

# Einphasige Ferroresonanzschwingungen in Hochspannungsanlagen

Reinhold Bräunlich • Holger Däumling • Martin Hofstetter • Udo Prucker • Joachim Schmid • Ruthard Minkner • Hans-Werner Schlierf

**Bezugnehmend auf die Tätigkeit der internationalen Arbeitsgruppe AG 1 des technischen Komitees TK 38-CH (Messwandler) des Schweizerischen Elektrotechnischen Komitees (CES) betreffend, wird in diesem Aufsatz über Vorschläge für ein „New Work Item Proposal: Ferroresonanz in Substations“ an das internationale IEC/TC 38 Messwandler berichtet. Dieser Beitrag ist eine Fortsetzung der Veröffentlichung „Ferroresonanz an 220/420-kV-Spannungswandlern bei Schalthandlungen“ [1]. In dem ersten Teil wurde von Ferroresonanzschwingungen in einem abgeschalteten, nicht geerdeten 123-kV-Netz berichtet. Die Erregung der nichtlinearen Ferroresonanzschwingungen erfolgte durch eine kapazitive Einkopplung der Energie aus einem in Betrieb befindlichen Leitungssystem höherer Spannung 420 kV. Das 420-kV-Netz lief parallel zu dem nicht geerdeten, abgeschalteten Leitungsabschnitt der Spannung 123 kV. Weitere praktische Beispiele von Ferroresonanzschwingungen in Hochspannungsnetzen wurden von der AG 1-TK 38-CH in [2] und [3] veröffentlicht.**

## Die Anlagenparameter

Bild 1 zeigt das Ersatzschaltbild zur Analyse der einphasigen Ferroresonanzschwingung mit den bestimmenden Parametern des schwingungsfähigen Systems. Der rot gestrichelte Zweig in Bild 1 ist eine alternative Anregung der Schwingungen durch ein parallel geführtes Leitungssystem höherer Spannungsebene. Dieser Anregungsvorgang ist in [1] behandelt. Typische Werte für die einzelnen Elemente in Bild 1 sind in Tabelle 1 angegeben.

Sind die Spannungswandler mit Freileitungs- oder Kabelstrecken verbunden, so müssen die Leitungskapazitäten gegen Erde mitberücksichtigt werden. Werte der Betriebskapazitäten sind: Freileitung  $C_L$  10 pF/m bis 15 pF/m und Kabelstrecke  $C_K$  150 pF/m bis 300 pF/m.

Die in Tabelle 1 aufgeführten Größen bestimmen das Risiko für das Auftreten von Ferroresonanzschwingungen und müssen deshalb zur Beurteilung der Ferroresonanzgefährdung, zur Bildung von Berechnungsmodellen und zur Bewertung von Abhilfemaßnahmen herangezogen werden. Hinweise zu den Größenordnungen der Komponenten im Ersatzschaltbild Bild 1: Die Netzimpedanz  $Z_N$  und die Impedanz  $Z_{HS}$  der Primärwicklung des Spannungswandlers, Widerstand und Streuinduktivität, sind linear und verglichen mit den Impedanzen der anderen Elemente sehr klein, sodass sie bei der Analyse des Ferroresonanzsystems in erster Annäherung vernachlässigt werden können. Dieses hat den Vorteil, dass sich das Ersatzschaltbild in Bild 1 mithilfe des Theorems von Léon Charles Thévenin übersichtlich in Bild 2 darstellen lässt.

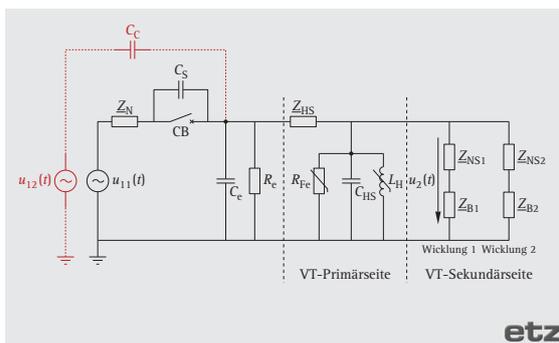
Die Höhe der erregenden Spannung für die Ferroresonanzschwingung ist die Netzspannung  $u_1(t) = \hat{U}_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi)$  multipliziert mit dem kapazitiven Teilverhältnis  $C_S/(C_S + C_{eg})$ .  $u_2(t)$  ist Ausgangsspannung des Spannungswandlers, und damit kann die Ferroresonanzschwingung an der Sekundärwicklung gemessen werden.

Der Pseudoschalter PS in Bild 2 ersetzt das Öffnen des Leistungsschalters CB in Bild 1. Die anregende Energie vom Netz fließt dann über die Steuerkondensatorkapazität  $C_S$  in das Ferroresonanzsystem. Zusammenstellung der Hauptparameter für Ferroresonanzsysteme:

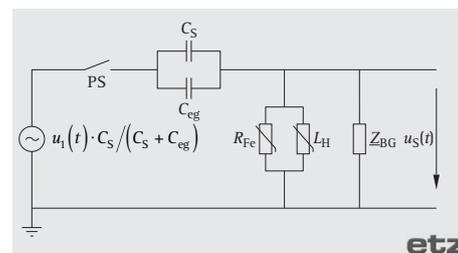
- Scheitelwert der erregenden Wechselspannung  $\hat{u}$ ,
- Schaltzeitpunkt Phasenwinkel  $\varphi$ ,
- Kapazität des Steuerkondensators  $C_S$  sowie Kapazität der Leitung-Kopplungskapazität  $C_c$ ,
- gesamte Erdkapazität der Anlage  $C_{eg}$ ,
- gesamte Bürdenimpedanz  $Z_{Bg}$ ,
- nichtlineare Wandlerinduktivität  $L_h$ ,
- nichtlinearer Eisenwiderstand  $R_{FE}$ .

## Erkennen von Ferroresonanzen im Netz

Das Anzeigen oder das Melden von Ferroresonanzschwingungen sind bisher wenig verbreitet, und das Erkennen der Schwingungen ist nur durch das Erfassen von mehreren Messgrößen möglich. Oft werden Ferroresonanzschwingungen erst



**Bild 1.** Ersatzschaltbild zur Behandlung einer einphasigen Ferroresonanzschwingung



**Bild 2.** Ersatzschaltung aus Bild 1 ohne Netzimpedanz  $Z_N$  und ohne die Impedanz  $Z_{HS}$  der Primärwicklung des Spannungswandlers. Erdkapazität  $C_{eg} = C_e + C_{HS} + C_L + C_K$ .  $Z_{Bg}$  ist die Parallelschaltung von  $R_e$ ,  $Z_{NS1} + Z_{B1}$  und  $Z_{NS2} + Z_{B2}$



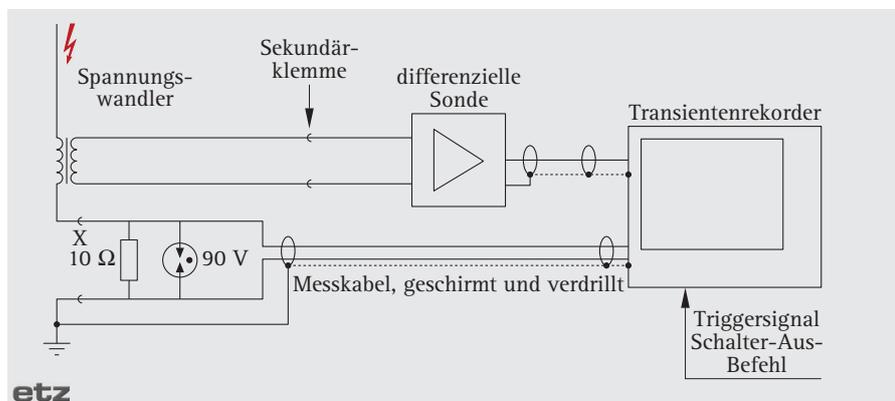
Max. Netzspannung Anlagenparameter	$U_m$	123 kV ... 145 kV	245 kV	420 kV ... 550 kV
Erdkapazitäten induktive Spannungswandler $C_{HS}$	Öl	250 pF ... 300 pF	400 pF ... 450 pF	200 pF
	SF <sub>6</sub>	80 pF	100 pF ... 200 pF	200 pF ... 250 pF
Erdkapazitäten induktive Stromwandler $C_{HS}$	Öl	600 pF ... 1 300 pF	600 pF ... 1 300 pF	
	SF <sub>6</sub>	150 pF	250 pF	230 pF ... 290 pF
Erdkapazitäten kombinierte Wandler $C_{HS}$	Öl	1 000 pF ... 1 700 pF	1 000 pF ... 1 700 pF	
	SF <sub>6</sub>	190 pF	250 pF ... 350 pF	270 pF ... 380 pF
Kapazität kapazitive Spannungswandler $C_{HS}$	Öl	4 000 pF ... 10 000 pF	3 000 pF ... 6 000 pF	2 000 pF ... 4 000 pF
Erdkapazitäten induktive Spannungswandler für GIS $C_{HS}$	SF <sub>6</sub>	70 pF	80 pF	100 pF
Kapazität RC-Spannungswandler $C_{HS}$	Öl		700 pF ... 5 000 pF	
Erdkapazität der Anlage ohne Messwandler $C_e$			200 pF ... 3 000 pF	
Hauptinduktivitäten von Spannungswandlern im Arbeitspunkt $L_h$		Größenordnung 1 kH ... 1 000 kH, Angaben vom Hersteller		
Eisenverluste der induktiven Spannungswandler $R_{Fe}$		Angaben vom Hersteller		
Verlustwiderstände zwischen Hochspannung und Erde $R_e$		Isolationswiderstände gegen Erde: Größenordnung 1 MW bis 10 GW. Sie variieren stark je nach Art der Isolation, Feuchtigkeit und Verschmutzungsgrad		
Typische Werte der Kapazität von Steuerkondensatoren für Leistungsschalter $C_s$		Europa: 200 pF ... 1 000 pF, USA: 200 pF ... 1 500 pF. Moderne Hochspannungsschalter besitzen oft keine Steuerkondensatoren, die Schaltstreckenkapazität liegt dann in der Größenordnung von 10 pF		

**Tabelle 1.** Für Ferroresonanz ausschlaggebende Anlagenparameter – Eigenkapazität und Verlustwiderstand der Messwandler zwischen Hochspannung und Erde, Hauptinduktivität von Spannungswandlern, Kapazität der Steuerkondensatoren für Hochspannungsleistungsschalter

nach der Zerstörung eines oder mehrerer Spannungswandler festgestellt. Einphasige Ferroresonanzschwingungen werden in der Regel durch sekundäre Schutzgeräte nicht angezeigt. Es erfolgen keine Aktivierungen von Relais, die zur automatischen Beseitigung von Ferroresonanzschwingungen der betroffenen Teile

der Schaltanlagen oder Umspannstation führen.

Meistens kann das Vorliegen von Ferroresonanzschwingungen nur durch Messungen von Spannung und Strom durch die Primärwicklung des Spannungswandlers sowie Frequenz in der Anlage festgestellt werden. Je nach Registrier-



**Bild 3.** Messung des Stroms durch die Spannungswandler-Primärwicklung und die Spannung an der Sekundärwicklung. Der Strom wird mit einem Shunt von 10 Ω erfasst. Anmerkung: Der Erdschluss der Primärwicklung darf im Betrieb niemals geöffnet werden, da an der Klemme sonst Hochspannung auftritt. Als Sicherheitsmaßnahme wird aus diesem Grund der Einbau eines Überspannungsschutzelements zwischen Erde und der erdseitigen Klemme der Primärwicklung empfohlen

einrichtungen kann im Kontrollraum eine einphasige Ferroresonanzschwingung folgendermaßen erkannt werden:

- Bei Überwachung der Nullpunktspannung kann die Meldung „Unsymmetrie der Spannungen“ vorliegen. Damit kann allerdings fälschlicherweise der Eindruck entstehen, der Leistungsschalter hätte nicht alle Außenleiter ausgeschaltet.
- Es werden unterschiedliche Außenleiterspannungen angezeigt.
- Bei Vorliegen einer Frequenzauswertung werden ebenfalls Frequenzen angezeigt, die von der Netzfrequenz (subharmonische) abweichen.

### Methoden zur Behebung von Ferroresonanzschwingungen

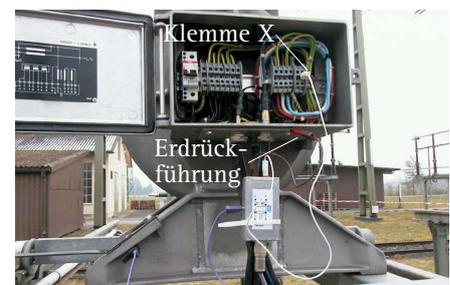
Es haben sich vier Methoden zur Behebung von Ferroresonanzschwingungen etabliert:

- Messtechnische Untersuchungen der Schwingungen im Netz,
- Simulation von einphasigen Ferroresonanzschwingungen,
- Signalflusspläne zur Analyse und Vermeidung von Ferroresonanzschwingungen,
- Maßnahmen zur Vermeidung oder Beseitigung von stationären Ferroresonanzschwingungen.

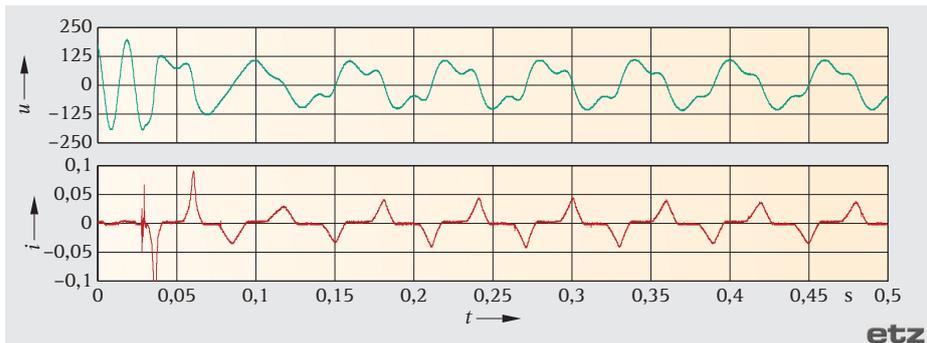
Die verschiedenen Methoden werden nachfolgend kurz vorgestellt.

### Messtechnische Untersuchungen der Schwingungen im Netz

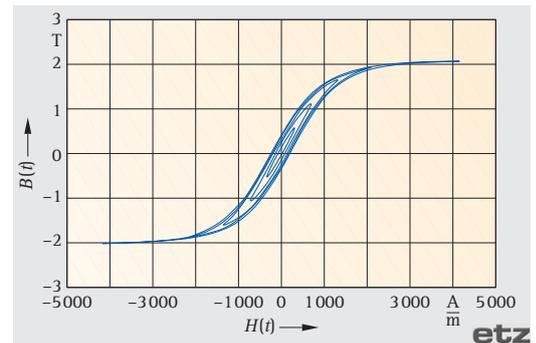
In der Praxis werden messtechnische Untersuchungen durchgeführt, ob Ferroresonanzen vorhanden sind, mit dem Ziel der Messungen der Amplitude und Frequenz der Ferroresonanzschwingung und des Stroms durch die Hochspannungswicklung des Spannungswandlers. Diese Messungen werden in der Praxis zusammen mit Schaltversuchen durchgeführt, um festzustellen, ob es bei Anlagekonfi-



**Bild 4.** Beispiel für den Anschluss eines Messwiderstands für die Erfassung des Stroms durch die Primärwicklung des Spannungswandlers an der Klemme X (vgl. Prinzipschaltbild Bild 3)



**Bild 5.** Beispiel für eine gemessene, stationäre einphasige Ferroresonanzschwingung von  $16\frac{2}{3}$  Hz, Messung FKH [4], 220-kV-Schaltanlage Unterwerk Mettlen/Schweiz – obere Spur: Primärspannung, gemessen auf der Sekundärwicklung, untere Spur: Strom durch die Spannungswandlerprimärwicklung



**Bild 6.** Typische Magnetisierungskurve eines Spannungswandlers mit Luftspalt berechnet für eine Frequenz von 50 Hz

guration und bestimmten Schaltvorgängen zu ansteigenden, abklingenden oder stationären Ferroresonanzschwingungen kommt. Eine Schaltung zur Messung ist in Bild 3 dargestellt. Die Ströme durch die Primärwicklung liegen bei einigen Milliampere und im Schwingungsfall zwischen 20 mA und einigen 100 mA und nur in Extremfällen im Bereich von 1 A. Bild 4 zeigt ein Foto der Messanschlüsse an einem Spannungswandler-Anschlusskasten.

Der Strom durch die Primärwicklung des Spannungswandlers ergibt stets eindeutige Hinweise auf eine bestehende Ferroresonanzschwingung. Die Ferroresonanzschwingung eines Spannungswandlers mit starkem Sättigungsgrad des Eisenkerns ist durch die schmalen und

hohen Stromspitzen des Stroms durch die Primärwicklung des Spannungswandlers direkt ersichtlich (Bild 5). Spannungsverläufe an den Sekundärwicklungen zeigen zwar ebenfalls Schwingungen an. Liegt nur eine Spannungsmessung vor, kann aber in der Regel nicht eindeutig zwischen Schwingungen ohne Kernsättigung und Ferroresonanzschwingungen mit gefährlich hohen Strömen in der Primärwicklung unterschieden werden (Bild 5).

### Simulation von einphasigen Ferroresonanzschwingungen

Die Simulation von einphasigen Ferroresonanzschwingungen hat sich als wirkungsvolles Mittel zur Beurteilung des

Ferroresonanzverhaltens erwiesen. Voraussetzung dafür ist jedoch die Beschreibung des Problems durch ein geeignetes Ersatzschaltbild. Ein besonderes Interesse besteht darin, ferroresonanzgefährdete Anlagenkonfigurationen bereits im Planungsstadium von Neuanlagen bzw. Erweiterungen zu erkennen um geeignete Maßnahmen dagegen ergreifen zu können.

Die Simulation liefert die Strom-, Spannungsformen, deren Amplitude und die Frequenz der Schwingung. Dies gilt jedoch nur für die untersuchte spezifische Konfiguration und stellt kein allgemeingültiges Ergebnis dar, womit unter Umständen mehrere Rechengänge für unterschiedliche Konfigurationen notwendig werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Simulation und Rechnung von dreiphasigen Ferroresonanzschwingungen wegen der hohen Anzahl der Anlage- und Messwandlerparameter bisher nicht zum Erfolg geführt haben.

Im Folgenden sollen am Beispiel der einphasigen Ferroresonanz die wesentlichen Kreisparameter und deren Bedeutung im Hinblick auf das Simulationsergebnis erläutert werden.

Bild 1 zeigt das Ersatzschaltbild zur rechnerischen Behandlung der einphasigen Ferroresonanz. Die in der Literatur oftmals zu findende Reduktion des in Bild 2 gezeigten Ersatzschaltbilds auf einen Serienresonanzkreis ist für eine qualitative Beschreibung zum Verständnis des Ferroresonanzvorgangs sehr hilfreich. Für die rechnerische Behandlung birgt diese Darstellung allerdings einige Gefahren. So muss besonders auf die Behandlung nichtlinearer Elemente und auf die richtige Transformation der Anfangsbedingungen zum Zeitpunkt der Zustandsänderung (Schalthandlung) geachtet werden. Bei den heute zur Verfügung stehenden Rechnerleistungen kann aller-

Dr. sc. techn. Reinhold Bräunlich ist seit 19 Jahren bei der Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) tätig, bei der er seit 2000 die Geschäftsleitung besorgt. Er ist Mitglied verschiedener Fachgremien und vertritt die Schweiz im Cigré-Studienkomitee C4 „Power Systems Performance“. E-Mail: braeunlich@fkh.ch

Dr.-Ing. Holger Däumling studierte Elektrotechnik an der TU München und wurde an der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg promoviert. Seit 1987 ist er bei der Firma Ritz Messwandler im Bereich Entwicklung, Qualitätsmanagement und Prüffelder tätig und ist seit 2007 einer der Geschäftsführer bei der Ritz Instrument Transformers in Hamburg. Er ist Mitglied in verschiedenen Arbeitsgruppen der IEC. E-Mail: holger.daumling@ritz-international.de

Dipl. El.-Ing. Martin Hofstetter arbeitet seit 2002 beim Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (EWZ) in der Abteilung Projektierung und Bau Unterwerke als Gesamtprojektleiter. E-Mail: martin.hofstetter@ewz.ch

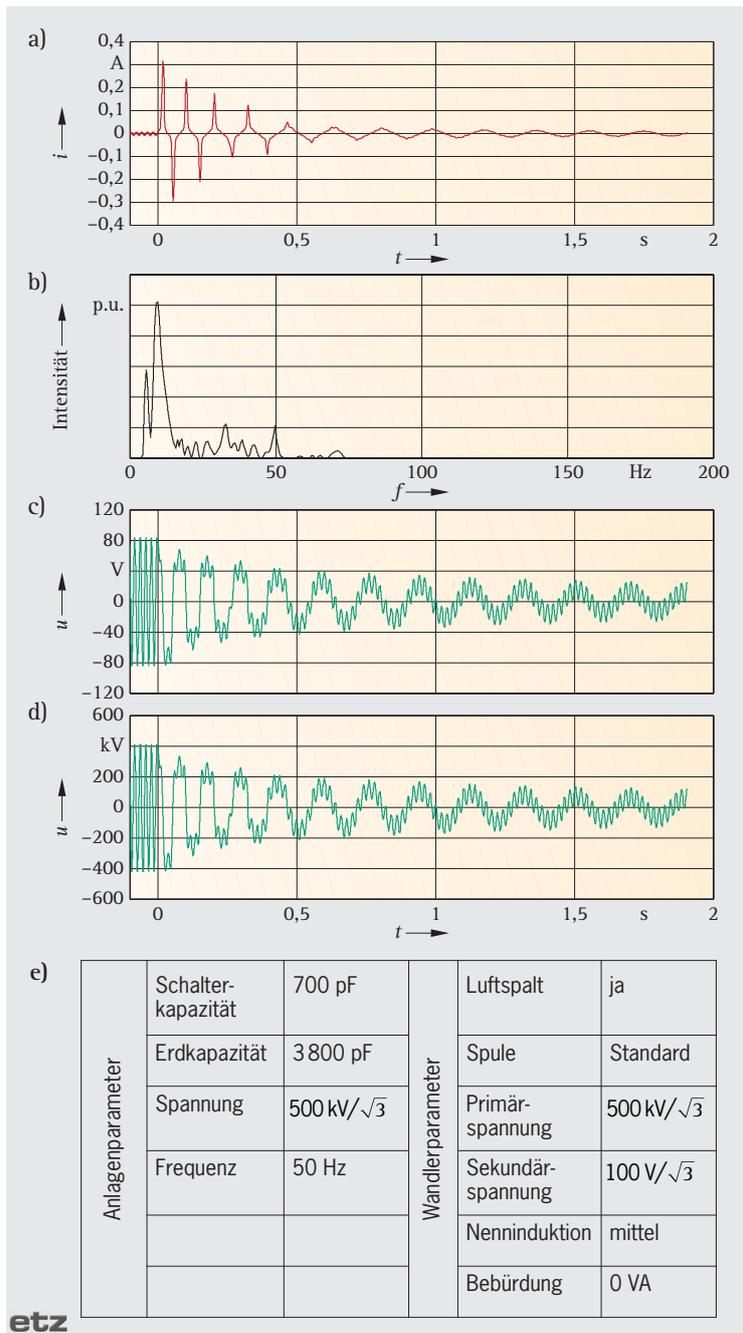
Dr. rer. nat. Udo Prucker studierte Physik an der Universität Erlangen-Nürnberg, wo er auch promoviert wurde. Seit 1999 ist er in der Hochspannungstechnik tätig. Als Leiter Product Support und F+E der Trench-Germany GmbH beschäftigt er sich u. a. mit dem Thema Ferroresonanzen und deren Simulation. E-Mail: udo.prucker@trench-group.com

Dr.-Ing. Joachim Schmid ist seit 1991 in verschiedenen Positionen in der Entwicklung bei Trench (früher Haefely) tätig. Seit 2003 leitet er die in Basel/Schweiz ansässige Technologiegruppe, welche für technologische Fragen der weltweiten Trenchgruppe zuständig ist. Er ist Mitglied in verschiedenen Arbeitsgruppen der IEC und der Cigré. E-Mail: joachim.schmid@trench-group.com

Dipl.-Ing. Hans-Werner Schlierf ist seit 1975 bei der RWE Transportnetz Strom GmbH in der Abteilung für Hochspannungsbetriebsmittel tätig. Sein Aufgabengebiet umfasst im Speziellen die Hochspannungsmesswandler. Seit 2002 ist er auch in Arbeitskreisen bei DKE tätig. E-Mail: hans-werner.schlierf@rwe.com

Dr.-Ing. Ruthard Minkner war von 1957 bis 1971 Entwicklungsingenieur im Gebiet Hochspannungstechnik und von 1972 bis 1988 Direktor für Hochspannungskomponenten bei der Emil Haefely AG. Von 1999 bis heute ist er Berater bei der Haefely AG und der Trench AG und bis 2001 Dozent an der Hochschule für Technik und Informatik in Burgdorf/Schweiz. Er ist seit 1974 Vorsitzender der Technischen Kommission TK 38 für Messwandler in der Schweiz, Vorsitzender mehrerer IEC-Arbeitsgruppen und Vorsitzender der AG1 der TK38-CH Ferroresonanzen. 1999 war er Gastprofessor an der Washington State University in Pullman, Washington/USA. E-Mail: minkner.ruthard@trench-tsfc.com

Leerseite

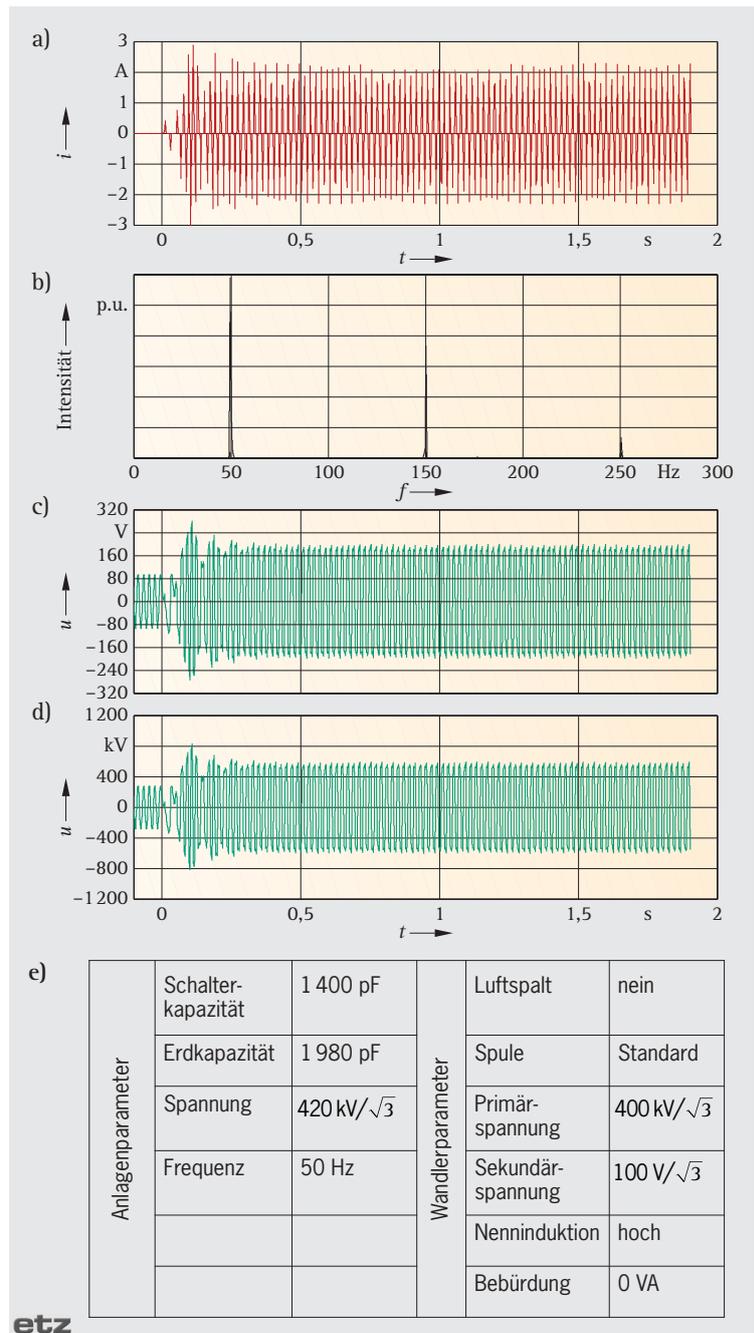


**Bild 7.** Modellierte abklingende Ferroresonanzschwingung – a) Strom durch die Primärwicklung des VT, b) Frequenzspektrum, c) Sekundär-, d) Primärspannung, e) Berechnungsparameter

dings auf die Vereinfachung der Ersatzschaltung in Bild 1 auf die Ersatzschaltung in Bild 2 verzichtet werden.

Neben der Auswahl eines geeigneten Ersatzschaltbilds sind die Wahl der richtigen Anfangsbedingungen und die Charakterisierung der einzelnen Kreiselemente entscheidend für das Simulationsergebnis. Eine besondere Rolle spielt dabei die Darstellung des nichtlinearen Elements, d. h. der Magnetisierungskurve des Spannungswandlers und die Erfassung der Kreisverluste.

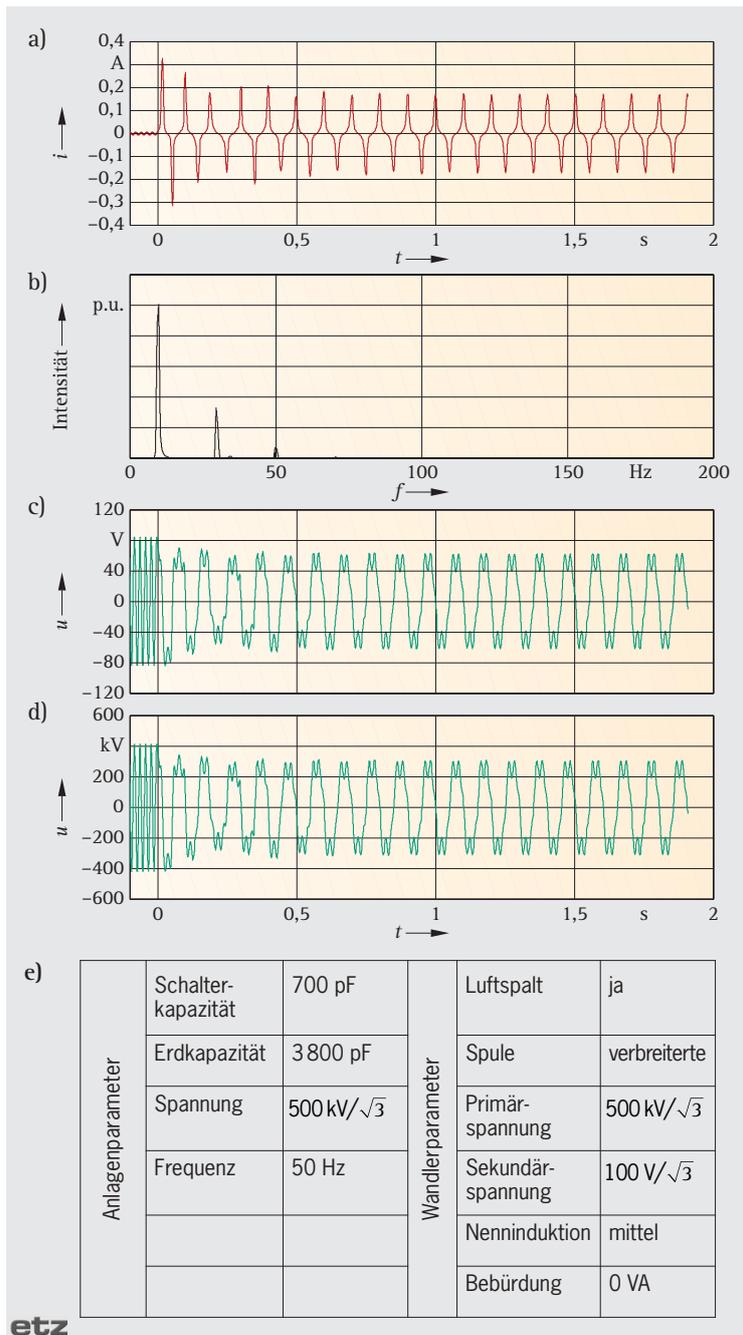
In Bild 6 ist eine typische Magnetisierungskurve eines Spannungswandlers dargestellt. Bei der Durchführung zahlreicher Simulationen wurde deutlich, dass bereits geringfügige Veränderungen der Kreisparameter, so auch der Magnetisierungscharakteristik, zu gänzlich unterschiedlichen Simulationsergebnissen führen können. Daher ist auf eine möglichst realitätsgetreue Nachbildung der Magnetisierungskurve bis weit in den Sättigungsbereich hinein zu achten. Berechnete Magnetisierungskurven können oft-



**Bild 8.** Modellierte stationäre Ferroresonanzschwingung – a) Strom durch die Primärwicklung des VT, b) Frequenzspektrum, c) Sekundär-, d) Primärspannung, e) Berechnungsparameter

mals erheblich von gemessenen Kurven abweichen. Die Messung stellt somit meist die exakteste Möglichkeit zur Bestimmung der Magnetisierungskurve dar. Jedoch muss auch bei der Messung auf parasitäre Einflüsse wie kapazitive Größen geachtet werden, welche das Messergebnis stark verfälschen können. Weiterhin muss sichergestellt sein, dass das Sättigungsverhalten bis zu hinreichend hohen Erregungen  $H(t)$  zur Verfügung steht. Die für die Simulation geeignete Form der Magnetisierungskurve ist die

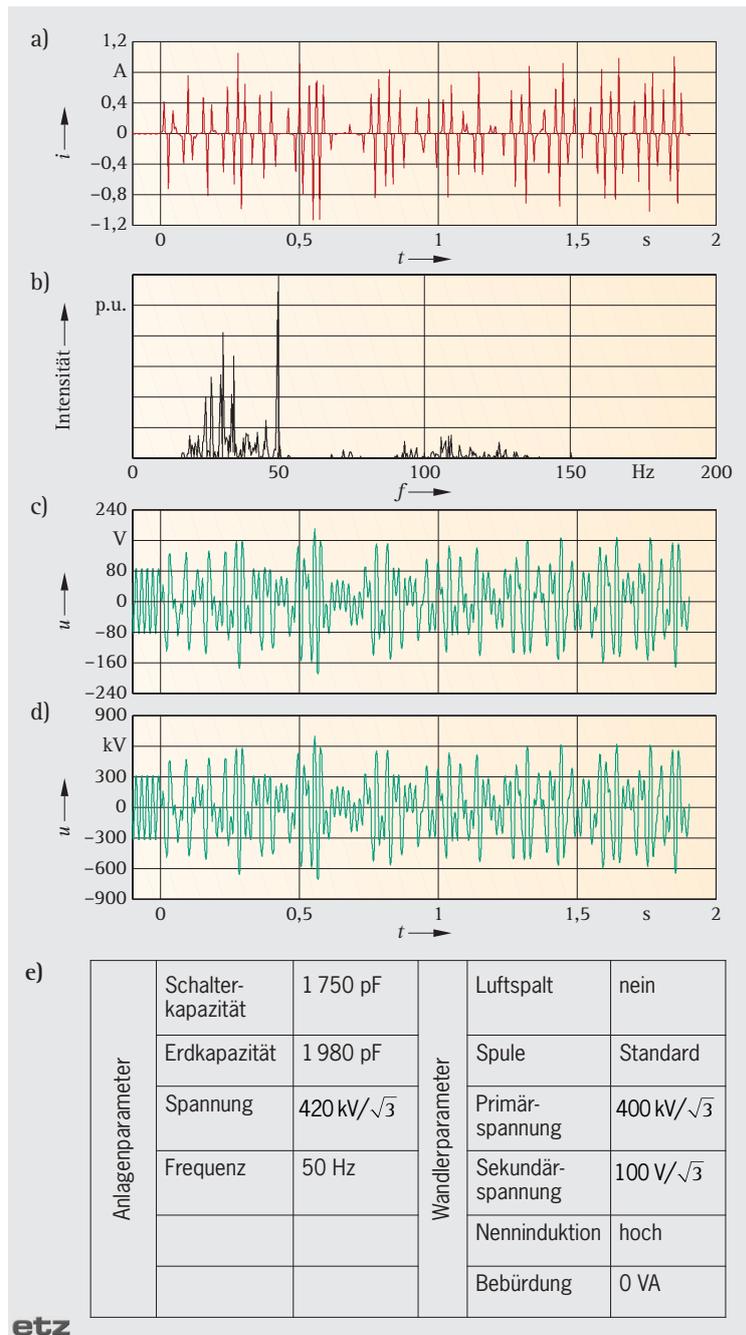
Leerseite



**Bild 9.** Modellierte stationäre Ferroresonanzschwingung von 10 Hz – a) Strom durch die Primärwicklung des VT, b) Frequenzspektrum, c) Sekundär-, d) Primärspannung, e) Berechnungsparameter

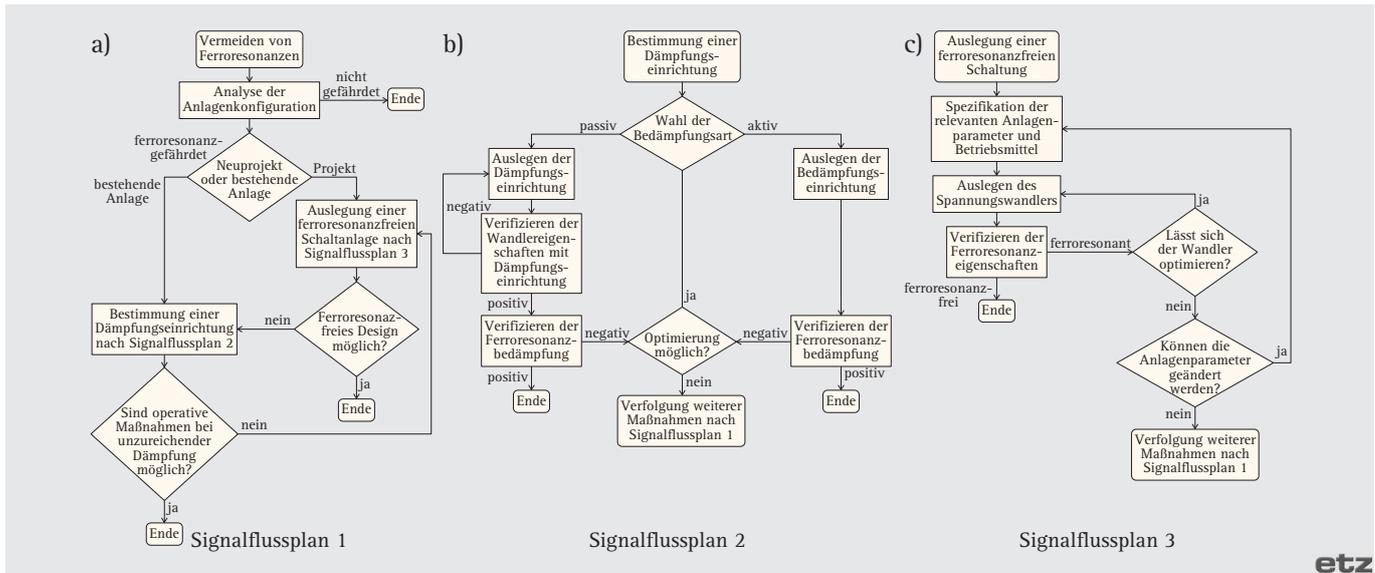
Darstellung der magnetischen Flussdichte  $B(t)$  in Abhängigkeit der Erregung  $H(t)$ . Die oftmals zu findende Darstellung durch Effektivwerte weicht ebenso wie die Rekonstruktion der Scheitelwerte aus den Effektivwerten zu stark vom tatsächlichen Verlauf ab. Eine weitere wichtige Größe, welche die Qualität des Simulationsergebnisses stark beeinflusst, ist die Erfassung und Behandlung von Verlusten im Ferroresonanzkreis. Diese entscheiden letztendlich, ob ein Vorgang stationär wird oder abklingt. Im Ersatzschalt-

bild in Bild 1 sind dabei verschiedene Verlustanteile enthalten. Die im Spannungswandler selbst auftretenden Verluste sind zum einen in der Impedanz  $Z_{HS}$  der Primärwicklung enthalten. Zum anderen berücksichtigt der nichtlineare Widerstand  $R_{Fe}$  Wirbelstrom- und Hystereseverluste im Kern. Diese werden durch die bei Netzfrequenz gemessene Magnetisierungskurve berücksichtigt. Verluste aufgrund der angeschlossenen Bürde werden durch die Impedanz  $Z_B$  erfasst. Weitere Verlustquellen in der Schaltanla-



**Bild 10.** Modellierte stationäre, chaotische Ferroresonanzschwingung – a) Strom durch die Primärwicklung des VT, b) Frequenzspektrum, c) Sekundär-, d) Primärspannung, e) Berechnungsparameter

ge, wie Ableitströme über Isolatoren, Ableiter oder Koronaentladungen, werden in einem Widerstand  $R_c$  parallel zur Anlagenkapazität  $C_e$  zusammengefasst. Während die Wandlerverluste von Herstellerseite meist hinreichend genau bekannt sind, sind die Verluste von Anlage zu Anlage verschieden, lokalen und temporären Einflussgrößen wie Wetter und Verschmutzungsgrad unterworfen und daher meist unbekannt. Für GIS-Anlagen sind bauartbedingt wesentlich geringere Verluste als in luftisolierten Anlagen anzu-



**Bild 11.** Signalflusspläne für die Analyse und Vermeidung der Ferroresonanz – a) Analyse der Anlagenkonfiguration (Signalflussplan 1), b) Wahl der Bedämpfungsart (Signalflussplan 2), c) Spezifikation der relevanten Anlagenparameter und Betriebsmittel (Signalflussplan 3)

setzen. Je nach Anlagentyp und -design kann somit der Wert des Widerstands  $R_c$  durchaus über mehrere Größenordnungen variieren. Typische Werte für eine 420-kV-Anlage sind einige 10 M $\Omega$  bis hin zu einigen Gigaohm. Im Folgenden werden vier Fälle für Simulationsergebnisse angeführt:

- Fall 1: Nichtstationäre (transiente) Ferroresonanzschwingungen (Anregungssituation, die zu einer abklingenden Ferroresonanzschwingung führt),
- Fall 2: Stationäre netzfrequente Ferroresonanzen,
- Fall 3: Stationäre subharmonische Ferroresonanzschwingungen,
- Fall 4: Stationäre chaotischen Ferroresonanzschwingungen.

Das Leitungsfeld wird in allen Beispielen mit dem Leistungsschalter im Spannungsmaximum (Zeitpunkt 0) des dargestellten Außenleiters ausgeschaltet.

**Fall 1: Beispiel für eine nichtstationäre (transiente) Ferroresonanzschwingung**

Bei ausreichend hohen Kreisverlusten bzw. zu geringer Energieeinkopplung in den Ferroresonanzkreis kommt es zu einer abklingenden nichtstationären (transienten) Ferroresonanzschwingung (Bild 7). Diese ist als Ausgleichsvorgang aus physikalischen Gründen unvermeidlich und ist für den Wandler unkritisch.

Charakteristisch ist ein breites „kontinuierliches“ Frequenzspektrum mit der Mischung unterschiedlicher Frequenzanteile und einer ausgeprägten Subharmonischen.

Die Ferroresonanzschwingung klingt exponentiell ab (Bild 7). Sichtbar ist außerdem eine überlagerte 50-Hz-Schwingung, deren Amplitude sich aus der Spannungaufteilung über der Koppl- und der Erdkapazität ergibt.

**Fall 2: Beispiel einer stationären netzfrequenten 50-Hz-Ferroresonanzschwingung**

Bei einer stationären Ferroresonanzschwingung (Bild 8) reichen die Kreisverluste nicht aus, um die angeregte Schwingung zu bedämpfen und die Energieeinkopplung überwiegt. In diesem Ferroresonanzmode kann es aufgrund der netzfrequenten Schwingungsform je nach Kapazitätsverhältnissen zu hohen Überspannungen kommen. Charakteristisch für das Frequenzspektrum ist das dominante Auftreten der anregenden Frequenz (hier 50 Hz). Aufgrund der Sättigungserscheinung des Kerns ist weiterhin die dritte Harmonische als Spitze zu beobachten.

**Fall 3: Beispiel einer stationären subharmonischen Ferroresonanzschwingung**

Bei Einsatz von Spannungswandlern mit Luftspaltkern können die oftmals mit hohen Überspannungen einhergehenden netzfrequenten Ferroresonanzschwingungen vermieden werden, und es treten nur subharmonische Ferroresonanzschwingungen auf (Bild 9).

Im Frequenzspektrum dominant tritt die jeweils relevante Subharmonische auf. Am häufigsten sind dabei die dritte Subharmonische, fünfte Subharmonische, usw. zu beobachten.

**Fall 4: Beispiel einer stationären chaotischen Ferroresonanzschwingung**

In seltenen Fällen kann es auch zu chaotischen Schwingungsformen kommen (Bild 10). In diesem Fall können die auftretenden Spannungen wiederum höher ausfallen als für die subharmonische Erscheinungsform. Im Frequenzspektrum ist wiederum ein kontinuierlicher Bereich, d. h. ein Mischen eines breiten Frequenzspektrums zu erkennen.

**Die Simulationsergebnisse und die dazugehörigen Eingabedaten**

Werden die Berechnungsparameter von Fall 1 und Fall 2 verglichen, so liegt das Verhältnis der Steuerkondensatorenkapazität  $C_S$  (Einkoppelkapazität in der Anlage) zur gesamten Erdkapazität  $C_{eg}$  bei Fall 1:  $C_S/C_{eg}=700 \text{ pF}/3 \text{ 800 pF}=0,2$  und bei Fall 2:  $C_S/C_{eg}=1 \text{ 400 pF}/1 \text{ 980 pF}=0,7$ . Das Teilverhältnis bei Fall 1 ist 0,16 und im Fall 2 ist dieses 0,41. Die aus dem Teilverhältnis resultierende erregende Spannung ist im Fall 2 um Faktor 2,6 höher.

Gleichzeitig ist die Nennflussdichte (Nenninduktion)  $B(t)$  im Fall 2 höher verglichen mit Fall 1. Der Wandler von Fall 1 hat einen Luftspalt. Die Simulationsergebnisse zeigen den Einfluss der Parameter Anlage und Wandler: Fall 1 abklingende Ferroresonanzschwingung und Fall 2 stationäre Ferroresonanzschwingung.

Im Fall 3 wird ein Spannungswandler mit Luftspalt eingesetzt, alle Daten der Anlage und des Spannungswandlers sind wie in Fall 1. Es stellt sich eine 10-Hz-

Ferroresonanzschwingung ein. Der Einfluss der Wicklungsausführung von einer Standardausführung auf eine extrem breite Wicklung hat eine Verkleinerung der linearen Streuinduktivitäten zur Folge. Tendenziell führt die Änderung zu einer leichteren Ferroresonanzschwingungsanregung.

Im Fall 4 wird folgendes System untersucht: Spannungswandler ohne Luftspalt (vgl. Fall 2) mit einem Teilverhältnis  $C_S/C_S+C_{eg}=1750/1750+1980=0,47$ . Die aus dem Teilverhältnis resultierende erregende Spannung des Systems ist um Faktor 3 höher als bei Fall 1. Außerdem liegt die Flussdichte  $B(t)$  wesentlich höher als im Fall 1 und der Kern besitzt keinen Luftspalt. Diese Konfiguration des Systems führt zu einer chaotischen Schwingung (vgl. Bild 10).

In einem späteren Beitrag werden die Ergebnisse einer theoretischen Schwin-

gungs- und Stabilitätsuntersuchung der simulierten Ferroresonanzschwingungen veröffentlicht. Die Resultate sollen einen tieferen Einblick in die nichtlinearen Ferroresonanzschwingungen geben und den Einfluss der Parameter des nichtlinearen Systems zeigen.

## Signalflusspläne zur Analyse und Vermeidung von Ferroresonanzschwingungen

Die Aufstellung von Signalflussplänen von ferroresonanzgefährdeten Systemen ist ein Hilfsmittel für die Vorgehensweise zur Analyse und Vermeidung von Ferroresonanzschwingungen. Zu Beginn des Prozesses steht die prinzipielle Beurteilung der Anlage bezüglich des Auftretens von einphasigen Ferroresonanzschwingungen (Bild 11).

Ferroresonanzschwingungen in bestehenden Anlagenteilen, linker Ast des Signalflussplans 1 (Bild 11a), können ohne Umbaumaßnahmen nur durch externe Dämpfungseinrichtungen oder operative Maßnahmen vermieden werden.

Gelingt es nicht, ein bestehendes Problem mithilfe einer externen Dämpfungseinrichtung zu beheben, so muss geprüft werden, ob stationäre Ferroresonanzen durch operative Maßnahmen, wie den Ausschluss von kritischen Schaltzuständen bzw. Schalthandlungen oder sofortiges Betätigen des Trennschalters zur Unterbrechung der weiteren Energieeinkopplung, vermieden werden können. Sind diese Maßnahmen nicht erfolgreich, so muss die Anlagenkonfiguration dementsprechend verändert werden.

Im Fall der Neuprojektierung oder Erweiterung einer Anlage, rechter Ast des Signalflussplans 1 (Bild 11a), können stationäre Ferroresonanzschwingungen bereits in der Planungsphase durch das Anlagendesign bzw. die Abstimmung der einzelnen Betriebsmittel aufeinander vermieden werden. Aufgrund ökonomischer und technischer Zwänge (große Kapazitäten der Steuerkondensatoren der Schalter zur Beherrschung hoher Kurzschlussströme, die Forderung nach einer hohen Klassengenauigkeit bei gleichzeitig hoher Bürdenleistung) ist die Ausschöpfung aller

Maßnahmen gegen Ferroresonanz beim Design des Spannungswandlers nicht immer möglich. In diesen Fällen können stationäre Ferroresonanzschwingungen meist durch eine speziell auf den Wandler abgestimmte externe Dämpfungseinrichtung vermieden werden.

In Signalflussplan 2 (Bild 11b) kann zunächst zwischen einer aktiven bzw. passiven Dämpfungseinrichtung unterschieden werden. Bei einer aktiven Dämpfungseinrichtung wird das dämpfende Bauteil bei Auftreten einer Ferroresonanzschwingung durch eine Steuereinrichtung zugeschaltet. Eine passive Dämpfungseinrichtung kommt ohne Steuereinheit aus, wobei das dämpfende Glied permanent an den Spannungswandler angeschlossen ist. Die Einhaltung der Klassenanforderungen mit angeschlossener Dämpfungseinrichtung muss verifiziert werden.

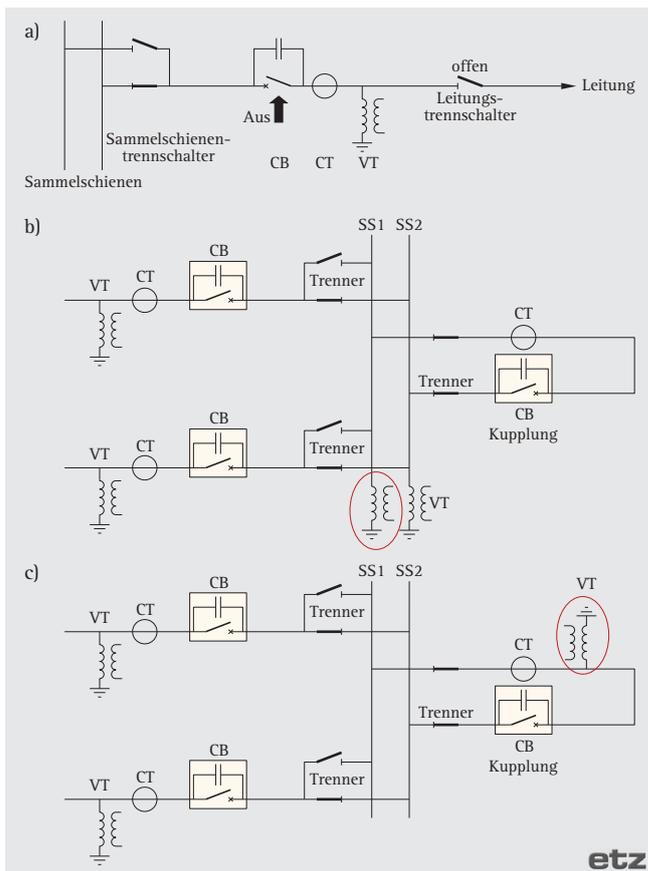
Bei der Neuprojektierung oder Erweiterung von Schaltanlagen, Signalflussplan 3 (Bild 11c), besteht die Möglichkeit, das Ferroresonanzverhalten im Vorfeld zu untersuchen und durch eine gezielte Spezifikation der Betriebsmittel positiv zu beeinflussen. Der rechnerische Nachweis ist nach heutigem Stand für einphasige Ferroresonanzkonfigurationen mit der geforderten Zuverlässigkeit realisierbar. In allen Fällen kann eine experimentelle Überprüfung in der betreffenden Anlage selbst bzw. exemplarisch an einer für den Betreiber typischen Referenzanlage erfolgen.

Im Fall eines negativen Verifizierungsergebnisses besteht bei einphasiger Ferroresonanz die Möglichkeit, die Auslegung des Wandlers zu optimieren. Falls die Optimierung für die zugrunde gelegte Spezifikation nicht anwendbar ist, sind die Spezifikationen von Wandler und Leistungsschalter dementsprechend zu ändern. Ist dies nicht realisierbar, ist zu überprüfen, ob stationäre Ferroresonanzschwingungen durch eine speziell auf den Wandler abgestimmte externe Dämpfungseinrichtung unterdrückt werden können.

## Maßnahmen zur Vermeidung oder Beseitigung von stationären Ferroresonanzschwingungen

Zur Verringerung des Risikos von stationären Ferroresonanzschwingungen in Anlagen haben sich die folgenden Maßnahmen bewährt:

- Betriebliche Maßnahmen: kontrollierte Schalthandlungen, Anpassung der Nennbürde an den tatsächlichen Bedarf bzw. Ausnutzen der verfügbaren Bürdenleistung,



**Bild 12.** Einpoliges Ersatzschaltbild für einphasige Ferroresonanz – a) Ausschaltung eines Leistungsschalters (CB) mit Steuerkondensatoren bei ausgeschaltetem Leitungstrennschalter und eingeschaltetem Sammelschientrennschalter, b) Abschaltung einer Sammelschiene (SS) mit induktiven Spannungswandlern durch Leistungsschalter (CB) mit Steuerkondensatoren und eingeschalteten Sammelschientrennschaltern, c) Abschaltung einer Kupplung mit induktiven Spannungswandlern durch Leistungsschalter (CB) mit Steuerkondensatoren und eingeschalteten Sammelschientrennschaltern



## Formelzeichen

- $C_e$  gesamte Erdkapazität der Anlage
- $C_c$  Kopplungskapazität zu einer benachbarten Anlage eines höheren Spannungsniveaus
- $C_{HS}$  Kapazität der Primärwicklung
- $C_S$  Steuerkondensator-Kapazität des Leistungsschalters CB
- $L_h$  nichtlineare Hauptinduktivität
- $R_e$  externer Widerstand Phase-Erde: (Wandler interner Isolationswiderstand, nichtlinearer Ableitwiderstand, z. B. durch Ströme in verschmutzten Oberflächen, Koronastrome und Ströme von Metalloxidableitern)
- $R_{Fe}$  nichtlinearer Widerstand, der die Eisenverluste repräsentiert
- $u_{11}(t)$  Phasen-Erdespannung vor dem Leistungsschalter in der Anlage
- $u_{12}(t)$  Spannung einer benachbarten Anlage eines höheren Spannungsniveaus, mit der eine kapazitive Kopplung besteht
- $u_2(t)$  Sekundärspannung des Spannungswandlers
- $Z_{B1}$  Impedanz des Bürdenwiderstands der Sekundärwicklung 1 (Bürdenwiderstand und Induktivität)
- $Z_{B2}$  Impedanz des Bürdenwiderstands der Sekundärwicklung 2 (Bürdenwiderstand und Induktivität)
- $Z_{HS}$  Impedanz der Primärwicklung (Widerstand und Streuinduktivität)
- $Z_N$  Netzimpedanz
- $Z_{NS1}$  Impedanz Sekundärwicklung 1 (Widerstand und Streuinduktivität)
- $Z_{NS2}$  Impedanz Sekundärwicklung 2 (Widerstand und Streuinduktivität)

## Abkürzungen

- CB Leistungsschalter
- CES Comité Electrotechnique Suisse
- CT Stromwandler
- GIS gasisolierte Schaltanlage
- PS Pseudoschalter
- SF<sub>6</sub> Schwefelhexafluorid
- SS Sammelschiene
- VT Spannungswandler

- Auslegung der Anlage: Reduktion der Anregungsleistung (kleine Koppelkapazität), Vergrößern oder Verkleinern der Erdkapazitäten (muss durch Simulation oder Messung abgeklärt werden),
- Auslegung des Wandlers: Optimierung der nichtlinearen Magnetisierungscharakteristik des Spannungswandlers

(Luftspalt im Eisenkern), Einsatz einer zusätzlichen Bedämpfungseinrichtung auf der Sekundärseite des Wandlers.

**Betriebliche Maßnahmen:** Bei Schaltheandlungen gilt grundsätzlich, dass Ferroresonanzgefahr besteht, wenn Netzteile abgetrennt und nicht geerdet werden. Darauf ist bei Schaltungen, besonders bei Schaltungen für Prüfungen, zu achten.

Bei festgestellter einphasiger, stehender Ferroresonanz in einer Konfiguration nach Bild 12a gibt es drei mögliche Vorgehensweisen zur Beseitigung der Ferroresonanzschwingung:

Bild 12a gibt es drei mögliche Vorgehensweisen zur Beseitigung der Ferroresonanzschwingung:

- Der Leistungsschalter kann wieder eingeschaltet werden, um die Wandler mit dem Netz zu verbinden. Dies garantiert nicht, dass bei der nächsten Ausschaltung keine Ferroresonanz auftritt.
- Der Sammelschientrennschalter kann ausgeschaltet werden, sofern die Verriegelungsbedingungen es zulassen. Das ist möglich, da nur ein geringer Strom fließt.
- Einschalten des Leitungstrennschalters, sofern die Verriegelungsbedingungen es zulassen.

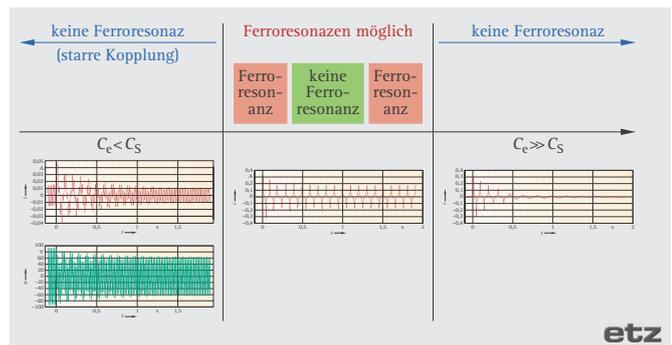
Gleichartige Anregebedingungen gelten auch für das Abschalten von leerlaufenden Sammelschienen mit induktiven Sammelschienen Spannungswandlern (Bild 12b).

Das Betreiben der Kupplung mit geschlossenen Trennschaltern und geöffnetem Leistungsschalter (CB) ist zu vermeiden, wenn der Leistungsschalter Steuerkondensatoren hat. Diese Konfiguration kann zu Ferroresonanz des Sammelschienen Spannungswandlers (Bild 12b, unten) mit der Kapazität des Steuerkondensators des Kupplungsschalters führen. Deshalb müssen die Trennschalter unmittelbar nach dem Öffnen des Kupplungsschalters geöffnet werden.

Dies gilt auch beim Abschalten von gekuppelten Sammelschienen (Spannungswandler im Kuppelfeld, Bild 12c).

**Auslegung der Anlage:** Die schwingungsanregende Steuerkondensatorkapazität, die Erdkapazitäten und die magnetische Charakteristik des Spannungswandlers stehen grundsätzlich in einer Wechselbeziehung. Es existieren gewisse Bereiche von Wertekombinationen, in welchen stationäre Ferroresonanzschwingungen möglich sind.

Die Neigung zu Ferroresonanzschwingungen hängt im Besonderen vom Ver-



**Bild 13.** Einfluss der Leistungsschaltersteuerkapazität –  $i$  Strom durch die Primärwicklung des VT,  $u$  Spannung durch die Sekundärwicklung des VT

hältnis der Steuerkapazität des Leistungsschalters zur Erdkapazität ab. Dabei werden drei Fälle unterschieden: keine Ferroresonanzanregung, abklingende Ferroresonanzschwingung und stationäre Ferroresonanzschwingung (Bild 13).

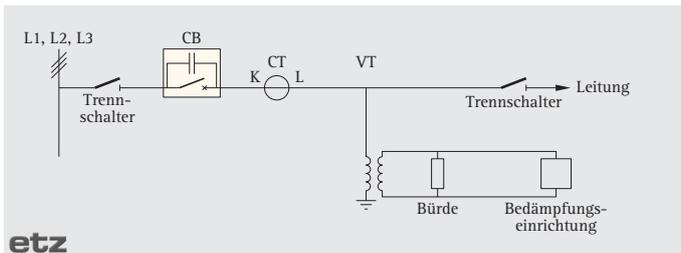
Insbesondere, wenn mehrere Leistungsschalter parallel auf einen Sammelschienen Spannungswandler wirken können, wird die Vermeidung von Ferroresonanzschwingungen oft schwer beherrschbar.

Die Kapazitätswerte der Steuerkondensatoren eines Typs zu ändern, ist in der Praxis äußerst schwierig. Das Gleiche gilt für die Erdkapazitäten. Eine Vergrößerung des  $C_e$ -Werts ist durch Zuschaltung eines Kopplungskondensators denkbar, wird aber in den wenigsten Fällen angewandt.

**Auslegung des Wandlers:** Durch das Einfügen eines Luftspalts in den Spannungswandlerkern wird die Magnetisierungskennlinie (vgl. Bild 10) linearisiert und der Neigungswinkel wird reduziert. Bei großer Magnetisierung infolge von Schaltheandlungen tritt die Sättigung dann weniger abrupt auf, wodurch bei gezielter Auslegung des Wandlers in vielen Anlagenkonfigurationen Ferroresonanzschwingung vermieden werden können.

Wesentlich für die natürliche Dämpfung auftretender Ferroresonanzschwingungen ist die Frage der Bebürdung. Wandler, die für eine hohe Messleistung dimensioniert sind, aber nur mit geringer Bürdenleistung betrieben werden, sind bei ungünstigen Anlagenkonfigurationen bezüglich Ferroresonanzschwingungen nicht ausreichend bedämpft.

Die Spezifikation der Spannungswandler sollte von zu hohen und oftmals nicht benötigten Forderungen bzgl. Bürdenleistung und Genauigkeit absehen, da dadurch der Spielraum in der Wandlerauslegung bzgl. der Vermeidung von Ferroresonanzen durch Senkung der Induktion bzw. Verschiebung der Magnetisie-



**Bild 14.** Bedämpfung einphasiger Ferroresonanzschwingungen durch Anschluss einer Bedämpfungseinrichtung

rungskurve ( $U$ - $I$ -Charakteristik) zu höheren Strömen hin, erheblich eingeschränkt wird. Die „Ferroresonanzfreiheit“ kann für den spezifizierten Parameterbereich der Anlage entweder experimentell oder durch ein geeignetes Rechenverfahren nachgewiesen werden.

**Bedämpfungseinrichtung:** Die notwendige Bedämpfung muss jeweils individuell für die vorliegende Netzsituation bestimmt werden. Entsprechende Beschaltungen werden aufgrund dieser Abklärungen ausgewählt (Bild 14). Abklingende Verläufe der Sekundärspannung und des Stroms in der Primärwicklung des Spannungswandlers zeigt das Oszillogramm Bild 15.

In der Praxis kommen folgende Dämpfungsbeschaltungen zum Einsatz: Widerstand, Sättigungsdröselspule, Widerstand mit Dröselspule (als Parallel- oder Serienwiderstand zur Dröselspule), Serienresonanzkreis (abgestimmt auf die Frequenzen der Ferroresonanz), elektronische Zuschaltung von Dämpfungsgliedern, Parallelresonanzkreis mit einem Reihenwiderstand (abgestimmt auf Betriebsfrequenz). In der Regel werden die Bedämpfungseinrichtungen, bei einphasiger Ferroresonanzschwingung, an einer Sekundärwicklung der Spannungswandler in jedem Außenleiter einzeln angebracht.

Wenn der Dämpfungswiderstand an der Sekundärwicklung des Wandlers so klein gewählt werden muss, dass die Genauigkeitsklasse beeinträchtigt wird, kann eine dämpfende Beschaltung gewählt werden, welche möglichst nur im Ferroresonanzfall wirkt und sonst den Messwandlerkreis unbeeinflusst lässt. Die dabei verwendeten Lösungen umfassen folgende Möglichkeiten (vgl. auch die bereits genannte Aufzählung der Dämpfungsbeschaltungen):

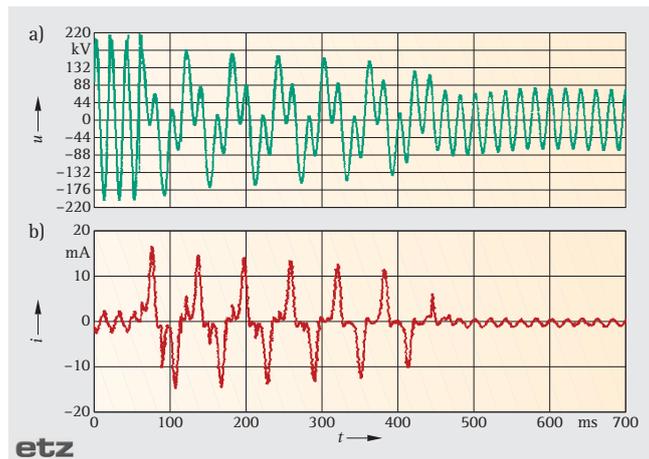
- Als eine der Standardlösungen werden Dämpfungsdrosselspulen an die Sekundärwicklungen der Spannungswandler angeschlossen, welche im Ferroresonanzfall in Sättigung gehen und dann Energie absorbieren.

- Aufwendiger ist der Einsatz eines Ferroresonanzschutzrelais, welches das Auftreten von Ferroresonanzschwingungen detektiert und kurzzeitig einen niederohmigen Dämpfungswiderstand elektronisch zuschaltet. Der Widerstand wird wieder abgeschaltet, wenn die Ferroresonanz abgeklungen ist. Treten die Ferroresonanzen nur bei Schalthandlungen auf, so können Hilfskontakte für das Zuschalten der Widerstände verwendet werden [5].

Die Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die praxisrelevanten Ferroresonanzsituationen. Dabei sind die Eigenschaften, das Gefährdungspotenzial und die möglichen Gegenmaßnahmen zusammengestellt.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass bei Abänderungen der Netzkonfiguration, Ersatz von Komponenten und/oder Anpassung der Schaltprogramme Ferroresonanzschwingungen auftreten können, die bisher nicht festzustellen waren. Dabei sind insbesondere folgende Modifikationen in Betracht zu ziehen:

- Vergrößerung der Steuerkondensatoren von CB zur Erhöhung der Abschaltleistung,
  - Änderung der Erdkapazitäten durch Umbau von Anlagenteilen, z. B. Änderung einer Kabelverbindung,
  - Änderung der Betriebsspannung eines Freileitungsübertragungssystems auf einem Mast mit weiteren Übertragungssystemen,
  - Austausch von Betriebsmitteln (Leistungsschalter, Wandler, Transformator),
  - Aufbau von Bauprovisorien,
  - Änderung der Sternpunktbehandlung.
- Bei der Angabe des Gefährdungspotenzials in Tabelle 2 ist darauf hinzuweisen, dass sich die grün eingefärbte Spalte: „kein Gefährdungspotenzial“ jeweils nur auf den behandelten Anregungsmechanismus bezieht. In gewissen Schaltanlagenkonfigurationen können gleichzeitig mehrere Anregungsmechanismen vorlie-



**Bild 15.** In einer Schaltanlage gemessene abklingende Ferroresonanzschwingung durch Dämpfung – a) Spannung  $u$  an der Sekundärwicklung, b) Strom  $i$  durch die Primärwicklung

gen. In diesem Fall wären zum Ausschluss von Ferroresonanzschwingungen unter Umständen entsprechend mehrere Abhilfemaßnahmen zu ergreifen.

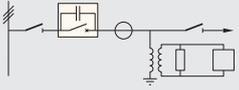
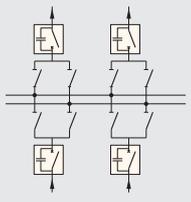
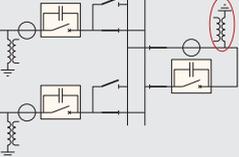
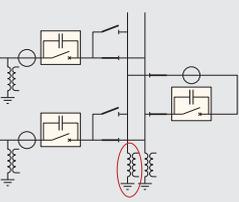
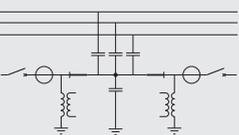
## Ausblick

In einer Serie von mehreren Fachbeiträgen zum Thema Ferroresonanzschwingungen in Hochspannungsnetzen wurden die wichtigsten Aspekte über Ferroresonanzen aufgezeigt. Dabei wurde angestrebt, den Problemkreis mit praktischen Beispielen aber auch mit grafischen sowie tabellarischen Zusammenstellungen der Abhilfemethoden und der kritischen Anlageparameter einem breiten Fachpublikum vorzustellen. Die Arbeit war im Besonderen dadurch motiviert, dass eine zusammenfassende praktische Darstellung der Problematik in der Fachliteratur weitgehend fehlte. Die vorliegende Artikelserie soll den Herstellern von Messwandlern und den Planern, Herstellern und Betreibern von Hochspannungsanlagen und -netzen als Leitfaden dienen, die heute immer noch häufig auftretenden Probleme im Zusammenhang mit Ferroresonanzschwingungen zu vermeiden, bzw. deren Auftreten effizient zu beheben.

Die Gründung der internationalen Arbeitsgruppe AG 1 des nationalen Komitees TK 38, Schweiz, für das Gebiet Ferroresonanzschwingungen, beruht auf den positiven Erfahrungen des Vorsitzenden der AG 1, die er bei zwei Arbeitsgruppen über Wandlerthemen sammeln konnte. Daraus resultierten folgende Publikationen:

- „Betriebserfahrungen mit Messwandlern >100 kV und ihre Konsequenzen“ [6],
- „The paper-oil insulated measurement transformer“ [7].



	Gefährdungspotenzial für das Auftreten von Ferroresonanz			nach Übersichts-schaltplan	Netzzuschaltungen bei denen Ferroresonanz auftritt (Anregungsmechanismus)	Bedingung für die Anregung Energieeinkopplung	Erkennen sofortige Abhilfemaßnahme
	hoch	mittel	klein				
<b>einphasige Ferroresonanz im starr geerdeten Netz</b>							
Abzweig (Leitung, Kabel)	zwischen CB und offenem Abzweigtrennschalter  Spannung von der Sammelschiene	zwischen CB und offenem Abzweigtrennschalter  Spannung von der Sammelschiene	CB ohne Steuerkondensatoren		bei Prüfschaltung (Überprüfung des Schutzes, Wartung des CB) durch Ausschaltung des CB	je größer die Steuerkapazität des CB und je kleiner die Erdkapazität ist.  Energieeinkopplung über Steuerkapazität des CB	Spannungsüberwachung (Wert, Frequenz)  CB sofort wieder einschalten oder Sammelschientrennschalter ausschalten
Sammelschiene	mehrere parallele CB mit großer Kapazität der Steuerkondensatoren	ein, zwei CB mit kleiner Kapazität des Steuerkondensators	CB ohne Steuerkondensatoren		Normalbetrieb (Sammelschienenfehler, leerlaufende Sammelschiene)  Prüfschaltungen durch Ausschaltung des CB	CB mit Steuerkondensatoren und induktive Spannungswandler in der SS  Energieeinkopplung über Steuerkapazität des CB	Spannungsüberwachung (Wert, Frequenz)  CB sofort wieder einschalten oder Sammelschientrennschalter ausschalten
Kupplung	CB mit großer Kapazität der Steuerkondensatoren	CB mit kleiner Steuerkapazität	CB ohne Steuerkondensatoren		Normalbetrieb (Abschaltung CB und Trennschalter in Ein) durch Ausschaltung des CB	je größer die Steuerkapazität des CB und je kleiner die Erdkapazität ist  Energieeinkopplung über Steuerkapazität des CB	Spannungsüberwachung (Wert, Frequenz)  CB sofort wieder einschalten oder Sammelschientrennschalter ausschalten
Kupplung	CB mit großer Kapazität der Steuerkondensatoren	Wandler vor oder nach geschlossenem Leitungstrennschalter bei ausgeschaltetem kurzen Leitungsstück	Wandler vor oder nach geschlossenem Leitungstrennschalter bei ausgeschalteter langer Leitung oder CB ohne Steuerkondensatoren		Normalbetrieb nach erfolgloser Wiedereinschaltung durch Ausschaltung des CB	je größer die Steuerkapazität des CB und je kleiner die Erdkapazität ist  über Steuerkondensatoren aller CB an den Leitungsenden	Spannungsüberwachung (Wert, Frequenz)  Spannungszufuhr über Trennschalter unterbrechen
leerlaufende Leitung auf Masten mit Stromkreisen höherer Spannungen	CB in Aus und Trennschalter in Ein (meist abhängig von der Leitungslänge)	CB in Aus und Trennschalter in Ein (meist abhängig von der Leitungslänge)	Trennschalter in Aus (evtl. Leitung geerdet)		Normalbetrieb durch Ausschaltung des letzten CB der Leitung	kapazitive Einkopplung von höherer Spannungsebene (Leitungsanordnung bei Mehrfachstromkreisen auf einem Mast)	Spannungsüberwachung (Wert, Frequenz)  Erden der leerlaufenden Leitung <sup>1</sup>

<sup>1</sup> in betroffenen Außenleitern sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Wandler an beiden Leitungsenden betroffen

**Tabelle 2.** Zusammenstellung Ferroresonanzschwingungen, Anlagenkonfiguration, Erkennung und Abhilfe

Die zwei Arbeitsgruppen setzten sich aus Mitgliedern der Wandlerhersteller, der Hersteller der Schaltanlagen und deren Betreibern zusammen. Die Ergebnisse dieser Arbeitsgruppen wurden international verwendet und fanden ihre Anwendung in IEC/TC-38-Standards für Messwandler.

Es ist vorgesehen, dass die Ergebnisse der AG1 für Ferroresonanzschwingungen von magnetischen Spannungswandlern in Schaltanlagen die Basis für ein Amendment des IEC/TC-38/60044-2-Standards für induktive Spannungswandler [8] bzw. für die zukünftige IEC/TC 38/61869-3 Ed. 1 „Specific requirements for inductive voltage transformers“ sind.

## Literatur

- [1] Bräunlich, R.; Däumling, H.; Hofstetter, M.; Schlierf, H.-W.; Schmid, J.; Minkner, R.: Ferroresonanz an 220/420-kV-Spannungswandlern bei Schalthandlungen. *etz Elektrotech. + Autom.* 128 (2007) H. 7, S. 36–40 (ISSN 0948-7387)
- [2] Bräunlich, R.; Däumling, H.; Hofstetter, M.; Prucker, U.; Schlierf, H.-W.; Schmid, J.; Minkner, R.: Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen – Teil 1: Definition und allgemeine Erklärungen. *Bulletin SEV/VSE 97* (2006) H. 23, S. 17–22 (ISSN 1660-6728)
- [3] Bräunlich, R.; Däumling, H.; Hofstetter, M.; Prucker, U.; Schlierf, H.-W.; Schmid, J.; Minkner, R.: Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen – Teil 2: Fallbeispiele. *Bulletin SEV/VSE 97* (2006) H. 24/25, S. 27–30 (ISSN 1420-7028)
- [4] FKH – Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich/Schweiz: [www.fkh.ch](http://www.fkh.ch)
- [5] Wojciech, P.; Florkowski, M.; Fulczyk, M.; Mahonen, P.; Luto, M.; Nowak, W.; Preiss, O.: Schutz vor Resonanzen – Methoden zur Vermeidung von Ferroresonanz in Mittelspannungs-Spannungswandlern. *ABB Technik* (2005) H. 4, S. 42–46 (ISSN 1013-3143)
- [6] Vorwerk, H.-J.: Betriebserfahrungen mit Messwandlern >100 kV und ihre Konsequenzen. *Bulletin SEV/VSE 72* (1981) H. 1, S. 27–34 (ISSN 1660-6728)
- [7] The paper-oil insulated measurement transformer. CIGRE-Working-Group 23.07 of Study Committee 23 (Substation). Technical Brochure 57. Paris/Frankreich: CIGRE, 1990 (zu beziehen über CIGRE, 21 Rue d'Artois, 75008 Paris, France, Fax: 00 33-1/53 89 12 99, E-Mail: [publications@cigre.org](mailto:publications@cigre.org))
- [8] IEC 60044-2:2003-02 Instrument transformers – Part 2: Inductive voltage transformers. Genf/Schweiz: Bureau de la Commission Electrotechnique Internationale (ISBN 2-8318-6837-8)