmäßig auch von LKW genutzt.

Die sich für Verkehrsflächen und -wege in der Umgebung der fiktiven Infrastruktur ergebene Bewertung ist in Abbildung A.3 abgebildet. In dieser Darstellung ist in den grauen Kästen die minimale erforderliche Mobilität (M_e) angegeben. Mobile Systeme mit einer geringeren Mobilität ($M_{TP} < M_e$) können aufgrund von baulichen Eigenheiten (z.B. Barrieren, Breite des Weges) oder Kontrollen nicht als Gesamtsystem in die zugehörigen Verkehrsflächen und -wege eingebracht werden. Weicht die Mobilität (M_t) der für die Verkehrsflächen und -wege typischen Systeme von der minimal erforderlichen Mobilität (M_e) ab, so ist diese in den blauen Kästen vermerkt. So wird der Kirchhoff Weg üblicher Weise nur von Systemen mit einer Mobilität $M \geq 3$ (PKW, Van, Kleinlastwagen) befahren. Aufgrund ihrer Bauform könnte diese Straße jedoch auch von einem LKW oder Stattelauflieger genutzt werden.

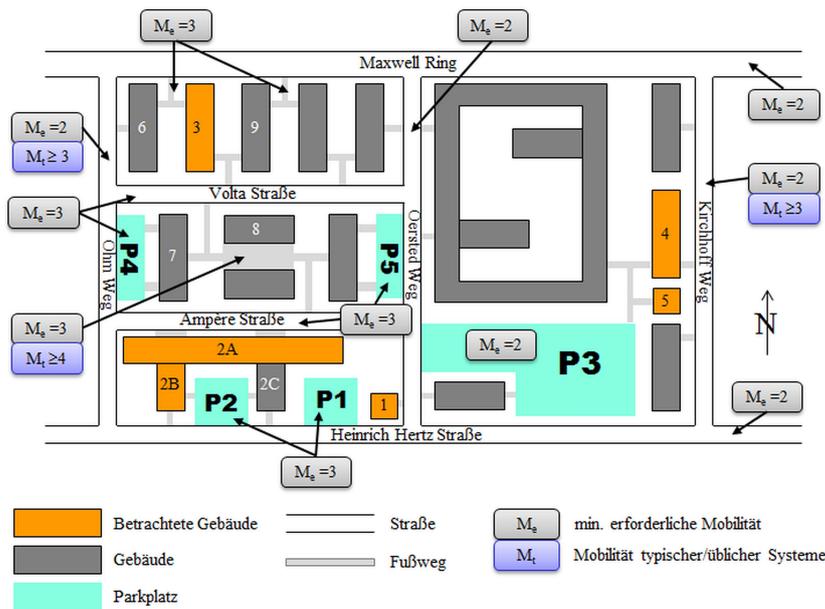


Abb. A.3 Mobilität der Verkehrsflächen und -wege in der Umgebung einer fiktiven Infrastruktur

A.3 Energieversorgungsnetz

Das Energieversorgungsnetz der fiktiven Infrastruktur wurde unter Beachtung der im Band M des vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik herausgegebenen Hochverfügbarkeitskompendiums [148] geplant und implementiert. Der Empfehlung einer doppelten Einspeisung der Energieversorgung¹ folgend, wird die fiktive Infrastruktur über die in den Gebäuden 1 und 5 befindlichen Netzstationen mit elektrischer Energie versorgt. Der Hauptverteiler² des Gebäudes 3 wird ausschließlich über die Netzstation 1 gespeist. Demgegenüber werden die Hauptverteiler der Gebäude

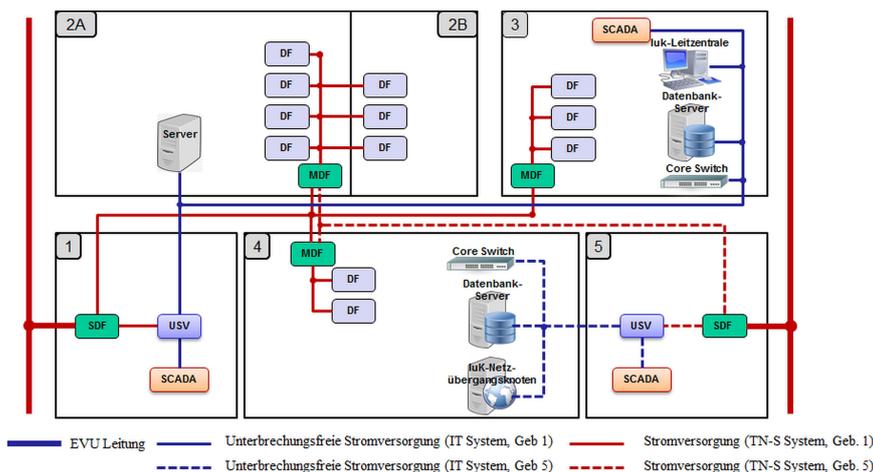


Abb. A.4 Netzplan der elektrischen Energieversorgung der fiktiven Infrastruktur (durchgezogene Linie: Speisung durch Netzstation 1; gestrichelte Linie: Speisung durch Netzstation 2; blau: über USV gepufferte Speisung

¹ Maßnahme VM.11.19

² engl.: Main Distribution Frame (MDF)

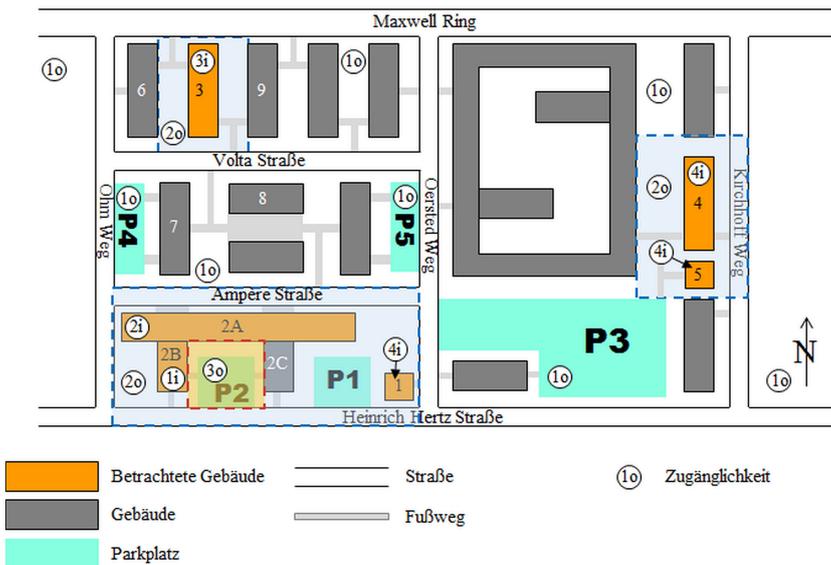


Abb. A.5 Örtlicher Verlauf der Energieversorgungsleitungen der fiktiven Infrastruktur

2A/B und 4 sowohl über die Netzstation 1 als auch über die Netzstation 2 gespeist. In jedem Gebäude der fiktiven Infrastruktur sind hinter dem Hauptverteiler je ein Unterverteiler³ verschaltet. Aus den Unterverteilungen der Etage werden dann die Räume mit elektrischer Energie versorgt. Das beschriebene allgemeine Energieversorgungsnetz ist in Form eines TN-S Netz⁴ mit Differenzstromüberwachung durch einen Residual Current Monitor (RCM)⁵ ausgeführt.

Parallel zu diesem allgemeinen Energieversorgungsnetz sind in der Infrastruktur zwei unterbrechungsfreie Stromversorgungsnetze ausgebracht. Durch die im Gebäude 1 installierte unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) werden die Server im Gebäude 2A sowie die im Gebäude 3, die IuK-Netzleitzentrale und das Rechenzentrum II versorgt. Die USV im Gebäude 5 speist den IuK-Netzübergangsknoten und das Rechenzentrum I. Beide USVen sind Voltage and Frequency Independent-Stromversorgungen (VFI-USV) die zum einen das nachgeschaltete Netz bei Ausfall der EVU Einspeisung hinreichend lange stützen und gleichzeitig das gezielte Herunterfahren der versorgten Rechner und Server auslösen. Beide USVen können aus der IuK-Leitzentrale ferngewartet werden. Das über die USVen gestützte Energieversorgungsnetz wurde in Form eines IT-Netzes (ohne Neutralleiter) ausgeführt. Der örtliche Verlauf der Energieversorgungsleitungen auf dem Gelände der fiktiven Infrastruktur ist in Abbildung A.4 abgebildet.

A.4 Informations- und Kommunikationsnetz

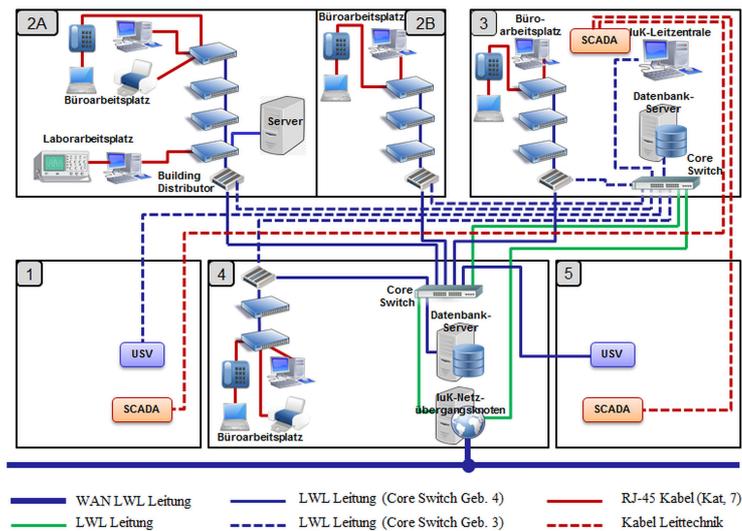
Die Grundstruktur des Informations- und Kommunikationsnetzes (IuK-Netz) der fiktiven Infrastruktur bilden die in den Gebäuden 3 und 4 installierten Rechenzentren, bestehend aus je einem Core-Switch und einer nachgeschalteten Serverfarm. Beide Core-Switches sind über breitbandige Lichtwellenleiterleitung⁶ mit dem im Gebäude 4 installierten Netzübergangsknoten zum IuK-Netz als auch untereinander verbunden. Der Core-Switch in Gebäude 3 ist zudem mit dem IuK-Leitzentrum verbunden. Die Daten der beiden Serverfarmen sind als Haupt-Rechenzentrum (Geb.

³ engl.: Distribution Frame (DF)

⁴ Maßnahme VM.11.25

⁵ Maßnahme VM.11.26

⁶ grün gekennzeichnete Verbindungen in Abbildung A.6



SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition System

Abb. A.6 Netzplan des IuK-Netz der fiktiven Infrastruktur

3) und Ausweich-Rechenzentrum (Geb. 4) betrieben. Im Regelbetrieb werden die Daten des Haupt-Rechenzentrum immer auch in das Ausweich-Rechenzentrum gespiegelt, so dass diese bei Ausfall des Haupt-Rechenzentrum weiterhin verfügbar sind.

In diesem Sinne sind alle Gebäudeverteilungen (Building Distributor) mit beiden Core-Switches verbunden. Innerhalb der Gebäude ist für jede Etage eine Unterverteilung installiert, über die die jeweiligen Büro- und Laborarbeitsplätze mit dem IuK-Netz verbunden sind. Die IuK-Verkabelung innerhalb der Gebäude wurde mittels RJ45 Kabel (Cat. 7 S/FTP) und zwischen den Gebäuden als Lichtwellenleiterkabel ausgeführt.

Die in den Gebäuden 1 und 5 installierte Leittechnik (SCADA) ist unabhängig vom IuK-Netz mittels Lichtwellenleiter sternförmig mit der zentralen Leittechnik in Gebäude 3 verbunden.

Anhang B

Anwendung ausgesuchter EMI-Risikobeurteilungsmethoden

Die Durchführung einiger in Kapitel 5¹ vorgestellter Methoden zur Beurteilung des Risikos einer Exposition durch IEMI-Störquellen wird in diesem Anhang am Beispiel der in vorstehenden Anhang beschriebenen fiktiven Infrastruktur verdeutlicht.

B.1 Anwendung der Preliminary Hazard List (PHL)

Aufgabenstellung:

Mit Hilfe der PHL sollen die möglichen EMI-Gefährdungen für die im Gebäude 2A installierten Systemteile der fiktiven Infrastruktur identifiziert und erfasst werden.

Durchführung:

Die einzelnen Schritte der Durchführung der PHL sind im Abschnitt 5.2.1 auf Seite 44 beschrieben.

- 1. Erfassung potentieller Störquellen:** Die PHL beginnt mit einer systematischen Erfassung aller möglichen Gefährdungen. In der vorliegenden Aufgabenstellung entspricht dies einer Auflistung aller EMI-Störquellen in der Umgebung des Gebäudes 2A der fiktiven Infrastruktur. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und um die Erfassung möglichst umfassend zu gestalten, sollten bei diesem Schritt Klassen von EMI-Störquellen betrachtet werden. Durch die Erfassung spezifischer generischer oder existierender EMI-Störquellen könnte die Risikobeurteilung zu früh auf einzelne Störquellen eingengt und weitere potentielle Störquellen vernachlässigt werden. Diesem Gedanken folgend werden hier zunächst nur die Mobilität² der potentiellen Störquellen sowie die Orte (besser Bereiche) ihres Auftretens erfasst. Die Zuordnung der so erfassten Daten zu EMI-Störquellenklassen kann dann im Zuge einer weitergehenden Analyse (z.B. PHA) erfolgen. Die Auswertung der Zugänglichkeit³ und Mobilitätsbeschränkungen⁴ in der Umgebung des Gebäudes 2A führt auf die in den ersten drei Spalten der Tabelle B.1 aufgetragene Liste.
- 2. Erfassung möglicher Koppelpfade:** In dem zweiten Schritt der PHL werden die potentiell betroffenen Teilsysteme sowie die möglichen Koppelpfade erfasst. Aus der Dokumentation der fik-

¹ Seite 41

² Unter Verwendung der in Tabelle 7.3 auf Seite 89 aufgetragenen Skala für Mobilität

³ Abb. A.2, Seite 170

⁴ Abb. A.3, Seite 171

Tabelle B.1 PHL Arbeitsblatt für die Beurteilung der EMI-Gefährdung des Gebäudes 2A

1	2	3	4	5	6	7
Ref. Nr.	potentieller EMI-Störquelle Mobilität	möglicher Ort	möglicher Koppelpfad Art	Abstand	betroffenes Teilsystem	möglicher Effekt
2.1	$M = 2$ (transportabel)	Heinrich Hertz Straße	gestrahlt	20 m	(a) Büroarbeitsplätze	(i) Funktionsstörung
2.2		Ohm Weg		2 - 70 m		
2.3		Oersted Weg		20 - 90 m		
2.4		Parkplatz P3		25 - 95 m		
3.1	$M = 3$ (mobil)	Heinrich Hertz Straße		20 m	(b) Laborarbeitsplätze (EG & 1. Et.)	(ii) Zerstörung von Baugruppen
3.2		Ohm Weg		2 - 70 m		
3.3		Oersted Weg		25 - 95 m		
3.4		Parkplatz P3		25 - 95 m		
3.5		Ampère Straße		2 m		
3.6		Parkplatz P1		5 m		
3.7		Parkplatz P2		5 m		
3.8		Parkplatz P4		10 m - 50 m		
4.1	$M \geq 4$ (sehr-hoch mobil)	Heinrich Hertz Straße		20 m	(d) MDF (EG)	(i) Funktionsstörung
4.2		Ohm Weg	2 - 70 m			
4.3		Oersted Weg	25 - 95 m			
4.4		Parkplatz P3	25 - 160 m			
4.5		Ampère Straße	2 m			
4.6		Parkplatz P1	5 - 20 m			
4.7		Parkplatz P2	5 - 20 m			
4.8		Parkplatz P4	10 m - 50 m			
4.9		Gebäude 2A	≤ 10 m			
4.10		Gebäude 2B	1 m - 10 m			
4.11		Gebäude 2C ⁽¹⁾	1 m - 10 m			
4.12		Fläche um Gebäude 2	1 m - 10 m			
4.13		Gebäude 7 ⁽¹⁾	10 m - 50 m			

(1) Das Gebäude 2C und 7 gehören nicht zur fiktiven Infrastruktur und es liegen keine Informationen über dessen Nutzung vor.

tiven Infrastruktur⁵ ist bekannt, dass sich im Gebäude 2 vorwiegend Büroräume befinden. Im Erdgeschoss und dem 1. Stock sind zusätzlich Laborräume untergebracht. In ausgesuchten Räume des 2. und 3. Stockwerks werden lokale Server betrieben. Darüber hinaus befinden sich im Erdgeschoss der Hauptverteiler (EVU) und IuK-Gebäudeverteiler. Aufgrund der vorliegenden Informationen ist davon auszugehen, dass alle im Gebäude 2A befindlichen Teilsysteme durch alle erfassten EMI-Störquellen beaufschlagt werden können. Daher werden alle aufgeführten Teilsysteme in der Spalte 6 des PHL Arbeitsblattes (Tabelle B.1) eingetragen.

Die Kopplung zwischen den erfassten EMI-Störquellen und den möglichen Zielsystemen im Gebäude 2A erfolgt hauptsächlich über das von den Störquellen abgestrahlte elektromagnetische Feld (gestrahlte Kopplung). Für die Bewertung dieser Koppelpfade ist neben der Schirmwirkung des Gebäudes, der Gehäuse und Verkabelung auch die durch das elektromagnetische Feld zu überwindende Abstand. Daher wurde in Spalte 5 des PHL Arbeitsblattes die Abstände zwischen möglichen Orten der Störquelle sowie der nächsten und am weitesten entfernten Begrenzung des Gebäudes 2A eingetragen.

3. **Abschätzung möglicher Effekte:** Im dritten Arbeitsschritt sind für die betroffenen Teilsysteme (Tabelle B.1, Spalte 6) abzuschätzen welche Effekte auftreten könnten. Basierend auf den bekannten und erfassten Daten ist davon auszugehen, dass transportable ($M = 2$) und mobile ($M = 3$) Störquellen in den potentiellen Zielsystemen sowohl zu Zerstörungen von Baugruppen als auch Funktionsstörungen hervorrufen können. Die Leistungsfähigkeit der sehr bis hoch mobilen ($M \geq 4$) Störquellen dürfte für Zerstörungen von Baugruppen zu gering sein, so dass diese Störquellen nur Funktionsstörungen hervorrufen dürften. Eine detailliertere Beurteilung potentieller Effekte erfordert eine genauere Spezifikation der Störquellen, die Bewertung der Dämpfung des jeweiligen Koppelpfades sowie Informationen über die Störfestigkeit der betroffenen Teilsys-

⁵ Anhang A

teme. Diese Analysen übersteigen jedoch in der Regel den Rahmen einer PHL und werden eher im Rahmen deiner nachfolgenden PHA durchgeführt.

4. **Dokumentation:** Die Ergebnisse der durchgeführten PHL sind in der Tabelle B.1 PHL Arbeitsblatt dokumentiert.

B.2 Anwendung der Preliminary Hazard Analysis (PHA)

Aufgabenstellung:

Aufbauen auf der im Abschnitt B.1 durchgeführten PHL soll die möglichen EMI-Gefährdungen für die im Gebäude 2A installierten Systemteile der fiktiven Infrastruktur mit einer PHA bewertet werden.

Durchführung:

Die einzelnen Schritte der Durchführung der PHA sind im Abschnitt 5.2.2 auf Seite 46 beschrieben.

1. **Erfassung potentieller Störquellen:** Wie die PHL, beginnt auch die PHA mit der Erfassung potentieller Störquellen und deren mögliche Orte. Wie in der Aufgabenstellung vorgegeben setzt die aktuelle PHA auf die Ergebnisse der vorstehenden PHL auf. Aus diesem Grund wird das im Rahmen der PHL erstellte Arbeitsblatt weiter verwendet. Zur Durchführung der PHA wird gegenüber der PHL eine detailliertere Spezifikation der EMI-Störquellen benötigt, daher werden zusätzlich zur Mobilität (Spalte 2) Spalten für die Bezeichnung der generischen Störquellenklasse⁶ (Spalte 2a, Typ), der Auftrittswahrscheinlichkeit⁷ der Störquellenklasse am möglichen Ort (Spalte 2b) sowie der maximal abgestrahlten elektrischen Feldstärke (Spalte 2c) in das Arbeitsblatt eingefügt. Darüber hinaus wurde für jeden potentiellen Ort je betroffenes Zielsystem eine eigene Zeile vorgesehen (s. Tabelle B.2). Da hierdurch das Arbeitsblatt der gesamten PHA sehr komplex wird,

Tabelle B.2 Auszug (potentieller EMI-Störquelle) aus dem PHA Arbeitsblatt für die Beurteilung der EMI-Gefährdung des Gebäudes 2A

1	2	2a	2b	2c	3	...	6	...
Ref. Nr.	Mobilität	potentieller Typ	EMI P_{EMI}	Störquelle $E_{max} \cdot r$	möglicher Ort	...	betroffenes Teilsystem	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	
4.9.1.a	M = 4	M4-2:MB-b-2	5	124 kV	Gebäude 2A (EG & 1. Et.)	...	Büroarbeitsplätze	...
4.9.1.b						...	Laborarbeitsplätze (EG & 1.Et.)	...
4.9.1.c						...	Server (2. & 3. Et.)	...
4.9.1.d						...	MDF (EG)	...
4.9.1.e						...	Gebäudeverteilung (EG)	...
4.9.2.a	M = 4	M4-2:MB-b-2	5	124 kV	Gebäude 2A (2. & 3. Et.)	...	Büroarbeitsplätze	...
4.9.2.b						...	Laborarbeitsplätze (1.Et.)	...
4.9.2.c						...	Server (2. & 3. Et.)	...
4.9.2.d						...	MDF (EG)	...
4.9.2.e						...	Gebäudeverteilung (EG)	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	

⁶ siehe Kapitel 8 ab Seite 133

⁷ siehe Abschnitt 9.2 , ab Seite 162

beschränken sich die nachfolgenden Darstellungen auf die Zeile 9.4 des PHL-Arbeitsblattes (Tabelle B.1) und der generischen Quellenklasse M4-2:MB-b-2. Die für weitere Quellenklassen und potentielle Orte durchzuführenden Arbeitsschritte gleichen den nachfolgend diskutierten Arbeitsschritten. Dem im Abschnitt 8.3.1⁸ abgeleiteten Modell wurde der Wert für die maximal abgestrahlte elektrische Feldstärke entnommen und die Auftrittswahrscheinlichkeit innerhalb des Gebäudes 2A bestimmt. Aufgrund der unterschiedlichen Zugänglichkeit wurde der betrachtete mögliche Ort (innerhalb Gebäude 2A) in die unteren zwei (EG & 1. Stock) und oberen zwei (2. & 3. Stock) Etagen untergliedert (s. Tabelle B.2).

2. **Erfassung möglicher Koppelpfade:** Die betroffenen Zielsysteme wurden bereits im Rahmen der PHL identifiziert. Anhand der vorliegenden Informationen (s. Anhang A) ist eine detailliertere Spezifikation nicht möglich. Demgegenüber können die Längen der möglichen gestrahlten Kopplungen zwischen der Störquelle und den Zielsystemen spezifischer bestimmt werden. Die **Büroarbeitsplätze** im EG und im 1. Stock sind für die Öffentlichkeit frei zugänglich. Die Zugangüberwachung im 2. und 3. Stock führt für Störquellen der Mobilität $M = 4$ zu keiner wesentlichen Reduzierung der Auftrittswahrscheinlichkeit. Als Folge ist davon auszugehen, dass sich die betrachtete Störquelle den Büroarbeitsplätzen unmittelbar nähern kann und die Abstände im Mittel geringer als 5 m sind. Aufgrund des restriktiveren Zuganges zu **Laborräumen** wurde hier angenommen, dass sich die Störquelle ausserhalb des Laborraumes (auf dem Flur oder in einem Nachbarraum) befindet. Die gleiche Annahme wurde bei der **MDF** und der **IuK-Gebäudeverteilung** getroffen, hier wurde jedoch von einer geringeren Raumgröße ausgegangen. Für eine Störquelle im EG oder dem 1. Stock ist die minimale Distanz zu einem Server im 2. oder 3. Stock durch die Höhe einer Etage als auch der Dämpfung der Decke gegeben. Bei der Abschätzung der Abstände wurde eine Etagenhöhe von 3 m angenommen. In ähnlicher Weise wurden die Abstände zwischen einer Störquelle in den oberen zwei Etagen und den betroffenen Teilsystemen abgeschätzt.
3. **Gewichtung möglicher Koppelpfade:** Für die in zweiten Schritt (bzw. im Rahmen einer PHL) erfassten Koppelpfade sind im dritten Analyseschritt die zugehörige Kopplungsdämpfung abzuschätzen. Aus den Abständen (r) ergibt sich die geometrische Dämpfung über die Beziehung:

Tabelle B.3 Auszug (möglicher Koppelpfad) aus dem PHA Arbeitsblatt für die Beurteilung der EMI-Gefährdung des Gebäudes 2A

1	...	3	4	5	5a	6	...
Ref. Nr.	...	potentieller EMI-Störquelle möglicher Ort	möglicher Koppelpfad Art	Abstand	Dämpfung	betroffenes Teilsystem	...
⋮	...	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...
4.9.1.a	...	Gebäude 2A (EG & 1. Et.)	gestrahlt	≤ 5 m	≤ 14 dB	Büroarbeitsplätze	...
4.9.1.b	...			≤ 10 m	≤ 20 dB	Laborarbeitsplätze (EG & 1.Et.)	...
4.9.1.c	...			6 m / 9 m	25 dB/34 dB	Server (2. & 3. Et.)	...
4.9.1.d	...			≤ 5 m	≤ 14 dB	MDF (EG)	...
4.9.1.e	...			≤ 5 m	≤ 14 dB	Gebäudeverteilung (EG)	...
4.9.2.a	...	Gebäude 2A (2. & 3. Et.)	gestrahlt	≤ 5 m	≤ 14 dB	Büroarbeitsplätze	...
4.9.2.b	...			3 - 9 m	15 - 34 dB	Laborarbeitsplätze (EG & 1.Et.)	...
4.9.2.c	...			≤ 5 m	≤ 14 dB	Server (2. & 3. Et.)	...
4.9.2.d	...			6 m / 9 m	25 dB/34 dB	MDF (EG)	...
4.9.2.e	...			6 m / 9 m	25 dB/34 dB	Gebäudeverteilung (EG)	...
⋮	...	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...

⁸ Seite 146

$$D_{\text{dB}} = 20 \cdot \lg \left(\frac{1}{r} \right) \quad (\text{B.1})$$

Zusätzlich dämpfen Gehäuse und Gebäudestrukturen (Decken und Wände) die Ausbreitung elektromagnetischer Felder. Da über Gehäuse keine Informationen vorliegen, werden diese an dieser Stelle zunächst vernachlässigt. In der Beschreibung der fiktiven Infrastruktur wird das Gebäude 2A beschrieben als Stahlbetonbau dessen Innenausbau in Trockenbauweise ausgeführt ist. Aus der BSI-Richtlinie *Schirmung von Gebäuden* [149] konnte entnommen werden, dass bei der Betriebsfrequenz von $f = 340 \text{ MHz}$ Stahlbetondecken eine Dämpfung von ca. 5 dB ⁹ und Gipskarton als Trockenbauwand keine Dämpfung¹⁰ aufweisen. Für jede zu durchdringende Decke ist die Dämpfung um 5 dB zu erhöhen. Die so bestimmten Werte wurden in der Spalte 5a des PHL Arbeitsblattes eingetragen (s. Tabelle B.3).

4. **Abschätzung möglicher Effekte:** Aufgrund der abgeschätzten Störfelder in der Umgebung der betroffenen Teilsysteme können anhand der vorliegenden Informationen die möglichen Effekte nur sehr grob abgeschätzt werden. Aus der Literatur ist bekannt, dass grundsätzlich Funktionsstörungen aber auch Zerstörungen von Baugruppen hervorgerufen werden können. Eine Störquelle im Erdgeschoss bzw. im 1. Stock könnte in die unmittelbare Nähe der IuK-Gebäudeverteilung, sowie der Büro- und Laborarbeitsplätze verbracht und unmittelbar auf diese einkoppeln. Als Folge sind sowohl Funktionsstörungen als auch Zerstörungen möglich. Bei der MDF wird angenommen, dass diese für eine industrielle Umgebung und daher störresistenter aufgebaut ist, so dass die betrachtete Störquelle nur Funktionsstörungen hervorrufen dürfte. Die im 2. und 3. Stock installierten Server sind in Bezug auf eine Störquelle in den ersten beiden Geschossen sowohl durch den sich ergebenden Abstand als auch die Decken getrennt. Als unmittelbare Folge der sich hierdurch ergebenden Dämpfung sind nur Funktionsstörungen möglich. Bei einer angenommenen Störquelle im 2. oder 3. Stock wirkt sich dieser Effekt schützend für die Laborarbeitsplätze im EG und 1. Stock sowie den im EG installierten MDF und der IuK-Gebäudeverteilung aus, so dass nur Funktionsstörungen zu erwarten sind.
5. **Bewertung der Effekte:** Aufgrund der vorliegenden Informationen könnten Funktionsstörungen der Büroarbeitsplätze und Laborarbeitsplätze zu einem Ausfall des betroffenen Arbeitsplatzes führen. Bei einer Zerstörung von Baugruppen dieser Arbeitsplätze wird ebenfalls ein Ausfall des betroffenen Arbeitsplatzes angenommen. Für die Funktion der betrachteten Infrastruktur stellt ein solcher Ausfall jedoch nur eine geringe Störung der Prozessabläufe mit einer geringen Kritikalität dar. Bei den im Gebäude 2A installierten Servern handelt es sich um lokale Server, für die kein Spiegelsystem vorgesehen ist. Eine Funktionsstörung der Server könnte mit hoher Wahrscheinlichkeit für die auf diesem Server laufenden Prozesse zu Leistungseinschränkungen führen. Zerstörungen von Servern resultieren in einer eingeschränkten Funktionalität mit hoher Kritikalität (Tabelle B.4 Spalten 8 und 9). Störungen des MDF führen unmittelbar zu Störungen der Energieversorgung der Gebäude 2A und 2B. Die Auswirkungen einer solchen Störung im Hinblick auf die Funktion der gesamten Infrastruktur wird als hoch eingeschätzt. Hinsichtlich der Auftrittswahrscheinlichkeit (Tabelle B.4 Spalte 10) können auf der Basis der vorliegenden Informationen keine Aussagen gemacht werden. Hierzu sind weitergehende Analysen und Untersuchungen notwendig.
6. **Identifikation von Maßnahmen zur Risikobewältigung:** Die PHA schließt mit der Identifikation möglicher Maßnahmen zur Risikobewältigung (Gegenmaßnahmen, Schutzmaßnahmen) einschließlich einer Abschätzung ihrer Wirksamkeit. In dem vorliegendem Beispiel wurde dieser Schritt nicht durchgeführt.
7. **Dokumentation:** Die Ergebnisse der durchgeführten PHA sind in Tabelle B.2, Tabelle B.3 und Tabelle B.4 dokumentiert.

⁹ [149], Seite 38

¹⁰ [149], Seite 53

Tabelle B.4 Auszug (Folgen & Risiko) aus dem PHA Arbeitsblatt für die Beurteilung der EMI-Gefährdung des Gebäudes 2A

1	...	6	7	8	9	10	11
Ref. Nr.	...	betroffenes Teilsystem	möglicher Effekt	Folgen / Auswirkungen	Kritikalität Schwere	Auftrittswahrsch.	Risiko (o. M.)
⋮	...	⋮					
4.9.1.a.i	...	Büroarbeitsplätze	Funktionsstörungen	Ausfall Arbeitsplatz	2 - 3 (gering)	k.A.	II (gering)
4.9.1.a.ii	Zerstörung von Baugruppen						
4.9.1.b.i	...	Laborarbeitsplätze (EG & 1.Et.)	Funktionsstörungen				
4.9.1.b.ii	Zerstörung von Baugruppen						
4.9.1.c	...	Server (2. & 3. Et.)	Funktionsstörungen	Leistungseinschränkungen	4 - 6 (mittel / störend)	k.A.	III (mittel)
4.9.1.d	...			MDF (EG)			
4.9.1.e.i	...	Gebäudeverteilung (EG)	Funktionsstörungen	Störung IuK-Netz	4 - 6 (mittel / störend)		
4.9.1.e.ii	Zerstörung von Baugruppen		Ausfall IuK-Netz	7 (hoch)			
4.9.2.a.i	...	Büroarbeitsplätze	Funktionsstörungen	Ausfall Arbeitsplatz	2 - 3 (gering)	k.A.	II (gering)
4.9.2.a.ii	Zerstörung von Baugruppen						
4.9.2.b	...	Laborarbeitsplätze (EG & 1.Et.)	Funktionsstörungen				
4.9.2.c.i	...	Server (2. & 3. Et.)	Funktionsstörungen	Leistungseinschränkungen	4 - 6 (mittel / störend)	k.A.	III (mittel)
4.9.2.c.ii	Zerstörung von Baugruppen			eingeschränkte Funktionsfähigkeit			
4.9.2.d	...	MDF (EG)	Funktionsstörungen	Störung Energievers.	7 (hoch)	k.A.	III (mittel)
4.9.2.e	...	Gebäudeverteilung (EG)		Störung IuK-Netz	4 - 6 (mittel / störend)		
⋮	...	⋮					

k.A. - keine Angaben, weiterführende Analyse notwendig

B.3 Anwendung der Hazard and Operability Study (HAZOP)

Aufgabenstellung:

Mit Hilfe der HAZOP sollen die möglichen EMI-Gefährdungen für die im Gebäude 5 installierten Systemteile der fiktiven Infrastruktur identifiziert und erfasst werden.

Durchführung:

Die einzelnen Schritte der Durchführung der HAZOP sind im Abschnitt 5.3.2 auf Seite 50 beschrieben.

Tabelle B.5 Attribute (Parameter) und Leitworte (s. Tab. 5.6, Seite 50)

Attribut Parameter	Leitworte						
	kein	weniger	mehr	sowohl als auch	früher	später	anders als
Netzspannung	✓	✓	✓				✓
Netzfrequenz		✓	✓				✓
Steuersignal	✓			✓	✓	✓	

- Vorbereitung:** Vor Beginn der Analyse erstellt der Moderator eine Liste aus **Leitworten**, die dem zu betrachtendem System angepasst sind und mit denen er die Analyse leiten kann. In diesem Beispiel besteht die Aufgabe in der Analyse der im Gebäude 5 installierten Systemteile. Der Beschreibung der fiktiven Infrastruktur¹¹ kann entnommen werden, dass im Gebäude 5 die Netzstation 2 (**SDF 2**) einschließlich einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (**USV 2**) und der zugehörigen Leittechnik (**SCADA**) installiert sind. Das Gebäude 5 und die in ihm installierten Teilsysteme sind somit der **Energieversorgung** zuzuordnen. Die betrachteten Attribute (Prozessparameter) und die Leitworte sind folglich aus dem Kontext der Energieversorgung zu wählen. Die auf die Aufgabenstellung angepassten Attribute und Leitwerte sind in Tabelle B.5 aufgelistet. In dieser Darstellung sind sinnvolle Kombinationen durch einen Haken gekennzeichnet.
- Auswahl eines Prozessschritts:** Für die Energieversorgung sind die Prozessschritte (1) **Anfahren/Einschalten**, (2) **Regelbetrieb**, (3) **Vollauslastung**, (4) **Störung** (z.B. Notabschaltung, Isolationsverletzung, Masseschluss) und (5) **Herunterfahren/Ausschalten** von Bedeutung. Als erster zu betrachtender Prozessschritt wurde der Regelbetrieb gewählt. Die Analyse beginnt mit der Betrachtung der SDF 2.
- Attributisierung des Prozessschritts:** Die Ein- und Ausgangsgrößen der betrachteten Systemteile (SDF 2, USV 2 und SCADA) werden Attributen (Netzspannung, Netzfrequenz und Steuersignal) sowie Sollwerten zugeordnet. Für die SDF 2 sind dies die Eingangs- und Ausgangsspannung (Netzspannung) sowie die Netzfrequenz der Eingangs- und Ausgangsspannung. Die USV hat zusätzlich noch Steuerleitungen zur SCADA. Die SCADA wiederum besitzt Steuerleitungen zur Überwachung der Ausgangsspannung (Spannung und Frequenz) der SDF 2 und zum Steuern des der USV 2 nachgeschalteten Rechenzentrums I und des IuK-Netzübergangsknotens. In Spalte 5 der Tabelle B.6 ist die Zuordnung für die SDF 2 beispielhaft aufgetragen.
- Kombination jedes Attributs eines Prozessteils mit Leitworten:** Wie in Spalte 6 der Tabelle B.6 am Beispiel der SDF 2 dargestellt, werden mögliche Abweichungen der Prozessvariablen (Attribute) mit geeigneten Leitwörtern (Tabelle B.5) bezeichnet.
- Risikoidentifikation:** Das Expertenteam diskutiert dann, ob die durch das gewählte Leitwort beschriebene Abweichung ein Problem oder Gefährdung darstellt. Der Moderator beginnt die Diskussion durch Fragen die er aus der Kombination der Attribute und Leitworte bildet. In dem vorliegenden Beispiel könnten die Fragen lauten:
 - Welche unmittelbare Folge hat eine geringere Ausgangsspannung des SDF 2? oder
 - Was passiert, wenn die Ausgangsspannung der USV 2 zu hoch ist?.
- Diskussion möglicher Ursachen und Folgen:** Im Zuge der Diskussion erörtert das Expertenteam auch die **Auswirkungen** der identifizierten Gefährdungen. Zum Beispiel folgt aus dem Ausfall der Ausgangsspannung der SDF 2 (Zeile 1.2.2.1) das Herunterfahren des USV 2 Netzes. Hierdurch kommt es zum Ausfall des Rechenzentrum I und des IuK-Netzübergangsknotens. Darüber hinaus stellt der Moderator auch Fragen bezüglich **möglicher Ursachen** der betrachteten Fehlerzustände. Im Rahmen des Risikomanagements ist hierbei darauf zu achten alle potentiellen EMI-Ursachen zu erfassen. Bei der Beurteilung des EMI-Risikos der im Gebäude 5 installierten

¹¹ siehe Anhang A

Tabelle B.6 Auszug (Gegenstand & Abweichungen) aus dem HAZOP Arbeitsblatt zu Beurteilung der EMI-Gefährdung des Gebäude 5

1	2	3	4	5	6	...
Ref. Nr.	Systembestandteil	Gegenstand		Abweichung		...
		Komponente	Prozessschritt	Prozessvariable	Leitwort	
1.2.1.1	Geb. 5	SDF 2	Regelbetrieb	Eingangsspannung	anders als (Überschwinger)	...
1.2.1.2					anders als (Unterschwinger)	...
1.2.2.1				Ausgangsspannung	kein	...
1.2.2.2					weniger	...
1.2.2.3					mehr	...
1.2.2.4					anders als (Überschwinger)	...
1.2.2.5					anders als (Unterschwinger)	...
1.2.3.1				Netzfrequenz (Aus)	weniger	...
1.2.3.2					mehr	...
1.2.3.3					anders als (Frequenzschwankungen)	...

Tabelle B.7 Auszug (Ursachen & Auswirkungen) aus dem HAZOP Arbeitsblatt zu Beurteilung der EMI-Gefährdung des Gebäude 5

1	...	7	8	9	10	...		
Ref. Nr.	...	EMI-Quelle	mögliche Ursache		Auswirkungen	...		
			Ort	Koppelpfad				
1.2.1.1	...	1.) M = 2	a.) Parkplatz P3 b.) Kirchhoff Weg c.) vor Gebäude 5* d.) in Gebäude 5*	a. - c. gestrahlt durch Wand (0 dB)	keine maßgeblichen Folgen	...		
1.2.1.2	...	2.) M = 3			d. direkte Einstrahlung	Herunterfahren des USV 2 Netz → Ausfall Rechenzentrum I und IuK-Netzübergangsknoten	...	
1.2.2.1	...	3.) M = 4					Zerstörung von Baugruppen in USV 2 oder MDF Geb. 2A/B & Geb. 4	...
1.2.2.2	...	4.) M = 5						Herunterfahren des USV 2 Netz → Ausfall Rechenzentrum I und IuK-Netzübergangsknoten
1.2.2.3	...					keine maßgeblichen Folgen	...	
1.2.2.4			
1.2.2.5			
1.2.3.1	...				keine maßgeblichen Folgen	...		
1.2.3.2			
1.2.3.3			

* nur M ≥ 4

Systembestandteile sind IEMI-Störquellen mit einer Mobilität von 2 oder höher zu betrachten. Anhand des Lageplanes ist ersichtlich, dass sich diese Quellen auf dem Kirchhoff Weg und dem Parkplatz 3 befinden können. Die in diesen Fällen relevante Kopplung erfolgt durch das gestrahlte Feld, das durch die Wand in den Innenraum des Gebäude 5 eindringt. IEMI-Störquellen mit einer Mobilität von 4 und 5 können sich zudem unmittelbar vor oder in dem Gebäude 5 befinden.

- Entwicklung von Abstellmaßnahmen:** Das Expertenteam prüft, ob **Schutzeinrichtungen** vorhanden sind und ob diese geeignet sind erkannte Risiken zu begrenzen oder das Eintreten der Folgen zu vermeiden. In dem vorliegendem Beispiel ist hierbei zu prüfen, ob Filter der Eingangsbzw. Ausgangsspannung des SDF geeignet sind die Ausbreitung der Spannungsschwankungen und eingekoppelten Störspannungen zu reduzieren oder zu verhindern. Darüber hinaus könnten vorhandene Überspannungsableiter evtl. auftretende Überschwinger oder Überspannungen so weit reduzieren können, dass Beschädigungen nachgeschalteter Systemteile sicher verhindert werden. Für verbleibende nicht tolerierbare Risiken entwickelt das Expertenteam abschließend Maßnahmen für die Risikomitigation. So wäre ein Notstromaggregat geeignet den Ausfall der Ausgangsspannung des SDF zu kompensieren und den Betrieb der nachgeschalteten Systemteile sicherzustellen. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu berücksichtigen, dass die fiktive Infra-

Tabelle B.8 Auszug (Schutzeinrichtungen & Maßnahmen) aus dem HAZOP Arbeitsblatt zu Beurteilung der EMI-Gefährdung des Gebäude 5

1	...	11	12
Ref. Nr.	...	Schutzeinrichtungen	mögliche Maßnahmen
1.2.1.1	...	1.) Überspannungsableiter 2.) Eingangsfilter	
1.2.1.2	...	Eingangsfilter	
1.2.2.1	...		Notstromaggregat
1.2.2.2	...		Überwachung der Ausgangsspannung
1.2.2.3	...	Spannungsbegrenzer	Stützkondensator
1.2.2.4	...	1.) Überspannungsableiter 2.) Ausgangsfilter	Netzfilter
1.2.2.5	...	Ausgangsfilter	
1.2.3.1	...		
1.2.3.2	...		
1.2.3.3	...		

struktur in weiten Teilen bereits redundant und über eine USV gepuffert mit elektrischer Energie versorgt. Weitere mögliche Mitigationsmaßnahmen für Abweichungen der Ausgangsspannung des SDF sind die Überwachung der Ausgangsspannung in Kombination mit einer Umschaltung auf die alternative Energieeinspeisung.

8. **Fortsetzung der Analyse mit einem anderen Leitwort, Attribut oder Prozessteil:** Die dargestellte HAZOP Analyse ist ebenfalls für die USV 2 und die Leittechnik (SCADA) durchzuführen. Danach ist der Analyseprozess für die verbleibenden Prozessschritte zu wiederholen.
9. **Dokumentation:** Die erkannten nicht tolerierbaren Risiken, einschließlich ihrer Ursachen, Folgen und Maßnahmen, werden in einem HAZOP Arbeitsblatt (Tabelle B.6, Tabelle B.7 und Tabelle B.8) erfasst und dokumentiert.

B.4 Anwendung der Structured What-if Technique (SWIFT)

Aufgabenstellung:

Mit Hilfe der SWIFT sollen die möglichen EMI-Gefährdungen für die im Gebäude 1 installierten Systemteile der fiktiven Infrastruktur identifiziert und erfasst werden.

Durchführung:

Die einzelnen Schritte der Durchführung der SWIFT sind im Abschnitt 5.3.3 auf Seite 52 beschrieben.

1. **Vorbereitung:** Vor Beginn der Analyse erstellt der Moderator eine Liste aus Schlüsselworten und Frage, die dem zu betrachtendem System angepasst sind. In dem Gebäude 1 sind Systeme der elektrischen Energieversorgung (SDF 1, USV 1 und SCADA) installiert. Daher sind bei der EMI-Risikobeurteilung Schlüsselworte aus dem Bereich der Energieversorgung (zur Beschreibung des Zustandes der installierten Systeme) und der Feldeinkopplung zu wählen. Mögliche Schlüsselwörter sind:

- Unterspannung / Überspannung,
- Spannungseinbruch,
- Ausfall,

- Herunterfahren,
- Funktionsstörung,
- Störspannung und
- Feldexposition.

Mit Hilfe der vorbereiteten Fragen lenkt der Moderator die Expertendiskussion. Die Fragen werden aus den im Kapitel 5.3.3¹² vorgestellten Phrasen, der Bezeichnung von Teilsystemen und den Schlüsselworten gebildet. Die EMI-Risikobeurteilung der in Gebäude 1 installierten Systemteile könnte mit Hilfe folgender Fragen gelenkt werden:

- Was wäre wenn, das Gebäude 1 durch eine IEMI-Quelle der Mobilität $M = 3$ ($M = 2$) auf dem Parkplatz P1 (P3) bestrahlt würde?
 - Könnte jemand eine IEMI-Quelle der Mobilität M / vom Typ X in das Gebäude 1 einbringen?
 - Was würde geschehen, wenn die Ausgangsspannung des SDF 1/ der USV 1 eine Überspannung/ Unterspannung/ Spannungseinbrüche aufweist?
 - Was würde geschehen, wenn SDF 1/ USV 1 ausfällt / herunterfährt hat?
 - Könnte jemand auf der Signalleitung der SCADA ein falsches Steuersignal erzeugen?
 - ...
2. **Systembeschreibung und Vorgaben:** Die zu betrachtenden Teilsysteme und deren Betriebsbedingungen sind in Anhang A beschrieben.
 3. **Erfassung vorbekannter Risiken:** Durch den Moderator werden vorbekannte Risiken, frühere Erfahrungen und EMI-Ereignisse, bekannte Steuerungs- und Schutzelemente sowie Einschränkungen erfragt.
 - Vorbekannte Risiken → keine
 - frühere Erfahrungen und EMI-Ereignisse → Es sind keine bekannt
 - bekannte Steuerungs- und Schutzelemente
→ Redundante Speisung Geb. 2A/B und Geb. 4
→ USV
→ Überspannungsschutz an der EVU Einspeisung
 - Einschränkungen → keine
 4. **Auswahl eines Prozessschrittes:** Der zu betrachtende Prozessschritt ist der Regelbetrieb bei 70% Auslastung.
 5. **Diskussion von Abweichungen:** Mit Hilfe der vorbereiteten Fragen lenkt der Moderator die Diskussion des Expertenteams. Die Diskussion könnte folgenden Beginn haben¹³:

F: Was wäre wenn, Gebäude 1 durch eine IEMI-Quelle ($M = 3$) auf Parkplatz P1 bestrahlt würde?
 A: Feldeinkopplung in das Gebäude 1. Die Wände sind gemauert und weisen unterhalb 1 GHz gegenüber elektromagnetischen Feldern keine Dämpfung auf ($D = 0$ dB).
 F: Könnte diese Feldeinkopplung zu Störungen in Teilsystemen führen?
 A: Ja, Störsignal in SCADA.
 A: Als Folge Herunterfahren des USV-Netzes 1. Hierdurch Herunterfahren des Rechenzentrums II, IuK-Leitzentrale und Server in Geb. 2A.
 ...

Zum gegebenen Zeitpunkt sollte der Moderator durch ähnliche Fragen die Diskussion auf die Auswirkungen abweichender Betriebsparameter der USV 1 und der Leittechnik (SCADA) lenken. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, das Expertenteam anzuregen potentieller Szenarien (Bedrohungsszenarien) einschließlich der hierbei hervorgerufenen Effekte und deren Auswirkungen zu diskutieren.

¹² Seite 52

¹³ F - Frage des Moderators, A - Antwort der Experten

6. **Risikoidentifikation:** Zum Ende jeder Expertendiskussion werden erkannte Risiken zusammengefasst und vorhandene Steuerungsmöglichkeiten betrachtet. Mögliche **Auswirkungen** sind:
- Temporärer Ausfall der im Gebäude 2A installierten Server,
 - Ausfall des Rechenzentrum II, hierdurch Verlust der Redundanz und Einschränkung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems und
 - Ausfall IuK-Leitzentrale.
- Mögliche **Steuerungsmöglichkeiten** sind:
- Manuelles Wiederanfahren der USV 1 Netzes,
 - Filtern der Signalleitungen und
 - Schirmung der betroffenen Anlagenteile (schirmende Gehäuse).
7. **Evaluation von Abstellmaßnahmen:** Abschließend prüft das Expertenteam, ob die diskutierten Steuerungsmaßnahmen geeignet und wirksam sind und fasst das Beratungsergebnis in einer Stellungnahme zur Wirksamkeit der Risikosteuerung zusammen. Ist das verbleibende Risiko zu hoch bzw. nicht tolerierbar, sollte das Expertenteam darüber hinaus weitere Maßnahmen zur Risikobehandlung betrachten.
8. **Dokumentation:** Erkannte Risiken, Bedrohungsszenarien, deren Auswirkungen als auch voraussichtliche Maßnahmen können z.B. in Textform, anhand eines Arbeitsblattes (ähnlich des HA-ZOP Arbeitsblattes) oder in Form eines Bow Tie Diagrammes dokumentierte werden.

B.5 Anwendung der Bow Tie Analysis (BTA)

Aufgabenstellung:

Mit Hilfe der BTA sollen die möglichen EMI-Gefährdungen für die im Gebäude 1 installierten Systemteile der fiktiven Infrastruktur identifiziert und erfasst werden.

Durchführung:

Die einzelnen Schritte der Durchführung der BTA sind im Abschnitt 5.3.6 auf Seite 57 beschrieben.

1. **Definition Top Event - Gefährdung:** Der **Startpunkt** einer Bow Tie Analyse ist die in der Aufgabenstellung vorgegebene **Gefährdung**, die Exposition des Gebäudes 1 durch ein elektromagnetisches Feld. Ein hieraus folgende Fehlerereignis bildet den **zentralen Knoten** des zu erstellenden Bow Tie Diagrammes. Aus der Beschreibung der fiktiven Infrastruktur geht hervor, dass

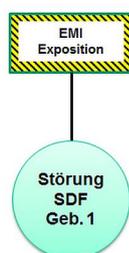


Abb. B.1 Arbeitsschritt 1 - Definition des Top Event

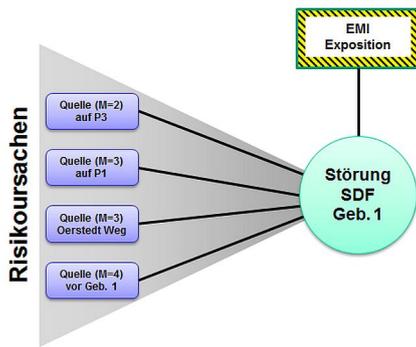


Abb. B.2 Arbeitsschritt 2 - Identifikation der Ursachen

im Gebäude 1 die Netzstation 1 (SDF 1), eine nachgeschaltete unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV 1) sowie der zugehörigen Leittechnik (SCADA) installiert sind. Als Top Event wird hier die Störung der SDF 1 gewählt (s. Abb. B.1). Für den Start der BTA ist die unspezifische Beschreibung der Störung zunächst ausreichend. Wenn notwendig kann das Fehlerereignis im Laufe der BTA weiter detailliert werden. Als alternative Top Events wären auch die Störung der USV 1 und der SCADA möglich. Für eine umfassende um vollständige Darstellung der potentiellen EMI-Gefährdungen müsste für jedes mögliche Top Event ein Bow Tie Diagramm erstellt werden.

2. **Identifikation Ursachen:** Im zweiten Schritt der BTA sind mögliche Ursachen der betrachteten Gefährdung zu identifizieren und links von dem Top Event aufzutragen. In dem aktuellen Beispiel könnte die EMI-Exposition von einer Störquelle der Mobilität $M = 2$ auf dem Parkplatz P3 ausgehen. Daher wird diese identifizierte Ursache in dem oberen Kasten auf der linken Seite des Bow Tie Diagramms vermerkt und der Kasten mit dem Top Event verbunden. In analoger Weise werden Störquellen auf dem Parkplatz P1, dem Oerstedt Weg und vor dem Gebäude 1 in das Diagramm eingetragen (s. Abb. B.2). Links von dem Top Event baut sich so ein Fächer möglicher Ursachen auf. Für eine weitere Detaillierung des Diagramms können links neben den Ursachen mögliche generische Störquellenklassen aufgetragen werden und mit den jeweiligen Ursachen verbunden werden, so dass sich ein mehrstufiger Ursachenbaum ergibt.
3. **Mögliche Auswirkungen:** Nach den Ursachen betrachtet das Expertenteam alle möglichen Auswirkungen, die ohne Mitigations- und Schutzmaßnahmen aus dem betrachteten Fehlerereignis

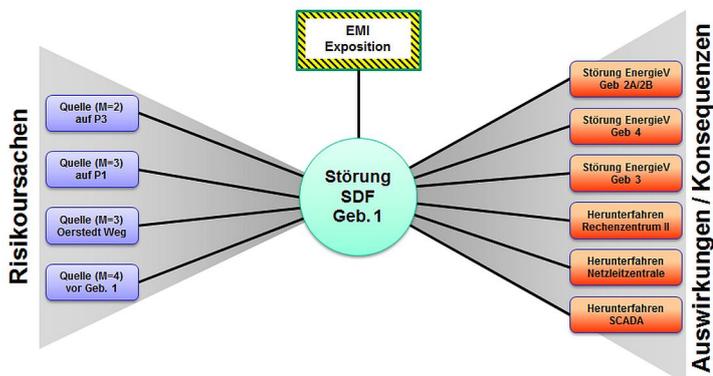


Abb. B.3 Arbeitsschritt 3 - Mögliche Auswirkungen

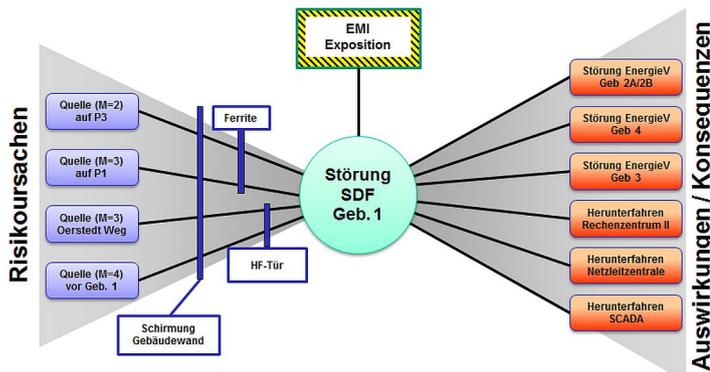


Abb. B.4 Arbeitsschritt 4.1 - Barrieren

folgen können. In dem aktuellen Beispiel würde eine Störung des SDF 1 zu einer Störung der Energieversorgung der Gebäude 2A/B, 3, 4 führen. Eine Störung der SDF 1 könnte darüber hinaus das Herunterfahren des der USV 1 nachgeschalteten Teilsysteme initiieren. Aus dem Netzplan der elektrischen Energieversorgung¹⁴ der fiktiven Infrastruktur geht hervor das hiervon die Netzleitzentrale, das Rechenzentrum II und die Leittechnik (SCADA) betroffen sein könnten. Diese potentiellen Auswirkungen werden, wie in Abbildung reffig:B:BTA3 dargestellt, rechts von dem betrachteten Fehlerereignis aufgetragen und mit diesem verbunden.

- 4. Barrieren / Maßnahmen:** Schwerpunkt des abschließenden Schrittes der BTA bildet die Diskussion von Mitigations- und Schutzmaßnahmen. So sind die Schirmung der Gebäudewände oder die Verwendung geschirmten Mantelleitungen¹⁵ im Energieversorgungsnetz geeignet die Einkopplung in das Gebäude 1 zu verringern oder zu unterbinden. Die Einkopplung von Störquellen, die sich nördlich des Gebäudes befinden kann darüber hinaus durch die Verwendung einer HF-Tür weiter reduziert werden. Störquellen, die sich in der Nähe von in das Gebäude hineinlaufenden Kabeln befinden besitzen das Potential in diese Störsignale einzukoppeln. Diese leitungsgeführten Störsignale können durch Ferrite unterdrückt und eine Störung des SDF 1 verhindert werden. Diese Schutzmaßnahmen gegenüber den identifizierten Ursachen (Störquellen) werden

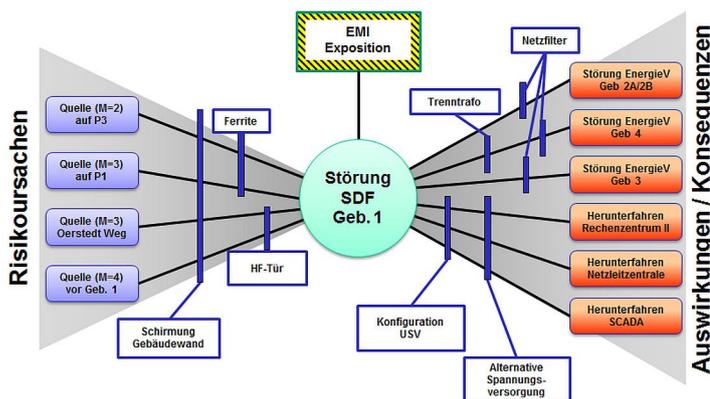


Abb. B.5 Arbeitsschritt 4.2 - Mitigationsmaßnahmen

¹⁴ Abbildung A.4 auf Seite 171

¹⁵ z.B.: Typ NYM(ST)-J

in das Bow Tie Diagramm als Barrieren auf den zugehörigen Verbindungslinien vermerkt (s. Abbildung B.4). In gleicher Weise werden die Mitigationsmaßnahmen, die bei Auftreten des Fehlerzustandes das Eintreten der Auswirkungen verhindern oder zumindest deren Stärke verringern, als Barrieren auf den Verbindungslinien zwischen dem Fehlerzustand und den Auswirkungen vermerkt (s. Abbildung B.5). So können die Gebäudeeinspeisungen der Gebäude 2A/B, 3 und 4 durch Netzfilter und/oder Trenntransformatoren gegenüber Störungen der SDF 1 geschützt werden. Die USV 1 könnte durch eine veränderte Einstellung toleranter gegenüber Störungen des SDF 1 konfiguriert werden. Durch eine alternative Spannungsversorgung (Notstromaggregat) könnte der Ausfall des SDF 1 bzw. der USV 1 kompensiert und der Betrieb der in Gebäude 4 installierten Systemteile aufrechterhalten werden.

5. **Dokumentation:** Das im Zuge der BTA erstellte Bow Tie Diagramm (Abbildung B.5) visualisiert alle Ursachen und Auswirkungen eines betrachteten Fehlerzustandes einschließlich möglicher Mitigations- und Schutzmaßnahmen.

Anhang C

Bewertung von RF-Modulatoren

In diesem Anhang werden technische Grundlagen der in Kapitel 7 verwandten Abschätzungen, insbesondere dem Zusammenhang zwischen Operationsfrequenz und Baugröße, dargelegt.

C.1 Bewertung Virtual Cathode Oscillator (VIRCATOR)

Im VIRCATOR wird das RF-Feld durch zwei Prozesse generiert. Zum einen führt die Oszillation der virtuellen Kathode zur Erzeugung eines elektromagnetischen Feldes. Unabhängig hiervon erzeugt auch das Schwingen von Elektronen zwischen der Kathode und der virtuellen Kathode zur Synchrotronstrahlung.

Die Resonanzfrequenz der zwischen der Kathode und der virtuellen Kathode reflektierten Elektronen in einem axialen VIRCATOR ist durch die Beziehung [111]:

$$f_{\text{axial}} = \frac{c}{2\pi \cdot d_{\text{KA}}} \cdot \cosh^{-1} \left(\frac{eU_0}{m_e c} + 1 \right) \quad (\text{C.1})$$

gegeben, mit dem Kathoden-Anoden-Abstand d_{KA} , der Ladung e und der Ruhemasse m_e eines Elektrons, sowie der Speisespannung U_0 des VIRCATORS.

Da diese beiden beschriebenen Prozesse nicht zwingend mit der selben Frequenz ablaufen, kann das ausgekoppelte Strahlungsfeld zwei dominierende Frequenzen aufweisen. Wird der Raum um die virtuelle Kathode als, auf die Elektronenoszillation abgestimmter, Hohlraumresonator ausgeführt, wird die Bildung der virtuellen Kathode durch die Feldresonanz auf die Frequenz der Elektronenoszillation synchronisiert und die Effizienz des VIRCATORS gesteigert. In [108] wird der Einfluss eines abstimmbaren Resonators auf das abgestrahlte Feld experimentell untersucht. Die Zeichnung des hierfür aufgebauten und vermessenen axialen VIRCATORS ist in Abbildung C.1 (a) dargestellt. Durch Verschieben der variablen Wand des Resonators konnte die Frequenz des ausgekoppelten elektromagnetischen Feldes zwischen 3,1 und 3,8 GHz ($\Delta f \leq 1\%$) variiert werden (Abb. C.1 (b)). Bei der Bewertung dieser Ergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, dass durch die Variation des Resonators die Bandbreite des abgestrahlten Feldsignals in Abhängigkeit von der Resonatortiefe zwischen 1% und 9% betragen sowie die ausgekoppelte Energiedichte um bis zu ± 4 dB vom Mittelwert abweichen kann.

Wesentliches Ziel der coaxialen Bauform des VIRCATORS (Abb. 7.12 (b)) ist die coaxiale Feldauskopplung. In dieser Bauform sind die Kathode als auch die Anode als coaxial angeordnete Zylinder ausgeführt. Hierdurch werden die Elektronen radial auf die Zylinderachse hin emittiert und die virtuelle Kathode bildet sich innerhalb der Anode in Form eines Torus aus. Bei idealer Symmetrie der Bauform bildet sich der TM_{01} Mode aus. In [150] wird gezeigt, dass geringe Störungen der angenommenen Symmetrie die Ausbildung des TE_{11} Modes begünstigen. Beim Bau eines coaxialen

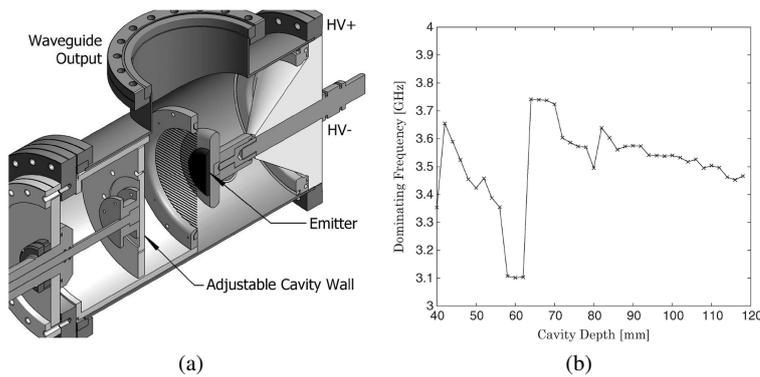


Abb. C.1 Zeichnung (a) und Resonanzfrequenz (b) eines axialen Vircators mit variablem Resonator; Radius VIRCATOR (innen) = 50,8 mm (3"), Radius Wellenleiter (innen) = 76,2 mm (2"), Radius Emitter = 27,5 mm. (©2010 IEEE. Reprinted, with permission, from C. Moeller, et al., Experimental Studies of the Influence of a Resonance Cavity in an Axial Vircator, IEEE Trans. Plasma Sci., 38(6):1318, June 2010 [108].)

VIRCATORS wird dieser Mode bevorzugt, da er geringere Anforderungen an die Einhaltung der Axialsymmetrie stellt und zudem eine axiale Feldauskopplung ermöglicht. Die Resonanzfrequenz der zwischen der Kathode und der virtuellen Kathode reflektierten Elektronen in einem koaxialen VIRCATOR kann über die Gleichung [111]:

$$f_{\text{koaxial}} = \frac{c}{2\pi(r_c - r_a)} \cdot \cosh^{-1} \left(\left(\frac{eV_o}{m_e c} + 1 \right) \sqrt{\frac{r_a}{r_c}} \right) \quad (\text{C.2})$$

berechnet werden, mit dem Radius der zylindrischen Kathode r_c und dem Radius der Anode r_a .

Das in Abbildung C.2 (b) dargestellte Spektrum des abgestrahlten Feldsignals zeigt zwei deutlich ausgeprägte Spitzen bei ca. 2,5 GHz und 3,5 GHz. Einsetzen der Abmessungen in Gleichung C.2 ergibt eine theoretische Resonanzfrequenz von 4,2 GHz.

Eine systematische und gezielte Auslegung auf eine vorgegebene Frequenz (bzw. Frequenzbereich) erfordert akademische Kenntnisse der Elektrodynamik in Hohlraumresonatoren sowie der Erzeugung und Steuerung von Elektronenstrahlen, wie sie in einem Ingenieurstudium vermittelt werden. Unter Verzicht auf die gezielte Auslegung ist es einem Facharbeiter, mit entsprechenden

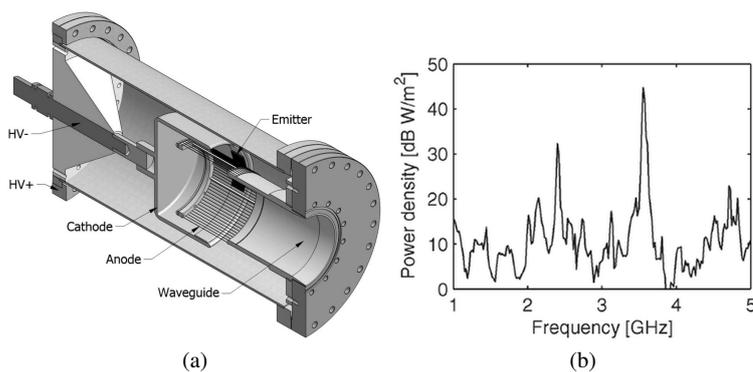


Abb. C.2 Zeichnung (a) und Feldspektrum (b) eines koaxialen Vircators; Radius VIRCATOR (innen) = 76,2 mm (3"), Radius Kathode = 68 mm, Länge Emitter = 20 mm, Radius Anode = 53 mm. (©2010 IEEE. Reprinted, with permission, from C. Moeller, et al., Proof of Principle Experiments on Direct Generation of the TE₁₁ Mode in a Coaxial Vircator, IEEE Trans. Plasma Sci., 38(1):26, Jan 2010 [112].)

Tabelle C.1 Baugröße von VIRCATOREN bei ausgesuchten Operationsfrequenzen

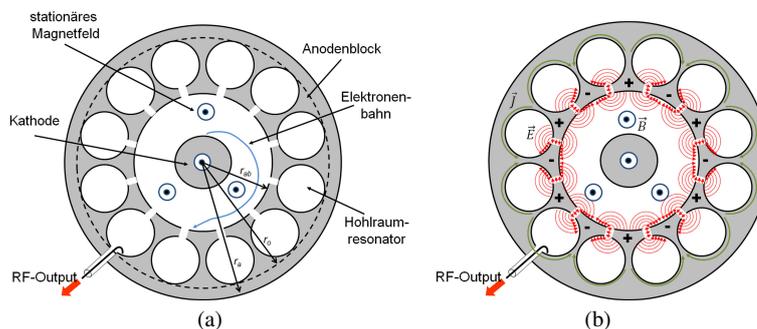
Band	Frequenz f GHz	Wellenlänge λ m	Radius r_a m	Länge L m	Baugröße V_{bau} m^3	Mobilität
			$r_a = 0,5\lambda$	$L = 2,5\lambda$	$V_{\text{bau}} = 4r^2L$	
UHF	0,30	1,0000	0,5000	2,5000	2,5	3 - mobil
	0,65	0,4615	0,2308	1,1538	0,25	3 - mobil
L	1,00	0,3000	0,1500	0,7500	0,068	4 - sehr mobil
	1,50	0,2000	0,1000	0,5000	0,020	4 - sehr mobil
S	2,00	0,1500	0,0750	0,3750	$8,4 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
	3,00	0,1000	0,0500	0,2500	$2,5 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
C	4,00	0,0750	0,0375	0,1875	$1,1 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
	6,00	0,0500	0,0250	0,1250	$0,31 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
	8,00	0,0375	0,0188	0,0938	$0,13 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil

Erfahrungen in der Vakuum- und Hochspannungstechnik möglich, mit Hilfe der frei zugänglichen Informationen, einen einfachen VIRCATOR aufzubauen. Durch seinen sehr einfachen Aufbau kann dieser zudem weitestgehend aus frei erhältliche Komponenten aufgebaut werden. So wurden beim Aufbau der die in [111] untersuchten VIRCATOREN handelsübliche Vakuum Amaturen¹ als Grundgeäuse genutzt. Die Kathode, das Anodengitter, die Wellenleiter sowie weitere Amaturen wurden aus nicht rostendem Stahl gefertigt. Wesentliche Herausforderungen beim Bau eines VIRCATORS ist die Wahl des Emittiermaterials² sowie der hochspannungsfeste und vakuumdichte Aufbau, insbesondere die vakuumdichte Auskoppelung des RF-Feldes.

Die charakteristischen Abmaße des VIRCATORS skalieren mit der Wellenlänge des generierten Feldes. Als Daumenregel ist der Außendurchmesser eines axialen VIRCATORS größer oder gleich der erzeugten Wellenlänge. Bei der koaxialen Bauform liegt dieser im Bereich des zehnfachen der Wellenlänge. Die Länge entspricht in guter Näherung dem 2 - 2,5 fachen des Durchmessers. Bei einfachen (nicht vakuumsiegelten) Bauformen werden für den Betrieb Vakuumamaturen (z.B. Vakuumpumpen) benötigt, die bei der Abschätzung des Bauvolumens zu berücksichtigen sind.

C.2 Bewertung Magnetron

In dem Grundmode des Resonatorsystems, dem sogenannten π -Mode, schwingen benachbarte Hohlraumresonatoren um π versetzt zueinander an (Abb. C.3 (b)). Die gesamte Reihe von Resonatoren

**Abb. C.3** Prinzip eines Magnetron, (a) prinzipielle Bauform, (b) Feldverteilung

¹ Der axiale VIRCATOR wurde in einem 8" - 6" -Reducing Tee (mit Innendurchmessern von 6" bzw 4") eingebaut. Der koaxiale VIRCATOR in einem 8" Rohrstutzen (mit einem Innendurchmesser von 6") eingebaut.

² Am gebräuchlichsten ist die Verwendung von Samt oder Seide

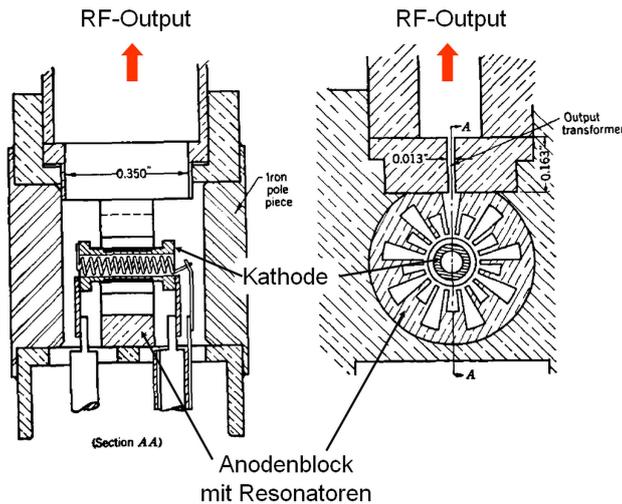


Abb. C.4 Prinzipzeichnung eines Magnetron mit Rising-Sun Resonator (From G. B. Collins, *Microwave Magnetrons*, Radiation Laboratory Series 6, p. 20, McGraw Hill, Jan. 1948 [151], with permission.)

bildet somit eine Verzögerungsleitung, auf der eine umlaufende elektromagnetische Welle entsteht. Das in Abbildung C.4 dargestellte Rising-Sun Resonatorsystem besteht aus alternierend angeordneten großen und kleinen Resonatoren. Bei dieser Bauform liegt der gewünschte π -Mode zwischen den Gruppen der, zu den großen Resonatoren zugehörigen, langwelligigen Schwingungsmoden und den kurzwelligigen Schwingungsmoden der kürzeren Resonatoren. Aus dieser Lage des π -Mode resultiert eine sehr gute Separation von Resonatormoden und hohe Frequenzstabilität des erzeugten RF-Feldes.

Im Laufraum wirkt die elektrische Feldstärke dieser umlaufenden elektromagnetischen Welle zusätzlich auf die Elektronen. Je nach Phasenlage der Welle werden die Elektronen in tangentialer Richtung beschleunigt oder abgebremst. Als Folge kommt es zu einer Dichtemodulation des Elektronenplasmas im Laufraum. Im eingeschwingenen Zustand führt die Dichtemodulation zu einer Verstärkung der umlaufenden Welle. Wie in Abbildung C.3 und Abbildung C.4 dargestellt, kann die erzeugte RF-Energie mit Hilfe von Koaxialleitungen oder Hohlleitern aus einzelnen Hohlraumresonatoren ausgekoppelt werden. In einer alternativen Bauform wird die RF-Energie in axialer Richtung an der Kopfplatte des Laufraumes ausgekoppelt (Abb. 7.14 und Abb. C.6). Da hierbei die Auskoppelung parallel aus mehreren Resonatoren erfolgt erhöht sich der realisierbare Wirkungsgrad.

Die Auslegung eines Magnetrons ist komplex und erfolgt in der Regel auf der Basis numerischer Analysen. In Collins Buch *Microwave Magnetrons* [151] ist eine detaillierte Beschreibung des Magnetron Designs einschließlich graphischer Lösungen für die wesentlichen Designparameter zu finden. Im Zuge der Diskussion der Designgleichungen wird gezeigt, dass die Frequenz des π -Mode knapp unterhalb der Frequenz liegt bei der die Länge der Resonatoren $\lambda/4$ entsprechen.

$$f_{\pi} = \frac{c}{\lambda_{\pi}} \leq \frac{c}{4(r_o - r_{ab})} \quad (\text{C.3})$$

Weiterhin wird gezeigt, dass der Radius der Anodenbohrung (r_{ab}) im Bereich eines Zehntels bis zu einem Sechstel der Wellenlänge betragen kann.

$$\frac{\lambda_{\pi}}{10} \leq r_{ab} \leq \frac{\lambda_{\pi}}{6} \quad (\text{C.4})$$

Einsetzen des oberen Limits für die Anodenbohrung aus Gleichung C.4 in Gleichung C.3 liefert:

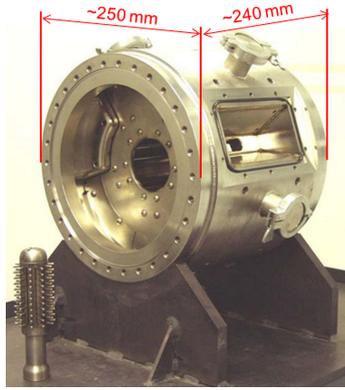


Abb. C.5 Anodenblock eines relativistischen L-Band Magnetron; $f_c = 1,3$ GHz, $\hat{P}_{out} = 3,1$ MW (©Crown copyright 2002, From The High Power Microwave Facility: ORION, QinetiQ, 2002, With permission.)



Abb. C.6 Anodenblock eines relativistischen Magnetron mit axialer Auskopplung. (© 2010 IEEE. Reprinted, with permission, from J. Benford, History and future of the relativistic magnetron, 2010 Int. Conf. on the Origins and Evolution of the Cavity Magnetron, p. 44, April 2010 [113].)

$$r_o \leq \frac{5}{12} \lambda_\pi \approx 0,41 \lambda_\pi \quad (\text{C.5})$$

Unter Berücksichtigung der notwendigen Wandstärke der Resonatoren zum Außenraum lässt sich aus dieser Beziehung der Außenradius der Anode abschätzen zu:

$$r_a \geq \frac{\lambda_\pi}{2} \quad (\text{C.6})$$

Bei Anwendung dieser Abschätzung ist zu beachten, dass die Gleichung C.3 nur für im π -Mode operierende Magnetrons gültig sind. Bei Betrieb im 2π -Mode halbieren sich die Werte näherungsweise. In [7] wird die Gültigkeit der Gleichung C.3 anhand von Daten realer Magnetrons diskutiert. Hierbei wird gezeigt, dass die über Gleichung C.3 bestimmten Werte der Frequenz f_π bis zu 60% über den gemessenen Operationsfrequenzen f_c der Magnetrons liegen können. Für die Abschätzung der Baugröße eines Magnetrons bzw. dessen Operationsfrequenz (bei gegebener Baugröße) im Rahmen des EMI-Risikomanagements ist diese Genauigkeit ausreichend.

C.3 Bewertung Magnetically Insulated Line Oscillator (MILO)

In Abbildung C.7 ist die Zeichnung eines am US Air Force Research Laboratory aufgebautem 1,2 GHz MILO abgebildet [114, 116]. Anhand dieses Experimentalsystems wurden grundlegende Eigenschaften von MILOs analytisch, numerisch und experimentell untersucht. Der MILO wurde in Rohrstützen mit einem Innendurchmesser von 285,75 mm eingebaut und bis auf $6,67 \cdot 10^{-3}$ Pa evakuiert. Das Resonatorsystem³ ist 247,65 mm und der Kollektor 301,4 mm lang. Der abgebildete MILO hat eine Gesamtlänge von ca. 1.570 mm, einschließlich der Antennabdeckung. Bezogen auf die Wellenlänge λ des generierten RF Feldes ergeben sich die relativen charakteristischen Abmaße:

$$r_a \approx 0,57 \cdot \lambda \quad (\text{C.7})$$

³ Gemessen von der ersten Blende bis zum Kollektor.

Tabelle C.2 Baugröße von Magnetron bei ausgesuchten Operationsfrequenzen

Band	Frequenz f GHz	Wellenlänge λ m	Radius r_a m	Länge L m	Baugröße V_{bau} m^3	Mobilität
			$r_a = 0,75\lambda$	$L = 0,6\lambda$	$V_{\text{bau}} = 4r^2L$	
UHF	0,30	1,0000	0,7500	0,600	1,35	3 - mobil
	0,65	0,4615	0,3462	0,277	0,13	4 - sehr mobil
L	1,00	0,3000	0,2250	0,180	0,036	4 - sehr mobil
	1,50	0,2000	0,1500	0,120	$10,8 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
S	2,00	0,1500	0,1125	0,090	$4,56 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
	3,00	0,1000	0,0750	0,060	$1,35 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
C	4,00	0,0750	0,0563	0,045	$0,57 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
	6,00	0,0500	0,0375	0,030	$0,17 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
	8,00	0,0375	0,0281	0,023	$0,07 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil

Tabelle C.3 Baugröße von relativistischen Magnetron bei ausgesuchten Operationsfrequenzen

Band	Frequenz f GHz	Wellenlänge λ m	Radius r_a m	Länge L m	Baugröße V_{bau} m^3	Mobilität
			$r_a = 0,75\lambda$	$L = 2\lambda$	$V_{\text{bau}} = 4r^2L$	
L	1,00	0,3000	0,2250	0,60	0,122	4 - sehr mobil
	1,50	0,2000	0,1500	0,40	$36,0 \cdot 10^{-3}$	4 - sehr mobil
S	2,00	0,1500	0,1125	0,30	$15,18 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
	3,00	0,1000	0,0750	0,20	$4,50 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
C	4,00	0,0750	0,0563	0,15	$1,90 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
	6,00	0,0500	0,0375	0,10	$0,56 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
	8,00	0,0375	0,0281	0,075	$0,24 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil

$$L_{\text{ges}} \approx 6 \cdot \lambda \quad (\text{C.8})$$

Der Innenradius des Zylinderhohlleiters lässt sich über die Ausbreitungsbedingungen des angestrebten TM_{01} Mode bestimmen. In einem Zylinderhohlleiter ist der TM_{01} Mode ausbreitungsfähig, wenn gilt:

$$r_a \geq \frac{p_{01}}{2\pi} \lambda_c = \frac{2,405}{2\pi} \lambda_c = 0,38\lambda_c \quad (\text{C.9})$$

wobei p_{mn} die n-te Nullstelle der Besselfunktion J_m bezeichnet. Um den TE_{01} Mode nicht anzuregen, sollte der r_a ebenfalls die Beziehung

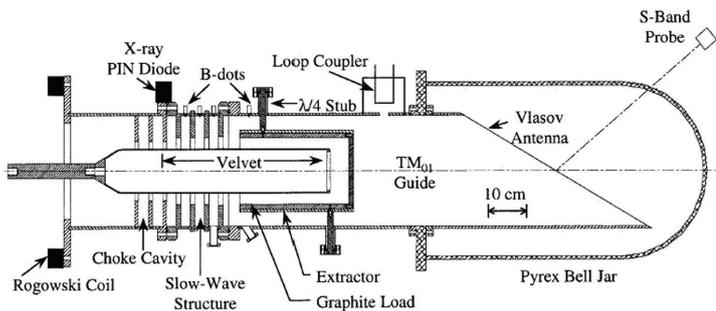


Abb. C.7 Experimentelle Aufbau eines 1,2 GHz Magnetically Insulated Line Oscillator (MILO) (©1998 IEEE. Reprinted, with permission, from M. D. Haworth, et al., Significant pulse-lengthening in a multigigawatt magnetically insulated transmission line oscillator, IEEE Trans. Plasma Sci., 26(3):313, June 1998 [114].)

Tabelle C.4 Baugröße von MILOs bei ausgesuchten Operationsfrequenzen

Band	Frequenz f GHz	Wellenlänge λ m	Radius r_a m	Länge L m	Baugröße V_{bau} m^3	Mobilität
			$r_a = 0,6\lambda$	$L = 6\lambda$	$V_{\text{bau}} = 4r^2L$	
L	1,00	0,3000	0,180	1,800	0,233	3 - mobil
	1,50	0,2000	0,120	1,200	0,069	4 - sehr mobil
S	2,00	0,1500	0,090	0,900	$29,16 \cdot 10^{-3}$	4 - sehr mobil
	3,00	0,1000	0,060	0,600	$8,64 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
C	4,00	0,0750	0,045	0,450	$3,65 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
	6,00	0,0500	0,030	0,300	$1,08 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil
	8,00	0,0375	0,023	0,225	$0,46 \cdot 10^{-3}$	5 -hoch mobil

$$r_a < \frac{p'_{01}}{2\pi} \lambda_c = \frac{3,83}{2\pi} \lambda_c = 0,61 \lambda_c \quad (\text{C.10})$$

erfüllen, wobei p'_{mn} die n-te Nullstelle der differenzierten ersten Besselfunktion J'_m bezeichnet. Der Vergleich mit den Werten des AFRL MILO (Gl. C.7) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemachten Abschätzungen. Hinsichtlich der Gesamtlänge ist eine solche Abschätzung nicht möglich, die Werte des AFRL MILO dürfen aber als typisch angesehen werden.

In [116] zeigen Lemke et al. anhand theoretischer Überlegungen, dass ein MILO einen maximalen Wirkungsgrad (η) von 15% erreichen kann.

$$\eta = \frac{P_{\text{RF}}}{P_{\text{in}}} \leq 15\% \quad (\text{C.11})$$

Der Wirkungsgrad des MILO ist so gering, da ein Teil der eingespeisten Leistung für die Erzeugung des Magnetfeldes verbraucht wird. Der Wirkungsgrad ist abhängig von der Betriebsspannung und erreicht seinen Maximalwert für Spannungen ab 1 MV. Wird ein MILO mit einer Betriebsspannung von weniger als 500 kV betrieben, wird ein zunehmend größerer Anteil für die Generierung des Magnetfeldes benötigt und der erreichbare Wirkungsgrad sinkt unter 10%. Anhand eines Designbeispiels zeigen Lemke et al. in [116] ebenfalls auf, dass der realisierbare Wirkungsgrad sehr stark von der Konfiguration des MILOs abhängt. Sind das Resonatorsystem, die Ausführung der Kathode und des Kollektors nicht richtig aufeinander abgestimmt, liegt der tatsächliche Wirkungsgrad und somit die Ausgangsleistung, schnell um einen Faktor von 2-3 niedriger als theoretisch möglich. Der Entwurf und der Bau eines MILO erfordert daher eine ausgewiesene Expertise auf den Gebieten Plasmaphysik und Hochfrequenzresonatoren.

In der frei zugänglichen Literatur werden MILO Experimente beschrieben, in denen RF Ausgangsleistung von bis zu 7 GW und Pulse mit einer Halbwertsbreite (T_{FWHM}) von bis zu 600 ns gemessen wurden. Mit zunehmender Pulsdauer konnte das Auftreten von Plasmaeffekten beobachtet werden. So beginnt der MILO bei längerem Betrieb zu *chirpen*, da vermehrt Elektronenplasma in den Bereich der Resonatorstruktur eintritt und zu einem Anstieg der Resonanzfrequenz führt [114].

Diese Verschiebung der Resonanzfrequenz kann zur Anregung höherer Resonanzmoden und hierdurch zu einer erheblichen Reduktion der Effizienz führen. Die beobachteten Plasmaeffekte resultieren in einer Begrenzung der realisierbaren Pulslängen als auch, im Repetierenden Betrieb, der Pulswiederholfrequenz.

C.4 Bewertung Klystron

Durch Einbringen weiterer Hohlraumresonatoren zwischen der Buncher Cavity und der Catcher Cavity kann der Verstärkungsfaktor des Klystrons und als unmittelbare Folge die entnehmbare RF-

Leistung erhöht werden (siehe Abb. C.8). Der durch die Buncher Cavity modulierte Elektronenstrahl regt in den zusätzlichen Hohlraumresonatoren Resonanzfelder an, die durch ihre elektrische Feldkomponente im Zentrum zusätzlich auf die Elektronen wirken und die Geschwindigkeitsmodulation verstärken. Die verstärkte Geschwindigkeitsmodulation regt in dem nächsten Hohlraumresonator ein stärkeres Resonanzfeld an, welches wiederum die Intensität der Geschwindigkeitsmodulation verstärkt. Insgesamt entwickeln sich in den Resonatoren kaskadierend höhere Resonanzfelder, die zu einer intensivierten Geschwindigkeitsmodulation des Elektronenstrahls und folglich in einer stärker ausgebildeten Paketbildung resultieren. Eine ausführliche Beschreibung des Aufbaus und der Funktion von Klystron-Verstärkern ist in [152, 120, 7, 109] zu finden.

Um zu verhindern, dass die Resonatoren neben dem Elektronenstrahl über das elektromagnetische Feld miteinander koppeln, wird die Öffnung für den Elektronenstrahl mit einem Gitter oder *Drift Tubes* (Abb. C.9.B) versehen. Bei Verwendung eines Gitters, kann der Elektronenstrahl dieses durchdringen, wogegen es das elektromagnetische Feld des Resonators gegenüber dem Feld der Umgebung entkoppelt. Bei langem Betrieb und einer hohen Intensität des Elektronenstrahles kommt es zu einer Abnutzung der Gitter, so dass diese in regelmäßigen Abständen ausgewechselt werden müssen. Der Vorteil bei der Verwendung von Drift Tubes liegt darin, dass kein Störkörper (Gitter) in den Weg des Elektronenstrahls eingebracht wird. Zur elektromagnetischen Entkopplung der Resonatoren, wird der Radius der Drift Tubes so gewählt, dass die Resonanzfrequenz des Resonators unterhalb der cut-off Frequenz des ersten ausbreitungsfähigen Modes der Drift Tube liegt. Der erste ausbreitungsfähige Mode eines kreiszylindrischen Hohlleiters ist der TM_{11} Mode mit einer cut-off Frequenz von [153]:

$$f_{TE_{11}} = \frac{1,84c}{2\pi r_0} \quad (C.12)$$

Aus der Forderung, dass bei der Betriebsfrequenz des Klystrons dieser Mode noch nicht ausbreitungsfähig sein soll, folgt für den Innenradius r_0 des Drift Tubes:

$$r_0 < \frac{1,84}{2\pi} \lambda \quad (C.13)$$

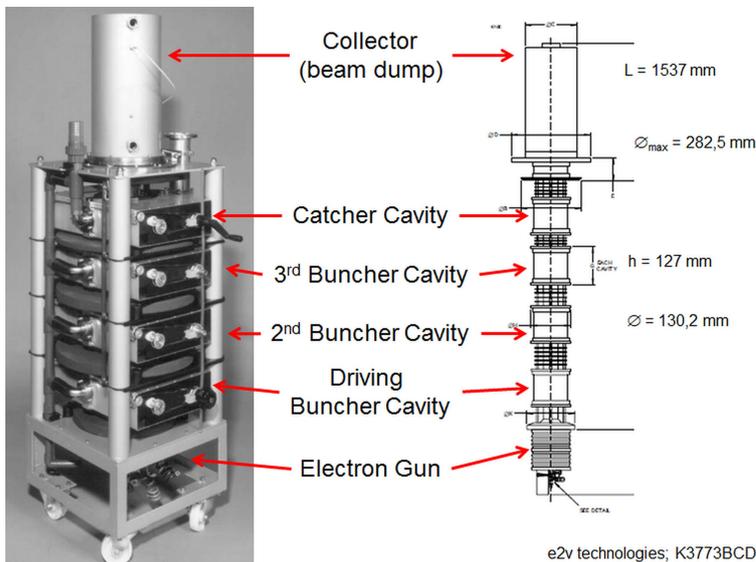


Abb. C.8 Beispiel eines Vierkammer-Klystron Amplifiers, Arbeitsfrequenz $f_c = 470 - 860 \text{ MHz}$, Ausgangsleistung $P_{out} = 70 \text{ kW}$, Gesamtlänge $L = 1537 \text{ mm}$ (From e2v technologies EEV High Power Amplifier Klystron Datasheet Part No. K3773BCD. With permission.)

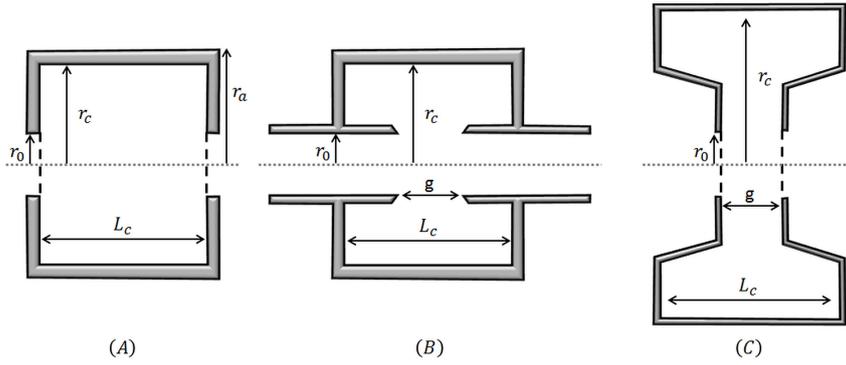


Abb. C.9 Beispiele für TM-Resonatoren ((A) Zylinder Resonator mit Gitter, (B) Resonator ohne Gitter, (C) Felgenförmiger Resonator mit Gitter)

In den meisten Klystrons werden zylindrische Resonatoren (s. Abb C.9) verbaut, die in dem TM_{010} -Mode angeregt werden. Der TM_{010} -Moden ist üblicher Weise der erste resonanzfähige Mode und besitzt auf seiner Längsachse eine nicht verschwindende axiale Komponente der elektrischen Feldstärke, die mit den Elektronen interagieren kann. Die einfachste Bauform eines TM-Resonators ist der in Abbildung C.9.A dargestellte Zylinderresonator. Unter Annahme idealer Leitfähigkeit der Wände und eines idealen Vakuums im Inneren des Zylinderresonators lässt sich zeigen⁴, dass als niedrigster Mode der TM_{010} Mode ab einer cut-off-Frequenz von:

$$f_{TM_{010}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \cdot \lambda_{TM_{010}}} = \frac{p_{01}}{2\pi r_i \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{2,405}{2\pi r_i \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (C.14)$$

auftritt. In dieser Gleichung bezeichnet p_{mn} die n-te Nullstelle der Besselfunktion J_m . Auflösen nach dem Innenradius des Resonators (r_i) führt auf die Beziehung:

$$r_i = \lambda_{TM_{010}} \frac{2,405}{2\pi} \approx 0,4 \lambda_{TM_{010}} \quad (C.15)$$

Unter Einbeziehung der endlichen Wandstärke des Resonators ergibt sich für dessen Außenradius r_a die Abschätzung:

$$r_a \geq \frac{\lambda}{2} \quad (C.16)$$

Zur Sicherstellung einer monofrequenten Anregung des Resonators, ist dessen Länge L_c so zu wählen, dass kein weiterer Mode auftritt. Der nächst höhere Mode ist der TE_{111} Mode, der ab einer cut-off Frequenz von

$$f_{TE_{111}} = \frac{1}{2\pi r_c \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\left(\frac{1,841}{r_c}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{L_c}\right)^2} \quad (C.17)$$

resonanzfähig wäre. Bei dem über Gleichung C.15 bestimmten Wert für r_c ist der TE_{111} Mode nicht resonanzfähig, wenn gilt:

$$\frac{r_c}{L_c} > \sqrt{\frac{2,405^2 - 1,841^2}{\pi^2}} = \frac{1}{2} \quad (C.18)$$

über die Gleichungen C.15 und C.18 lassen sich die charakteristischen Abmaße eines zylindrischen Resonators abschätzen zu:

$$r_a = 0,5\lambda \quad (C.19)$$

⁴ [154] Kap. 8.7, S. 426ff

$$L_c < 0,8\lambda \quad (\text{C.20})$$

Diese Abschätzung ist hinreichend genau, um im Rahmen des EMI-Risikomanagements die Baugröße von TM-Resonatoren abzuschätzen.

Bei Arbeitsfrequenzen oberhalb von 10 GHz weisen die TM-Resonatoren Durchmesser unterhalb 3 cm auf. Für Arbeitsfrequenzen unterhalb 1 GHz liegt der Durchmesser von TM-Resonatoren bei mehr als 30 cm und unterhalb von 100 MHz sogar über 3 m. betragen. Mit dem Ziel der Begrenzung der Baugröße werden für Klystrons mit Arbeitsfrequenzen unterhalb von 1 GHz daher TEM-Resonatoren verwendet (s. Abb C.10). Bei TEM-Resonatoren wird eine Seite des Drift Tubes weit in den Resonator hineingezogen, so dass ein am Ende offener koaxialer TEM-Wellenleiter (Koaxialleiter) entsteht. Da der, in dem Koaxialleiter ausbreitungsfähige, TEM Mode keine cut-off Frequenz besitzt, weisen TEM-Resonatoren Außendurchmesser auf, die deutlich unterhalb der Wellenlänge der Arbeitsfrequenz liegen. Für lange zylindrische Resonatoren mit einer Resonatorlänge von

$$L_c \gg (r_c - r_0) \quad (\text{C.21})$$

kann der koaxiale Teil des Resonators als TEM-Wellenleiter mit einem Leitungswellenwiderstand von

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{r_c}{r_0}\right) = 60 \Omega \cdot \ln\left(\frac{r_c}{r_0}\right) \quad (\text{C.22})$$

modelliert werden [7]. Für einen in Abbildung C.10 dargestellten offenen TEM-Resonator lautet die Resonanzbedingung:

$$L_c = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}, \text{ mit } n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{C.23})$$

Für den Betrieb bei der ersten Resonanz folgt:

$$L_c = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{C.24})$$

Einsetzen der Gleichung C.24 und C.13 in die Beziehung C.21 liefert:

$$\frac{\lambda}{2} \gg r_c \quad (\text{C.25})$$

Die für eine Abschätzung der Baugröße eines Klystrons noch benötigte Länge des Driftbereiches (Drift Space) ist eine Funktion der Beschleunigungsspannung und der elektrischen Feldstärke im Zentrum der Buncher Cavity. Üblicher Weise liegt bei einem Zweikammern-Klystron die Länge des Drift Space im Bereich der Resonatorlänge L_c . Veranschlagt man nun noch für den Abstand vor der Buncher Cavity als auch nach der Catcher Cavity je die Hälfte des Drift Spaces, so lässt die Gesamtlänge des Klystrons⁵ zu $L_{\text{ges}} > 4 \cdot L_c$ abschätzen. Klystrons werden als Ausgangsverstärker für Radiosender, als Sendeverstärker für Radaranlagen sowie als RF-Verstärker bei Elektronenbeschleunigern und der Fusionsforschung eingesetzt. Im einschlägigen Fachhandel sind Klystrons für den Frequenzbereich 300 MHz bis einige 10 GHz mit Ausgangsleistungen im MW Bereich erhältlich. Im Bereich der Radaranwendungen werden sie jedoch durch die zunehmende Verwendung von Arrayantennen durch Halbleiterverstärker verdrängt.

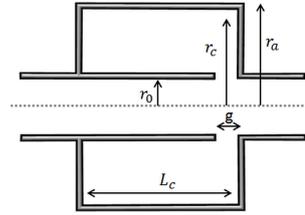


Abb. C.10 TEM-Resonator

⁵ ohne Electron Gun und Beam Dump

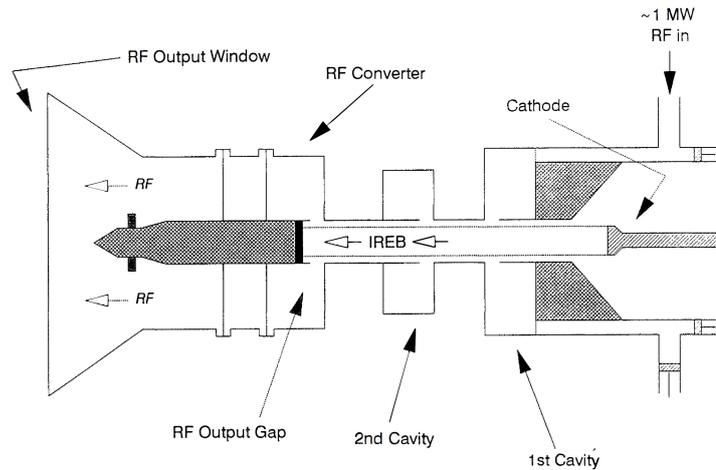


Abb. C.11 Schematischer Aufbau eines L-Band relativistischen Klystron Amplifier, Arbeitsfrequenz $f = 1,3 \text{ GHz}$, Maximale Ausgangsleistung $P_{\text{RF,out}} = 15 \text{ GW}$, Drift Tube Radius $r_0 = 68 \text{ mm}$, Innenradius der 2nd Cavity (verstimmbarer TEM-Resonator) $r_c = 80,4 \text{ mm}$, Länge der 2nd Cavity $L_c = 57,7 \text{ mm}$, IREB: Intense Relativistic Electron Beam, (©1994 IEEE. Reprinted, with permission, from V. Serlin and M. Friedman, Development and optimization of the relativistic klystron amplifier, IEEE Trans. Plasma Sci., 22(5):692, Oct. 1994 [155].)

Insbesondere im Bereich der Fusionsforschung sowie für High-Power Anwendungen (HPEM) werden Ausgangsleistungen im GW-Bereich benötigt. Aufgrund der deutlich höheren kinetischen Energie der Elektronen werden diese mit sogenannten relativistische Klystrons erzeugt (s. Abbildung C.11). In einem relativistischen Klystron werden die Elektronen auf Geschwindigkeiten von mehr als 10 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt [156, 157, 155, 158]. In diesem Geschwindigkeitsbereich führt die Interaktion mit der elektrischen Feldstärke zwar zu einer Modulation der kinetischen Energie, aufgrund des zu berücksichtigenden relativistischen Effekts schlägt sich diese jedoch nicht mehr so stark in der Geschwindigkeit der Elektronen nieder. Als unmittelbare Folge kann der Drift Space zwischen der Buncher Cavity und der Catcher Cavity deutlich kürzer dimensioniert werden oder ganz entfallen.

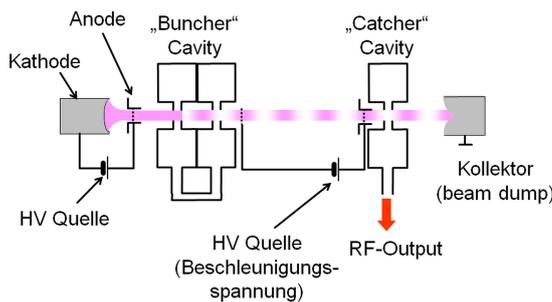


Abb. C.12 Prinzip eines Relatron

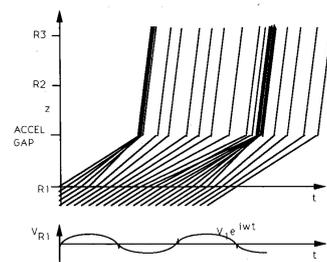


Abb. C.13 Applegate-Diagramm eines Relatron (©1992 IEEE. Reprinted, with permission, from R. B. Miller, et al., Superrelatron theory and experiments, IEEE Trans. Plasma Sci., 20(3):332, June 1992 [159].)

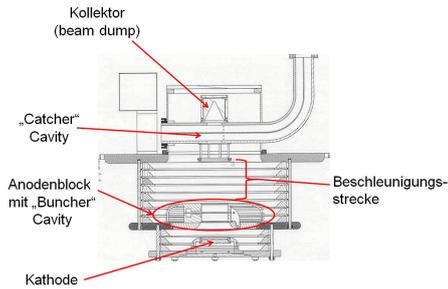


Abb. C.14 Zeichnung eines Reltron (Quelle: WIS)

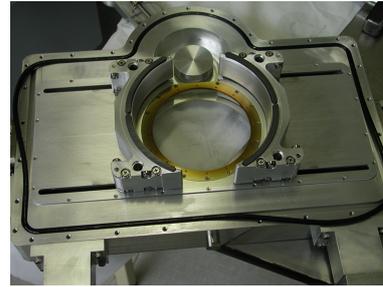


Abb. C.15 Verstellbare Buncher Cavity eines Reltron (Durchmesser des Gitters $\varnothing = 140$ mm; SUPRA 1,315 GHz-Tube; Quelle: WIS)

Eine zu den relativistischen Klystrons alternative Bauform für Klystron Oszillatoren hoher Leistung stellt das von Miller et. al. entwickelte **Reltron** dar [160] (s. Abb. C.12). Anders als in einem Klystron werden bei dem Reltron die Elektronen in zwei Beschleunigungsstufen auf eine Endgeschwindigkeit von 90 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Wie in dem in Abbildung C.13 dargestellten Applegate-Diagramm erkennbar ist, werden die Elektronen in der ersten Beschleunigungsstufe nur so stark beschleunigt, dass in den gekoppelten Buncher Cavities eine (klassische) Geschwindigkeitsmodulation erfolgt. Nach dem sich im Elektronenstrahl die Elektronenpakete gebildet haben, werden diese in der zweiten Beschleunigungsstufe auf ihre relativistische Endgeschwindigkeit beschleunigt [160, 161, 159, 162]. Durch den hierbei auftretenden relativistischen Effekt weisen die Elektronen eine annähernd gleiche Geschwindigkeit auf, so dass ein zerfließen der Elektronenpakete unterbunden wird. Die zweite Beschleunigungsstufe führt zu einer deutlichen Erhöhung der kinetischen Energie der Elektronen, welche wiederum in einer höhere in der Catcher Cavity entnehmbare RF-Leistung resultiert.

In der Literatur werden Reltrons mit Arbeitsfrequenzen im Bereich 0,5 - 12 GHz mit einer RF-Ausgangsleistung von bis zu 600 MW und einem Wirkungsgrad von $\eta \leq 50\%$. Reltrons werden üblicher Weise im geplusten Betrieb mit einer Pulslänge von 100 - 300 ns und einer Puls Wiederholungsrate im 10 Hz Bereich betrieben [161, 163, 10, 164].

Anders als bei den klassischen Klystron Röhren hängt beim Reltron der Abstand zwischen Buncher und Catcher Cavity nicht von der für die Bildung der Elektronenpakete benötigte Driftstrecke ab, sondern ist vorwiegend durch die benötigte überschlagsfestigkeit der Röhre vorgegeben. Aus der in Abbildung C.14 dargestellten Zeichnung eines Reltrons ist auch ersichtlich, dass die realen Di-

Tabelle C.5 Baugröße von Klystrons / Reltrons bei ausgesuchten Operationsfrequenzen

Band	Frequenz f GHz	Wellenlänge λ m	Radius r_a m	Länge L m	Baugröße V_{bau} m^3	Mobilität
			$r_a = 0,5\lambda$	$L = 4\lambda$	$V_{\text{bau}} = 4r^2L$	
UHF	0,65	0,4615	0,231	1,846	0,392	3 - mobil
	1,00	0,3000	0,150	1,200	0,108	4 - sehr mobil
L	1,50	0,2000	0,100	0,800	$32,00 \cdot 10^{-3}$	4 - sehr mobil
	2,00	0,1500	0,075	0,600	$13,50 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil
S	3,00	0,1000	0,050	0,400	$4,00 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil
	4,00	0,0750	0,038	0,300	$1,69 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil
C	6,00	0,0500	0,025	0,200	$0,50 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil
	8,00	0,0375	0,019	0,150	$0,21 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil

mensionen aus mechanischen Gründen gegenüber den gemachten Abschätzungen um den Faktor 2 größer sein wird.

Es gibt Bauformen von Klystron und Reltron Röhren bei denen die Arbeitsfrequenz, durch Verschiebung der Außenwandungen des TM-Oszillators (s. Abb. C.15) oder des Abschlusses von TEM-Resonatoren, 10 % verstimmt werden kann.

C.5 Bewertung Leitungsresonatoren

Ein Leitungsresonator in Form einer fehlangepassten Leitung kann z.B. bei Verwendung von Koaxialleitungen durch Variation des Innendurchmessers des Außenleiters bzw. des Außenradius des Innenleiters realisiert werden. Eine weitere Option besteht in einer Variation des Dielektrikums. Bei einer solchen Realisierung sind die charakteristischen Leitungsimpedanzen der Leitungsstücke 1 und 3 identisch, so dass gilt $\rho_{2 \rightarrow 3} = \rho_{2 \rightarrow 1}$. Unabhängig davon, ob die charakteristische Leitungsimpedanz des fehlangepassten Leitungsstückes 2 größer⁶ oder kleiner⁷ als die beiden übrigen ist, wird aufgrund der Symmetrie der Dämpfungsfaktor immer positiv sein

$$\rho_{2 \rightarrow 3} \rho_{2 \rightarrow 1} > 0, \text{ für } Z_1 = Z_3 \tag{C.26}$$

Die Ausgangsspannung besteht aus einer Folge aus N Impulsen gleicher Polarität. Für den Fall, dass die charakteristischen Leitungsimpedanzen der Leitungsstücke eine absteigende ($Z_1 > Z_2 > Z_3$) oder aufsteigende ($Z_1 < Z_2 < Z_3$) Folge bilden, wird der Dämpfungsfaktor negativ und das Ausgangssignal besteht aus einer Folge aus N Impulsen alternierender Polarität. Aufgrund des geringeren Gleichanteils lässt sich dieses Signal effizienter über die nachgeschaltete Antenne abstrahlen.

Als Nachteile des Leitungsresonators in Form einer fehlangepassten Leitung sind zu nennen, dass die Amplituden der Ausgangsspannung immer niedriger sind als die Amplitude des speisenden Signals. Darüber hinaus wird ein Spannungssignal der Form

$$u_r(t) = u_{in}(t) \rho_{1 \rightarrow 2} + \tau_{1 \rightarrow 2} \rho_{2 \rightarrow 3} \tau_{2 \rightarrow 1} \sum_{n=1}^N u_{in}(t - nT) (\rho_{2 \rightarrow 3} \rho_{2 \rightarrow 1})^{n-1} \tag{C.27}$$

von dem Leitungsresonator zur Impulsquelle zurückreflektiert. Somit ist dafür Sorge zu tragen, dass die Impulsquelle nicht durch das reflektierte Signal beschädigt wird.

Weitere Varianten von Leitungsresonatoren ist die Verschaltung von $\lambda/4$ -Stichleitungen (s. Abb C.16). Beim Amateurfunk als auch in der Radar- und Funktechnik werden offene und kurzgeschlossene $\lambda/4$ -Leitungen im Frequenzbereich von 100 MHz bis in den niedrigen GHz-Bereich als Filter eingesetzt.

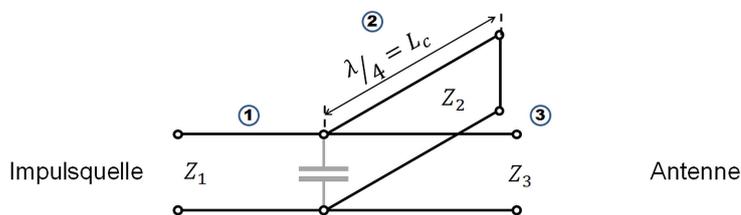


Abb. C.16 Kurzgeschlossene $\lambda/4$ -Leitung (mit optionaler Kapazität)

⁶ $Z_2 > Z_1 \rightarrow \rho_{2 \rightarrow 1} < 0$

⁷ $Z_2 < Z_1 \rightarrow \rho_{2 \rightarrow 1} > 0$

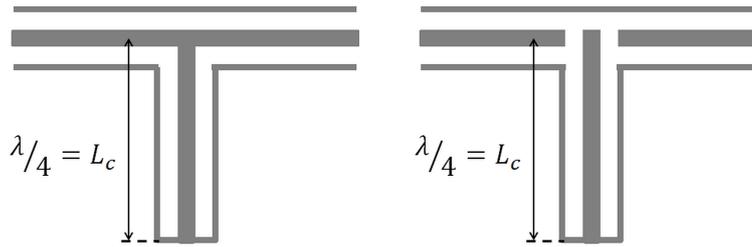


Abb. C.17 Prinzip eines galvanisch (links) und kapazitiv (rechts) gekoppelten $\lambda/4$ -Topfresonator (Topfkreis)

Wird die charakteristische Impedanz kleiner als $1/4$ der charakteristischen Impedanzen der Hauptleitung gewählt ($Z_1 = Z_3 \geq 4 Z_2$) so erzeugt die Stichleitung bei Beaufschlagung mit einem Spannungsimpuls ein Ausgangssignal bestehend aus einer Summe gedämpfter Spannungsimpulse alternierender Polarität und einer Verzögerungsdauer zwischen zwei Impulsen gleicher Polarität von

$$T = \frac{4L_c}{c} = \frac{\lambda}{c} = \frac{1}{f_c} \quad (\text{C.28})$$

In der koaxialen Bauform werden die am Ende kurzgeschlossenen $\lambda/4$ -Stichleitungen auch als *Topfkreise* bezeichnet. Diese sind im Fachhandel als Baugruppen für Amateurfunkanlagen und ältere Radaranlagen für den Frequenzbereich 100 MHz - 1 GHz (VHF- und UHF-Band) erhältlich. In der Literatur für Amateurfunken existieren darüber hinaus Anleitungen für den Selbstbau von Topfkreisen [165]. Die Anbindung an die Hauptleitung kann galvanisch, kapazitiv oder induktiv erfolgen (s. Abb C.17).

In der Koaxialen Bauweise bestimmt der Logarithmus des Verhältnis des Innenradius des Außenleiters r_a zum Außenradius des Innenleiters r_i die charakteristische Leitungsimpedanz der Resonanzleitung. Zur Realisierung einer möglichst hohen Güte muss diese eine möglichst große Abweichung zu den Anschlussleitungen bzw. der Hauptleitung aufweisen. Die Radien der Leiter sind jedoch nicht beliebig wählbar. Zum einen muss die Differenz beider Radien so groß sein, dass die Durchbruchspannung des Isolatormediums⁸ nicht überschritten wird. In der Regel folgt aus dieser Bedingung eine untere Grenze für r_a und damit auch für die charakteristische Leitungsimpedanz. Darüber hinaus darf der Innenradius des Außenleiters nicht so groß werden, dass der TE_{11} -Mode ausbreitungsfähig wird.

$$f_c \leq 0,9 \cdot f_{TE_{11}} = \frac{0,9}{\pi \sqrt{\epsilon \mu}} \frac{2}{r_a + r_i} \quad (\text{C.29})$$

Bei der Abschätzung der Baugröße ist zusätzlich noch die Wandstärke des Außenleiters zu berücksichtigen. Auch ist zu Bedenken, dass bei Verwendung von Isolationsmedien (z.B. zur Erhöhung der

Tabelle C.6 Baugröße von Leitungsresonatoren bei ausgesuchten Operationsfrequenzen in Luft

Band	Frequenz f MHz	Wellenlänge λ m	Radius r_a m	Länge L m	Baugröße V_{bau} m^3	Mobilität
			$r_a = 0,1\lambda$	$L = 0,25\lambda$	$V_{\text{bau}} = 4r^2L$	
VHF	30,00	10,00	1,00	2,500	10,00	3 - mobil
	165,00	1,82	0,18	0,455	$60,11 \cdot 10^{-3}$	4 - sehr mobil
UHF	300,00	1,00	0,10	0,250	$10,00 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil
	650,00	0,46	0,046	0,115	$0,983 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil
	1000,00	0,30	0,030	0,075	$0,270 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil

⁸ z. B. Luft, SF6 oder Trafoöl

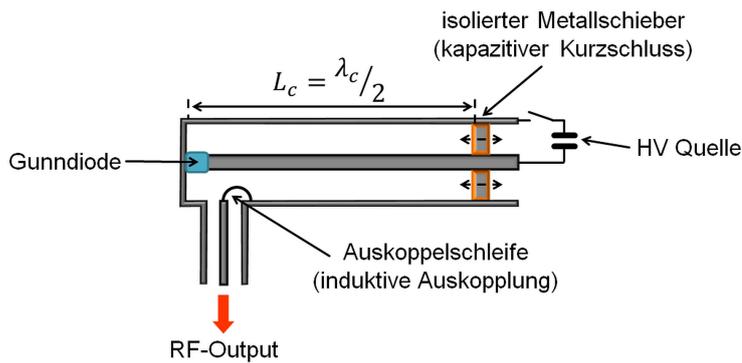


Abb. C.18 Prinzip eines Gunndiodenoszillators

Spannungsfestigkeit) dessen relative Dielektrizitätskonstante zu einer Verkürzung der physikalisch wirksamen Wellenlänge führt. Im Rahmen des Risikomanagements kann der Außenradius eines koaxialen Leitungsresonators in erster Näherung mit

$$r_a \approx \frac{\lambda_c}{10} \quad (\text{C.30})$$

angenommen werden.

In Funksendeanlagen und älteren Radaranlagen, die im VHF- und UHF-Band arbeiten, wurden Gunndiodenoszillatoren⁹ als Quelle für die Trägerfrequenz genutzt. In Abhängigkeit von der Arbeitsfrequenz erzeugen Gunndiodenoszillatoren Impulsleistungen im Bereich 100 - 250 kW. In dem hier betrachteten Anwendungsfall könnte ein Gunndiodenoszillator in Verbindung mit einem Hochspannungsimpulsgenerator als RF-Quelle im VHF- und UHF-Band eingesetzt werden.

C.6 Bewertung Switched Oscillator

Unter Berücksichtigung günstiger Eigenschaften bezüglich des Hochfrequenzverhaltens als auch der Spannungsfestigkeit werden Switched Oscillatoren üblicher Weise in koaxialer Bauform (ähnlich einem Topfkreis) gebaut. Beispielhaft ist in Abbildung C.19 ein an der École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) aufgebauter Switched Oscillator abgebildet [166, 167]. Abweichend von der Prinzipzeichnung (Abb. 7.20) erfolgt die Speisung über den Antennenanschluss. Das dem Antennenanschluss gegenüberliegende Ende der Resonanzleitung ist in Form einer radialen Leitung zur zentrisch angeordneten Funkenstrecke hin verjüngt. In der Zeichnung (Abb. 7.20 links) ist dieser Bereich braun gekennzeichnet. Aus Gründen der Hochspannungsfestigkeit wird die Resonanzleitung mit Schutzgas¹⁰ unter Druck betrieben. Forschungsarbeiten hinsichtlich des Designs von Switched Oszillatoren fokussieren sich insbesondere die Ausführung der Funkenstrecke und des radialen Leitungsstückes [168, 169, 170, 164].

Ein Experimentalsystem, in dem ein Switched Oscillator zur Generierung des RF-Signals verwendet wurde ist das am US Air Force Research Laboratory aufgebaute MATRIX System [166]. In dem MATRIX System wird eine Half Impuls Radiating Antenna durch einen im Bereich 180 - 600 MHz durchstimmbaren Switched Oscillator gespeist. In dem in Abbildung C.20 dargestellten abge-

⁹ bestehend aus einem abstimmbaren Topfkreis mit einer Gunndiode (s. Abb. C.18)

¹⁰ trockne Luft, Stickstoff oder SF₆

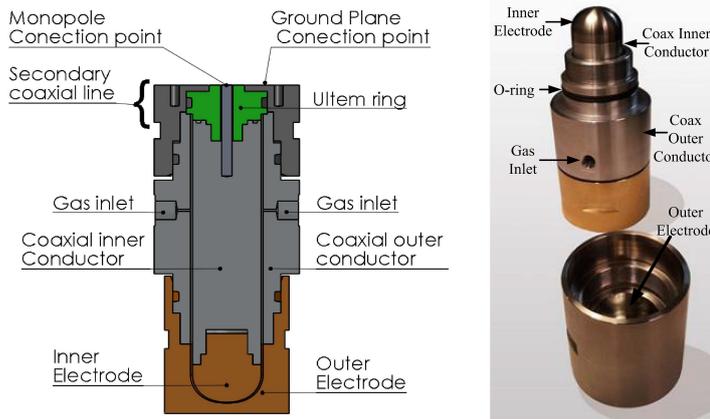


Abb. C.19 Zeichnung (links) und Bild (rechts) eines Switched Oscillators (©2016 IEEE. Reprinted, with permission, from F. Vega and F. Rachidi, A switched oscillator geometry inspired by a curvilinear space - part I: DC considerations, IEEE Trans. Plasma Sci., 44(10):2246, Oct 2016 [166].)

strahltem Feldsignal ist der erwartete Signalverlauf in Form eines gedämpften Sinussignals deutlich erkennbar.

Ein weiteres Beispiel einer auf dem Switched Oscillator basierenden Mesoband Quelle ist der von der Firma Diehl BGT Defence gebaute und vertreibende HPEMcase [143, 11]. In den verschiedenen Ausführungen werden durch die eingesetzten Switched Oscillators RF-Signale mit Arbeitsfrequenzen von 50 MHz bis zu 400 MHz generiert.

In der wissenschaftlichen Literatur wird neben dem Speisen von Antennen durch Switched Oscillatoren auch die Integration des Switched Oscillators in die Antennenstruktur diskutiert. Insbesondere die Integration eines Switched Oscillators in eine bikonische Antenne (Abb.C.21) ist ein häufig diskutiertes Systemdesign für eine kompaktes Mesobandsystem [169].

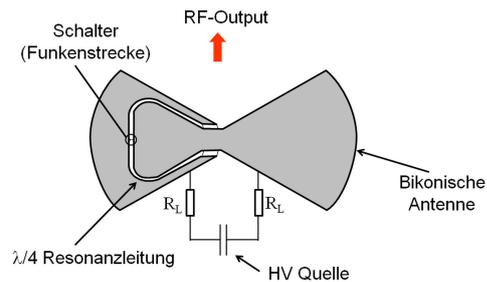


Abb. C.21 Prinzip eines in eine bikonische Antenne integrierten Switched Oszillators

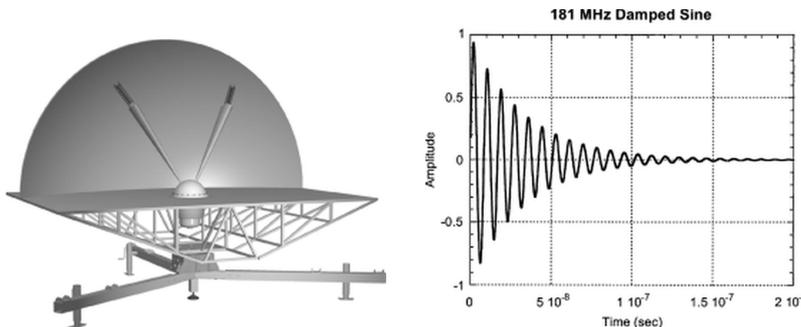


Abb. C.20 Zeichnung (links) und abgestrahltes Feldsignals (rechts) des MATRIX Systems (©2004 IEEE. Reprinted, with permission, from W. D. Prather, et al., Survey of worldwide high-power wideband capabilities, IEEE Trans. EMC, 46(3): 335, Aug 2004 [11].)

Tabelle C.7 Baugröße von Swiched Oszillators bei ausgesuchten Operationsfrequenzen in Luft

Band	Frequenz f MHz	Wellenlänge λ m	Radius r_a m	Länge L m	Baugröße V_{bau} m^3	Mobilität
			$r_a = 0,1\lambda$	$L = 0,25\lambda$	$V_{\text{bau}} = 4r^2L$	
VHF	30,00	10,00	1,00	2,500	10,00	3 - mobil
	165,00	1,82	0,18	0,455	$60,11 \cdot 10^{-3}$	4 - sehr mobil
UHF	300,00	1,00	0,10	0,250	$10,00 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil
	650,00	0,46	0,046	0,115	$0,983 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil
L	1000,00	0,30	0,030	0,075	$0,270 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil
	1500,00	0,20	0,020	0,050	$0,080 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil
	2000,00	0,15	0,015	0,375	$0,034 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil

C.7 Bewertung Resonante Antennen (Antennenoszillatoren)

M. Armanious et al. haben in [124] gezeigt, dass sich die effektiv wirksame Länge der Antenne durch ein geeignetes Design¹¹ näherungsweise verdoppeln lässt.

Der Spannungssprung des schließenden Schalters erzeugt einen in Abb. C.22 deutlich erkennbaren Feldimpuls, das sogenannte Anfangssignal. Die Höhe dieses Feldimpulses wird im Wesentlichen durch die Schaltgeschwindigkeit des schließenden Schalters und den Strahlungswirkungsgrad¹² der Antennenstruktur bestimmt. Der Strahlungswirkungsgrad in Kombination mit der Antennengüte bestimmt die Stärke und Dämpfung des abgestrahlten Feldes (Langzeitsignal) und somit auch die Dauer des abgestrahlten Signalzuges [171].

Zur Optimierung dieser Systemparameter wurden verschiedene Öffnungswinkel der Konusantenne als auch der Helixantenne untersucht [172, 123, 124, 173]. In den Untersuchungen hat sich für HPEM Quellensysteme ein Öffnungswinkel der Konusse von $\vartheta = 28^\circ$ als praktikabler Wert herausgestellt. Für die Abschätzung der Baugröße eines Antennenoszillators kann dieser als zylindrische Struktur mit der über Gleichung (7.23) gegebenen Länge L_{ges} und einem Außenradius von

$$r_{\text{AO}} = \tan(14^\circ) \cdot L_{\text{ges}} \approx \frac{\lambda}{8} \quad (\text{C.31})$$

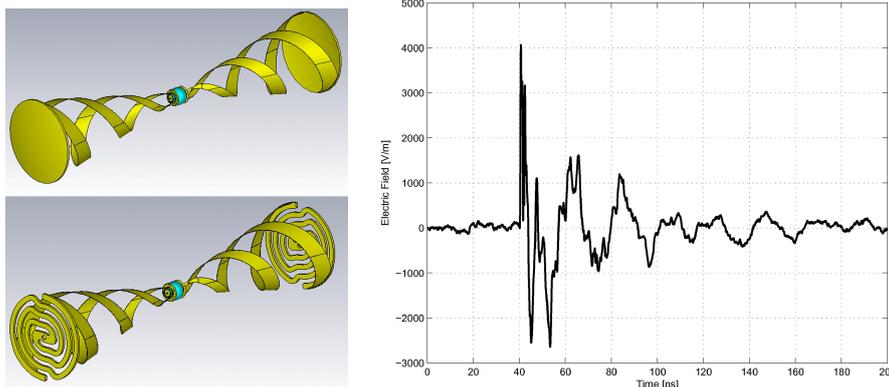


Abb. C.22 Disconnected-Spiral Conically Wound Antenna (DSCWA); links: Zeichnungen, rechts gemessene elektrische Feldstärke beim Betrieb als Antennenoszillator. (©2014 IEEE. Reprinted, with permission, from , et al., An Electrically Small Conical Folded Dipole Antenna for Use as a Compact, Self-Resonant Mesoband High-Power Microwave Source, IEEE Trans. Antennas Propag., 62(12):5964, Dec 2014 [124].)

¹¹ z.B. Ausführung der Konen als Helixantennen (disconnected-spiral conically wound antenna)

¹² eng. radiation efficiency

Tabelle C.8 Baugröße von Antennenoszillators bei ausgesuchten Operationsfrequenzen in Luft

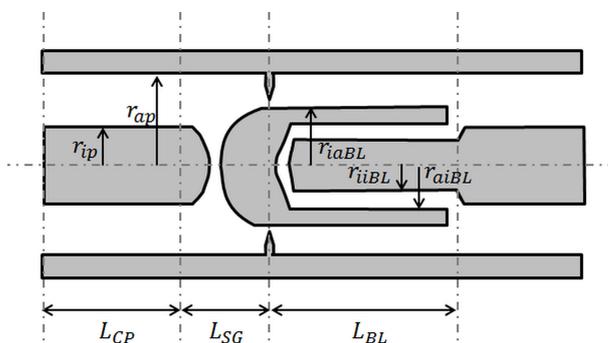
Band	Frequenz f MHz	Wellenlänge λ m	Radius r_a m	Länge L m	Baugröße V_{bau} m^3	Mobilität
Ausführung als Biconus						
			$r_a = 0,125\lambda$	$L = 0,5\lambda$	$V_{\text{bau}} = 4r^2L$	
VHF	30,00	10,00	1,25	5,000	31,25	2 - transportabel
	165,00	1,82	0,23	0,909	$187,829 \cdot 10^{-3}$	4 - sehr mobil
	300,00	1,00	0,125	0,500	$31,250 \cdot 10^{-3}$	4 - sehr mobil
UHF	650,00	0,46	0,058	0,231	$3,072 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil
	1000,00	0,30	0,038	0,150	$0,844 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil
Ausführung als Helix						
			$r_a = 0,0625\lambda$	$L = 0,25\lambda$	$V_{\text{bau}} = 4r^2L$	
VHF	30,00	10,00	0,625	2,500	3,19	3 - mobil
	165,00	1,82	0,114	0,455	$23,479 \cdot 10^{-3}$	4 - sehr mobil
	300,00	1,00	0,063	0,250	$3,90610^{-3}$	5 - hoch mobil
UHF	650,00	0,46	0,029	0,115	$0,384 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil
	1000,00	0,30	0,019	0,075	$0,105 \cdot 10^{-3}$	5 - hoch mobil

angenommen werden. Bei der Bewertung der Baugröße eines Antennenoszillators ist zu beachten, dass dieser die Funktionen des RF-Modulators und der Antenne in sich vereint.

Derzeit werden Antennenoszillatoren ausschließlich in Studien im Rahmen von Forschungsprogrammen zur Entwicklung von Technologien für HPEM-Quellensystemen untersucht. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse werden in der wissenschaftlichen Literatur (Fachjournale, Konferenzen) publiziert [124, 172, 173]. Auf dem kommerziellen Markt werden derzeit keine Antennenoszillatoren angeboten.

C.8 Bewertung Pulsformende Schaltungen

Bei der Realisierung von UWB-Störquellen und UWB-Systemen werden die Pulsformenden Schaltungen häufig in koaxialer Bauform aufgebaut. Ein Beispiel für den koaxialen Aufbau, der z.B. im UWB-System GIMLI des ISL¹³ eingesetzt wird [91, 92, 93], ist in Abbildung C.23 dargestellt. In der koaxialen Bauform ist der Peaking Kondensator als koaxiales Leitungsstück (Koaxialkondensator) und die Funkenstrecke der pulsformenden Schaltung (Peaking Circuit) als axiale Funkenstrecke aus-

**Abb. C.23** Beispiel für einen koaxialen Aufbau eine Pulsformenden Schaltung

¹³ ISL: Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis, URL: www.isl.eu

Tabelle C.9 Leitungswellenwiderstand ausgesuchter Koaxialleitungen

Isolationsmaterial	Luft	Teflon	Transformatoröl
rel. Permittivität (ϵ_r)	1	2	2,2
$\frac{r_a}{r_i} = 1,52$	$Z_L = 25 \Omega$	$Z_L = 18 \Omega$	$Z_L = 17 \Omega$
$\frac{r_a}{r_i} = 2,3$	$Z_L = 50 \Omega$	$Z_L = 35 \Omega$	$Z_L = 34 \Omega$
$\frac{r_a}{r_i} = 3,5$	$Z_L = 75 \Omega$	$Z_L = 54 \Omega$	$Z_L = 50 \Omega$

geführt. In dieser Bauform ist die Größe der Transferkapazität durch das Produkt aus Kapazitätsbelag und der Länge des Koaxialen Abschnittes gegeben.

$$C_P = L_{CP} \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{r_{ap}}{r_{ip}}\right)} \quad (\text{C.32})$$

In Abbildung C.23 wird die Crowbar durch mehrere radiale Funkenstrecken gebildet. In der einfachsten Form reicht es aus eine radiale Funkenstrecke zwischen Außen- und Innenleiter zu verschalten. Die Schaltspannung der Funkenstrecken kann durch den Abstand der Elektroden eingestellt werden. Die Blumlein Transmission Line ist in Form zweier koaxial angeordneter Koaxialleitungen (s. Abbildung C.23) ausgeführt. Die nachfolgende Koaxialleitung wirkt hierbei als Lastimpedanz. Die Radien der Einzelleitungen der Blumlein Transmission Line sind hierbei so zu wählen, dass der Leitungswellenwiderstand der einzelnen Leitungen die Hälfte des Leitungswellenwiderstandes der Lastleitung beträgt.

$$Z_L = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{r_{ap}}{r_{ip}}\right) \quad (\text{C.33})$$

$$Z_{BL} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{r_{aaBL}}{r_{aiBL}}\right) = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{r_{iaBL}}{r_{iiBL}}\right) = \frac{1}{2} Z_L \quad (\text{C.34})$$

In Tabelle C.9 sind beispielhaft Leitungswellenwiderstände ausgesuchter Geometrien und Isolationsmaterialien aufgetragen. Bei dem Bau von Störquellen hoher Leistung wird die Dimensionierung einer koaxial aufgebauten Pulsformenden Schaltung im Wesentlichen von

- der Kapazität C_P des Peakingkondensators (s. Gl.C.32),
- der Verzögerungszeit τ_{BL} der Blumlein Transmission Line (s. Gl.7.25) und
- der benötigten Spannungsfestigkeit.

vorgegeben. Die Kapazität des Peakingkondensators und die Verzögerungszeit der Blumlein Transmission Line bestimmen im Wesentlichen die Länge der koaxialen Pulsformenden Schaltung. Aus der für die Betriebsspannung notwendige Spannungsfestigkeit ergibt sich eine untere Grenze für die Abmaße des Leitungsquerschnittes (also die Radien r_a und r_i).

Unter Annahme einer reinen TEM-Wellenausbreitung hat die elektrische Feldstärke im Raum zwischen dem Innen- und dem Außenleiter die Form:

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \quad \text{für } r_i \leq r \leq r_a \quad (\text{C.35})$$

Das Maximum der elektrischen Feldstärke tritt auf der Oberfläche des Innenleiters ($r = r_i$) auf und hat den Wert:

$$E_{max} = E(r = r_i) = \frac{U}{r_i \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \quad (\text{C.36})$$

$$= \frac{U}{r_a} \cdot \frac{\frac{r_a}{r_i}}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \quad (\text{C.37})$$

Der rechte Term in Gleichung (C.37) hat bei $\frac{r_a}{r_i} = 2,718$ ein Minimum. Bei vorgegebenem Innenradius r_a der Außenleiters tritt bei einem Radienverhältnis von $\frac{r_a}{r_i} = 2,718$ auf dem Innenleiter eine elektrische Feldstärke von

$$E(r_i) = \frac{U}{r_a} \cdot 2,72 \quad (\text{C.38})$$

auf. In der Praxis wird das Radienverhältnis in der Regel so gewählt, dass sich ein gewünschter Leitungswellenwiderstand ergibt. Die sich für häufig verwandte Radienverhältnisse ergebenden Koeffizienten sind in Tabelle C.10 aufgetragen. Bei der Auslegung einer coaxialen pulsformenden Schal-

Tabelle C.10 Koeffizienten ausgesuchter Radienverhältnisse

r_a/r_i	1,52	2,3	2,718	3,5
$E(r_i)r_a/U$	3,63	2,76	2,72	2,79

ung ist mit Hilfe dieser Koeffizienten das Verhältnis aus dem Scheitelwert der Spannung und dem Innenradius des Außenleiters so einzustellen, dass die elektrische Feldstärke auf der Oberfläche des Innenleiters unterhalb der Durchschlagfeldstärke des Isolationsmaterials (s. Tabelle C.11) bleibt.

Der Aufwand beim Bau coaxialer pulsformender Schaltungen kann durch Nutzung marktverfügbarer Elemente¹⁴ deutlich reduziert werden. Hierbei sind die Abmaße der Leitungsquerschnitte in einem festen Raster vorgegeben und nicht mehr frei wählbar. Basierend auf einem Innenradius der Außenleiters von $r_a = 30$ mm wurden charakteristische Parameter bei Verwendung typischer Isolationsmaterialien bestimmt und in Tabelle C.12 aufgetragen. Die aufgetragenen Designbeispiele zeigen, dass basierend auf einem Rohr mit einem Innendurchmesser von 60 mm und getrockneter Luft als Isolationsmaterial coaxiale Pulsformende Schaltungen für Impulsspannungen bis zu 150 kV realisiert werden können. Durch Verwendung von Schwefelhexafluorid (SF₆) kann die Span-

Tabelle C.11 Durchschlagfestigkeit ausgesuchter Isolationsmaterialien [174]

Isolationsmaterial	Durchschlagfestigkeit $\frac{\text{kV}}{10^{-3} \text{ m}}$
trockene Luft (0,1 MPa)	3
trockene Luft (0,2 MPa)	6
trockene Luft (0,5 MPa)	15
SF ₆ (0,1 MPa)	> 8
Transformatoröl (trocken)	5 - 30
Teflon (Polytetrafluorethylen)	18 - 105

Bem.: In Gasen ist die Durchschlagspannung von dem Elektronenabstand und dem Gasdruck abhängig. Unter Annahme einer homogenen elektrischen Feldstärke kann der Wert der Durchschlagspannung mit dem Paschen-Gesetz [174] berechnet werden.

Tabelle C.12 Charakteristische Parameter ausgesuchter Koaxialleiter

r_a 10^{-3} m	r_i 10^{-3} m	$\frac{r_a}{r_i}$	Isolationsmaterial	Z_L Ω	U_{\max} 10^3 V	v_{TEM} $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
30	13	2,3	trockene Luft (0,5 MPa)	50	160	$3 \cdot 10^8$
			SF ₆ (0,1 MPa)	50	> 86	
			SF ₆ (0,5 MPa)	50	> 430	
	8,6	3,5	Transformatoröl (trocken)	50	53 - 322	$2,12 \cdot 10^8$
	Teflon (Polytetrafluorethylen)		54	190 - 1.127	$2,02 \cdot 10^8$	

¹⁴ z.B.: 63 × 1,5 Rohre / Rohrstutzen und 26 mm bzw. 13 mm Rundstangen

nungsfestigkeit auf 400 kV, durch Teflon sogar auf über 500 kV gesteigert werden. Hierbei ist zu beachten, dass die diskutierten Spannungswerte auf der Gleichspannungsdurchschlagfestigkeit des Isolationsmaterials und der elektrischen Feldstärke auf dem Innenleiter basieren. In der Praxis führen die impulsförmigen Spannungssignale als auch die reale Feldverteilung im Koaxialleiter zu einer höheren Spannungsfestigkeit. Für die Bewertung der Baugröße kann festgehalten werden, dass mit Hilfe marktverfügbarer Isolationsmedien für die überwiegende Zahl der mobilen Störquellen koaxiale Pulsformende Schaltungen mit einem Außendurchmesser von 60 mm realisieren lassen.

Als letzte Unbekannte verbleibt somit die Länge. In der Regel ist die Blumlein Transmission Line genauso lang oder länger als der Peaking Circuit (s. Abbildung 7.23). Für eine grobe Abschätzung der Baulänge kann vereinfachend angenommen werden, dass Peaking Circuit und Blumlein Transmission Line gleich lang sind. Basierend auf dieser Annahme kann die Gesamtlänge einer koaxialen Pulsformenden Schaltung mit Hilfe der Ausbreitungsgeschwindigkeit der TEM Mode (v_{TEM}) und der Verzögerungszeit der Blumlein Transmission Line (τ_{BL} , s. Gl. 7.25) abgeschätzt werden.

$$L_{\text{ges}} = 2 \cdot L_{\text{BL}} = \tau_{\text{BL}} \cdot v_{\text{TEM}} \quad (\text{C.39})$$

Abhängig von dem verwandten Isolationsmedium liegt für eine Verzögerung von 1 ns die Länge der Blumlein Transmission Line im Bereich 10 - 15 cm und folglich die Gesamtlänge der Pulsformenden Schaltung bei 20 - 30 cm. Bis zu einer Verzögerungszeit von 4 ns hat eine koaxiale Pulsformenden Schaltung ein Bauvolumen von bis zu 0,1 m³ (Mobilität: 4 - sehr mobil).

Anhang D

Skalen zur Kategorisierung charakteristischer Daten

Skala zu Kategorisierung der Zugänglichkeit (A_z) (Tabelle 6.3, Seite 74)

A_z	Zugänglichkeit	im Freien	im Gebäude	Definition
1o	frei	x		Bereich der allgemeinen Öffentlichkeit (im Freien) der jeder Person ohne besonderen Aufwand oder Überwachung zugänglich ist.
1i	frei		x	Bereich in einem Gebäude der jeder Person ohne besonderen Aufwand oder Überwachung zugänglich ist.
2o	überwacht	x		Bereich der allgemeinen Öffentlichkeit, dessen Zugang jedoch überwacht (beobachtet) wird oder werden kann.
2i	überwacht		x	Bereich in einem Gebäude, dessen Zugang jedoch überwacht (beobachtet) wird oder werden kann.
3o	kontrolliert	x		Bereich im Freien, der nur nach einer Identitätskontrolle betreten werden kann
3i	kontrolliert		x	Bereich in einem Gebäude, der nur nach einer Identitätskontrolle betreten werden kann
4o	beschränkt	x		Kontrollbereich im Freien, der nur von autorisierten Personen oder nach einer Taschenkontrolle betreten werden kann.
4i	beschränkt		x	Kontrollbereich in einem Gebäude, der nur von autorisierten Personen oder nach einer Taschenkontrolle betreten werden kann.

Skala Wahrscheinlichkeit (Tabelle 2.1, Seite 15)

P_0	Wahrscheinlichkeit	Beschreibung
0	unwahrscheinlich	< 0,5 %
1		0,5 % – 1 %
2	gering	1 % – 2 %
3		2 % – 5 %
4		5 % – 12 %
5	mittel	12 % – 25 %
6		25 % – 50 %
7	hoch	50 % – 75 %
8		75 % – 90 %
9	sehr hoch	90 % – 97 %
10	nahezu sicher	> 97 %

Skala zu Kategorisierung der (Fach-) Kenntnisse (Tabelle 6.6, Seite 78)

K_D	Kategorie Fachwissen	Beschreibung	Beispiel
1	ohne Fachkenntnisse	Allgemeinwissen	Laie
2	angelernt	Grundverständnis	Hobbyelektroniker
3	Fachkraft	Fachkenntnisse; abgeschlossene technische Berufsausbildung	Handwerker, Elektroniker
4	Akademiker	Akademische Ausbildung und Berufserfahrung	Ingenieur
5	Experte	Expertenwissen und profunde praktische Erfahrung	

Skala zu Kategorisierung der finanziellen Ressourcen / Kosten (Tabelle 6.7, Seite 78)

C_{exp}	finanzielle Ressourcen	Beispiel	Kategorie Kosten
1	gering	< 1.000 €	geringe Kosten
2	durchschnittlich	1.000 - 10.000 €	moderate Kosten
3	überdurchschnittlich	10.000 - 100.000 €	erhöhte Kosten
4	hoch	0,1 - 1 Mio €	hohe Kosten
5	sehr hoch	> 1 Mio €	extreme Kosten

Skala zur Kategorisierung der Verfügbarkeit (Tabelle 7.1, Seite 88)

AV_C	Verfügbarkeit	Definition
0	nicht angeboten	Wird auf dem Markt nicht angeboten
1	marktübliche	Gebrauchsgegenstand der für jedermann frei auf dem Markt (z.B. Supermarkt) erhältlich ist
2	marktverfügbar	Kann ohne Beschränkungen von jedermann in Fachgeschäften erworben werden.
3	(gewerblicher) Fachhandel	Gegenstand ist nur in Fachgeschäften und für gewerbliche Unternehmen erhältlich
4	beschränkter Erwerb	Erwerb unter Auflagen für registrierte Käufer; Spezialanfertigungen
5	Stark eingeschränkte Verfügbarkeit	Verbot des Handels oder Besitz durch Gesetz

Skala zur Kategorisierung der Baugröße und Mobilität (Tabelle 7.3, Seite 89)

M	Mobilität	Baugröße	Beispiel
1	stationär	> 77 m ³	Gebäude oder ortsfeste Anlage
2	transportabel	10 – 77 m ³	Conatiner, Fernmeldekabine, Lkw
3	mobil	0,2 – 10 m ³	PKW, Van, Kleinlaster
4	sehr mobil	0,02 – 0,2 m ³	Koffer, Rucksack
5	hoch mobil	< 0,02 m ³	Aktenkoffer

Skala zur Bezeichnung der Frequenzbänder (Tabelle 2 in [95]) (Tabelle 7.4, Seite 89)

Radar Nomenklatur		ITU Nomenklatur		
Band (Radar)	Frequenzbereich	Frequenzbereich	Band Nr.	Band (ITU)
HF	$3 \text{ MHz} < f \leq 30 \text{ MHz}$	$3 \text{ MHz} < f \leq 30 \text{ MHz}$	7	HF
VHF	$30 \text{ MHz} < f \leq 300 \text{ MHz}$	$30 \text{ MHz} < f \leq 300 \text{ MHz}$	8	VHF
UHF	$0,3 \text{ GHz} < f \leq 1 \text{ GHz}$	$0,3 \text{ GHz} < f \leq 3 \text{ GHz}$	9	UHF
L	$1 \text{ GHz} < f \leq 2 \text{ GHz}$			
S	$2 \text{ GHz} < f \leq 4 \text{ GHz}$			
C	$4 \text{ GHz} < f \leq 8 \text{ GHz}$	$3 \text{ GHz} < f \leq 30 \text{ GHz}$	10	SHF
X	$8 \text{ GHz} < f \leq 12 \text{ GHz}$			
Ku	$12 \text{ GHz} < f \leq 18 \text{ GHz}$			
K	$18 \text{ GHz} < f \leq 27 \text{ GHz}$			

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Frequenzbänder nach der Radar Nomenklatur bezeichnet.

Skala zur Kategorisierung der Bandbreite nach [6]

(Tabelle 7.5, Seite 90)

Bandbreite		Fractional Bandwidth $B_F = 2 \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l}$	Band Ratio $b_r = \frac{f_h}{f_l}$	Beispiel
Hypoband Schmalband	/ HO	$0,00 < B_F \leq 0,01$	$0,00 < b_r \leq 1,01$	Sinusquelle, pulsmodierte Sinusquelle
Mesoband	ME	$0,01 < B_F \leq 1,00$	$1,01 < b_r \leq 3,0$	gedämpfter Sinus
Sub-Hyperband	SH	$1,00 < B_F \leq 1,63$	$3,00 < b_r \leq 10,0$	Chirp
Hyperband	HE	$1,63 < B_F \leq 2,00$	$10,00 < b_r \leq \infty$	Gaußpuls, Bipolarer Puls, Doppelt-Exponentieller Puls,

Skala zur Kategorisierung der Frequenzagilität

(Tabelle 7.6, Seite 90)

F_{AG}	Frequenzagilität	Definition	Beschreibung
1	Festfrequenz	$\Delta f = 0$	Die Quelle arbeitet auf einer festen (Mitten-) Frequenz und ist nicht durchstimmbare.
2	gering	$ \Delta f / f_c \leq 1 \%$	Die (Mitten-) Frequenz kann bis zu $\pm 1 \%$ verstimm werden.
3	mittel	$1 \% < \Delta f / f_c \leq 10 \%$	Die (Mitten-) Frequenz kann bis zu $\pm 10 \%$ verstimm werden.
4	hoch	$10 \% < \Delta f / f_c \leq 25 \%$	Die (Mitten-) Frequenz kann bis zu $\pm 25 \%$ verstimm werden.
5	sehr hoch	$ \Delta f / f_c \geq 25 \%$	Die (Mitten-) Frequenz kann um mehr als $\pm 25 \%$ verstimm werden.

Literaturverzeichnis

1. Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln (Elektromagnetische-Verträglichkeit-Gesetz EMVG). Bundesgesetzblatt, I(61):2879–2891, Dezember 2016.
2. Paul, Clayton R. (Herausgeber): *Introduction to Electromagnetic Compatibility (EMC)*. John Wiley & Sons, Inc., February 2006, ISBN 978-0471755005.
3. *URSI Resolution on Criminal Activities using Electromagnetic Tools*. Seiten 178–179, August 1999, ISSN 0074-9516.
4. Radasky, W.A., C.E. Baum und M.W. Wik: *Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI)*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 46(3):314 – 321, Aug. 2004, ISSN 0018-9375. doi: 10.1109/TEMC.2004.831899.
5. Radasky, W.A.: *The threat of intentional interference (IEMI) to wired and wireless systems*. In: *17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2006. EMC-Zurich 2006.*, Seiten 160 –163, February 2006. doi: 10.1109/EMCZUR.2006.214894.
6. *IEC 61000-2-13, Environment - High-power electromagnetic (HPEM) environments - Radiated and conducted*. IEC, March 2005.
7. Benford, J., J. A. Swegle und E. Schamiloglu: *High-Power Microwaves*, Band 3. CRC Press, 2016, ISBN 978-1-4822-6059-5.
8. Gaudet, J. A., R. J. Barker, C. J. Buchenauer, C. Christodoulou, J. Dickens, M. A. Gundersen, R. P. Joshi, H. G. Krompholz, J. F. Kolb, A. Kuthi, M. Laroussi, A. Neuber, W. Nunnally, E. Schamiloglu, K. H. Schoenbach, J. S. Tyo und R. J. Vidmar: *Research issues in developing compact pulsed power for high peak power applications on mobile platforms*. Proceedings of the IEEE, 92(7):1144–1165, July 2004, ISSN 0018-9219. doi: 10.1109/JPROC.2004.829006.
9. Korovin, S. D., V. V. Rostov, S. D. Polevin, I. V. PEGEL, E. Schamiloglu, M. I. Fuks und R. J. Barker: *Pulsed power-driven high-power microwave sources*. Proceedings of the IEEE, 92(7):1082–1095, July 2004, ISSN 0018-9219. doi: 10.1109/JPROC.2004.829020.
10. Sabath, F., M. Backstrom, B. Nordstrom, D. Serafin, A. Kaiser, B.A. Kerr und D. Nitsch: *Overview of four European high-power microwave narrow-band test facilities*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 46(3):329 – 334, Aug. 2004, ISSN 0018-9375. doi: 10.1109/TEMC.2004.831822.
11. Prather, W. D., C. E. Baum, R. J. Torres, F. Sabath und D. Nitsch: *Survey of worldwide high-power wideband capabilities*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 46(3):335–344, Aug 2004, ISSN 0018-9375. doi: 10.1109/TEMC.2004.831826.
12. Backstrom, M. und J. Loren: *Microwave coupling into a generic object. Properties of measured angular receiving pattern and its significance for testing*. In: *2001 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2001*, Band 2, Seiten 1227 –1232 vol.2, 2001. doi: 10.1109/ISEMC.2001.950610.
13. Camp, M., H. Garbe und F. Sabath: *Coupling of transient ultra wide band electro-magnetic fields to complex electronic systems*. In: *2005 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2005*, Band 2, Seiten 483–488, Aug 2005. doi: 10.1109/ISEMC.2005.1513563.
14. Nitsch, D., M. Camp, F. Sabath, J. L. ter Haseborg und H. Garbe: *Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threats*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 46(3):380–389, Aug 2004, ISSN 0018-9375. doi: 10.1109/TEMC.2004.831842.
15. Nitsch, D. und F. Sabath: *Electromagnetic effects on systems and components*. In: *Book of Abstracts AMEREM 2006*, Jul. 2006.
16. Sabath, F.: *Classification of electromagnetic effects at system level*. In: *2008 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe 2008*, Seiten 1 –5, Sep. 2008. doi: 10.1109/EMCEUROPE.2008.4786916.
17. Sabath, F.: *Classification of electromagnetic effects at system level*, Seiten 325 – 332. Springer Science+Business Media, LLC, 2010, ISBN 978-0-387-77844-0. doi: 10.1007/978-0-387-77845-7_38.

18. IEC 61000-5-9, *Installation and mitigation guidelines - System-level susceptibility assessments for HEMP and HPEM*. IEC, 2009.
19. Radasky, W. und H. Ohsaki: *Recent Trends of TC 77 and its Subcommittees FR-PM-1-2*. In: *2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI PI)*, Seiten 1–22, July 2018. doi: 10.1109/EMCSI.2018.8495212.
20. IEC 61000-4-36, *IEMI Immunity Test Methods for Equipment and Systems*. IEC, November 2014.
21. ITU-T K.81, *High-power electromagnetic immunity guide for telecommunication systems*. International Telecommunication Union, June 2016.
22. WG C4.206, *Protection of the high voltage power network control electronics against intentional electromagnetic interference (IEMI)*. Cigre Study Committee C4, November 2014.
23. Sabath, F. und H. Garbe: *Risk potential of radiated HPEM environments*. In: *2009 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2009*, Seiten 226–231, Aug 2009. doi: 10.1109/IEMC.2009.5284566.
24. Sabath, F. und H. Garbe: *Concept of stochastic modeling for High-Power Electromagnetics (HPEM) risk analysis at system level*. In: *2013 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2013*, Seiten 401–406, Aug 2013. doi: 10.1109/IEMC.2013.6670446.
25. Genender, E., H. Garbe und F. Sabath: *Probabilistic Risk Analysis Technique of Intentional Electromagnetic Interference at System Level*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 56(1):200–207, Feb 2014, ISSN 0018-9375. doi: 10.1109/TEMC.2013.2272944.
26. Arnesen, O. und R. Hoad: *Overview of the European project HIPOW*. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 3(4):64–67, th 2014, ISSN 2162-2264. doi: 10.1109/MEMC.2014.7023201.
27. Beek, S. van de, J. Dawson, I. Flintoft, F. Leferink, N. Mora, F. Rachidi und M. Righero: *Overview of the European project STRUCTURES*. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 3(4):70–79, th 2014, ISSN 2162-2264. doi: 10.1109/MEMC.2014.7023202.
28. Deniau, V.: *Overview of the European project security of railways in Europe against Electromagnetic Attacks (SECRET)*. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 3(4):80–85, 2014, ISSN 2162-2264. doi: 10.1109/MEMC.2014.7023203.
29. Oakes, B. D., L. G. Mattson, P. Näsman und A. A. Glazunov: *A Systematic-Based Risk Assessment Framework for Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) on Critical Infrastructure*. Risk Analysis, 38(6):1279–1305, January 2018. doi: 10.1111/risa.12945.
30. Sabath, F. und H. Garbe: *Assessing the likelihood of various intentional electromagnetic environments the initial step of an IEMI risk analysis*. In: *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2015*, Seiten 1083–1088, Aug 2015. doi: 10.1109/IEMC.2015.7256319.
31. Trunzer, H. F.: *Infrastrukturinvestitionen und Wirtschaftswachstum*. Bock und Herchen, 1980.
32. Moteff, J. und P. Parfomak: *Critical Infrastructure and Key Assets: Definition and Identification*. Nummer RL32631. Congressional Research Service, October 2004.
33. *Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie)*. Technischer Bericht, Juni 2009.
34. Graham, W R. et al.: *Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack - Critical Infrastructures*. apr. 2008, ISBN 978-0-16-080927-9.
35. IEC 61000-5-8, *Installation and mitigation guidelines - HPEM protection methods for the distributed infrastructure*. IEC, 2009.
36. Menssen, B., M. Mleczko, H. Garbe, K. Rathjen, S. Dickmann, S. van de Beek und F. Leferink: *Reference configurations for the characterization of critical infrastructures*. In: *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe 2014*, Seiten 1218–1223, Sept 2014. doi: 10.1109/EMCEurope.2014.6931090.
37. *Gesetz über das Telegraphenwesen des Deutschen Reichs*. Deutsches Reichsgesetzblatt, (21):467–470, April 1892.
38. ISO 31000, *Risk management - Principles and guidelines*. ISO, November 2009.
39. Kaplan, S. und B. J. Garrick: *On The Quantitative Definition of Risk*. Risk Analysis, 1(1):11–27. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x>, doi: 10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x.
40. Aven, T. und E. Zio: *Foundational Issues in Risk Assessment and Risk Management*. Risk Analysis, 34(7):1164–1172. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/risa.12132>, doi: 10.1111/risa.12132.
41. ISO-Guide-73, *Risk management - Vocabulary*. ISO, 2009.
42. Aven, T. (Herausgeber): *Foundations of Risk Analysis*, Band 2nd Edition. John Wiley & Sons, April 2012, ISBN 978-1-119-96697-5.
43. Ayyub, B. M. (Herausgeber): *Risk Analysis in Engineering and Economics*, Band 2nd Edition. Chapman and Hall/CRC, March 2014, ISBN 978-1466518254.
44. Genender, E.: *Risikoanalyse von Systemen bei elektromagnetischer Störbeaufschlagung*. Shaker Verlag, 2012, ISBN 978-3-8440-1525-6.

45. Aven, T. und S. Guikema: *On the Concept and Definition of Terrorism Risk*. Risk Analysis, 35(12):2162–2171. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/risa.12518>, doi: 10.1111/risa.12518.
46. Ängskog, P., P. Näsman und L. Mattsson: *Resilience to Intentional Electromagnetic Interference Is Required for Connected Autonomous Vehicles*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Seiten 1–8, 2018, ISSN 0018-9375. doi: 10.1109/TEMC.2018.2866178.
47. Müller, W.: *Risiko und Ungewißheit*. Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, 1993, ISSN 3-7910-8033-4.
48. Knight, F.: *Risk, Uncertainty and Profit*. University of Chicago Press, 1971, ISBN 0-226-44690-5.
49. Gleißner, W.: *Grundlagen des Risikomanagements. Mit fundierten Informationen zu besserer Entscheidung*. Franz Vahlen, 3. Auflage, 2011.
50. Eckstein, Peter P.: *Repetitorium Statistik : Deskriptive Statistik - Stochastik - Induktive Statistik, Lehrbuch*. Springer Gabler, Wiesbaden, 2014, ISBN 9783658057480. doi: 10.1007/978-3-658-05748-0.
51. Papoulis, Athanasios: *Probability, random variables, and stochastic processes, McGraw-Hill series in systems science*. McGraw-Hill, New York, 1965.
52. Wunsch, Gerhard und Helmut Schreiber: *Stochastische Systeme*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006, ISBN 9783540292265. doi: 10.1007/3-540-29226-8.
53. Richter, Hans: *Wahrscheinlichkeitstheorie, Die Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften, In Einzeldarstellungen mit Besonderer Berücksichtigung der Anwendungsgebiete*, Band 86. Springer, Berlin, 1966, ISBN 9783662008454. doi: 10.1007/978-3-662-00845-4.
54. Mises, Richard: *Wahrscheinlichkeit Statistik und Wahrheit : Einführung in die Neue Wahrscheinlichkeitslehre und Ihre Anwendung*. Springer Vienna, Vienna, 1951, ISBN 9783709120675. doi: 10.1007/978-3-7091-2067-5.
55. Kutschera, Franz: *Zur Problematik der naturwissenschaftlichen Verwendung des subjektiven Wahrscheinlichkeitsbegriffs, Synthese*. Synthese, 20(1):84–103, 1969, ISSN 1573-0964, 0039-7857. doi: 10.1007/BF00567238.
56. De Finetti, Bruno: *Wahrscheinlichkeitstheorie : einführende Synthese mit kritischem Anhang, Teoria delle probabilità ; dt. ; Teoria della probabilità ; dt. ; Scientia nova*. Oldenbourg, Wien, 1981, ISBN 3486447017. Teoria delle probabilità ; dt. ; Teoria della probabilità ; dt. ;
57. Finetti, Bruno de: *Logical foundations and measurement of subjective probability, Acta Psychologica*. Acta Psychologica, 34:129–145, 1970, ISSN 0001-6918. doi: 10.1016/0001-6918(70)90012-0.
58. Finetti, Bruno De: *On the Probability Concept, Statistica, Vol 76, Iss 3, Pp 207-219 2016*. Statistica, Vol 76, Iss 3, Pp 207-219 (2016), 2016, ISSN 0390-590X, 1973-2201. doi: 10.6092/issn.1973-2201/6620.
59. Schmidt, C.: *Der subjektive Wahrscheinlichkeitsbegriff*, April 2014. Studienarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU).
60. *BSI, IT-Grundsicherheits-Kataloge - 4 Glossar und Begriffsdefinitionen*. Bundesamt für die Sicherheit in der Informationstechnik, Oktober 2018.
61. *ISO/IEC Guide 51, Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards*. ISO, 2014.
62. *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*. IEC International Electrotechnical Commission.
63. *DIN 40041, Zuverlässigkeit; Begriffe*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Dezember 1990.
64. Birolini, Alessandro: *Reliability Engineering : Theory and Practice*. Springer, Berlin, 2004, ISBN 9783662054093. doi: 10.1007/978-3-662-05409-3.
65. *Raufahrt-Projektmanagement - Projektphaseneinteilung und -planung*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, April 1996.
66. Nitsch, D., F. Sabath, C. Braun und H.U. Schmidt: *Comparison of the HPM and the UWB susceptibility of microprocessor boards*. In: *Book of Abstracts AMEREM 2002*, Seite 18, 2002.
67. Hoad, R., A. Lambourne und A. Wraight: *HPEM and HEMP susceptibility assessments of computer equipment*. In: *17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC-Zurich 2006*, Seiten 168 – 171, February 2006. doi: 10.1109/EMCZUR.2006.214896.
68. Parfenov, Y.V., L.N. Zdoukhov, W.A. Radasky und M. Ianoz: *Conducted IEMI threats for commercial buildings*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 46(3):404 – 411, Aug. 2004, ISSN 0018-9375. doi: 10.1109/TEMC.2004.831883.
69. Brauer, F., F. Sabath und J.L. ter Haseborg: *Susceptibility of IT network systems to interferences by HPEM*. In: *2009 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2009*, Seiten 237 –242, Aug. 2009. doi: 10.1109/IEMC.2009.5284569.
70. Mansson, D., T. Nilsson, R. Thottappillil und M. Backstrom: *Propagation of UWB Transients in Low-Voltage Installation Power Cables*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 49(3):585 –592, Aug. 2007, ISSN 0018-9375. doi: 10.1109/TEMC.2007.902186.
71. *Risikomanagement im Rahmen der Störfall-Verordnung*, Band SFK-GS-41. Störfall-Kommission beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, April 2004.
72. *Risikomanagement für Organisationen und Systeme*. Austrian Standards Institute, 2010.
73. *ISO 31010, Risk management -Risk Assessment Techniques*. ISO, November 2009.
74. *FAA System Safety Handbook*. FAA, December 2000.
75. Kind, S., E. A. Hartmann und M. Bovenschulte: *Die Visual-Roadmapping-Methode für die Trendanalyse, Roadmapping und Visualisierung von Expertenwissen*. itt perspektive, 4, Februar 2011.

76. IEC 61882, *Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide*. IEC International Electrotechnical Commission, May 2001.
77. *Military Standard: Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*. US Department of Defense, November 1980.
78. Lanzrath, M., M. Suhrke und H. Hirsch: *HPEM Based Risk Assessment of Substations enabled for the Smart Grid*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Seiten 1–13, 2019, ISSN 0018-9375. doi: 10.1109/TEMC.2019.2893937.
79. *DIN 25419, Ereignisablaufanalyse; Verfahren, graphische Symbole und Auswertung*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., November 1985.
80. Mansson, D., R. Thottappillil und M. Backstrom: *Methodology for Classifying Facilities With Respect to Intentional EMI*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 51(1):46–52, February 2009, ISSN 0018-9375. doi: 10.1109/TEMC.2008.2010327.
81. Frenzel, T., J. Rohde und J. Opfer: *Elektromagnetische Schirmung von Gebäuden*, Band BSI-TR-03209. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2007.
82. Cooke, Roger M.: *Experts in Uncertainty: Opinion and Subjective Probability in Science*. Oxford Univ Press, 30. Auflage, January 1992, ISBN 978-0195064650.
83. Sabath, F.: *What can be learned from documented Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) attacks?* In: *General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI*, Seiten 1–4, Aug 2011. doi: 10.1109/URSI-GASS.2011.6050718.
84. *Bildungsstand der Bevölkerung*. Statistisches Bundesamt, 2016.
85. Gambetta, D. und S. Hertog: *Why are there so many Engineers among Islamic Radicals?* European Journal of Sociology, 50(2):201–230, Aug 2009. doi: 10.1017/S0003975609990129.
86. Lochner, L. und E. Moretti: *The Effect of Education on Crime: Evidence from Prison Inmates, Arrests, and Self-Reports*. American Economic Review, 94(1):155–189, March 2004. doi: 10.1257/000282804322970751.
87. *Einkommens- und Verbrauchsstichprobe, Geld- und Immobilienvermögen sowie Schulden privater Haushalte 2013*, Band 2. Statistisches Bundesamt, 2014.
88. Mora, N., F. Vega, G. Lugin, F. Rachidi und M. Rubinstein: *System Design and Assessment Note 41: Study and Classification of Potential IEMI Sources*. Technischer Bericht, Juli 2014.
89. Giri, D.V.: *High-power Electromagnetic Radiators: Nonlethal Weapons and Other Applications*. Harvard University Press, December 2004, ISBN 978-0674015692.
90. Schamiloglu, E., R. J. Barker, M. Gundersen und A. A. Neuber: *Modern Pulsed Power: Charlie Martin and Beyond*. Proceedings of the IEEE, 92(7):1014–1020, July 2004, ISSN 0018-9219. doi: 10.1109/JPROC.2004.829058.
91. Sabath, F., D. Nitsch, M. Jung und T. H. G. G. Weise: *Design and setup of a short pulse simulator for susceptibility investigations*. IEEE Transactions on Plasma Science, 30(5):1722–1727, Oct 2002, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2002.805331.
92. Delmote, P., J. P. Duproux, F. Bieth und S. Pinguet: *Performances of an ultra compact, high-power, monocyclus pulse former for WB and UWB applications*. In: *2011 IEEE Pulsed Power Conference*, Seiten 558–562, June 2011. doi: 10.1109/PPC.2011.6191486.
93. Pinguet, S., J. P. Duproux, P. Delmote, F. Bieth und R. Bischoff: *Short-Pulse Marx Generator for High-Power Microwave Applications*. IEEE Transactions on Plasma Science, 41(10):2754–2757, Oct 2013, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2013.2277981.
94. *ISO 668 ISO-Container der Reihe 1 - Klassifikation, Maße, Gesamtgewichte*. ISO, Oktober 1999.
95. *IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands*. IEEE Std 521-2002 (Revision of IEEE Std 521-1984), 2003. doi: 10.1109/IEEESTD.2003.94224.
96. Sabath, F., E. L. Mokole und S. N. Sammaddar: *Definition and Classification of Ultra-Wideband Signals and Devices*. The Radio Science Bulletin, (313):14–26, June 2005, ISSN 1024-4530.
97. Rahimezei, E., K. Sann und M. Vogel: *Kompendium: Li-Ionen-Batterien - Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen*. Technischer Bericht, Juli 2015.
98. Engelko, A.: *Optimierungsregeln für Halbleiteröffnungsschalter in Hochspannungspulsenergiegeneratoren sehr hoher Leistung*. Forschungszentrum Karlsruhe, 2002.
99. Wetz, D. A., B. Shrestha und P. M. Novak: *Elevated rate cycling of high power electrochemical energy storage devices for use as the prime power source of an EM launcher*. In: *2012 16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology*, Seiten 1–6, May 2012. doi: 10.1109/EML.2012.6325175.
100. Liebfried, O. und V. Brommer: *A Four-Stage XRAM Generator as Inductive Pulsed Power Supply for a Small-Caliber Railgun*. IEEE Transactions on Plasma Science, 41(10):2805–2809, Oct 2013, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2013.2257873.
101. Liebfried, O., V. Brommer und S. Scharnholz: *Development of XRAM generators as inductive power sources for very high current pulses*. In: *2013 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, Seiten 1–6, June 2013. doi: 10.1109/PPC.2013.6627504.
102. Dedie, P., V. Brommer und S. Scharnholz: *Twenty-Stage Toroidal XRAM Generator Switched by Counter-current Thyristors*. IEEE Transactions on Plasma Science, 39(1):263–267, Jan 2011, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2010.2055168.

103. Efanov, V. M., V. V. Karavaev, A. F. Kardo-Sysoev und I. G. Tchashnikov: *Fast ionization dynistor (FID)-a new semiconductor superpower closing switch*. In: *1997 11th IEEE International Pulsed Power Conference, 1997. Digest of Technical Papers*, Band 2, Seiten 988–991 vol.2, June 1997. doi: 10.1109/PPC.1997.674523.
104. Grekhov, I. V., S. V. Korotkov, A. L. Stepaniants, D. V. Khristyuk, V. B. Voronkov und Y. V. Aristov: *High-Power Semiconductor-Based Nano and Subnanosecond Pulse Generator With a Low Delay Time*. IEEE Transactions on Plasma Science, 33(4):1240–1244, Aug 2005, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2005.852349.
105. Ehlen, T.: *UWB-Halbleiterpulser - Konzept und Realisierung mit COST-Bauteilen*. In: *EME Symposium, 2005. Tagungsband des 2005 Wehrtechnischen Symposiums Elektromagnetische Effekte*, Seiten 1–8, September 2005.
106. Grekhov, I. V. und G. A. Mesyats: *Physical basis for high power semiconductor nanosecond opening switches*. In: *12th IEEE International Pulsed Power Conference, 1999. Digest of Technical Papers*, Band 2, Seiten 1158–1161 vol.2, June 1999. doi: 10.1109/PPC.1999.823727.
107. Lyubutin, S. K., G. A. Mesyats, S. N. Rukin und B. G. Slovikovskii: *Repetitive nanosecond all-solid-state pulsers based on SOS diodes*. In: *11th IEEE International Pulsed Power Conference, 1997. Digest of Technical Papers*, Band 2, Seiten 992–998 vol.2, June 1997. doi: 10.1109/PPC.1997.674524.
108. Moller, C., M. Elfsberg, A. Larsson und S. E. Nyholm: *Experimental Studies of the Influence of a Resonance Cavity in an Axial Vircator*. IEEE Transactions on Plasma Science, 38(6):1318–1324, June 2010, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2010.2042822.
109. Barker, R. J. und E. Schamiloglu: *High-Power Microwave Sources and Technologies*, Band 1. Wiley-IEEE Press, June 2001, ISBN 978-0780360068.
110. Granatstein, V. L. und I. Alexeff: *High-Power Microwave Sources*, Band 1. Artech House Microwave Library, November 1987, ISBN 978-0890062418.
111. Moeller, C.: *Design and Experiments with High Power Microwave Sources - The Virtual Cathode Oscillator*. Dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, December 2012, ISBN 978-91-7501-568-2.
112. Moeller, C., M. Elfsberg, T. Hurtig, A. Larsson und S. E. Nyholm: *Proof of Principle Experiments on Direct Generation of the TE₁₁ Mode in a Coaxial Vircator*. IEEE Transactions on Plasma Science, 38(1):26–31, Jan 2010, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2009.2035502.
113. Benford, J.: *History and future of the relativistic magnetron*. In: *2010 International Conference on the Origins and Evolution of the Cavity Magnetron (CAVMAG)*, Seiten 40–45, April 2010. doi: 10.1109/CAVMAG.2010.5565566.
114. Haworth, M. D., G. Baca, J. Benford, T. Englert, K. Hackett, K. J. Hendricks, D. Henley, M. LaCour, R. W. Lemke, D. Price, D. Ralph, M. Sena, D. Shiffler und T. A. Spencer: *Significant pulse-lengthening in a multigigawatt magnetically insulated transmission line oscillator*. IEEE Transactions on Plasma Science, 26(3):312–319, June 1998, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/27.700759.
115. Dwivedi, S. und P. K. Jain: *Design Expressions for the Magnetically Insulated Line Oscillator*. IEEE Transactions on Plasma Science, 41(5):1549–1556, May 2013, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2013.2256470.
116. Lemke, R. W., S. E. Calico und M. C. Clark: *Investigation of a load-limited, magnetically insulated transmission line oscillator (MILO)*. IEEE Transactions on Plasma Science, 25(2):364–374, Apr 1997, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/27.602513.
117. Lemke, R. W. und M. C. Clark: *Theory and simulation of highpower microwave generation in a magnetically insulated transmission line oscillator*. Journal of Applied Physics, 62:3436–3440, Oct 1987. doi: 10.1063/1.339309.
118. Dong, Wang, Qin Fen, Wen Jie, Chen Dai-Bing, Jin Xiao, An Hai-Shi und Zhang Xin-Kai: *HEM 11 mode magnetically insulated transmission line oscillator: Simulation and experiment*. Chinese Physics B, 21(8):084101, 2012. <http://stacks.iop.org/1674-1056/21/i=8/a=084101>.
119. Gold, S. und G. S. Nusinovich: *Review of high-power microwave source research*. Review of Scientific Instruments, 68(11):3945–3974, Nov. 1997, ISSN 0034-6748.
120. Gewartowski, J. W. und H. A. Watson: *Principles of Electron Tubes: Including Grid-Controlled Tubes, Microwave Tubes and Gas Tubes*. Van Nostrand Company, May 1965, ISBN 978-0442026509.
121. Nitsch, D. und F. Sabath: *Widebandimpulsformer*, Juli 2004. <https://register.dpma.de/DPMAregister/pat/register?AKZ=102563357>.
122. Baum, C. E.: *Circuit and Electromagnetic System Design Note 45: Switched Oscillators*. Technischer Bericht, September 2000.
123. Hong, K. D. und S. W. Braidwood: *Resonant antenna-source system for generation of high-power wideband pulses*. IEEE Transactions on Plasma Science, 30(5):1705–1711, Oct 2002, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2002.806637.
124. Armanious, M. M. H., S. V. B. Olaya, J. S. Tyo, M. C. Skipper, M. D. Abdalla, L. L. Altgilbers und A. Bryan: *An Electrically Small Conical Folded Dipole Antenna for Use as a Compact, Self-Resonant Mesoband High-Power Microwave Source*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 62(12):5960–5967, Dec 2014, ISSN 0018-926X. doi: 10.1109/TAP.2014.2360549.
125. King, Ronold W. P.: *The Theory of Linear Antennas*. Harvard University Press, 1956, ISBN 9780674182189.
126. Balanis, C. A.: *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley & Sons Inc., 2nd Auflage, 1997, ISBN 0-471-59268-4.

127. Stutzman, Warren L. und Gary A. Thiele: *Antenna Theory and Design*. Wiley & Sons Inc., 3rd Auflage, 2012, ISBN 978-0470576649.
128. Kildal, Per Simon: *Foundations of Antenna Engineering: A Unified Approach for Line-of-Sight and Multipath*. Artech House Publishers, 2015, ISBN 978-1608078677.
129. Balanis, C. A.: *Modern Antenna Handbook*, Kapitel 5 Reflector Antennas, Seiten 201–262. Wiley, 2008, ISBN 9780470294154. doi: 10.1002/9780470294154.ch5.
130. Balanis, C. A.: *Modern Antenna Handbook*, Kapitel 7 Leaky Wave Antennas, Seiten 325–367. Wiley, 2008, ISBN 9780470294154. doi: 10.1002/9780470294154.ch7.
131. Balanis, C. A.: *Modern Antenna Handbook*, Kapitel 12 Wideband Arrays, Seiten 581–629. Wiley, 2008, ISBN 9780470294154. doi: 10.1002/9780470294154.ch12.
132. Giri, D. V. und F. M. Tesche: *Energy patterns of pulsed antennas illustrated with a reflector type of an impulse-radiating antenna (IRA)*. URSI Radio Science Bulletin, 2012(340):14–24, March 2012, ISSN 1024-4530. doi: 10.23919/URSIRSB.2012.7910168.
133. Bowen, L. H., E. G. Farr, D. I. Lawry und J. S. Tyo: *An ultra-compact impulse-radiating antenna*. URSI Radio Science Bulletin, 2005(313):39–48, June 2005, ISSN 1024-4530. doi: 10.23919/URSIRSB.2005.7909524.
134. Sabath, F., D. Nitsch, M. Jung und T. H. G. G. Weise: *Design and setup of a short pulse simulator for susceptibility investigations*. In: *Pulsed Power Plasma Science, 2001. PPS-2001. Digest of Technical Papers*, Band 1, Seiten 500–503 vol.1, June 2001. doi: 10.1109/PPPS.2001.1002142.
135. Papas, C. H. und R. King: *Radiation from Wide-Angle Conical Antennas Fed by a Coaxial Line*. Proceedings of the IRE, 39(1):49–51, Jan 1951, ISSN 0096-8390. doi: 10.1109/JRPROC.1951.230420.
136. Lee, R. T. und G. S. Smith: *A design study for the basic TEM horn antenna*. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 46(1):86–92, Feb 2004, ISSN 1045-9243. doi: 10.1109/MAP.2004.1296150.
137. Grosvenor, Chr. A., R. T. Johnk, D. R. Novotny, S. Canales, B. Davis und J. Veneman: *NIST Technical Note 1544: TEM Horn Antenna Design Principles*. Technischer Bericht, January 2007.
138. Farr, E. G. und C. A. Frost: *Sensor and Simulation Note 296: Development of a Reflector IRA and a Solid Dielectric Lens IRA, Part I: Design, Predictions, and Construction*. Technischer Bericht, April 1996.
139. *IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas*. IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993), Seiten 1–50, March 2014. doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6758443.
140. Kildal, P. S., E. Martini und S. Maci: *Degrees of Freedom and Maximum Directivity of Antennas: A bound on maximum directivity of nonsuperreactive antennas*. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 59(4):16–25, Aug 2017, ISSN 1045-9243. doi: 10.1109/MAP.2017.2706659.
141. Harrington, R.: *On the gain and beamwidth of directional antennas*. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 6(3):219–225, July 1958, ISSN 0096-1973. doi: 10.1109/TAP.1958.1144605.
142. Kildal, P. S. und S. R. Best: *Further investigations of fundamental directivity limitations of small antennas with and without ground planes*. In: *2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Seiten 1–4, July 2008. doi: 10.1109/APS.2008.4618968.
143. *HPEMcase - Non-Lethal Effector System for the Protection of Persons and Buildings*, June 2017. http://www.diehl.com/fileadmin/diehl-defence/user_upload/flyer/140700_HPEMCase_e_neu.pdf.
144. Peikert, T., H. Garbe und S. Potthast: *Risk analysis with a fuzzy-logic approach of a complex installation*. Adv. Radio Sci., 14:91–96, Sep 2016, ISSN 0018-9375. doi: doi.org/10.5194/ars-14-91-2016.
145. Aliev, Rafik Aziz. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, ISBN 978-3-642-34894-5. doi: 10.1007/978-3-642-34895-2.
146. Peikert, T., H. Garbe und S. Potthast: *Fuzzy-Based Risk Analysis for IT-Systems and Their Infrastructure*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 59(4):1294 – 1301, Aug 2017, ISSN 0018-9375. doi: 10.1109/TEMC.2017.2682643.
147. Peikert, T., H. Garbe und S. Potthast: *A fuzzy approach for IEMI risk analysis of IT-Systems with respect to transient disturbances*. In: *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2015*, Seiten 1077–1082, Aug 2015. doi: 10.1109/ISEMC.2015.7256318.
148. *BSI, Hochverfügbarkeitskompendium - Band M: Maßnahmen*. Bundesamt für die Sicherheit in der Informationstechnik, 2013.
149. Frenzel, T., J. Rohde und J. Opfer: *Elektromagnetische Schirmung von Gebäuden - Praktische Messungen*, Band BSI-TR-03209-2. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2008.
150. Shao, Hao, Guozhi Liu, Zhanfeng Yang, Changhua Chen, Zhimin Song und Wenhua Huang: *Characterization of modes in coaxial vircator*. IEEE Transactions on Plasma Science, 34(1):7–13, Feb 2006, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2005.863895.
151. Collins, G. B. (Herausgeber): *Microwave Magnetrons, Radiation Laboratory Series 6*. McGraw Hill, January 1948, ISBN 978-1568383736.
152. Gilmour, A. S.: *Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Cross-Field Amplifiers, and Gyrotrons*, Band 28. Artech House Publishers, February 2011, ISBN 978-1608071845.
153. Lehner, G.: *Elektromagnetische Feldtheorie*. Springer, 1990, ISBN 3-540-52319-7.
154. Jackson, J. D.: *Klassische Elektrodynamik*, Band 4. Walter de Gruyter, Juni 2006, ISBN 978-3-11-018970-4.

155. Serlin, V. und M. Friedman: *Development and optimization of the relativistic klystron amplifier*. IEEE Transactions on Plasma Science, 22(5):692–700, Oct 1994, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/27.338284.
156. Serlin, V., M. Friedman, M. Lampe und R. Hubbard: *New developments in the relativistic klystron amplifier technology*. In: *1994 10th International Conference on High-Power Particle Beams*, Band 2, Seiten 881–884, June 1994.
157. Sandalov, A. N., V. M. Pikunov, V. E. Rodiakin und A. A. Stogov: *Relativistic high power klystrons*. In: *1992 9th International Conference on High-Power Particle Beams*, Band 3, Seiten 1673–1678, May 1992.
158. Fazio, M. V., W. B. Haynes, B. B. Carlsten und R. M. Stringfield: *The long-pulse, high-current relativistic klystron at 500 MW and beyond*. In: *1994 10th International Conference on High-Power Particle Beams*, Band 1, Seiten 268–271, June 1994.
159. Miller, R. B., W. F. McCullough, K. T. Lancaster und C. A. Muehlenweg: *Super-reltron theory and experiments*. IEEE Transactions on Plasma Science, 20(3):332–343, Jun 1992, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/27.142834.
160. Miller, R. B., W. F. McCullough, K. T. Lancaster und C. A. Muehlenweg: *SUPER-RELTRON analysis and experiments*. In: *1992 IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest*, Seiten 237–240 vol.1, June 1992. doi: 10.1109/MWSYM.1992.187955.
161. Miller, R. B., C. A. Muehlenweg, K. W. Habiger und J. R. Clifford: *Super-Reltron progress*. IEEE Transactions on Plasma Science, 22(5):701–705, Oct 1994, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/27.338285.
162. Miller, R. B.: *Pulse shortening in high-peak-power Reltron tubes*. IEEE Transactions on Plasma Science, 26(3):340–347, Jun 1998, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/27.700764.
163. Mahto, M. und P. K. Jain: *Oscillation Condition and Efficiency Analysis of the Reltron*. IEEE Transactions on Plasma Science, 44(7):1056–1062, July 2016, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2016.2577059.
164. Armanious, M., J. S. Tyo, M. C. Skipper, M. D. Abdalla, W. D. Prather und J. E. Lawrance: *Interaction Between Geometric Parameters and Output Waveforms in High-Power Quarter-Wave Oscillators*. IEEE Transactions on Plasma Science, 38(5):1124–1131, May 2010, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2010.2044519.
165. *ARRL Handbook for Radio Communications*, Band 94. ARRL, 2017, ISBN 978-1-62595-063-5.
166. Vega, F. und F. Rachidi: *A Switched Oscillator Geometry Inspired by a Curvilinear Space - Part I: DC Considerations*. IEEE Transactions on Plasma Science, 44(10):2240–2248, Oct 2016, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2016.2581308.
167. Vega, F. und F. Rachidi: *A Switched Oscillator Geometry Inspired by a Curvilinear Space - Part II: Electrodynamic Considerations*. IEEE Transactions on Plasma Science, 44(10):2249–2257, Oct 2016, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2016.2581586.
168. Vega, F., F. Rachidi und D. V. Giri: *A New Set of Electrodes for Coaxial Quarter Wave Switched Oscillators*. IEEE Transactions on Plasma Science, 41(9):2545–2550, Sept 2013, ISSN 0093-3813. doi: 10.1109/TPS.2013.2276400.
169. Armanious, Miena Magdi Hakeem: *Design and Analysis of a High-Power Moderate Band Radiator using a Switched Oscillator*. Dissertation, University of Arizona, August 2010. <http://hdl.handle.net/10150/195937>.
170. Armanious, M., J. S. Tyo, M. C. Skipper, M. D. Abdalla, W. D. Prather und G. Gruen: *Electrostatic field management and electrodynamic modeling of switched quarter-wave oscillators*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 18(4):1054–1065, August 2011, ISSN 1070-9878. doi: 10.1109/TDEI.2011.5976095.
171. McLean, J. S.: *A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 44(5):672–, May 1996, ISSN 0018-926X. doi: 10.1109/8.496253.
172. Buchenauer, C. und J. Marek: *Hybrid antenna sources for radiating highpower impulsive fields*. Proceedings SPIE, 2557:209–213, 1995, ISSN O-8194-1916-8/.
173. Ramon, E. S., S. Bernal, M. M. H. Armanious, J. S. Tyo, M. C. Skipper und M. D. Abdalla: *Tunable Electrically Small Conical Folded Dipole Antenna Used as a Mesoband High-Power Microwave Source*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 15:1614–1617, 2016, ISSN 1536-1225. doi: 10.1109/LAWP.2016.2519511.
174. Lehr, J. und P. Ron: *Foundations of Pulsed Power Technology*, Kapitel Electrical Breakdown in Gases, Seite 369438. John Wiley & Sons, 2007, ISBN 978-1-118-62839-3. doi: 10.1002/9781118886502.ch8.

Sachverzeichnis

- Magnetically Insulated Line Oscillator (MILO), 108, 193
- Marx-Generator, 95
- Tesla-Transformator, 96
- XRAM-Generator, 97
- Antennen, 126
- Bewertung
 - Antennenoszillator, 119
 - Halbleiter-Pulsgeneratoren, 100
 - Hochspannungsquellen, 95
 - Klystron, 112
 - Leitungsresonator, 114
 - Magnetron, 107
 - Marx-Generator, 96
 - MILO, 109
 - Primärenergiequellen, 93
 - Switched Oscillator, 117
 - Tesla-Transformator, 97
 - VIRCATOR, 105
 - XRAM, 98
- Bow Tie Analysis, 57
- Electromagnetic Interference (EMI), 7
- Elektrische Systeme, 22, 23
- Elektromagnetische Beeinflussung, 7
 - Verträglichkeit (EMV), 7
- Elektromagnetische Beeinflussung, 7
- Elektromagnetische Beeinflussung
 - absichtliche, Elektromagnetische Beeinflussung vorsätzliche, 9
- Elektromagnetische Verträglichkeit, 8
- EMI-Szenario, 68
- Event Tree Analysis, 56
- Generischer Angreifer, 77
- Hazard and Operability Study, 50
- Hochspannungsquellen, 93
- Impulsquelle, 94
- Impulsquellen, Primärenergiequellen, 90
- Klystron, 110, 195
- Kritische Infrastrukturen, 5
- Leitungsresonatoren, 113, 201
- Magnetron, 106, 191
- Methoden
 - deduktive, 42
 - explorative, 43
 - hybride, 42
 - induktive, 42
- Preliminary Hazard Analysis, 46
- Preliminary Hazard List, 44
- Pulsformende Schaltungen, 124, 206
- Reltron, 200
- Resonante Antennen, Antennen-Oszillatoren, 117
- Resonante Antennen, Antennenoszillatoren, 205
- RF-Modulatoren, 103
- Risiko, 9, 10
- Risiko
 - bewältigung, 38
 - bewertung, 38
 - identifikation, 36
 - prioritätszahl, 60
 - absichtlicher Beeinflussung, 11
 - Matrix, 62
 - Vektor, 63
- Risikomanagement, 11
- Risikomanagement
 - Grundsätze, 28
 - Prozess, 34
 - Struktur, 32
- Risikoursachen, Gefährdung, 15
- Scenario Analysis, 48
- Skalen, 88
- Skalen
 - Frequenzagilität, 90
 - Bandbreite, 90
 - Frequenzbänder, 89
 - Mobilität, 89
 - Verfügbarkeit, 88
- Störquellen
 - Aufbau, 86

- Structured What-if Technique, 52
Switched Oscillator, 115, 203
Threat Scenario, Effect and Criticality Analysis, 54
Topfkreis, 202
Unsicherheit, 11
UWB-Störquellen, 124
Verfügbarkeit, 17
Virtual Cathode Oscillator (VIRCATOR), 104, 189
Virtual Cathode Oscillator (VIRCATOR)
 axial, 189
 koaxial, 189
virtuelle Kathode, 104
Wahrscheinlichkeit, 12
Zuverlässigkeit, 16