

Ankopplung der Kommunikationseinrichtungen über Hochspannungsleitungen

Joachim Schmid, Emil Haefely & Cie. AG

1. Einleitung

Die Betreiber von Hochspannungsnetzen haben einen grossen Bedarf an Kommunikation zwischen teilweise weit entfernt liegenden Stationen und Einrichtungen. Neben der Übertragung von Sprache spielt dabei auch die Übertragung von Daten, z.B. Messwerten für Schutzzwecke und Steuersignale zur Fernwirkung eine grosse Rolle. Es ist deshalb von Vorteil für diese Art von Kommunikation separate Übertragungswege zu benutzen, die dauernd zur Verfügung stehen, daneben aber auch wirtschaftlich sind.

Für die Kommunikation stehen den EVU verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Die Übertragung der Nachrichten unter Benutzung der vorhandenen Hochspannungsleitungen mit Hilfe von modulierten Trägerfrequenzen ist eine dieser Möglichkeiten. Da die Übertragung auf Hochspannung erfolgt, erfordert die TFH spezielle Bauelemente welche nach hochspannungs- und hochstromtechnischen Gesichtspunkten konstruiert sind.

In diesem Bericht wird diese Art der Nachrichtenübertragung beschrieben und dabei hauptsächlich auf die hochspannungstechnischen Bauteile eingegangen.

2. Trägerfrequenzübertragung auf Hochspannungsleitungen (TFH)

Die Trägerfrequenzübertragung auf Hochspannungsleitungen, oder kurz TFH, wurde schon vor Jahren als rückläufige Technik bezeichnet. Doch auch im Zeitalter der modernen Telekommunikation mit Lichtwellenleiterübertragung und Funk spielt die TFH weiter eine grosse Rolle und wird diese auch in Zukunft spielen. Neben dem Vorteil der langjährigen Erfahrung dieser Technik und somit der ausgereiften Bauelemente, ist auch in Zukunft der Vorteil des vorhandenen Hochspannungsnetztes, das zur Kommunikation verwendet wird, nicht zu unterschätzen.

TFH zur Kommunikation im EVU Bereich wird bei der Fernmessung, Fernsteuerung, der Sprachübertragung per Telefon und anderen Gebieten angewendet. Das Prinzip der TFH ist die Übertragung eines trägerfrequenten Signals über die Hochspannungsleitungen als Übertragungsmedium. Das Signal im Frequenzbereich zwischen 30 und 500 kHz ist mit der zu übertragenden Information moduliert. Die einzelnen Übertragungskanäle haben dabei eine Bandbreite von ca. 3 kHz.

Der prinzipielle Aufbau einer solchen Übertragungsstrecke ist im Bild 3 gezeigt. Sie lässt sich in zwei Hauptbereiche einteilen, den Niederspannungs- oder Telekommunikationsbereich und den Hochspannungsbereich.

Die zur Übertragung bestimmten Signale werden in den TFH-Geräten auf die Trägerfrequenz moduliert und das so modulierte Signal wird dann abgesandt. Als Bindeglied zur Hochspannung dient dann der Ankoppelvierpol, über den dann das TFH-Signal dem Koppelkondensator zugeführt wird, der das hochfrequente Signal auf die Hochspannungsleitung überträgt. Die TFH-Sperren sorgen dafür, dass die Information nur in die gewünschte Richtung übertragen wird und nicht im gesamten Netz verteilt wird. An der gegenüberliegenden Seite wird das Signal wieder über einen Koppelkondensator ausgekoppelt, durch den Ankoppelvierpol an die Kommunikationseinrichtung angepasst und dem Empfänger zugeleitet.

Die Betriebssicherheit der Hochspannungsleitung und der Schaltstationen darf durch die Trägerfrequenzverbindung nicht beeinträchtigt werden, was für die Dimensionierung und die Konstruktion der speziellen TFH-Apparaten von grosser Bedeutung ist.

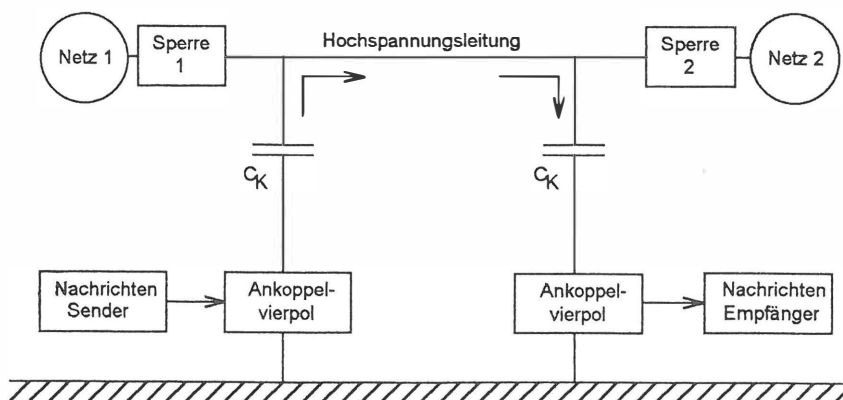


Bild 1
Prinzip einer TFH-
Übertragungsstrecke

3. Kopplung der Telekommunikationseinrichtungen auf die Hochspannungsleitung

3.1 Ankopplungsarten

Das Hochspannungsnetz kann unterschiedlich zur Übertragung des TFH-Signals verwendet werden, je nachdem wie die Ankopplung geschieht. Es wird im allgemeinen zwischen drei verschiedenen Ankopplungsarten unterschieden (Bild 2).

Die Einleiterankopplung benötigt am wenigsten Bauteile, weswegen sie aus wirtschaftlichen Gründen bevorzugt wird. Sie hat jedoch eine grössere Dämpfung als die beiden anderen Kopplungsarten und ist anfälliger gegen Störsignale. Für hohe Spannungen und in, mit grösseren Störpegel behafteten, Höchstspannungsnetzen werden deshalb die Zweileiterkopplung oder die Zwischensystemkopplung bevorzugt. Ein weiterer Vorteil der Zweileiterkopplung und der Zwischensystemkopplung ist die höhere Sicherheit bei Bruch eines Koppelleiters. Bei der Zwischensystemkopplung kann eines der Drehstromsysteme dazwischen geerdet werden und die TFH Übertragung bleibt trotzdem betriebsfähig.

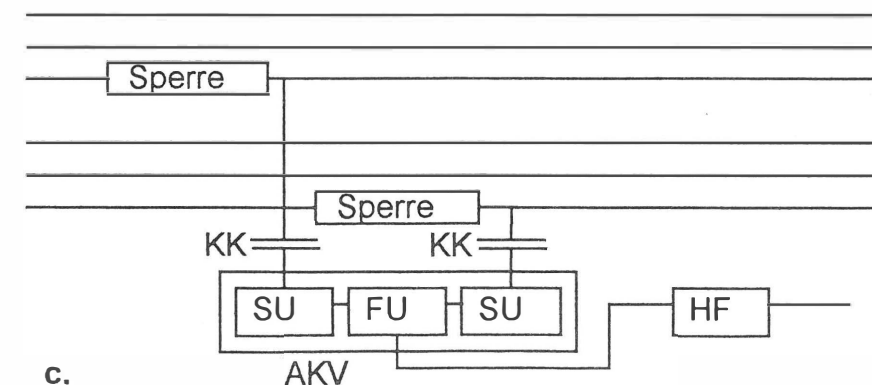
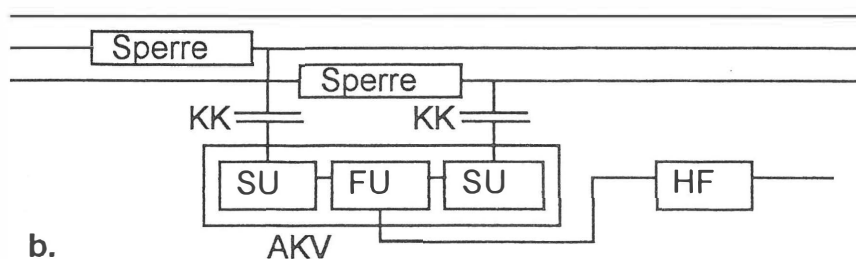
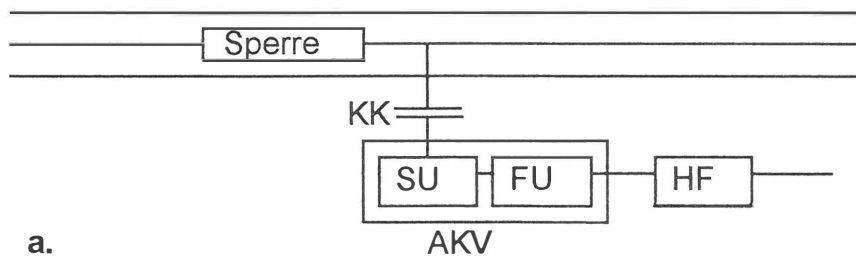


Bild 2
Ankopplungsarten:

- a. Einleiterkopplung
- b. Zweileiterkopplung
- c. Zwischensystemkopplung

KK - Koppelkondensator
SU - Schutzeinheit
FU - Filtereinheit
AKV - Ankoppelvierpol
HF - HF-Einrichtung

3.2 Ankoppelvierpol

Der Ankoppelvierpol, welcher zwischen den Telekommunikationselementen und dem Hochspannungselementen der Übertragungsstrecke liegt, besteht in der Hauptsache aus einem Schutzteil und einem Filterteil. (siehe Bild 3).

Der Ankoppelvierpol hat verschiedene Aufgaben zu erfüllen. Er dient zusammen mit dem Koppelkondensator zur Frequenzabstimmung auf die zu übertragende TFH-Frequenzen. Ein geeigneter Transformator im Ankoppelvierpol passt die Impedanz der Hochspannungsleitung (etwa 250 bis 700 Ohm) an die Impedanz der Trägerfrequenzverbindungen zum TFH-Empfänger bzw. -Sender (typisch 75 Ohm) an. Er dient ebenfalls zur galvanischen Trennung zwischen Primär- und Sekundäranschlüssen des Ankoppelvierpols.

Eine Ableitdrossel im Ankoppelvierpol leitet den 50 Hz Ladestrom des Koppelkondensators gegen Erde ab. Geeignete Ableiter und Schutzfunkenstrecken dienen als Schutz vor transienten Überspannungen, welche von der Hochspannungsleitung kommen. Ausserdem ist noch eine direkte Erdung der Primäranschlüsse in den Koppelvierpolen integriert.

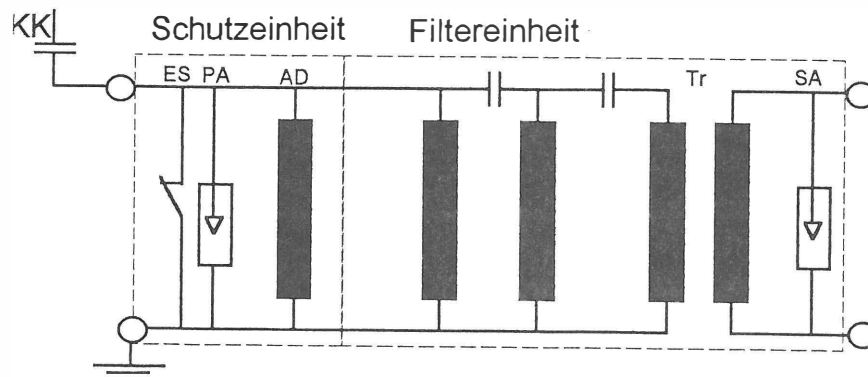


Bild 3
Schaltbild eines
Ankoppelvierpols

- ES - Erdungsschalter
- PA - Primärableiter
- AD - Ableitdrossel
- Tr - Transformator
- SA - Sekundärableiter
- KK - Koppelkondensator

3.3 Koppelkondensator

Der Koppelkondensator dient als Bindeglied zwischen den Hochfrequenz-Apparaturen und der Hochspannungsleitung. Er koppelt das hochfrequente Niederspannungssignal auf die Hochspannungsleitung. Dabei hat der Koppelkondensator ebenfalls für eine sichere Isolation zwischen den Anschlüssen des Ankoppelvierpols und der Hochspannung zu sorgen.

Als Koppelkondensator kann auch der Kondensator eines kapazitiven Spannungswandlers verwendet werden, welcher einen separaten Anschluss für die TFH-Signale hat.

Um auch bei extremen Bedingungen einen einwandfreien Betrieb zu gewährleisten, muss die Änderung der Kapazität mit Temperaturschwankungen praktisch vernachlässigbar sein.

Von grosser Bedeutung ist der Verlustwinkel des Kondensators. Er muss nach IEC-Empfehlungen so sein, dass im Frequenzbereich der Übertragung der Ersatzserienwiderstand immer kleiner als 40 Ohm bleibt.

In gewissen Grenzen, welche von der mechanischen Stabilität des Kondensators abhängt, dienen Koppelkondensatoren auch als Stützisolator für die TFH Sperren. Die Grenzen, für die diese Montage möglich ist, hängt ab von der Grösse der Sperre, von den mechanischen Belastungen (Kurzschlusskräfte, Windkräfte, Erdbebenbelastungen) sowie von der Biegefestigkeit des Koppelkondensators.

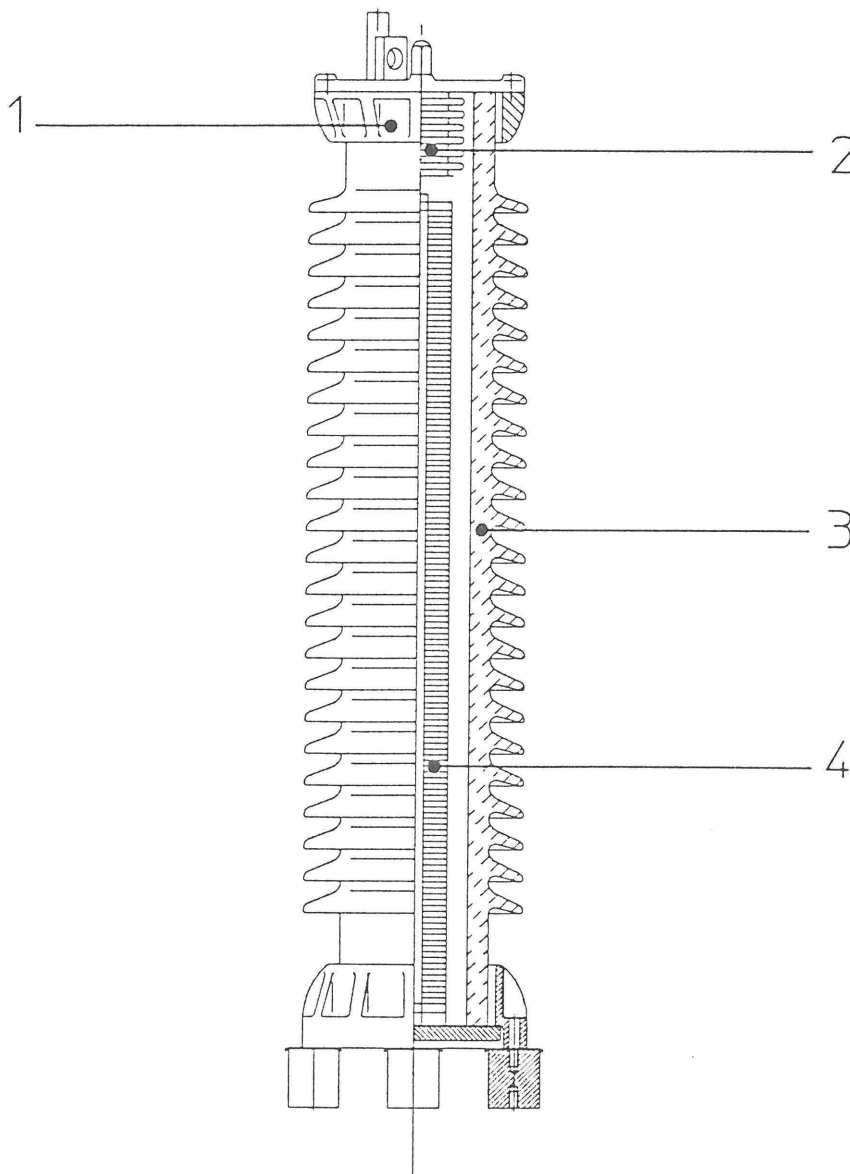


Bild 4
Aufbau eines
Koppelkondensator

- 1. Kondensatorkopf
- 2. Metallbalg
- 3. Isolator
- 4. Aktivteil des Kondensators

4. HF-Sperren als besonderes hochspannungstechnisches Bauelement der TFH-Übertragungstechnik

TFH-Sperren sind Bauelemente welche seriell in die Hochspannungsleitung eingebaut werden um die hochfrequenten Telekommunikationssignale auf die gewünschte Übertragungsstrecke zu begrenzen. Daraus lassen sich die generellen Anforderungen an die Sperren ableiten. Sie müssen für die hochfrequenten Signale eine hohe Impedanz aufweisen um diese von den zu sperrenden Netzbereich abzublocken. Sie müssen jedoch die 50 Hz Ströme der Energieübertragung möglichst ungehindert durchlassen. Bild 6 zeigt einen typischen Impedanzverlauf einer TFH-Sperre für den Frequenzbereich von 200 bis 400 kHz.

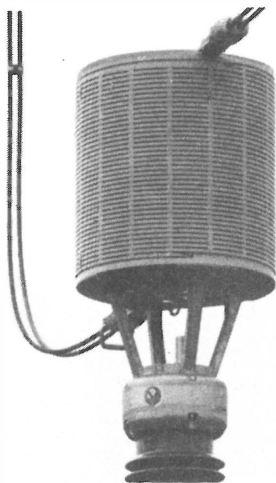


Bild 5
TFH-Sperre

Diese Forderungen werden im Grunde genommen von Spulen erfüllt. Eine TFH-Sperre besteht somit aus einer Spule, durch die der 50 Hz Hauptstrom fließt. Zusammen mit einer Abstimmereinheit, welche im Prinzip aus Kondensatoren besteht, wird die Sperre auf ein gewünschtes Frequenzband abgestimmt. Als dritter Bestandteil der Sperre ist noch ein Überspannungsableiter enthalten, welcher transiente Überspannungen an den empfindlichen Kondensatoren begrenzen soll.

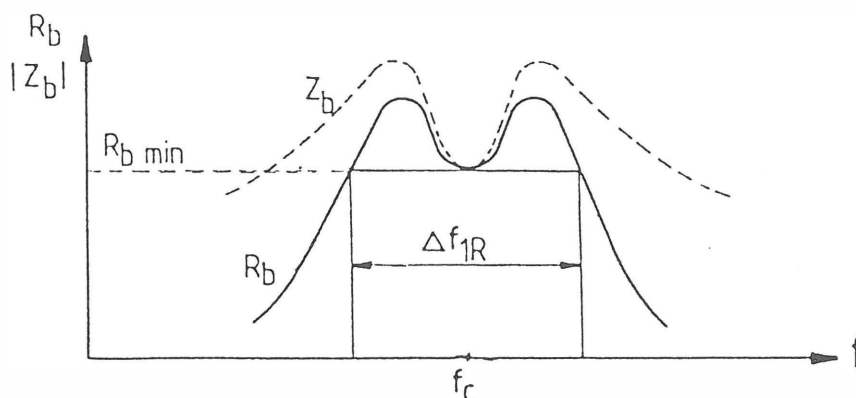


Bild 6
typischer Impedanzverlauf über
der Frequenz einer TFH-Sperre

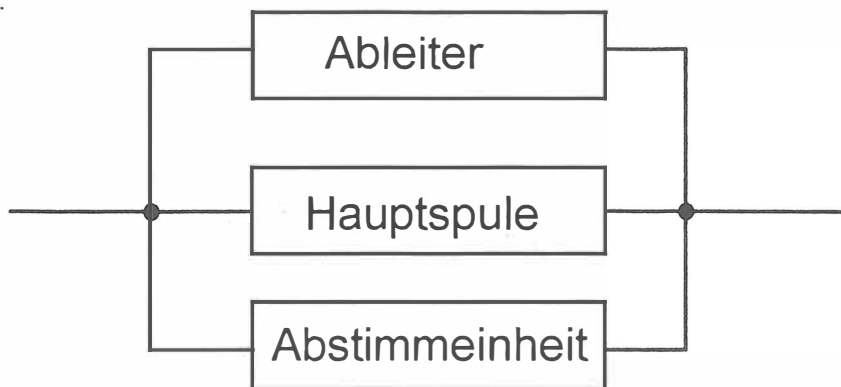


Bild 7
prinzipieller Aufbau einer TFH-Sperre

Die Hauptspule, welche die zur Abstimmung benötigte Induktivität besitzt, muss sowohl den Dauerstrom der Hochspannungsleitung tragen, als auch den Kurzschlussstrom unbeschadet überstehen. Die erste Dimensionierung der Spule zieht demnach auf die Einhaltung der maximalen Werte für die Erwärmung der Spule. Nach den Empfehlungen der IEC Publikation 353 darf die Spule im Dauerstrom nicht mehr als 155 °C warm werden, wobei ein Heisspunkt von 185 °C erlaubt wird. (Dies gilt für Isolierstoffklasse F, GFK)

Der Kurzschlussstrom, normalerweise 1 sec lang, erwärmt die Spule über diese Dauerbetriebstemperatur hinaus. Hierfür gilt nach IEC 353 eine maximale Temperatur von 250 °C. Kann dies wegen relativ hohen Kurzschlussanforderungen nicht eingehalten werden, so muss der Leiterquerschnitt vergrößert werden. Der Kurzschlussstrom hat durch seine mechanische Belastung der Spule Einfluss auf deren Konstruktion. Die selbsttragende Bauweise mit den GFK-Distanzierungen der Leiter, muss so beschaffen sein, dass diese Belastungen standgehalten wird.

Bei den Haefely Sperren handelt es sich um Spulen in einlagiger Bauweise. Sie sind aus 1 bis 6 parallelen massiven Aluminiumleiter aufgebaut. Die Windungen sind durch GFK-Distanzklötzchen in ihrer Position gehalten. Anfang und Ende der Wicklungen sind an einen Aluminiumstern angeschweisst, durch den auch die Stromaufteilung bei mehreren parallelen Leitern erfolgt.

Diese Bauweise gewährleistet eine gute Kühlung des Leiters, was eine kurzzeitige Überlastung des Leiters in relativ schneller Folge zulässt. Auch für die Dauerbelastung kann wegen der guten Kühlung der Leiterquerschnitt relativ klein gehalten werden, was zusammen mit der eingesparten Glas isolation eine Gewichtsreduktion um bis zum Faktor 2.5 bedeutet, im Vergleich zu in GFK eingebetteten Spulen.

Mit Luft als Windungs isolation ist diese selbstheilend und ein Durchschlag zwischen Windungen hat keinen Schaden der Spule zur Folge. Die geringe Eigenkapazität der luftisolierten Spule ergibt eine hohe Resonanzfrequenz, die Sperren können also bis in hohe Frequenzen betrieben werden. Ebenso ergibt dies einen kleinen Unterschied zwischen der 100 kHz Induktivität L_{tN} und der 50 Hz Induktivität L_p .

Der durch die Distanzklötzchen genau einzuhaltende Abstand zwischen den Windungen führt zu kleinen Fertigungstoleranzen. So ist es möglich ohne Nachmessung der Spule die Abstimmereinheit auszuwechseln.

In der Spule eingebaut ist die Abstimmereinheit, welche zusammen mit der Spuleninduktivität eine Bandsperre für die HF-Signale bildet. Je nach Anforderung und Einsatz der Sperren gibt es verschiedene Bauformen für Einwellenabstimmung, Zweiwellenabstimmung und Breitbandabstimmung. Wird die TFH Verbindung für einen oder zwei eng benachbarten Kanäle aufgebaut, so kann die Sperre mit einer Einwellenabstimmung ausgerüstet werden, welche nur ein schmales Band sperrt (Bild 8a). Werden zwei weit auseinanderliegende Kanäle geplant, so kann die Zweiwellenabstimmung verwendet werden (Bild 8b). Die am häufigsten verwendete Abstimmung ist die Breitbandabstimmung (Bild 8c). Hierbei können mehrere Übertragungskanäle Verwendung finden oder die Frequenzen der Übertragung ohne Austausch der Abstimmereinheit gewechselt werden.

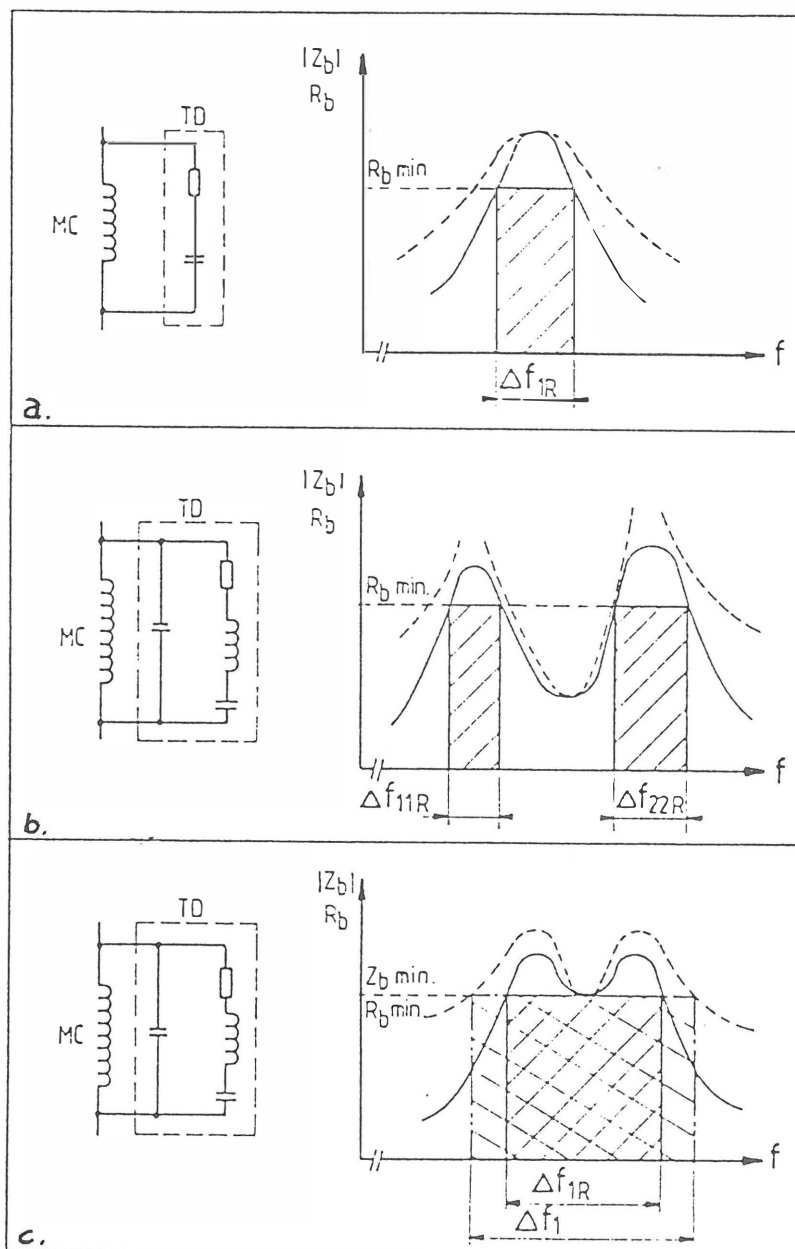


Bild 8
Abstimmereinheiten für
Einwellen-, Doppelwellen und
Bandsperren

Die Abstimmereinheit liegt parallel zur Spule. Daraus ergeben sich die Belastungen der Kondensatoren in der Abstimmereinheit aus dem Spannungsabfall über der Spule bei Nennstrom beziehungsweise bei Kurzschlussstrom. Daneben werden sie noch durch Schalt- und Blitzüberspannungen belastet.

Geschützt sind die Bauelemente der Abstimmereinheiten durch einen Überspannungsableiter, der parallel zur Spule und zur Abstimmereinheit montiert ist. Dieser wird dimensioniert nach dem Spannungsabfall über der Spule im Kurzschlussfall. Da die TFH-Übertragung auch während eines Kurzschlusses funktionieren soll, muss die Ansprechspannung des Ableiters höher sein als die Spannung welche während des Kurzschlusses an der Spule abfällt. Die Belastung der Kondensatoren in der Abstimmereinheit ist dann durch die Charakteristik des Überspannungsableiters gegeben, und die Kondensatoren müssen so dimensioniert werden, dass sie diese Belastungen überstehen. Dies ist neben dem Spannungsabfall über der Spule bei Nennstrom über 30 Jahre Betriebsdauer, die beim Kurzschluss auftretenden Spannungen und Stossspannungen, deren Amplituden durch den Ableiter begrenzt ist. Eine besonders hohe Belastung stellen die hochfrequenten Spannungsspitzen während Trennerschaltungen in der Nähe von Sperren dar. Für diesen Fall werden die Sperren mit besonders spannungsfesten Abstimmereinheiten ausgerüstet.

Als Ableiter in den Sperren können Funkenstreckenableiter sowie Zinkoxidableiter eingesetzt werden. ZnO-Ableiter bieten für die Kondensatoren in den Abstimmereinheiten einen besseren Schutz, da sie für schnelle Impulse keine so grosse Erhöhung der Ansprechspannung zeigen wie Funkenstreckenableiter. Im Dauerbetrieb werden die ZnO-Ableiter nur mit etwa 5 % ihrer zulässigen Dauerbetriebsspannung belastet. Für die nur kurzzeitig (1 sec) auftretenden Kurzschlussströme, für welche die Ableiter dimensioniert werden, können sie demnach etwas überlastet werden, was zu weiterer Verbesserung des Schutzes der Abstimmereinheit führt. Der Nachteil der ZnO-Ableiter ist ihre Kapazität die dauernd parallel zur Abstimmereinheit liegt und somit die Abstimmung der Sperre beeinflusst und in der Berechnung der Elemente berücksichtigt werden muss. Bei Funkenstreckenableitern ist die Kapazität bis zum Ansprechen der Funkenstrecke von der Abstimmereinheit getrennt und braucht somit nicht berücksichtigt zu werden.

Umfangreiche Untersuchungen an Ableitern und Ableiterscheiben wurden bei Haefely durchgeführt um die Abhängigkeit dieser Ableiterkapazität von Temperatur, Frequenz, anliegender Spannung und Zeit zu klären. Zu grosse Schwankungen würden die Abstimmung der Sperre negativ beeinflussen, was nicht zulässig wäre. Die so ausgewählte Ableitertypen zeigen eine geringe Abhängigkeit von diesen Parametern und haben somit bei allen Betriebsbedingungen den gleichen und somit berechenbaren Einfluss auf die Abstimmung der Sperre.

Die TFH-Sperren werden entweder hängend oder auf Stützisolatoren stehend montiert. Sperren welche nicht zu gross und schwer sind können unter bestimmten Voraussetzungen direkt auf die Koppelkondensatoren oder die zur Kopplung verwendeten kapazitiven Spannungswandler montiert werden.

Dabei sind jedoch die mechanischen Belastbarkeiten dieser Bauelemente zu berücksichtigen und die Belastung bei verschiedenen Bedingungen zu kennen. Dazu gehören Windlast, eventuelle Erdbebenbelastungen, Seilzug und mechanische Belastung während des Kurzschlussstromes.

5. Zusammenfassung und Schlussbemerkungen

Auch heute ist die trägerfrequente Signalübertragung auf Hochspannungsleitungen noch weit verbreitet. Die Bauelemente welche dazu benötigt werden, insbesondere die Koppelkondensatoren und die Sperren, müssen, um einen sicheren Betrieb der TFH zu gewährleisten, besonderen Anforderungen genügen.

Für die Sperren sind dies eine genügend hohe Impedanz im gewünschten Frequenzbereich und eine hohe Kurzschlussfestigkeit um auch in diesem Betriebszustand eine Datenübertragung zu ermöglichen.

Für die Koppelkondensatoren sind dies neben den Isolationsbedingungen des jeweiligen Netzes, eine stabile Kapazität im gesamten Temperaturbereich.

Für die direkte Montage der Sperren auf die Koppelkondensatoren muss ausserdem die mechanische Belastung in allen Betriebs- und Umweltbedingungen, sowie die Belastbarkeit der Porzellane bekannt sein.

6. Literatur

H.-K. Podszcek, "Trägerfrequenz-Nachrichtenübertragung über Hochspannungsleitungen", Springer Verlag, Berlin Göttingen, Heidelberg, 1971

IEC Publication 353 "Line Traps for A.C. Power Systems", 1989

IEC Publication 358 "Coupling Capacitors and Capacitor Dividers", 1990

IEC Publication 481 "Coupling Devices for Power Line Carrier Systems", 1974

IEC Publication 663 "Planning of (single-sideband) Power Line Carrier Systems", 1980

Haefely Prospekte Nr. D 231.5, D 232.1, D 235, E 8238.1

Haefely Druckschriften Nr. D 2-07, D 2-18