HAMFU
HISTORY

KRIEG IM AETHER

Vorlesungen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich
im Wintersemester 1985/1986
Leitung:
Bundesamt für Übermittlungstruppen
Divisionär J. Biedermann, Waffenchef der Übermittlungstruppen

Schutz von Geräten und Elektroniksystemen vor elektromagnetischen Störungen, insbesondere NEMP

Referent: D. Hansen, Dr. Ing.

Diese Vorlesung wurde durch die Stiftung HAMFU digitalisiert und als
PDF Dokument für www.hamfu.ch aufbereitet.

SCHUTZ VON GERÄTEN UND ELEKTRONIK-SYSTEMEN VOR ELEKTROMAGNETISCHEN STÖRUNGEN, INSBESONDERE NEMP

D. Hansen, Dr. Ing.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung
   1.1 Aktuelle Beispiele von "EMI-Unfällen"
   1.2 Internationale EMC-Normenentwicklung und Trends
   1.3 Wechselbeziehung zwischen den EMI-Fachgebieten

2. NEMP-Bedrohungsszenarien
   2.1 Boden-EMP (Endo)
   2.2 Höhen-EMP (Exo)
   2.3 Magnetohydrodynamischer EMP (MHD-EMP)

3. Theoretische Schadens-/Wirkungsanalyse in ausgedehnten Elektroniksystemen
   3.1 Ziel, Planung, Projektmanagement
   3.2 Rechenprogramme
   3.3 Fallbeispiele (Probleme, Grenzen)

4. Experimente zur Schutz- und Prüftechnik
   4.1 Schutzphilosophie
   4.2 Beispiele zu Schutzmassnahmen
   4.3 Prüfphilosophie
   4.4 Fallbeispiel: NEMP-Systemtest

5. NEMP-Normen

6. Vorstellung einiger NEMP-gehärteter Elektronikprodukte der Nachrichtentechnik

7. Zusammenfassung, Ausblick

Adresse des Autors:

D. Hansen, Dr.,Ing.
BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie
Forschungszentrum
5401 Baden-Dättwil

"Krieg im Aether", Folge XXV

1. EINLEITUNG

NEMP-Schutz ist ein besonderer Teilaspekt der allgemeinen Verträglichkeit (EMC = electromagnetic compatibility) von Elektronikprodukten in elektromagnetisch rauher Umgebung. Diese Verträglichkeit sicherzustellen, wird immer wichtiger, da einerseits die Bauelemente der Elektronik als Folge der höheren Integrationsdichte empfindlicher werden, und anderseits die Elektronik immer mehr und zum Teil auch lebenswichtige Funktionen in der modernen Gesellschaft übernimmt (Prozesssteuerung, Informationsübermittlung, elektrische Stromversorgung, Verkehr, Güterversorgung, Medizintechnik etc.).

1.1 AKTUELLE BEISPIELE VON "EMI-UNFAELLEN"

Bei fehlender oder nur mangelhafter EMC können elektromagnetische Störungen (EMI = electromagnetic interference) in Systemen und/oder Teilsystemen, wie Geräte, zu katastrophalen Ereignissen führen, wie durch die folgenden vier Beispiele gezeigt wird:

- Absturz des Nato-Kampfflugzeuges Tornado /1/
  Unfallursache: Unkontrollierte elektromagnetische Einstrahlung in das elektronische Steuerungssystem der etwa 100 Millionen DM teuren Maschine. Diese befand sich am 6.Juli 1984 im Tiefflug (230 m, Tempo 800 km/h) in unmittelbarer Nähe des bei Holzkirchen, südlich von München, mit hoher Leistung abstrahlenden Rundfunksenders "Radio Free Europe".

- Stahlwerksunglück an der Ostküste der USA /2/ im Sommer 1983
  Unglückursache: Unkontrollierte elektromagnetische Einstrahlung eines Handfunksprechgerätes in die Mikroprozessorsteuerung eines mit flüssigem Stahl beladenen Kranbehälters. Dieser öffnete vorzeitig und glühender Stahl tötete einen Arbeiter sofort, vier weitere wurden schwer verletzt.

- Versenkung des britischen Zerstörers Sheffield im Falklandkrieg /3/
  Ursache: Mangelnde EMC bei der feindlichen Flugzeugerkennung zwischen Radarempfänger und gleichzeitig betriebenem schiffseigenen Sender für Datentransfer via Satellit mit dem Hauptquartier in England. Die Empfangswarnanlage wurde durch starke eigene Sendersignale "zugestopft", was den Treffer einer argentinischen Exocet-Rakete zur Folge hatte. Als Verluste waren 20 Mann und das Schiff zu beklagen.

- Süddeutscher Raketenunfall (amerikanische Pershing II)
  Unfallursache: Elektrostatische Entladung. Durch Elektrostatik wurde beim Stationieren dieser Rakete der Raketenmotor unkontrolliert gezündet. Dieser Vorfall ist bedauerlich und erstaunlich zugleich insofern, als aus der offenen Literatur /4/ bekannt ist, dass die Rakete einem ausgedehnten Analyse-Testprogramm,z.B. gegen Blitzeinwirkungen bis zu Spitzenströmen von 200 kA, unterzogen wurde.

Probleme dieser und ähnlicher Art sind seit langer Zeit der Fachwelt bekannt. Durch entsprechende Ausführung bzw. Normung von Schutzmassnahmen, die zum Teil auch international verbindlich sind, wird versucht, solche Ereignisse zu verhindern.

1.2 INTERNATIONALE EMC-NORMENENTWICKLUNG UND TRENDS

Bereits in den Anfangszeiten der Telegraphie und Telefonie (1850 - 1875) waren Beeinflussungsprobleme wie Uebersprechen auf Kabeln und Fernleitungen bekannt. Zunehmende Störungen durch den Betrieb von elektrischen Geräten bei Funk- und Radioempfang führten später dann zur Gründung internationaler Fachgremien wie dem CISPR (= Comitē international spēcial des perturbations radioēlectriques) (1934). Seit 1945 beschäftigt man sich verstärkt in amerikanischen Militärkreisen mit EMC-Problemen der Army, Airforce und Navy, was 1968 zum Erlass des bekannten und heute z.B. noch gültigen Normenwerkes MIL-Std 461 (Electromagnetic Interference Characteristics, Requirements) des Departements of Defense führte. Die weitere Entwicklung der Technik vom Schwarz-Weiss-Fernseher, der Erfindung des Transistors, des Farbfernsehers bis hin zur heutigen Informatik und Mikroelektronik ist durch eine ständige Absenkung der Störschwellen gekennzeichnet.

Deshalb beschäftigen sich heute weltweit mehr als 20 grosse Normenorganisationen wie die IEC (International Electrotechnical Commission) zunehmend mit Fragen der EMC. Dies hat eine Unzahl von immer schärferen Normenpapieren, Richtlinien, Empfehlungen bis hin zu Gesetzen zur Folge (Bei der Firma Seequa Computer Corporation beschlagnahmten US-Marshals am 24.7.1985 wegen Verstosses gegen eine amerikanische FCC-EMC-Entstörungsvorschrift mit Gesetzeskraft auszuliefernes Material im Wert von 1 Mio US$). Zunehmend setzt sich hier nun die Erkenntnis durch, dass dem Zusammenspiel von einzelnen Geräten im Systemverbund erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Da erst in jüngster Zeit verstärkte Koordinationsanstrengungen zwischen den verschiedenen Organisationen unternommen wurden, sind die Normenwerke untereinander nicht immer kompatibel und physikalisch sinnvoll auslegbar /5/. Inhaltlich behandeln diese Normen sechs Fachgebiete (Fig. 1).

8-3

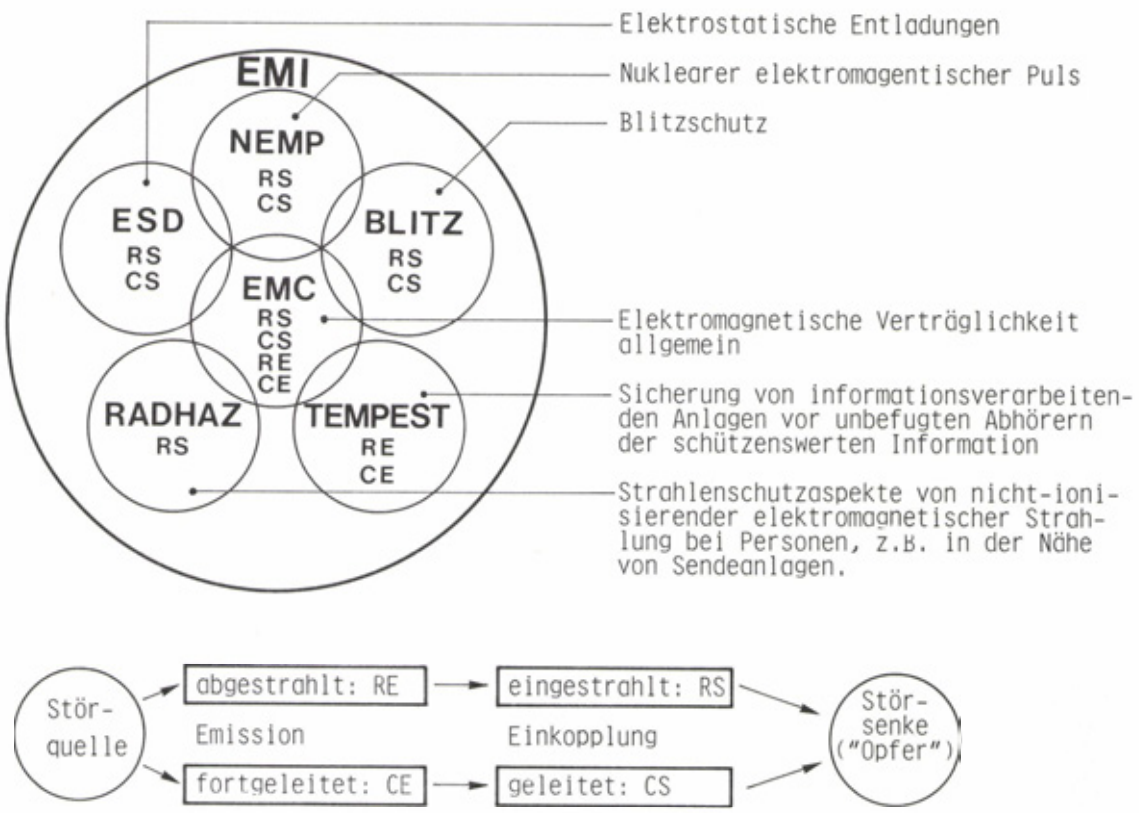


Fig. 1 Wechselbeziehung der unterschiedlichen EMI-Arbeitsgebiete

1.3 WECHSELBEZIEHUNG ZWISCHEN DEN EMI-FACHGEBIETEN

Im Laufe der Zeit kristallisierte sich bei der Behandlung von EMI-Problemen immer deutlicher heraus, dass alle diese, zum Teil sehr unterschiedlich anmutenden Arbeitsfelder einen gemeinsamen Nenner besitzen: gleichartige elektromagnetische Eigenschaften, die sich letztlich durch die Maxwellschen Gleichungen behandeln lassen. Bei einem störempfindlichen Elektroniksystem, wie z.B. einem Rechner, gibt es prinzipiell nur zwei Störmöglichkeiten:

- Das Gerät/die Anlage ist Quelle der Störung (E = emission)

- Das Gerät/die Anlage ist Opfer (Senke) der Störung (S = susceptibility).

In beiden Fällen wird nun weiterhin nach gestrahlten (R = radiated) oder leitungsgebundenen (C = conducted) Prozessen unterschieden.

Die hochfrequenten, digitalen Taktsignale solcher Anlagen erzeugen ein breitbandiges Frequenz-Spektrum, was z.B. über die als Antenne wirkende Verkabelung abgestrahlt und fortgeleitet wird. Anderseits wirken die Verkabelung, bzw. die mit Bauelementen bestückten Elektronikkarten, als Empfänger von Störungen. Es kommt zu Feldeinkopplungen bzw. Einströmungen. Soll nun dieser Rechner geschützt werden, sind zuerst die EMC-Schutzmassnahmen zu installieren. Wird zusätzlich TEMPEST gefordert, müssen die Aussendungen der Anlage besonders hoch gedämpft werden. Bei Blitzschutz ist besonders vor erhöhter Energieeinkopplung (Stromtragfähigkeit etc.) zu schützen.

NEMP- bzw. ESD-Gesichtspunkte erfordern gegebenenfalls Schutz vor steilflankigen Störungen sehr grosser Amplituden. Es erscheint somit z.B. sinnvoll, einen auf einem gesunden EMC-Konzept aufbauenden NEMP-Schutz kostengünstig zu realisieren.

Zu den Randgebieten der EMI-Disziplin gehört aber auch, und nicht zuletzt, der Strahlenschutz bei nichtionisierender EM-Strahlung /6/, da dies ein wichtiges Designkriterium bei Sendeantennen bzw. Einstrahlungsmessaufbauten (EMC-RS-Test) ist.

Im Folgenden werden nun im Einzelnen nur die für den NEMP-Schutz wichtigen Gesichtspunkte behandelt, da diese Thematik in den letzten Jahren zunehmend auch ins öffentliche Interesse gerückt ist.

2. NEMP-BEDROHUNGS-SZENARIEN

An dieser Stelle sei auf das bereits im letzten Vorlesungszyklus stattgefundene Referat von Dr.J.Gut (FMB) verwiesen (vgl. Sammlung der Kolloquiumsvorträge "Krieg im Aether", Folge XXIV). Es werden also nur die drei wichtigsten Szenarien kurz erläutert, wobei ich alle weiteren Betrachtungen und Analysen anschliessend nur auf den Exo-EMP-Fall beschränken möchte.

2.1 BODEN-EMP (ENDO-EMP)

Detoniert der nukleare Sprengsatz am Boden oder in geringer Höhe, so stehen in der Nähe des Detonationspunktes die von Nagasaki und Hiroshima bekannten Effekte wie Feuerball, Gammastrahlung, Röntgenstrahlung, Neutronen, Druckwelle und Hitze im Vordergrund. Je nach Waffenkaliber (Fig. 2, gilt für etwa 1 MT) entsteht eine mehr oder weniger grosse ionisierte Luftzone. In ihr herrschen grosse magnetische und elektrische Felder (Erzeugungsmechanismus: Unsymmetrie am Erdboden/Luftinterface), die aber mit zunehmender Entfernung viel schneller als beim flächendeckenden Höhen-EMP abnehmen.

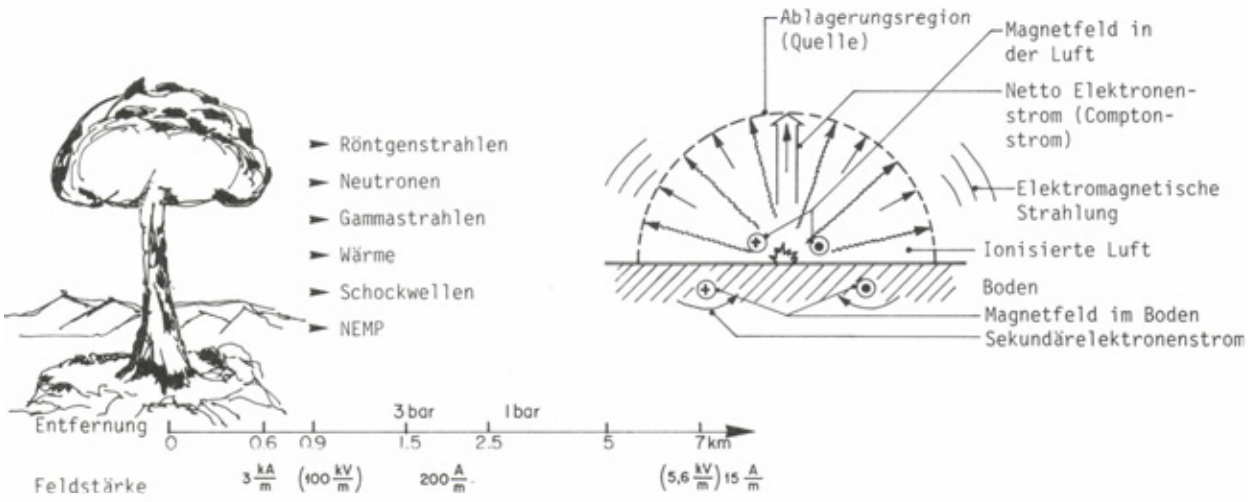


Fig. 2 Wirkungen eines Boden-EMP (Endo-EMP)

2.2 HOEHEN-EMP (EXO-EMP)

Höhendetonationen von nuklearen Sprengsätzen erreichen ihre grosse, Kontinente bedeckende elektrische Feldstärkewirkung über einen Wandlungseffekt (Comptoneffekt) der Gammastrahlung aus der Bombe mit in tieferen Luftschichten sich befindenden neutralen Molekülen (Fig. 3). Unter dem Einfluss des geomagnetischen Erdfeldes wird die punktförmige Gammaquelle in eine grosse flächenhafte Quelle, pulsförmig, synchron abstrahlender "Radiowellen" übergeführt /7/. Die am Erdboden auftretende steilflankige Feldstärkenänderung wird typisch mit 50 kV/m nach 5 ns angegeben, wobei normalerweise örtliche Feldstärkenvariationen bis zum Faktor zwei auftreten können.

Im Vergleich zum Endo-EMP, bei dem das Amplitudendichtespektrum schon bei der Frequenz von etwa 200 kHz auf 1% abgesunken ist, erreicht der Exo-EMP erst bei etwa 80 MHz 1%, so dass selbst höchstfrequente Empfangssysteme noch beeinflusst werden können. Zerstörerische Induktionswirkung zeigt der Exo-EMP besonders bei Systemen und metallischen Strukturen von grösseren Abmessungen.

2.3 MAGNETOHYDRODYNAMISCHER EMP (MHD-EMP)

Diese Begleiterscheinung eines Exo-EMP's /8/ wurde in ihrer zerstörenden Auswirkung, vor allem auf lange (viele km) Energie- und Nachrichtenleitungen, viele Jahre in der offenen Literatur nicht erwähnt.

Durch Ausdehnungserscheinungen des Bombenplasmas werden die Erdmagnetfeldlinien nach unten bzw. nach oben "gedrückt" (Fig. 4). Dieser im Sekundenbereich langsam sich abspielende Effekt induziert kleine elektrische Feldstärkeänderungen am Erdboden, die aber zu gefährlichen Energieeinkopplungen, ähnlich wie geomagnetische Sturmeffekte in Nordländern, führen. Die hierbei fliessenden langsamen Ausgleichsströme, speziell in sternpunktgeerdeten Energieversorgungssystemen, können versorgungstechnisch kurzfristig unersetzliche Komponenten, wie Transformatoren, durch Sättigungseffekte im Eisen zerstören. Der somit vielleicht noch nicht durch Exo-EMP-Einwirkung beschädigte Systemteil könnte nun ausfallen und den totalen Zusammenbruch eines Netzes bewirken. Genau hier setzt z.B. die theoretische Schadens-/Wirkungsanalyse mit ihren vorausberechnenden Abschätzungen ein.

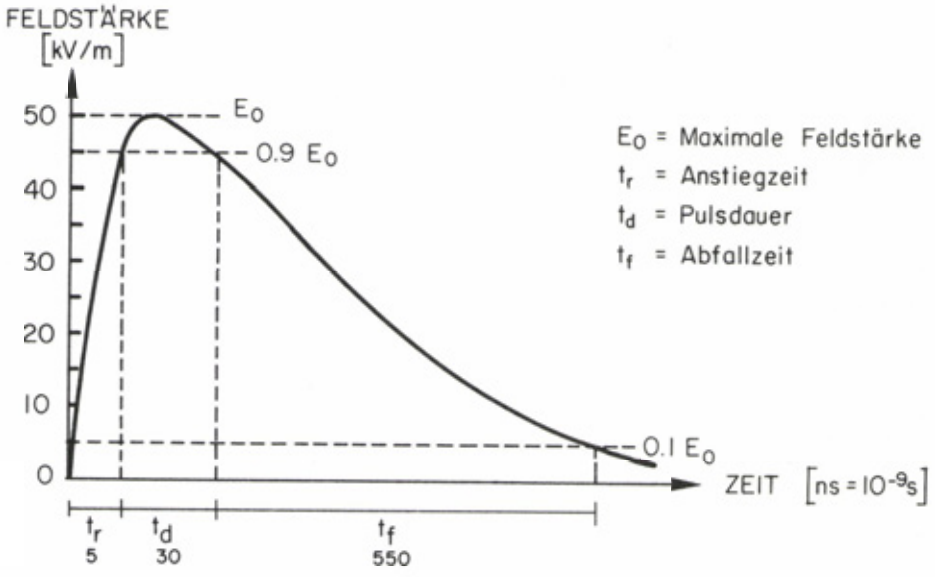


Fig. 3 Feldstärkeverlauf eines Exo-EMP am Boden (MIL-Standard 461B)

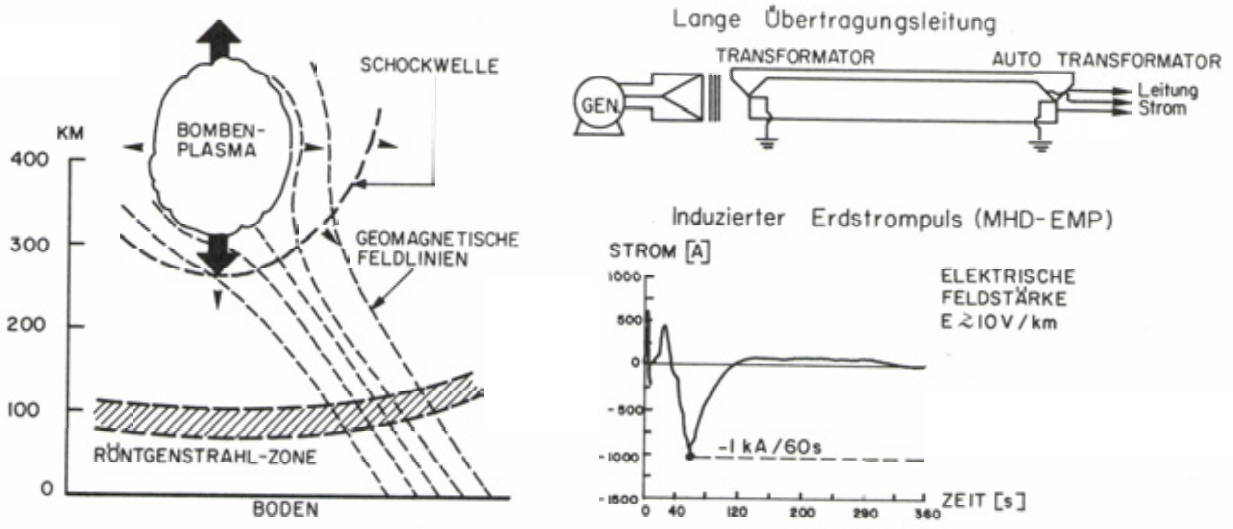


Fig. 4 Magnetohydrodynamischer EMP-Effekt (MHD-EMP)

3. THEORETISCHE SCHADENS-/WIRKUNGSANALYSE IN AUSGEDEHNTEN ELEKTRONIKSYSTEMEN

Die wichtigsten theoretischen Grundlagen sind bereits von Dr.J.Gut und W.Blumer im vorerwähnten Referat dargestellt worden, so dass hier nur der für uns wichtige industrielle Aspekt eingebracht wird.

3.1 ZIEL, PLANUNG, PROJEKTMANAGEMENT

Ziel einer solchen Analyse ist es, vor Projektbeginn erste Zahlen der an den Schnittstellen (z.B. Gerät/System) zu erwartenden Bedrohung in Form von Spannungen, Strömen und Feldern (Fig. 5) rechentechnisch zu ermitteln. Diese werden schon für die Pflichtenheftphase benötigt.

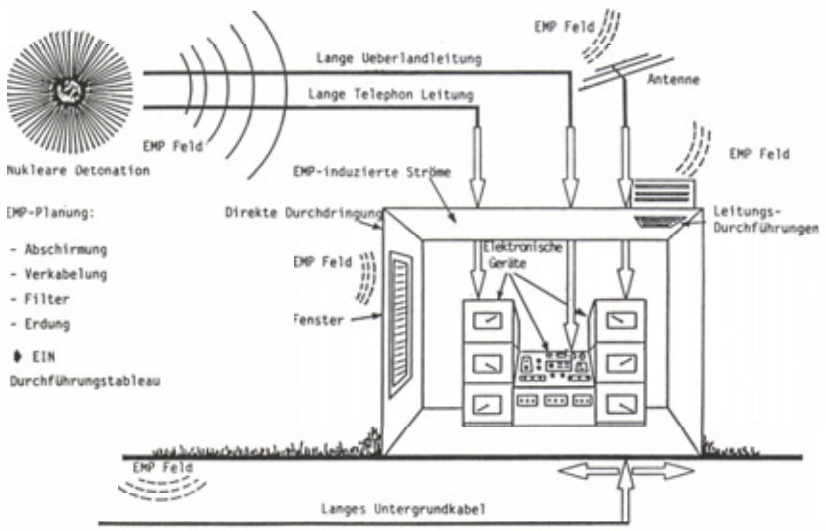


Fig. 5 Eindringen von EMP-Energie in ein Elektroniksystem

Ein grossflächiges System wird analytisch in prüftechnisch handhabbare Teilsysteme zergliedert. Der gesamte Ablauf von Analyse, Planung und Testen, das Projektmanagement, ist vereinfacht in Fig. 6 dargestellt. Wichtig ist, dass diese Massnahmen so früh wie nur irgendwie möglich in den Projektablauf eingebaut werden, da sonst später oft kostenintensive und zum Teil unbefriedigende Retrofitmassnahmen eingeleitet werden müssen.

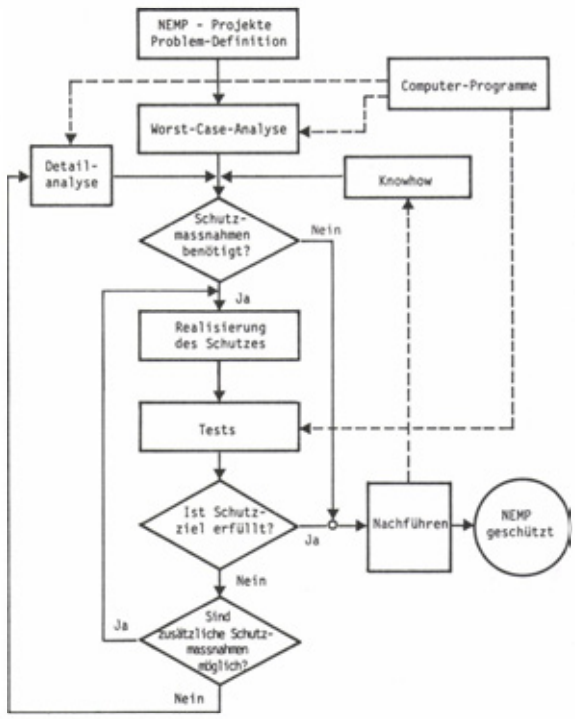


Fig. 6 Typische Vorgehensweise bei NEMP-Projekten

3.2 RECHENPROGRAMME

Es wurden im BBC-Forschungszentrum spezielle Computerprogrammpakete entwickelt /9/, /10/, /11/, sozusagen Analyse/Engineeringwerkzeuge. Diese Programme setzen sich aus mehreren, meist modularen Teilprogrammen zusammen und ermöglichen dadurch eine schnelle und zugleich kostengünstige Problemlösung. Grosse und somit schwerfällige Computercodes, wie sie zum Teil in den USA verwendet werden, führen oft zu langen Dateneingabe- und Rechenzeiten; zudem sind sie teuer oder oft nicht einmal erhältlich, da klassifiziert.

3.3 FALLBEISPIELE (PROBLEME, GRENZEN)

Erster Fall: Mikrowellensturm unter Exo-EMP-Einfluss. Ein etwa 50 m hoher Stahlgitterturm führt EMP-induzierte Ströme von bis zu 9 kA. Interessant ist, dass bei allen ausgedehnten Strukturen dieser Art durch den kurzen Feldanregungspuls Eigenresonanzen des Systems angeregt werden.

Zweiter Fall: In langen Energie- oder Nachrichtenleitungen werden, wie in Fig. 7 gezeigt ist, beträchtliche Spannungen und Ströme (worst case) induziert.

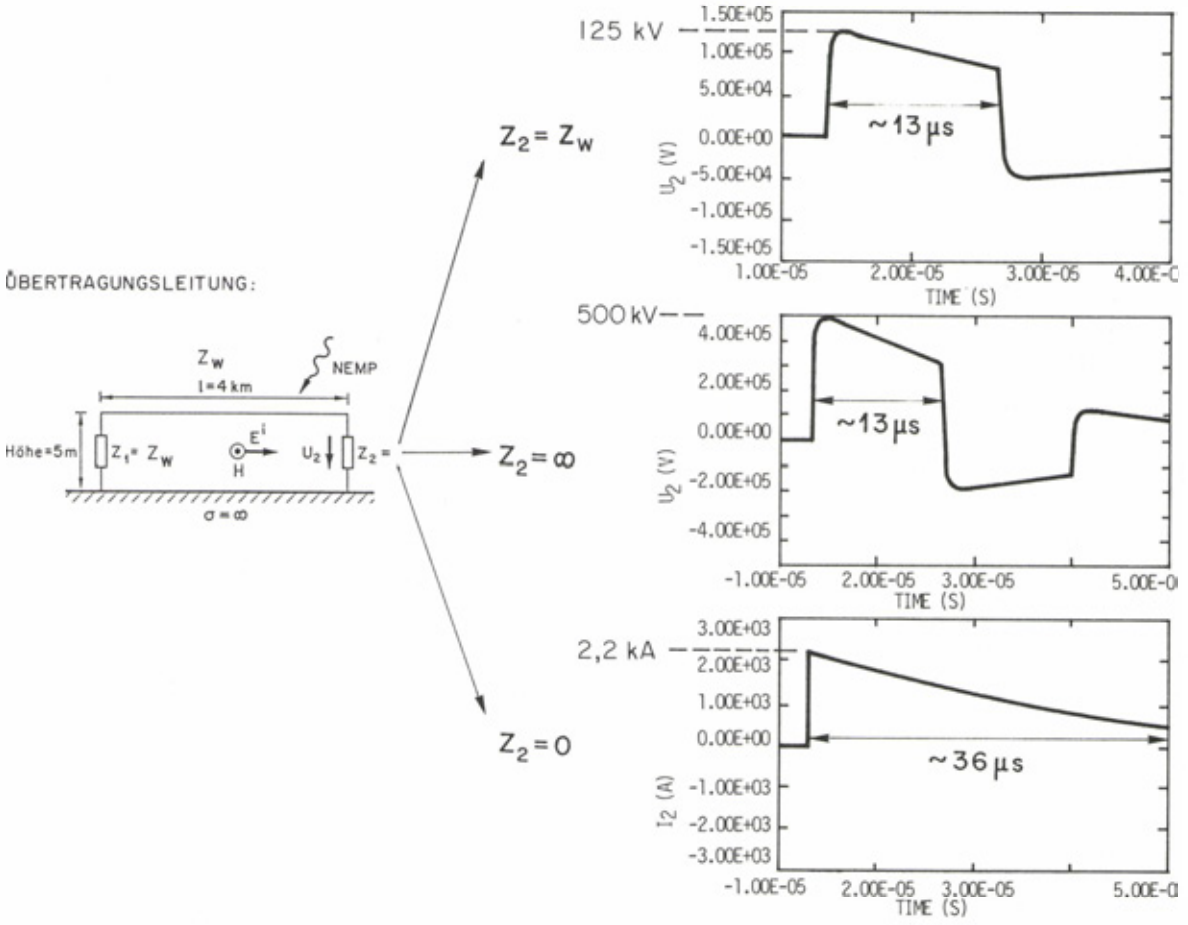


Fig. 7 Fallbeispiel: Exo-EMP-Einkopplung in lange Leitung (Z_w = 120 Ohm)

Dieser zweite Fall eignet sich anderseits aber auch gut, um auf Probleme und Grenzen eines solchen Vorgehens hinzuweisen:

- Ein physikalisches Modell macht idealisierte Annahmen: $\sigma = \infty$, Leitung verlustfrei etc.

- In der Praxis treten z.B. natürliche, dielektrische Spannungsbegrenzungen an Isolationsstrecken auf, so dass zum Teil richtig errechnete Einkoppelwerte (MV) kritisch zu überprüfen sind.

4. EXPERIMENTE ZUR SCHUTZ- UND PRUEFTECHNIK

4.1 SCHUTZPHILOSOPHIE

Namhafte, amerikanische NEMP-Spezialisten untergliedern das Schutzkonzept für "ground-based systems" in die Arbeitsgebiete /12/, /13/:

- Topology (Zoneneinteilung),
- Penetrating conductors (Durchführungen),
- Aperture control (Beherrschung der funktionsbedingten Schirmöffnungen),

wobei mit Recht auf die grosse Bedeutung der durch Abschirmungen hindurchgeführten Leiter hingewiesen wird. Hier können oft mit einfachen Mitteln,wie z.B. Massung der Kabelschirme am Geräteeingang,entscheidende Verbesserungen erreicht werden.

Prinzipiell wird unterschieden zwischen Schutz vor feldeingestrahlten Störungen (Schutzmassnahmen: Schirmung, Erdung, Massung) und leitungsverschleppten Störungen (Schutzmassnahmen: Z.B. Ueberspannungsbegrenzer, Filter).

Beim Zonenkonzept (Fig. 8) wird mit ineinander verschachtelten Schutzzonen gearbeitet. Gegen Feldstörungen können so leicht stufenweise 20 - 30 dB erreicht werden, um die Störung auf verträgliche EMI-Niveaus abzubauen (Zone 3). Für leitungsgebundene Störungen gilt prinzipiell dasselbe, nur ist die gleiche Stufung im Schutz aufgrund von anderen Einkoppelmechanismen in Leitungen nicht unbedingt sinnvoll.

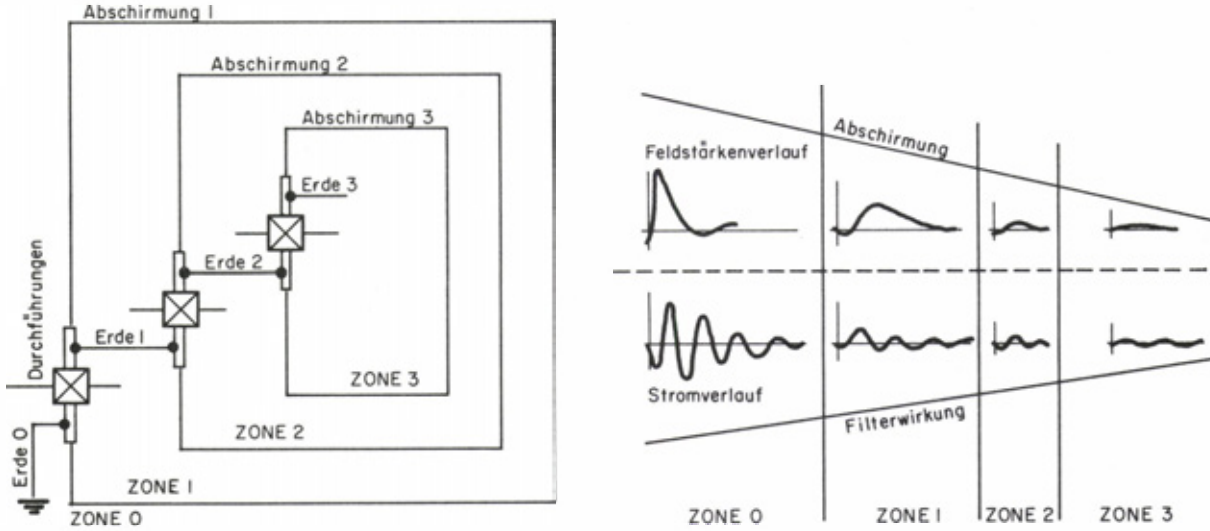


Fig. 8 NEMP-Schutzzonenkonzept

4.2 BEISPIELE ZU SCHUTZMASSNAHMEN

Felddämpfung

Bei der Ausführung EMP-geschützter Neubauten, die z.B. noch von grösseren Erdreichschichten überdeckt sind, ist es unter Umständen vorteilhaft, das Stahlarmierungsskelett mit in das Zonenkonzept einzubeziehen. Speziell im tiefen Frequenzbereich (10 kHz, Fig. 9) können dadurch ungefähr 20 dB magnetische Schirmdämpfung gewonnen werden. Voraussetzung ist, dass die Kreuzungspunkte der Armierung richtig verschweisst werden.

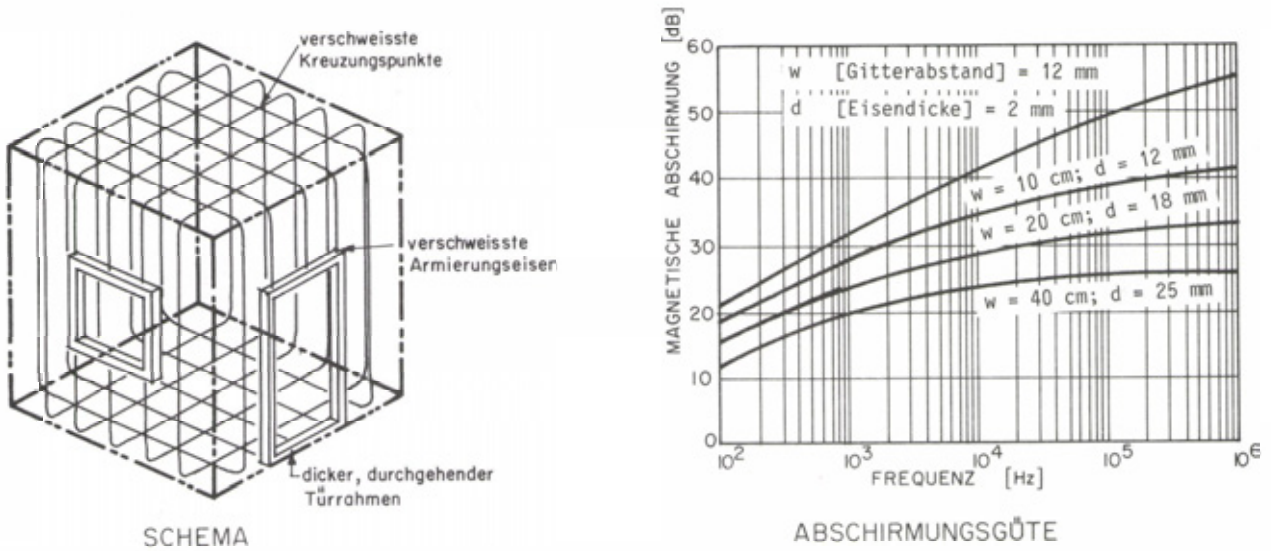


Fig. 9 Kostengünstiges Abschirmungskonzept

Leitungsdämpfung

Um leitungsgeführte Transienten unschädlich zu machen, muss zuerst der Zerstörungspegel der an die Leitungen angeschlossenen elektronischen Bauelemente bekannt sein /13/. Das Streuband für Strom/Spannungspegel einer solchen Suszeptibilitätsmessung für kurze Belastungszeiten an TTL-Leitungstreibern und Empfängern zeigt Fig. 10. Im gezeigten Zeitbereich < 100 ns herrschen als Versagensmechanismen vor allem dielektrische Defekte vor. Bei grösseren Zeiten sind Energieeffekte im Bauelement bestimmend.

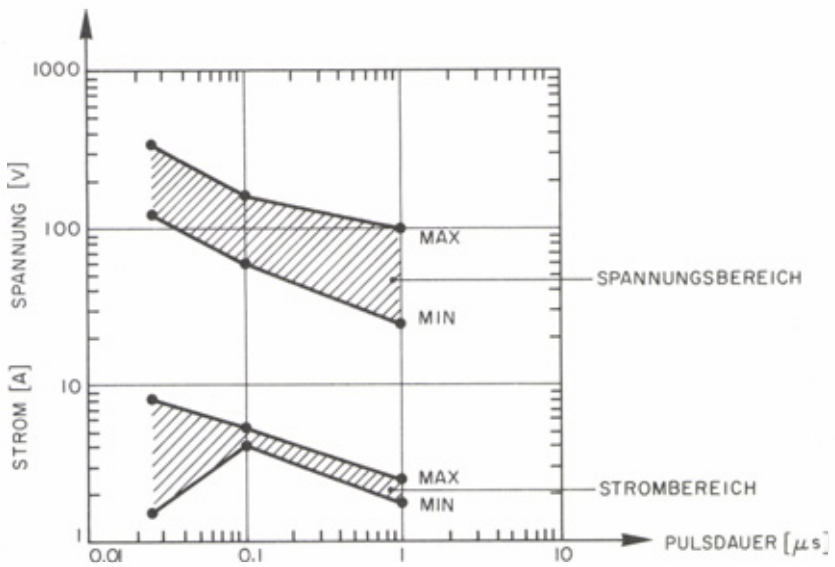


Fig. 10 Zerstörungsgrenzwerte von elektronischen Bauelementen

Die Störpegelanpassung an den jeweiligen Schutzzonen kann nun durch Ueberspannungsschutz (Funkenstrecken, Edelgas-Ableiter, Varistoren, schnellen Schutzdioden) bzw. Tiefpassfilter vorgenommen werden (Fig. 11).

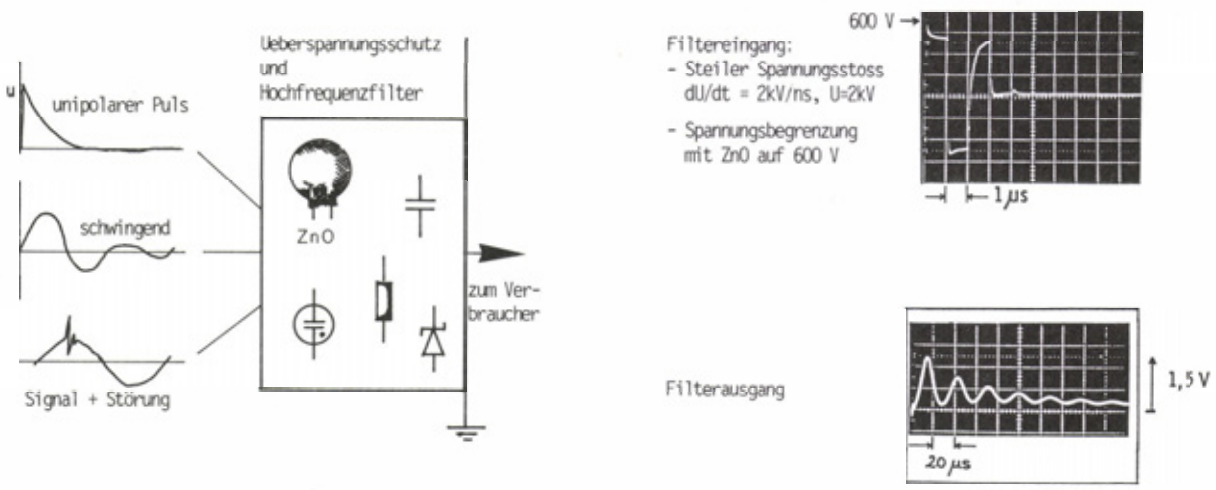


Fig. 11 Pulsdämpfung durch Ueberspannungsbegrenzung und Filterung

Diese Netzfilter besitzen gute Hochfrequenzeigenschaften, was auch durch die Messung mit steilem Spannungsstoss belegt wird (600 V → 1.5 V). Probleme können jedoch bei nicht fachgerechtem Filter/Schutzdesign entstehen, besonders bei langen Störpulsen, weil die Filter eventuell wegen mangelnder Dämpfungseigenschaften im tiefen Frequenzbereich versagen und der spannungsbegrenzte Eingangspuls ungedämpft am Filterausgang erscheint.

Fig. 12 zeigt einen krassen Fall des Versagens. Der Ausgangspuls hinter dem Filter ist auf 1'300 V "verstärkt" worden! Dieser Verstärkungseffekt kann durch unkontrollierte Resonanzen im Wechselspiel des Filters mit dem Lastkreis auch rechentechnisch bewiesen werden. Es muss deshalb darauf hingewiesen werden, dass Filterauswahl per Katalog -gemessen in 50 Ω Prüfschaltungen- problematisch ist. Diese Problematik /14/, /15/ liegt u.a. in der speziell im Commonmode bei tiefen Frequenzen stark vom Sollwert 50 Ohm abweichenden frequenzabhängigen Netzimpedanz.

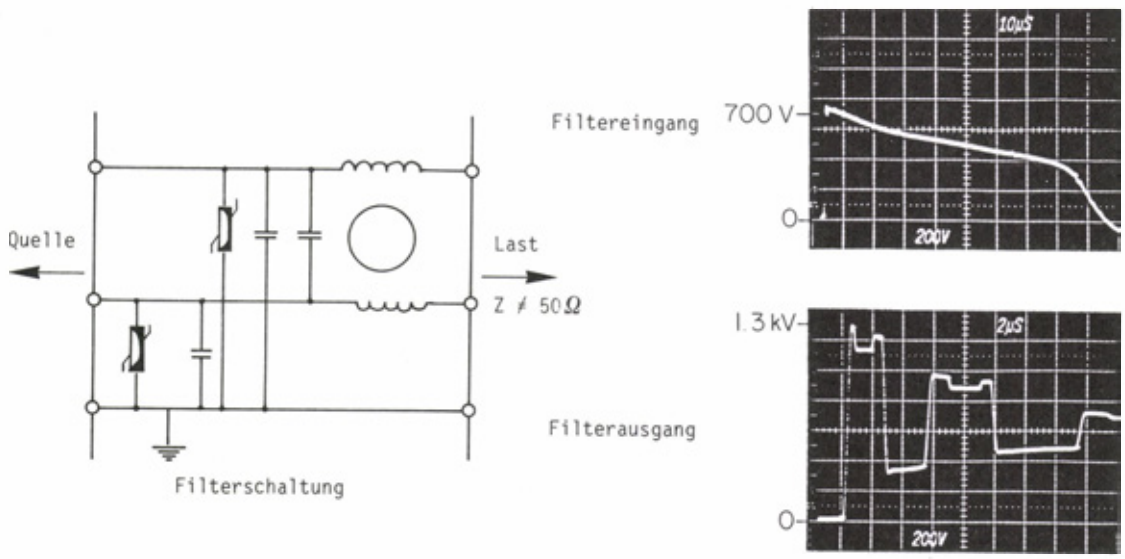


Fig. 12 "Verstärkungseffekt" bei Netzfiltern

4.3 PRUEFPHILOSOPHIE

Vornehmlich aus Kostenerwägungen streben wir zur Zeit nicht die Anschaffung eines grossen Feldsimulators (wie die AC-Spiez Arbeitsgruppe EMP) an. Entwicklungsbegleitend werden aber sowieso EMC-Tests an Geräten und Anlageteilen nach Testplan vorgenommen. Deshalb bietet sich für EMP-Teilprüfungen im Labor z.B. die Methode der Stromeinspritzung bzw. der Test in einer grösseren TEM-Zelle an. Durch Erkenntnisse aus Forschungs- und Entwicklungsmessungen in externen Grossraumsimulatoren wird dann versucht, Theorie und Praxis in Einklang zu bringen.

4.4 FALLBEISPIEL: NEMP-SYSTEMTEST

Im Simulator der Universität Stuttgart, Lehrstuhl Prof. K.Feser, wurde ein BBC-Leittechniksystem mit Verkabelung gemeinsam vermessen. Das Simulatorprinzip, die Antenne (zur Zeit 6 m Höhe) sowie die erreichten Prüfpulsdaten zeigt Fig. 13.

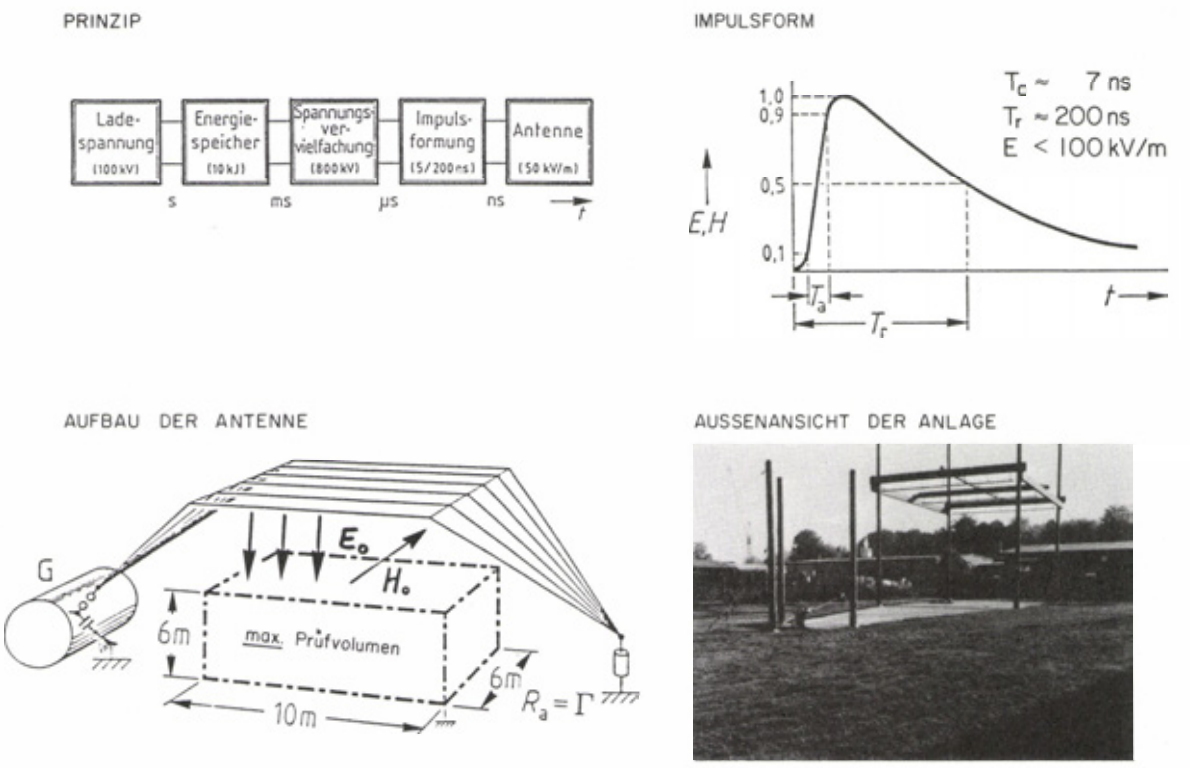


Fig. 13 Prinzip und Aufbau des MIGUS-EMP-Simulators

Fig. 14 zeigt den abgeschirmten Aufstellungsort des 800 kV EMP-Generators mit Marxgenerator und schnellem, pulsformenden Nachkreis. Die unter der Antenne in das Testobjekt eingekoppelten Störgrössen werden mittels hochschirmender Kabel oder Optolinks in die Messkabine geführt (Fig. 14). Hier können gleichzeitig mehrere Kanäle digital oder analog zum Teil mit Bandbreiten bis zu mehreren hundert Megahertz aufgezeichnet werden. Da z.B. die Feldsonden meist die abgeleiteten Signale ($E \rightarrow \dot{D}$, $H \rightarrow \dot{B}$) der physikalisch interessanten Messgrössen liefern, wird über einen Rechner integriert. Die Messprinzipien und Daten der verwendeten H- bzw. E-Feldsonden sind der Fig. 15 zu entnehmen, wobei die Empfindlichkeit in weiten Grenzen über die jeweilige aktive Messfläche festgelegt ist.

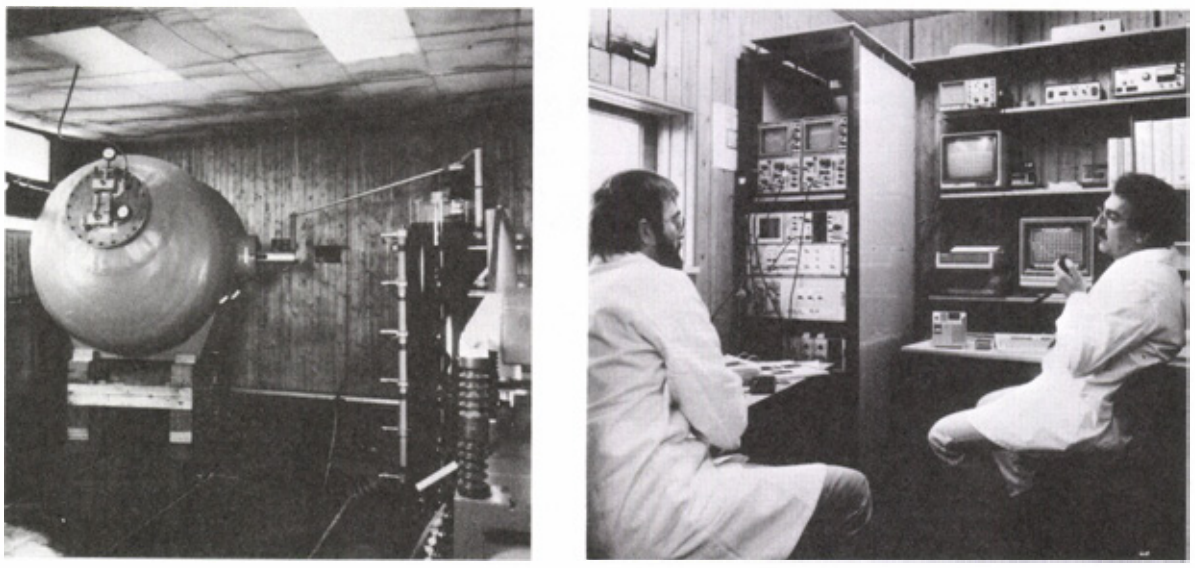
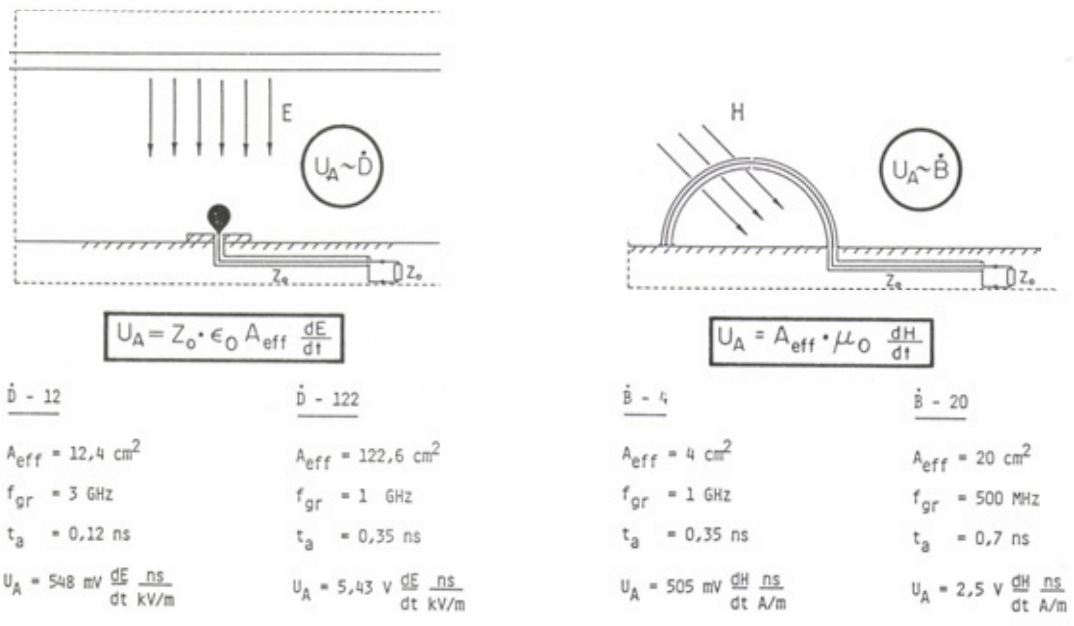


Fig. 14 Ansicht des MIGUS-Generators und der Auswerteelektronik



$\dot{D}$ - 12	$\dot{D}$ - 122	$\dot{B}$ - 4	$\dot{B}$ - 20
A_{eff} = 12,4 cm^2	A_{eff} = 122,6 cm^2	A_{eff} = 4 cm^2	A_{eff} = 20 cm^2
f_{gr} = 3 GHz	f_{gr} = 1 GHz	f_{gr} = 1 GHz	f_{gr} = 500 MHz
t_a = 0,12 ns	t_a = 0,35 ns	t_a = 0,35 ns	t_a = 0,7 ns
U_A = 548 mV $\frac{dE}{dt} \frac{ns}{kV/m}$	U_A = 5,43 V $\frac{dE}{dt} \frac{ns}{kV/m}$	U_A = 505 mV $\frac{dH}{dt} \frac{ns}{A/m}$	U_A = 2,5 V $\frac{dH}{dt} \frac{ns}{A/m}$

Fig. 15 Messprinzipien: D-Sonde für elektrisches Feld, B-Sonde für magnetisches Feld

Eine speziell für solche extrem hohen Anforderungen von uns entwickelte robuste optoelektrische, breitbandige Messwertübertragungsstrecke, ist in Fig. 16 dargestellt. Die Kopfverstärker sind geeicht, vollautomatisch, ferngesteuert und batteriebetrieben.

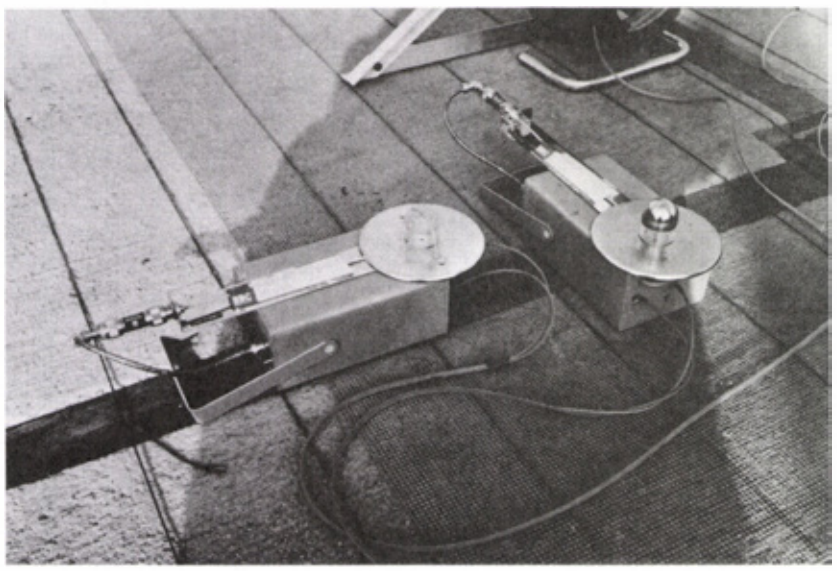


Fig. 16 Optolink mit Sonden

Den Vergleich eines mit diesem System gemessenen typischen Feldstärkeverlaufs im Prüfvolumen sowie den dazugehörigen Vergleich mit einem Normpuls zeigt Fig. 17. Hierbei zeigt sich die relativ gute Uebereinstimmung der jetzigen Pulsform mit dem jüngst durch die VG-Norm (VG 96 901 T4 10/85) vorgegebenen Testimpuls im Zeit- und Frequenzbereich.

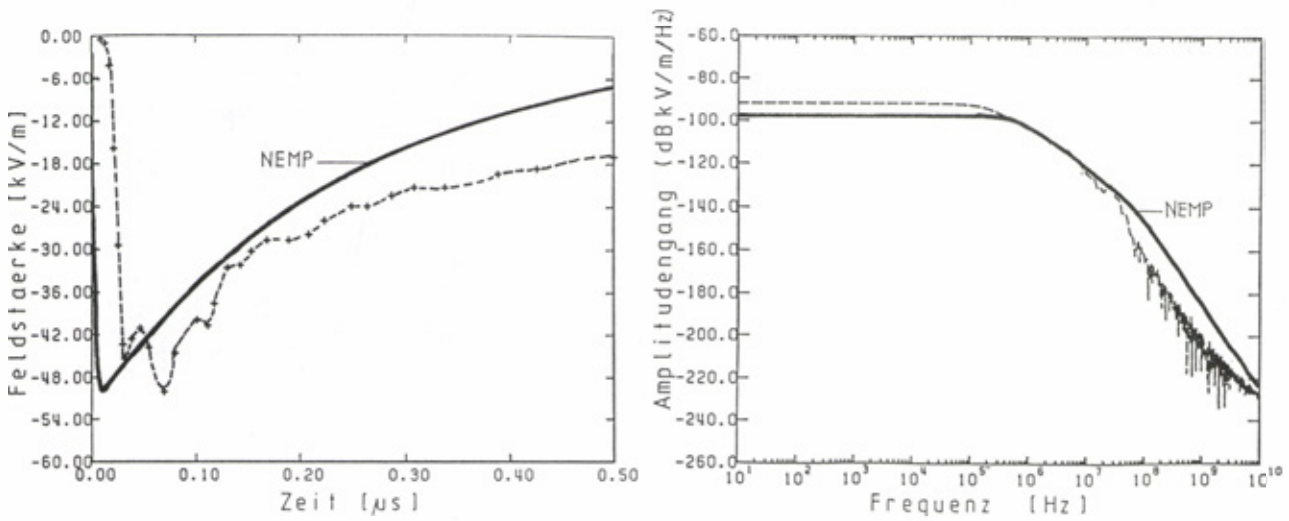


Fig. 17 Pulsform und Spektrum: Vergleich MIGUS und Norm-NEMP

Die Schirmdämpfung eines mit Elektronik bestückten kleinen Schrankes wird folgendermassen gemessen jeweils ein Feldsensor ist innen und aussen angebracht. Schnelle optoelektrische Datenübertragung ist hier unbedingt nötig, da sonst Verfälschungen von Messwerten auftreten, z.B. durch Kabelresonanzen.

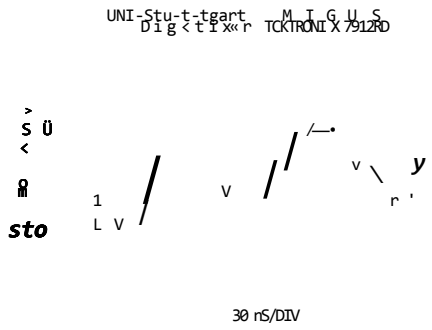


Fig. 18 Vergleich H-Feldverlauf (links) mit induziertem Mantelstrom (rechts) (Fernbuskabel)

Einkoppelmesswerte in ein ausgelegtes Koaxkabel für digitalen Datentransfer in der Testanlage zeigt Fig. 18. Im linken Bildteil ist der in Kabelnähe gemessene zeitliche Verlauf des Magnetfeldes H, rechts der zugehörige induzierte Kabelmantel ström I_m angegeben. Hierbei sind die typischerweise auftretenden Oszillationen zu erkennen. Bestimmt man zusätzlich simultan noch den in den Innenleiter des Koax eingekoppelten Strom I-j, so lässt sich, wie in Fig. 19 gezeigt ist, die Schirmdämpfung SE verschiedener Kabel bestimmen. Diese einfache theoretische Abschätzung zeigt recht gute Uebereinstimmung mit dem gemessenen Wert.

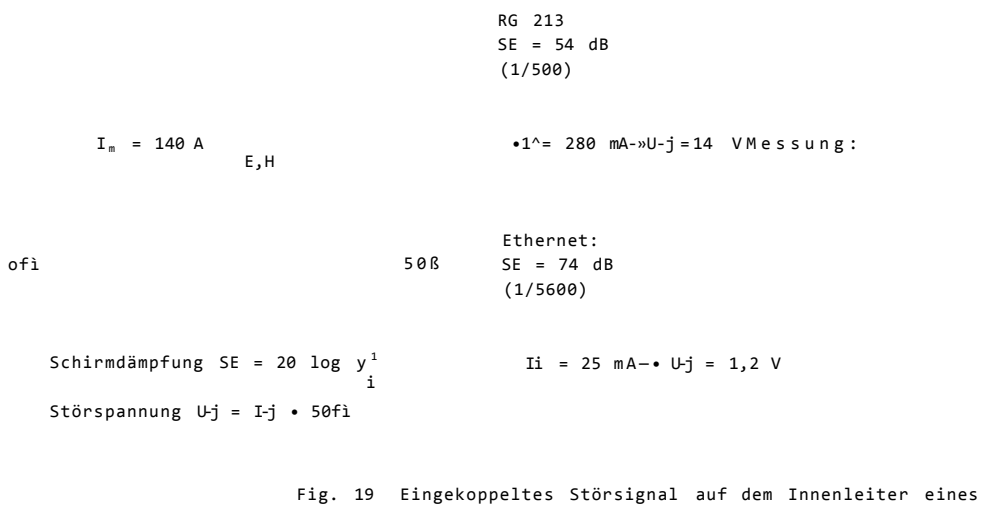


Fig. 19 Eingekoppeltes Störsignal auf dem Innenleiter eines Fernbuskoax (MantelStromeinkopplung)

Strominjektionsmessungen im Labor können anschliessend durchgeführt werden, um die aus der theoretischen Analyse zu erwartenden und nicht in diesem Simulator erzielbaren Einkoppelwerte in ihrer Auswirkung auf das System zu testen.

Induzierte Spannung in Schleife:

$= A * ll_Q \cdot £$

A - 0,1 m^2 ^ = 4 Jt 10"^{7} Ji

g^r max. etwa (Feld ungedämpft)

$\hat{U}_A \sim 800\,V$

Messung: Magnetfeld-Pulsdämpfung etwa 30 dB

dann $\hat{U}_A \sim 25\,V$

Messung: $\hat{U} = 19\,V$

UNI-Stuttgart M I G U S
DIGITIZER IMRTSU TS-8123

Fig. 20 Induzierte Schleifenspannung im Schrank (vgl. Theorie/Praxis)

Als letztes messtechnisches Beispiel sei noch die in einem teilweise offenen Testschrank ermittelte induzierte Sehleifenspannung an einem bestimmten Punkt der Verdrahtung angegeben. Mit der gleichen theoretischen Vereinfachung wie bei der magnetischen Feldsonde wird hier bei einer Fläche von 0.1 m^2 (Fig. 20) ohne Schrankdämpfung 800 V eingekoppelt. Setzt man 30 dB Schirmdämpfung (teilweise offener Testschrank) an, so ergibt sich ein Spitzenwert der Spannung von 25 V; dies stimmt grössenordnungsmässig gut mit den gemessenen 19 V überein. Diese und ähnliche, bereits an anderen Orten gewonnenen Messerfahrungen, bilden dann die Grundlage für die Festlegung von typischen Grenzwerten, z.B. in Normenvorhaben.

5. NEMP-NORMEN

BESTEHENDE NORMEN UND TRENDS

In der Schweiz existieren seit längerem Richtlinien des Bundesamtes für Zivilschutz und der Gruppe für Rüstungsdienste. In der Bundesrepublik Deutschland entsteht zurzeit die Verteidigungsgeräte-Norm (VG) für NEMP- und Blitzschutz (Fig. 21). 5

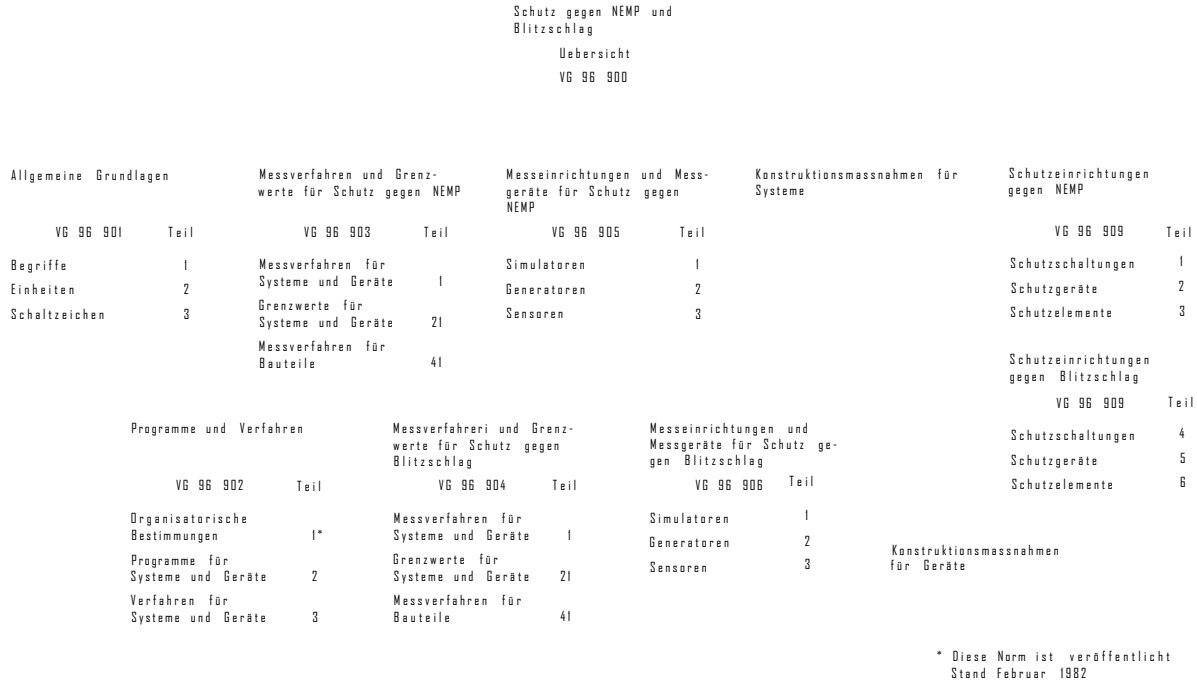


Fig. 21 Deutsche Verteidigungsgerätenorm

Hierbei wird der Gedanke der bei Projektbeginn durchzuführenden Wirkungsanalyse für das gesamte System festgeschrieben. In den Ausschüssen und Arbeitskreisen dieses DIN-Normengremiums (NEA 760) beraten Vertreter von Industrie und Bundesbehörden seit 1976. Neben organisatorischen Abläufen werden Grenzwerte, Messverfahren, Messgeräte, Schutzeinrichtungen sowie Richtlinien diskutiert und verabschiedet. Zurzeit präsentiert sich der Veröffentlichungsstand wie folgt (Bezugsquelle: Beuth-Verlag, Köln): »

- VG 96 900 (März 1982): Schutz gegen NEMP und Blitzschlag,

- VG 96 901 Teil 4 (Oktober 1985): Schutz gegen NEMP und Blitz, Grundlagen, Bedrohungsdaten,

- VG 96 902 Teil 2 (Anfang 1986): Schutz gegen NEMP und Blitz, Programme für Systeme und Geräte,

- VG 96 907 Teil 1 (Anfang 1986): Schutz gegen NEMP und Blitz, Konstruktionsmassnahmen und Schutzeinrichtungen, Allgemeines.

In den USA ist der bekannte EMC-Mil-Standard 461 B für Geräte durch die folgenden EMP-Anforderungen ergänzt worden: «

- RS 05: Radiated susceptibility, Feldpuls,

- CS 10: Conducted susceptibility, Interface Pin Voltage/Current.

Der Feldpuls einer EXO-NEMP-Detonation wird mit einem maximalen Amplitudenwert von 50 kV/m und einer Anstiegszeit (10 - 90%) von 5 ns angegeben. Geräteein- und -ausgänge müssen in Abhängigkeit vom vorgegebenen Arbeitsfrequenzbereich der Einheit bis zu 1'000 V und 10 A vertragen. Die Strom-/Spannungsbelastung wird gedämpft oszillierend angenommen. Nach Ablauf von 15 Schwingungen ist die Spannungs- bzw. Stromamplitude unterhalb 5% ihres Anfangswertes abgesunken. Mit wachsender Frequenz klingt daher die Schwingung schneller ab. Die Grenzkurvengestalt lässt sich nach /16/ mit einer Faltung von Crosstalk-Transfer-Funktion und NEMP-Amplitudendichtespektrum deuten.

6. VORSTELLUNG EINIGER NEMP-GEHAERTETER ELEKTRONIKPRODUKTE DER NACHRICHTENTECHNIK

BBC liefert heute neben einigen militärischen Geräten der Nachrichtentechnik (z.B. Richtstrahlgerät R 902) auch Funksprechgeräte wie das Veriphone Comet (900 MHz) in der Exo-EMP geschützten Ausfuhrung. Seit einiger Zeit werden schon Ortsfunksender und Schutzraumempfänger für den Zivilschutz gefertigt. Diese Geräte dienen der sicheren Nachrichtenübermittlung zwischen Kommandoposten und Schutzräumen. Die Geräte sind,zusammen mit ihren typischen Kabelkonfigurationen wie Netz und Antenne,vom GRD-AC-Laboratorium Spiez, Arbeitsgruppe EMP, erfolgreich getestet worden. Der Schutz gegen leitungsgebundene Transienten auf der Netzeinspeisung wird im Sender hauptsächlich durch entsprechenden Einsatz von BBC-ZnO-Ableitern erreicht. Im Antenneneingang befindet sich eine speziell entwickelte,koaxiale Filterschaltung (X -4-Sichleitung).

Es ist zu betonen, dass NEMP-Schutzmassnahmen nicht unbedingt teuer sein müssen. Sie sind an den Geräten auch nicht unbedingt augenfällig sichtbar. Die Anforderungen sind vom Anwender jedoch im Gerätepflichtenheft zu formulieren, um während der gesamten Entwicklung berücksichtigt werden zu können. Etwaige Retrofit-Massnahmen an existierenden Geräten sind wesentlich aufwendiger zu realisieren.

7. ZUSAMMENFASSUNG, AUSBLICK

In den vorangegangenen Kapiteln habe ich versucht aufzuzeigen, wie der Schutz von Geräten und Elektroniksystemen vor elektromagnetischen Störungen allgemein und insbesondere NEMP-systematisch und kostenbewusst realisiert werden kann. Lassen Sie mich zum Schluss noch auf eine.diesem Gebiet eigene Besonderheit hinweisen. Trotz der in vielen europäischen Ländern in den letzten Jahren zunehmenden NEMP-Aktivität kann festgestellt werden:

- Informationen aus erster Hand (USA bzw. Frankreich) sind nach wie vor nur schwer erhältlich, da sie vornehmlich militärischen Charakter haben. Immer klassifiziert sind die genauen Waffendaten (NEMP-Enstehung) sowie die Systemdaten (EMP-Auswirkung auf Waffensysteme oder Telekommunikationssysteme). Eine Ausnahme bildet die laufende EMP-Untersuchung für das zivile US-Stromversorgungsnetz /17/.

- Die Verwirklichung eines abgestuften, kostengünstigen Schutzes gegen alle Arten elektromagnetischer Bedrohung wie EMI, ESD und/oder Blitz und NEMP entspricht dem Trend, der sich auch in Form von Normen zu manifestieren beginnt, aber erst an wenigen Orten schon praktisch realisiert ist.

Die wirtschaftliche Auslegung eines zuverlässigen Schutzes -durch Messung und Rechnung- wird in der Zukunft, speziell in komplexen, weitläufigen Systemen, sicherlich noch grosse Herausforderungen für Forscher und Entwickler mit sich bringen. Internationale Zusammenarbeit nimmt hierbei einen hohen Stellenwert ein.

8. LITERATURVERZEICHNIS

/1/ Nachrichtenmagazin Stern, Heft 31, Juli 1984.

/2/ "Taming EMI in microprocessor systems": Donald R.J.White et al., IEEE Spektrum, Dec. 1985.

/3/ "EMC for Forces afloat": James F.Garret et al., IEEE 1983 Int. Symposium on EMC, Arlington VA, USA, S. 113.

/4/ "Lightning Test of Pershing II": L.H.Riley et al., Int. Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Orlando FL, USA, 1984.

/5/ "Unification of electromagnetic specifications and Standards. Part I: Evaluation of existing practices", E.F.Vance et al., Stanford Research Institute International, Menlo Park CA, USA, 1983.

/6/ "Die Wirkung hochfrequenter EM-Felder auf den Menschen (1 kHz...1'000 GHz)", Institut zur Erforschung elektrischer Unfälle, A.H.Frucht et al., Berufsgenossenschaft der Feinmechnanik und Elektrotechnik, Köln, Medizinisch Techn. Bericht 1984.

I H "The Effects of Nuclear Weapons", S.Glasstone et al., US-Department of Defense, 1977, Washington.

/8/ "MHD EMP Code Simulation of Starfish", Conrad Longmire et al., Mission Research Corporation, Santa Barbara CA, USA, 1979.

/9/ "EMP-Schutz in Geräten und Anlagen", D.Hansen, Bull. SEV/VSE 76, 7.Dez./1985, 23.

/10/ "Durchdringung schnell veränderlicher elektromagnetischer Impulsfelder durch eine leitende Platte", N.Ari, D.Hansen, ETZ Archiv, Bd. 7 (1985) H 6.

/Il/ "Electromagnetic pulse (EMP) penetration through circular apertures in the frequency domain", N.Ari, D.Hansen, H.Schär, Proc. IEEE 73 (1985) 2.

/12/ K.S.H.Lee: EMP-interaction. Principles, techniques and reference data. Albuquerque/N.M., Diekwood Ind., Inc. 1980.

/13/ EMP engineering and design principles. R.Sherman, Whippany/N.Y. Bell Laboratories Incorporation, 1975.

/14/ H.Schlicke: Worst case filter measurements. Plymouth Meeting/Pa., Interference Technology Engineering Master (ITEM) R & B Enterprises, 1979.

/I5/ Guide sur les méthodes de mesure des transitoires de courte durée sur les lignes de puissance et de contrôle basse tension. Publication de la CEI No. 816, 1984.

/I6/ C.R.Paul: Printed circuit board EMC. Electromagnetic Compatibility 1985. 6th Symposium and technical exhibition on electromagnetic compatibility, Zurich, March 5-7, 1985, paper No 21 El, p. 107 - 114.

/I7/ Program plan for research and development of technologies under influence of NEMP. Oak Ridge/Tenn., Oak Ridge National Laboratory/US Department of Energy, 1983.