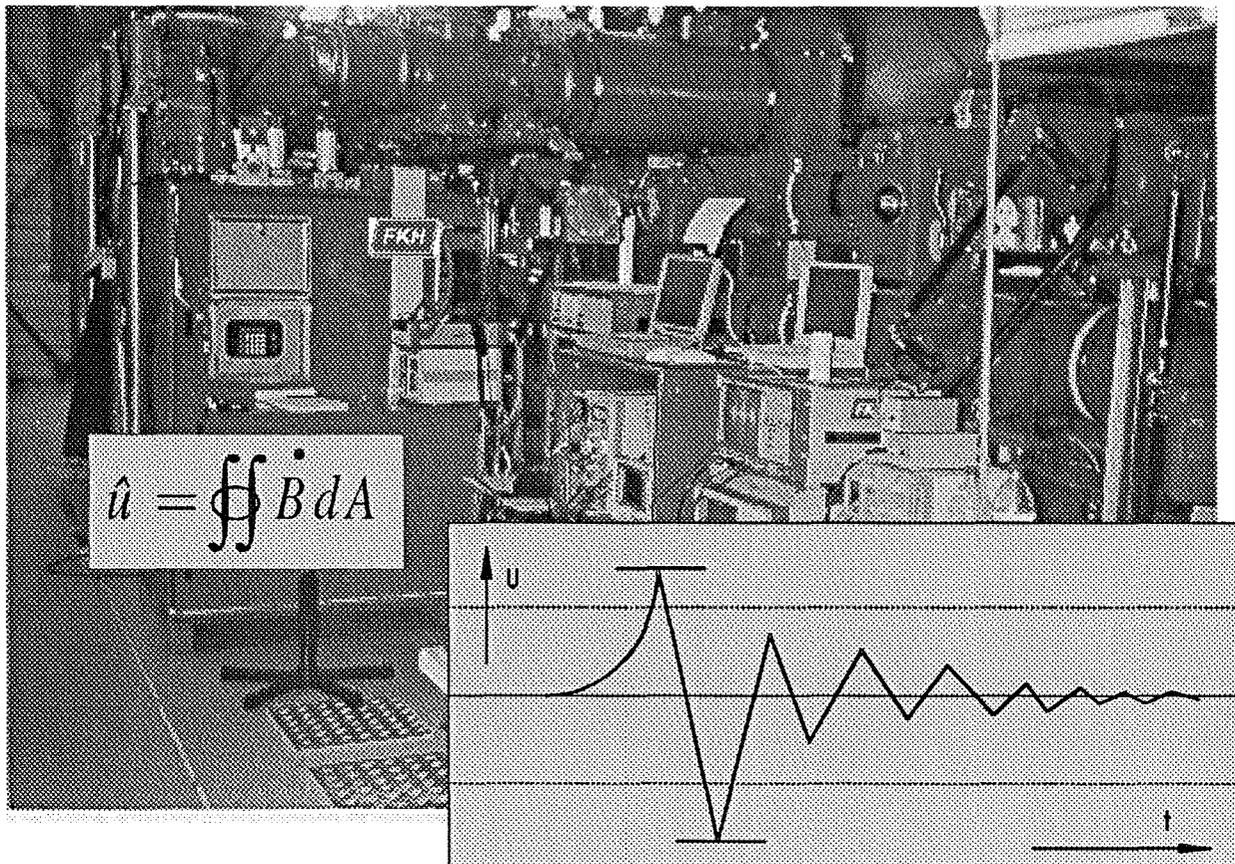


**FKH- / VSE-Fachtagung
20. Oktober 1999
ETH Zürich**

EMV in elektrischen Energieversorgungsanlagen

***Koordination zwischen Primärtechnik,
Sekundärtechnik und
Kommunikationsanlagen***



VSE-Druckschrift 5.67 d/f

***FKH - / VSE - Fachtagung
20. Oktober 1999***

***ETH Zürich,
Auditorium Maximum, Rämistr. 101***

EMV in elektrischen Energieversorgungsanlagen

**Koordination zwischen Primärtechnik, Sekundärtechnik
und Kommunikationsanlagen**

Veranstalter:

*Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH
Voltastrasse 9
8044 Zürich*

*Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, VSE
Postfach 6140
8023 Zürich*

***FKH - / VSE - Fachtagung
20. Oktober 1999***

EMV in elektrischen Energieversorgungsanlagen

Koordination zwischen Primärtechnik, Sekundärtechnik
und Kommunikationsanlagen

Vorwort

Die elektromagnetische Verträglichkeit zwischen den einzelnen Systemkomponenten elektrischer Energieversorgungsanlagen stellt eine unabdingbare Voraussetzung für eine zuverlässige Versorgung mit elektrischer Energie dar.

Infolge der schnellen Entwicklung von Elektronik und Datentechnik aber auch aufgrund von weiterentwickelten Designs in der Primärtechnik fallen sowohl bei der Entwicklungsarbeit aber auch im Betrieb laufend neue Problemstellungen an.

Durch die intensivere Integration von leittechnischen Komponenten in die Starkstromapparate einerseits, aber auch durch den zunehmenden Einsatz von optischer Sensorik und Signalerübertragung kann zur Zeit eine Schwerpunktsverlagerung bei den aktuellen EMV-Fragen festgestellt werden.

Die Tagung setzt sich zum Ziel nebst klassischen EMV-Massnahmen auch eine Reihe von neuen Themenbereichen anzuschneiden, in denen heute oder zukünftig an Beeinflussungsproblemen gearbeitet wird. Dabei stehen neuartige Systeme und Subsysteme der Sekundär- und Kommunikationstechnologie im Vordergrund, bei denen die elektromagnetischen Störmechanismen noch zu charakterisieren sind und für deren Unterdrückung noch technisch zweckmässige und ökonomisch tragbare Lösungen gefunden werden müssen. Bereits vorliegende Lösungsansätze auf diesem Gebiet sollen im Rahmen der Fachtagung präsentiert werden.

Tagungsprogramm

Datum, Zeit: 20. Oktober 1999 Beginn 09³⁰
 Ort: ETH Zürich, Auditorium Maximum, Rämistr. 101
 Titel: **EMV in elektrischen Energieversorgungsanlagen,**
 Koordination zwischen Primärtechnik, Sekundärtechnik und
 Kommunikationsanlagen

Tagungsleitung: Prof. Dr. M. Ianoz, EPFL

| Zeit | Titel / Inhalt | Referent |
|------------------------------------|---|---------------------------------------|
| ab 09 ⁰⁰ | <i>Empfang und Abgabe der Tagungsbände</i> | |
| 09 ³⁰ -09 ⁴⁵ | Begrüssung | Dr. G. Biasiutti, KWO |
| 09 ⁴⁵ -10 ¹⁵ | Einführung: EMV-Probleme zwischen Primär- und Sekundärtechnik, Handlungsbedarf in der Praxis | Dr. D. Orzan, BKW/FMB Energie AG |
| 10 ¹⁵ -10 ⁴⁵ | Sichere Analyse von Beeinflussungsproblemen auf der physikalischen Grundlage der dabei auftretenden elektrischen Vorgänge | Prof. Dr. A. Rodewald |
| 10 ⁴⁵ -11 ¹⁰ | Modélisation des effets electromagnétiques de manoeuvres et de la foudre dans les postes sous enveloppe metallique | Dr. D. Tabara, EPFL |
| 11 ¹⁰ -11 ³⁰ | <i>Kaffee-Pause</i> | <i>SV-Service</i> |
| 11 ³⁵ -12 ⁰⁰ | Übertragung von Schalttransienten durch GIS-Messwandler | Dr. W. Büsch, Alstom AG |
| 12 ⁰⁰ -12 ³⁰ | Anforderungen, Tests und Lösungen für die EMV von Leittechnik im prozessnahen Bereich | U. Wirth, ABB Hochspannungstechnik AG |
| 12 ³⁰ -13 ⁰⁰ | EMV-Probleme bei der Integration von Kommunikationsanlagen in Energieversorgungsnetze | Dr. G. Friedrich, diAx |
| 13 ⁰⁰ -14 ³⁰ | <i>Mittagspause</i> | <i>SV-Service ETH-Mensa</i> |
| 14 ³⁰ -14 ⁵⁰ | Richtlinien, Vorschriften, Normen für die Abstimmung der EMV zwischen Primär- und Sekundärtechnik | V. Narayan, Netzconsult |
| 14 ⁵⁰ -15 ²⁰ | Minimierung von Transienten durch intelligentes Schalten | Prof. Dr. K. Fröhlich, ETHZ |
| 15 ²⁰ -15 ⁵⁰ | Praktische Beispiele für die Behebung von EMV-Problemen im Bereich von Hochspannungsanlagen | F. Trotti, Montena EMC |
| 15 ⁵⁰ -16 ²⁰ | Die messtechnische Untersuchung von Beeinflussungsproblemen | Dr. R. Bräunlich, FKH |
| 16 ²⁰ -16 ⁴⁵ | Schlussdiskussion und Zusammenfassung | Prof. Dr. M. Janoz, EPFL |

Zusammenfassung der Referate

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Einführung: EMV-Probleme zwischen Primär- und Sekundärtechnik, Handlungsbedarf in der Praxis | |
| Dr. D. Orzan, BKW/FMB Energie AG | 1 |
| Sichere Analyse von Beeinflussungsproblemen auf der physikalischen Grundlage der dabei auftretenden elektrischen Vorgänge | |
| Prof. Dr. A. Rodewald | 19 |
| Modélisation des effets électromagnétiques de manoeuvres et de la foudre dans les postes sous enveloppe metallique | |
| Dr. D. Tabara, EPFL | 26 |
| Übertragung von Schalttransienten durch GIS-Messwandler | |
| Dr. W. Büsch, Alstom AG | 29 |
| Anforderungen, Tests und Lösungen für die EMV von Leittechnik im prozessnahen Bereich | |
| U. Wirth, ABB Hochspannungstechnik AG | 34 |
| EMV-Probleme bei der Integration von Kommunikationsanlagen in Energieversorgungsnetze | |
| Dr. G. Friedrich, diAx | 37 |
| Richtlinien, Vorschriften, Normen für die Abstimmung der EMV zwischen Primär- und Sekundärtechnik | |
| V. Narayan, Netzconsult | 44 |
| Minimierung von Transienten durch intelligentes Schalten | |
| Prof. Dr. K. Fröhlich, ETHZ | 53 |
| Praktische Beispiele für die Behebung von EMV-Problemen im Bereich von Hochspannungsanlagen | |
| F. Trotti, Montena EMC | 55 |
| Die messtechnische Untersuchung von Beeinflussungsproblemen | |
| Dr. R. Bräunlich, FKH | 58 |
| Teilnehmerverzeichnis | 67 |

Einführung: EMV-Probleme zwischen Primär- und Sekundärtechnik, Handlungsbedarf in der Praxis

Dr. David Orzan

BKW/FMB Energie AG, Bern

1. Einleitung

Die Vielschichtigkeit der Probleme im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit hat in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen. Im folgenden soll zunächst auf die zentrale Bedeutung des EMV-Managements bei den heutigen Elektrizitätswerken eingegangen werden.

1.1 Erfahrungen aus der Vergangenheit

Die seit jeher verwendeten und auch heute noch eingesetzten elektromechanischen Netzschutzgeräte verarbeiten analoge Messinformationen. Da die elektromechanischen Messglieder ihre Arbeitsenergie aus dem Messsignal beziehen, ist ihre Eingangsimpedanz besonders für hohe Frequenzen niederohmig. Im Weiteren besitzen diese Bauelemente durch die Masse der beweglichen Teile eine gewisse Trägheit, die verzögernd wirkt. Daher rührt die Unempfindlichkeit elektromechanischer Netzschutzgeräte gegen energiearme, kurze Störimpulse, welche folglich auch keine Fehlfunktionen bewirken.

1.2 Aktuelle Situation

Die aktuelle Situation bezüglich der EM-Verträglichkeit ist heute schwieriger geworden. Man kann einige Gründe dafür erwähnen:

- Die Anlagen werden immer häufiger ferngesteuert und automatisiert. Man braucht also eine grössere Anzahl von Schutz- und Leittechnikgeräten, die numerische Signale austauschen und bearbeiten. Die Wahrscheinlichkeit immer grösser, dass elektronische Geräte oder übertragene Signale gestört werden.
- Die Bandbreite der verwendeten Signale nimmt zu und Hochfrequenzstörungen können die Zuverlässigkeit der Sekundärtechnikgeräte beeinträchtigen.
- Es gibt mehr störende Quellen als früher (SF6 Anlagen, Leistungselektronik mit Phasenschnittsteuerungen etc.)
- Die Hochspannungskomponenten und die elektronischen Einrichtungen werden z. Teil nicht mehr getrennt aufgestellt, sodass kurze Kopplungswege und viele Kopplungsmöglichkeiten entstehen .
- Probleme können auch auftreten, wenn eine alte Anlage mit einer modernen Leittechnik erweitert wird, weil bei der Projektierung der ursprünglichen Anlage noch keine EMV-Massnahmen realisiert worden sind.

Wenn die Ursache eines Problems unklar ist, wird oft die Schuld der EMV zugeschoben. Die EMV kann zwar Verursacher sein, aber erfahrungsgemäss sind die Zusammenhänge nicht genügend bekannt. Wir hoffen, dass diese Tagung Ihnen mehr Klarheit verschaffen kann und dass Sie sich hinsichtlich EMV weitere Kenntnisse aneignen können.

1.3 Erwartungen der Anlagenbetreiber

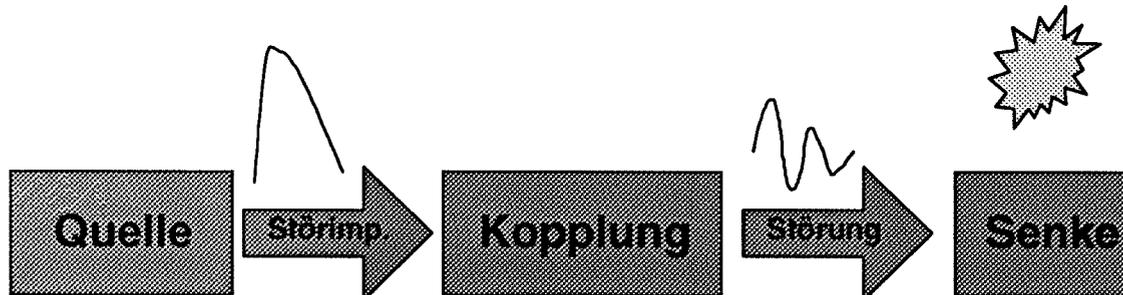
Es besteht ein starker Trend, sowohl zur Betriebsautomatisierung, als auch zur Erhöhung der Funktionalität von leittechnischen Anlagen. Dieser Trend bewirkt, dass die Zuverlässigkeitsanforderungen und folglich die Aktualität von EMV-Fragen im Zusammenhang mit der Sekun-

därtechnologie zunehmen werden. Deshalb müssen die Elektrizitätswerke die EMV-Problematik beherrschen.

Die Betreiber möchten vor der Projektierung sicher sein, dass die neuen Systeme EMV-fest sind. Sie erwarten auch, dass die Hersteller genaue Angaben machen können, bei welchen Bedingungen ihre Geräte eingesetzt werden können.

Das Ziel dieses Beitrages ist, Sie an einige Prinzipien zu erinnern und die nachfolgenden Beiträge anhand konkreter Beispiele, wie sie bei einem Anlagenbetreiber vorkommen können, einzuleiten.

Das Prinzip der EMV kann vereinfacht mit der nachfolgenden Figur dargestellt werden:



Figur 1 Die Problematik der EMV

Eine Quelle erzeugt einen Störimpuls (EM-Feld, Strom, Spannung). Durch die Kopplung wird die Störung an die Senke übertragen. Die Senke ist ein empfindliches Gerät. Es könnte auch ein Lebewesen sein, aber es wird hier nicht über die biologischen Folgen von Feldern gesprochen. Geräte können beschädigt werden (direkte Schäden) oder so gestört werden, dass sie während der Störeinwirkung fehlerhaft arbeiten (indirekte Schäden).

Die Struktur dieser Einteilung ist also gegeben: Quelle, Kopplung und Senke.

2. EMV-Stör-Quellen

Die EMV-Stör-Quellen sind zahlreich; es wird hier jedoch nur von denen gesprochen, die in Elektrizitätswerken vorkommen. Sie können nach verschiedenen Kriterien unterteilt werden [1]:

- Ihr Spektrum: Niederfrequenz-Störungen (<1MHz) oder Hochfrequenz-Störungen (>1MHz).
- Ihr Medium für die Fortpflanzung : Leitergebundene Störungen oder über den Raum gekoppelte (elektrische und/oder magnetische) Störfelder = Raumkopplung
- Ihre Dauer: Dauernde (>1 s) oder transiente Störung

Entsprechend dieser Unterteilung werden im folgenden Beispiele gezeigt, die man im Netz und in Anlagen der Elektrizitätswerke finden kann. Die nachfolgenden Referenten werden mit ihren Erfahrungen diese Liste ergänzen und die Vorgänge präzisieren.

2.1 Niederfrequenz (NF) Störungen

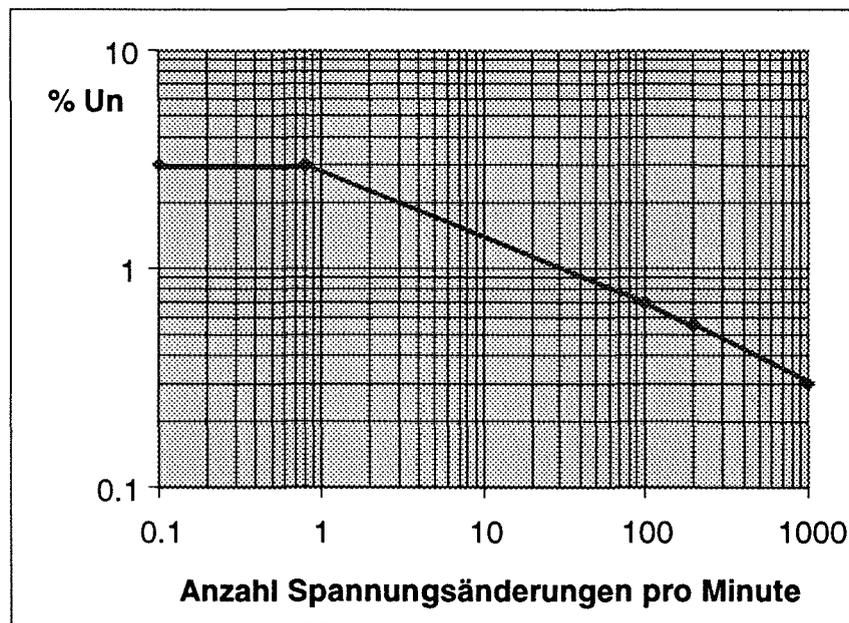
2.1.1 Leitergebundene Störungen

Diese Störungen werden hauptsächlich durch die elektrische Einspeisung verursacht.

Dauernde NF Störungen

Flicker

Der Flicker ist die Summe der kleinen plötzlichen Spannungsänderungen. Diese Änderungen sollten eine Häufigkeit und einen Betrag nicht überschreiten, wie es die folgende Kennlinie dargestellt [1]:



Figur 2 Grenzwerte des Flickers

Flicker tritt auf, wenn die Kurzschlussleistung am Anschlusspunkt gering ist und wenn die Last veränderlich oder gepulst wird (Lichtbogenofen, Mikrowellengeräte, Schweißmaschinen).

Oberschwingungsströme

Als mögliche Quellen von Oberschwingungsströmen (auch harmonische Ströme genannt) kann man erwähnen:

- Phasenanschnittsteuerungen, Leistungselektronik
- Gesättigte Transformatoren
- Lichtbogenofen
- Gasentladungslampen, Stromsparlampen

Oberschwingungsströme¹ (Stör-Quellen) verursachen über der Impedanz des Netzes (Kopplung) Oberschwingungsspannungen, die den Betrieb anderer Verbraucher stören können:

- Zusätzliche Erwärmung von Motoren und Transformatoren
- Resonanz, insbesondere mit Kondensatoren von Kompensationsanlagen
- Sättigung von Transformatoren (Gleichstrom)

In Gebäuden mit viel Informatik (Computer) kann ein sehr hoher Gehalt an harmonischen Strömen auftreten (zwischen 50 bis 80 % der Grundschwingung). Der Scheitelwert des harmonischen Stromes kann bis zum 4...6 - fachen des 50 Hz - Anteils betragen [1].

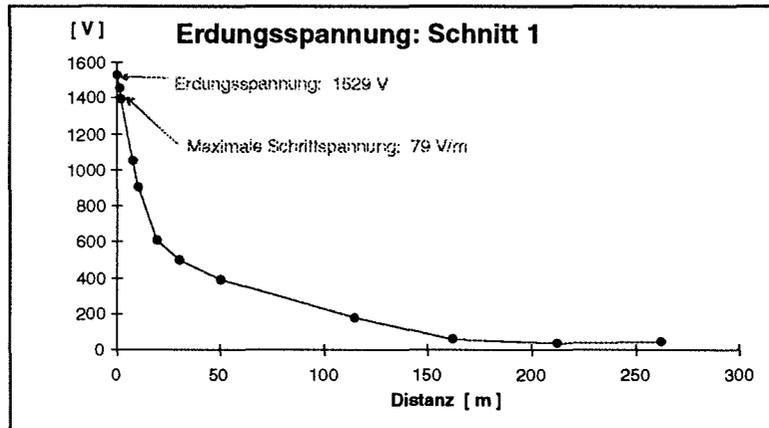
Transiente NF Störungen

Erdungsspannung - Erdungsströme

Beim Erdschluss und Erdkurzschluss tritt mit dem Fehlerstrom über die Erdungsimpedanz eine Erdungsspannung auf, die eine beachtliche Grösse erreichen kann und die bei ungeeigneten oder fehlenden Schutzmassnahmen eine Gefahr für Personen und Sachen darstellt. Die fol-

¹ auch subharmonische Ströme

gende Kurve zeigt einen Spannungsverlauf in Abhängigkeit von der Entfernung einer Unterstation.



Figur 3 Gemessener Spannungstrichter einer Unterstation

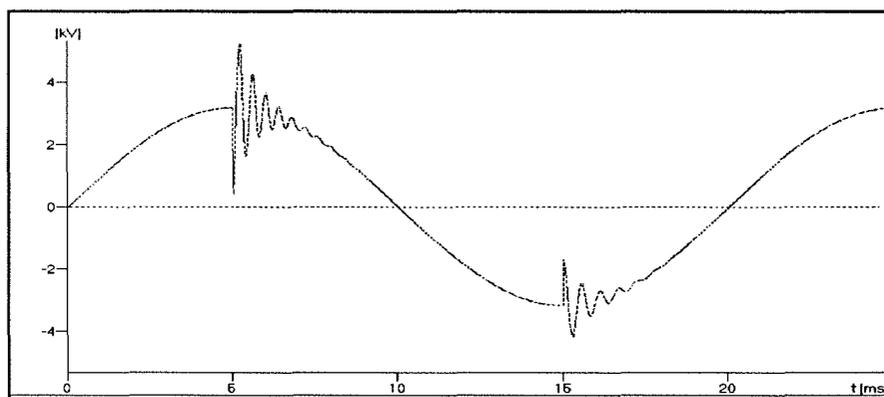
Beispiel : In einer Stadt steht neben einem Lagerhaus ein Bürogebäude, in das eine 132-kV-Anlage eingebaut ist. Zwischen dem Lager und Bürogebäude wurde ein Signalkabel für den Informationsaustausch installiert, dessen Schirm beidseitig geerdet war. Nach einem Erdschluss im Hochspannungsnetz in der Nähe der 132-kV-Anlage wurde der Kabelschirm thermisch beschädigt, sodass das Kabel ersetzt werden musste.

Einschalten einer Kondensatorenbatterie

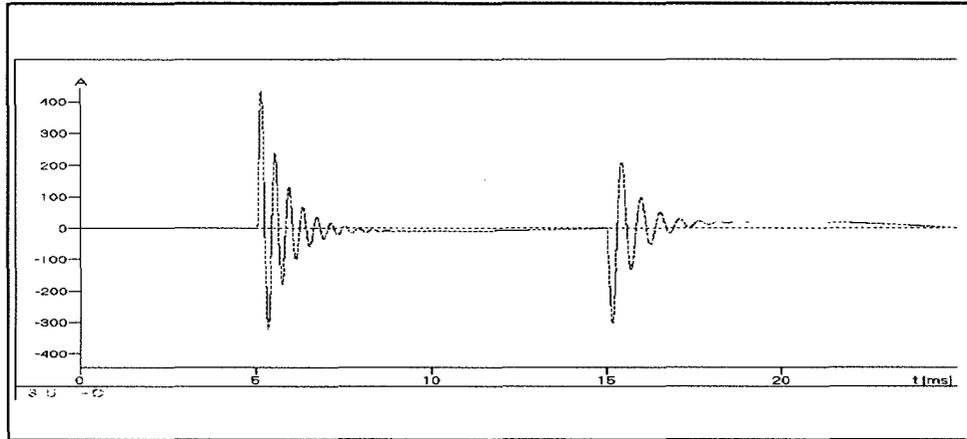
Das Einschalten von Kondensatorenbatterien verursacht hohe Transienten. Die Auswirkungen sind [4]:

- Überspannungen an der Sammelschiene an der die Kondensatoren angeschlossen sind.
- Inrush-Ströme können den Betrieb stören.
- Steile Überspannungen an den Sekundärwicklungen von Verteiltransformatoren durch die kapazitive Kopplung
- Resonanzen, je nach Netzkonfiguration.

Das folgende Beispiel entspricht einem Industrieverbraucher, der mit einer Kondensatorenbatterie von 2*100 kVAr seinen Leistungsfaktor verbessert und durch ein Mittelspannungsnetz mit einer Kurzschlussleistung von 250 MVA angespeist wird. Die zwei Kondensatorenbatterien werden beim Spannungsmaximum (ungünstigster Fall), eine nach der anderen eingeschaltet.



Figur 4 Sammelschienenspannung beim Einschalten von Kondensatoren



Figur 5 Inrush Strom beim Einschalten von Kondensatoren

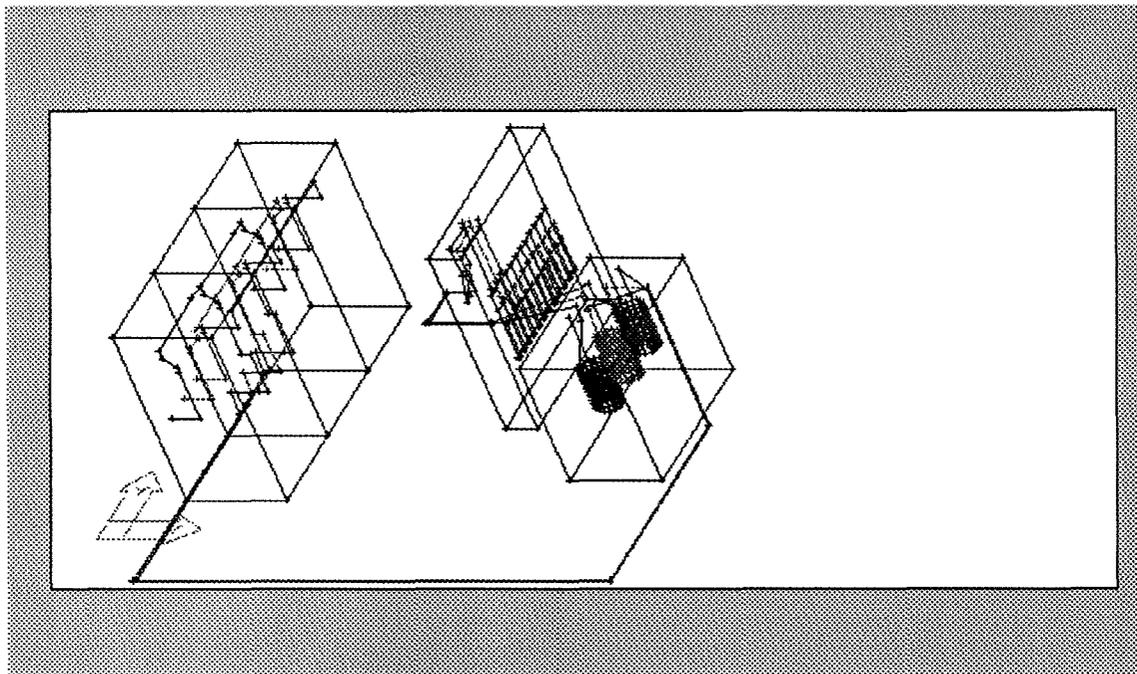
Die Berechnung obiger Einschaltvorgänge wurde mit dem Programm EMTP, Version ATP ausgeführt. Die berechneten Transienten von Figur 4 und 5 sind typisch für das Einschalten von Kondensatorbänken und stimmen gut mit gemachten Aufzeichnungen überein.

2.1.2 NF Störungen, Feldkoppelung

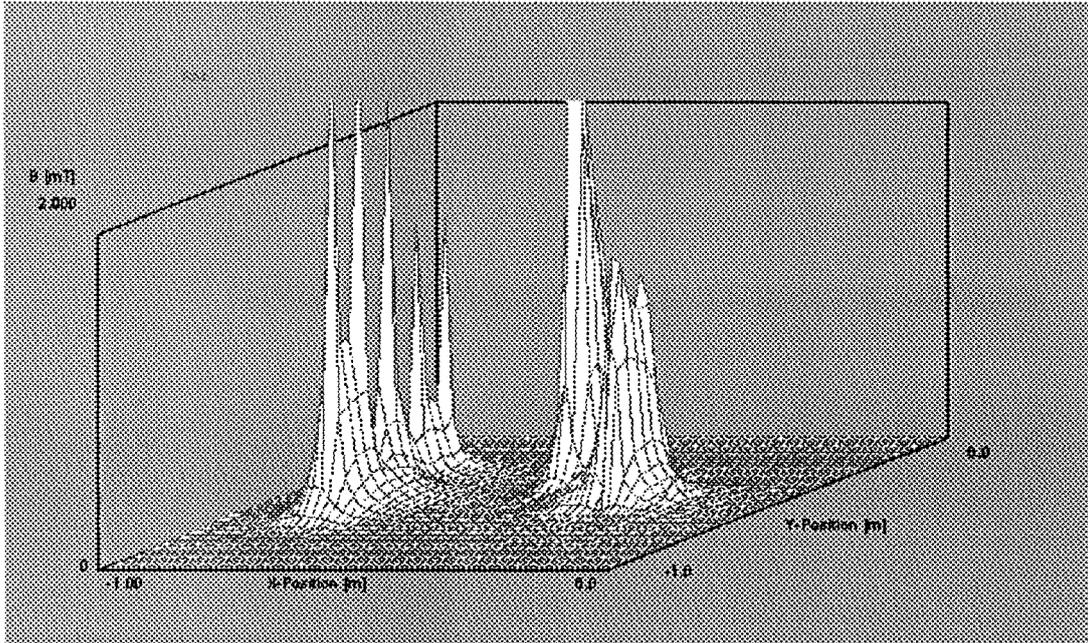
Dauernde NF Feldeinwirkung

Transformator

Im der Nähe von in Betrieb stehenden Transformatoren besteht ein stromabhängiges elektromagnetisches Feld. Das folgende Beispiel zeigt eine Berechnung einer Trafostation mit dem Programm EFC-400.



Figur 6 Anlage mit Sicht von oben in perspektivischer Darstellung

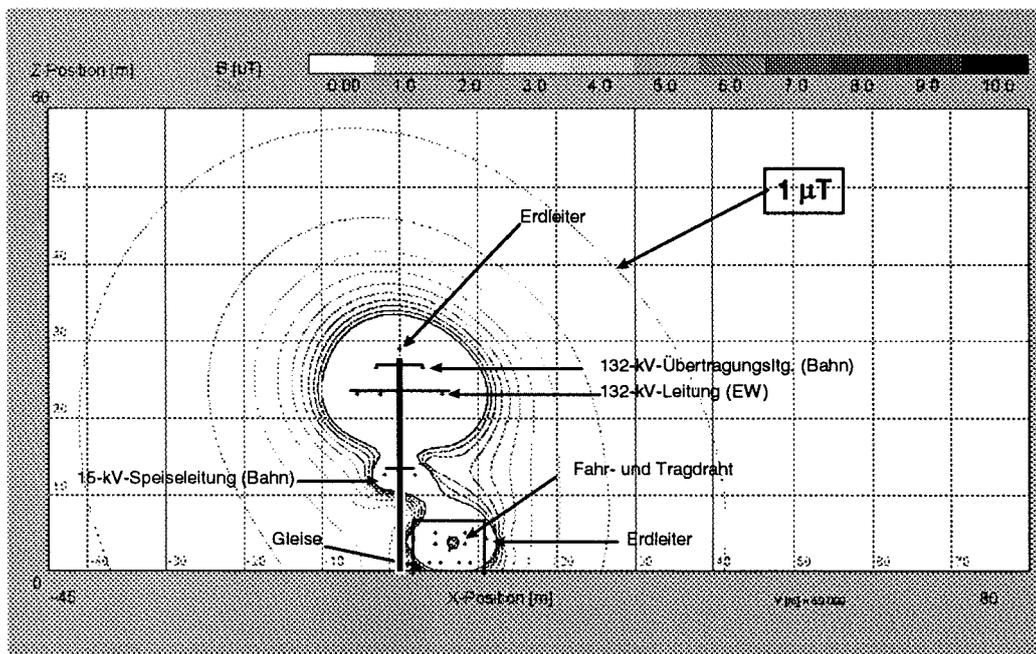


Figur 7 Werte des magnetischen Induktion in mT; Messort: 1 Meter über dem Boden.
 Von links nach rechts : HS-Sammelschiene, NS-Verteilung, Trafo.

Hochspannungsleitungen (Freileitung oder Kabel)

Hochspannungsleitungen erzeugen ein elektrisches und ein magnetisches Feld. Das elektrische Feld ist von der Leitungsspannung und der Geometrie der Leitung und des Messortes (inkl. Umgebung) abhängig. Im Gegensatz dazu ist das magnetische Feld nur vom Strom und von der Geometrie der Leitung abhängig. Das folgende Beispiel zeigt die Berechnung der magnetischen Induktion für eine Konfiguration mit:

- Verschiedenen Spannungsebenen und Systemen (50 und 16,7 Hz),
- zwei Bahngleisen.



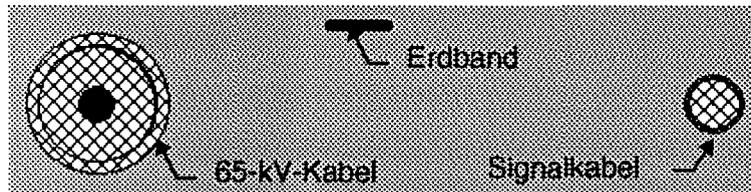
Figur 8 Magnetische Induktion

Die Leiter sind mit 50% des thermischen Grenzwertstromes belastet.

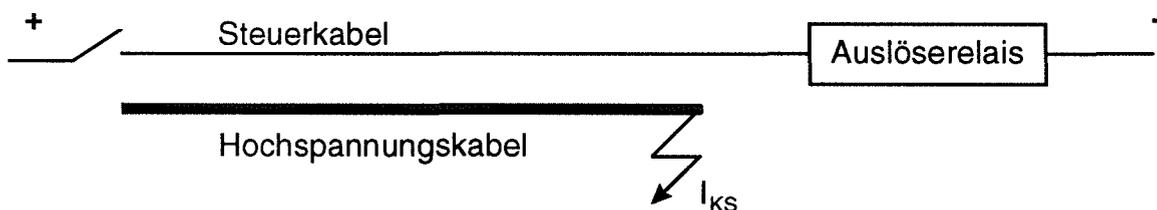
Transiente NF Feldeinwirkung

Beeinflussung durch einen kurzzeitigen Überstrom

Ein durch einen kurzzeitigen Überstrom erzeugtes Feld kann eine störende Spannung in ein parallel geführtes Signalkabel induzieren. Das folgende Beispiel entstammt einer Untersuchung in einer 65-kV-Anlage. Ein Wasserkraftwerk und die Unterstation sind durch ein 400 Meter langes Hochspannungskabel verbunden, dessen Schirm einseitig geerdet ist. Ein Signalkabel ist parallel zum Hochspannungskabel verlegt. Das Ziel der Berechnung war zu prüfen, ob Auslöserelais durch die vom Erdkurzschlussstrom im benachbarten Hochspannungskabel im Steuerkabel induzierte Spannung angeregt werden könnten.

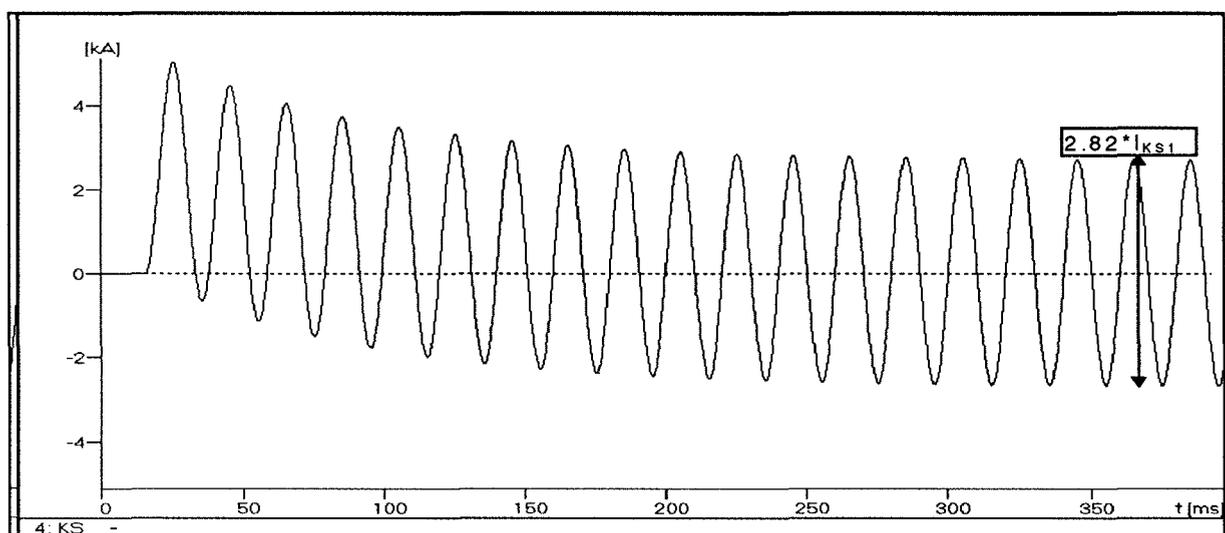


Figur 9 Querschnitt radial



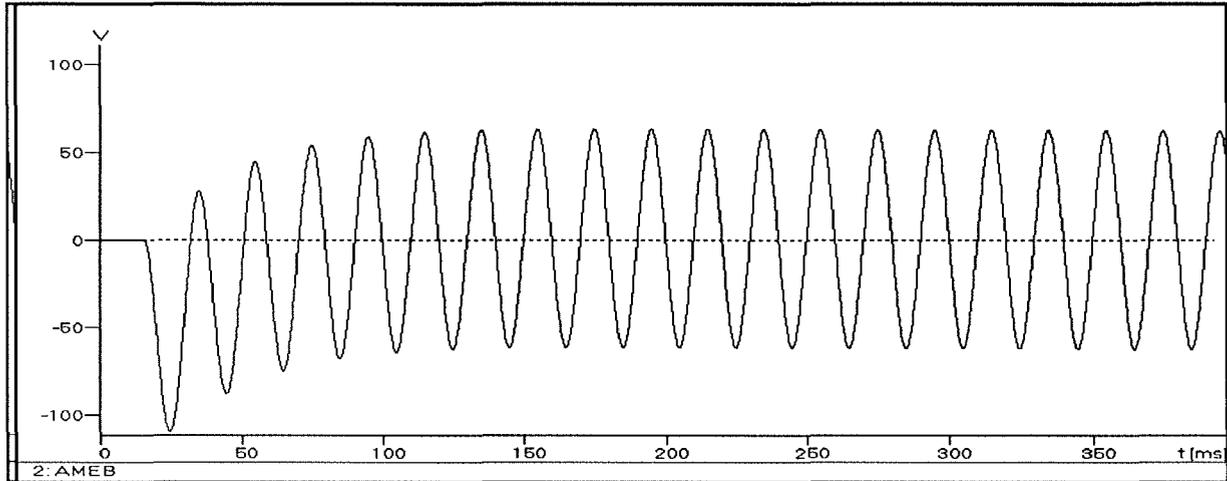
Figur 10 Längsschnitt

Der transiente Erdkurzschlussstrom mit Vollverlagerung wird nachfolgend dargestellt:



Figur 11 Stoss-erdkurzschlussstrom in kA

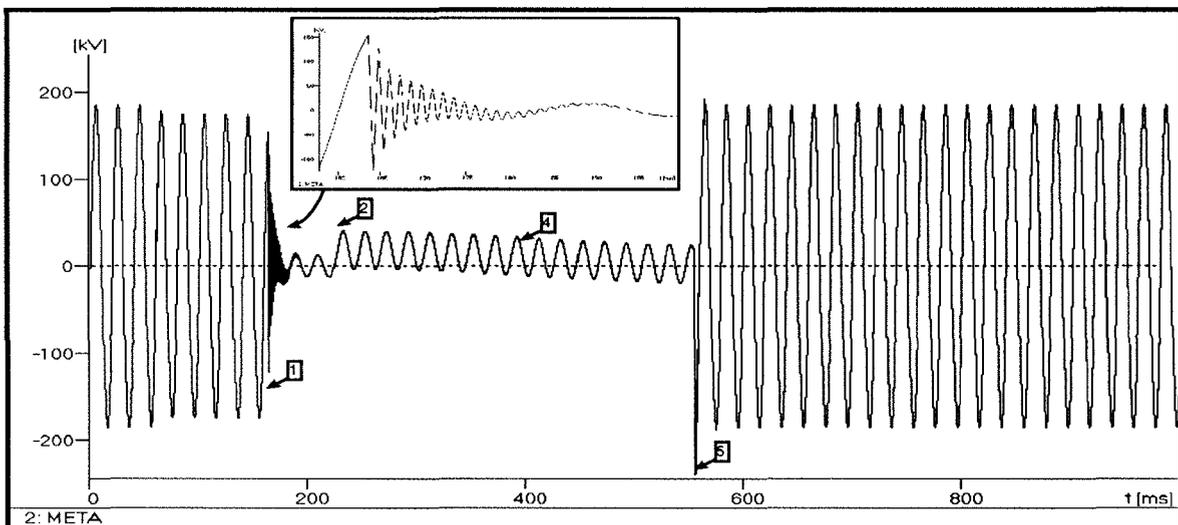
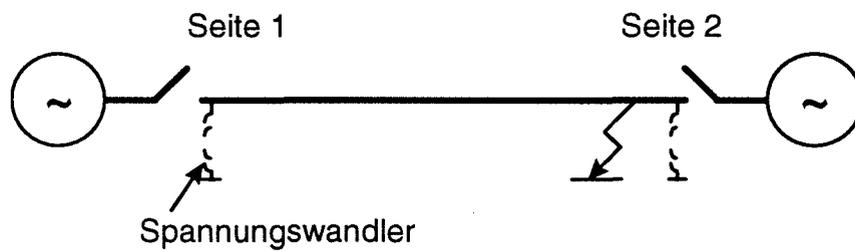
Die maximal in das Signalkabel induzierte Spannung beträgt 110 V (Scheitelwert). Da die Relaiskontakte für 1000 V dimensioniert sind, ist bei offenen Kontakten keine Beeinflussung durch den Erdkurzschlussstrom zu erwarten. Bei anderen Verhältnissen könnte die Situation kritischer sein (weniger beidseitig geerdete Parallelliter, höherer Erdkurzschlussstrom, kleinere Distanzen, empfindlichere Geräte, etc.)



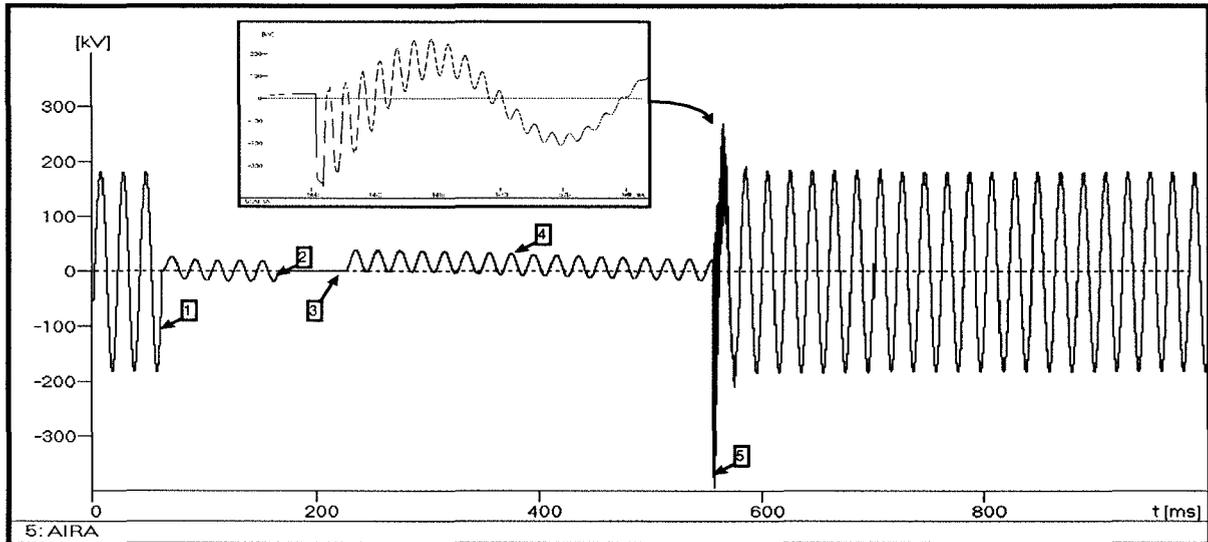
Figur 12 In das Signalkabel induzierte Spannung in V

Schaltüberspannungen

Die Schaltüberspannungen stellen Transiente dar, welche Leittechnikgeräte über verschiedene Kopplungsarten stören können. Die folgende Berechnung bezieht sich auf eine einpolige Kurzwiedereinschaltung einer 220-kV-Leitung von 90 km Länge.



Figur 13 Spannung Seite 1 (Von dieser Seite wird nach der Wiedereinschaltpause die Leitung wieder unter Spannung gesetzt)



Figur 14 Spannung Seite 2 (Diese Seite kann nach der Aufschaltung der Spannung von der Gegenseite parallelgeschaltet werden)

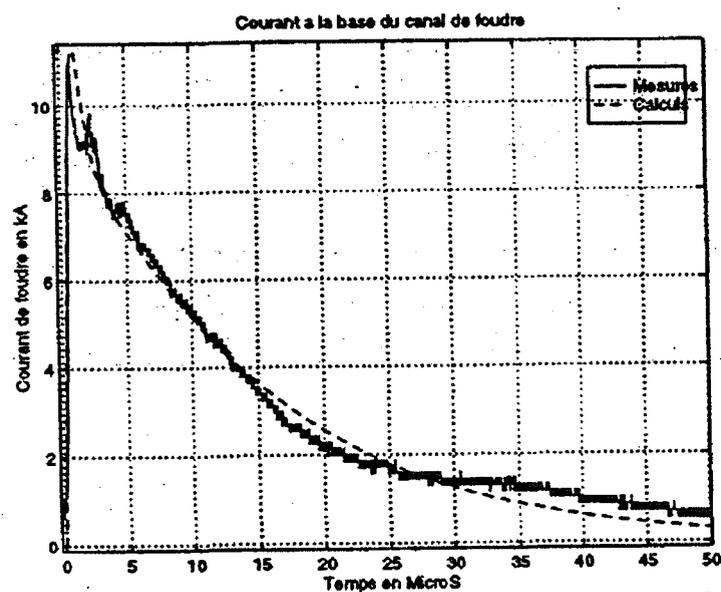
Legende zu den Bezeichnungen:

- 1 : Erdschluss
- 2 : Auslösung
- 3 : Der Fehler auf der Leitung ist eliminiert
- 4 : Entladung der Leitung durch die induktiven Spannungswandler und induktive Beeinflussung der anderen beiden noch in Betrieb stehenden Phasen
- 5 : Wiedereinschaltung und Schaltüberspannung

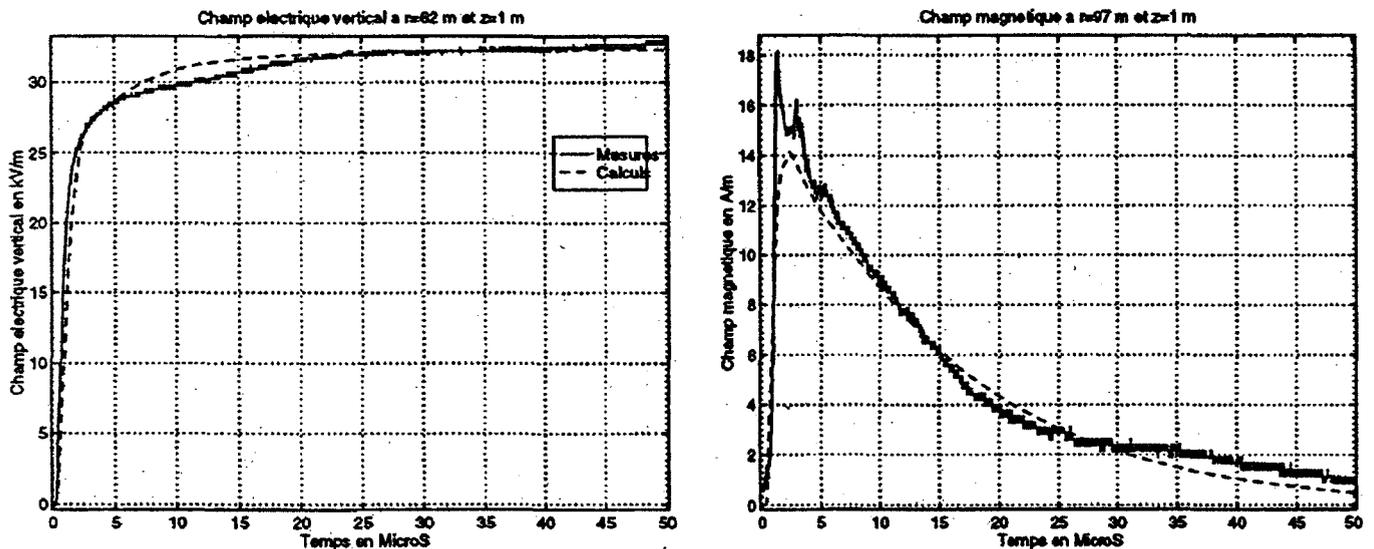
Herr Prof. Dr. Fröhlich wird uns heute in seinem Beitrag über die Möglichkeit der Minimierung dieser Rückwirkungen durch "intelligentes" Schalten informieren.

Indirekter Blitzeinschlag

Beim Blitzeinschlag in der Nähe einer Leitung wird ein elektromagnetisches Feld durch den Blitzstrom erzeugt. Dieser kann hohe transiente Spannungen verursachen, welche Geräte oder ihre Funktion stören können.



Figur 15 Blitzstrom



Figur16 Elektrisches und magnetisches Feld (62 m von Blitzkanal entfernt, Höhe 1 m) :
Links: Elektrisches Feld und rechts: Magnetisches Feld

2.2 Hochfrequenz (HF) Störungen

In den Elektrizitätswerken treten hauptsächlich Hochfrequenzstörungen auf, wenn ein Lichtbogen auftritt.

Dauernde HF Störungen

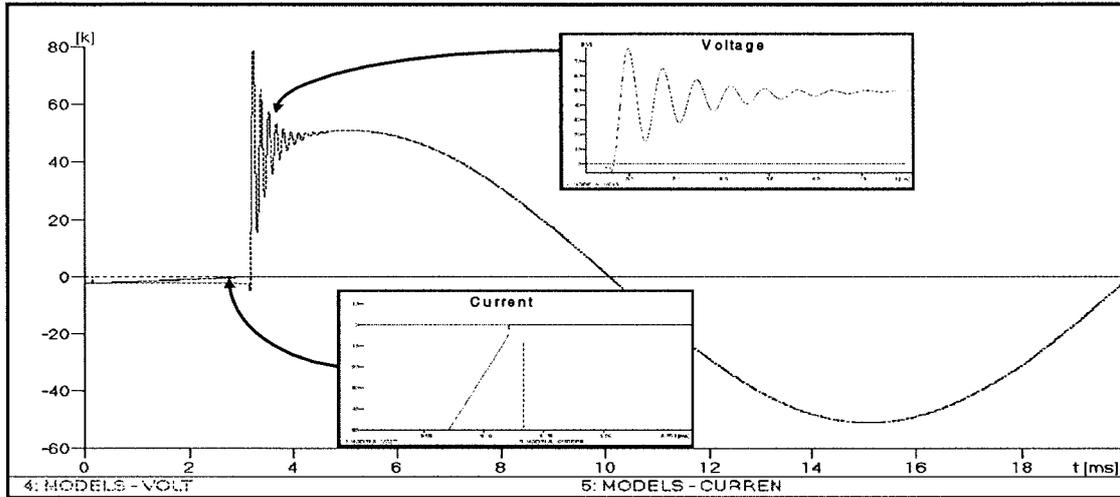
Kollektormaschinen

Zwischen dem Kollektor des Rotors und den Stromzuführungsbürsten können Funken durch schlechte Kommutierungsverhältnisse verursacht werden. Ein sehr steiler Strom (Anstiegszeit einige 10 ns) tritt auf und kann Steuergeräte stören, die in der Nähe positioniert sind.

Transiente HF Störungen

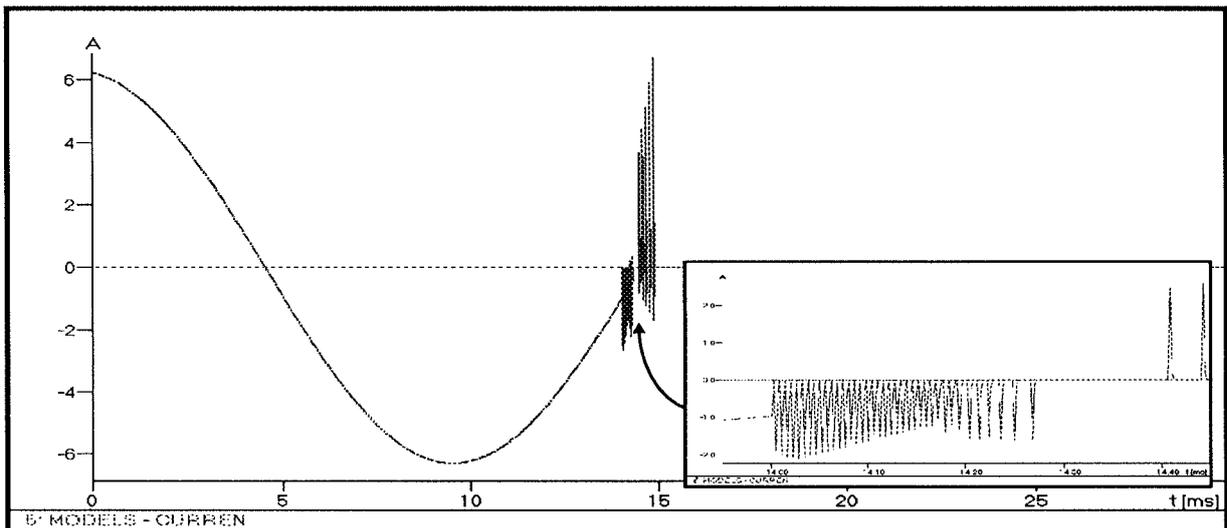
Ausschalten von induktiven Strömen

Die Unterbrechung von induktiven Strömen wird heutzutage von den Leistungsschaltern beherrscht. Dabei entsteht eine transiente Überspannung. Der Lichtbogen, der beim Öffnen der Kontakte auftritt, wurde in der nachfolgenden Berechnung mit den Mayr und Cassie Equations modelliert [7].

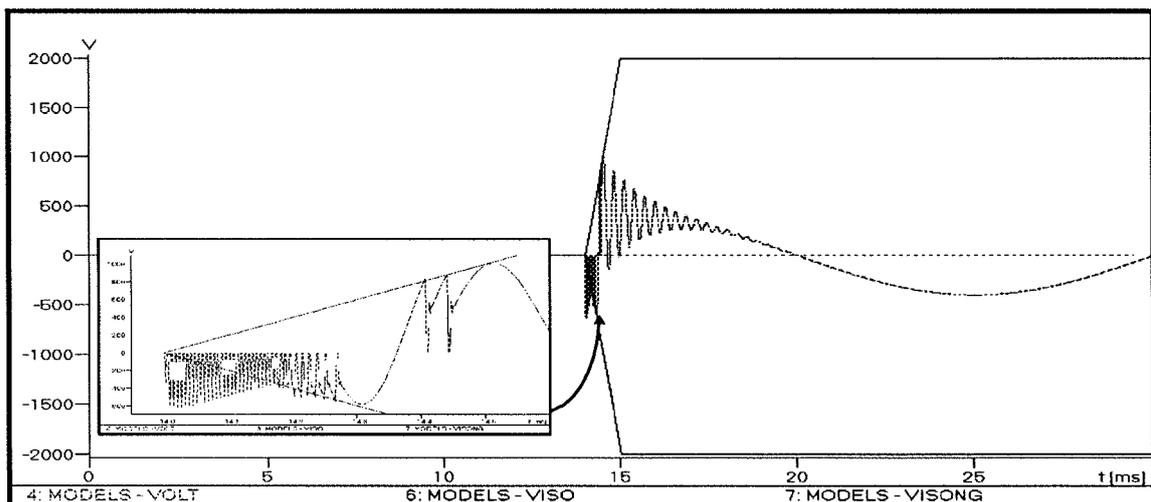


Figur 17 Unterbrechung eines induktiven Strom durch einen Leistungsschalter

Für einen Schütz ist die Situation schwieriger, da er vielfach nur ein beschränktes Löschvermögen besitzt. Das folgende Beispiel veranschaulicht Rückzündungen die beim Ausschalten eines induktiven Stromes auftreten können.



Figur 18 Strom zwischen den Kontakten des Schützes

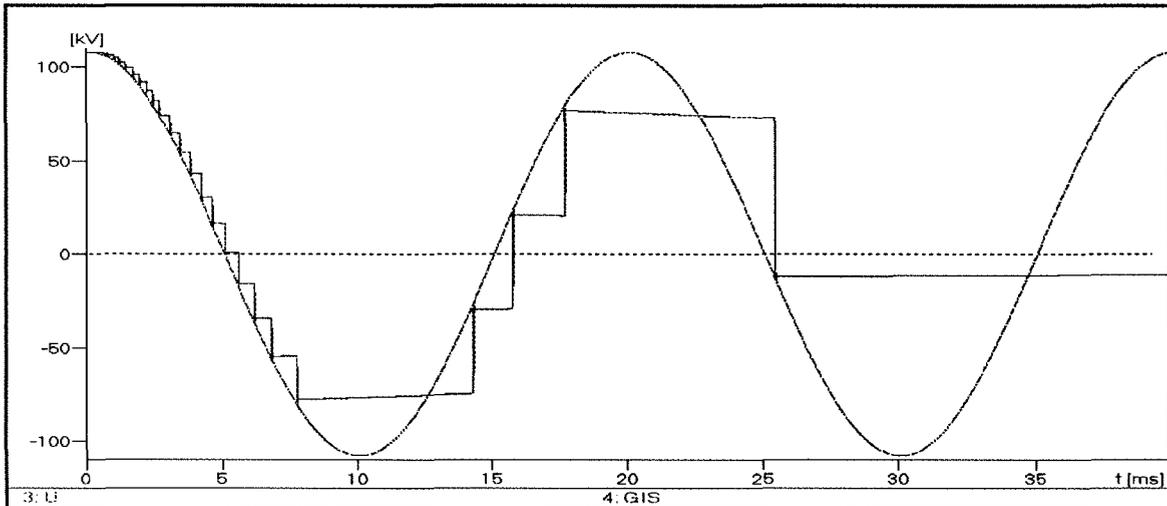
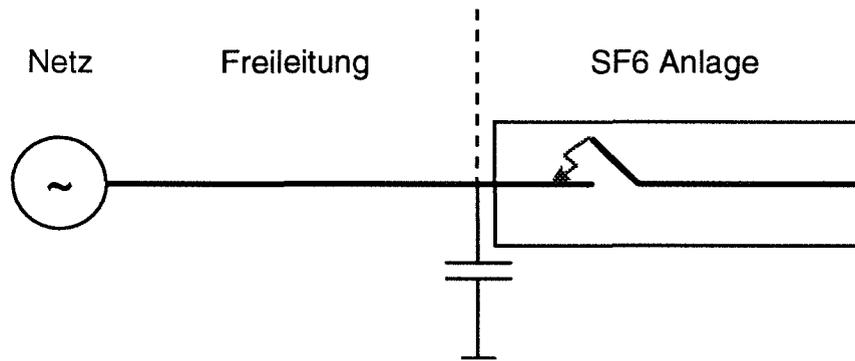


Figur 19 Spannung zwischen den Kontakten des Schützes

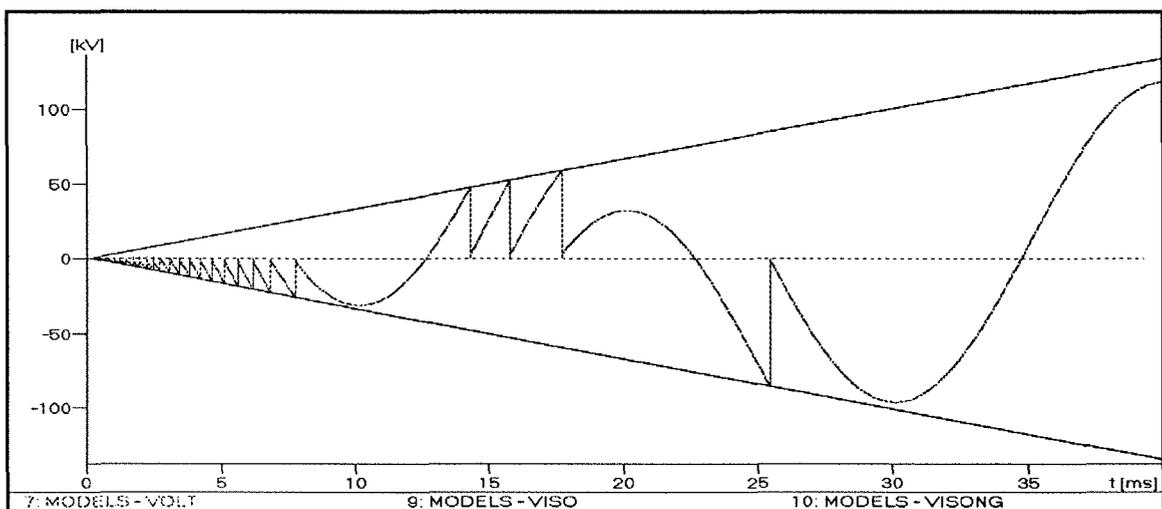
Das durch den Strom verursachte Feld hat ein breites Spektrum bis einige MHz.

Schaltüberspannungen in einer SF6 Anlage

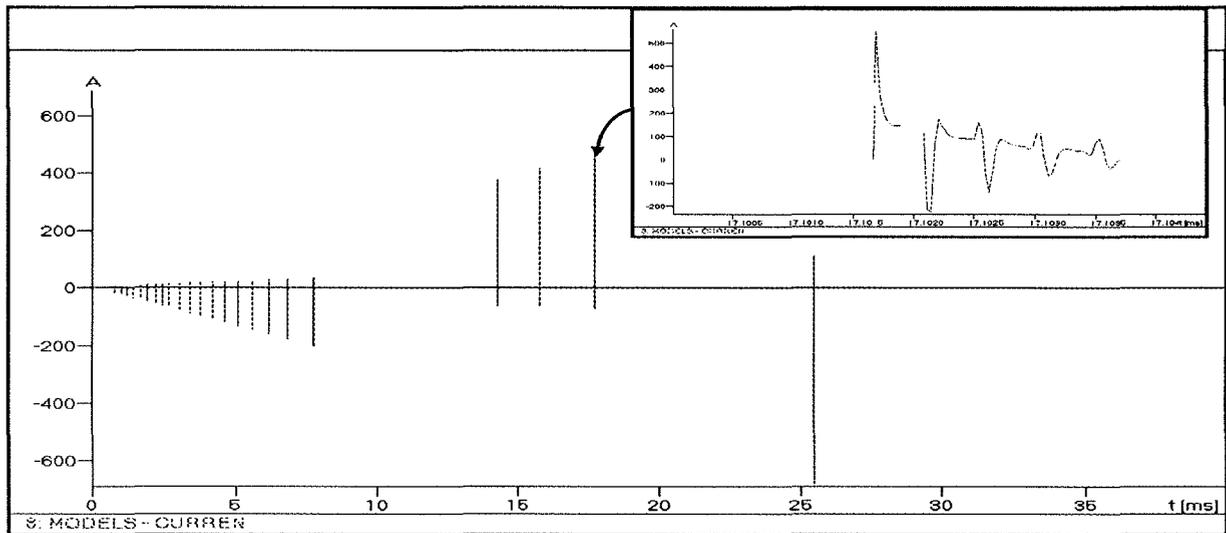
Durch das Öffnen eines Trenners in einer SF6 Anlage und dem dabei entstehenden Lichtbogen zwischen den Kontakten können sehr hochfrequente elektromagnetische Felder auftreten [6, 13]. Die folgenden Kurven veranschaulichen die Vorgänge.



Figur 20 Spannung Netzseite: sinusförmig, GIS-Seite: treppenförmig.



Figur 21 Spannung zwischen den Polen des Trenners



Figur 22 Strom (Rückzündungen)

Wenn beim Öffnen eines Trenners die Distanz der Kontakte grösser wird steigt die Isolationsfestigkeit der Trennstrecke. Zu Beginn der Öffnung ist jedoch die Isolationsfestigkeit noch gering, Zündungen treten auf bis die Isolationsfestigkeit grösser ist als die Spannung zwischen den Trennerpolen. Die dabei entstehenden sehr steilen Stromimpulse werden in der SF6-Anlage reflektiert.

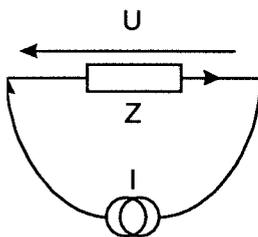
Durch die Betätigung eines Trenners treten also hochfrequente elektromagnetische Felder auf, die durch Feldeinwirkungen Leittechnikgeräte stören können.

Mehr über dieses Thema wird uns Dr. Tabara noch berichten. Im Beitrag von Dr. Büsch wird ebenfalls über GIS Anlagen berichtet, wobei im Speziellen auf die Thematik der GIS-Messwandler eingegangen wird.

3. Kopplung

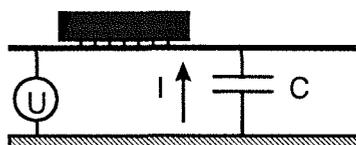
Sicher ist Ihnen bekannt, dass es zwischen einer störenden Quelle und einem empfindlichen Gerät grundsätzlich sechs Kopplungsmöglichkeiten gibt:

Ein Störstrom I fließt in einem Leiter und verursacht eine Spannung U



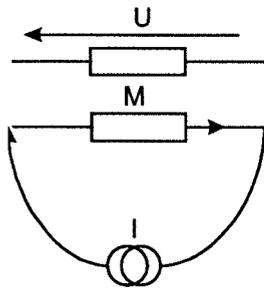
Typisches Beispiel: Harmonische Ströme im Netz, die eine harmonische Spannung verursachen (Z wäre die Impedanz des Netzes).

Eine AC Störspannung zwischen einem Leiter und Erde erzeugt einen Strom



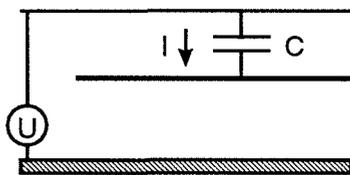
Typisches Beispiel: Karte in einem elektronischen Gerät

Ein Wechselstrom induziert eine Spannung auf einem parallelen Leiter



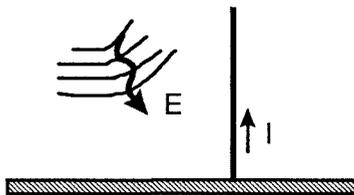
Typisches Beispiel: Hochspannungsleitung in der Nähe eines Signalkabels

Eine AC Spannung zwischen zwei parallelen Leitern verursacht einen Strom



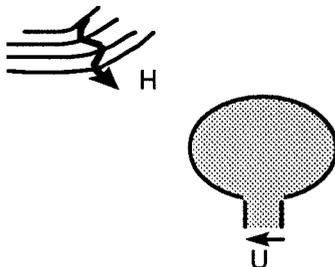
Typisches Beispiel: Sehr nahe parallel geführte Signalkabel bei HF Störung

Ein veränderliches elektrisches Feld verursacht einen Strom auf einem Leiter



Typisches Beispiel: Antenne eines Radioapparates

Ein veränderliches magnetische Feld verursacht eine Spannung in einer Schlaufe



Typisches Beispiel: Induzierte Spannung in der Schlaufe Kabelschirm-Erdleiter

Nur selten treten Kopplungen nur nach einem Prinzip auf, wesentlich häufiger sind verschiedene Kopplungseinwirkungen vereint anzutreffen.

4. Einige grundsätzliche Prinzipien

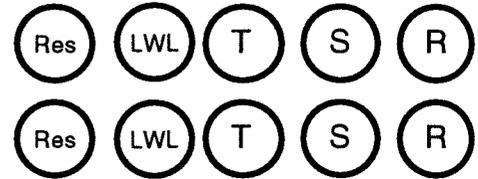
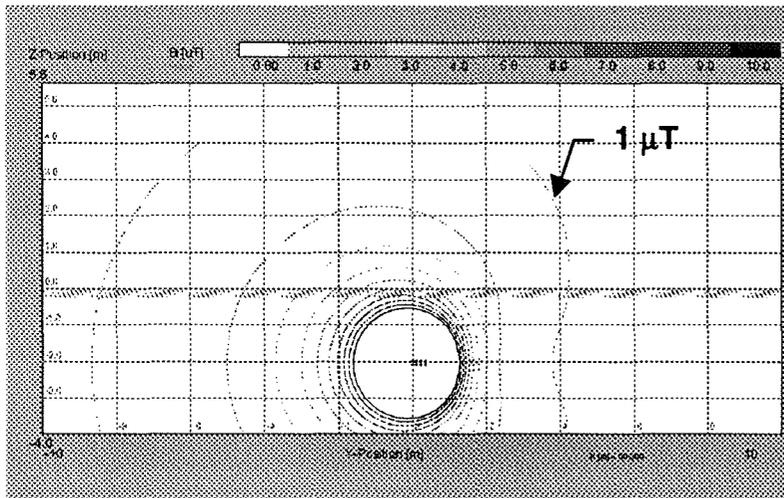
Es sollen hier nur einige Prinzipien erklärt werden, die in einem Elektrizitätswerk wie den BKW anwendet werden, um eine normale EMV zu gewährleisten. Der nachfolgende Beitrag von Herrn Trotti wird diesen Aspekt wesentlich ausführlicher darlegen.

Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten, EMV-Probleme zu vermeiden:

- Die Emissionen an der Störquelle reduzieren
- Die Kopplung verhindern

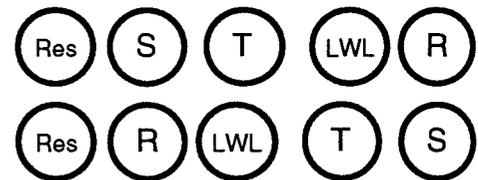
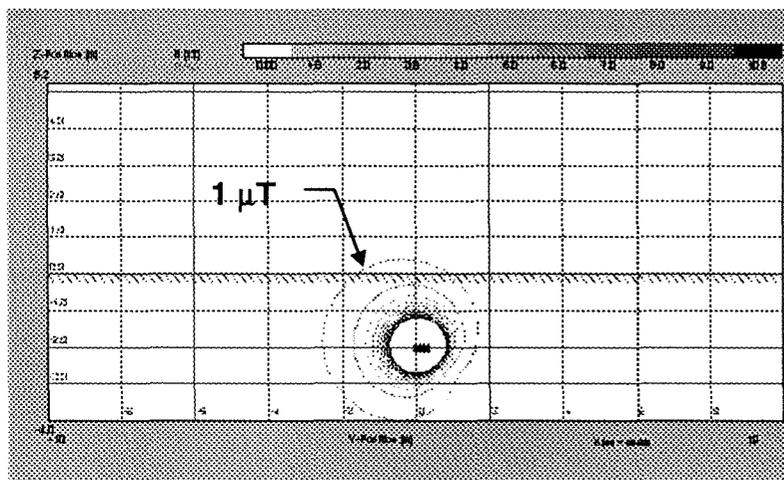
4.1 Reduktion an der Störquelle

4.1.1 Anordnung der Phasenleiter einer Kabelanlage mit Zwei Dreiphasensystemen



Figur 23 Unsymmetrische Leiteranordnung: Ungünstig.

Gleicher Massstab wie Figur 25
(Position und Feld)



Figur 24 Symmetrische Leiteranordnung: Vorteilhaft.

Gleicher Massstab wie Figur 24
(Position und Feld)

4.1.2 Phasenwinkelabhängige Schaltungen

Für Schaltungen die den Befehl an den Schalter in Abhängigkeit vom Phasenwinkel der Spannung geben ist es notwendig, dass die Schaltzeit des Leistungsschalters möglichst konstant ist, da man mit einem Wert von 5 ms vom Minimum zum Maximum gelangt. Herr Prof. Fröhlich wird uns mehr über dieses Thema berichten.

4.1.3 Niederspannungsverteilung nicht an den Wänden

Eine günstige Anordnung ist durch die Figur 6 und 7 dargestellt. Man vermeidet damit Störungen an benachbarten Geräten hervorgerufen durch Felder der stromstarken Niederspannungsverteilungen.

4.1.4 Saugtransformatoren

Das einphasige System der Bahnstromversorgung mit Fahrdrabt und erdfühligem Rückleiter (Schiene) besitzt nicht die Vorteile eines konventionellen dreiphasigen Übertragungssystems. Bei dreiphasigen Hochspannungsleitungen ist die Stromsumme stets nahezu null, wodurch

sich die von den drei Phasen verursachten Magnetfelder kompensieren. Um in Traktionsnetzen einen ähnlichen Kompensationseffekt zu erreichen, können Saugtransformatoren verwendet werden.

Die Aufgabe dieser Saugtransformatoren besteht darin, die in den geerdeten Gleisen fließenden Rückströme so zu beeinflussen dass sie in den Gleisen oder anderen dafür vorgesehenen Installationen zurückfließen, am besten in einem Leiter, der möglichst nahe am Fahrdrabt positioniert ist. Die SBB kann uns darüber mehr informieren.

4.1.5 *Aktive Kompensation zur Reduzierung von EM-Felder*

Für die Lösung dieser Aufgabe bleibt noch ein Entwicklungspotential. Es wird ein Kompensationsfeld mit einer entgegengesetzten Phase zum Störungfeld erzeugt, welches dazu führt, dass das resultierende Feld in zulässigen Grenzen gehalten werden kann.

4.2 **Verhinderung oder Reduktion der Kopplungsmöglichkeiten**

4.2.1 *Verkabelung*

- Die stromführenden Leiter (Stromversorgung) möglichst kompakt mit geringen Abständen zueinander anordnen
- Hin- und Rückleiter so nahe wie möglich parallel führen
- Schwachstrom- und Starkstromkabel separieren
- Distanz zwischen den stromführenden Leitern und einem möglichen Störeintrittsort maximieren
- Sekundärverbindungen zu SF6-Anlagen im allgemeinen sowie Anschlüsse von empfindlichen Geräten im speziellen mit abgeschirmten Kabeln ausführen. Der Schirm muss beidseitig geerdet werden.

4.2.2 *Systematische Vermaschung der Erdungsleiter*

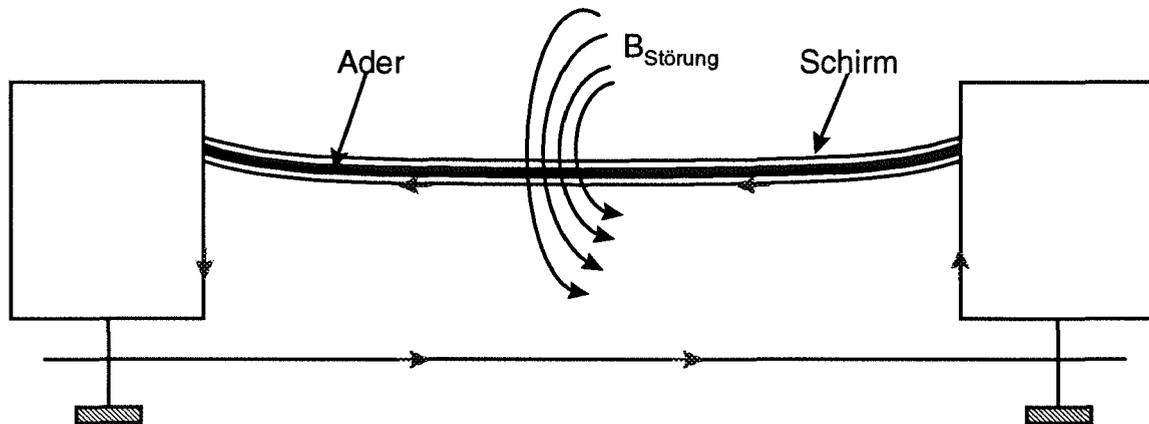
Die Erdungssysteme der Unterstationen werden unter Miteinbezug sämtlicher Erdungsträger (50-Hz-Erdungsleitungen, Betonarmierung, Jordanschienen, Kabelpritschen, Lüftungskanäle usw.) vollkommen vermascht ausgeführt.

Vorteile :

- nur geringe Spannungsunterschiede an der Erdungsanlage d.h. geringe vagabundierende Ströme in den Erdungsinstallationen
- Abschirmung gegen elektrische und magnetische Felder (E und B)
- Reduktion der Impedanz jeder Erdleiterverbindung bei HF ($\approx 1 \mu\text{H/m}$)

4.2.3 Reduzieren der Schlaufen

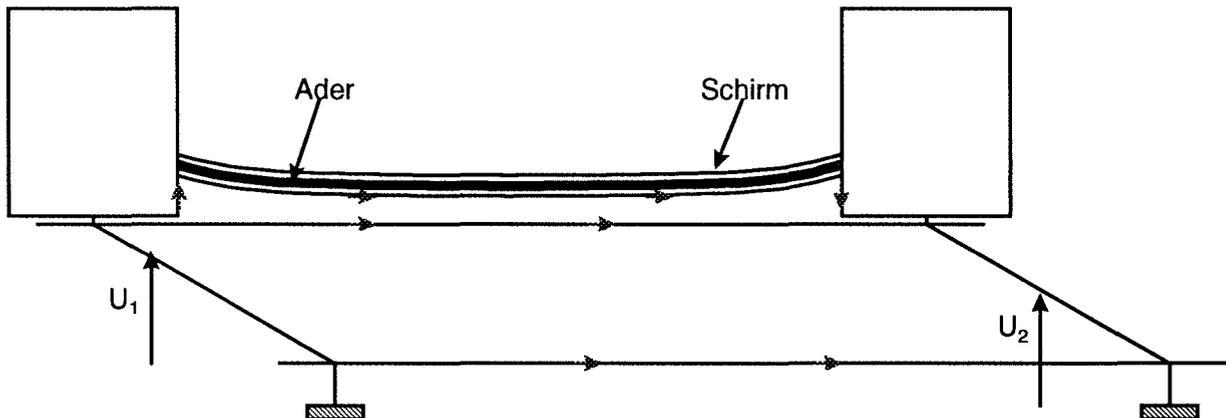
Schleife zwischen Kabelschirm und Erdnetz



Figur 25 Die Schlaufen klein halten (d.h. nicht wie auf der Figur)

Damit ein magnetisches Feld eine möglichst kleine Spannung in der Schleife induziert, ist die Fläche der Schleife klein zu halten, sonst entsteht ein Strom im Kabelschirm, der eine störende Spannung zwischen Ader und Schirm verursacht.

Schleife des Erdnetzes



Figur 26 Systematische Vermaschung der Erdungsleiter (d.h. nicht wie auf der Figur)

Eine gute Vermaschung der Erdungsanlage und allen Erdleiter ist notwendig um eine gute Äquipotentialität zu gewährleisten und um zu vermeiden, dass Ströme auf den Kabelschirmen fließen

4.2.4 Herstellung von EM-resistenten Geräten

Herr Narayan wird uns darüber viel Wissenswertes bieten.

5. Schlusswort

In den Elektrizitätswerken gibt es verschiedentliche EMV-Probleme, die hier kurz beschrieben worden sind. Die nachfolgenden Referenten werden die beschriebenen Vorgänge präzisieren und Massnahmen vorschlagen. Einige einfache Grundprinzipien wurden auch skizziert, um

Niederfrequenzstörungen zu begrenzen. Für Hochfrequenzstörungen ist die EMV eine Kunst, deren Feinheiten wir heute erfahren werden.

6. Literaturverzeichnis

- [1]: A. Charoy
Parasites et perturbations des électroniques
Ed. Dunod
- [2]: G. Ecklin A. Plessl and D. Schlicht
Overvoltages in GIS caused by the operation of isolators
Surges in high-voltage networks, edited by Kl. Ragaller
- [3]: Ch. Prévé
Protection des réseaux électriques
Ed. Hermés
- [4]: Shunt capacitor bank switching - Stresses and test methods
Électra N° 182 February 1999
- [5]: E. Philippow
Taschenbuch 5 Elektrotechnik
Elemente un Baugruppen der Elektrotechnik
Carl Hanser Verlag
- [6]: Kl. Ragaller
Surges in high voltage network
Brown Boveri Symposia Series
- [7]: Proceedings
International Conference on Power System Transients (IPST'99)
- [8]: Electromagnetic Transient Program (EMTP)
Theory Book
Bonneville Power Administration
- [9]: F. Tesche, M.Ianoz, T. Karlson
EMC analysis methods and computational models
Wiley Interscience
- [10]: D. Orzan
Couplage externe et interne entre un champ électromagnétique et un réseau de lignes multifilaires
Thèse EPFL n° 1768
- [11]: F. Rachidi
Effets électromagnétiques de la foudre sur les lignes de transmission aériennes. Modélisation et simulation
Thèse EPFL n° 974
- [12]: Brenda
ABB Technik 81996
Überspannungen und Störsapnungen beherrschen

Sichere Analyse von Beeinflussungsproblemen auf der physikalischen Grundlage der dabei auftretenden elektrischen Vorgänge

Prof. Dr. Arnold Rodewald, Reinach

Im folgenden wird der im Titel aufgestellte Grundsatz, EMV-Probleme möglichst auf physikalischer Basis zu analysieren und nach Lösungsansätzen zu suchen, an zwei Themen demonstriert und zwar zum einen am Problem der induktiven Kopplung und zum anderen im Zusammenhang mit der Frage, ob der leitende Mantel eines Kabels an einer Seite oder an beiden Seiten mit dem Bezugsleiter verbunden werden muss.

1. Die physikalische Betrachtungsweise einer induktiven Kopplung

In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass man zum sicheren Verständnis und zur gezielten Veränderung einer induktiven Kopplung die beteiligten Magnetfelder analysieren sollte.

Als Beispiel dient die Anordnung, die in Bild 1 skizziert ist. Zwischen den beiden Drähten einer Leitung befindet sich eine Masche A-B-C-D. Der Abstand der Leitungsdrähte beträgt 0,5 m. Wenn in der Leitung ein Impulsstrom hin- und zurückfließt, entstehen an den Widerständen R_1 und R_2 in der Masche Spannungen.

Bild 1

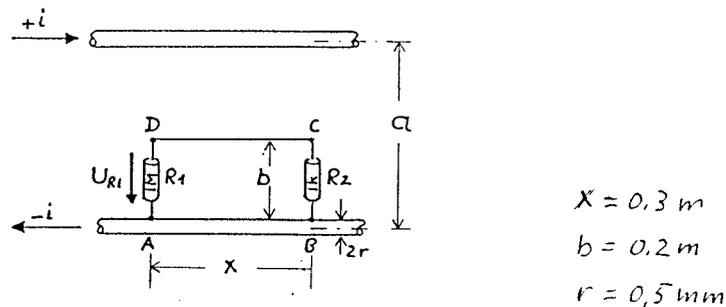
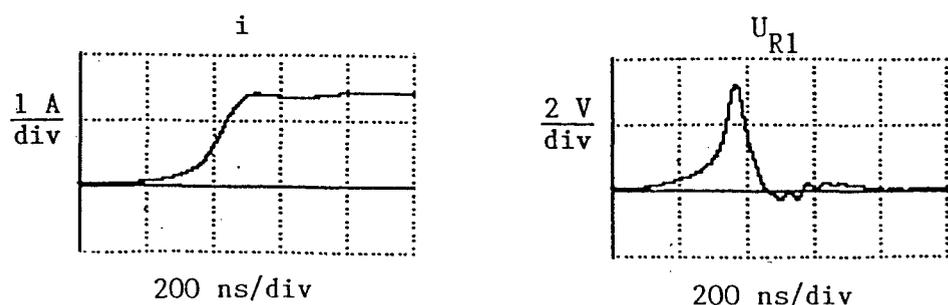


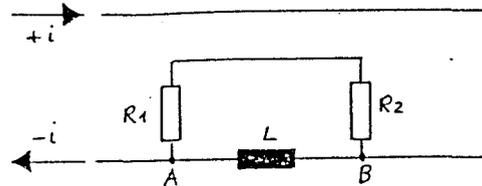
Bild 2 zeigt die Oszillogramme des Stromes und der Spannung an Widerstand R_1 . Die Spannung an R_1 wirkt als Störung und soll verringert werden.

Bild 2



Im folgenden wird zunächst ein falscher Problemlösungsansatz skizziert, der aber in der Praxis recht häufig anzutreffen ist. Er geht vom Ersatzschaltbild der Leitung (Bild 3) aus und begründet die störende Spannung mit Spannungsabfall an der Eigeninduktivität des Leitungsabschnittes zwischen A und B.

Bild 3



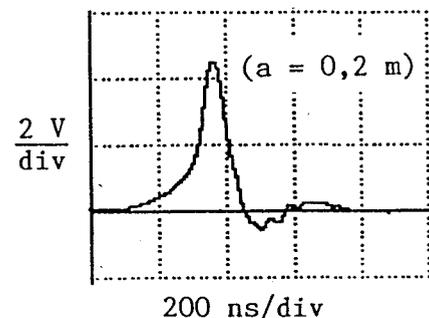
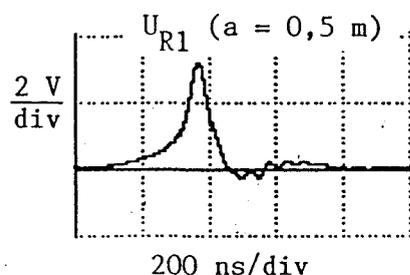
Zieht man die Formel für die Eigeninduktivität einer 2-Draht-Leitung für grosse Leiterabstände zu Rate

$$L = 0,4 \times \ln \frac{a}{r} \quad [\mu\text{H}]$$

mit x = Länge des Leitungsstückes in Metern, r = Leiterradius (0,5 mm) und a = Leiterabstand der Leitung, dann erhält man daraus z.B. den Hinweis, dass man den Abstand zwischen den Drähten der Leitung verringern sollte, um die Induktivität zu verkleinern.

In Bild 4 sind die Oszillogramme der Spannungen am Widerstand R_1 mit dem ursprünglichen Leiterabstand $a = 0,5$ m und einer verringerten Distanz von $a = 0,2$ m wiedergegeben. Man erkennt, dass die Spannung nicht, wie erwartet, geringer geworden ist, sondern zugenommen hat.

Bild 4



Der Versuch, die gestellte Aufgabe zu lösen, ist fehlgeschlagen, weil zur Beschreibung – und damit auch als Quelle für Lösungshinweise – der Begriff "Eigeninduktivität" verwendet wurde, ohne dessen physikalischen Hintergrund zu beachten, d.h. welcher magnetische Fluss zu dieser Induktivität gehört. Hätte man dies getan, dann wäre deutlich geworden, dass der Fluss, der durch den Begriff "Eigeninduktivität" repräsentiert wird, nicht derjenige sein kann, der die Störung verursacht.

Es sei in diesem Zusammenhang daran erinnert, dass eine Induktivität ein von einem Strom erzeugter magnetischer Fluss pro Stromeinheit ist

$$L = \frac{\bar{\Phi}_L(i)}{i} \quad \text{oder} \quad M = \frac{\bar{\Phi}_M(i)}{i} \quad (1a, 1b)$$

Es ist üblich, mit dem Index L Selbstinduktionen in dem Stromkreis des felderzeugenden Stromes zu bezeichnen und mit dem Index M Induktionsvorgänge in anderen Maschen.

Wenn man also den Begriff "Induktivität" verwendet, sollte man sich besonders in Zusammenhang mit EMV-Problemen immer bildlich vorstellen, welcher Magnetfluss damit gemeint ist.

In Bild 5a ist der Feldausschnitt, durch den der Fluss $\bar{\Phi}_L$ die Leiteranordnung des diskutierten Beispiels durchdringt, mit einer Schraffur gekennzeichnet. $\bar{\Phi}_L$ besteht aus zwei Teilflüssen. Ein Teil $\bar{\Phi}_{L1}$ geht vom Strom im oberen Leiter aus und ein zweiter Teil $\bar{\Phi}_{L2}$ vom unteren Leiter.

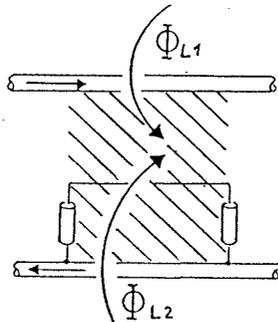


Bild 5a

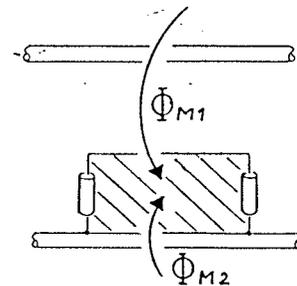


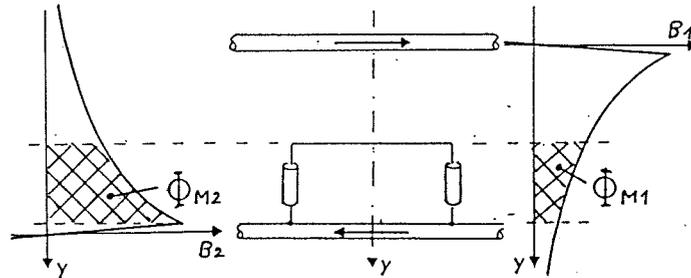
Bild 5b

Bild 5b zeigt die entsprechende Darstellung für den Fluss $\bar{\Phi}_M$, der die gestörte Masche A-B-C-D durchdringt. Auch er besteht aus zwei Teilflüssen $\bar{\Phi}_{M1}$ und $\bar{\Phi}_{M2}$, von denen ein Teil ($\bar{\Phi}_{M1}$) vom Strom im oberen Leiter der Leitung erzeugt wird und $\bar{\Phi}_{M2}$ vom Strom im unteren Leiter der Leitung.

Aus dieser Gegenüberstellung wird erkennbar, dass nicht der Fluss $\bar{\Phi}_L$ und damit die Eigeninduktivität für die Störung verantwortlich ist, sondern der Fluss $\bar{\Phi}_M$.

Um zu zeigen, wie die Φ_M -Flüsse zustande kommen, ist in Bild 6 der Verlauf der magnetischen Induktion quer zur Leitung aufgezeichnet. In dieser Darstellung sind die Flächen, die den Flüssen Φ_{M1} und Φ_{M2} entsprechen, durch eine Kreuzschraffur hervorgehoben.

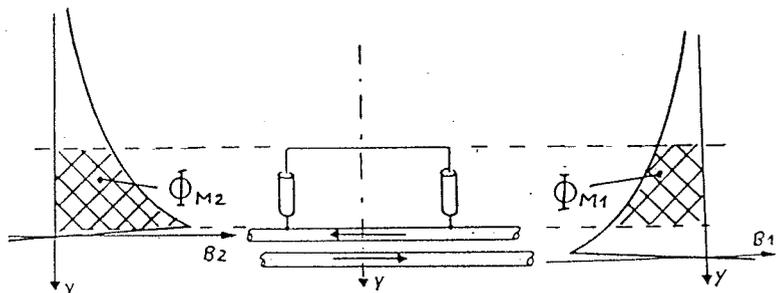
Bild 6



Mit diesem Einblick in die Struktur des Magnetflusses ergeben sich drei Ansätze zur Verringerung der Störspannung in der Masche A-B-C-D:

1. Man könnte den Abstand zwischen den Leitern der Leitung vergrößern, weil dadurch der Teilfluss Φ_{M1} verringert wird.
2. Man könnte die Masche A-B-C-D verkleinern, weil dadurch sowohl Φ_{M1} als auch Φ_{M2} reduziert wird.
3. Man könnte die Drähte der Leitung sehr dicht zusammenlegen (im Idealfall verdrehen), weil dann Φ_{M1} und Φ_{M2} gleich gross, aber einander entgegengerichtet sind und sich auf diese Weise kompensieren (Bild 7).

Bild 7



Der zu Beginn des Beispiels geschilderte Lösungsansatz auf der Grundlage des Spannungsabfalls an der Eigeninduktivität war deshalb falsch, weil durch die Halbierung des Leiterabstands Φ_{M1} vergrößert wurde und deshalb die Störspannung zunahm.

Natürlich kann man die Situation auch mit Hilfe eines Ersatzschaltbildes beschreiben, in dem man die den magnetischen Flüssen entsprechenden Induktivitäten bestimmt [1] :

$$M_1 = 0,2 \times \ln \frac{a}{a-b} \quad [\mu H] \quad (2)$$

$$\text{und } M_2 = 0,2 \times \ln \frac{b}{r} \quad [\mu H] \quad (x \text{ in Metern}) \quad (3)$$

In Bild 8 ist das entsprechende Ersatzschaltbild aufgezeichnet.

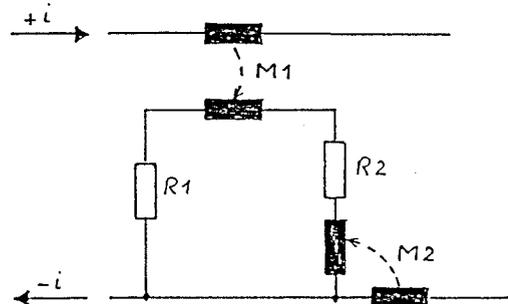


Bild 8

Aber auch bei dieser Beschreibungsart kommt man nicht ohne Rückgriff auf die physikalischen Vorgänge aus. Um entscheiden zu können, ob die berechneten Werte für M_1 und M_2 in den Lösungsansätzen 1 und 2 zu addieren oder wie in Lösungsansatz 3 voneinander zu subtrahieren sind, muss man die Richtungen der magnetischen Flüsse beachten, die zu M_1 bzw. M_2 gehören.

Mit der Darstellung dieses Beispiels sollte vor allem die empfehlenswerte Reihenfolge bei der Lösung von EMV-Problemen hervorgehoben werden:

- zuerst auf der Grundlage der physikalischen Vorgänge Störungsursachen erkennen und Problemlösungen entwerfen
- danach Ersatzbilder aufstellen und Berechnungen durchführen.

2. Einseitige oder beidseitige Verbindungen zwischen Kabelmanteln und Bezugsleitern

Bild 9 zeigt das physikalische Prinzip einer Störung, die durch ein elektrisches Feld verursacht wird. Durch das Feld fließt ein Verschiebungsstrom und ein ohmscher Strom auf den Innenwiderstand R_2 der Störsenke zu und erzeugt dort eine störende Spannung.

Bild 9

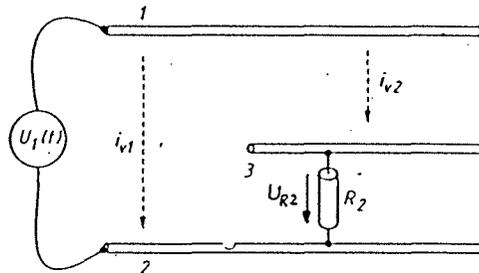
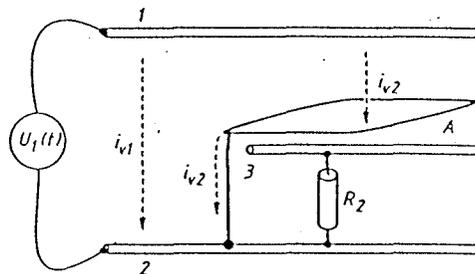


Bild 10 zeigt das Prinzip der Abschirmung gegen ein elektrisches Feld: Der störende Verschiebungsstrom wird durch eine leitende Fläche aufgefangen, bevor er die Störsenke erreicht, und über eine niederohmige Verbindung an der Senke vorbeigeleitet.

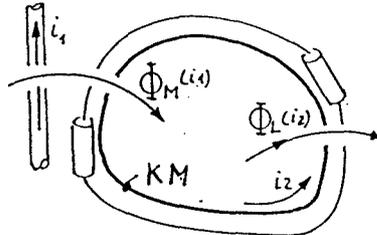
Bild 10



Konsequenz für Kabelabschirmungen: Zur Abschirmung gegen ein elektrisches Feld genügt es, den leitenden Kabelmantel mit einer Verbindung am Gegenpol der Störquelle (in der Regel am Bezugsleiter) anzuschliessen.

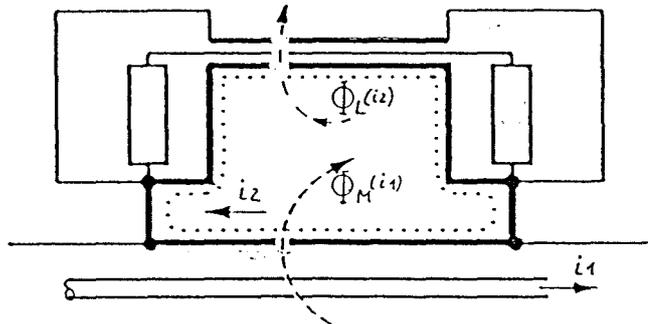
Bild 11 zeigt das physikalische Prinzip der Abschirmung gegen ein zeitlich schnell veränderliches Magnetfeld: Parallel zur Masche, in die ein störendes Magnetfeld eingreift, wird eine Kurzschlussmasche KM angebracht. In der Kurzschlussmasche wird ein Strom i_2 induziert, der mit seinem Magnetfeld Φ_A dem störenden Magnetfeld Φ_S entgegenwirkt und es dadurch schwächt.

Bild 11



Konsequenz für Kabelabschirmungen: Zur Abschirmung gegen ein zeitlich schnell veränderliches Magnetfeld muss der Kabelmantel auf beiden Seiten mit der zu schützenden Masche verbunden werden, damit ein Strom in der dadurch entstehenden Kurzschlussmasche fließen kann (Bild 12).

Bild 12



Das Prinzip der Abschirmung mit Hilfe von induzierten Strömen, die abschirmend Gegenfelder erzeugen, ist nur bei schnell veränderlichen Magnetfeldern wirksam, etwa im Frequenzbereich oberhalb 1 kHz. Die Begründung, warum das so ist und Hinweise darauf, welches physikalische Prinzip bei tiefen Frequenzen anzuwenden ist, findet man in der einschlägigen Literatur, z.B. in [1].

[1] Rodewald, A.: Elektromagnetische Verträglichkeit.
Braunschweig, Vieweg, 1995.

Modélisation des effets électromagnétiques de manœuvres et de la foudre dans les postes sous enveloppe métallique

Dr. Daniel Tabara
EPFL, Lausanne

Les problèmes de CEM dans les postes sous enveloppe métallique (PSEM) sont dus aux effets électromagnétiques des surtensions de manœuvre et de la foudre. Les circuits à haute tension des PSEM sont situés à l'intérieur d'une enveloppe étanche remplie de gaz SF₆ sous pression. Les ondes mobiles de surtensions transitoires se propagent sur les barres du PSEM. Aux discontinuités de l'enveloppe une partie des surtensions sort à l'extérieur du PSEM et produit une montée en tension transitoire des terres. Ce phénomène est une source de perturbation des appareils de contrôle et commande du poste.

Les transformateurs de mesure ainsi que tous les dispositifs nécessaires au bon fonctionnement des PSEM sont reliés aux équipements de contrôle et commande à travers des câbles à basse tension (câbles secondaires). Dû aux dimensions réduites des installations, les circuits à haute et à basse tension sont très rapprochés. Les câbles secondaires sont situés dans un environnement électromagnétique (EM) très pollué. L'interférence entre les phénomènes EM transitoires et les câbles génère des tensions dangereuses à l'entrée des dispositifs de protection du PSEM. La connaissance des sources de bruit EM et des voies possibles de transmission des perturbations vers les équipements sensibles sont des étapes essentielles dans l'établissement d'un concept efficace de compatibilité électromagnétique (CEM).

Les contributions originales de cette étude sont mises en valeurs par les éléments suivants:

1. Traitement unitaire des effets EM dans un PSEM depuis la source et jusqu'aux systèmes affectés.

Le PSEM a été considéré comme un système unique. Les circuits primaire et secondaire ont été intégrés dans *le même modèle de calcul*. De cette manière, le calcul des surtensions internes a permis de déterminer la montée en tension transitoire des terres et les tensions conduites en mode commun sur les gaines des câbles secondaires.

2. Traitement avec l'EMTP-ATP des lignes non uniformes

L'enveloppe, les conducteurs de terre et les gaines des câbles sont des lignes non uniformes de configuration complexe. Nous avons utilisé des approches simplifiées, basées sur la théorie des antennes et des lignes de transmission, pour leur modélisation. Les lignes de transmission non uniformes du PSEM ont été modélisées à l'aide des deux logiciels très connus, l'EMTP-ATP et le NEC. Les résultats obtenus ont été comparés avec les mesures dans un PSEM de 125 kV du Service Electrique de Lausanne. Il y a une bonne concordance tant des amplitudes ainsi que des spectres entre le calcul et la mesure.

3. Modélisation simplifiée des tubes et calcul du champ EM rayonné par l'enveloppe à l'aide de NEC

Le calcul du champ électromagnétique rayonné par l'enveloppe a été une tâche ardue à cause de la difficulté de modéliser l'enveloppe. La modélisation par segments (*wire-grid*) avec le NEC

était impossible dû à la grande taille de l'installation. Nous avons proposé une méthode originale de modélisation de l'enveloppe pour le calcul du champ électromagnétique. Elle s'applique surtout pour les postes à une enveloppe par phase. Les erreurs faites par cette méthode sont acceptables si on tient compte de la complexité du problème.

4. Etude des méthodes pratiques de réduction de la MTTT

Les différentes méthodes prises en compte ne sont pas des solutions nouvelles. Cependant, dans nombre de cas, les circuits sont surdimensionnés. Il y a trop de conducteurs de terre, double blindage des câbles secondaires, etc. Par les modèles et les résultats obtenus nous avons, espérons-le, apporté une contribution à la clarification de ces problèmes et des critères de choix pour des solutions plus économiques.

5. Combinaison originale des deux codes de calcul commerciaux : EMTP-ATP et NEC

Le NEC a été utilisé pour affiner les modèles EMTP-ATP des lignes de transmission non uniformes. La tension calculée avec l'EMTP-ATP sur la transition PSEM/câble a été utilisée comme source de tension d'excitation des modèles NEC de l'enveloppe.

Nous avons rencontré plusieurs difficultés au long de cette étude, les plus importantes étant les suivantes :

- La complexité des circuits internes et externes du PSEM
- Le grand nombre de structures métalliques à modéliser à l'extérieur du PSEM
- La présence du fer à béton des murs modifie la propagation du champ EM; cet élément n'a pas été pris en compte dans les modèles
- Il a été difficile de modéliser le comportement du réseau de terre en haute fréquence

Par ailleurs les mesures dans le PSEM ont posé un nombre de problèmes comme:

- la possibilité d'effectuer des manœuvres est limitée pendant le service normal
- la dépendance du centre de dispatching
- le nombre élevé d'opérations nécessaires pour une seule mesure
- l'utilisation de la chaîne de mesure et de la cage blindée dans un espace restreint
- la dispersion des valeurs mesurées dans les mêmes conditions

Malgré toutes ces difficultés, la plupart des buts de l'étude ont été atteints. Une des retombées pratiques de cette étude est la contribution à la clarification des problèmes d'interférence dans les PSEM et aux critères de choix pour des solutions plus économiques. Les modèles proposés sont simples et efficaces malgré les approximations et simplifications qui ont été faites. Avec peu d'effort ils peuvent être utilisés dans l'industrie et étendus à d'autres PSEM. Les perturbations ont été calculées à partir de la source et jusqu'aux systèmes affectés. Il y a une bonne concordance entre les résultats de calcul et de mesure. Il a été clairement démontré que le choix du routage des câbles peut se faire en fonction de l'intensité du champ EM dans la salle du PSEM. Le logiciel NEC peut être utilisé comme outil d'aide à la conception.

Une autre retombée peut être la contribution à la modification de la norme CEI 1000-4-12 dans laquelle la fréquence pour les essais d'immunité de l'appareillage est limitée à 1 MHz. Les spectres des surtensions très rapides calculées et mesurées dans les circuits secondaires ont montré des pics de résonance significatifs jusqu'à 100 MHz. Les résultats obtenus fournissent pour ces normes la preuve que des fréquences d'essais d'immunité supérieures à 1 MHz sont nécessaires.

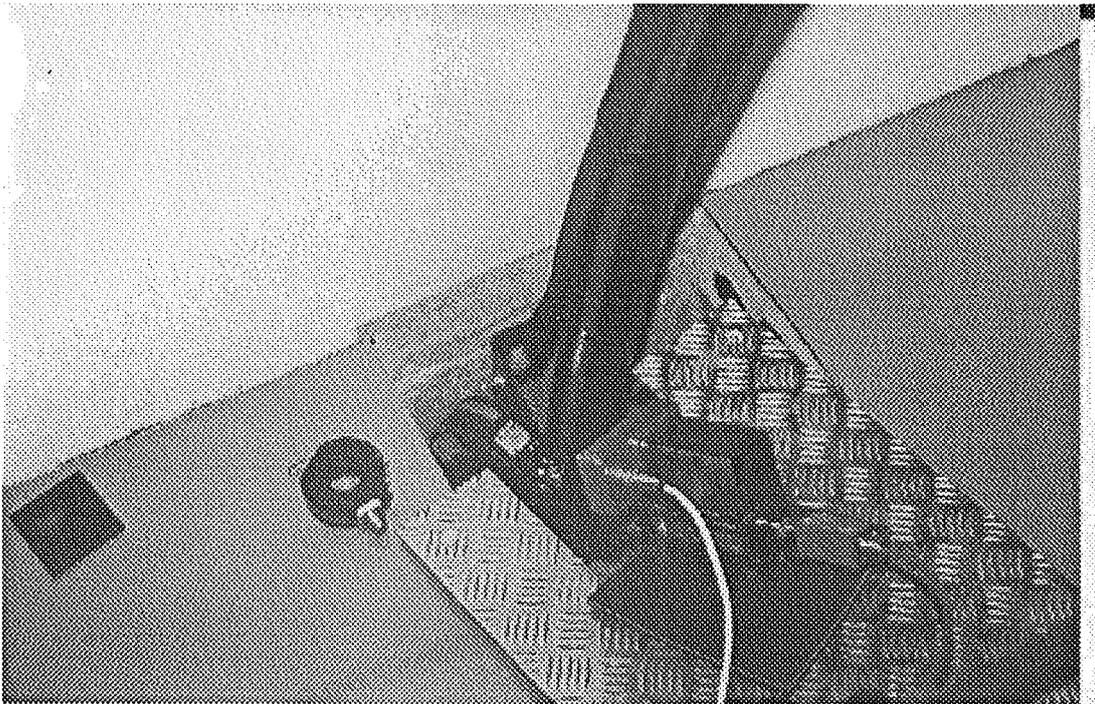


Figure 1 Mesure du courant transitoire dans le réseau de terre du poste, suite à une fermeture d'un sectionneur de barres à l'intérieur de l'enveloppe.

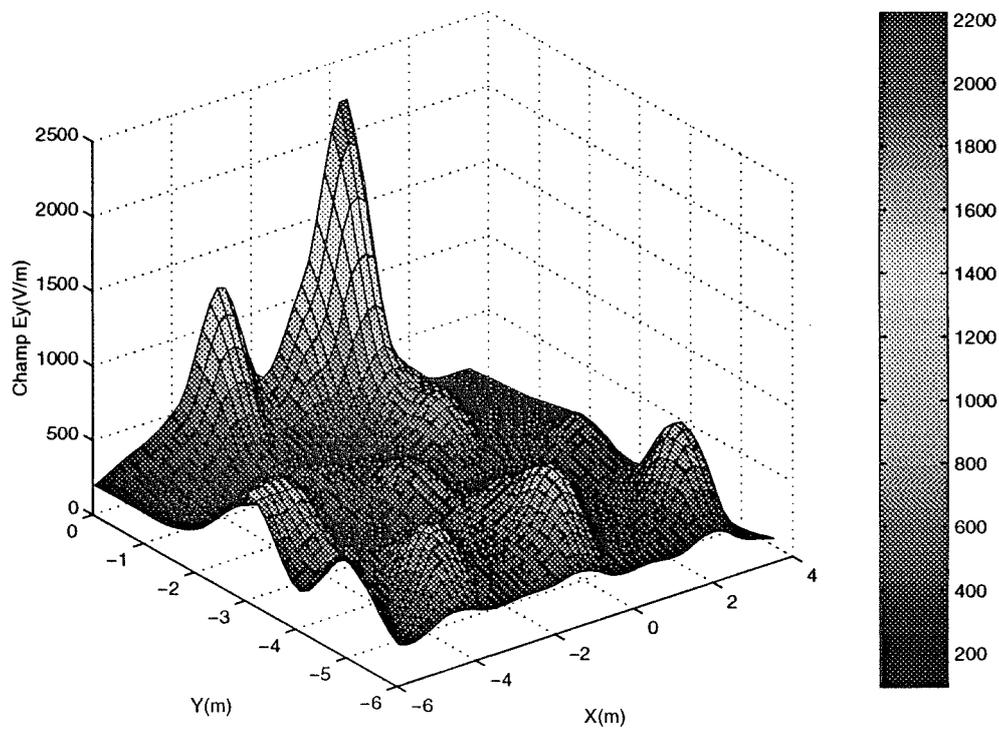


Figure 2 Carte des amplitudes maximales du champ électrique transitoire dans la chambre du poste blindé calculées à une hauteur de 2 m, pour une fermeture d'un sectionneur de barres à l'intérieur de l'enveloppe.

Übertragung von Schalttransienten durch GIS-Messwandler

Dr. Werner Büsch
ALSTOM AG, Oberentfelden

1. Einleitung

Bei der erfolgreichen Umsetzung jedes EMV-Konzeptes für eine GIS-Anlage kommt den Messwandlern eine besondere Bedeutung zu. Messwandler sind direkt mit dem Hochspannungskreis gekoppelt. Erfahrungsgemäss werden die höchsten in einer GIS-Sekundäranlage auftretenden transienten Überspannungen häufig in Wandlersekundärkreisen bei primärseitigen Schalthandlungen mit Trennern festgestellt.

Zur Reduktion der Durchkopplung dieser Überspannungen werden vom Wandlerhersteller spezielle konstruktive Massnahmen angewendet. Der Beitrag zeigt mögliche Massnahmen und deren Wirkung auf das transiente Übertragungsverhalten bei induktiven Strom- und Spannungswandlern auf.

Ein weiterer Punkt ist der Nachweis der Wirksamkeit der angewendeten Massnahmen. Der Beitrag geht auf die heutige Praxis und bestehende Probleme ein und leitet daraus entsprechende Empfehlungen ab.

2. Transientes Übertragungsverhalten

Auf Grund des unterschiedlichen konstruktiven Aufbaus sind auch das transiente Übertragungsverhalten und mögliche Dämpfungsmassnahmen bei induktiven Strom- und Spannungswandlern unterschiedlich.

2.1 Stromwandler

Bild 1a zeigt den prinzipiellen Aufbau eines GIS-Stromwandlers. Typisch ist die isolierte Trennstelle T am Gehäuse zur Verhinderung einer Kurzschlusschleife des Wandlerfensters. Die Kerne befinden sich ausserhalb des SF₆-Gasraumes.

Bei Schaltung mit dem Trenner breiten sich transiente EM-Felder innerhalb der Anlage aus. Als Folge fliesst ein Rückstrom I_R im Gehäuse. Ein Teil des EM-Feldes (2) wird an der Trennstelle nach aussen in den Fensterraum abgestrahlt und in die Sekundärwicklungen eingekoppelt. Andererseits induziert der transiente Leiterstrom I eine Spannung in die offene Fensterschleife, die eine kapazitive Kopplung (1) mit den Sekundärwicklungen hervorruft. *Bild 1c* zeigt das Ersatzschaltbild des Wandlerfensters für den Rückstrom. Das Frequenzverhalten wird im wesentlichen durch die Induktivität L_a des äusseren Gehäuses des Fensters und durch die Kapazität C der Trennstelle bestimmt (*Bild 1d*). Bei Erreichen der Resonanzfrequenz f_{res1} , d. h. beide Widerstandswerte X_a und X_c sind gleich gross, fliesst der Rückstrom mit zunehmender Frequenz im wesentlichen über das Innengehäuse des Wandlerfensters. Das SF₆-Gehäuse ist quasi geschlossen. Als Folge werden die hohen Frequenzen ($f > f_{res}$) stark abgedämpft.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten eine für den Betrieb in der GIS-Anlage ausreichende Dämpfung zu erhalten. Eine Methode, die sich in der Praxis sehr gut bewährt hat, ist die Vergrösserung der Kapazität C durch den Einbau eines zusätzlichen Kapazitätsbelags (*Bild 1b*). Dadurch kann

die Resonanzfrequenz des Wandlers je nach Grösse der Zusatzkapazität zu tieferen Werten (f_{res2}) verschoben werden.

Bild 1e zeigt als Beispiel das typische Übertragungsverhalten eines 245 kV Stromwandlers mit und ohne zusätzlichem Kapazitätsbelag. Die Resonanzfrequenz ändert sich in diesem Fall von ca. 30 MHz auf 5.6 MHz. Zusätzlich ist noch jener Frequenzbereich speziell markiert (fGIS), in dem die charakteristischen GIS-Anlagefrequenzen beim Trennerschalten in der Anlage auftreten. Diese Frequenzen sind im wesentlichen für das Durchkopplungsverhalten der Wandler im Betrieb massgebend.

2.2 Spannungswandler

Das Prinzipschaltbild eines induktiven Spannungswandlers ist in *Bild 2a* und das zugehörige Ersatzschaltbild in *Bild 2b* gezeigt. Bei den Spannungswandlern kann die magnetische Übertragung der Transienten über die Wicklungen praktisch vernachlässigt werden. Wirksam sind im wesentlichen die Streukapazitäten und Induktivitäten der Verbindungsleitungen.

Zur Bedämpfung der Transienten wird in der Regel ein zusätzlicher Metallschirm S zwischen der hochspannungs- und niederspannungsseitigen Wicklung eingebaut. Ob die Schirmung effizient genug ist, wird ganz wesentlich von mehreren Faktoren mitbestimmt:

- der Ausführung des Schirmes und seiner Erdverbindung L_1
- der Herausführung des Fusspunktes der Hochspannungswicklung an die Gehäuseerde und
- der Schirmung der herausgeführten Wandlerleitungen.

Bild 2c zeigt das Übertragungsverhalten eines 145 kV Spannungswandlers mit und ohne entsprechende Schirmungsmassnahmen. Ebenso ist wieder der Bereich der charakteristischen GIS-Anlagefrequenzen beim Trennerschalten angegeben. Im Unterschied zum Stromwandler wird beim Spannungswandler die gesamte Dämpfungskurve in dem betrachteten Frequenzbereich zu höheren Dämpfungswerten hin verschoben. Trotz der ausgeprägten Resonanzspitze bei etwa 15 MHz zeigt der Wandler mit der Schirmung eine hervorragende Dämpfung vor Ort. Die höchsten bei $U_n = 110$ kV und kritischen Schaltbedingungen gemessenen Überspannungswerte haben 400 V nicht überschritten. Hingegen wurden bei dem Wandler ohne entsprechende Schirmungsmassnahmen Überspannungswerte bis 4600 V bei genau den selben Bedingungen gemessen. In beiden Fällen war die typische Anregefrequenz der GIS-Anlage etwa 22 MHz.

3. Nachweis der EMV-Konformität

Die Wirksamkeit der angewendeten Dämpfungsmassnahmen sollte auf jeden Fall überprüft werden.

IEC 60694 [1] definiert ein Überspannungslimit für Sekundäranlagen von Hochspannungsschaltanlagen. Die Eingangsklemmen im Vorortsteuerschrank werden als Schnittstelle zwischen der Primär- und Sekundäranlage betrachtet. An dieser Stelle sollen transiente Überspannungen einen maximalen Wert von 1600 V nicht überschreiten. Dies gilt in erster Linie für Wandlersekundärkreise, wo erfahrungsgemäss die höchsten Überspannungen zu erwarten sind. Es wird ebenso empfohlen, die Einhaltung dieses Limitwertes vor Ort bei Trennerschaltungen im Betrieb zu überprüfen.

Solche Vorortmessungen sind aufwendig und erfordern auch eine grössere Anzahl von Schaltaktionen, die im normalen Netzbetrieb oft nur eingeschränkt durchführbar sind. Daher wird zur Zeit im IEC TC38/WG24 eine Alternativmethode diskutiert, die in IEC 60044-1 für Stromwandler [2] und 60044-2 für Spannungswandler [3] einfließen soll. Die vorgeschlagene Methode ist eine

Niederspannungsimpulsmethode und soll als Typprüfung angewendet werden. Details dieser Methode sind in *Tabelle 1* zusammengefasst.

Tabelle 1: Niederspannungsimpulsmethode zum Nachweis der Durchkopplung transienter Überspannungen bei induktiven GIS-Messwandlern gemäss [2] und [3]

- *Impulsform*
 - Stirnzeit 5 - 10 ns
 - Rückenlänge > 100 ns
 - Amplitude nicht definiert
- *Bürde*
 - rein ohmisch (an den Klemmen des Wandlers ohne Kabel) 50 Ohm (z. B. Eingangsimpedanz des Oszilloskops)
- *Bezug auf GIS-Betriebsbedingungen*
 - höchste primärseitig auftretende Überspannungsamplitude (1 p.U. = $U_m \sqrt{2} / \sqrt{3}$) 1.6 p.U.
- *Maximal sekundärseitig zulässige Überspannung (Scheitelwert)* 1600 V

Bild 3 zeigt die Anwendung der Niederspannungsimpulsmethode als Beispiel bei einem 245 kV Stromwandler. Es erweist sich als vorteilhaft, den zeitlichen Verlauf der durchgekoppelten Überspannung durch einen Fast Fourier Transfer (FFT) auch im Frequenzbereich darzustellen (*Bild 3b*). Daraus erkennt man, dass die charakteristische Frequenz des Wandlers bei Anwendung des ns-Impulses etwa 5,6 MHz ist. Zum Vergleich dazu wurde derselbe Wandler auch unter realen Betriebsbedingungen in einer GIS-Versuchsanordnung beim Trennerschalten geprüft (Hochspannungsmethode). Der Sekundärkreis besteht in diesem Fall aus einer Nachbildung eines Vorort-Steuerschrankes, der durch ein 8 m langes Wandlerkabel mit der Anlage verbunden ist. Die sekundärseitige Messstelle befindet sich an den Eingangsklemmen im Steuerschrank, wo auch die Bürden angeschlossen sind. *Bild 4* zeigt die Ergebnisse. Der zeitliche Verlauf der primärseitigen Überspannung (*Bild 4a*) und jener der durchgekoppelten Überspannung (*Bild 4b*) wurde wieder mittels der FFT-Analyse in den Frequenzbereich transformiert. Daraus erkennt man, dass die charakteristische Anlagefrequenz etwa 26 MHz ist. Die bei Anwendung des ns-Impulses auftretende Frequenz von 5,6 MHz tritt anlagenseitig nicht auf. Auch sekundärseitig ist die Hauptfrequenz 26 MHz. Für das Durchkopplungsverhalten des Wandlers im Betrieb sind die Anregefrequenzen durch die GIS-Anlage massgebend. Dies zeigt sich auch deutlich, wenn man die durchgekoppelten Überspannungswerte beider Methoden für $U_m = 245$ kV vergleicht: 487 V bei der Niederspannungsimpulsmethode gegenüber 62 V bei der Hochspannungsmethode. Der zusätzliche kapazitive Belag ist unter Betriebsbedingungen voll wirksam.

Als weiteres Beispiel zeigen die *Bilder 5 und 6* den Vergleich beider Methoden bei einem 72.5 kV Spannungswandler. Auch in diesem Beispiel ist die Hauptanregefrequenz der GIS-Anlage etwa 21.5 MHz. Hingegen sind die ausgeprägten Wandlerfrequenzen der Niederspannungsimpulsmethode etwa bei 13 und 45 MHz, wobei die Frequenz von 45 MHz auch bei den primärseitigen Anregefrequenzen der GIS erkennbar ist und sekundärseitig etwas stärker hervortritt. Vergleicht man wieder die durchgekoppelten Überspannungswerte beider Methoden, erhält man eine etwa doppelt so starke Durchkopplung mit der Niederspannungsimpulsmethode.

Auf Grund dieser und anderer Ergebnisse lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- Die NS- und HS-Methode liefern annähernd die selben Durchkopplungswerte nur dann wenn die höchste Resonanzspitze der Dämpfungskennlinie des Wandlers bei einer Frequenz auftritt,

die nahe bei der charakteristischen Anlagefrequenz der GIS liegt. Dies ist jedoch bei Stromwandlern mit kapazitivem Dämpfungsbelag nie der Fall. Bei Spannungswandlern trat dies in einigen Fällen auf.

- Die Niederspannungsimpulsmethode ist daher nur bedingt anwendbar.
- Trotzdem liefert die Niederspannungsimpulsmethode dem Schaltanlagenhersteller wichtige Erkenntnisse zur Beurteilung des Übertragungsverhaltens transienter Überspannungen, vorausgesetzt dass neben dem zeitlichen Überspannungsverlaufs auch eine Frequenzanalyse (FFT) zur Verfügung steht.
- Die generelle Verwendung einer 50 Ohm-Bürde für Strom- und Spannungswandler ist vom messtechnischem Standpunkt vorteilhaft, aber entspricht nicht den Bedingungen im Betrieb. Der Einsatz einer ohmschen Bürde, die etwa der Nennbürde entspricht, jedoch nicht grösser als 15 VA sein soll, erscheint realistischer zu sein.

Eine Beurteilung des transienten Verhaltens eines Wandlers könnte nach den folgenden Kriterien erfolgen:

- Amplitudenwert der NS-Methode tiefer als der festgelegte Limitwert, unabhängig von der Durchkopplungsfrequenz: Der Wandler erfüllt die EMV-Forderung in der GIS.
- Amplitudenwert der NS-Methode höher als der festgelegte Limitwert, jedoch mit einer Durchkopplungsfrequenz stark unterschiedlich zur charakteristischen GIS-Anlagefrequenz: Die EMV-Forderung ist durch eine HS-Prüfung bei Trennerschaltungen unter Betriebsbedingungen in einer GIS-Versuchsanordnung im Werk nachzuweisen.
- Amplitudenwert der NS-Methode höher als der festgelegte Limitwert, jedoch mit einer Durchkopplungsfrequenz nahe bei der charakteristischen GIS-Anlagefrequenz: Der Wandler erfüllt nicht die EMV-Forderung! Zusätzliche Dämpfungsmaßnahmen sind erforderlich.

Die Anwendung dieser Kriterien gestattet die zuverlässige Beurteilung des EMV-Verhaltens der Wandler. Auf eine aufwendige EMV-Prüfung vor Ort sollte damit in der Regel verzichtet werden können.

4. Schlussfolgerungen

- Effiziente konstruktive Massnahmen werden heute generell zur Reduktion der Durchkopplung transienter Überspannungen bei GIS-Messwandlern angewendet.
- Ein Nachweis der Wirksamkeit dieser Massnahmen ist zur Sicherstellung der EMV-Konformität erforderlich, wenn elektronische Geräte/Systeme in den Sekundärkreisen der Wandler eingesetzt werden.
- Die von IEC TC38/WG24 vorgeschlagene und zur Zeit in Vernehmlassung befindliche Niederspannungsimpulsmethode ist für GIS-Messwandler nur bedingt aussagekräftig: Die vom Prüfimpuls im Wandler angeregte Durchkopplungsfrequenz ist in vielen Fällen unterschiedlich im Vergleich zu den charakteristischen Anregefrequenzen der GIS.
- Eine zusätzliche FFT-Analyse des zeitlichen Verlaufs der durchgekoppelten Überspannung wird zur besseren Beurteilung des Frequenzverhaltens eines Wandlers empfohlen.
- In bestimmten Fällen erscheint die Durchführung einer zusätzlichen Hochspannungsprüfung zum korrekten Nachweis der EMV-Konformität als erforderlich.
- Bei Berücksichtigung der gegebenen Empfehlungen kann in der Regel auf eine aufwendige Vorort-Prüfung verzichtet werden.

5. Literatur

- [1] IEC Publication 60694: "Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards", Second edition, May 1996
- [2] IEC TC38/WG24 (Secr.) 99/20: "Amendment No.5 to IEC 60044-1, CURRENT TRANSFORMERS - Measurement of transmitted overvoltages"
- [3] IEC TC38/WG24 (Secr.) 99/24: "Amendment No.4 to IEC 60044-2, VOLTAGE TRANSFORMERS - Measurement of transmitted overvoltages"

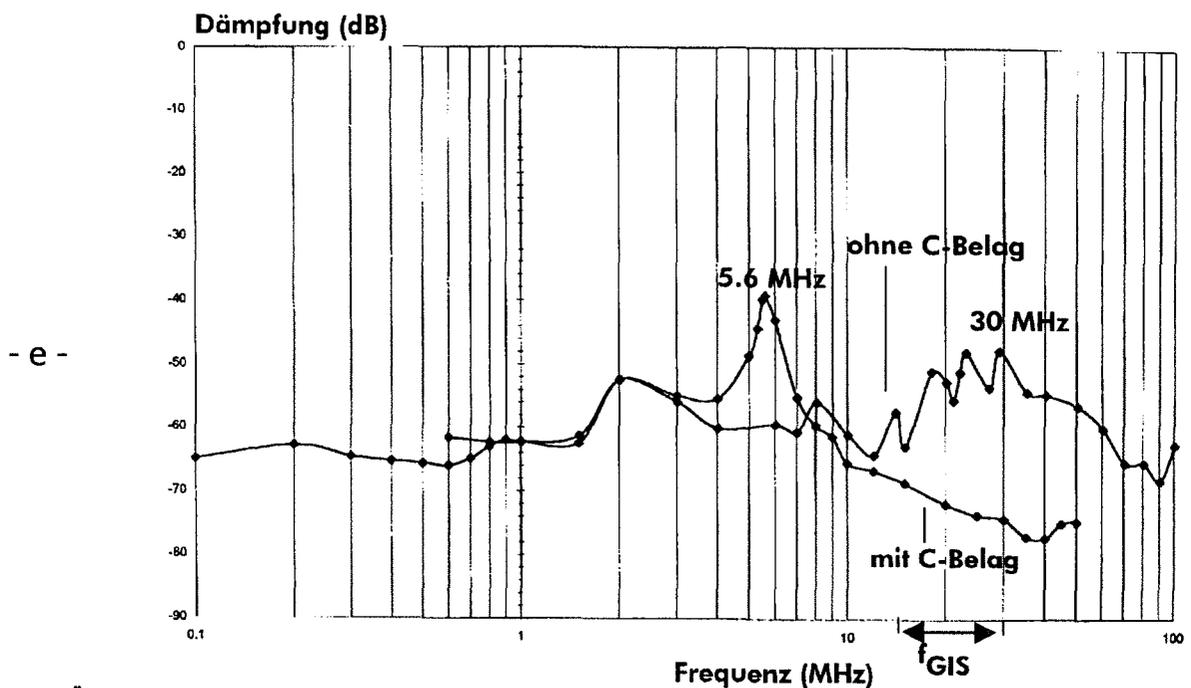
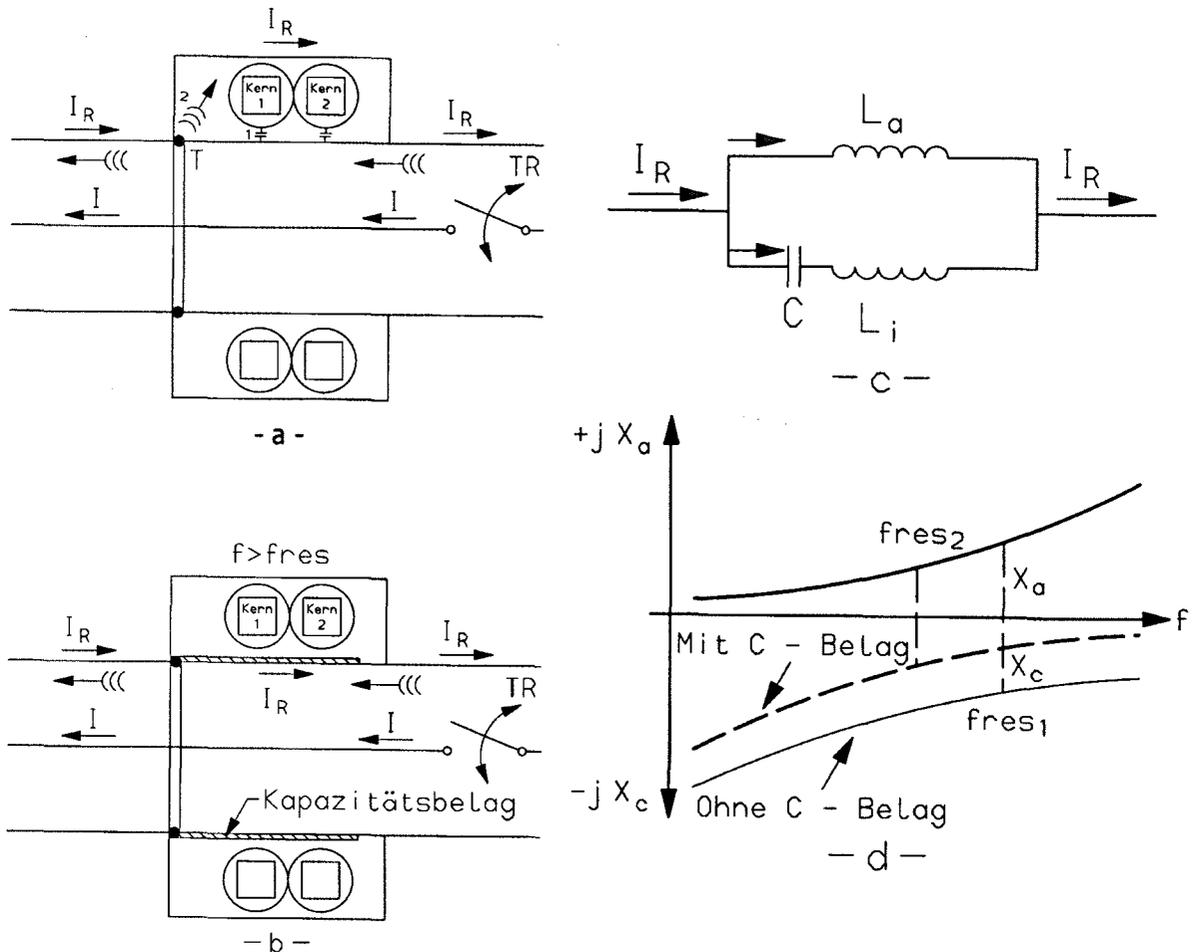


Bild 1 Übertragung der hochspannungsseitig auftretenden transienten Überspannungen auf die Sekundärseite eines induktiven GIS-Stromwandlers.

- a - prinzipieller Aufbau ohne EMV-Massnahmen
- b - prinzipieller Aufbau mit EMV-Massnahmen (Kapazitätsbelag)
- c - Ersatzschaltbild des Wandlerfensters für den Rückstrom I_R
- d - prinzipielles Frequenzverhalten
- e - Durchkopplung mit und ohne EMV-Massnahmen

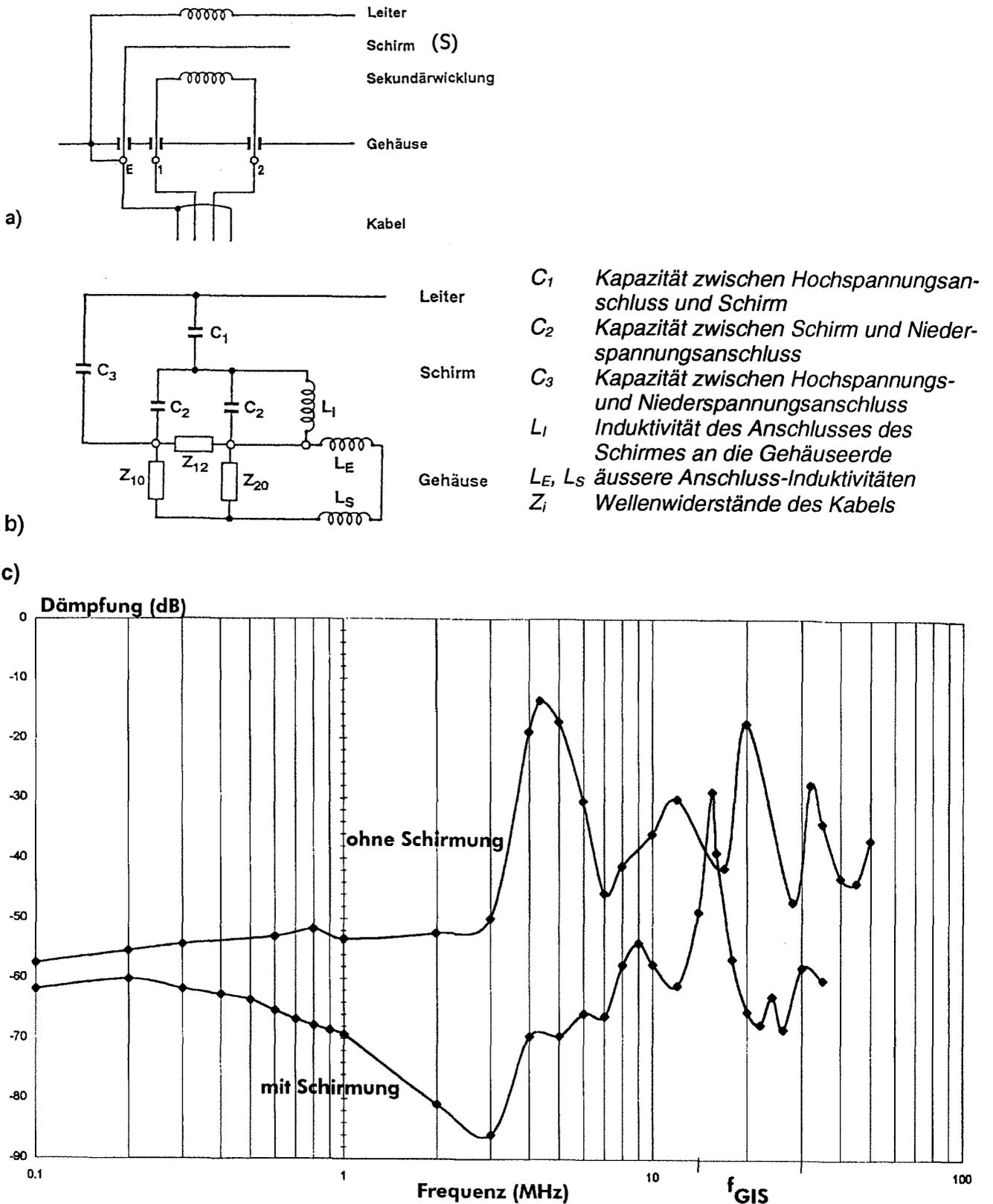
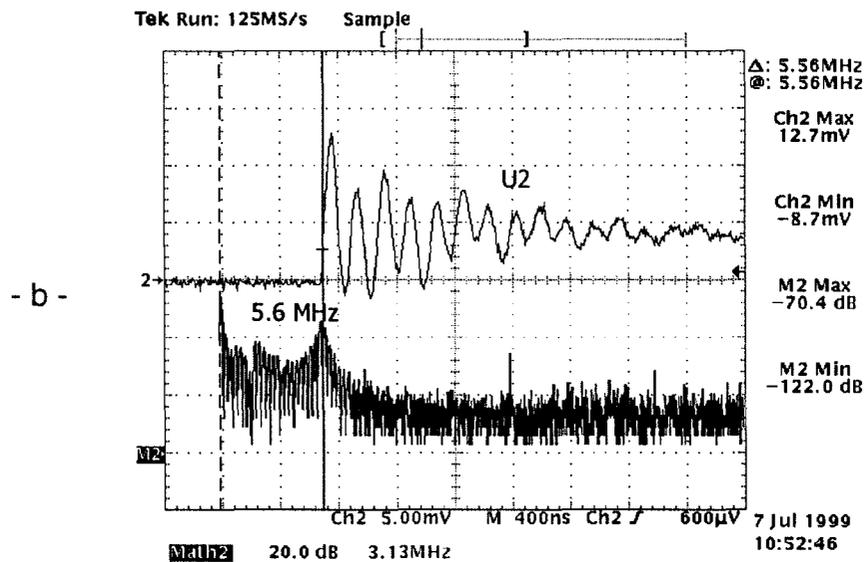
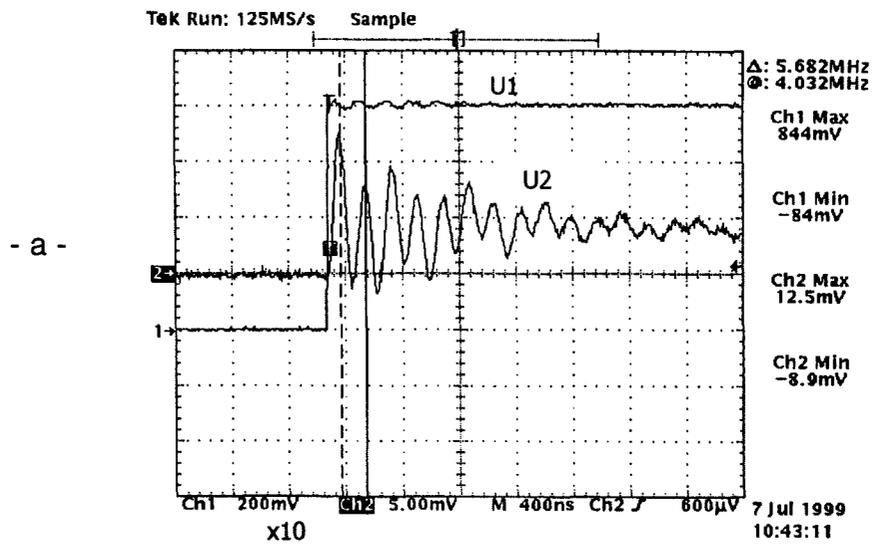
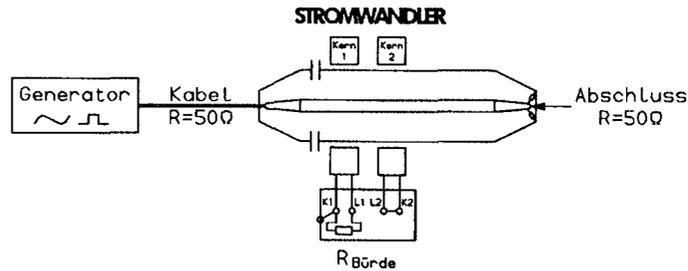


Bild 2 Übertragung der hochspannungsseitig auftretenden transienten Überspannungen auf die Sekundärseite eines induktiven GIS-Spannungswandlers.

- a) Prinzipschaltbild
- b) Ersatzschaltbild
- c) Durchkopplung mit und ohne EMV-Massnahmen

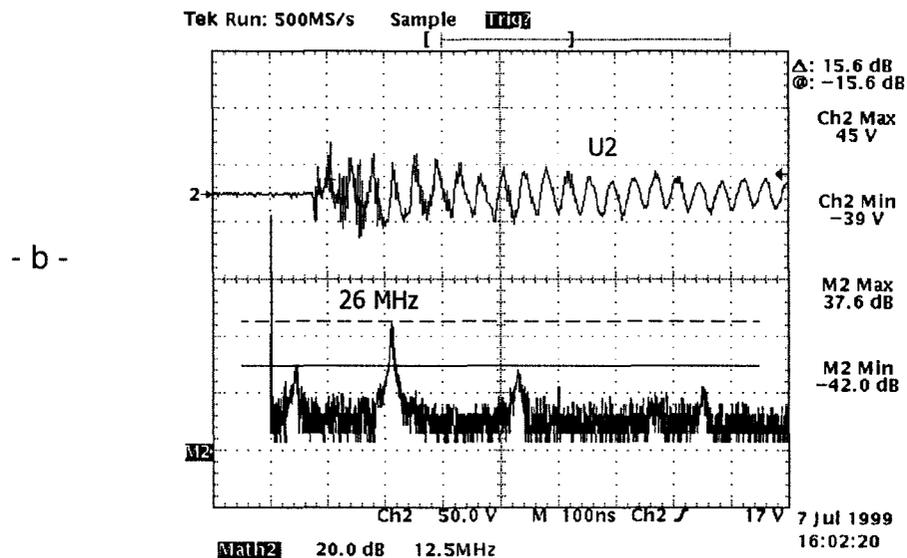
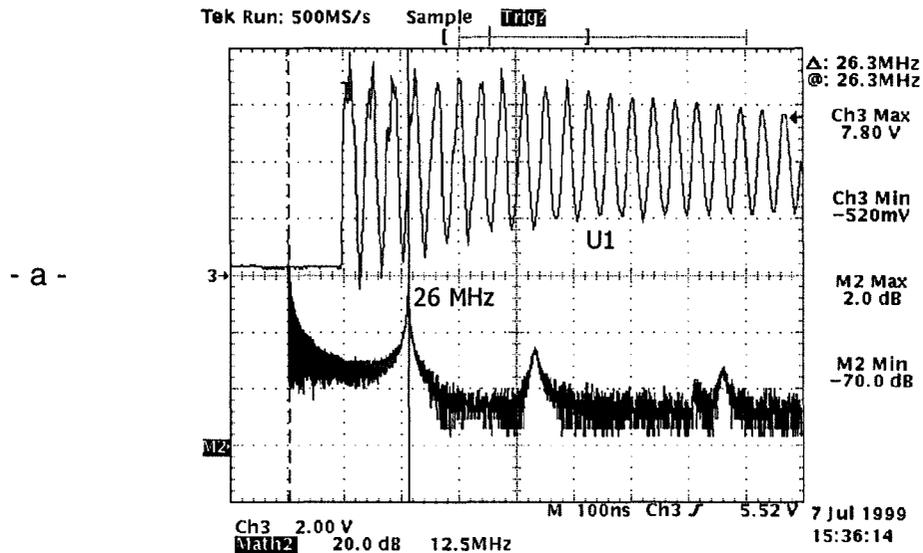
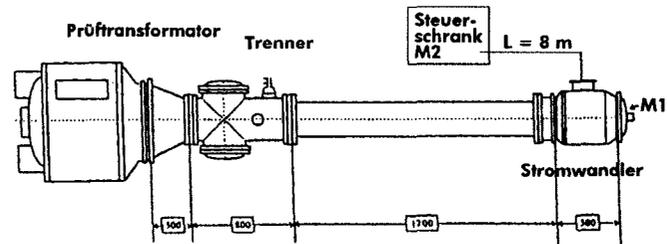
Niederspannungsimpulsmethode



$$\begin{aligned}
 U_1 &= 8 \text{ V}; \hat{U}_2 = 12.5 \text{ mV} \\
 K_{\hat{u}} &= 0.156 \% \\
 \hat{U}_2 &= 1.6 \text{ p.U.} \times K_{\hat{u}} = 487 \text{ V (bei } U_m = 245 \text{ kV)} \\
 f_{\text{typ}} &= 5.6 \text{ MHz} \\
 R_{\text{Bürde}} &= 10 \text{ Ohm}
 \end{aligned}$$

Bild 3 Überprüfung des Durchkopplungsverhaltens eines 245 kV Stromwandlers (Kern 2) mit der Niederspannungsimpulsmethode. (Erklärungen siehe Text)

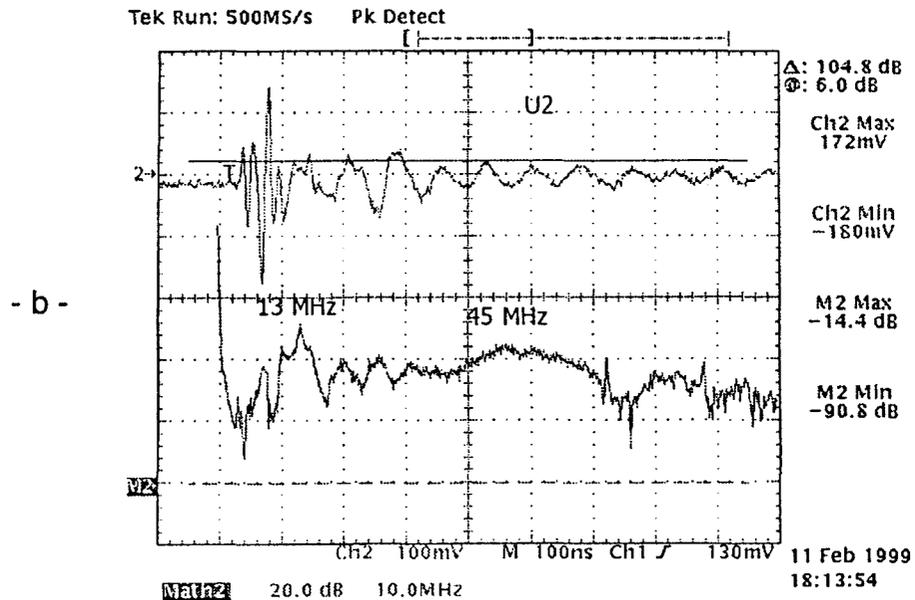
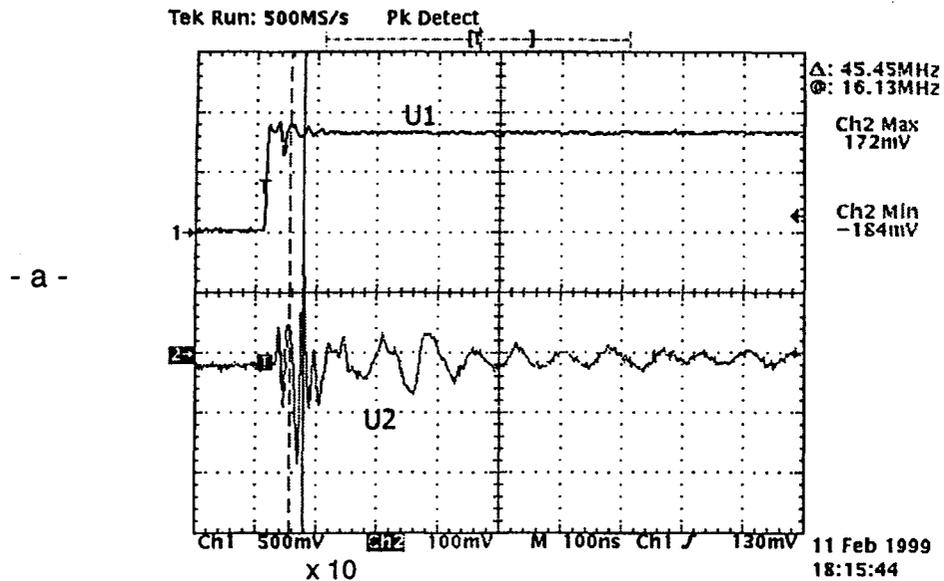
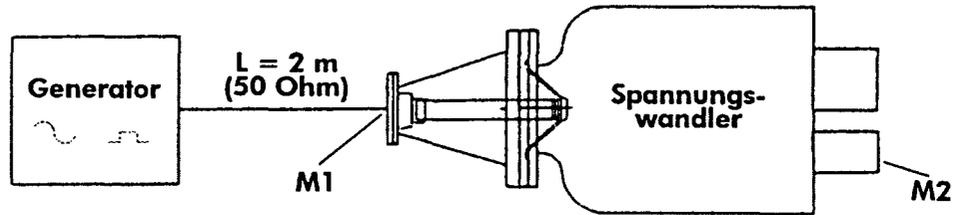
Hochspannungsmethode



$$\begin{aligned}
 U_{1\max} &= 1.61 \text{ p.U.} = 322 \text{ kV} \\
 \dot{U}_2 &= 62 \text{ V (Trenner öffnen)} \\
 f_{\text{typ}} &= 26 \text{ MHz} \\
 R_{\text{Bürde}} &= 10 \text{ Ohm}
 \end{aligned}$$

Bild 4 Überprüfung des Durchkopplungsverhaltens eines 245 kV Stromwandlers (Kern 2) mit der Hochspannungsmethode. (Erklärungen siehe Text)

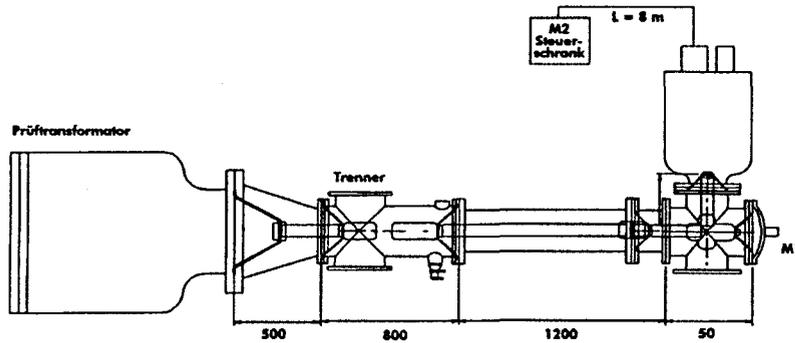
Niederspannungsimpulsmethode



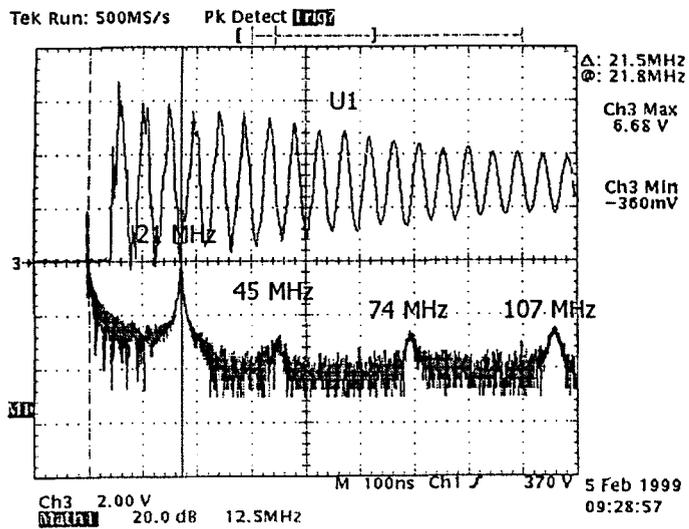
$$\begin{aligned}
 U_1 &= 8.2 \text{ V}; \hat{U}_2 = 184 \text{ mV} \\
 k_{\hat{U}} &= 2.24 \% \\
 \hat{U}_2 &= 1.6 \text{ p.U.} \times k_{\hat{U}} = 1466 \text{ V (bei } U_N = 50 \text{ kV)} \\
 f_{\text{typ}} &= 13 \text{ und } 45 \text{ MHz} \\
 R_{\text{Bürde}} &= 330 \text{ Ohm}
 \end{aligned}$$

Bild 5 Überprüfung des Durchkopplungsverhaltens eines 72.5 kV induktiven Spannungswandlers (Wicklung 1) mit der Niederspannungsimpulsmethode. (Erklärungen siehe Text)

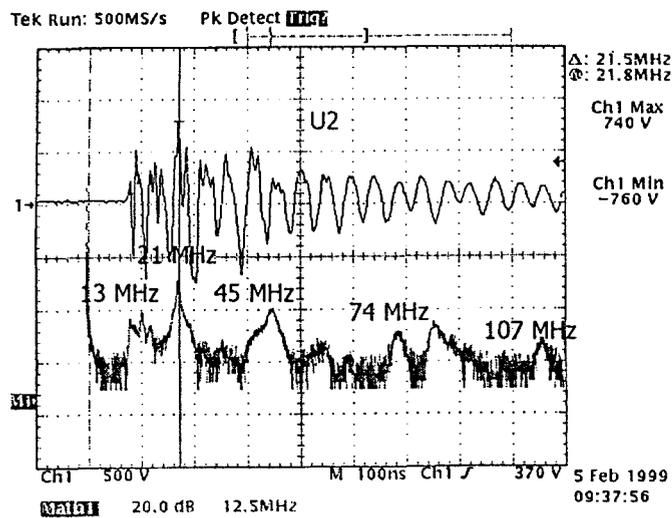
Hochspannungsmethode



- a -



- b -



$$\begin{aligned} \hat{U}_{1\max} &= 1.51 \text{ p. U.} = 62 \text{ kV} \\ \hat{U}_2 &= 745 \text{ V (nur Trenner öffnen)} \\ f_{\text{typ}} &= 21.5 \text{ MHz} \\ R_{\text{Bürde}} &= 300 \text{ Ohm} \end{aligned}$$

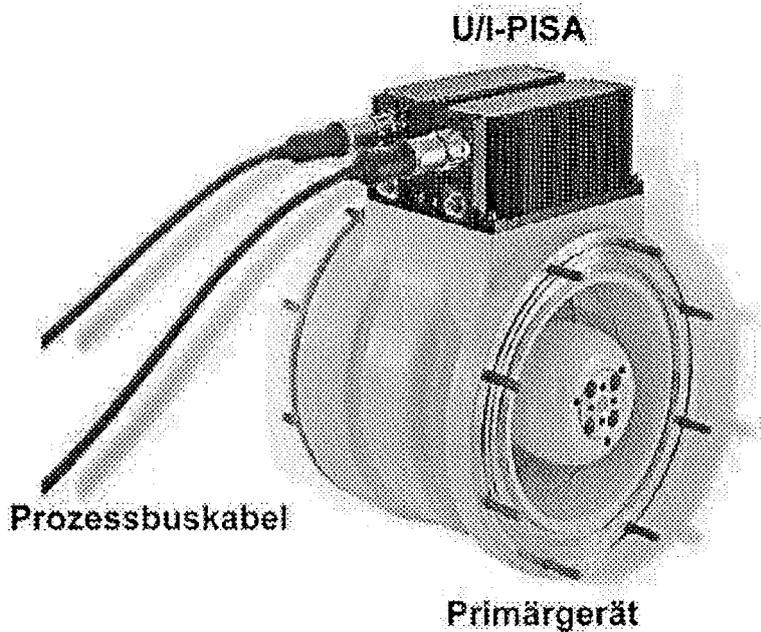
Bild 6 Überprüfung des Durchkopplungsverhaltens eines 72.5 kV induktiven Spannungswandlers (Wicklung 1) mit der Hochspannungsmethode. (Erklärungen siehe Text)

EMV Aspekte beim Einsatz der Mikroelektronik in unmittelbarer Nähe von Hochspannung am Beispiel des U/I-Kombisensors CP14

Urs Wirth

ABB Hochspannungstechnik AG, Zürich

Bei der ABB Hochspannungstechnik AG ist ein neuer Kombisensor zur Messung von Spannung und Strom in einer gasisolierten Schaltanlage (GIS) entwickelt worden. In diesem Sensor wird die Spannungsmessung mit einem kapazitiven Spannungsteiler realisiert, während für die Strommessung eine Rogowskispule zum Einsatz kommt. Um eine zuverlässige und genaue Messung der beiden Größen Spannung und Strom zu garantieren, muss die Auswerteelektronik (U/I-PISA) möglichst nahe beim Sensor platziert werden. Diese Forderung führt dazu, dass die Elektronik in der Lage sein muss, Signale im Mikrovoltbereich in unmittelbarer Nähe von mehreren 100 Kilovolt zu messen. Damit diese Elektronik störungsfrei in dieser schwierigen EMV-Umgebung arbeiten kann, mussten beim Design des U/I-PISA's die vielfältigsten Aspekte der EMV berücksichtigt werden.



Figur 1 U/I-Kombisensor CP14

Berücksichtigte Aspekte der EMV:

Damit das Gesamtsystem störungsfrei und zuverlässig funktioniert sind bei der Entwicklung des Kombisensors folgende Aspekte beachtet worden:

- Die Kommunikation zwischen Kombisensor und Feldrechner ist mit einem Lichtwellenleiterpaar realisiert. Durch diese Massnahme ist die Datenübertragung immun gegenüber EMV-Störungen.
- Die Speisung und die Lichtwellenleiter sind in einem Hybridkabel (Prozessbuskabel) zusammengefasst, welches über einen massiven Schirm verfügt. Diese massive Schirmung reduziert die Einkopplung von Störung auf die Versorgungsspannung der Elektronik auf ein Minimum.
- Die Verbindung zwischen Prozessbuskabel und U/I-PISA ist mit einem massiven Metallstecker realisiert. Dadurch ist der Schirm des Prozessbuskabels elektrisch sehr gut mit dem U/I-PISA Gehäuse verbunden.
- Die Führung des Prozessbuskabels ist so ausgelegt, dass das Kabel eng an der Kontur der GIS anliegt. Dies führt dazu, dass eine sehr kleine Fläche aufgespannt wird und somit nur kleine Ströme im Kabel induziert werden.
- Das Gehäuse des U/I-PISA's besteht aus Aluminiumdruckguss und ist, dank einer speziellen Oberflächenbehandlung, elektrisch leitend. Dadurch wird eine optimal elektrische Kontaktierung mit dem Sensorkörper erreicht.
- Durch Schirmelemente wird das Innere des U/I-PISA Gehäuses in Kammern unterteilt. Durch diese Kammerbildung sind die verschiedenen Elektronikteile, Netzteil, digitaler Verarbeiter und analoge Eingangsstufe, gegeneinander abgeschirmt.
- Die elektrischen Verbindungen zwischen Sensor und U/I-PISA-Elektronik sind mittels doppelt geschirmten Koaxialkabeln realisiert. Somit sind die analogen Signale des Sensors optimal gegen Störungen geschützt.

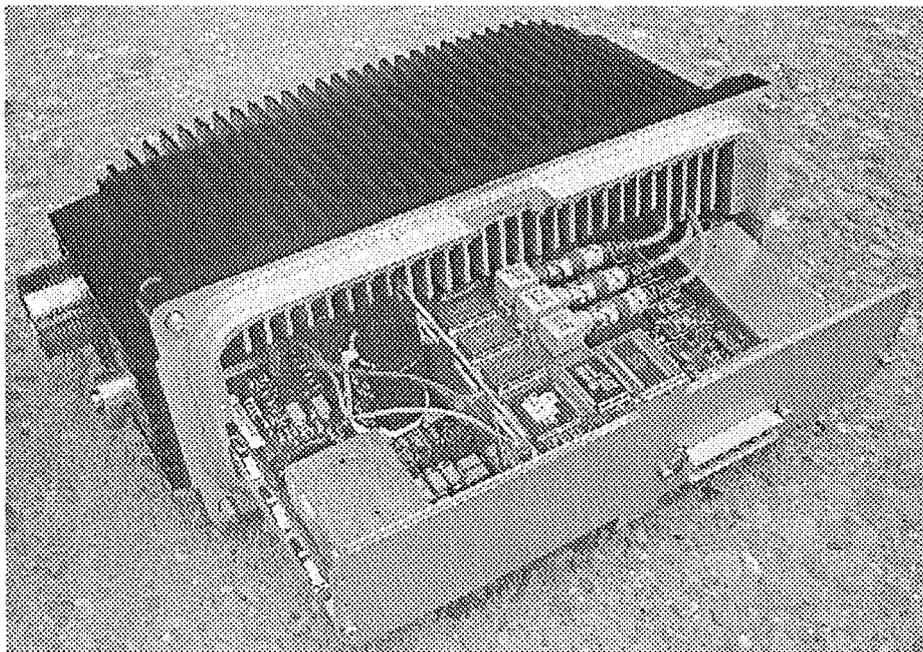


Fig. 2 U/I-PISA geöffnet



Schlussfolgerung:

Durch die oben erwähnten Massnahmen war es möglich ein Elektronikgerät zu entwickeln, welches in der unmittelbaren Umgebung von Hochspannung genau und zuverlässig arbeitet. Zudem ist die Elektronik bei allen Hochspannungstests der Primärgeräte im Einsatz gewesen und es konnten wertvolle Erfahrungen für das Seriengerät gesammelt werden. So kam es dank den verschiedenen Massnahmen nie zu Abstürzen, wenn das Gehäuse sauber geschlossen war. Das zeigte uns, dass alle die getroffenen Massnahmen richtig und zielführend sind.

EMV-Probleme bei der Integration von Kommunikationsanlagen in Energieversorgungsnetze

*Dr. Giorgio Friedrich
diAx AG, Zürich*

1. Zusammenfassung

Aus eigener Kraft im Rahmen der Telecomüberlandwerke hat sich die Elektrizitätswirtschaft im Jahre 95 entschlossen, an der Liberalisierung des Telekommarktes aktiv zu partizipieren und in mehreren Schritten ein Hochleistungsnetz aufzubauen. Dabei drängte sich aus technisch-wirtschaftlichen Gründen eine Kollokation mit der Infrastruktur der EW auf.

Frühzeitig wurden zur Abklärung der Kompatibilität verschiedenste Untersuchungen der möglichen EM- Quelle (Unterwerk) bzw. der Senke (SDH-Geräte) eingeleitet. Hierbei stellten sich systembedingt Unverträglichkeiten der 48V-Speisung heraus, Schirmung der E1-Schnittstellen und die Anbindung an das Bezugspotential der SDH-Einrichtungen müssen hierbei an das Umfeld des Unterwerkes angepasst werden. Jedenfalls hat sich das Erdungssystem der SDH-Anlagen in die Maschenerdung des Unterwerkes einzufügen. Spezielle Beachtungen erfahren auch die Sende- und Umsetzanlagen für das Mobiltelefonnetz auf den Masten.

Die Untersuchungen zeigten einen vermehrten Bedarf an Informationen und die Notwendigkeit einer sorgfältigen Installationsdurchführung. Die bisherigen Vorschriften des EMC-Nachweises folgt den neuen Anforderungen der EW-Wirtschaft nur ungenügend. Eine Verschärfung ist angezeigt. Vorschläge wurden eingebracht und werden erläutert.

2. Grundüberlegung beim Netzentwurf

Das neue Hochleistungsnetz der Elektrizitätswerke – welches von der Betreibergesellschaft diAx – anlässlich der Liberalisierung des Fernmeldewesens seit dem 1.1.98 errichtet wird, stützt sich im wesentlichen auf die folgenden Komponenten ab:

- a) passives LWL-Netz von ca. 2400 km, 5/6 OPGW, 1/6 Skywrap entsprechend ca. 70'000 km Fasern vom Typ A, G.652, mit 25'000 E-2000 Kupplungen; Fasern und Kupplungen von sehr hoher Qualität, Netzauslegung für hohe Bandbreite im 10Gbit/s – Bereich, vorgesehen auch für Wellenlängenmultiplex (WDM).
- b) Netzstruktur in Layer und Ringen, digitaler Signaltransport erfolgt mit Hochleistungslasern mit Reichweiten von typ. 120 km im Format der Synchronen Digitalen Hierarchie (SDH). Knoten weisen CrossConnect und AddDrop-Funktionalitäten auf. Typ. Mainframe Bitraten im Transportnetz sind STM16 2.5Gbit/s und STM 64 10Gbit/s.

Hieraus resultiert eine Bruttoleistung auf dem Erdseil von ca. 0.5 Tbit/s!

Diese Übertragungsinfrastruktur stützt sich im wesentlichen auf Verbindungen und Knoten der Betriebsmittel der Elektrizitätswerke, wobei die Multiplexer in den Unterwerken zu stehen kommen. Mit Absicht wird die Synergie der Energieübertragungsnetze und der Datennetze genutzt, dies gilt für die physische Struktur der Netztopologie und damit auch für die grundlegende n-1 Sicherheit bzw. für die Netzzuverlässigkeit.

Bei einer Kollokation müssen somit die folgenden technisch-physikalischen Grössen verträglich gemacht werden (vgl. hierzu Tabelle I).

| EW-Bereich: | Telecom-Bereich: |
|---------------------------------------|---|
| Erzeugung, Transformator, Switchgear | SDH-Transmission, Switch, LWL, GSM-Antennen |
| kA, MV, MW, Tonnen und Meter | N, μm , 100ps, |
| Transienten im μs -Bereich | mW, Gbit/s, Tbit/s |
| E-Felder im kV/cm-Bereich | GHz, MHz, |
| B-Felder im Tesla Bereich | delays im 6ps-Bereich |

Tabelle 1 Gegenüberstellung der Begriffe und Grössenordnungen im EW- und Telecom-Bereich.

Masten, Erdseile und Unterwerke sind die primären potentiellen Konfliktbereiche, die oft interdisziplinär anzugehen sind und beidseitig ein vertieftes Verständnis erfordern. Dies gilt für mechanische, konstruktive Belange als auch verschärft für elektrische Verträglichkeitsabklärungen.

Aufgrund dieser Ausgangslage wurden frühzeitig die verschiedensten Konfliktbereiche eingekreist und einer vertieften Bearbeitung unterzogen. Als erste Anhaltspunkte sind die folgenden Grössen in Erfahrung zu bringen:

- a) Die Störfestigkeit, welche die SDH- (Telecom)-Elektronik aufzuweisen hat.
- b) Die Grenzwerte, welche die Hochspannungsanlagen als störungserzeugendes System für industrielle Anlagen nicht überschreiten sollen.
- c) Mögliche Massnahmen zur Erhöhung der Immunität des in jeder Hinsicht hybriden Systems "Telecom und Elektrizitätswerke".

3. Eingeleitete Untersuchungen

Zur Klärung der Verträglichkeit wurden im Jahre 1997/1998 von der FKH vorgängig umfangreiche elektrische Messungen zur Charakterisierung des EM-Umfeldes in den folgenden Unterwerken durchgeführt:

- a) UW-Altstetten (EWZ), SDH und Switchstandort inkl. GSM
- b) UW-Engehalde (EWB), Freiluftanlage, SDH-Standort
- c) UW-Littau (SF6-Anlage), SDH-Standort
- d) UW-Chippis, (Forces Motrice de la Gougtra SA), SF6-Anlage, SDH-Standort

Es wurden typische Schalthandlungen bezüglich Trafo, Abgangsleitungen und Sammelschienen durchgeführt und dabei die resultierenden EM-Felder (Quasistationäre Felder), Erdpotentialschwankungen bzw. Ausgleichsströme festgehalten und Amplituden und Anstiegsgeschwindigkeiten/Frequenzen (transiente magnetische Felder) mit den Normwerten bzw. EMC-Versuchen verglichen. (Für entsprechende Versuchsanordnungen und Einzelheiten sei auf den letzten Vortrag von Dr. R. Bräunlich, FKH verwiesen).

Zur Charakterisierung des EM-Umfeldes der Telecomanlagen wurden systematisch die folgenden Grössen aufgenommen (Bsp. Chippis):

- 1) **Stationäre EM-Felder** am Standort der Übermittlungsanlagen

- 2) **Transiente Felder** hervorgerufen durch Schalthandlungen an Hochspannungsleitungen:
 - Ausschaltung unter Last
 - Schalten von Transformatoren (oder Kabeln)
 - Aufschalten von potentialfreier Sammelschiene (SF6)
 - Auf/Abschalten der leerlaufenden Leitung nach Laufenburg
- 3) **Leitungsgebundene Grössen** in transienter Phase; Beobachtung des zeitlichen Verlaufs des Referenzpotentials und der Ausgleichsströme bzw. der Spannungsdifferenzen, zwischen Erdleiter und Neutralleiter

4. Ergebnisse der Feldmessungen

Nachstehend werden einige exemplarische Messresultaten aus den Untersuchungen wiedergegeben. Im Falle der im folgenden genannten Unterwerke wird die Störgrösse, dort wo es technisch sinnvoll ist, auf die Nennlast hochgerechnet. Stark zusammengefasst ergibt sich folgendes Bild:

- a) UW-Altstetten: Das Einschalten eines Kabels ergab einen Peakwert von ca. $2 \mu\text{T}$ bei etwa 20 MHz. Die maximale Steilheit beträgt 126 T/s, bzw. es werden 126 V/m^2 induziert.
- b) Das UW-Engelhalde gilt als Beispiel einer gutmütigen EM-Feldumgebung; die gemessenen Werte liegen alle innerhalb der Belastungsgrenzwerte gem. EN 61000, als Teil der EN 50082-2. Das stationäre Feld bei Vollast dürfte kleiner als $1 \mu\text{T}$ sein. Die leitungsgebundene Störspannung auf der Stromversorgung ist kleiner als 200V. Transiente magnetische Störfeldstärken sind kleiner als 1 A/m bei ca. 20 MHz.
- c) Das UW-Littau zeigt im Vollastfall stationäre Felder von bis zu $200 \mu\text{T}$. Die Störspannung Nullleiter-Erde auf Vollast hochgerechnet ergab 1.2kV bei Zuschaltung des Trafos 21. Das transiente Magnetfeld beträgt 4 A/m bei ca. 1 MHz bei noch hohen Frequenzanteilen.
- d) Beim UW-Chippis befindet sich der SDH-Raum in der Nähe der SF₆-gekapselten Schaltanlage. Das stationäre Magnetfeld rührt von einem 220-kV-Feeder-Kabel (Chamoson, 1000 A) her, und erreicht $70 \mu\text{T}$ bei 1000 A. Aufgrund der Trennerschaltungen von einer SF₆-Sammelschiene konnten magnetische Transienten von bis zu $800 \mu\text{T}/\mu\text{sec}$ detektiert werden.

Aufgrund der uns vorliegenden Resultate und der nur selektiven Zertifizierung seitens des Herstellers der Telecomkomponenten wurde ein systematischer EMC-Test beim Hersteller eines SDH-Knotens von 620Mbit/s angeordnet. Um die gemessenen Störgrössen abdecken zu können, wurde entgegen den üblichen Gepflogenheiten nicht nach dem EN-Standard 50082-1 sondern nach der Norm EN50082-2 geprüft, wobei zusätzlich auch die verschärften Klassen zur Anwendung kamen. Damit konnte besser dem harten Industrieumfeld Rechnung getragen werden. Genauere Einzelheiten sind in der Norm EN 61000 zu finden, sie bilden einen integrierenden Bestandteil der Norm EN 50082-2.

Wie die Versuche aufzeigten, sind hauptsächlich zwei verschiedene Einwirkungspfade denkbar, die zur Beeinträchtigung, Funktionsstörung bzw. zu einem temporären oder definitiven Ausfall eines SDH-Knotens führen können:

- a) modulierte oder nicht modulierte quasistationäre B- und E-Felder
- b) abgestrahlte und/oder galvanisch eingekoppelte transiente B- und E-Felder
- c) Kombination beider Fälle als schlimmster Fall.

Es hat sich gezeigt, dass der Fall a) ohne grössere Schwierigkeiten im Labor standardmässig durchgeführt werden kann. Der Fall b) ist bereits schwieriger, da eine saubere Versuchsanordnung und entsprechende Auskoppelglieder notwendig sind, um die hohen

Anstiegsgeschwindigkeiten von Strömen und Spannungen noch korrekt einer aussagekräftigen Messung zuführen zu können. Hier zeigte sich auch deutlich die Anforderung der Versuchsnachbildung, sind doch in Chippis Transienten von bis zu 600 bis 800 $\mu\text{T}/\mu\text{s}$ nachgewiesen worden. Im EMC -Versuch konnte diese Störgrösse nur knapp mit einer Stromquelle von ca. 700 $\text{A}/\mu\text{s}$ und einer speziellen Antennenanordnung bei zugehörigem Antennenfaktor nachgebildet werden.

5. Befund der EMC-Versuche im Herstellerlabor

Die durchgeführten Versuche zeigten deutlich, dass die Telekomausrüstung sehr empfindlich auf die Anhebung des Bezugspotentials reagiert; d.h. dort, wo mit grossen eingepprägten Strömen in das Erdungssystem zu Rechnen ist, modelliert durch den Surge - Test gemäss EN61000-4-5, Figur 13 und die Ladespannung grösser als 4 kV ist, können ernsthafte Fehler auf den E1 - Signalleitungen induziert werden, wobei sich das Gerät selber elektrisch reseten muss (self recovery) und dabei ein Signalunterbruch für einige Sekunden auftritt.

Abgestrahlte EM-Felder im 900 MHz - Bereich, um die Empfindlichkeit auf GSM-Felder zu testen (siehe hierfür auch EN 61000-4-3), führten zu mehrfachen Fehlern des Gerätes bei geöffneter Abdeckung, besonders wenn mit einem Rechtecksignal moduliert wird. Dieser Versuch wurde mit Absicht leicht oberhalb des vorgeschriebenen Standards durchgeführt. Mit geschlossener Abdeckung konnte keine Fehlfunktion des Gerätes herbeigeführt werden.

6. Schlussfolgerungen bei der Installation von SDH- Knoten (Telecommgeräten) in Unterwerken

Zur Vermeidung von Fehlfunktionen von Übertragungsgeräten sehr hoher Bitraten, die in Anlagen der elektrischen Energieversorgung (Hochspannungsanlagen) eingebaut werden (Kollokation), sind die folgenden Grundsätze einzuhalten:

- 1) Die Erdung der Geräte hat zum nächstliegenden Erdungspunkt (Maschenerdung) mit kleiner Induktivität zu erfolgen, d.h. also mit Rechteckquerschnitten Cu-Bänder oder Cu-Litzen. Die Erdung muss sich in die Maschenerdung des UW einbetten.
- 2) Energieversorgungskabel AC/DC sind so kurz wie möglich zu gestalten, um Maschen so gering wie möglich zu halten, so dass bei transienten EM-Feldern die induzierten Spannungen/Ströme gering gehalten werden können.
- 3) Die Geräte dürfen keinen hohen 50-Hz-Feldern von Kabeln und Sammelschienen ausgesetzt werden (Chippis, Littau). Felddurchdringungen von einigen 100 μT sind zu vermeiden; dies gilt auch für optische und elektrische Testeinrichtungen!
- 4) Besondere Vorsicht ist dort geboten, wo verschiedene SDH/PDH-Multiplexer oder Switches in einem UW mit hartem EM-Umfeld mit Koax-Leitungen verbunden werden (G.703 interfaces, E1-lines, Synchronisation line): die Masche/Fläche zwischen Signalleitungen und Bezugspotential muss so klein wie möglich gewählt werden. Symmetrische Eingänge, wenn möglich verwenden und/oder mit doppelter Abschirmung arbeiten. Man merke insbesondere:
 - Signalleitungen nicht parallel zu Hochspannungs-/Energiekabeln verlegen.
 - Erdverbindungen zwischen Racks müssen geringste Impedanzen aufweisen, für DC und hohe Frequenzen!
 - Maschenerdung verwenden bzw. die Telecomsysteme sind hier einzubetten.
 - Loop-Flächen zwischen Signalleitungen und Erdungssysteme vermeiden bzw. minimieren.
 - Doppelte Abschirmung oder symmetrische Kabel ($Z_w = 120 \Omega$) verwenden.

- 5) Nie die SDH-Knoten mit offener Abdeckung in Gegenwart von GSM-Handies betreiben oder nie GSM-Handies bei offenen SDH-Geräten benutzen!

Punkt 4 ist besonders dort wichtig, wo verschiedene SDH-Systeme elektrisch miteinander verbunden werden (Clocksignal transfer, E1-Verbindungen bei PDH-SDH-Systemen), wo nicht unmittelbar eine Kollokation möglich ist.

In diesem Zusammenhang möchte ich besonders darauf hinweisen, dass für die Erdungsvorschriften von Telecomanlagen die Norm ETS 300 253 "Earthing and bonding of telecommunication equipment in telecommunication centres" nicht in allen Belangen den Anforderungen von Hochspannungsanlagen Rechnung getragen wird, sind doch höhere Amplitudenwerte u./o. andere Zeitverläufe zu respektieren. Hierzu verweise ich besonders auf den Anhang A der ETS 300 253.

Die hohen Transienten in energietechnischen Anlagen (Unterwerken) und das damit allgemein harte EM-Umfeld solcher Anlagen macht es notwendig, dass die neu genutzten Synergien von Hochleistungsdatenübertragungen in diesen Anlagen nur zum Erfolg führen kann, im Sinne einer hohen Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit, wenn die geforderten EMV-Tests gemäss der EN 50082-2 diesen harten industriellen Umgebung auch voll Rechnung trägt. Dies bedeutet insbesondere, dass einige Tests, wie in EN 61000-4-x beschrieben, für die Klasse 3 und 4 (also bei höheren Grenzwerten) durchzuführen sind.

7. Weiterführende Literaturhinweise:

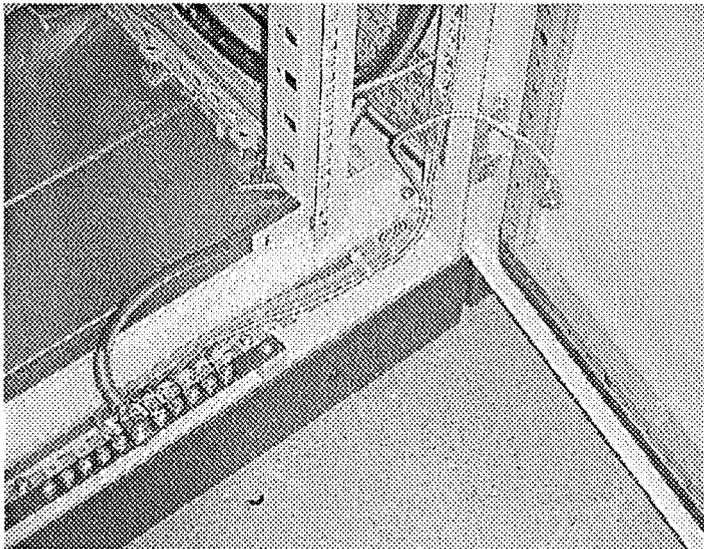
Don Russel, B., M. Harvey, Stig L. Nilsson: Substation electromagnetic interference Part 1: Characterization and description of transient EMI problem. IEEE 1984, 84 WM 148-3.

Sauvain, H., influences électromagnétiques: protection des équipements sensibles dans les postes HT. La Revue Polytechnique No. 1526, 8/90, 851.

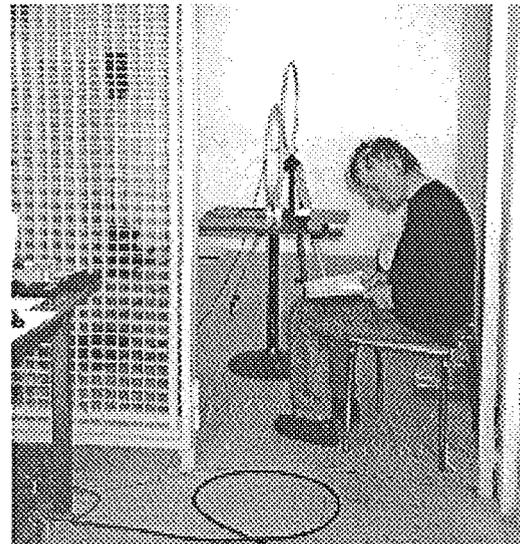
Rudolph, T., R. Speh: EMV-Massnahmen in der Schaltanlagenleittechnik. Elektrie Berlin 46, (1992) 6.

Klaus G. Dr., AWK, diAx - interner Rapport: EMC-environment for Transmission Nodes and EMC requirements for the Transmission Equipment, 1998.

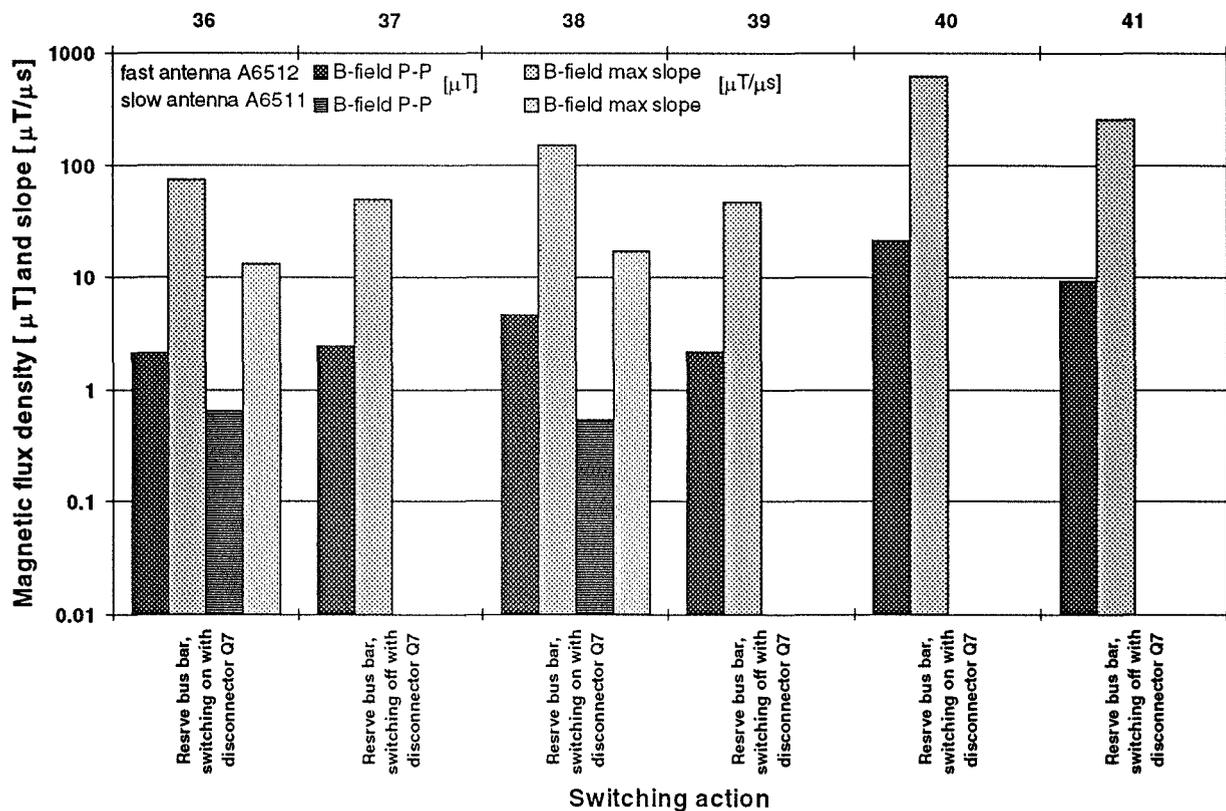
ETG-Fachbericht 61: Stand und Trends in der Freileitungstechnik, Vorträge der ETG-Fachtagung am 11./12.Juni 1996, Berlin.



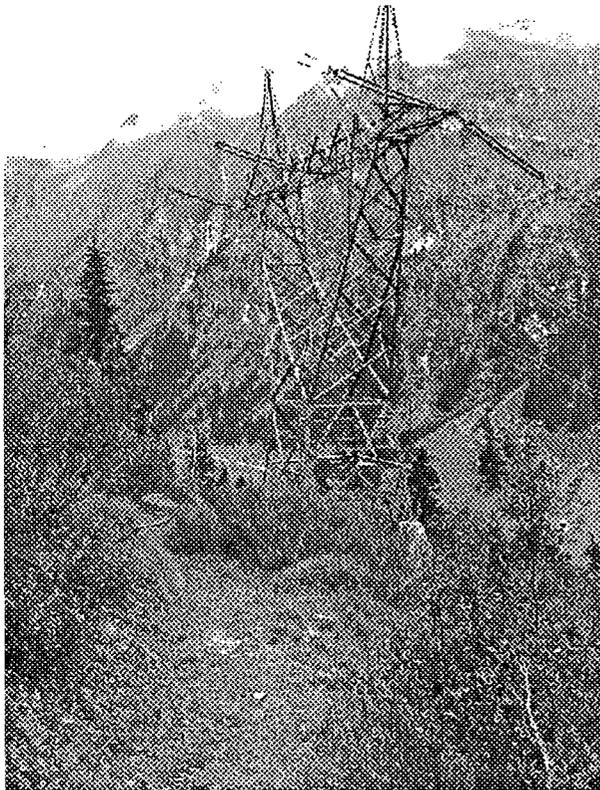
Figur 1 Erdung eines Elektronikschrankes an einem SDH-Knoten.



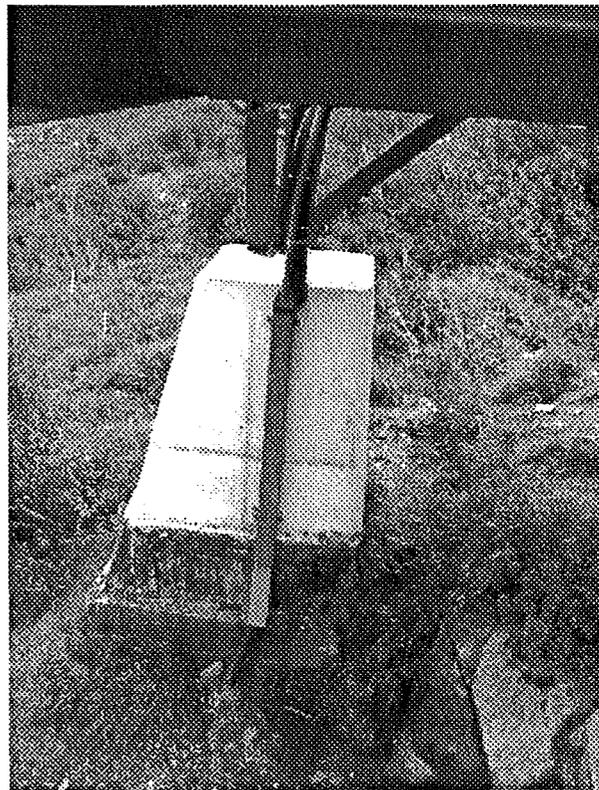
Figur 2 B-Feld-Messung mit Loop-Antenne (Bild: FKH)



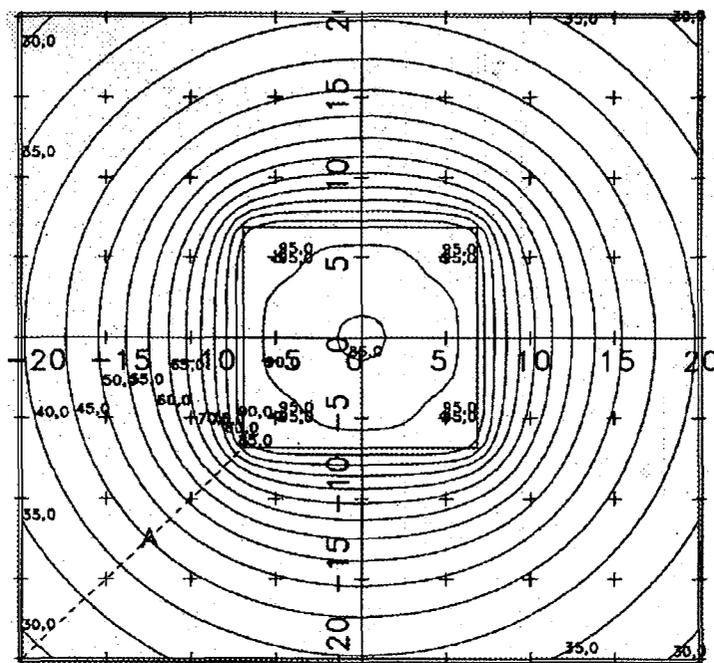
Figur 3 Resultateausschnitt der Messungen transienter Magnetfelder durch Schalthandlungen im UW Chippis, Darstellung der maximalen Spitze-Spitze-Werte der magnetischen Flussdicht B und Maximalwerte der Flussdichteänderungen. Die Grafik zeigt, dass bei gewissen Schalthandlungen im Bereich der untersuchten Elektronikschränke Änderungsraten von über $100 \mu\text{T}/\mu\text{s}$ erreicht werden können.



Figur 4 Mast einer Höchstspannungsfreileitung mit einer Mobiltelefonantennenanlage.



Figur 5 Mastterdung und Führung der Antennenstromversorgung.



Figur 6 Berechneter Spannungstrichter um einen Hochspannungsfreileitungsmast auf gebirgigem Untergrund mit Zusatzerdband bei einem Erdschluss (Ausschnitt 20 m x 20 m). Darstellung der Äquipotentiallinien bei einem Fehlerstrom durch das Mastfundament von 15 kA. Die Bodenleitfähigkeit beträgt bis zu einem Meter Tiefe 100 Ω m, darunter 450 Ω m. (Beschriftung der Äquipotentiallinien in [kV], Berechnung: FKH, 1995).

Sekundärtechnik: EMV-Richtlinien und -Normen

*Venkat Narayan
Netzconsult Ing, Spreitenbach*

Einleitung

Die Anforderungen bezüglich Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit an die elektrische Energieversorgung sind sehr anspruchsvoll. Um diesen zu genügen werden in der Sekundärtechnik vermehrt Geräte und Systeme basierend auf moderner, numerischer Technologie eingesetzt. Die durch diese Systeme zur Verfügung gestellten grossen Rechenleistungen und die nunmehr relativ leicht zugänglichen Informationen ermöglichen eine Optimierung des Betriebes durch Integrieren der verschiedenen Funktionen der Sekundärtechnik, wie Schutz, Steuerung, usw.

Einerseits brauchen die modernen, numerischen Systeme geringere Energiemengen für die Messung, Signalverarbeitung und logischen Entscheide sowie Befehlsausgaben. Andererseits sind die einzelnen Geräte und Systeme gegenüber den auftretenden Störgrössen empfindlicher geworden, da die zur Zerstörung bzw. zum Fehlverhalten der Geräte führenden Energiepegel ebenfalls kleiner geworden sind. Ohne geeignete Gegenmassnahmen bei der Herstellung der Geräte und bei der Auslegung des gesamten Systems erhöhen diese Trends die Wahrscheinlichkeit einer negativen Beeinflussung des optimalen Betriebes durch elektromagnetische Störungen.

Auslegekriterien

Bei der Auslegung ist es nötig, das komplette System der Sekundärtechnik zu optimieren und nicht nur das Verhalten einzelner Komponenten zu überprüfen. Die mögliche, gegenseitige Beeinflussung der miteinander verbundenen Komponenten muss ebenfalls bei der Optimierung des Systems mitberücksichtigt werden.

Im Hinblick auf die riesige Anzahl der möglichen Kombinationen der potentiellen Quellen (Primärgeräte, Kurzschlüsse, Schalthandlungen, Blitz...), Kopplungsmechanismus und Ankoppelwege der Störungen ist es in der Praxis fast unmöglich, bei der Auslegung alle Kombinationen zu überprüfen. Erschwerend wirkt die Tatsache, dass die elektromagnetische Umgebung jeder Anlage, abhängig von der Detailauslegung einmalig sein wird und sich mit der Zeit ändern kann. In anderen Worten können keine Detailannahmen für eine Anlage basierend auf Messungen anderer Anlagen getroffen werden.

Um trotzdem ein für den störungsfreien Betrieb notwendiges, optimales System auszulegen, wird empfohlen:

- die elektromagnetische Umgebung aufgrund der zu erwartenden Störgrössen zu klassifizieren
- Für jede Klasse einen technisch und ökonomisch akzeptablen Grenzwert bei der maximal zu erwartenden Störung festzulegen. In jeder Umgebung der Anlage sollten die Geräte und Systeme gegenüber dieses Pegels unempfindlich sein.

- Sich zu vergewissern, dass dieser Pegel bei allen zu erwartenden Störungen in jeder Umgebung der Anlage nicht überschritten wird.
- Akzeptanzkriterien für jede Funktion der Sekundärtechnik festzulegen.
- Die entsprechenden Geräte, Systeme und Anlagenpraktiken auszuwählen, welche die angeforderte Immunität gegen die festgelegten Störpegel gewährleisten würden.
- Die Prüfungen für den Nachweis der Erfüllung der Anforderungen zu spezifizieren.

Bei der Auslegung des Systems und der Auswahl der Komponenten sollten ebenfalls die Einschränkungen der gängigen Normen bezüglich der von den Geräten selber erzeugten elektromagnetischen Störungen berücksichtigt werden.

Die verschiedenen Massnahmen und Richtlinien (z.B. Erdung, Kabelverlegung, Einsatz eines Ableiters...), welche die elektromagnetische Beeinflussung der Geräte und Systeme der Sekundärtechnik minimieren bzw. innerhalb bestimmter Grenzen halten würden, sowie die allgemeinen Praktiken sind von der CIGRE WG 36.04 zusammengestellt und veröffentlicht [1].

Elektromagnetische Störungen

Die elektromagnetischen Störungen werden entweder als leitergebundene oder angekoppelte (induktiv und/oder kapazitiv) Störung an das Gerät geleitet. Zusätzlich sind die durch statische Entladungen (z.B. verursacht durch Personen beim Bedienen), während des Netzbetriebes möglichen Störungen zu berücksichtigen.

Nachfolgend sind die in einer elektrischen Anlage vorkommenden elektromagnetischen Störungen aufgelistet:

Stationäre Störungen:

- Langsame Spannungsschwankungen in der WS- / GS-Versorgung
- Oberwellen
- Welligkeit in der GS-Hilfsversorgung
- Leitergebundene, geleitete Störungen im Bereich DC – 150kHz
- Leitergebundene, geleitete, von RF-Feldern induzierte Störungen
- Magnetische und elektrische Felder (Netzfrequenz)
- Gestrahlte RF-elektromagnetische Felder

Transiente Störungen hoher Wahrscheinlichkeit

- Vorübergehende Spannungssenkungen und –unterbrüche in der WS- / GS-Versorgung (Dauer • 20ms)
- Spannungsschwankungen
- Netzfrequente Überspannungen
- Schnelle Transiente

Gedämpfte Spannungsschwingungen
Gedämpfte Schwingungen der magnetischen Felder
Elektrostatistische Entladungen

Transiente Störungen geringer Wahrscheinlichkeit

Vorübergehende Spannungssenkungen in der WS- und GS-Versorgung mit einer Dauer > 20ms.
Unterbrüche in der Hilfsstromversorgung (WS / GS)
Netzfrequenzänderungen
Spannungsschwingungen (Ringwellen)
Kurzzeitige, netzfrequente, magnetische Felder

Immunität gegen elektromagnetische Störungen

Die Auswirkung der elektromagnetischen Störungen auf das gesamte System der Sekundärtechnik, falls keine geeigneten Gegenmassnahmen getroffen werden, kann von vorübergehenden Funktionsausfällen bis zur Zerstörung einzelner Komponenten des Systems führen. Selbstverständlich wäre es möglich, durch geeignete Auswahl der Komponenten und Auslegung das System gegen elektromagnetische Beeinflussung immun zu gestalten. Einerseits führt eine solche Lösung zu unverhältnismässig hohen Kosten. Andererseits sind nicht alle Funktionen der Sekundärtechnik lebenswichtig für die optimale und störfreie Betriebsführung. Um eine ökonomisch akzeptable Lösung auszuarbeiten, wird empfohlen, das notwendige Niveau der Immunität jeder Funktion aufgrund der Konsequenzen eines eventuellen Ausfalls bzw. einer Beeinträchtigung dieser Funktion zur Betriebsführung und zur Minimierung des Personen- und Materialschadens zu beurteilen und festzulegen.

Nachfolgend wird das erforderliche Immunitätsniveau wichtiger Funktionen der Sekundärtechnik [2] unter Berücksichtigung der elektromagnetischen Phänomene aufgelistet:

| Funktion | Immunitätsanforderung |
|--|--|
| Schutzeinrichtungen (Inkl. Kommunikation zur und von der Gegenstation). | Sehr hoch: Die Verfügbarkeit und Selektivität sowie die effektive Auslösezeit dürfen in keinem Fall beeinträchtigt werden. Totale Immunität mit genügender Sicherheitsmarge muss gewährleistet sein. |
| Betriebsdatenverarbeitung / Trafo.-Regulierung (On-Line) | Sehr hoch: Die Steuerung und Regulierung inkl. die Prozessschnittstellen und die Instrumentierung sollten gegenüber Störungen unempfindlich sein und zu keinem Funktionsverlust oder Materialschaden führen. |
| Zähler | Sehr hoch: Totale Immunität mit genügender Sicherheitsmarge (finanzielle Konsequenzen). |
| Steuerung / Befehle | Hoch: Immunität gegen stationäre und transiente Störungen hoher Wahrscheinlichkeit. Die durch Transienten geringer Wahrscheinlichkeit verursachte Verzögerung wird in |

den meisten Fällen akzeptabel sein.

| | |
|---|---|
| Aufzeichnungen (Ereignisse, Messungen, Fehlergrößen...) | Hoch: Der durch Transienten von geringer Wahrscheinlichkeit verursachte Verlust der zyklischen Abfrageresultate der Messungen kann in einigen Fällen akzeptabel sein. Jedoch sollten alle Ereignisse und Fehleraufzeichnungen in richtiger Zeitfolge aufgezeichnet und nach der Störung der Leitzentrale bzw. der Station zur Verfügung stehen. |
| Bedienung / MMI | Hoch: Ein Funktionsverlust wegen einer transienten Störung von geringer Wahrscheinlichkeit wird meistens in Kauf genommen, da das System durch den Operator wieder gestartet werden kann. |
| Alarmer | Mittel: Abhängig von der Dringlichkeitsklasse und der Möglichkeit einer Wiederherstellung, kann ein vorübergehender Informationsverlust akzeptiert werden. Jedoch in Anlagen, wo eine automatische Zeitstempelung der Alarmer vorgesehen ist, sollte die Immunität gegen elektromagnetische Störungen gewährleistet sein. |
| Datenübertragung und Telekommunikation | Mittel: Ein vorübergehender Verlust ist in den meisten Fällen akzeptabel unter der Voraussetzung, dass der Kommunikationslink automatisch innerhalb einer akzeptablen Zeit wiederhergestellt wird. |
| Datenakquisition und –speicherung | Mittel: Eine richtige Auslegung der Schnittstellen, geeignete Filterung, usw. sollten eine genügende Immunität gewährleisten. Es wird jedoch keine Korrumpierung der lokal gespeicherten Daten oder deren Verlust zugelassen. |
| Anzeige / MMI | Mittel: Vorübergehende Beeinträchtigung der Anzeige am Bildschirm, der Bildqualität... sind akzeptabel unter der Voraussetzung, dass nach der Störung das System und die Anzeige in korrekter Form wiederhergestellt werden. |

Es muss jedoch sichergestellt werden, dass in keiner der oben aufgeführten Funktionen die elektromagnetischen Störungen zu irreversiblen Schäden (Material oder Personen) oder zu irreversiblen Änderungen in der Einstellung oder im Verhalten der Komponenten bzw. Systeme führen dürfen. Nach der Störung sollten das korrekte Funktionieren und Verhalten aller Komponenten sowie des gesamten Systems automatisch wiederhergestellt sein.

Die Tabelle 1 fasst das empfohlene, typische Immunitätsniveau für die verschiedenen Funktionen der Sekundärtechnik einer Hochspannungsunterstation zusammen.

Systemkomponenten

Die Systeme der Sekundärtechnik bestehen aus Geräten für die verschiedenen Funktionen (integriert oder einzeln), die zu einem gesamten System zusammen verbunden werden. Die Hauptkomponenten sind:

- Schutzeinrichtungen (Schutz, Datenakquisition, Teilautomatisierung, Datenspeicherung...)
- Feldeinheiten für die Steuerung, Überwachung, Teilautomatisierung, Verriegelungen, Teilautomatisierung...
- Kommunikation zwischen den Feldern und zwischen jedem Feld und der Stationsleitstelle...
- Stationsleitstelle zur Steuerung, Betriebsführung
- Kommunikation zwischen Bezirks-, bzw. Zentraleitstelle und der Station

Die elektromagnetische Umgebung der verschiedenen Komponenten ist nicht gleich für das gesamte System und ist abhängig von der Wahl der Komponenten bzw. dem Ort und der Lage. Zum Beispiel werden die I/O-Schnittstellen, welche die Feldeinheit mit dem Prozess (Primärgeräte) direkt verbinden viel stärker beeinflusst als diejenige zwischen Feldeinheit und Stationsrechner, wenn Glasfaserkabel als Kommunikationsmedium für die Datenübertragung gewählt werden. Dies führt dazu, dass beim Quantifizieren des Immunitätsniveaus der Teilkomponente für verschiedene Funktionen differenziert vorgegangen werden muss, um die Gesamtkosten des Systems zu reduzieren.

Normen und Richtlinien

Damit eine Flexibilität bei der Auswahl einzelner Komponenten bei der Auslegung der Sekundärtechnik gewährleistet bleibt, sollten sowohl das ganze System als auch die einzelnen Komponenten verschiedener Herkunft die Anforderungen bezüglich ihres Verhaltens beim Auftreten von elektromagnetischen Störungen erfüllen.

Verschiedene Ausschüsse der IEC, deren Mitglieder international aus den Kreisen der Betreiber und Lieferanten zusammengesetzt sind, haben die Anforderungen an einzelne Komponenten bezüglich ihres Verhaltens beim Auftreten von elektromagnetischen Störungen standardisiert und in Form der IEC-Normen herausgegeben. Sie quantifizieren das Immunitätsniveau für verschiedene elektromagnetische Umgebungsklassen. Diese Normen sind im Allgemeinen als Empfehlung gedacht.

Hingegen haben die CENELEC-Normen verbindlichen Charakter und werden bei der Implementierung der EMV-Richtlinien der EU verwendet. Eine enge Zusammenarbeit zwischen CENELEC und IEC eliminiert Doppelspurigkeiten und beschleunigt die Herausgabe der Normen.

Es sind drei Hauptkategorien der EMV-Normen/Richtlinien zu unterscheiden [3]:

Grundsätzliche EMV-Richtlinien:

Sie legen die allgemeinen Bedingungen, die zum Erlangen einer genügenden Immunität bei allen Produkten notwendig sind, fest. In vielen Fällen geben diese Richtlinien bestimmte Prüfprozeduren und Leitfaden für die Wahl des Prüfniveaus in den verschiedenen Umgebungsklassen an.

Generische EMV-Richtlinien:

Sie beziehen sich auf eine spezifische Umgebung und sind auf alle in dieser Umgebung installierten Geräte anwendbar, wenn entsprechende IEC-Normen für diese Produkte noch nicht vorhanden sind.

EMV-Normen für Produkte bzw. Produktfamilie:

Sie legen die Anforderungen und die Nachweisprüfungen für spezifische Produkte/Produktfamilie in den verschiedenen elektromagnetischen Umgebungen fest. Die Nachweisprüfungen spezifizieren im allgemeinen die Prüfanordnungen, Prüfbedingungen (z.B. Störspannungspegel) und die Akzeptanzkriterien für Geräte in den verschiedenen Umgebungsklassen.

Offensichtlich ist es sehr schwierig, wenn nicht unmöglich, die Nachweisprüfungen der Immunität gegen elektromagnetische Störungen und Emissionen auf das Gesamtsystem durchzuführen, wenn die verschiedenen Geräte und Komponenten in der Anlage örtlich weit gestreut, oder verschiedener Herkunft (Lieferanten) sind. Ausserdem ist die Tatsache zu berücksichtigen, dass die Prüfungen von den Umgebungsbedingungen beeinflusst werden könnten. Demzufolge können sie für Zertifizierungszwecke nicht verwendet werden.

Deshalb wird empfohlen, die Geräte und Teilsysteme individuell zu prüfen, wobei jedes Gerät und Teilsystem sowie jede Komponente allein für sich die Anforderungen der Normen erfüllen müssen. Der Nachweis wird durch Bestehen der in den Normen festgelegten Prüfungen für das entsprechende Produkt geliefert. Der Lieferant sollte jedoch die Installationsbedingungen für seine Produkte/Systeme, wie z.B. die Erdung, Anschlusskriterien, Verdrahtungen, Abschlüsse, usw., angeben, welche für ein einwandfreies Verhalten des Gesamtsystems notwendig sind.

Da die Nachweisprüfungen unter Umständen zu einer Beeinträchtigung der Gerätetüchtigkeit und/oder seiner Lebensdauer führen können, werden einige dieser Prüfungen als Typenprüfung durchgeführt. Als Beispiel kann die Prüfung mit den „Hochenergie-Transienten“ erwähnt werden.

Die IEC-Norm 60694 behandelt die EMV-Prüfwerte in Schaltanlagen.

Die IEC-Normen der Serie 61000 behandeln das Thema „EMV in elektrischen Installationen“ und sind wie folgt strukturiert:

- Teil 1: Allgemeine Überlegungen, Definitionen...
- Teil 2: Umgebung (Beschreibung, Klassifizierung, EMV-Pegel...)
- Teil 3: EMV-Grenzen (Immunität, Emission)
- Teil 4: Nachweisprüfungen und Messprozeduren
- Teil 5: Richtlinien der Installation und Massnahmen gegen EM-Beeinflussung (Geräte und Methoden)

Nachfolgend sind die normalerweise durchgeführten EMV-Prüfungen auf den Geräten und Systemen der Sekundärtechnik und die relevanten IEC-Normen aufgelistet:

| | Richtlinien/Normen |
|--|--|
| EU-Direktiven | |
| EMV-Richtlinien | 89/336/EEC 92/31/EEC 93/68/EEC EN 50081-2 (1994) EN 50082-2 (1995) |
| Produktsicherheit Isolationsklasse, Industrielle Umgebung, Verschmutzungsgrad der Umgebung... | 72/23/EEC EN 61010-1: 1993 A2: 1996 EN 60950: 1992 A11: 1997 |
| Immunitätsgrenzen und -prüfungen für Schaltanlagen | |
| Schaltanlagen | IEC 60694 |
| Geleitete Störungen | |
| Oberwellen | IEC 61000-2-1 IEC 61000-2-2 IEC 61000-4-13 |
| Spannungsschwankungen, und -senkungen Kurze Spannungsunterbrüche | EN 61000-4-11 IEC 61000-4-29 (für DC- Leistungsports) |
| Spannungs- und Stromstöße | IEC 61000-4-5 |
| Hochfrequente Schwingungen (wiederholte 1 MHz Transienten und Einzel-Ringwellen) (Schalthandlungen im Primärkreis) | IEC 61000-4-12 (für GIS-Anlagen um- stritten) IEC 60255-22-1 |
| Elektrische schnelle Transienten / Bursts (Schalthandlungen im Sekundärkreis) | IEC 61000-4-4 IEC 60255-22-4 |
| Induzierte RF-Felder (150kHz – 80 MHz) | IEC 61000-4-6 (ev. als Ersatz für die traditionelle Strahlungs- prüfung mit elektroma- gnetischen Feldern) |
| Gleichtakt (Common Mode)-Störungen (DC – 150kHz) | IEC 61000-4-16 |
| Gehäuseprüfung | |
| Magnetische Felder (Netzfrequenz) | IEC 61000-4-8 |
| Magnetische Felder (Pulse und gedämpfte Schwin- gungen) | IEC 61000-4-9 IEC 61000-4-10 |

Gestrahle Felder

| | |
|---|---------------------------------|
| RF-elektromagnetische Felder (80MHz bis 1GHz) | IEC 61000-4-6 IEC 61000-4-3 |
| Elektrostatistische Entladung | IEC 61000-4-2 IEC 60255-22-2 |

Emissionsgrenzen und –prüfungen ($I_N \cdot 16A$)

| | |
|---------------------------------------|--|
| Oberwellen | IEC 61000-3-2 |
| Spannungsschwankungen und Flimmern | IEC 61000-3-3 |
| Geleitete und gestrahlte RF-Störungen | Publ. CISPR 22 Publ. CISPR 11 Publ. CISPR 16 |

IEC = International Electrotechnical Commission

CISPR = Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques

Es ist noch zu bemerken, dass einige der oben erwähnten IEC-Normen noch in Bearbeitung sind. Die hochfrequenten Schwingungen sind für Frequenzen bis 1 MHz festgelegt. In der Praxis treten jedoch auch Störungen von 10 bis 50 MHz auf.

Die in der Norm IEC 60694 spezifizierten EMV-Pegel entsprechen der Klasse III der IEC-Norm 61000-4. Um die Unterschiede zwischen diesen Normen auszugleichen, sind Gespräche im Gang, wobei die Norm IEC 60694 demnächst revidiert wird.

Die in den Normen festgelegten Prüfmethode und -größen sind im Allgemeinen aus den Feldmessungen und Erfahrungswerten der Anwender und Lieferanten abgeleitet. Sie sollten die in der Praxis zu erwartenden „Worst-Case“ Bedingungen darstellen. Erst nach Erreichen eines Konsenses im Ausschuss und bei den Nationalen Komitees der IEC-Mitglieder werden die Prüfwerte und -größen in die Norm aufgenommen. Es ist jedoch dem Anwender freigestellt, im Einvernehmen mit den Lieferanten zusätzliche Prüfungen festzulegen bzw. zu modifizieren. Beim Vorliegen neuer Messungen oder Erfahrungen, werden diese Normen nach vorgeschriebenem Vorgehen revidiert.

Im Hinblick auf die Vielfalt der Anlagenkonzepte und Produkte ist es sehr schwierig, dass die in den Normen aufgeführten Prüfungen den tatsächlichen Bedingungen einer bestimmten Anlage entsprechen. Zum Beispiel die in neun verschiedenen Hochspannungsanlagen (40 – 400kV) in Schweden durchgeführten Messungen (1995 –97) haben gezeigt, dass die vorkommenden schnellen Transienten in Folge der Schalthandlungen von Schaltern, Trennern, Ein- und Ausschalten der Sammelschienen, usw. sehr stark von den in der Norm IEC 61000-4-4 bzw. IEC 60255-22-4 spezifizierten Störgrößen und deren Form abweichen [4].

Die IEC-Norm spezifiziert als Störquelle der Schnellen Transienten einen „Burst-Generator mit einer effektiven Last von 50 Ohm. Die Spannungsamplitude variiert je nach Umgebungsklasse, zwischen 1 und 4kV. Die Wellenform besteht aus „Bursts“ konstanter Amplitude und Frequenz (2,5kHz während 15ms) in 300ms Abständen während

mindestens einer Minute. Diese Prüfung simuliert die Schalthandlungen im Sekundärkreis.

Die Wellenform der Messungen weist bei der maximalen Amplitude am Anfang der Störung eine sehr kurze HF-Schwingung auf. Diese Schwingung wird den anderen Schwingungen niedriger Frequenzen überlagert. Die Messungen zeigen auch, dass die nachfolgenden Schwingungen eine höhere Amplitude aber dafür niedrigere Frequenzen aufweisen.

Aufgrund dieser Messungen haben die schwedischen EVUs einen Vorschlag zur entsprechenden Anpassung der IEC-Norm unterbreitet [4].

Ebenfalls behandeln die kanadischen und die US-Normen das Verhalten bei elektromagnetischen Störungen.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Der Einsatz von numerischen Geräten und Systemen in der Sekundärtechnik und die zunehmende Integration der verschiedenen Funktionen der Sekundärtechnik bedingen vermehrte Aufmerksamkeit der Anwender und der Lieferanten bezüglich dem Verhalten dieser modernen Geräte und Systeme beim Auftreten von elektromagnetischen Störungen. Ohne Gegenmassnahmen können die elektromagnetischen Störungen zum Fehlverhalten bzw. zur Zerstörung dieser empfindlichen Geräte und Systeme führen.

Internationale Gremien wie CIGRE und IEC haben Richtlinien zur Verminderung der negativen Folgen von Störungen auf die Geräte der Sekundärtechnik sowie die empfohlenen Prüfungen zum Nachweis der EMV von Geräten und Systemen ausgearbeitet. Basierend auf diesen Empfehlungen gibt CENELEC verbindliche EMV-Richtlinien heraus.

Aufgrund der statistischen Natur der Störungen und der Vielfalt der Einflussfaktoren, spezifizieren die Normen Prüfungen und Prüfgrössen für die zu erwartenden „Worst-Case“ Bedingungen. In Fällen, wo spezielle Umgebungsbedingungen vorliegen, ist es dem Anwender freigestellt, im Einvernehmen mit den Lieferanten zusätzliche Prüfungen zu vereinbaren.

Literaturverzeichnis

- [1] Guide on EMC in Power Plants and Substations
CIGRE Working Group 36.04, December 1997
- [2] Automation and Control Apparatus for Generating Stations and Substations
Electromagnetic Compatibility, Immunity Requirements
UNIPED: 230.05 Normspec, Ren9523, Paris, Jan. 1995
- [3] International Standardization in the Field of Electromagnetic Compatibility
G. Goldberg
EMC 94, 12. International WROCLAW Symposium on EMC, Poland, pp. 451 - 455
- [4] Relay Protection Interference Environment During Normal Operating Conditions
Compared To IEC 1000-4-4 / IEC 255-22-4
A. Eriksson, L. Koppari et al.
CIGRE Session 1998, Paris, Paper 36-301

Minimierung von Transienten durch intelligentes Schalten

*Prof. Dr. Klaus Fröhlich
ETH Zürich*

1. Ursachen für transiente Spannungen und Ströme

Wie allgemein bekannt ist, können beim Schalten von Hoch- und Mittelspannungsschaltern erhebliche hochfrequente Überspannungen und/oder transiente Ströme auftreten. Diese gefährden nicht nur die Primäreinrichtung, sondern sie bewirken auch elektromagnetische Einstreuung in die Sekundärkreise. So tritt beim Einschalten von Kondensatorbänken ein Einschaltstrom von einigen kA mit einer Frequenz von einigen Kilohertz auf, der erhebliche Störungen der Sekundäreinrichtungen bewirken kann. Beim Einschalten leerlaufender Leistungstransformatoren tritt ein asymmetrischer Einschaltstrom auf, (bis in die Größenordnung des Kurzschlussstromes,) welcher nach neuester Erkenntnis dem Trafo auf die Dauer schaden kann. Wegen Fehlauflösung des Schutzes sind auch mitunter mehrere Einschaltversuche nötig, um den Trafo ans Netz zu schalten. Bei ungenügender EMV können auch durch elektromagnetische Einstreuung Fehlauflösungen und andere Störungen auftreten. Das Einschalten leerlaufender Übertragungsleitungen, insbesondere eine Schnellwiedereinschaltung, bewirkt oftmals inakzeptable Überspannungen mit steilen Flanken.

Bei der Unterbrechung kleiner kapazitiver Ströme (Kondensatorbank, leerlaufende Leitung oder Kabel) können ebenfalls im Falle einer Rückzündung hohe Überspannungen mit extrem steilen Flanken auftreten. Auch bei der Unterbrechung kleiner induktiver Ströme (Kompensationsdrossel, leerlaufender Trafo, Motor) ist inhärent die Möglichkeit einer Wiederspaltung gegeben, welche hohe Spannungsimpulse mit extrem steiler Front zufolge haben. Bei älteren Schaltern können diese Wiederspaltungen multipel sein.

2. Reduktion von Transienten durch kontrolliertes Schalten

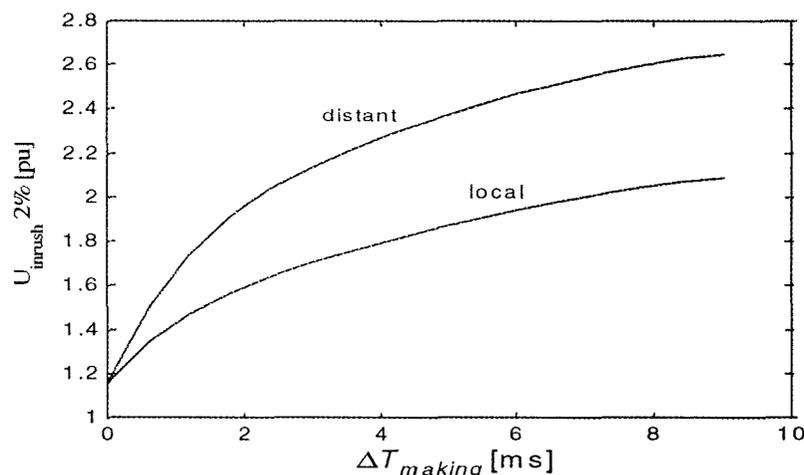
Als moderne Abhilfe gegen die oben erwähnten transienten Schaltphänomene setzt sich seit einigen Jahren verstärkt das kontrollierte Schalten durch. (In CIGRE und IEC als „Controlled Switching“ etabliert). Das Konzept ist dabei, den Einschaltmoment oder die Kontakttrennung im Schalter in bezug auf den Phasenwinkel der Spannung über dem schliessenden Schalter bzw. dem Strom im öffnenden Schalter so zu wählen, dass keine Transienten entstehen. Beim Einschalten einer Kapazität (Kondensatorbank, Leitung) wäre das der Spannungsnulldurchgang, während ein leerlaufender Trafo im Spannungsmaximum einzuschalten wäre. Im letzteren Fall kann ein möglichst geringer Einschaltstrom nur dann erreicht werden, wenn der Remanenzfluss im Trafo vor der Einschaltung berücksichtigt wird. Eine entsprechende Strategie wurde erst jüngst im Rahmen einer Dissertation an der ETHZ entwickelt. Beim Ausschalten von kapazitiven Strömen kann durch Wahl einer möglichst lange Lichtbogenzeit (Zeitintervall von der Kontakttrennung bis zum nächsten Stromnulldurchgang) die Rückzündwahrscheinlichkeit erheblich reduziert werden. Ebenso lässt sich die Wiederspaltungswahrscheinlichkeit beim Ausschalten einer Induktivität durch Vermeidung der kritischen Lichtbogenzeit deutlich verringern. Die letzten beiden Fälle können heute nur qualitativ behandelt werden. Es ist eine der künftigen Aufgaben der CIGRE Arbeitsgruppe 13.07 die Quantität dieser Massnahmen abzuschätzen und deren Kostenrelevanz aufzuzeigen.

3. Der Einfluss eines realen Schalters

Hätte man ein ideales Schaltgerät, d.h. einen Schalter dessen Ein- und Ausschaltzeit keine Streuung aufweist, so könnte durch kontrolliertes Schalten praktisch jede Schalttransiente vermieden werden. Die Realität sieht allerdings anders aus. Reale Schalter haben bei der Annäherung der Kontakte stets eine Vorzündung, so dass der elektrische Einschaltmoment streuend bereits etwa 1ms-2ms vor der mechanischen Kontaktgabe erfolgt. Zudem kommt eine sog. mechanische Streuung der Schaltzeit, welche eine inhärente Eigenschaft des Antriebssystems ist. Dadurch tritt auch bei höchster Genauigkeit der Elektronik, welche den Schaltzeitpunkt bestimmt, stets eine streuende Abweichung vom idealen Schaltzeitpunkt auf. Die mechanischen wie auch die dielektrischen Eigenschaften des Schalters sind daher ausschlaggebend, ob das kontrollierte Schalten für den gegebenen Schaltfall sinnvoll ist. Ein Schalter mit zu hoher mechanischer Streuung und/oder zu langsamer Entfestigung der schliessenden Schaltstrecke kann völlig ungeeignet sein. Es ist daher von Fall zu Fall zu untersuchen, welchen Effekt kontrolliertes Schalten bei gegebenem Schaltfall, bei gegebener Netzkonfiguration und unter gegebenen Eigenschaften des Schaltgerätes hat.

4. Nutzen

Abb. 1 zeigt als Beispiel, welche Überspannungen beim Einschalten einer Kondensatorbank in einem einige zehn Kilometer entfernten Industrienetz als Funktion der Genauigkeit des Schalter auftreten können.



Figur 1 Überspannung in einem Industrienetz in Abhängigkeit der Schaltgenauigkeit ΔT (2% Wert = dieser Wert wird nur mit 2% Wahrscheinlichkeit überschritten)

Der Nutzen des kontrollierten Schaltens ist evident, vorausgesetzt der Schalter bleibt innerhalb einer Genauigkeit von ± 1 ms. Eine ähnliche Genauigkeit ist für die anderen erwähnten Schaltfälle erforderlich. Moderne Schalter sind in der Lage, dies zu erfüllen. Es sei jedoch betont, dass der zu erzielende Effekt sowohl vom jeweiligen Schaltfall als auch von der Genauigkeit des Schaltgerätes abhängt. Es gibt daher nicht einfach eine Ja – Nein Entscheidung. Vielmehr ist die Frage zu beantworten mit welcher Schaltergenauigkeit welcher Effekt erzielbar ist, oder umgekehrt betrachtet, welcher Schalter erforderlich ist, um ein definiertes Ausmass an Reduktion der Transienten zu erreichen. Das kontrollierte Schalten ist jedenfalls potentiell eine sehr wirksame Massnahme, transiente Vorgänge im Netz zu reduzieren. Es wird dadurch nicht nur die Lebensdauer der Primärkomponenten erhöht, sondern auch elektromagnetische Einstreuungen in die Sekundäreinrichtung der Anlagen können reduziert werden.

Praktische Beispiele für die Behebung von EMV-Problemen im Bereich von Hochspannungsanlagen

*F. Trotti
Montena emc sa, Rossens*

1. Einleitung

Die Kontrolle und die Steuerung einer Hochspannungs-Schaltanlage wie Chamoson oder Creux-de-Chippis (380 bzw. 220 kV) erfolgt mit Hilfe von elektronischen Geräten und Computern. Diese befinden sich oft nahe den störenden Hochspannungseinrichtungen. Ohne vorsorgliche Massnahmen können Probleme der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) die Zuverlässigkeit des Betriebes stark beeinträchtigen.

2. Typische Störgrössen

In der Schaltanlage würden ohne einen EMV-gerechten Bau beim Ein- und Ausschalten der Leistungsschalter und Trenner folgende Störungen auftreten:

- gestrahlte elektromagnetische Pulse 1 bis 40 kV/m
- Gleichtaktspannungen 1 bis 70 kV (Erdungspunkte der
Kabelendverschlüssen)
- Gleichtaktströme 1 bis 200 A (in den Steuerkabeln)

Die Störfestigkeitspegel der empfindlichen Systeme liegen für eine normale industrielle Umgebung nach den aktuellen Normen bei:

- gestrahlte elektromagnetische Pulse 1 bis 10 kV/m
- Gleichtaktspannungen 2 bis 4 kV
- Gleichtaktströme 8 bis 16 A

Die Beeinflussungsmatrize sieht wie folgt aus:

| Störquelle | Position der Störsenken | |
|-------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| | externe Umgebung | Schränke Leit- und Schutztechnik |
| 380 kV Freileitungen | klein | klein |
| 380 kV Kabelendverschlüsse | sehr klein | gross |
| Trafo 380 kV | sehr klein | mittel |

3. Schutzkonzept

Die Beeinflussungen durch hochfrequente (HF) Impulsfelder erfordern ein HF-Erdungskonzept und abgeschirmte Steuer- bzw. Messkabel sowie einen entsprechenden Immunitätspegel der Elektronik.

3.1 Erdungskonzept

- Ein Maschengitter aus Armierungseisen im Betonboden stellt eine sehr geringe Hochfrequenzimpedanz sicher.
- Die Steuerschränke werden niederimpedant mit der HF-Massungsgitter verbunden.
- Die Steuerkabel werden so nahe wie möglich zur Betonarmierung verlegt, um Schleifenflächen zu reduzieren.
- Es werden keine speziellen HF-dichte Schränke mit einer Dämpfung von 40 - 80 dB benötigt. Es genügt wenn sie metallen sind und wenn alle Einzelteile miteinander regelmässig verbunden sind.

Der HF-Potentialausgleich zwischen jedem Erdungspunkt der 380 kV-SF₆-Schaltanlage, den Kabelendverschlüssen, den Trafos und den Steuerschränken vermeidet das Entstehen von Gleichtaktspannungen. Folglich werden auch elektromagnetische Impulsfelder und HF-Ströme vermieden. Besondere Sorgfalt musste den, ausschliesslich über Stromwandler mit der Erde verbundenen, Trafokesseln und 380 kV Kabelarmierungen geschenkt werden.

3.2 Immunitätspegel der Elektronik

Beim Einkauf jedes Systems wird das Einhalten eines entsprechenden EMV-Pflichtenheftes verlangt. Es enthält:

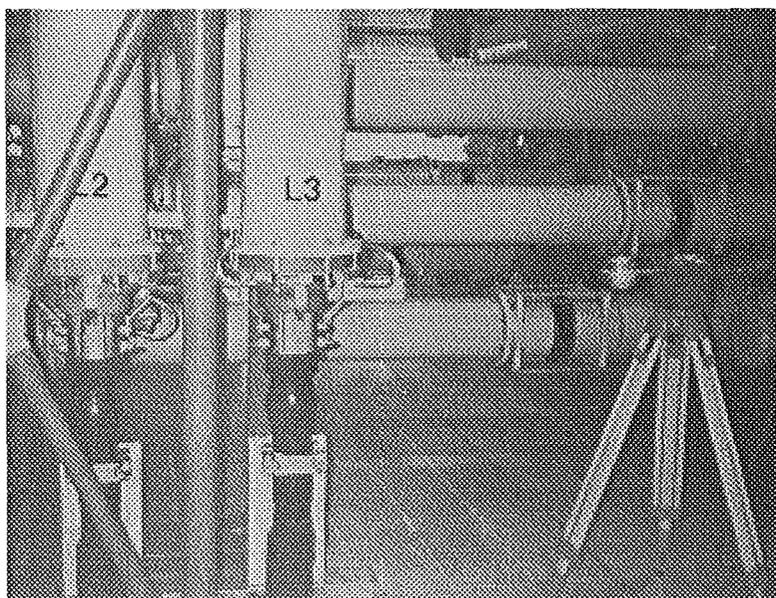
- die Störfestigkeit, die ein empfindliches System aufzuweisen hat;
- die Grenzwerte, die ein störungserzeugendes System nicht überschreiten darf.

4. Erfolg des Konzeptes

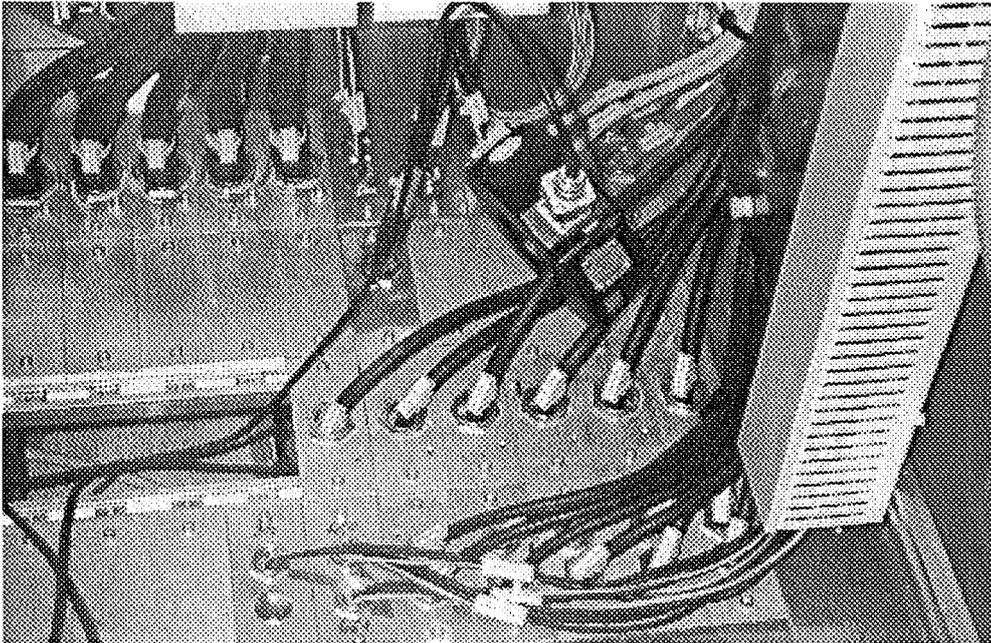
Vor Ort Messungen bei der Inbetriebsetzung der Anlage haben gezeigt, dass die vorsorglichen Massnahmen ihr Ziel erreicht haben. Die gemessene Störgrössen sind auf folgende Maximalwerte beschränkt:

- Gleichtaktspannungen 50 bis 500 V
- Gleichtaktströme 1 bis 10 A (in den Steuerkabeln)

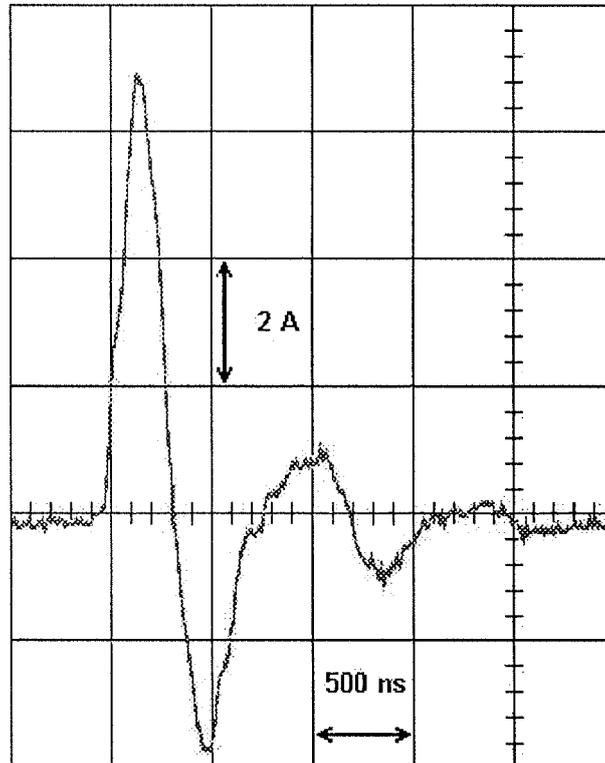
Alle Geräte, die dem EMV-Pflichtenheft gerecht werden, arbeiten störungsfrei.



Figur 1 Sonde zur Messung Transienter hochfrequenter elektromagnetischer Felder in der Nähe eines GIS-Kabelendverschlusses.



Figur 2 Messung eines Gleichtaktimpulsstroms mit einem Hochfrequenzstromwandler an einem Signalkabel.



Figur 3 Typischer Verlauf eines durch Schalthandlung verursachten Störsignals

DIE MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG VON BEEINFLUSSUNGSPROBLEMEN

Dr. Reinhold Bräunlich

Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH), Zürich

1. Der Zweck von EMV-Messungen

Für das elektrische Engineering ist die heutige technisch ausgereifte EMV-Messtechnik nicht mehr wegzudenken. Sie kann innerhalb des elektrischen Messwesens zurecht als eine Spitzendisziplin bezeichnet werden, da sie sich mit den Extremen der Elektrotechnik beschäftigt. Sie umfasst den gesamten **Pegel-** und **Frequenzbereich** und bedient sich beinahe aller verfügbarer Techniken zur Erfassung von elektrischen Grössen.

Die EMV-Messtechnik stellt eine unabdingbare Voraussetzung für den Nachweis dar, dass elektrotechnische Einrichtungen die Normen einhalten, die zur gegenseitigen Abstimmung von Störaussendung und Störimmunität aufgestellt werden. Mit EMV-Messungen soll, vereinfachend ausgedrückt, das korrekte Funktionieren elektrischer Systeme in ihrer elektromagnetischen Umgebung überprüft werden. Nebst den Normenprüfungen dienen EMV-Messungen auch der Grundlageninformationsbeschaffung für Entwicklungsarbeiten und der Lösung von Beeinflussungsproblemen in bestehenden elektrischen Systemen.

Messtechnische EMV-Untersuchungen können demnach folgende Zielsetzungen haben:

- **Ermittlung fehlender Erfahrungs- und Auslegungswerte (Entwicklungsversuche, und Tests in bestehenden Installationen)**
- **Abnahmeprüfungen (Typen- und Stückprüfungen) zur Ermittlung der Störpegel bzw. zur Überprüfung der Schutzpegel (Immunitätsüberprüfung).**
- **Fehlerrückmeldung und Behebung von EMV-Problemen.**

Messungen im Vergleich zu Berechnungen

EMV-Fragen könne grundsätzlich auch theoretisch mittels Berechnungen behandelt werden. In zahlreichen Situationen können aber gezielte Messungen die Berechnungen ergänzen oder sogar ersetzen. Wegen vielfältigen Einflussfaktoren und Randbedingungen fällt eine ausreichend detaillierte mathematische Simulation oft kostspieliger aus als eine Messung an realen elektrotechnischen Einrichtungen.

In vielen Fällen liegen bei EMV-Problemen unübersichtliche Verhältnisse vor. Beeinflussungsgrössen oder Kopplungswege sind teilweise nicht quantifizierbar oder gar unerkannt. Können nicht alle Randbedingungen berücksichtigt werden, bzw. kann die EMV-Situation nicht genügend detailliert modelliert werden, so verliert jede Berechnung ihre Aussagekraft. Ausserdem ist zu berücksichtigen, dass elektromagnetische Beeinflussungsprobleme in der Regel durch transiente und instationäre Phänomene bestimmt sind, die eine entsprechend aufwendige mathematische Behandlung notwendig machen.

Die Gründe für die Komplexität bei der theoretischen Problembehandlung sind meist nicht prinzipieller, sondern praktischer Art. Typischerweise ist ein elektrotechnisch eindeutig definiertes optimales Design zu kostspielig und es werden bei der Auslegung Kompromisse und Inkonsequenzen eingegangen. Dies ist vielfach der Grund für die Unübersichtlichkeit der EMV-Kopplungsmechanismen. Besonders in diesen Fällen muss die Einhaltung der elektromagnetischen Kompatibilität mit Messungen belegt werden.

2. Messeinrichtungen und -methoden

2.1 Gliederung der Messgebiete

Bezüglich Pegelbereich

Der Pegelbereich (Amplituden- oder Intensitätsbereich) kennt innerhalb des gesamten Gebiets der elektromagnetischen Verträglichkeit praktisch keine Grenzen. Im Bereich der Einwirkung eines elektromagnetischen Impulses (EMP) oder in der Stossspannungsmesstechnik, müssen Potentialdifferenzen im Bereich einiger Megavolt (MV) und Impulsströme bis in den Bereich von etwa einem Mega-Ampères (MA) gemessen werden. Eine besonders anspruchsvolle und wichtige Aufgabe dabei ist die Messung von sehr schnellen Änderungen solch hoher Amplitudenwerte.

Dagegen beschäftigt sich die EMV-Messtechnik auch mit kleinsten Grössen im Bereich von empfindlichen Sensoren. Die untere Grenze ist dabei im Extremfall gegeben durch die Ladung eines einzigen Elektrons (1.6×10^{-19} As).

Angesichts des gewaltigen Dynamikbereichs, welche die EMV-Messtechnik abzudecken hat, ist die Vielfalt der verwendeten Messeinrichtungen entsprechend umfangreich (siehe Abschnitt 2.2).

Die elektrischen Energieversorgungsanlagen umfassen etwa den Mittelbereich der Pegelwerte, wobei zwischen den elektrischen Pegeln der Primärtechnik und denen der Sekundärtechnik doch leicht sechs Zehnerpotenzen liegen können.

Bezüglich Frequenzbereich

Die meisten Fragestellungen der elektromagnetischen Verträglichkeit betreffen mehr oder weniger definierte Frequenzbereiche. Dies liegt daran, dass Störquellen, Kopplungswege und Störempfindlichkeiten stark frequenzabhängig sind, so dass gewisse Beeinflussungsmechanismen nur in begrenzten Frequenzbereichen zu erwarten sind.

Die Frequenz bestimmt die Ausbreitung des elektromagnetischen Felds sowie die Kopplungsimpedanzen, und sie ist im wesentlichen proportional zu den Ausgleichsströmen und induzierten Spannungen, welche durch eine gegebene elektrische oder magnetische Feldstärke in metallischen Leitern hervorgerufen werden.

Wegen des starken Einflusses auf die Kopplungsmechanismen bestimmt die Frequenz auch die relevanten Beeinflussungs- und Messgrössen und letztlich die zu verwendenden Messeinrichtungen.

Bezüglich den betroffenen Signalarten

Im Gegensatz zu den *analogen* Signalen werden *digitale* Signale erst ab einem definierten Störpegel beeinträchtigt. Für die EMV-Messtechnik entstehen deshalb je nach Signalart unterschiedliche Anforderungen. Bei Signalen, die auf Trägerfrequenzen aufmoduliert sind, ist auch die EMV-Sensibilität und die dazugehörige Messtechnik naturgemäss stark auf die verwendeten Frequenzbänder konzentriert.

2.2 Messgeräte, Sensorik

Die Vielfalt der messtechnischen Einrichtungen ist derart gross, dass eine eindeutige Klassifizierung kaum möglich ist. Die im EMV-Bereich eingesetzte Messtechnik lässt sich aber etwa in folgende Gruppen einteilen: **Signalquellen, Sensorik, Signalübertragung und Verarbeitung, Signalerfassung und Auswertung.**

Folgende Aufstellung zeigt eine grobe Übersicht über einige der wichtigsten EMV-Messeinrichtungen auf.

| Signalquellen | |
|-------------------------|---|
| Transienten | Impulsgeneratoren, Stossstrom- und Stossspannungsgeneratoren, |
| Kontinuierliche Signale | Signal- und Funktionsgeneratoren, Messender |
| Signalwandler | Sendeantennen, Wanderwellen- und TEM-Zellen, Strominjektoren |

| Sensorik (Messwandler und Antennen) | |
|-------------------------------------|--|
| Strom | Stromwandler (mit und ohne ferromagnetischem Kern), Shunts, |
| Spannung | Oszillographensonden (mit Bezugspotential, oder differenziell), Ohm'sche, induktive und kapazitive Spannungsteiler. |
| E-Feld | Kapazitive Platten- und Kugelsensoren, Pockels- und Kerr-Zellen. |
| B-Feld | Schleifen und Spulen (Rahmenantennen), Hall-Elemente, Faraday-Effekt-Sensoren (meist mit interferometrischen Detektoren) |
| Elektromagnetisches Feld | Empfangsantennen unterschiedlichster Art je nach Frequenzbereich und Bandbreite |

| Signalübertragung Verarbeitung, EMV-Hilfseinrichtungen | |
|--|--|
| Signalstrecken | Koaxialkabel Symmetrische abgeschirmte Messkabel (Twinax) Lichtleiterübertragungsstrecken Trennwandler und -transformatoren |
| Signalverarbeitung | Abschwächer Verstärker Filter (aktiv, passiv, mit Hilfssignalen, mit Prozessoren) Integratoren, Differentiatoren Gleichrichter |
| Hilfseinrichtungen | Abschirmungen, Abschottungen, Durchführungen, EMV-Dichtungen Absorber |
| Triggereinrichtungen | Sensoren, Kabel- und Lichtleiterübertragungsstrecken |

| Signalregistrierung und Auswertung | | |
|------------------------------------|--|--|
| Registrierung und Auswertung | Zeitbereich: | Oszillographen, Transientenrekorder, Impulsverarbeitungssysteme |
| | Frequenzbereich: | Frequenzanalysatoren, Netzwerkanalysatoren Messempfänger, Vektorvoltmeter |
| Informatik | Signaltheoretische Analysen, Statistik | |

3. Vor-Ort-Messungen in elektrische Anlagen

EMV-Messungen, welche die Verträglichkeit zwischen Primär- und Sekundäranlagen in elektrischen Energieversorgungsanlagen definitiv überprüfen sollen, müssen zu einem grossen Teil vor Ort durchgeführt werden. Bei den Prüfungen der Hersteller in Labors können nur definierte Schnittstellen unter definierten Bedingungen getestet werden. Die EMV-Bedingungen am Einsatzort in der Praxis unterscheiden sich ggf. von den Laborbedingungen unter Umständen hinsichtlich folgender zwei Aspekte:

1. Der Zustand der Schnittstellen zwischen Primär- und Sekundärtechnik kann von den Verhältnissen der Standardprüfungen abweichen (Unterschiede in den Impedanzen von Quelle und Senke, geometrische Abweichungen etc.).
2. Es können neue Pfade für eine Störsignalkopplung vorliegen, die in der Standardprüfung nicht berücksichtigt werden können.

Bei Vor-Ort-Messungen herrschen deshalb grundsätzlich weniger genau definierte Bedingungen als bei Labormessungen. Damit die **Aussagekraft** und **Reproduzierbarkeit** von EMV-Messungen trotzdem gewährleistet werden kann, ist die Vorgehensweise besonders

sorgfältig zu **planen**. Ausserdem müssen die Randbedingungen und Begleitdaten während der Messung sehr detailliert **festgehalten** werden. Aus diesem Sachverhalt leiten sich für Vorortmessungen folgende Regeln ab.

1. Messvorbereitung

Die Aufgabenstellungen müssen sorgfältig analysiert werden, damit realistische Zielsetzungen getroffen werden können. Im weiteren sollen die erwarteten Aussagen eine **vernünftige Allgemeingültigkeit** besitzen.

Oft führt diese Anforderung letztlich zur Strategie einer sogenannten „**Worst-case**“-Analyse. Eine solche Vorgehensweise drängt sich insbesondere auf, wenn die untersuchte Auswirkung der EMV-Beeinflussung folgenschwere oder irreversible Beeinträchtigungen des Systems zur Folge hat. Ein einziger unzulässiger Beeinflussungsfall führt bei solchen Verhältnissen zum Ausfall einer Komponente oder einer Funktion.

Eine Aussage über den häufigsten typischen Fall einer Beeinflussung ist meist nur bei fehlertoleranten Systemen sinnvoll und verhältnismässig aufwendig. Die Generierung ausreichender statistischer Messdaten erfordert eine hohe Anzahl von Einzelversuchen.

Vereinfachte mathematische Modelle zur Überprüfung der **Plausibilität** und zur **Skalierung** von Messresultaten sind wichtige Grundlageninformationen, die vor der Messkampagne erarbeitet werden sollen.

Zu den Vorbereitungen gehört ein **Versuchsprogramm**. Es soll realistische Zeitreserven beinhalten, und es soll auch verschiedene vorhersehbare (und überraschende) Eventualitäten einbeziehen, die eine kurzfristige Änderung des ursprünglich vorgesehenen Plans zulässt.

2. Das Triggerproblem bei Transientenmessungen

Bei Transientenmessungen mit Oszillographen oder Transientenrekordern stellt die Triggerung auf das gewünschte Ereignis, bzw. Signal oft schwierige Probleme. In vielen Fällen sind die Signale im gewünschten Triggermoment so unauffällig, dass sich kein eindeutiges Triggerkriterium ableiten lässt. In diesen Fällen sind dann zusätzliche Signalerfassungen und Verbindungen zur Erzeugung der Auslösebedingung der Registrierung nötig.

3. Durchführung der EMV-Messungen

- Sind definierte Messwerte an vorgegebenen Orten zu ermitteln, so ergeben sich in der Regel verhältnismässig einfache und leicht planbare Versuchsabläufe.
- Bei der Untersuchung unbekannter Beeinflussungsmechanismen reicht oft eine Abwicklung eines festen Versuchsprogramms nicht aus. In diesen Fällen ist eine flexible analytische „detektivartige“ Vorgehensweise erforderlich. Es müssen dabei **Zwischenauswertungen** vorgenommen werden, welche die **nötigen Ad-hoc-Entscheidungen** für eine Vorgehensweise in überlegten Schritten ermöglichen.

4. Das EMV-Problem der EMV-Messung

Ein erster Schritt bei allen Messungen muss die Überprüfung der eigenen Messeinrichtung sein. Der Grund dafür, dass diese Sorgfaltsmassnahme oft vernachlässigt wird, ist, dass die Fehlerhaftigkeit beeinflusster Ergebnisse nur in einigen Fällen unmittelbar in Erscheinung tritt. Unerkannte Fehlmessungen treten oft erst bei der detaillierten Auswertung als nicht erklärbare Diskrepanzen zu Tage. Im Nachhinein vorgenommene Korrekturmanipulationen entsprechend irgendwelchen vermuteten Fehlereinflüssen mindern allerdings den Wert der Messungen und das Vertrauen in die Ergebnisse erheblich.

Das Problem der Beeinflussung der eigenen Messung hängt sehr stark von den vorliegenden **Pegelunterschieden** ab. Hohe Dämpfungen in den Messketten begünstigen die

Beeinflussung über einen unerwünschten Nebenkopplungspfad drastisch. Häufige Kopplungsmechanismen sind:

- **Direkteinkopplungen in das Messgerät über das elektromagnetische Feld.**
- **Einkopplungen in den Signalpfad: an Steckern, Übergängen und über die Koppelimpedanz abgeschirmter Messleitungen.**
- **Rückwirkungen über die Netzspeisung von Messgeräten.**
- **Ausgleichsströme über Erdungsverbindungen mit magnetischer oder Ohm'scher Kopplung auf den Messleiter.**

Bei hohen Störpegeln können Verfälschungen des Messsignals auch durch Signale aus Frequenzbereichen verursacht werden, die das Gerät unter normalen Bedingungen nicht erfassen kann.

Häufig hat man mit dem Problem zu kämpfen, dass die zu prüfende elektrische Systemkonfiguration durch die Messanordnung verändert wird. Durch die Verlegung von metallischen Mess-, Trigger-, Erdungsleitungen und Stromversorgungen werden Kopplungspfade meist ungünstig verändert.

Die Überprüfung und Eliminierung aller dieser genannten Fehlerquellen muss durch

**Nullmessungen und
Kontrollmessungen**

sichergestellt werden.

Die Kontrollmessungen sind systematische, gezielte Überprüfungen des gesamten Messsystems. Alle denkbaren Einflussfaktoren müssen dabei selektiv untersucht werden, um ihre Auswirkung auf das Messergebnis festzustellen. Die Kontrollmessungen sind situativ festzulegen und erfordern daher eine gewisse Erfahrung mit den Messeinrichtungen und der Messaufgabe. Typische Kontrolltätigkeiten sind:

- **Messungen bei Abwesenheit des zu untersuchenden Signals.**
- **Messungen bei bekanntem Eingangssignal.**
- **Messungen bei gezielten Unterbrechungen des Signalpfads, unter Umständen an verschiedenen Stellen**
- **Messungen bei kurzgeschlossenen Sensoreingängen**
- **Messungen unter Variation diverser Kopplungsparameter (z.B. geometrische Anordnung, Austausch von Messkomponenten) und Quantifizierung der Auswirkungen auf das Messresultat.**

Erst wenn allfällige Störquellen bekannt bzw. eliminiert sind, sollte mit den eigentlichen EMV-Messungen begonnen werden.

5. Die Dokumentation

Die Dokumentation muss bereits vor der Messung beginnen. Es ist auch vorgängig festzulegen, welche Parameter und Begleitdaten zu protokollieren sind, damit Vergleiche zwischen den Messungen und auch die Reproduzierbarkeit zu einem späteren Zeitpunkt gewährleistet ist. Die Erstellung entsprechender Formulare auf Papier oder PC ist eine sinnvolle Hilfe für eine konsequente und effiziente Dokumentation des Messgeschehens.

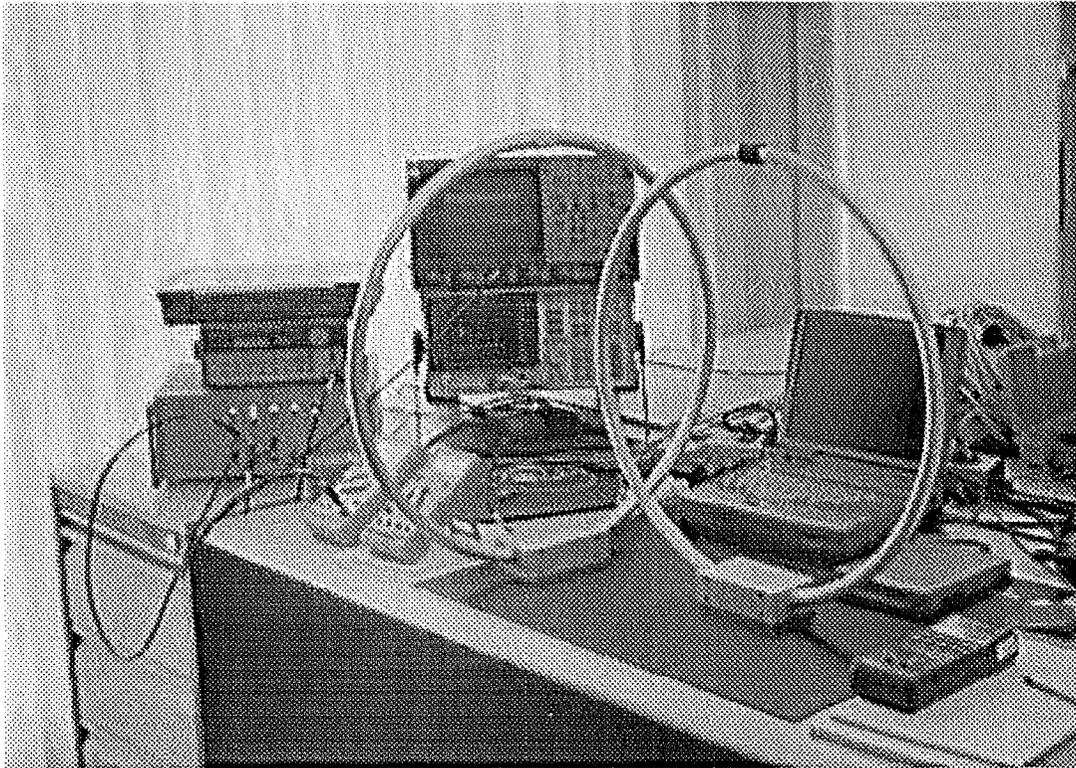
Für den praxiserfahrenen Messtechniker ist es selbstverständlich, dass die Dokumentation auch bei optimaler Vorbereitung in der Regel mehr Zeit in Anspruch nimmt als die Messung selbst. Dieser Sachverhalt muss allen in die Versuche involvierten Personen verständlich gemacht werden. Die Konsequenzen einer kompromisslosen Dokumentation sind für die Beteiligten langweilige und oft auch kostspielige Wartezeiten, die vor allem bei jeder Änderung

der Versuchsanordnung in Kauf genommen werden müssen. Es ist aber diesbezüglich zu berücksichtigen, dass eine unvollständig dokumentierte Messung im nachhinein praktisch wertlos sein kann.

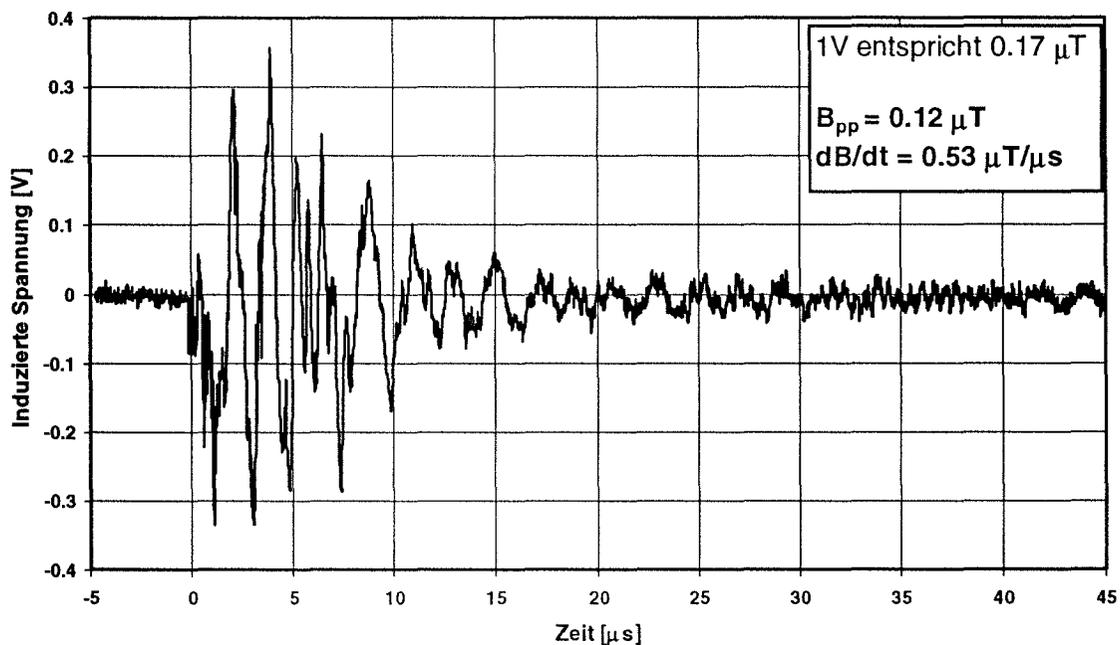
4. Literaturangaben zum Thema EMV-Messtechnik

- 1 A. Schwab, „Elektromagnetische Verträglichkeit“, Springer-Verlag, 4. Auflage, 1996.
- 2 A. Rodewald, „Elektromagnetische Verträglichkeit, Grundlagen, Experimente, Praxis“, Reihe: Viewegs Taschenbücher der Technik, Vieweg, Braunschweig, 1995.
- 3 M. Ianovici, J.-J. Morf, „Compatibilité électromagnétique“, Presses Polytechniques Romandes, 2. Edition 1985.
- 4 J. Wilhelm, „Elektromagnetische Verträglichkeit“ Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 4. Auflage, 1989.
- 5 M. Bauer u. a., „Handbuch elektromagnetische Verträglichkeit“, VDE-Verlag Berlin, 1987.
- 6 DIN/VDE, „Elektromagnetische Verträglichkeit“ Band 1 bis 3, DIN-VDE-Taschenbücher Nr. 515, 516, 517, VDE-Verlag, Beuth-Verlag, 1989.
- 7 C. Paul, „Introduction to electromagnetic compatibility“, John Wiley & Sons, 1992.
- 8 J. Geodbleod, „Electromagnetic compatibility“, Prentice Hall International (UK) Ltd, first english edition, 1992.
- 9 R. Morrison, „ Grounding and shielding techniques“, John Wiley & Sons, 1998.
- 10 D. Weston, „Electromagnetic compatibility, principles and applications“, Marcel Dekker Inc. 1991.
- 11 B. Keiser, „Principles of electromagnetic compatibility“, Artech House, 3. ed.

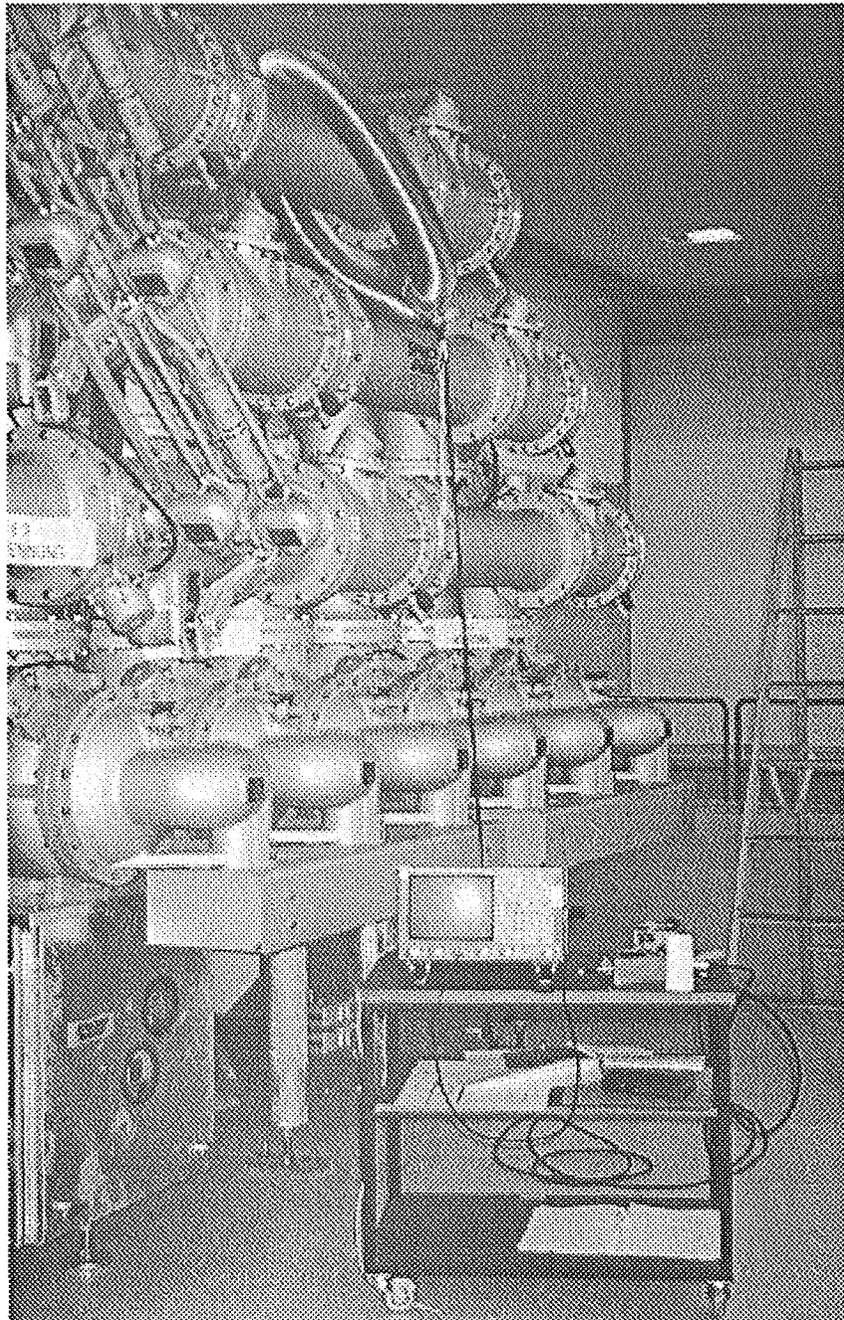
Illustrationen zu typischen Beispielen von EMV-Messungen an elektrischen Energieversorgungseinrichtungen.



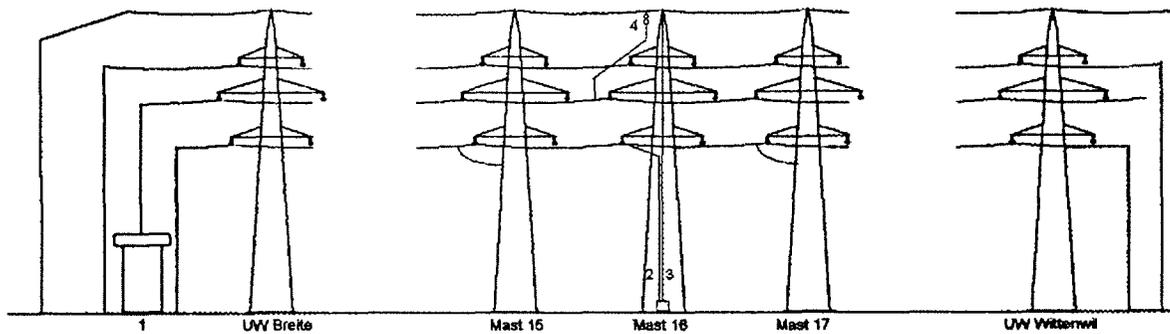
Figur 1 Messeinrichtungen zur Erfassung von hochfrequenten transienten Magnetfeldern mit Schleifenantennen.



Figur 2 Beispiel eines oszillographierten Ausgangssignals einer Schleifenantenne (Bandbreite 5 .. 30 MHz) während einer Abschaltung eines GIS-Freileitungs-Abgangs. Mit dieser Messung war die Frage der Beeinflussung von Elektronikschränken abzuklären.

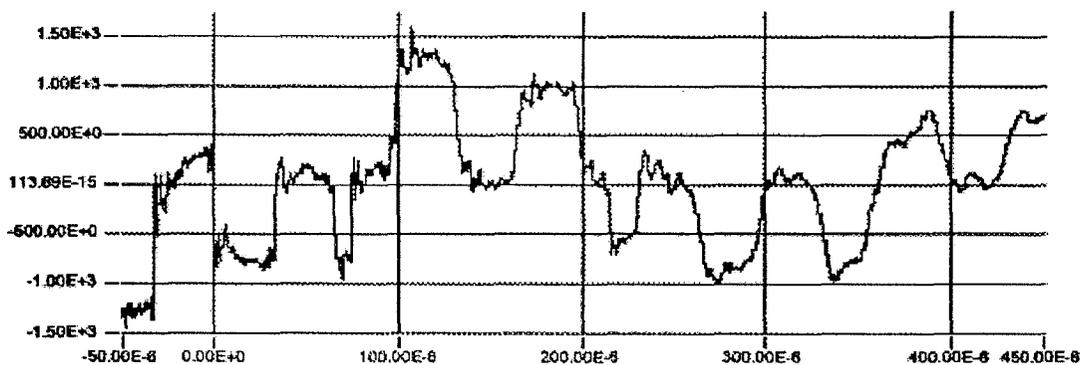


Figur 3 Beispiel einer Messung des betriebsfrequenten Rückstroms in einer GIS-Kapselung zur Abschätzung der Schirmwirkung für niederfrequente elektromagnetische Felder. Die Messungen galten der Abklärung allfälligen Beeinflussungen einer Leittechnikanlage.

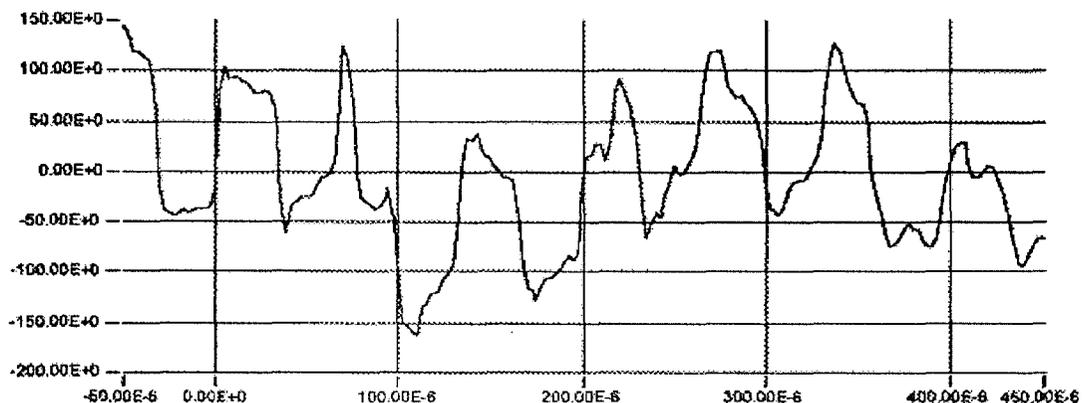


Figur 4 Versuchsaufbau für eine Stossimpedanzmessung an einem Mast einer Hochspannungsfreileitung. Eine Phase eines freigeschalteten Dreiphasensystem wurde mit Gleichspannung aufgeladen und über eine an einem definierten Mast angebrachte Kugelfunkenstrecke entladen (ETH-Diplomarbeit: G. Storf, S. Ansorge, 1994, mit Unterstützung durch die NOK). Die Abklärungen galten unter Anderem der Beeinflussungsfrage von in der Nähe verlegten Signalkabeln.

- 1: Gleichspannungsquelle
- 2: Spannungsmessung zwischen dem Mastpotential und den nicht benötigten Phasen, die an den Nachbarmasten geerdet waren.
- 3: Spannungsteiler zwischen Mastfuss und Mastspitze
- 4: Kugelfunkenstrecke zwischen der aufgeladenen Phase und der Mastspitze, Impulsstrommessung über Lichtleiterstrecke.



A



Figur 5 Ergebnis der Stossimpedanzmessung bei einer Leitungsladespannung von 80 kV. Die rechteckförmigen Schwingungen stellen Wanderwellenvorgänge auf der Freileitung dar. (ETH-Diplomarbeit: G. Storf, S. Ansorge, 1994).

- Oben: Oszillogramm der transienten Differenzspannung zwischen dem Mast und einem Referenzpunkt in 20 m Abstand vom Mast.
 Unten: Oszillogramm des transienten Stromverlaufs im Erdungsband des Masts.

| | | | |
|--------------------|--------------|----------------|---------------|
| Abgottspohn | Ivo | Walliser EW | Chippis |
| Aebersold | Andreas | NSE | Villmergen |
| Arangeh | Dordaneh | ABB | Zürich |
| Arnet | Thomas | EKZ | Zürich |
| Arnold | Martin | Arnold | Opfikon |
| Aschwanden Dr. | Thomas | BKW | Bern 25 |
| Bachmann | Urs | AEK | Solothurn |
| Bachofen | Felix | Alstom | Oberentfelden |
| Bernhard | Hans | ESATEC | Schaffhausen |
| Bertschi | Beat | Pfiffner | Hirschthal |
| Berz | Roland | Novartis | Basel |
| Bétrisey | Claude-Alain | Grande-Dixence | Sion |
| Biasiutti Dr. | Gianni | KWO | Innertkirchen |
| Böni | Franz | ESATEC | Schaffhausen |
| Bräunlich Dr. | Reinhold | FKH | Zürich |
| Brantschen | Florian | Grande Dixence | Sion |
| Brettschneider | Josef | EKZ | Zürich |
| Bruchert | Michael | ABB | Zürich |
| Büsch Dr. | Werner | Alstom | Oberentfelden |
| Burgert | Andreas | FKH | Zürich |
| Chatelain | Michel | ESTI | Fehraltorf |
| Conrad | Guido | KHR | Thuisis |
| Cornila | Vasile | Bakoplan | Dübendorf |
| Crameri | Dario | ABB | Sulz |
| Dutoit | Jacques | ENSA | Corcelles |
| Egli | Stefan | diAX | Zürich |
| Friedrich Dr. | Giorgio | diAx | Zürich |
| Fröhlich Prof. Dr. | Klaus | ETHZ | Zürich |
| Füglister | Hilmar | NOK | Baden |
| Geiser | Rudolf | EWW | Langenthal |
| Guérig | Adrien | NOK | Baden |
| Hänny | Daniel | WW Zug | Zug |
| Hässig | Martin | FKH | Zürich |
| Hager Dr. | Helmut | FH Burgdorf | Burgdorf |
| Hak | Jaromir | IWB | Basel |
| Hayoz | Patrick | SBB | Zollikofen |
| Hediger | Josef | EW Bez. Schwyz | Schwyz |
| Heer | Alfred | WW Zug | Zug |
| Hunziker | Patrick | Stationenbau | Villmergen |
| Hurni | Jakob | Swisscom | Fribourg |
| Ianoz Prof. Dr. | Michel | EPFL | Lausanne 9 |
| Imboden | Beat | Rhonewerke | Chippis |
| Kindlimann | Thomas | Holderbank | Holderbank |
| Knudsen | Olav | ABB | Zürich |
| Köppel | Herbert | ESATEC | Schaffhausen |
| Kostovic' | Jadran | ABB | Zürich |
| Kübler | Andrè | CPE | Baden |
| Kuonen | Gerold | ABB | Zürich |
| Läderach | Serge | EGL | Laufenburg |

| | | | |
|--------------------|---------------------|-----------------|----------------------------|
| Lauber | Alfred | ABB | Zürich |
| Leuenberger | Urs | BKW | Mühleberg |
| Lowak | Henrik | Arnold | Opfikon |
| Lüscher | Robert | Alstom | Oberentfelden |
| Lutz | Martin | EMC | Laufen |
| Marbach | Paul | EWB | Bern |
| Maron | Martin | KHR | Thusis |
| Marthaler | Hanspeter | EKZ | Zürich |
| Marti | Roland | FKH | Zürich |
| Marty | Dario | ESTI | Fehraltorf |
| Mathis | Peter | SBB | Zollikofen |
| Meier | Rudolf | Brugg | Brugg |
| Mele | Adamo | FKH | Zürich |
| Mendik | Michael | ABB | Zürich |
| Miesch | Markus | Alstom | Oberentfelden |
| Moor | Daniel | NOK | Baden |
| Morger | Beat | Alstom | Oberentfelden |
| Narayan | Venkat | Netzconsult | Spreitenbach |
| Neuhold | Stefan | FKH | Zürich |
| Noser | Valentin | KKW Leibstadt | Leibstadt |
| Orzan Dr. Ott | David Hans-Peter | BKW OCME | Bern 25 Schinznach-Dorf |
| Palmieri | Gerardo | Alstom | Oberentfelden |
| Peck | David | ABB | Turgi |
| Pfister | Dieter | HSK | Villigen-HSK |
| Philipona | Markus | EWB | Bern |
| Rais | Gustav | VSE | Zürich |
| Renner | Gustavo | Presco | Andermatt |
| Richard | Marcel | ENSA | Corcelles |
| Rieger | Roman | ESTI | Mörschwil |
| Rodewald Prof. Dr. | Arnold | | Reinach |
| Rothen | Hanspeter | BKW | Bern 25 |
| Rütschi | Heidi | FKH | Zürich |
| Schär | Rolf | Swisscom | Fribourg |
| Scheidegger | Hugo | St.Betr.Olten | Olten |
| Scheidegger | Robert | AEK | Solothurn |
| Schlesiger | Günter | EGL | Laufenburg |
| Schmid Dr. | Roland | Dätwyler | Altdorf |
| Schmutz | Rene | VA-TECH SAT | Hünenberg |
| Schoch | Werner | Romande Energie | Morges 1 |
| Schüepp | Xaver | ABB | Zürich |
| Schwendinger | Max | NOK | Baden |
| Seiterle | Alfred | Aeroplan | Rümlang |
| Singer | Rolf | EKS | Schaffhausen |
| Sonderegger | Gallus | NOK | Baden |
| Steiger | Martin | FKH | Zürich |
| Steinmann | Christoph | EWZ | Zürich |
| Storf | Günther | FKH | Zürich |
| Strub | Helmut | NOK | Zürich |
| Stuber | Kurt | Holderbank | Holderbank |
| Studer | Hugo | St.Betr. Olten | Olten |
| Tabara Dr. | Daniel | EPFL | Lausanne |



| Trotti | François | Montena | Rossens |
|-----------------|----------|--------------------|--------------|
| Vaudroz | Raymond | Siemens Schweiz AG | Renes |
| Vogt | Peter | EKS | Schaffhausen |
| Vogt | Rolf | EGL | Laufenburg |
| Von Arx | Markus | SBB | Zollikofen |
| von Deschwanden | Toni | FKH | Zürich |
| Wirth | Peter | SEV | Sedrun |
| Wirth | Urs | ABB | Zürich |
| Wirz | Rolf | ATEL | Olten |
| Witschi | Stefan | BKW | Bern 25 |
| Wyssa | Claude | EOS | Lausanne |
| Zimmermann | Gerhard | NOK | Baden |
| Zimmermann Dr. | Heinrich | ATEL | Olten |
| Zufferey | Jacques | KW Gougra | Chippis |
| Zweiacker Dr. | Pierre | EPFL | Lausanne |