Einkopplung von Störspannungen in geschirmte Leitungen einer Schaltanlage

Autor(en): **Albiez, M. / Meppelink, J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **80 (1989)**

Heft 5

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-903647

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Einkopplung von Störspannungen in geschirmte Leitungen einer Schaltanlage

M. Albiez, J. Meppelink

In dieser Arbeit wird die Beeinflussung von geschirmten Leitungen durch im Schirm fliessende Störströme behandelt. Die Entstehung dieser Störströme im Erdungssystem einer Schaltanlage wird erläutert. Die Untersuchungen der eingekoppelten Störspannungen wurde im Zeit- und Frequenzbereich mit galvanisch in den Kabelmantel eingespeisten Störströmen durchgeführt. Ein Zusammenhang zwischen Störstrom und eingekoppelter Störspannung wird hergestellt.

Ce travail traite de l'influence excercée sur les lignes blindées par les courants perturbateurs circulant dans l'écran. On explique la génération de ces courants dans le système de mise à la terre d'un appareillage de couplage. Les études des tensions perturbatrices couplées ont été exécutées en temps et en fréquence à l'aide de courants perturbateurs alimentés dans la gaine de câble par voie galvanique. Une relation a été établie entre le courant perturbateur et la tension perturbatrice couplée.

Adresse der Autoren

Dipl. Ing. *Manfred Albiez*, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich und Dr. Ing. *Jan Meppelink*, Leiter der Grundlagenentwicklung Hochspannungstechnik und EMV-Prüftechnik im Geschäftsbereich Hochspannungsschaltanlagen, Asea Brown Boveri AG, 8050 Zürich.

Schalthandlungen mit Trenner- und Leistungsschaltern oder Blitzeinschläge in die Erdungsanlage führen zu transienten Potentialdifferenzen im Erdungssystem einer Schaltanlage. Insbesondere bei SF_6-gasisolierten Schaltanlagen ist mit Ausgleichsvorgängen im ns-Bereich, den sogenannten Very Fast Transients (VFT), zu rechnen [1; 2; 3]. Die Wirkungen solcher transienter Potentialdifferenzen betreffen:

- die Hardware von Sekundäreinrichtungen der Leittechnik,
- die Funktion der Sekundäreinrichtungen,
- Personen.

Die Sekundäreinrichtungen der Schaltanlagen sind über Kabel mit Steuer und Hilfseinrichtungen von Apparaten, die zunehmend mit elektronischen Komponenten versehen sind, sowie mit elektronischen Sensoren verbunden. Hier bewirken elektromagnetische Vorgänge eine Stromeinkopplung auf die Schirme der Kabel mit der Folge transienter Spannungen zwischen Innenleitern und Schirm sowie zwischen den Innenleitern. Diese transienten Spannungen wiederum können die Funktionsfähigkeit der Sekundärgeräte beeinträchtigen oder im schlimmsten Fall zur Zerstörung des Gerätes führen, wenn keine Massnahmen zur Sicherstellung der elektromagnetischen Verträglichkeit getroffen wurden.

Während die Erdungsanlage im allgemeinen nach den Standards zur Beherrschung von Berührungsspannungen bei betriebsfrequenten Kurzschlussströmen auszulegen ist, wird darüber hinaus für die Beherrschung der Wirkung transienter Potentialdifferenzen eine Modifikation der Erdungsanlage vorgenommen, wenn

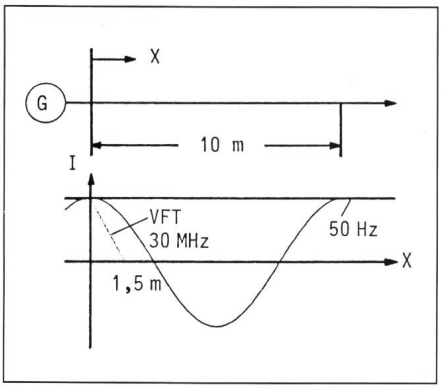
- die Betriebsspannungsebene hoch ist,
- SF_6-gasisolierte Anlagen eingesetzt werden,
- Mikroprozessoren und Mikrocomputer in der Leit- und Schutztechnik eingesetzt werden,
- Personenschutz zu beachten ist,
- elektronische Sensoren zur On-line-Überwachung von Schaltanlagen eingesetzt werden.

Hinsichtlich der Auswahl geeigneter Kabel für die Leittechnik ist zu bemerken, dass man ein Optimum zwischen perfektem Erdungssystem und einfachen Kabeln, einfachem Erdungssystem und sehr gut geschirmten Kabeln suchen muss. Als wirtschaftlich und technisch optimale Lösung kommen zwei gekoppelte Erdungssysteme in Frage:

- ein Erdungssystem für netzfrequente Vorgänge,
- ein überlagertes Erdungssystem, das insbesondere die transienten Vorgänge beherrschen muss.

Spannungs- und Stromverhältnisse im Erdungssystem einer Schaltanlage

Die Notwendigkeit der unterschiedlichen Behandlung von Erdungssystemen für nieder- und hochfrequente Vorgänge wird in Figur 1 verdeutlicht. Die Stromverteilung auf einer 10 m langen Erdungsschiene zu einem bestimmten Zeitpunkt zeigt, dass die Wellenlänge einer mit der Frequenz von 30 MHz eingespeisten Sinusschwingung gerade der Leitungslänge von 10 m entspricht, d.h. dass der Strom (und die Spannung) auf der Leitung ortsabhängig ist. Der 50-Hz-Schwingung entspricht eine Wellenlänge von 6000 km; die Stromverteilung kann demnach über einer Länge von 10 m als konstant angesehen wer-



Figur 1 Stromverteilung über einer 10 m langen Erdungsschiene
für die Frequenzen $f = 50$ Hz und $f = 30$ MHz sowie einen VFT-Stromsprung mit der Anstiegszeit $T_a = 5$ns

den. Ein VFT (z.B. mit einer Anstiegszeit von 5 ns), der mit der Lichtgeschwindigkeit fortschreitet, legt in 5 ns die Strecke von 1,5 m zurück.

Bei einer 50-Hz-Schwingung ergibt sich eine Potentialdifferenz in einer räumlich begrenzten Anlage allein durch den mit einem Stromfluss verbundenen Spannungsabfall längs der Strecke zwischen Anfangs- und Endpunkt, mit dem Proportionalitätsfaktor Impedanz. Bei einer Frequenz von 30 MHz entsteht auf einer Strecke von 2,5 m eine Potentialdifferenz, die dem Spannungsmaximum entspricht. Diese Potentialdifferenz führt zu transienten Ausgleichsströmen. Ein VFT mit einer Anstiegszeit T_a von 5 ns erreicht eine Potentialdifferenz von 100% bereits auf einer Strecke von 1,5 m. Der konstruktive Aufbau des Erdungssystems ist für die Höhe der auftretenden Spannungsmaxima entscheidend.

Auslegung des Erdungssystems einer gasisolierten Schaltanlage

Das Erdungssystem für die Beherrschung niederfrequenter Potentialdifferenzen aufgrund von betriebsfrequenten Kurzschlussströmen wird nach den internationalen Empfehlungen [4; 5] ausgeführt, d.h. die Berührungsspannungen und Schrittspannungen werden im Fehlerfall so klein wie nötig gehalten. Als Resultat erhält man ein Erdungsnetz (z.B. aus Kupferbändern) mit einer relativ grossen Maschenweite, das auf die maximal möglichen Kurzschlussströme dimensioniert wird. Im Gegensatz dazu wird ein für transiente Vorgänge dimensioniertes Erdungssystem (EMV-Erdungssystem) nach den folgenden Kriterien ausgelegt:

- Potentialdifferenzen sollen im Erdungssystem möglichst klein bleiben.
- Verlegte Kabel sollen möglichst wenig beeinflusst werden.

Ein EMV-Erdungssystems sollte – obwohl derzeit nicht standardisiert – ebenfalls vermascht aufgebaut werden, unter Ausnutzung der bestehenden Gebäudestrukturen (Betoneisen) und der Blitzschutzeinrichtungen. Als EMV-Erdungssystem bietet sich die Armierung aus engmaschigen Baustahlgittermatten im Zement des Fussbodens und der Wände an. Bei der Wahl der Verbindungen der beiden Erdungssysteme untereinander und mit der Kapselung der gasisolierten Schaltanlage (Fig. 2) müssen folgende Randbedingungen erfüllt werden:

- Niederfrequente Berührspannungen haben den nationalen und internationalen Standards zu entsprechen.
- Das EMV-Erdungssystem darf im Fall eines Kurzschlusses nicht thermisch überlastet werden.

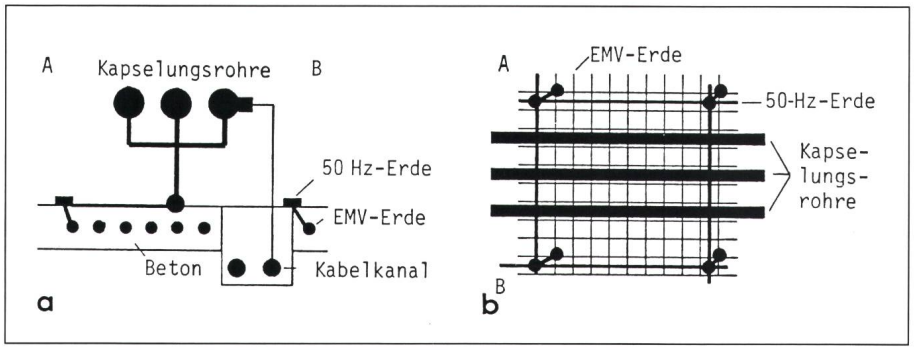
Die Kapselungsrohre und gasisolierten Apparate sind mit der Tragkonstruktion am Boden verankert und werden dort mit dem Erdungssystem für niederfrequente Vorgänge verbunden. An denselben Stellen wird sinnvollerweise auch das EMV-Erdungssystem angeschlossen. Die Kapselungsrohre werden am Eingang eines Gebäudes mit einer Manschette versehen, die an das vorhandene Betoneisen in der Wand angeschlossen wird [6]. Bei anderer Gebäudekonstruktion werden metallische Fassadenverkleidungen mit den Kapselungsrohren verbunden. An gleicher Stelle wird eine stromtragfähige Verbindung zum Erdungssystem für niederfrequente Vorgänge gelegt.

Die beste, aber auch die aufwendigste Lösung für die Ausführung eines EMV-Erdungssystems nach den oben genannten Kriterien wäre eine durchgehende (Metall-)Platte (statt des Gitterflächenleiters). Im folgenden wird ein Vergleich verschiedener EMV-Erdungssysteme durch die Untersuchung der Stromeinkopplung auf den Schirm eines Kabels vorgenommen.

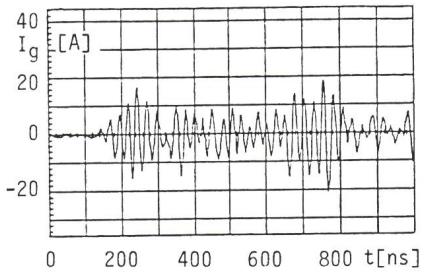
Einfluss des EMV-Erdungssystems auf die Stromeinkopplung in Kabelschirme

Eine Strommessung in einem EMV-Erdungssystem ist der Ausgangspunkt zur Untersuchung der Kabelbeeinflussung. Hervorgerufen wurde der Strom im Erdungssystem einer SF_6-gasisolierten 800-kV-Schaltanlage durch eine Trennerschaltung. Der Funkendurchschlag zwischen den Schaltkontakten einer SF_6-Schaltanlage vollzieht sich in wenigen Nanosekunden [7]. Der dabei entstehende steile Spannungssprung breitet sich als VFT in der Schaltanlage aus [1]. Dabei entsteht eine Auskopplung des VFT über die Freiluft-Durchführung der SF_6-Anlage in das Erdungssystem. Unter vereinfachten Annahmen (Abstrahlung nicht berücksichtigt) wird dabei in das EMV-Erdungssystem aus engmaschigem Metallgitter ein Strom eingeprägt, dessen Amplitude mit Kenntnis der transienten Impedanzverhältnisse abgeschätzt werden kann.

Als Beispiel für die Grössenordnung solcher Ströme zeigt die Figur 3 den Strom im vermaschten EMV-Erdungssystem einer 800-kV-Pilot-Schaltanlage [6]. Der Strom I_g wurde in einem Gitterstab (Durchmesser d = 3 mm)



Figur 2 Erdungssystem einer gasisolierten Schaltanlage (GIS), Schnitt A–B
a Seitensicht
b Aufsicht



Figur 3 Strommessung im EMV-Erdungssystem aus 150×3-Baustahlgittermatten einer 800-kV-GIS

des Gitterflächenleiters (Maschenweite $a = 150$ mm) mit einer Strommesszange Tektronix P6021 gemessen. Der im EMV-Erdungssystems fliessende Strom I_g hat eine Amplitude von etwa 20 A und eine Frequenz von 40 MHz mit einer Schwebung von etwa 2,5 MHz; diese Stromhöhe und die Frequenzen sind anlagenspezifisch.

Aus der Kenntnis der Stromamplitude I_g lässt sich der Strom im Mantel eines parallel zum EMV-Erdungssystem liegenden Kabels abschätzen. Längs des EMV-Erdungssystems verursacht der Erdstrom I_g einen zur Impendanz des Gitters proportionalen Spannungsabfall. Diese Potentialdifferenz bestimmt zusammen mit dem magnetischen Feld des Stromes I_g den Strom im Kabelmantel. In den folgenden Berechnungen wird der Kabelmantel durch einen Draht modelliert, unter Berücksichtigung des Skineffekts.

Das Erdungssystem soll einen Faraday-Käfig bilden mit einer Stahlplatte sehr grosser Ausdehnung als Boden. Die Stahlplatte sei an den äusseren Rändern mit den Wänden und diese wiederum mit der Decke des angenommenen Raumes galvanisch verbunden, so dass ein Strom innerhalb des Erdungssystems ausserhalb des Faraday-Käfigs kein magnetisches Feld hervorruft. Der Strom in der Platte sei gleichmässig mit einer «Dichte» i_p (A/m)[1] verteilt (einem Strom i_p in einer 1 m breiten Platte entsprechend). Längs der Platte verursacht dieser Strom über der Länge l einen Spannungsabfall U_p gemäss

$$U_p = Z'_p\, i_p\, l \qquad (1a)$$

mit dem Impedanzbelag[2] Z'_p für hohe Frequenzen ω [8; 9]

$$Z'_p = \varrho/2\delta + j\omega\,\frac{\mu\delta}{4}, \qquad (1b)$$

der Eindringtiefe δ des Stroms

$$\delta = (2\varrho/\omega\mu)^{1/2} \qquad (1c)$$

und dem spezifischen Widerstand ϱ der Stahlplatte. Wird unter dieser Platte im Abstand h ein Draht der Länge l gespannt und der Draht mit der Platte an der Unterseite verbunden, fliesst im Draht ein Strom I_{cp}

$$I_{cp} = U_{cp}/Z_c \quad , \qquad (1d)$$

mit der treibenden Spannung

$$U_{cp} = U_p = Z'_p\, i_p\, l \qquad (1e)$$

und der Drahtimpedanz [10]

$$Z_c = \frac{\varrho l}{2\pi\delta}(1+j) + j\omega l\,\frac{\mu_0}{\pi}\ln 4h/d_c\,. \qquad (1f)$$

Die Figur 4 zeigt den Betrag des Stroms I_{cp} im Draht unter der Platte in Funktion der Höhe h bei einem angenommenen Drahtdurchmesser d_c = 5 mm, einem spezifischen Widerstand der Platte und des Drahts von $\varrho = 1{,}5 \cdot 10^{-7}\,\Omega$m und einer Frequenz des Stromes von $f = \omega/2\pi = 30$ MHz. In der Platte wurde eine Stromverteilung $i_p = 100$ A/m angenommen. Der Strom I_{cp} ist von der Drahtlänge unabhängig und klingt mit wachsendem Abstand h exponentiell ab. Bei einer Höhe h von 1 m erreicht der Strom einen Wert von ungefähr 0,7 mA.

Das Erdungssystem aus einer durchgehenden Metallplatte stellt eine Optimallösung dar. Im folgenden werden unterschiedliche EMV-Erdungssysteme aus Stahlgittermatten verschiedener Maschenweiten und Drahtdurchmesser mit dieser Optimallösung verglichen. Die Oberfläche der verschiedenen Flächenleiter ist immer gleich gross angenommen. Im Unterschied zur durchgehenden Platte wird nun im Aussenraum des Erdungssystems ein vom Strom im Erdungssystem hervorgerufenes Streu-Magnetfeld wirksam. Der Strom im Draht I_{cg} unter einer Stahlgittermatte berechnet sich wie oben aus

$$I_{cg} = U_{cg}/Z_c\,. \qquad (2a)$$

Die treibende Spannung U_{cg} setzt sich nun aus zwei Komponenten, dem Spannungsabfall längs des Gitters und einer induzierten Spannung durch das Magnetfeld des Stroms I_g zusammen,

$$U_{cg} = j\omega\,(L'_\sigma + M'_g)\,l\; I'_g \qquad (2b)$$

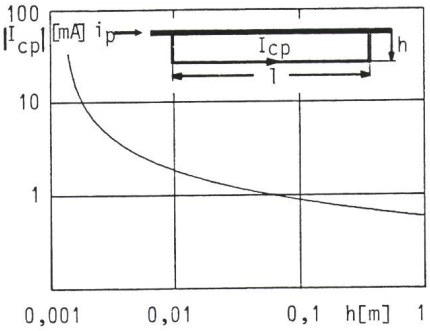
mit dem Streuinduktivitätsbelag L'_σ [8]

$$L'_\sigma = -\frac{\mu}{2\pi}\ln\left(\sin\frac{\pi d}{2a}\right), \qquad (2c)$$

und dem Gegeninduktivitätsbelag M'_g [8] zwischen Gitter und Draht

$$M'_g = \frac{\mu d}{8a}\coth\frac{\pi d}{2a} + \frac{\mu}{2\pi}\ln\frac{\sinh(\pi h/a)}{\sinh(\pi d/2a)} \qquad (2d)$$

wobei a wiederum die Maschenweite des Gitters, d der Gitterstabdurchmesser und h der Abstand des Drahts zum Gitter sein soll. Der ohmsche Spannungsabfall längs des Gitters ist sehr viel kleiner als der induktive Spannungsabfall und bleibt deshalb unberücksichtigt. Bei der Berechnung des Gegeninduktivitätsbelags M'_g wurde der Draht genau unterhalb eines Git-



Figur 4 Betrag des Stroms I_{cp} im Draht unter einer Platte im Abstand h (i_p = 100 A/m; f = 30 MHz)

[1] Dichte wird in Anführungszeichen gesetzt, um den Unterschied zur Stromdichte (A/m²) zu betonen.

[2] Der Strich bei Z'_p und weiteren Grössen weist darauf hin, dass es sich um Beläge, d.h. auf geometrische Abmessungen bezogene Grössen handelt.

terstabs positioniert (Worst-Case-Betrachtung).

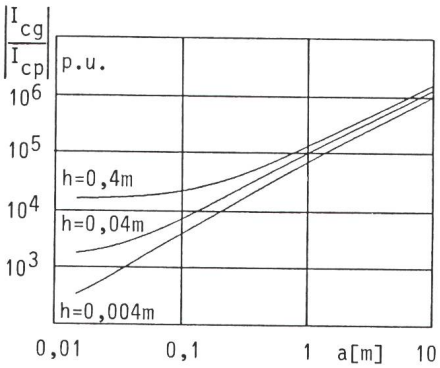
In Figur 5 wird der Betrag der Stromamplitude im Draht I_{cg}, verursacht durch einen Strom I_g in den verschiedenen Gittern, auf den Strom I_{cp}, verursacht durch einen Strom i_p in der Platte mit gleicher Stromdichte wie im Gitter, bezogen. Der Zusammenhang zwischen dem Strom I_g in einem Gitterstab und der «Stromdichte» i_p in der Platte ist durch die Maschenweite a des Gitters zu $I_g = a i_p$ gegeben.

Aufgetragen sind die Kurven in Figur 5 über der Maschenweite a bei drei unterschiedlichen Abständen h des Drahts zum Stahlgitter. Der Gitterstabdurchmesser wurde mit $d = 5$ mm gewählt. Der Einfluss des Stabdurchmessers d ist gegenüber der Variation der Maschenweite a von geringer Bedeutung. Die Figur 5 zeigt, dass durch das EMV-Erdungssystem aus engmaschigem Gitter das Verhältnis I_{cg}/I_{cp} um etwa zwei Zehnerpotenzen gegenüber dem 50-Hz-Erdungssystem (typische Maschenweite $a = 10$ m) reduziert wird.

Will man beispielsweise aus der Strommessung in Figur 3 den Strombetrag I_{cp} in einem Draht 40 mm unter einem Gitter von $a = 150$ mm und $d = 3$ mm näherungsweise bestimmen, so muss der Strom I_g in einem Gitterstab auf den gleichmässig verteilten Strom i_p in einer Platte umgerechnet werden. Mit einer Stromamplitude von $I_g = 20$ A ergibt sich mit $a = 150$ mm ein i_p von 133 A/m. In Figur 4 wurde mit $i_p = 100$ A/m bei $h = 40$ mm ein Strom $I_{cp} = 1{,}1$ mA erreicht. Für $i_p = 133$ A/m ergäbe sich somit bei $h = 40$ mm ein Strom I_{cp} im Draht unter einer Platte von ungefähr 1,4 mA. Die Stromamplitude I_{cg} im Draht unter dem 150×3-Gitter kann der Figur 5 entnommen werden und ergibt etwa 17 A. Diese Abschätzung beruht auf der Annahme eines unendlich ausgedehnten Erdungssystems mit einer homogenen Stromverteilung in der Platte bzw. im Gitter.

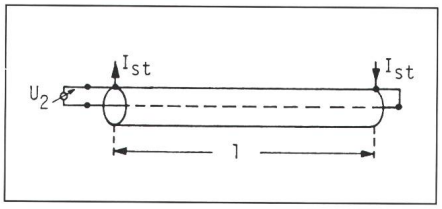
Die obigen Ausführungen wurden für einen Draht gemacht, der den beidseitig geerdeten Schirm (Kabelmantel) eines Kabels in einer Schaltanlage modelliert. Somit kann die Amplitude der in einer Schaltanlage auftretenden Kabelmantelströme abgeschätzt werden, wenn der Strom im Erdungssystem bekannt ist.

Der Strom im Kabelmantel wirkt über die Kopplungsimpedanz, deren Bedeutung im nächsten Abschnitt beschrieben ist, auf den Innenleiter des



Figur 5 Betrag der Stromamplitude im Draht I_{cg} bei unterschiedlichen Abständen h unter einem Gitter mit $d = 5$ mm

Bezugsgrösse: Strom im Draht I_{cp} unter einer Platte bei gleichem Abstand h



Figur 6 Definition der Kopplungsimpedanz
$Z_k' = U_2/(I_{st} \cdot l)$

Kabels und damit auf die an das Kabel angeschlossenen Sekundärgeräte. Bei den dabei auftretenden Störspannungen wird zwischen der

- Common-Mode-Spannung zwischen Innenleiter und Kabelmantel und der
- Differential-Mode-Spannung zwischen den einzelnen Leitern eines mehradrigen Kabels

unterschieden.

Einkopplung und Messung von Störgrössen in geschirmten Leitungen

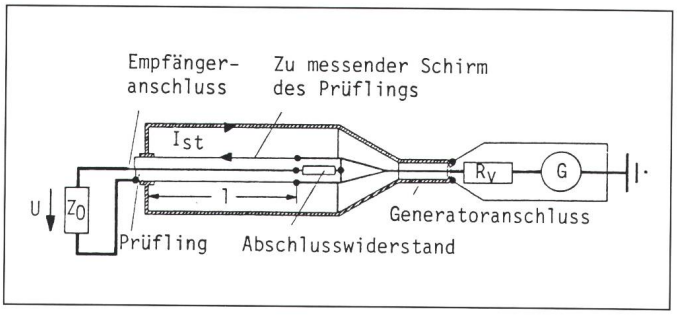
Wie in Figur 3 gezeigt, wird bei Schaltvorgängen ein Strom in das Erdungssystem eingekoppelt. Die Einkopplung von Störströmen in einen Kabelmantel erfolgt durch galvanische und induktive Kopplung der Erdströme und durch die Feldeinkopplung von Strahlungsfeldern, die als Folge einer Schalthandlung von der Hochspannungsdurchführung abgestrahlt werden [6]. Unabhängig vom Einkopplungsmechanismus erfolgt die Umsetzung des auf den Kabelmantel eingekoppelten Stroms in eine Spannung zwischen Innenleiter und Schirm des Kabels aufgrund der sogenannten Kopplungsimpedanz des Kabels. Die Kopplungsimpedanz Z_K (engl. Transfer Impendance) wird definiert als der Quotient des Spannungsabfalls U längs der inneren Seite des Kabelmantelschirms und dem Störstrom I_{st} im Kabelschirm (Fig. 6). Üblicherweise wird die Kopplungsimpedanz auf die Leitungslänge bezogen,

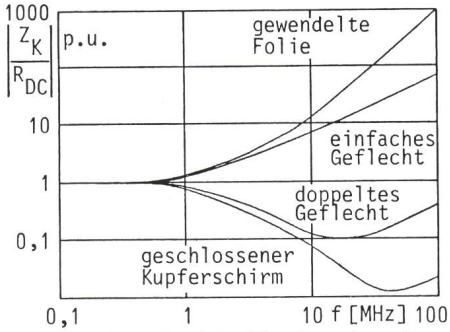
$$Z'_K = \frac{U}{I_{st}\, l} \quad . \tag{3}$$

Da die Definition einer Impedanz in Form eines (reellen) Widerstands nur für elektrisch kurze Anordnungen sinnvoll ist, beschränken sich Betrachtungen zur Kopplungsimpedanz vornehmlich auf eingeschwungene Zustände mit Wellenlängen, die gross gegenüber der Leitungslänge l sind. Die Kopplungsimpedanz Z'_K ist ein frequenzabhängiges Mass für die Schirmwirkung eines Kabelschirms; sie ist im allgemeinen eine komplexe Grösse.

Zur Messung der Kopplungsimpedanz wird in dieser Arbeit ein Versuchsaufbau nach [11] gewählt (Fig. 7), wobei das äusserste Rohr die Aufgabe der koaxialen Rückleitung des galvanisch eingeprägten Störstroms übernimmt. Die Leitung (im Innern) wird am Anfang mit einem Abschlusswiderstand, der dem Wellenwiderstand Z_0 des untersuchten Kabels entspricht, gegenüber dem Schirm abgeschlossen.

Figur 7 Messanordnung für eine geschirmte Leitung der Länge l





Figur 8 Betrag der Kopplungsimpedanz einiger gebräuchlicher Kabelschirme, bezogen auf den Gleichstromwiderstand der Schirme

Gewendelte Folie: zirkular um das Kabel gewikkelte, überlappende metallische Folienstreifen als Schirm

Einfaches Geflecht: Schirm aus metallischem Geflecht (z. B. RG 58)

Doppeltes Geflecht: Schirm aus zwei Lagen Metallgeflecht (z.B. RG 214)

Geschlossener Kupferschirm: Schirm aus überlappender Kupferfolie mit axialem Klebespalt

Am Leitungsende wird die Spannungsmessung zwischen Leitung und Schirm an einer Messimpedanz, die ebenfalls dem Wellenwiderstand Z_0 entspricht, vorgenommen. Diese Anordnung zeichnet sich durch den einfachen Versuchsaufbau aus und in der darin begründeten sehr guten Nachvollziehbarkeit der Messergebnisse; weitere Anordnungen zur Messung der Kopplungsimpedanz werden in [12] beschrieben.

Messung der eingekoppelten Störspannungen im Frequenzbereich

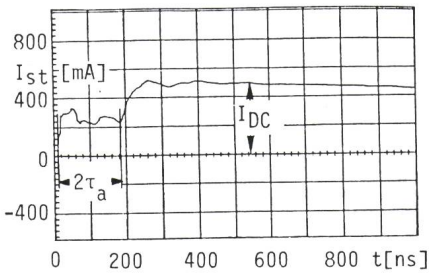
Speist man in einen Kabelschirm Ströme bekannter Grösse und variabler Frequenz ein mit der Bedingung, dass die zur Frequenz proportionale Wellenlänge der Störströme gross gegenüber der Leitungslänge ist, misst man am Ende der Leitung Störspannungen, aus denen sich der Kopplungsimpedanzverlauf Z'_K des Kabels berechnen lässt. Für Gleichstrombelastung und für Wechselströme niedriger Frequenzen entspricht Z'_K dem längenbezogenen Gleichstromwiderstand R'_{DC} des Schirms. Bei höherfrequenten Störströmen weicht der Kopplungswiderstand stark vom Gleichstromwiderstand ab infolge des Skineffekts und des Durchgriffs des durch den Störstrom I_{st} verursachten Magnetfelds auf den Innenleiter. Daraus ergibt sich der bekannte Verlauf des Betrags der Kopplungsimpedanz (Fig. 8) [6; 13]. Es ist im allgemeinen nicht möglich, den meist bei einer Kabellänge von 1 m gemessenen, bezogenen (Betrag der) Kopplungsimpedanz proportional auf grössere Leitungslängen zu übertragen. Die Ursache hierfür liegt in der Signaldämpfung im Kabel. Für Leitungslängen, die in derselben Grössenordnung wie die Wellenlänge des hochfrequenten Störstroms im Schirm liegen oder sogar grösser als diese Wellenlänge sind, bilden sich im Kabelschirm stehende Wellen aus. Die Messung der Kopplungsimpedanz wird dann ohne rechnerische Korrektur wenig aussagekräftig. Der Einfluss stehender Wellen im Kabelschirm ergibt bei der Messung einen schwingenden Verlauf der Kopplungsimpedanz, der nach [14] auch errechnet werden kann.

Messung der eingekoppelten Spannungen im Zeitbereich

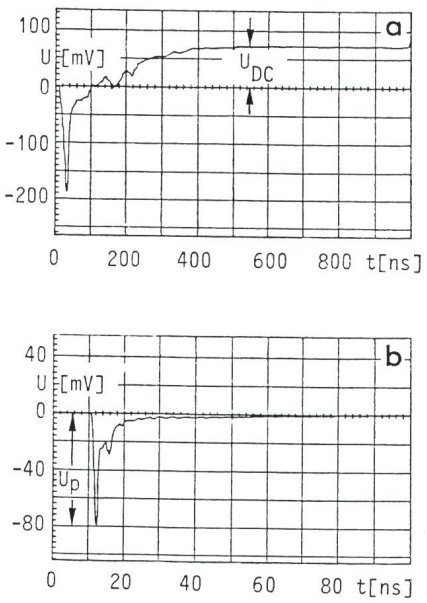
Die in einer Schaltanlage auftretenden Störgrössen sind entweder niederfrequente Störströme oder Stromsprünge (VFT) mit sehr kurzen Anstiegszeiten. Niederfrequente Kabelmantelströme beeinflussen die Innenleiter der Kabel nur proportional zum ohmschen Widerstand des Kabelschirms (Fig. 8). Der Einfluss eines VFT, einer zeitlich und örtlich veränderlichen Störgrösse im Kabelmantel, kann auch nicht mittels einer Fouriertransformation in den Frequenzbereich aus der an kurzen Proben, im eingeschwungenen Zustand gemessenen Kopplungsimpedanz ermittelt werden. Es ist deshalb nicht möglich, nur aus den in der Literatur und in den Katalogen der Hersteller angegebenen Daten der Kopplungsimpedanz im Frequenzbereich die durch einen VFT (Zeitbereich) im Kabelmantel eingekoppelte Störspannung zu quantifizieren. Der Störstrom und die eingekoppelte Störspannung müssen im Zeitbereich gemessen werden.

In der vorgestellten Anordnung zur Messung der Kopplungsimpedanz im Frequenzbereich (Fig. 7) wird der Sinusgenerator durch eine Sprungspannungsquelle ersetzt. Besondere Bedeutung kommt für Störsignalanstiegszeiten (Stromsprünge), die wesentlich kleiner als die Laufzeit des Systems zwischen Kabelschirm und koaxialem Störstromrückleiter sind, dem Vorwiderstand R_v zu; er wird so ausgelegt, dass eine zur Quelle zurücklaufende Stromwanderwelle in ihm voll absorbiert wird. Der Störstrom wird im Vorwiderstand R_v mit einer breitbandigen Strommesszange (z.B. Tektronix P6022) gemessen und mit einem Digitizer-Oszilloskop aufgezeichnet. Die Figur 9 zeigt den Verlauf des Störstroms I_{st} bei einer Kabellänge von 20 m und einer Störsignalanstiegszeit T_a von 0,1 ns. Nach der doppelten Laufzeit $2\tau_a$ im äusseren System zwischen Kabelschirm und Rückleiter trifft die am Kurzschluss zwischen Schirm und Rückleiter reflektierte Stromwanderwelle am Vorwiderstand R_v ein; der Stromwert hat sich auf den Gleichstromendwert I_{DC} verdoppelt; die transienten Vorgänge im äusseren System sind abgeschlossen.

Den Verlauf der eingekoppelten Störspannung, gemessen zwischen Kabelschirm und Innenleiter, zeigt die Figur 10a. Der (negative) Spannungspeak zu Beginn des Spannungssignals ist das Ergebnis des Durchgriffs des vom transienten Störstrom I_{st} verursachten magnetischen Felds [15; 16]. Im weiteren Verlauf des Störspannungssignals erkennt man das Ansteigen auf den Gleichspannungsabfall U_{DC} längs des Kabelschirms (entspricht dem Gleichstromwiderstand bei der Kopplungsimpedanzmessung). Der eingekoppelte Spannungspeak U_P ist grösser als der Gleichspannungsabfall U_{DC}, obwohl der Spannungspeak durch die Dämpfung im Kabel bereits verkleinert wurde. Der bei einer Kabellänge von 0,5 m gemessene Spannungspeak U_p verhält sich nicht linear zur Messung am 40mal längeren Kabel (Fig. 10a und b). Der eingekoppelte Spannungspeak U_p ist nicht auf den 40fachen Wert angewachsen, sondern wurde beim 40mal längeren Kabel nur um einen Faktor 2,3 grösser. Der auf den Gleichspannungsabfall U_{DC} der jeweiligen Kabellänge normierte



Figur 9 Zeitlicher Verlauf des Störstroms I_{st} im Vorwiderstand R_v bei l = 20 m, T_a = 0,1 ns



Figur 10 Zeitlicher Verlauf des Störspannungssignals

a $l = 20$ m, $T_a = 0{,}1$ ns

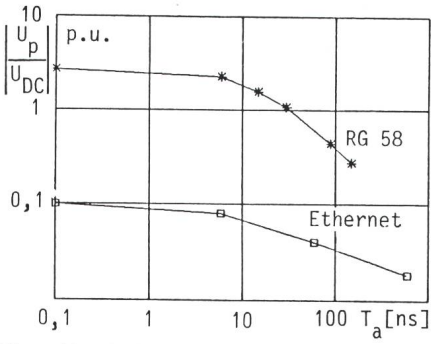
b $l = 0{,}5$ m, $T_a = 0{,}1$ ns (Kabeltyp: RG 58)

Spannungspeak nimmt also mit zunehmender Kabellänge ab. Das Störspannungsproblem reduziert sich demnach bei sehr grossen Kabellängen auf die Betrachtung des Gleichspannungsabfalls längs des Kabelschirms. Durch Variation der Anstiegszeit T_a des Störstromsprungs wird auch die Höhe des eingekoppelten Spannungspeaks U_p verändert. Eine Verkürzung der Anstiegszeit T_a führt zu einem Anwachsen des Spannungspeaks U_p (Fig. 11). Allerdings wirkt sich ab einem bestimmten Wert eine weitere Verkürzung der Anstiegszeit T_a auf die Spannungspeakhöhe praktisch nicht mehr aus; es stellt sich ein Sättigungswert der eingekoppelten Störspannung ein.

Die in Figur 11 verglichenen Koaxialkabel der Typen RG 58 und Ethernet unterscheiden sich sehr stark bezüglich ihrer Schutzwirkung gegen Kabelmantelströme; der eingekoppelte Spannungspeak U_p ist beim Ethernet deutlich kleiner als der Gleichspannungsabfall U_{DC} über dem Kabelschirm. Berücksichtigt man noch den kleineren Gleichspannungswiderstand R_{DC} des Ethernet-Schirm so ist der absolute Wert des eingekoppelten Spannungspeaks U_p beim RG 58 um einen Faktor von etwa 150 grösser. Messungen an kürzeren Kabellängen ergaben eine noch deutlichere Diskrepanz in der Schirmwirkung dieser beiden Kabel. Die Erklärung dieser Unterschiede liegt im konstruktiven Aufbau der Kabel; während das RG 58 einen Schirm aus einfachem Kupfergeflecht besitzt, hat das Ethernet zwei übereinanderliegende Kupfergeflechtschirme, zusätzlich eine gewendelte metallische Folie unter dem unteren Geflechtschirm und eine weitere gewendelte Folie aus Duofoil zwischen den Geflechtsschirmen.

Die Messung der eingekoppelten Störspannung ist natürlich auch bei mehradrigen Leitungen unter einem gemeinsamen Schirm (Steuerkabel) möglich. Will man die Störspannung in einer Ader des Kabels messen ohne Berücksichtigung der in diesem Fall leerlaufenden, zur «Messader» parallel liegenden Adern, kann das in Figur 7 vorgestellte Messsystem verwendet werden. Dieser Fall hat in der Praxis eine nur untergeordnete Bedeutung. Sehr oft sind zwei oder mehrere Adern eines Steuerkabels über Impedanzen am Anfang der Leitung miteinander verbunden. Um am Leitungsende weiterhin mit einem wellenwiderstandsgerechten Abschluss die Störspannung zu messen, müssen die Adern untereinander und gegen den Schirm mit dem jeweiligen Wellenwiderstand abgeschlossen werden (Fig. 12). Die Störspannung wird dann hochohmig (breitbandiger Tastkopf) an den Abschlusswiderständen abgegriffen.

Bei der Anordnung in Figur 12 wurden zwei beliebige Adern am Anfang der Leitung über einen Widerstand von 1 kΩ verbunden und die Ader 2 mit dem Schirm kurzgeschlossen; damit sollte ein an die Leitung angeschlossenes Gerät simuliert werden. Der Vorwiderstand R_v konnte bei der Messungsanordnung mit Steuerkabeln entfallen, da der Wellenwiderstand des Prüfgefässes mit den Kabeln gerade gleich gross wie der Quelleninnenwiderstand Z war.



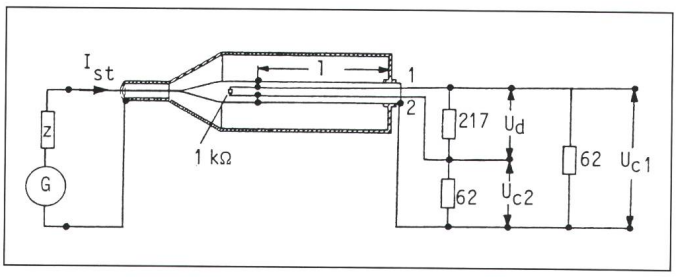
Figur 11 Auf den Gleichspannungsabfall U_{DC} normierter Betrag des eingekoppelten Spannungspeaks U_p in Abhängigkeit von der Anstiegszeit T_a des in den Kabelschirm eingespeisten Stroms

Leitungslänge jeweils l = 20 m (Kabeltypen: RG 58 und Ethernet)

Die eingekoppelte Störspannung an den einzelnen Adern (Fig. 13) zeigt bei einer Stromanstiegszeit im Schirm von T_a = 0,1 ns einen ähnlichen Verlauf wie bei einem Koaxialkabel (Fig. 10). Nach einem Spannungspeak zu Beginn des Störsignals U_{c2} folgt das Annähern an den Gleichspannungsabfall U_{DC}.

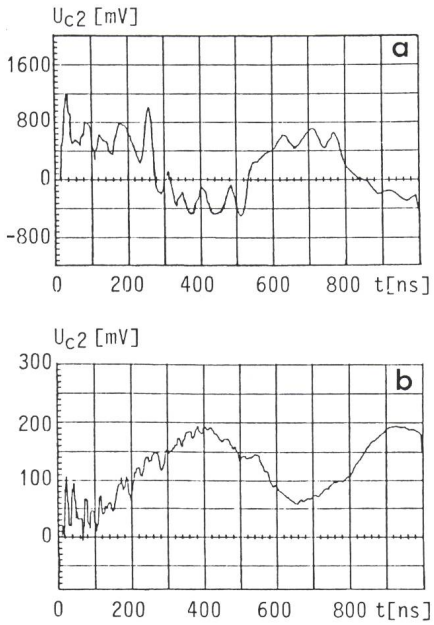
Der Verlauf des Störspannungssignals zwischen dem Spannungspeak und dem Endwert ist weniger glatt als bei einem Koaxialkabel. Dies liegt zum einen an den nicht beidseitig idealen Abschlüssen zwischen den Innenleitern und dem Schirm und zum anderen an der Beeinflussung der gemessenen Ader durch 22 weitere Adern. In Figur 13 werden zwei 24adrige Kabel mit unterschiedlicher Schirmkonstruktion verglichen. Ein Kabel mit Schirm aus Kupfergeflecht (Fig. 13a) wird einem mit einer Kupferfolie geschirmten Kabel (Fig. 13b) gegenübergestellt. Der Spannungspeak zu Beginn des Störsignals ist beim Folienkabel um einen Faktor 10 kleiner. Für die Mes-

Figur 12 Messsystem zur Störspannungsmessung bei mehradrigen Leitungen



sungen in Bild 13 wurden die Abschlusswiderstände am Ende der Leitung eliminiert. Der eingekoppelte Spannungspeak hat sich dadurch gegenüber dem Aufbau mit Abschlusswiderständen verdoppelt. Ausserdem bilden sich auf den Adern Schwingungen mit einer Periode proportional zur Leitungslänge aus. Wählt man aus den 24 Adern zwei zueinander symmetrisch liegende Adern aus, geht das Differenz-Störspannungssignal U_d während des gesamten zeitlichen Verlaufs gegen Null.

Bei den bisherigen Ausführungen wurde der durch Steckverbindungen verursachte Störspannungsabfall nicht berücksichtigt. Bei einer schlechten konstruktiven Ausführung der Stecker können diese aber wesentlich zu einem Störspannungssignal beitragen [6]. Der Kopplungswiderstand der Stecker wird deshalb getrennt nach [17] vermessen.



Figur 13 Zeitlicher Verlauf der eingekoppelten Störspannung U_{c2} bei 24adrigen Kabeln

Kupferfolie, l = 20 m, T_a = 0,1 ns, Messung ohne Abschlusswiderstände

a Schirm aus Kupfergeflecht

b Schirm aus Kupferfolie

Zusammenfassung

Bei Schalthandlungen und bei Isolationsfehlern entstehen im Erdungssystem von Hochspannungsanlagen transiente Potentialdifferenzen. Das Erdungssystem wird so ausgelegt, dass betriebsfrequente Fehlerströme keine unzulässig hohen Berührungsspannungen hervorrufen. Eine Modifikation dieses Erdungssystems durch Überlagerung eines engmaschigen Gitters liefert einen Beitrag zur Begrenzung der Potentialdifferenzen auch bei transienten Vorgängen. Dennoch kommt es zur Einkopplung von transienten Störströmen auf die Schirme von Mess- und Steuerleitungen und damit zu Störspannungen auf den Leitern. Ein Kriterium für die Auswahl der Abschirmung der Leitungen ist der von den Herstellern angegebene Kopplungswiderstand pro Längeneinheit, der an kurzen Proben unter definierten Bedingungen im Frequenzbereich gemessen wird. Die Berechnung der bei langen Leitungen eingekoppelten Störspannung durch eine einfache Multiplikation des Kopplungswiderstands mit einer Konstanten ist nicht möglich, da längenabhängige Dämpfungs- und Verzerrungseffekte auftreten. Versuche an einer Messeinrichtung mit 20 m langen Steuerleitungen, in deren Schirm Stromimpulse variabler Anstiegszeit eingekoppelt wurden, haben dies bestätigt. Die eingekoppelte Spannung strebt mit zunehmender Länge einem Grenzwert zu. Von wesentlichem Einfluss ist die Wahl der Schirmung. So zeigen Abschirmungen mit in Längsrichtung auf die Adern aufgebrachter Metallfolie wesentlich kleinere Störspannungen als solche mit flexiblen Geflechtschirmen.

Literatur

[1] *J. Meppelink* a. o.: Very fast transients in GIS. IEEE Power Engineering Society (PES) Winter Meeting, New York, January 31...February 5, 1988; paper 114.1.

[2] *W. Buesch, H. Stephanides* and *T. Heinemann:* Attenuation of fast transients in GIS earthing systems. Rapport CIGRE 23-10, 1988.

[3] *F. Chevalley* et *H. Sauvain:* Protection des microcalculateurs de contrôle-commande distribués dans les postes blindés SF_6 contre les perturbations électromagnétiques. Rapport CIGRE 36-05, 1988.

[4] Guide for safety in AC substation grounding. IEEE-Standard 80-1986.

[5] Regeln des SEV: Erden als Schutzmassnahme in elektrischen Starkstromanlagen. Teil 1: Bestimmungen, Publikation des SEV Nr. 3569-1.1985

[6] *J. Meppelink:* Elektromagnetische Verträglichkeit bei SF_6-gasisolierten Schaltanlagen. Bull. SEV/VSE 77(1986)23, S. 1497...1500.

[7] Very fast transient phenomena associated with gas insulated substations. Paper presented at the request of Study Committees 33 and 13. Rapport CIGRE 33-13, 1988.

[8] *N.R. Hylten-Cavallius* and *T.N. Giao:* Floor net used as ground return in high-voltage test areas. IEEE Trans. PAS 88(1969)7, p. 996...1005.

[9] *G. Lautz:* Elektromagnetische Felder. 2. Auflage. Stuttgart, Teubner, 1976.

[10] *H.H. Meinke* und *F.W. Gundlach:* Taschenbuch der Hochfrequenztechnik. 3. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1968.

[11] Hochfrequenz (HF)-Kabel und -Leitungen. DIN 47250, Februar 1983.

[12] Câbles pour fréquences radioélectriques. Première partie: Prescriptions générales et méthodes de mesure. Publication de la CEI 96-1, 4e édition, 1986.

[13] *H. Kaden:* Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik. 2. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1959.

[14] *H. Jungfer:* Die Messung des Kopplungswiderstands von Kabelabschirmungen bei hohen Frequenzen. NTZ 9(1956)12, S. 553...560.

[15] *J. Herold:* Der Kopplungswiderstand koaxialer Leitungen im Zeit- und Frequenzbereich. Abhandlungen des Instituts für Elektrische Anlagen und Hochspannungstechnik der Universität Karlsruhe Nr. 27, 1977.

[16] *E.P. Fowler:* Superscreened cables. Radio and Electronic Engineers 49(1979)1, p. 38...44.

[17] Luft- und Raumfahrt; Elektrische Rundsteckverbinder; Technische Lieferbedingungen, DIN 65002, September 1986.

ABB zum Thema Stromübertragung und Stromverteilung

Wir schalten weltweit schnell, damit Sie beruhigt abschalten können.

MACH

ABB Brown Boveri AG
5401 Baden

ABB
ASEA BROWN BOVERI