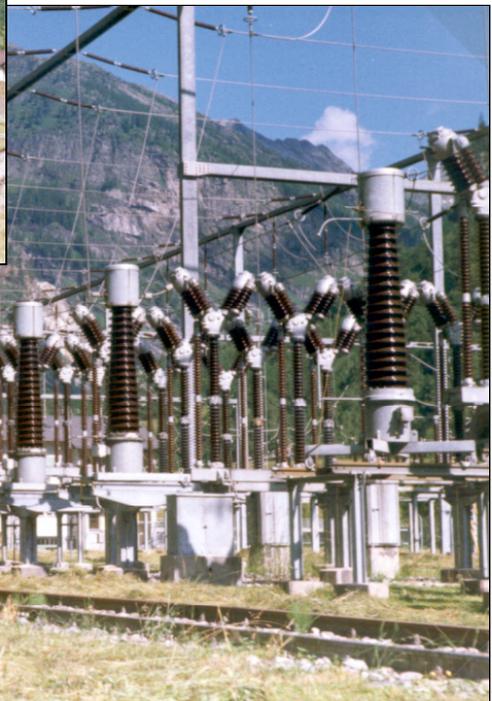


**FKH - / VSE - Fachtagung  
12. November 2003  
Aula Fachhochschule Aargau, Brugg - Windisch**

## ***Hochspannungsmesswandler***

***Betriebsfragen, Instandhaltung,  
technologische Entwicklungen***



***VSE-Druckschrift 8.03 d***



**FKH - / VSE - Fachtagung  
12. November 2003  
Aula Fachhochschule Aargau, Brugg - Windisch**

**Hochspannungsmesswandler  
Betriebsfragen, Instandhaltung,  
technologische Entwicklungen**

*Veranstalter:*

*Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH  
Voltastrasse 9  
8044 Zürich*



*Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, VSE  
Postfach  
5001 Aarau*



**VSE-Druckschrift 8.03 d**



**FKH - / VSE - Fachtagung, 12. November 2003  
Aula Fachhochschule Aargau, Brugg - Windisch**

# **Hochspannungsmesswandler**

**Betriebsfragen, Instandhaltung,  
technologische Entwicklungen**

## **Vorwort**

In elektrischen Energieversorgungssystemen kommt den Hochspannungsmesswandlern eine zentrale Rolle zu, indem sie das Bindeglied zwischen Primär- und Sekundärtechnik bilden. Messwandler transformieren Ströme und Spannungen aus den Energieversorgungsnetzen zu Signalen, die für die Mess- und Schutzeinrichtungen angepasst sind und bewerkstelligen, soweit notwendig, die galvanische Trennung zwischen der Hochspannungsebene und der Leittechnik. Damit ermöglichen sie die quantitative Erfassung der Energieflüsse und die sichere und optimierte Betriebsführung auf allen Spannungsebenen.

Schlüsselanforderungen für Messwandler sind Genauigkeit, ein gutes Übertragungsverhalten für Schutzanwendungen sowie Zuverlässigkeit. Daneben werden günstige Lebensdauer, Betriebssicherheit, Kompaktheit und Rückwirkungsfreiheit auf das Hochspannungsnetz und auf die Sekundärtechnik erwartet.

Eingeleitet wird die Tagung mit übergeordneten Fragestellungen des Einsatzes, der Wirtschaftlichkeit und Logistik, sowie des Risikomanagements.

Der Schwerpunkt der geplanten Veranstaltung wird auf die technischen Eigenschaften der Messwandler gelegt: Dabei wird auf die Vielfalt der Bauformen eingegangen. Im Vordergrund stehen Fragen des Signalübertragungsverhaltens, der Messunsicherheiten, der Apparateisolation und der Qualität und Prüfung. Schliesslich werden auch Fragen der Wechselwirkungen mit anderen Komponenten und den Energieversorgungsnetzen sowie die Beanspruchungen im Betrieb und Methoden zur Erfassung des Alterungszustands behandelt.



# Tagungsprogramm

Datum: 12. November 2003, Beginn 09.15 h

Ort: Aula, Fachhochschule Aargau, 5210 Windisch

**Titel: Hochspannungsmesswandler  
Betriebsfragen, Instandhaltung, technologische Entwicklungen**

Tagungsleitung: Dr. R. Minkner

	<b>Titel / Inhalt</b>	<b>Referent</b>
09 <sup>15</sup> -09 <sup>25</sup>	Begrüssung  Grussworte des VSE	Dr. Th. Aschwanden, BKW FMB Energie AG, Vizepräsident der FKH  P. Luginbühl, VSE
09 <sup>25</sup> -09 <sup>45</sup>	Einführung in das Tagungsthema	Dr. R. Minkner
09 <sup>45</sup> -10 <sup>15</sup>	Transformateurs de mesure des réseaux HT et THT de l'EOS  Messwandler in den Hoch- und Höchstspannungsnetzen der EOS	P. Muller, EOS
10 <sup>15</sup> -10 <sup>45</sup>	Methoden zur Erfassung des Isolationszustands vor Ort	Dr. Th. Heizmann, FKH
10 <sup>45</sup> -11 <sup>15</sup>	<b>Kaffeepause</b>	
11 <sup>15</sup> -11 <sup>45</sup>	Heutige Anforderungen an Messwandler und deren Umsetzung	B. Bertschi, Pfiffner Messwandler AG
11 <sup>45</sup> -12 <sup>15</sup>	„Kleinsignal-Strom- und Spannungswandler“ für Mittelspannung	Dr. J. Schmid, Trench Switzerland AG
12 <sup>15</sup> -12 <sup>45</sup>	RC-Spannungswandler für Standardanwendungen, Quality Power Management und Diagnostik	Dr. R. Minkner, Trench Switzerland AG
12 <sup>45</sup> -13 <sup>45</sup>	<b>Mittagessen</b>	
13 <sup>45</sup> -14 <sup>15</sup>	Aufgaben des METAS, Eichung, Rückführbarkeit	R. Kämpfer, METAS
14 <sup>15</sup> -14 <sup>45</sup>	Nichtlineare Schwingungen. Ferroresonanz in Wechselspannungsnetzen (Kippschwingungen)	Dr. R. Bräunlich, FKH
14 <sup>45</sup> -15 <sup>15</sup>	Einsatz konventioneller und nichtkonventioneller Wandler in der Sekundärtechnik	Dr. H.-J. Herrmann Siemens AG, Nürnberg
15 <sup>15</sup> -15 <sup>45</sup>	Technologie der Öl- und SF <sub>6</sub> -isolierten Wandler	Dr. J. Voss, Ritz Messwandler, Hamburg
15 <sup>45</sup> -16 <sup>30</sup>	Schlussdiskussion, Kurzbeiträge	Dr. R. Minkner

Ende der Veranstaltung ca. 16<sup>30</sup>



# Zusammenfassung der Referate

## *Inhaltsverzeichnis*

	Seite
<b>Betriebserfahrung und gewählte Lösungen im Westschweizer Hochspannungsnetz in den letzten 50 Jahren</b> P. Muller, EOS	1
<b>Heutige Anforderungen an Messwandler und deren Umsetzung</b> B. Bertschi, Pfiffner Messwandler AG	17
<b>Technologie der Messwandler mit Öl-Papier-Dielektrikum und SF<sub>6</sub>-Gas-Dielektrikum</b> Dr. J. Voss, Ritz Messwandler GmbH, Hamburg	39
<b>Methoden zur Erfassung des Isolationszustands vor Ort</b> Dr. Th. Heizmann, Dr. V. Der Houhanessian, Dr. H.-J. Knab, Dr. R. Bräunlich, FKH	47
<b>Aufgaben des Bundesamtes für Metrologie und Akkreditierung (METAS): Eichung und Rückführbarkeit</b> R. Kämpfer, METAS	67
<b>RC-Spannungswandler für Standardanwendungen, Quality Power Management und Diagnostik</b> Dr. R. Minkner, Trench Switzerland AG	69
<b>Kleinsignal-Strom- und Spannungswandler für Mittelspannung</b> Dr. J. Schmid, Trench Switzerland AG	83
<b>Einsatz konventioneller und nicht konventioneller Wandler in der Sekundärtechnik</b> Dr. H.J. Herrmann, Siemens AG, Nürnberg	95
<b>Nichtlineare Schwingungen / Ferroresonanz in Wechselspannungsnetzen</b> Dr. R. Bräunlich, FKH, mit Beiträgen von Dr. R. Minkner	107
<b>Teilnehmerverzeichnis</b>	125
<b>Referentenadressen</b>	129



# Transformateurs de mesure des réseaux HT et THT de l'EOS

Pierre Muller

EOS Transport, Service d'exploitation, Lausanne

## Résumé:

Le choix raisonné des caractéristiques de transformateurs de mesure à installer dans un réseau THT doit prendre en compte, au mieux:

- le cahier des charges de la mesure (précision, comptage et nature de l'objet à protéger)
- les normes et la documentation technique
- les besoins et les particularités du réseau et du lieu d'implantation
- la culture de l'entreprise

les enseignements des retours d'expérience y c. les conclusions des rapports d'incidents (internes ou externes) survenus en exploitation sur des matériels similaires

- les statistiques d'incidents
- l'effectif réduit des personnels et l'incidence sur la fréquence des rondes dans les installations
- une fiabilité de fonctionnement et durée de vie suffisante en vue de sauvegarder l'investissement initial
- l'adoption de dispositifs autonomes de surveillance et de protection en vue de prévenir et de réduire l'apparition d'incidents et les dangers inhérents (protection des personnes et des matériels)
- lors d'incidents, la réduction de la durée des pannes
- une approche ouverte et pragmatique aux nouvelles technologies (performances améliorées, simplification ou progrès significatifs)
- le conseil ou l'expertise

L'exposé qui suit, basé sur les observations relevées durant plusieurs décennies d'exploitation des réducteurs de mesure, en réseau HT et THT donne le point de vue de l'exploitant.

## Références

- "Erfahrungen mit der Strenpunktterdung im 110 kV Netz der Bayernwerk AG M. R. Gampenrieder. Bulletin ASE 64 (1973) 8, 14 avril. Campagne de mesure systématique de tg  $\delta$  effectuée sur 750 TP et 800 TI, déchet constaté de 10% env. A motivé le même contrôle de nos appareils lors de campagnes de mesure effectuées sur site.
- Groupe de travail UK-QS FK 38, rapport de synthèse préparé par 10 experts : „Einige Gesichtspunkte zur Qualitätssicherung bei Messwandlern“ Bulletin ASE/UCS tome 78(1987) n°9 pp. 469-477. Rappel sur les dérives du plan de tension du réseau CH en heures creuses, avec dépassement de la valeur  $U_m$ .
- "Lehren aus Störungen in Stromversorgungsnetzen" M. H. Wüger (a. dir.EKZ) Bulletin ASE/UCS Tome 69 (1978) 23. 2déc. Mise en garde sur la diminution des niveaux d'isolement amorcée lors des révisions des normes CEI 1962 en 1967, puis 1972. Sanction pratique résultant des pannes "mamouths" survenues sur les réseaux nord américains de la côte est entre 1965 et 1977.
- "Einflüsse auf die Nutzungsdauer der Hochspannungswandler in den Netzen der öffentlichen Stromversorgung" MM. P. Bunse, (VEW Energie) R. Heidingsfelder (EVS) G. Lange (VEW Eurotest) N. Linke (Veag) Elektrizitätswirtschaft, Jg.95 (1996) Heft 6. Insiste sur la nécessité de rechercher les causes exactes des avaries et d'y apporter les remèdes adéquats afin d'éviter une "épidémie"
- "Ferroresonanz –ein weiterhin aktuelles Problem". Wandlerschäden auf einer abgeschalteten 220 kV-Leitung, verursacht durch eine parallelgeführte 380 kV. MM. Georg Köppl, Serge Läderach, Edgar Lücke et Alois Umlauf. Moyens d'amortissement des phénomènes de relaxation des TP en chargeant les enroulements secondaires y c. l'enroulement en triangle ouvert.
- Groupe de travail 07 CIGRE: « Transformateurs de mesure » du Comité d'Etudes 23 (Postes).

Electra n°119 et n° 124 (1989) Technologie et comportement en service des réducteurs de mesure. Principe de réalisation. Vérification et surveillance. Enquêtes sur les incidents survenus entre 1970 et 1986. enquêtes sur 864 incidents survenus entre 1970 et 1986. Voir le catalogue des causes de défaillances recensées dans l'analyse statistique indiquée ci après.

GT 23.07 CIGRE. La population étudiée des réducteurs de mesure (~136 000 appareils, compris entre  $\geq 60$  et  $\leq 500$  kV recensés parmi les utilisateurs et constructeurs des pays suivants : Allemagne, Australie, Espagne, France, Grande-Bretagne, Japon, Nouvelle-Zélande, Pays-Bas, Suède et Suisse, dénombreait :

environ 56'500 réd. de courant (TI)	~ 41 %
environ 23'000 réd. de tension magnétique (TP ind.)	~ 17 %
environ 36'000 réd. de tension capacitif (TP cap.)	~ 27 %
environ 20'000 combinés	~ 15 %

## Causes des défaillances, selon GT 23.07 CIGRE

Cause possible de défaillances	Types de défauts et pourcentage	
	Défauts violents	Défauts non violents
Conception erronée	16%	40%
Foudre	16%	2%
Mauvais contrôle de qualité	9%	9%
Vieillessement anormal(DP, gaz dis.)	6%	13%
Défauts sur appareil voisin	6%	7%
Conditions anormales du rés.	6%	6%
Autres raisons	2%	4%
Humidité ou fuite d'huile	5%	13%
Inconnus	23%	4%
Tremblement de terre	7%	2%
Total	100%	100%
Taux relatif de défaillance	0,23%	0,42%
Taux de défaillance rapporté aux années d'exploitation (défauts par réducteur x an)	0,039%	

## Méthodes de surveillance en exploitation

- Contrôles effectués durant les visites d'installations: position des soufflets d'expansion, fuites d'huile, bris de porcelaine, pollution des isolateurs, en hiver, persistance uniforme et tripolaire du dépôt neigeux, etc.
- Surveillance de la tension résiduelle des TP ou surveillance homopolaire de la dissymétrie du réseau.
- Signalisation d'alarme (pressostat SF<sub>6</sub>, pour les appareils remplis de gaz et, pour les appareils contenant de l'huile, fonctionnement du pressostat de déclenchement, alarme Buchholz sur d'anciens appareils à gros volume d'huile, etc.
- Analyse des paramètres physico-chimiques de l'huile: couleur, tension disruptive selon différentes températures et teneur en eau, facteur de perte diélectrique ou tg.δ à 90°C, solubilité de l'eau dans l'huile en fonction de la température, du vieillissement ou d'une teneur en composants aromatiques, reprise d'humidité en fonction du temps d'exposition à l'air présentant différents taux d'humidité, tension inter-faciale (mN/m) indice de neutralisation (mg de KOH/g d'huile)
- Analyse des gaz dissous. Le laboratoire de Chamoson est aussi équipé pour la mesure des furanes, le degré de polymérisation du papier.
- Contrôles par thermovision IR. Vérification du serrage des connexions aériennes, détection de points chauds.

- ☑ Mesure de la tg.δ jusqu'à la tension de service (TI). Campagnes de mesure, in situ, dans les postes du réseau romand, 1980÷87 env.
- ☑ Mesure des décharges partielles (DP) par détection des ondes ultra sonores.
- ☑ Mesure du courant de fuite.

### Méthodes de protection des TP et TI

- ☑ Installation de fusibles aux primaires de TP (souhaitable dans toute la mesure du possible...) et systématiquement (HPC) au secondaire de chaque enroulement
- ☑ Para-surtension côté secondaire des TP :  
dans les installations GIS, afin de limiter dans la filerie et l'appareillage de contrôle commande BT, les influences EMC, lors de manœuvres des sectionneurs,  
dans les installations aériennes, afin d'atténuer les surtensions atmosphériques induites dans la filerie et l'appareillage de contrôle commande BT
- ☑ Para-surtension côté secondaire des TI :  
Essentiellement installé aux noyaux de protection 1A et complété par une protection thermique destinée à protéger le noyau des effets néfastes d'une ouverture accidentelle et durable, en court-circuitant ses bornes.

### Population de TP, TI et groupes de mesure des réseaux EOS: 65,125, 220 et 380 kV

- matériel en installation extérieure	<b>389 TP</b> <b>420 TI</b> <b>18 groupes de mesure</b>
- mat. GIS en installation intérieure	100 app. (essentiellement TI) inclus dans l'effectif précédent

## Caractéristiques d' exploitation des réseaux où sont installés les TP, TI et groupes de mesure

$U_{n \text{ rés.}}$ [kV entre phase] (écart de tension en exploitation)	65 ( $\pm 5\%$ )	125 ( $\pm 5\%$ )	220 (+12–<5%)	380 (+10–<5%)
Courant de c.-circuit triphasé max.[kA]	Env. 20	Env.25	Env. 45	
Mode de mise à terre du point neutre au primaire des (auto)/transformateurs	1) directe, 2) via self de limit. de $I_{cc}$ 3) isolée	directe		
Mode de réenclenchement automatique sur défaut ligne fugitif	—	Eventuelle-ment renvoi triphasé lent	Rapide monophasé & éventuellement mono & triphasé lent	

## Protection contre les surtensions atmosphériques et de manœuvres

$U_{n \text{ rés.}}$ [kV entre phase]	65	125	220	380
Armement des pylônes de lignes aboutis- sant aux postes :  - protecteurs ou « fil de garde » - isolateurs équipés d'éclateurs - résistance de mise à terre	de cas encas de cas encas e.g. $\leq 10 \Omega$	systématiquement installés systématiquement munis en plaine, $< 5 \Omega$		
Réseau de terre des postes	Résistance de terre $< 200 \text{ m}\Omega$			
Parafoudres installés à proximité des réd. de mesure	<b>Non!</b> sauf dans les champs d'(auto)/ de transformateurs, et les départs de lignes exploités en déclassement (à niveau de tension inférieur à celui de la réalisation)			

## Caractéristiques constructives appliquées aux réducteurs de mesure

U <sub>n</sub> rés. [kV entre phase]	65	125	220	380
Genre d'isolation, en installation de type				
- intérieure	solide	—	—	—
- extérieure	immergée: pap. imprég.et huile isolante	Immergée, papier imprégné et huile iiso- lante, (cas isolés: TP au SF <sub>6</sub> )		
Type d'isolateur, en installation intérieure	Composite* Résine époxy	—	—	—
-extérieure	Porcelaine, (cas isolés: en composite*)			
Type de fermeture étanche	Soufflet en caoutchouc, métallique ou anéroïde			
Indicateur visuel d'expansion (TI)	Systématique			

\*Composite : tube en fibre de verre imprégnée de résine époxy doté d'une tenue mécanique. L'extérieur est recouvert d'un revêtement souple en élastomère de silicone dont le profil à ailettes présente une ligne de fuite importante. Ce matériel devant résister aux contraintes extérieures, il doit cependant faire ses preuves pendant au moins 25 ans.

## Valeurs d'isolement requises pour les réducteurs de mesure

U <sub>n</sub> rés. [kV entre phase]	65	125	220	380
U <sub>m</sub> [kV entre phase]	72,5 (100)	170	300(362)	420 ou >
U <sub>p</sub> , (1 min, 50 Hz) [kV phase-terre]	140 (185)	325	510	680
U <sub>BIL</sub> (1,2/50 μs) [kV <sub>peak</sub> phase-terre]	325 (450)	750	1175	1425
U <sub>SIL</sub> [kV <sub>peak</sub> phase-terre]	—	—	950	1050
Décharges partielles [pC] Valeurs limites à l'état neuf - à 1,2 U <sub>m</sub> /√3 - à U <sub>m</sub> (tension appliquée entre phase et terre)		≤ 5 ≤ 10		
Facteur de dissipation diélectrique (tg.δ) Valeurs à l'état neuf (à U <sub>m</sub> /√3) Valeurs jugées critiques en service		Pour matériel immergé dans l'huile  < 2,5‰ ≥ 6 ÷ 10 ‰		

<p><b>1. Pressostat de mise hors service lors d'avarie interne grave</b></p> <p><b>2. Surveillance du courant de fuite dérivé à la terre</b></p> <p><b>3. Protection de "masse cuve étendue"</b></p>	
<p>Applicable aux TI et TP inductifs:</p> <p>1.- pressostat dans le pied ou la zone hors potentiel</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- fonctions du contact de fermeture (1bar)</li> </ul> <p>2.- surveillance du courant de fuite dérivé à la terre</p> <p>3.- borne de mise à terre de la cuve métallique du TI</p> <p>3'- borne de mise à terre de la cuve métallique du TP</p>	<p>Installation systématique sur tous les appareils récents ou réhabilités.</p> <p>Déclenche instantanément le départ (disj.+sect.), alarme le dispatching et verrouille la commande « EN » à distance de l'appareil.</p> <p>Au moyen de petits TI de contrôle, identiques à ceux utilisés par ex. pour la surveillance ou le diagnostic de parafoudres THT raccordés en pied d'appareil -hors potentiel- il est en principe possible de détecter la modification de l'état d'isolement d'un transformateur de mesure. Il est souhaitable que de tels dispositifs dotés de contacts à dépassement de seuils soient aussi développés pour la surveillance des transformateurs de mesure et systématiquement installés dans les installations THT, notamment.</p> <p>Dans les champs transformateurs récents, la connexion de mise à terre traverse un TI tore dit de "protection masse cuve étendue"</p> <p>Même disposition que pour le TI</p>

#### Commentaires:

1.- Le pressostat installé dans le pied de cuve est particulièrement recommandé lorsque le TI ou le groupe de mesure est installé entre le disjoncteur et le sectionneur du départ (ligne ou transformateur)

En cas de défaut interne grave, la surpression engendrée par les gaz de décomposition de l'isolation du transformateur de mesure et détectée par le pressostat, provoque sans délai - lorsque le seuil plus que critique de 1bar est atteint ou dépassé - l'ordre d'ouverture au disjoncteur et au sectionneur. Si la topologie d'installation de l'appareillage de manœuvre est différente, on doit en variante, transmettre cet ordre d'ouverture au disjoncteur sis dans le poste mitoyen, par télé-action. Par ailleurs, si durant la manœuvre d'ouverture du sectionneur, un courant de défaut revient par ce poste sur le réducteur avarié, la brûlure des contacts sur la phase perturbée constitue un moindre mal comparé à la nécessité absolue d'isoler du réseau le réducteur défectueux. Lorsque le transformateur de mesure avarié est déconnecté du réseau, les installations avoisinantes sont en principe, sécurisées.

L'alarme transmise au dispatching - via le fonctionnement du pressostat - ainsi que le verrouillage de la commande " EN " du sectionneur et du disjoncteur du champ en défaut. Il s'agit d'une amélioration importante de l'aide à la conduite. En procédant ainsi

on évite notamment une aggravation voire une extension du défaut, suite à des tentatives hasardeuses de remise sous tension!

2.- Mesure du courant de fuite dérivé à la terre: Aussi bien pour le TI que pour le TP, si le réducteur de mesure est sain, le courant dérivé à la terre en service n'est fonction que de la capacité -qqc.centaines de pF- de l'appareil raccordé à la haute tension. Ce courant se compose d'une partie déwattée ou capacitive (amplitude  $I_{c0}$ )-la plus importante - et d'une très faible partie wattée (amplitude  $I_r$ ) -cette faiblesse signifiant justement la "bonne santé" de l'appareil- le rapport  $I_r/I_{c0}$  des deux composantes correspond au facteur de dissipation diélectrique souvent désigné par le vocable: "tangente delta". L'augmentation d'amplitude du courant dérivé signifie de manière générale, une dégradation de l'isolation. Son origine peut être interne ou externe et, selon l'importance ou la rapidité de l'accroissement, résulter soit d'une pollution ou conduction de la surface de l'isolateur en contact avec l'air, soit d'une détérioration de l'isolation interne. Dans le premier cas, à l'extrême, un contournement externe de l'isolateur, peut s'ensuivre, alors que dans le deuxième cas, le réducteur de mesure ne peut finalement qu'amorcer ou claquer de façon interne. Dans les deux cas, le réseau est perturbé, cependant avec dans le deuxième cas, de graves conséquences alentour, dues à l'explosion et la projection de débris isolants y c. l'initialisation d'un incendie quand l'appareil contient de l'huile ou un compound mis à feu par la haute température de l'arc du défaut.

3.- Protection dite de "masse cuve étendue": Elle fonctionne selon le même principe que la protection masse cuve des transformateurs de puissance (mise au point par EdF, il y a plus de 50 ans) et généralisée à EOS. Elle consiste à déclencher sans délai l'installation, dès qu'un courant sinificatif d'une avarie interne, dérivé à la masse, se mesure dans la connexion de mise à terre de l'objet surveillé: disjoncteur, parafoudre, réducteur de mesure: TI, TP combiné de mesure ou boîte à câble.

Cette protection "masse cuve étendue" est installée dans les nouveaux champs transformateurs aussi bien du côté HT que BT et, pour autant que le point neutre de ces réseaux soit mis à terre; assure un déclenchement sûr et très rapide de tous les disjoncteurs du transformateur - qui est de loin l'objet le plus coûteux du champ - grâce à des relais  $I_{max}$  aptes à fonctionner en 2 ms (mesure de la pente  $di/dt$ ) Si le champ est également équipé de disjoncteurs très rapides (à commande hydraulique) un courant de défaut supérieur à 20 kA peut être éliminé, temps d'extinction d'arc inclus, en un temps record de 30 ms! (cas vécu) Dans le but de réduire le nombre de relais  $I_{max}$  ultra-rapides nécessaires, les enroulements secondaires sont connectés en parallèle; par exemple tous les TI afférents à la même phase peuvent simplement n'être raccordés que sur un même relais. L'inspection visuelle, à effectuer obligatoirement après le fonctionnement, permet à coup sûr de localiser l'appareil défectueux!

## Caractéristiques des TP

Les TP du réseau THT sont essentiellement capacitifs; autrefois obligatoirement utilisés comme condensateurs de couplage des courants porteurs HF circulant dans les conducteurs des lignes aériennes à tension  $U_n \geq 125$  kV; bien que ce mode de transmission soit aujourd'hui en voie de disparition, la fonction principale de ces diviseurs de tension capacitifs, à savoir la réduction de tension destinée aux circuits mesure, comptage et protection, s'est avérée durant ces nombreuses décennies d'exploitation, d'une qualité et fiabilité sans égales.

Les TP inductifs ne sont d'une manière générale, utilisés que dans les réseaux HT, alors qu'en réseau THT, on les trouve par ex. branchés en extrémités de tronçons câblés ou encore sur les jeux de barres d'installations GIS, isolées au gaz SF<sub>6</sub>, voire dans les transformateurs de mesure combinés, où ils sont logés en pied d'appareil.

U <sub>n rés.</sub> [kV entre phase]	65	125	220	380
Nature du TP	Inductif	Ind.ou cap.	Cap.(ind.)	Cap.
U <sub>n HT</sub> [kV entre phase]	66	132	242	418
U <sub>n BT</sub> [kV entre phase]	0,11			
Puissance S <sub>n</sub> [VA / phase]	30, 45 à 60 (anc.100)			
Classe de précision (mesure,comptage,protection)	(0,5) 0,2 & 3P	0,2 & 3P		
Deux enroulements identiques, polyvalents et inter-changeables - mesure, - comptage, - protection	1 <sup>er</sup> enroulement réservé à la mesure et au comptage, 2 <sup>ème</sup> enroulement dévolu à la protection			
Rapport de transformation: $\ddot{U}_{TP} = U_{n HT} / U_{n BT}$	600	1200	2200	3800
Mesure de la tension résiduelle 3U <sub>0</sub> , avec fonction d'amortissement	1 enroulement / phase couplé en triangle dans le champ et chargé sur résistance ou self Ritz			
Charge des enroulements couplés en « Δ ouvert »	I <sub>th</sub> = 4A, 8h			
U <sub>n BT</sub> " e-n " (tension homopolaire ou résiduelle 3U <sub>0</sub> ) [kV entre phase]	0,1			

## Dégâts occasionnés par l'avarie de TP

La protection des TP, surtout s'ils sont connectés directement au jeu de barres mérite une attention particulière.

En effet, si l'installation est dépourvue d'une protection de jeu de barres, en cas d'avarie sur un appareil (TP) par perte d'isolation primaire, toute la puissance de court-circuit de la barre participe de façon prolongée (éventuellement durant plusieurs secondes, i.e. jusqu'au déclenchement de la dernière source) à l'alimentation en énergie du défaut.

Dans ce cas un tel défaut se résume, au déroulement dans l'ordre, des 4 séquences suivantes:

1. une explosion, en général violente avec projection de débris dans un rayon important alentour de l'appareil détruit,
2. d'un incendie consécutif, si l'appareil contient de l'huile ou un compound diélectrique inflammables,
3. un défaut de jeu de barres sanctionné par une panne durable des clients raccordés aux transformateurs du poste concerné,
4. un traumatisme certain, à la simple vue de l'ampleur des dégâts engendrés, pour le personnel de piquet et d'intervention dépêché sur les lieux avec mission de rétablir, dans le meilleur délai, la desserte en courant des clients perturbés.

Il n'est pas rare que ce scénario s'accompagne aussi d'une ou plusieurs tentatives de remise sous tension infructueuses pratiquées en télé-commande à distance, faute d'une information ou d'une compréhension suffisamment claire perçue dès le début de la perturbation, par le dispatching. Le pressostat (précédemment décrit) incorporé dans l'appareil (TP inductif) prend dans ce cas toute sa signification et raison d'être.

En outre, pour une installation intérieure, la surpression appliquée aux parois de la cellule et consécutive au souffle dégagé par l'explosion doit faire l'objet de mesures de protection appropriées (présence de clapets de décompression de section et en nombre suffisant) Une attention particulière doit être portée aux portes ou aux panneaux sous peine de les voir s'arracher, les toitures pouvant - elles aussi, s'effondrer sur les installations...

## Caractéristiques des TI

Les TI récents ont leur partie active située dans la tête du transformateur de mesure. En termes de jargon, on parle de type "à tête", disposition également valable pour les combinés de mesure où la partie TP est alors installée en pied d'appareil (cuve)

Lors de renouvellement, les TI de type "à cuve" sont systématiquement remplacés par des types "à tête".

Le choix des valeurs de courant de court-circuit thermique et dynamique assignés répond aux attentes d'exploitation suivantes :

- accroître la résistance à la fatigue de la partie active en tête soumise, en cours de vie de l'appareil, au cumul des efforts dus aux courants de court-circuit véhiculés par le réseau environnant, et
- maîtriser sur le long terme, l'impact des chocs brutaux transmis à la superstructure par les commandes des disjoncteurs (hydrauliques, à ressort ou pneumatiques) lors de leurs manœuvres. Ces efforts dynamiques sévères engendrés par les manœuvres de l'organe de coupure sont transmis aux réducteurs de mesure vu la proximité d'installation via les connexions HT, dont la "rigidité" ne permet pas toujours un découplage mécanique correct ou suffisamment amorti.

$U_n$ rés. [kV entre phase]	65	125	220	380
$I_n$ HT (TI de couplage de barres) [ A ]	300-400-500-600	400-600-800	1000-2000 (4000)	1000-2000 (4000)
Multi-calibres $I_n$ HT ou $I_n$ BT commutables	Commutables au primaire, évent. aux secondaires			
Marquage de bornes - primaire  - secondaire	K (côté j.barres ou terre)- L (côté ligne ou transformateur)  nk - nl (n : numéro du noyau)			

### Noyau mesure et comptage, alignement de la précision

$I_n$ BT mesure et comptage [ A ]	5		
Puissance [VA / phase]	30 (anc.60)	15 (anc. 60)	
Classe de précision/ fact. de sécurité Fs	0,5 S/ 5 ou 10	0,2 S/ 5	
Capacité de surcharge, sans perte de précision	1,2 x $I_n$ HT en permanence 1,4 x $I_n$ HT pendant 4 h.		
Ajustement de la charge secondaire: (filerie et appareillage) à $S_n$	Si nécessaire, au moyen de résistances placées en série dans le circuit secondaire		

### Protection vis-à-vis de l'ouverture du circuit secondaire mesure à 5A

EOS, Cerbérus (CH) & Leutron (D) ont développé conjointement un dispositif parasurtension.

Installé sur le circuit secondaire à protéger, ce dispositif est aussi doté d'un contact de signalisation et d'une protection thermique agissant, lors de sollicitation de longue durée, par cycles de relaxation en court-circuitant le noyau fonctionnant sur circuit ouvert. Durant la mise en court-circuit, avec alarme transmise, les surtensions générées par le noyau sont interrompues. Le dispositif se refroidit et si l'intervention du personnel d'exploitation n'a pas pu se faire dans l'intervalle de temps (env. 30 min) le contact thermique s'ouvre, les surtensions réapparaissant, le dispositif assume à nouveau son rôle d'écrêtage...

$U_n$ rés. [kV entre phase]	65	125	220	380
-----------------------------	----	-----	-----	-----

## Noyaux de protection

$I_{n \text{ BT protection}}$ [A]	5 ou 1	5 ou 1	5 ou 1	1
Puissance $S_n$ [VA / phase]	30 (anc.60)			
Classes de protection	5 P 20, 30 ou 40 BS 3938 (HIP, enroulements sec. couplés en parallèle)			
Nombre de noyaux de protection	(anc.1)	(anc.1) à 5		
Courant de c.-c. thermique assigné [kA]				80
Court. c.-c. dynamique assigné [kA]				200

### Protection vis-à-vis de l'ouverture du circuit secondaire protection à 1 ou à 5A

La surtension induite au secondaire à 1A, d'un noyau de TI fonctionnant accidentellement à circuit secondaire ouvert est déjà très sévère même à faible charge ampèremétrique au primaire.

Ainsi, un noyau protection  $I_n = 2000/1$  A délivre 4,5 kV<sub>peak</sub> à seulement 10% de  $I_n$ . Cette particularité sert d'ailleurs à tester la tension d'isolement, 1 minute -spécifiée à cette valeur- de chaque enroulement secondaire.

La protection consiste en un dispositif parasurtension développé conjointement par EOS, Cerbérus(CH), Leutron(D) comme indiqué précédemment.

Installé sur chaque circuit secondaire -des installations récentes- il le protège en écrêtant instantanément la surtension apparaissant aux bornes secondaires dès que et seulement si ce circuit se trouve ouvert en service.

Apte à écouler un courant de décharge de 100 kA<sub>peak</sub> (10/350 $\mu$ s) ou de longue durée : 200 A /0,5s/ Q=100 As, selon CENELEC/BTTF 62-2, 2,5 MJ/ $\Omega$  ou 10x100 kA (8/20  $\mu$ s) selon DIN 0845 ou 5x 100 A<sub>eff</sub> durant 1 s et 3 min de pause, ou 5 A<sub>eff</sub> ,50 Hz en permanence, il est doté d'un contact de signalisation et d'une protection thermique agissant par cycles de relaxation en court-circuitant le noyau afin d'éviter qu'il ne fonctionne sur circuit secondaire ouvert →(échauffement considérable du noyau).

## Conclusion

Malgré d'indéniables progrès technologiques réalisés durant ces dernières décennies, de façon générale la sécurité de fonctionnement des transformateurs de mesure, d'exécution traditionnelle, vis à vis de dysfonctionnements graves en service, peut et doit encore être améliorée en HT et THT de manière relativement simple en recourant à des :

### -Fusibles HT

Il est souhaitable d'installer des fusibles du côté primaire des TP inductifs aériens surtout lorsqu'ils sont raccordés directement aux jeux de barres. Afin de gagner sur la place disponible, l'incorporation du fusible dans la borne même de traversée HT du TP, comme cela se réalise déjà en MT jusqu'à la norme  $U_m=36$  kV, doit également s'envisager jusqu'à  $U_m = 170$  kV.

### -Soupapes de sécurité en substitution de membranes de rupture

Pour les appareils contenant de l'huile inflammable, l'utilisation de soupapes de sécurité, placées dans la zone à risque, située soit au potentiel, soit hors potentiel, est nettement préférable à l'installation d'une membrane de sécurité sensée se déchirer avant l'éclatement de la porcelaine, lors d'une surpression interne importante. En effet, contrairement à la membrane, la soupape après avoir laissé s'évacuer la surpression consécutive à un arc d'amorçage interne, se referme instantanément empêchant ainsi toute pénétration d'air, donc d'oxygène entretenant et développant le feu amorcé par l'arc de défaut apparaissant dans le transformateur avarié. Ce dispositif de sécurité passif, lorsque son montage est réalisé dans une zone hors potentiel, doit obligatoirement être complété par un contact de déclenchement incorporé à la soupape, afin de le rendre actif en déclenchant instantanément les sources d'énergie de l'arc, côté HT. A l'inverse, quand la soupape -installée au potentiel- ne permet pas le raccordement électrique BT d'un contact auxiliaire de déclenchement, celui-ci doit être remplacé par un pressostat installé dans la zone hors potentiel. La surpression générée au point de défaut et située préférentiellement dans une zone à fort potentiel électrique, se transmet à distance jusqu'à l'emplacement du pressostat, grâce au couplage dû à l'incompressibilité de l'huile.

### -TI pour la mesure du courant de fuite

Les techniques d'évaluation de l'état opérationnel des parafoudres par la mesure en pied d'appareil du courant de fuite via un petit TI devraient être transposées et adaptées à l'exploitation des transformateurs de mesure. L'adjonction de convertisseurs munis de seuils réglables et dotés de contact(s) de sortie permettrait d'effectuer un "controlling" global très utile pour la surveillance du matériel THT notamment.

## Photos



Photo 1

Intervention de mesure au secondaire d'un TI 220 kV d'un départ de ligne aérienne



Photo 2

Parasurtension Leutron-EOS de protection contre l'ouverture accidentelle du circuit secondaire des TI



**Photo 3** Fusibles HT en montage ad-hoc destinés à protéger des TP 65 kV contre le court-circuit et l'explosion



**Photo 4** Pressostat de déclenchement pour TI



**Photo 5** Champ 125 kV de transformateur 200 MVA, appareillage avec TI de protection "masse cuve étendue"



**Photo 6** Champ 125 kV de transformateur 60 MVA avec TI de protect. masse cuve étendue et coffrets de dispositifs parasurtension Leutron-EOS

# Heutige Anforderungen an Messwandler und deren Umsetzung

Beat Bertschi

PIFFNER Messwandler AG, Hirschthal

## Zusammenfassung

Seit vielen Jahren besteht der Ruf nach einfacheren und günstigeren Sensoren zur Messung von Strom und Spannung. Die hohe Zuverlässigkeit, wie sie heute geboten wird, soll dabei beibehalten oder noch weiter verbessert werden.

Im Bereich Niederspannung werden heute vorwiegend leistungsarme, standardisierte Stromwandler eingesetzt. In der Mittelspannung gewinnen Rogowskispule und ohmscher Teiler an Boden, kämpfen aber mit den Tücken der Kleinsignaltechnik.

In der Hochspannung ist ein sehr zögernder Einsatz von neuen Technologien zu verzeichnen. Mit verantwortlich ist die Tatsache, dass die Schnittstelle zwischen Hersteller und Anwender meistens nicht funktions- sondern konstruktionsorientiert ist.

Wesentliche Fortschritte wurden in der Normung gemacht. So wurde dem Einsatz von Wandlern kleiner Leistung Rechnung gertagen. Leider besteht die Gefahr, dass die internationale Normung für eigene Zwecke gewisser Interessengruppen instrumentalisiert wird. Beispiele sind eine Nivellierung nach unten in der Klassendefinition von Stromwandlern mit Anzapfungen, sowie die vorgesehene Definition der Explosionsklassen.

Moderne Freiluftwandler sind äusserst zuverlässige und sichere Geräte. Falls es dennoch einmal zu einem internen Lichtbogen kommt, geschieht die Druckentlastung kontrolliert und ohne grössere Belastung der Umgebung. Weitergehende Sicherheit wird durch den Einsatz von Druckwächtern und / oder Verbundisolatoren erreicht. Weiter sollte bei der Festlegung von Sicherheitsmassnahmen zwischen Inbetriebnahme einerseits, und Betrieb andererseits unterschieden werden. Kein noch so ausgeklügeltes Sicherheitssystem wird das qualifizierte, geschulte Personal ersetzen können.

# **Heutige Anforderungen an Messwandler und deren Umsetzung**

**Dipl. Ing. Beat Bertschi  
PFIFFNER Messwandler AG, Hirschthal**



FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

## **Heutige Anforderungen an Messwandler und deren Umsetzung**

- PFIFFNER heute
- Wandlertagung vor 8 Jahren: was wurde verwirklicht, was blieb Utopie?
- Sinn und Unsinn in der Normung
- Schnittstellen zwischen Hersteller und Anwender
- Sicherheitsvorkehrungen oder Sicherheit?
- Traditionelle Vorbehalte oder moderne Lösungen?



FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

## PIFFNER Messwandler AG



PMW, 15.10.2003

FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 3

## Freiluftwandler 72 - 420 kV



PMW, 15.10.2003

FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 4

## Unsere Dienstleistungen



**PIFFNER**

true values

PMW, 15.10.2003

FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 5

## Forderungen der Anwender .....

- Kleine Leistungen genügen
- Keine Eisen-Sättigung
- Keine Elektronik auf HS-Potential
- Wenn schon Elektronik,  
dann digitale Schnittstelle und LWL-Übertragung
- Zuverlässigkeit muss sich am Bestehenden messen
- Keine Sekundärschäden im Fall der Zerstörung eines Wandlers

**PIFFNER**

true values

PMW, 15.10.2003

FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 6

## ... dies boten die Hersteller:

- Standardisierte, konventionelle Wandler kleiner Leistung:  
Sie vereinen: Vorteile der Zuverlässigkeit  
Vorteile bezüglich Preis und Verfügbarkeit
- Wandler verschiedenster Messprinzipien  
haben im Labor ihre Funktionstüchtigkeit nachgewiesen.
- U- und I-Sensor als Element in einem Gesamtkonzept  
für Messung und Schutz auf digitaler Ebene

## Verwirklicht:

Konventionelle Wandler kleiner Leistung haben sich etabliert in der **Niederspannung**



- Kleine Leistungen genügen
- Zuverlässigkeit muss sich am Bestehenden messen

- Standardisierte, konventionelle Wandler kleiner Leistung

## Verwirklicht:

Rogowskispulen und Ohmsche Teiler in der Mittelspannung:  
- passive Elemente  
mit analoger Schnittstelle zum Sekundärgerät

- Keine Eisen-Sättigung

- Wandler verschiedenster Messprinzipien haben im Labor ihre Funktionstüchtigkeit nachgewiesen.

## Verwirklicht:

Rogowskispule für Strommessung  
Kapazitiver Teiler für Spannungsmessung

in GIS-Anlagen  
mit nachgeschalteter Elektronik,  
und digitaler Schnittstelle  
zu den Sekundärgeräten

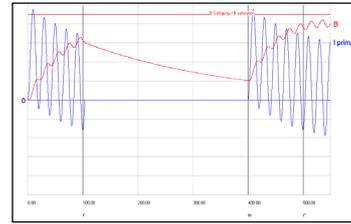


- Keine Eisen-Sättigung
- Keine Elektronik auf HS-Potential
- Wenn schon Elektronik, dann digitale Schnittstelle und LWL-Übertragung

- U- und I-Sensor als Element in einem Gesamtkonzept für Messung und Schutz auf digitaler Ebene

## Teilweise verwirklicht:

Vermehrter Einsatz von Linearkernen  
in Freiluftwandlern und GIS



• Keine Eisen-Sättigung

• konventionelle Wandler  
kleiner Leistung

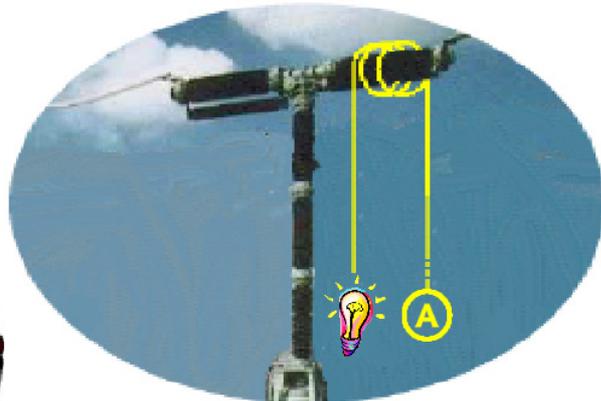
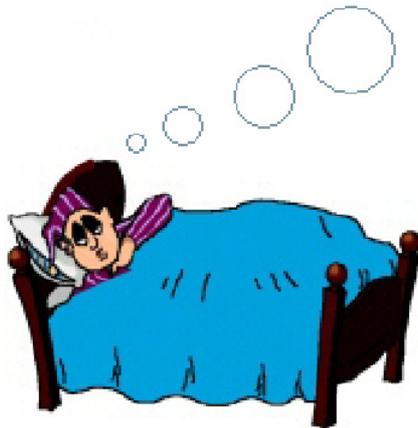
## Zukunftsmusik . . .

Standardisierte Freiluftwandler  
ab Stange...



## Traum . . .

Strommessung mit Faraday-Effekt



## IEC-Normen für Messwandler

- IEC 60'044-1 Stromwandler
- IEC 60'044-2 Spannungswandler
- IEC 60'044-3 Kombiwandler
- IEC 60'044-5 Kapazitive Spannungswandler (Publizierter Entwurf)
- IEC 60'044-6 Stromwandler (Linearkerne)
- IEC 60'044-7 Stromsensoren
- IEC 60'044-8 Spannungssensoren

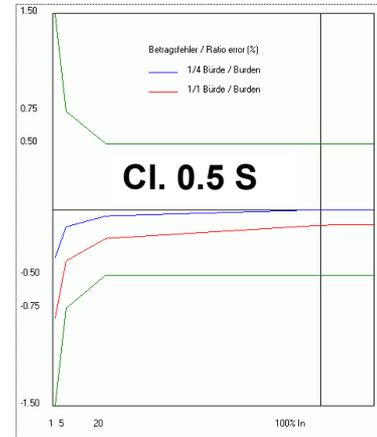
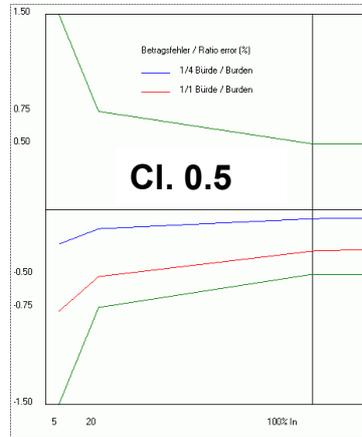
## Normung

Bisher:

S-Klassen nur bei 5 A Sekundärstrom

Neu:

S-Klassen auch bei 1 A Sekundärstrom



Beispiel: 1000 / 1 A , 5 VA cl. 0.5 S

## Erweiterte Bürdenbereiche für Stromwandler

für Klassen **0.1, 0.2 und 0.2S**  
und Leistung  **$\leq 15$  VA**

Beispiel: 1000 : 1 A cl. 0.2

Bisher: 15 VA (d.h. 3.75 ... 15 VA)

Neu auch: 1-15 VA

## Erweiterte Bürdenbereiche für Spannungswandler

für Klassen 0.1 und 0.2  
und Leistung  $\leq 10 \text{ VA}$

Beispiel:  $12'000/\sqrt{3} : 100/\sqrt{3} \text{ V}$  cl. 0.2

Bisher: 10 VA (d.h. 2.5 ... 10 VA)  
Neu auch: 0-10 VA

## Nivellierung nach unten

Bei Stromwandlern mit Sekundär-Anzapfung  
bezieht sich die Klassenangabe  
auf die höchste Übersetzung

Beispiel:  
300 - 600 : 1 A 5 VA cl. 0.5

IEC 60044-1 Amd. 2 vom Dezember 2002

## Wandlerexplosion mit Folgeschäden



## Instrumentalisierung der Norm für eigene Interessen . . .

- **Explosion resistant**  
Ein interner Lichtbogen kann einen Bruch des Gehäuses bewirken, aber alle Teile müssen innerhalb einer bestimmten Fläche liegenbleiben
- **Explosion proof**  
Ein interner Lichtbogen bewirkt keinen Bruch des Gehäuses

Diese Regelung  
gilt nicht  
für Berstscheiben,  
deren Teile auch  
weiter weg  
fliegen dürfen

## Instrumentalisierung der Norm für eigene Interessen . . .

- **Explosion resistant**

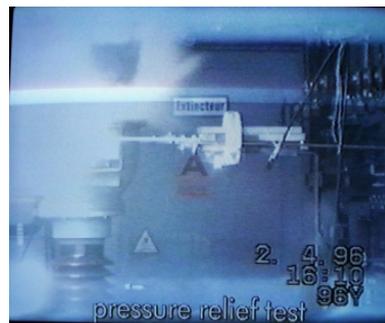
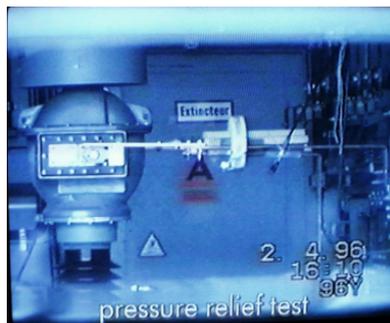
Ein interner Lichtbogen kann einen Bruch des Gehäuses bewirken, aber alle Teile müssen innerhalb einer bestimmten Fläche liegenbleiben

- **Explosion proof**

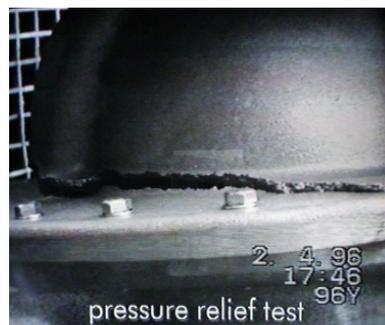
Ein interner Lichtbo  
Gehäuses



## Berstversuch an 123 kV Stromwandler



Kurzschluss  
41 kA 650 ms



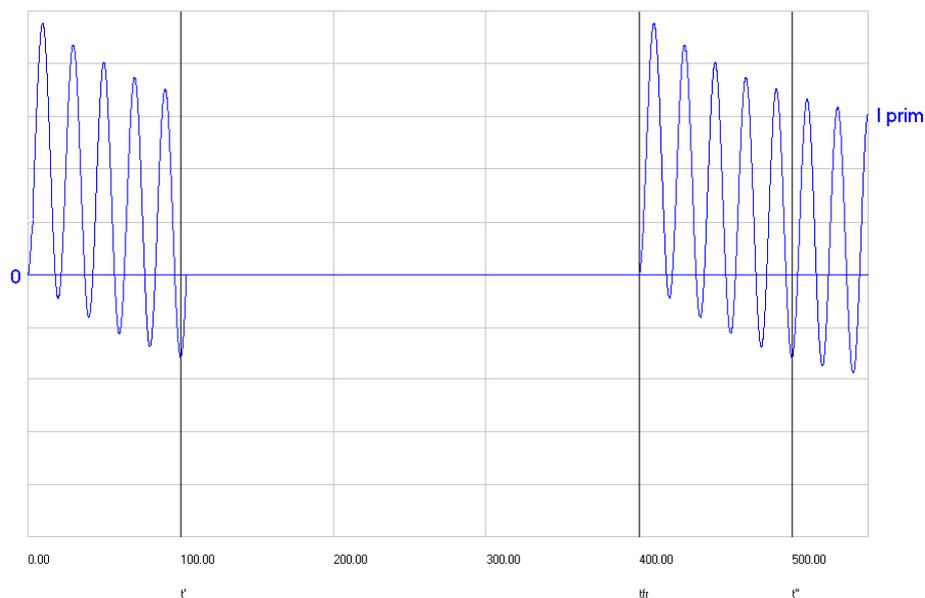
## Schnittstelle zwischen Hersteller und Anwender

Soll sich der Anwender

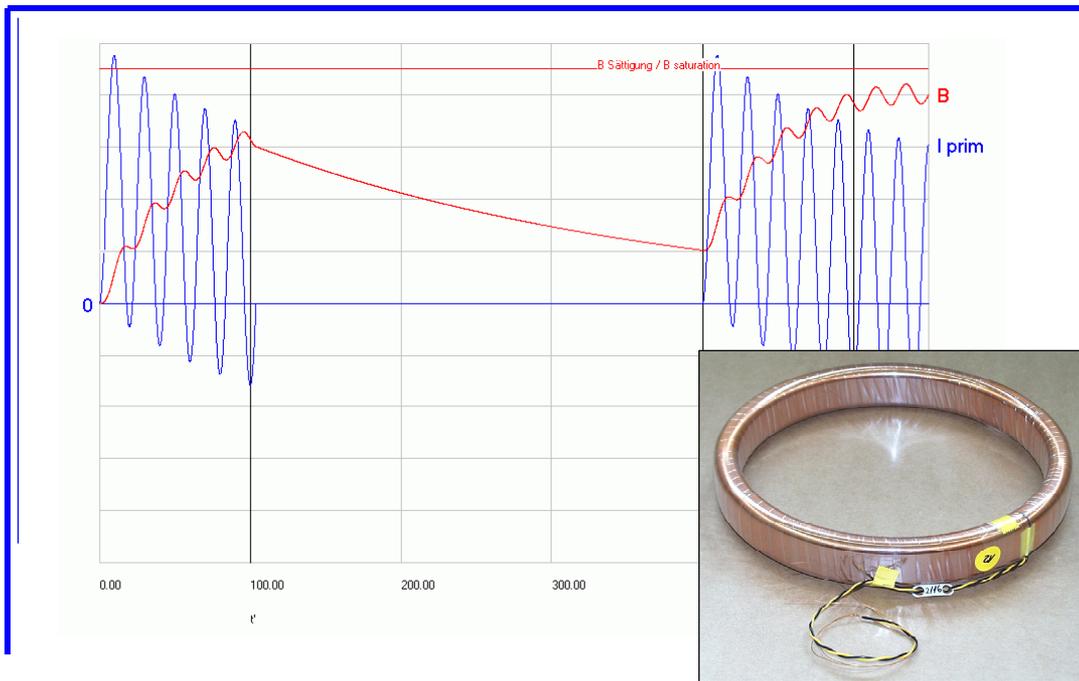
- mit der *Wandlerfunktion*
- oder mit Eisenkernen

herumschlagen?

## Der Kunde definiert die Anforderung ....



**... der Hersteller sucht die optimale Lösung**

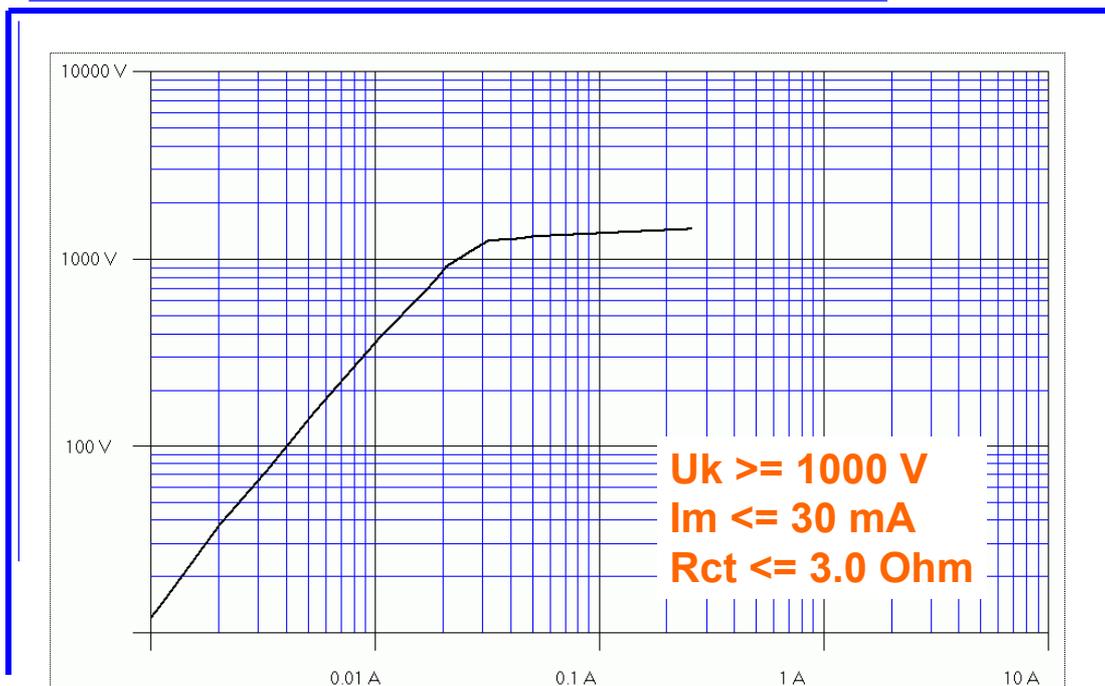


PMW, 15.10.2003

FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 5

**Der Kunde definiert die Lösung**



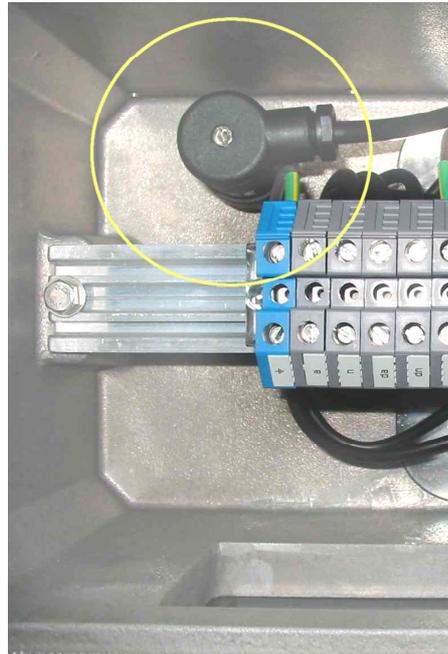
PMW, 15.10.2003

FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 6

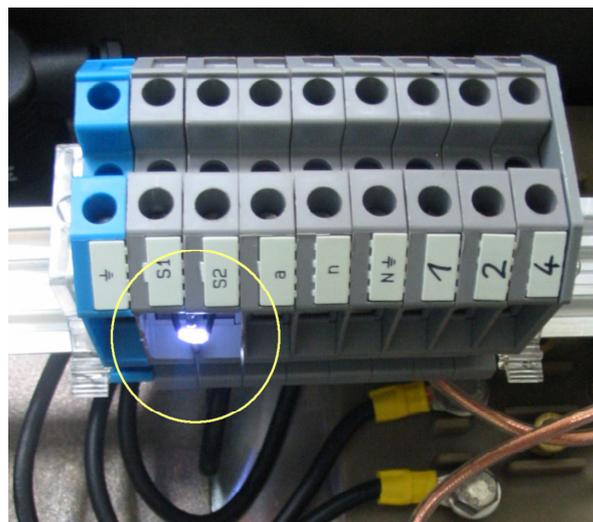
## Drucksensor

Drucksensoren vermögen in vielen Fällen anzusprechen, bevor es zu einer Druckentlastung kommt.



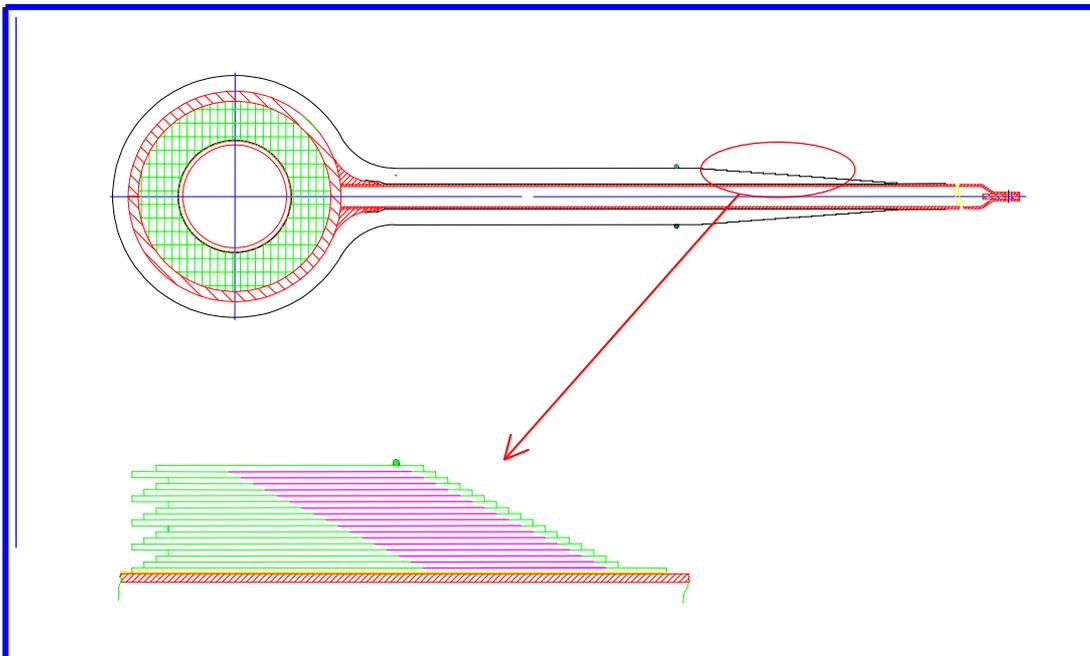
## Lichtbogen bei offenen Stromwandler-Sekundärklemmen

- Die Gefahr von Überspannungen durch offene Sekundärklemmen bei Stromwandlern besteht praktisch nur bei der Inbetriebnahme



- Der beste Schutz dagegen ist geschultes Personal, und nicht komplizierte Schutzvorkehrungen

## Explosionssicherheit: Fein gesteuerte Aufführung

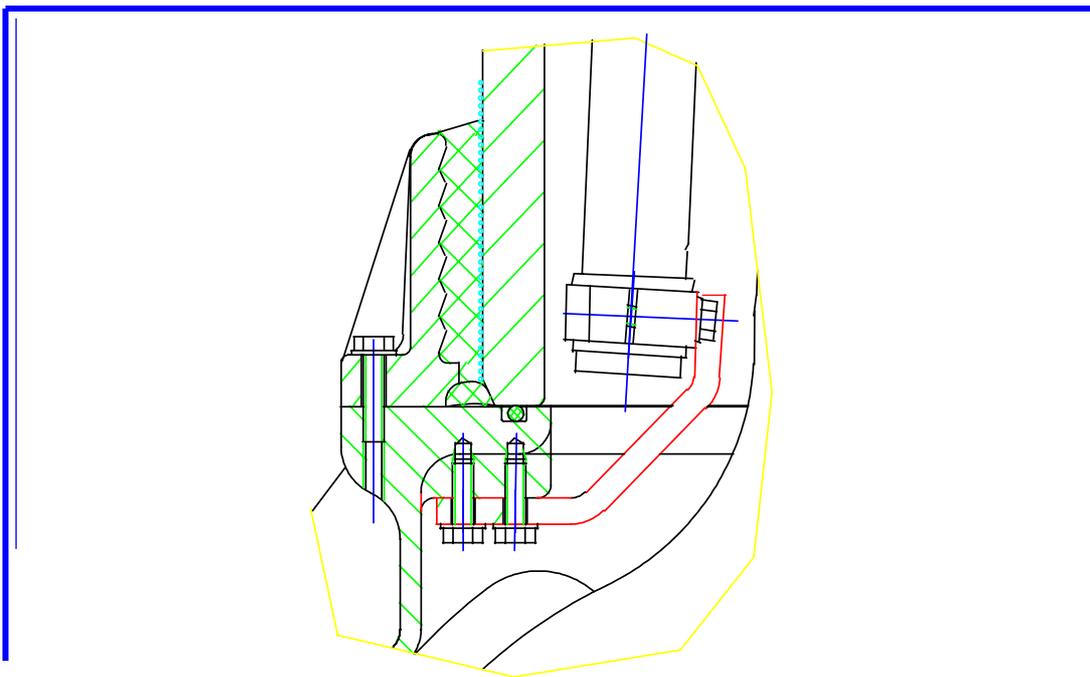


PMW, 15.10.2003

FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 9

## Explosionssicherheit: Kurzschlussfeste innere Verbindungen

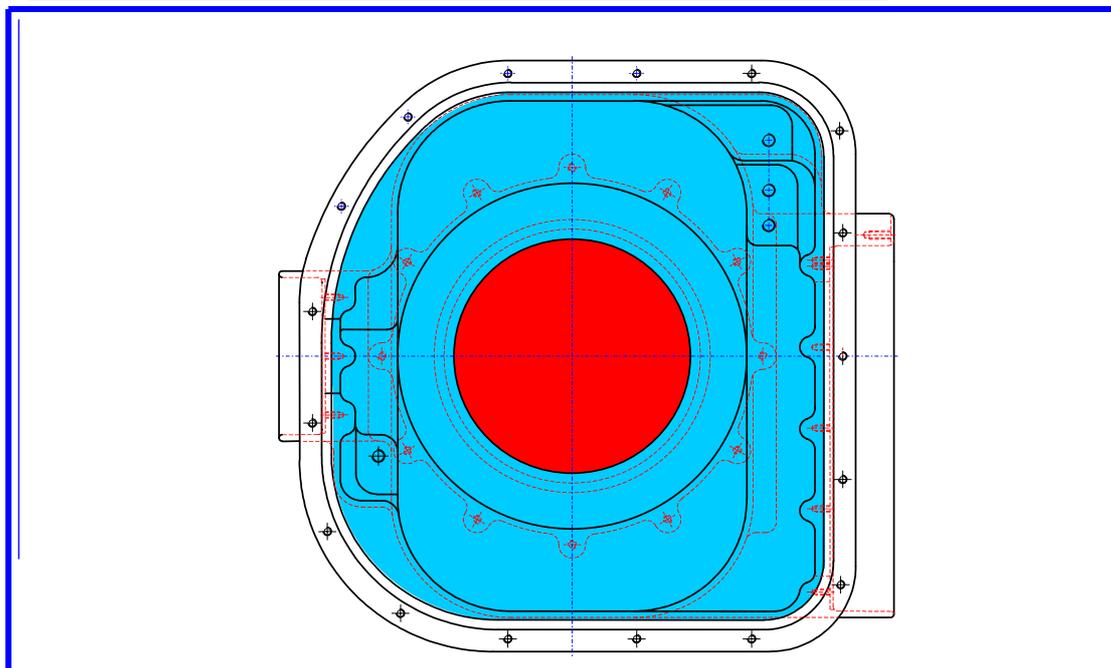


PMW, 15.10.2003

FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 10

## Explosionssicherheit: Kleine Isolator-Querschnitte



PFIFFNER

true values

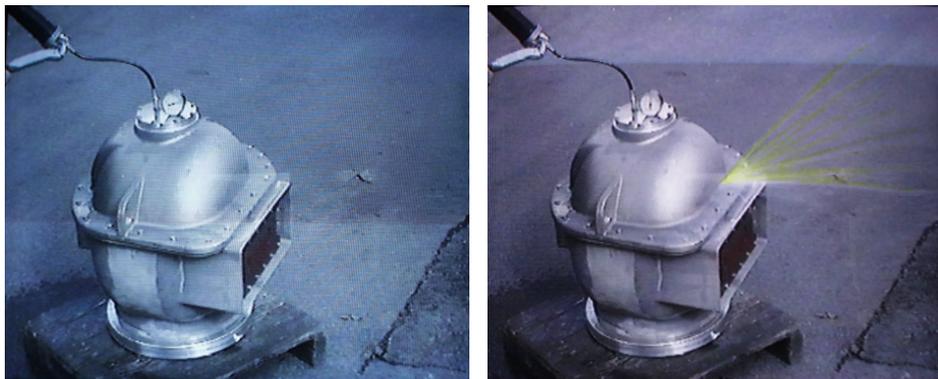
PMW, 15.10.2003

FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 11

## Explosionssicherheit: Sollbruchstellen in Gehäusen

### Druckentlastungstest (mit Wasser)



Das Gehäuse öffnet sich an der Sollbruchstelle  
bei einem Überdruck von 12 bar

PFIFFNER

true values

PMW, 15.10.2003

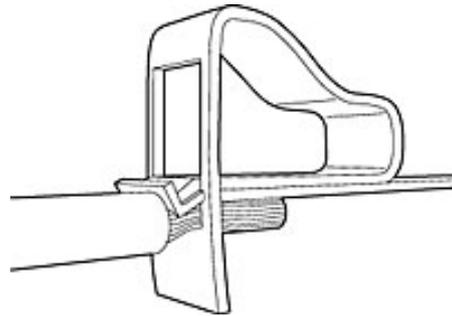
FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 12

## Traditionelle Vorbehalte oder moderne Lösungen?



Einsatz  
von Federzugklemmen



PIFFNER

true values

PMW, 15.10.2003

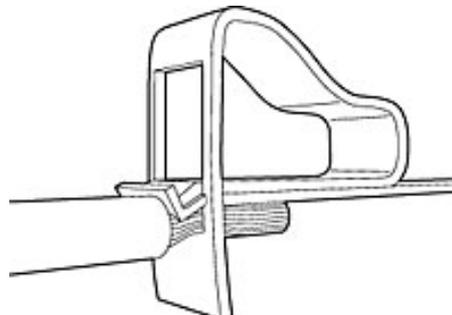
FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 13

## Traditionelle Vorbehalte oder moderne Lösungen?



Einsatz  
von Federzugklemmen



PIFFNER

true values

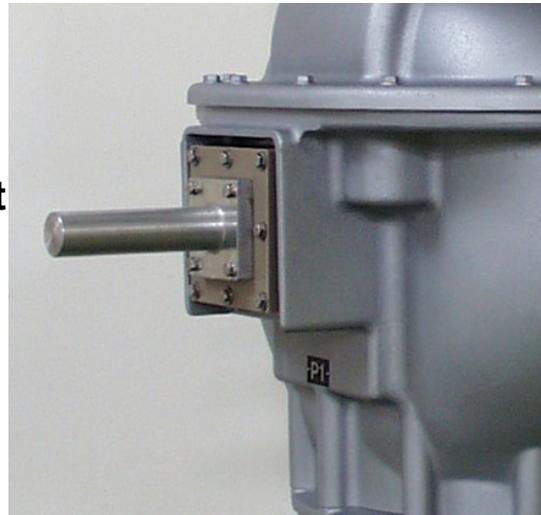
PMW, 15.10.2003

FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 13

## Traditionelle Vorbehalte oder moderne Lösungen?

Primäranschlüsse aus  
Aluminium,  
gegebenenfalls verzinkt



PMW, 15.10.2003

FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 14

## Traditionelle Vorbehalte oder moderne Lösungen?



### Verbundisolatoren

- leicht
- hydrophob
- explosionsicher
- erdbebenresistent
- erprobt



PMW, 15.10.2003

FKH/VSE-Fachtagung 2003  
„Hochspannungswandler“

Folie 15

## Zusammenfassung

- Als Hersteller von Wandlern sind wir auf die Erfahrung der Anwender angewiesen.
- Heute erachten wir die Spezifikationen der Anwender generell stark konstruktionsorientiert, und zuwenig funktionsorientiert
- Dadurch wird der Einsatz von neuen, erprobten Technologien unnötig behindert.
- Die Existenz der neuen Normen wird den Einsatz neuer Technologien erleichtern

## Sensoren

- Sensoren haben sich ihren festen Platz bereits erobert
  - Mittelspannung
  - GIS
- Ihr Einsatz wird zunehmen (Höchstspannungsnetze)
- Die benötigten Bürdenleistungen werden weiter zurückgehen
- Konventionelle Wandler werden weiterhin eine Berechtigung haben
- **Entscheidend ist die Reduktion der Gesamtkosten**

## Sicherheit

- Unterscheiden zwischen Inbetriebnahme und Betrieb
- Sicherheit bei der Inbetriebnahme durch qualifiziertes, geschultes Personal sicherstellen
- Sicherheit im Betrieb durch konstruktive Massnahmen sicherstellen, und nicht durch zu komplexe, am Schluss unüberblickbare Lösungen in Frage stellen

## Tipps

- Reduzieren Sie die Leistung auf das Notwendige!
- Wählen Sie  $I_{\text{sek}}$  1 A statt 5 A!
- Standardisieren Sie wo immer möglich!
- Definieren Sie die Anforderung, und nicht gleich die Konstruktion! Schildern Sie Ihre Anwendung dem Wandlerhersteller und lassen Sie sich beraten!



# Technologie der Öl- und SF<sub>6</sub>-isolierten Wandler

Hans-Jürgen Voss

Ritz Messwandler GmbH, Hamburg

## 1 Einleitung

Messwandler sind für Schutz- und Messzwecke unverzichtbare Komponenten von Hochspannungsschaltanlagen. Der Anwender muss neben der Wirtschaftlichkeit eine hohe Betriebssicherheit, langfristig stabile Mess- und Schutzzeigenschaften sowie eine weitestgehende Wartungsfreiheit fordern.

Heute befinden sich für diese Aufgaben im Spannungsbereich von 72,5 kV bis 800 kV zuverlässige Strom-, Spannungs- und Kombiwandler mit Ölpapier-Isolation seit über 50 Jahren im Einsatz. Die SF<sub>6</sub>-Gasisolation für Innenraum-Schaltanlagen wird seit über 20 Jahren und für Freiluftwandler seit über 15 Jahren verwendet. Beide Technologien können heute als technisch gleichwertig angesehen werden. Bei der Auswahl des Isolationssystems sind aber technische und kommerzielle Fragen abzuklären und Umweltgesichtspunkte zu berücksichtigen.

Nachfolgend sollen die Eigenschaften und Unterschiede der beiden Isolationssysteme erläutert und die dielektrischen und mechanischen Auslegungskriterien und Wandlerkonstruktionsmerkmale beschrieben werden. Sicherheitsaspekte, Wartungsanforderungen und Lebensdauererwartungen sowie Wirtschaftlichkeits- und Umweltaspekte werden abschließend angesprochen.

## 2 Isolationssysteme: Öl-Papier und SF<sub>6</sub>-Gas

Die für die Wandlertechnologie wesentlichen Eigenschaften sollen nachfolgend aufgeführt werden:

### 2.1 Chemische Eigenschaften

#### Öl-Papier:

Öl-Papier ist ein Mischdielektrikum, das typischerweise aus Kabelpapier, getränkt mit reinem Mineralöl, besteht. Das Öl hat eine Dichte von <900 g/l und einen Flammpunkt von ca. 140 °C. Für eine gute Imprägnierung ist im Temperaturbereich von 20 °C bis 50 °C eine möglichst niedrige Viskosität erforderlich. Der Stockpunkt des Öles sollte unter – 50 °C liegen, damit der Einsatz der Wandler bis zu diesem Temperaturbereich sichergestellt ist. Das Papier dient als Barriere gegen Faserbrückendurchschläge und bestimmt damit die elektrische Festigkeit. Durch Temperatur- und Sauerstoffeinfluss kann die Öl-Papier-Isolation altern (Oxidation).

#### SF<sub>6</sub>-Gas:

Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) ist ein bis 800 °C chemisch stabiles Gas. Es ist unbrennbar, geruchlos, farblos und ungiftig. Es ist ca. 5x schwerer als Luft. Es hat eine Masse von 6,14 g/l bei 20 °C. Es ist keine Alterung bekannt.

## 2.2 Dielektrische Eigenschaften Öl-Papier

Öl-Papier hat eine Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  von 3 bis 4 und einen Verlustfaktor  $\tan \delta$  von  $10 \dots 30 \cdot 10^{-4}$ .

Die Durchschlagsfestigkeit bei Wechselspannung liegt bei ca. 400 bis 500 kV/cm und ist vom Druck unabhängig.

## 2.3 Dielektrische Eigenschaften SF<sub>6</sub>

SF<sub>6</sub> hat eine Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  von 1. Die Durchschlagsfestigkeit ist mit ca. 89 kV/cm bei 1 bar etwa dreimal höher als in Luft und etwa 5mal geringer als bei Öl-Papier. Die technische Durchschlagsfestigkeit ist druckabhängig nach den Formeln \*):

Für Wechselspannung  $E_{dt} = 65 \cdot P_{20}^{0,73}$  kV/cm  $P_{20}$  = Gasdruck bei 20 °C

Für neg. Blitzstoßspannung  $E_{dt} = 75 \cdot P_{20}^{0,75}$  kV/cm

\*) Mosch/Hauschild „Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid“

Das bedeutet für die reine Gasstrecke bei:

Wechselspannung  $E_{dt}$  bei 1 bar 65 kV/cm, bei 4,5 bar 194 kV/cm

Blitzstoßspannung  $E_{dt}$  bei 1 bar 75 kV/cm, bei 4,5 bar 231 kV/cm

## 3 Dielektrische Auslegungskriterien

In der Regel werden für die Auslegung der Isolationsschichtdicken, der Schlagweiten und der Elektrodenradien bei Wandlern die Stehblitzstoßspannung und die Stehwechselspannung bezogen auf die jeweilige höchste Spannung für Betriebsmittel herangezogen.

Öl-Papier:

Der Papierfüllfaktor, die Härte der Papierschichten und die Vermeidung von Ölwickeln erhöhen die TE-Einsatzspannung und bestimmen die elektrische Festigkeit und Langzeit-Zuverlässigkeit. Bei Betriebsspannung kann eine gut ausgeführte Isolation mit über 50 kV/cm dauernd belastet werden. Für die Berechnung der Papierschichtdicken wird aber die Stehwechselspannungs-Prüfspannung herangezogen; die Feldstärke sollte 150 kV/cm nicht übersteigen.

SF<sub>6</sub>:

Wegen des sehr flachen Verlaufes der Stoßkurve (Durchschlagsspannung in Abhängigkeit vom Spannungsanstieg) müssen die SF<sub>6</sub>-Gasstrecken nach der Nennsteh-Blitzstoßspannung dimensioniert werden. Danach kann bei üblichen 4,5 bar mit einer Feldstärke von über 200 kV/cm gerechnet werden. Für die Dimensionierung der Kriechwege auf Isolierstoffoberflächen muss insbesondere wegen möglicher Verunreinigungen mit Partikeln die Stehwechselspannungs-Prüfspannung herangezogen werden. Die Feldstärken sollten hier deutlich unter 70 kV/cm liegen.

## 4 Wandlerkonstruktionsmerkmale

Die Schnittzeichnungen zeigen beispielhaft die Konstruktionsmerkmale moderner Kombiwandler mit Öl-Papier-Isolation (links) und SF<sub>6</sub>-Isolation (rechts).

In den folgenden Folien werden einige Konstruktionsmerkmale angesprochen und verglichen.

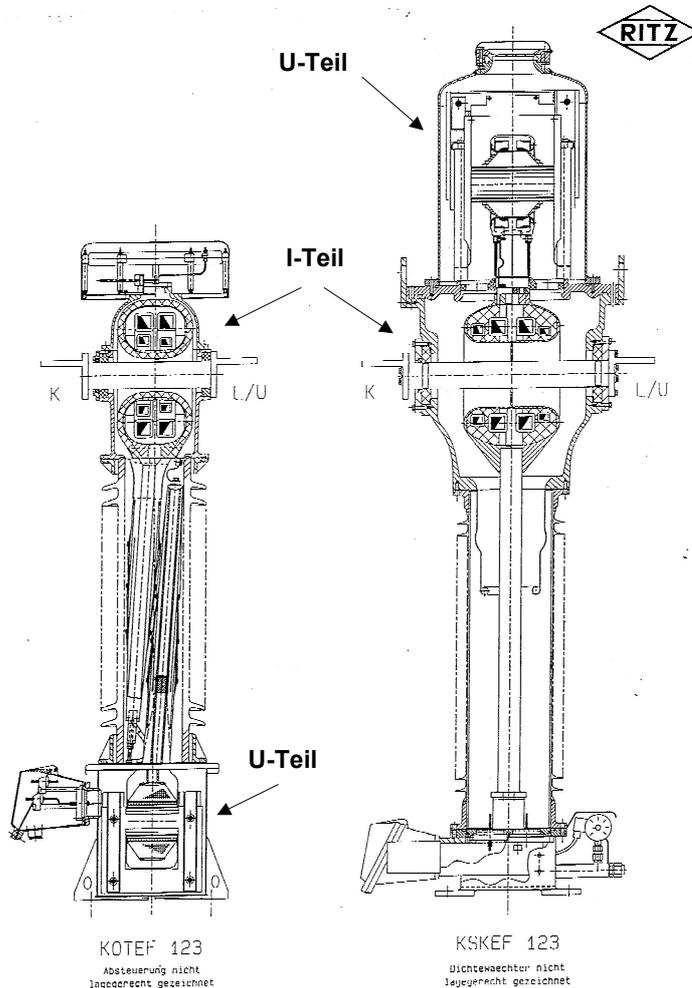


Bild 1

#### 4.1 Abmessungen

SF<sub>6</sub>-isolierte Wandler sind grundsätzlich in den Abmessungen erheblich größer, da bei nur 1 bar gegenüber Öl-Papier etwa die fünffachen Isolierstoffschichtdicken (Schlagweiten) benötigt werden würden. Selbst bei den üblichen Drücken von 4 bis 5 bar müssen die Isolierabstände noch etwa zwei bis dreimal so groß wie bei Öl-Papier dimensioniert werden. Noch höhere Drücke verbieten sich aus wirtschaftlichen Gründen und wegen des dann zu stark eingeschränkten Temperaturbereiches zu tiefen Temperaturen aufgrund der dann auftretenden Verflüssigung des SF<sub>6</sub>. Einsätze bei Umgebungstemperaturen von bis zu -50 °C sind in jedem Fall auch im üblichen Druckbereich nur durch Beimischung von ca. 30% bis 50% N<sub>2</sub> (Stickstoff) möglich.

## 4.2 Anforderungen an Dichtungen, Gehäuse und Isolatoren

Die Gehäuse bei SF<sub>6</sub>-isolierten Wandlern sind als Druckbehälter anzusehen und entsprechend zu dimensionieren und zu prüfen. Öl-Papier isolierte Wandler arbeiten dagegen fast drucklos. Das bedeutet, daß die Gehäuse bei SF<sub>6</sub>-isolierten Wandlern nicht nur erheblich größer sind, sondern wegen der Druckfestigkeitsanforderung auch noch bis zu dreifache Wandstärken aufweisen müssen. Außerdem sind alle Innenflächen bei Gehäusen für SF<sub>6</sub>-isolierte Wandler Elektrodenoberflächen, d.h. es werden hohe Anforderungen an die Oberflächengüte gestellt.

Alle Dichtungen müssen bei SF<sub>6</sub>-isolierten Wandlern den besonderen Anforderungen bei innerem Überdruck genügen. Es werden maximale Leckraten von nur 0,5% bis 1% pro Jahr toleriert.

Die Dichtigkeitsprüfung mit Helium für alle Gehäuse ist heute Standard. Gehäuse für SF<sub>6</sub>-isolierte Wandler müssen zusätzlich einer Berstdruck Typenprüfung mit 6- bis 7-fachem Nennfülldruck und einer Druckstückprüfung mit 2,5- bis 3-fachem Nennfülldruck standhalten. Die Berstscheibe muß aus Sicherheitsgründen bei ca. 2-fachem Nennfülldruck ansprechen.

## 4.3 Auswirkungen auf die magnetische Auslegung

Wegen der größeren Schlagweiten bei SF<sub>6</sub>-isolierten Wandlern sind dort auch die mittleren magnetischen Weglängen größer. Dies bedeutet bei gleichen Anforderungen an die Messtechnik, dass die Stromwandlerkerne größere Querschnitte haben müssen. Die Gesamtlänge des Kupferdrahtes wird damit länger und der Innenwiderstand würde sich bei gleichem Drahtquerschnitt erhöhen. Es muss also mit größerem Drahtquerschnitt gerechnet werden. Dies wiederum schränkt die Leistungsfähigkeit der Kerne bei gleichen Fassungsvermögen des Kernabschirmgehäuses ein.

Auch die Spannungswandlerprimärspule wird aufgrund der größeren Schlagweiten und der im Vergleich zum Öl-Papier isolierten Wandler offenen Spulenflanke einen größeren Aufbau im Spulentrapez haben. Dies hat wie beim Stromwandlerteil größere Drahtlängen und damit größere Innenwiderstände zur Folge. Auch hier muss gegebenenfalls mit dickeren Drähten gerechnet werden. Zusätzlich sind aufgrund des größeren Spulenaufbaues höhere Streukapazitäten bei der magnetischen Auslegung zur Einhaltung der Fehlwinkelgrenzen zu berücksichtigen.

## 4.4 Kippschwingungen

SF<sub>6</sub>-isolierte Spannungswandler sind bauartbedingt anfälliger gegen Kippschwingungen als Öl-Papier isolierte Wandler.

SF<sub>6</sub>-isolierte Wandler haben nur etwa 1/10 der Phase-Erd-Kapazität von Öl-Papier isolierten Wandlern. Die Steuerkapazitäten der Leistungsschalter können etwa die gleiche Kapazität wie die von SF<sub>6</sub>-isolierten Wandlern haben. Nach dem Abschalten liegt aufgrund des kapazitiven Teilverhältnisses an SF<sub>6</sub>-isolierten Wandlern noch 50% und mehr der Nennspannung an. Dies kann ausgelöst durch einen Abschaltvorgang zu einphasigen stabilen Kippschwingungen führen. Gegen Kippschwingungen wird heute meistens ein Luftspalt im Eisenkern von 2-6 mm Länge vorgesehen. Natürlich können auch externe Bedämpfungsmaßnahmen mit Wirkleistungsrosseln erfolgen.

Die Problematik von dreiphasigen Kippschwingungen bei Netzen mit freiem Sternpunkt ist bei beiden Wandlertypen vergleichbar. Wirkleistungsrosseln im offenen Dreieck der Erdschlusswicklungen bieten hier Abhilfe.

## 4.5 Fertigungsanforderungen

### Öl-Papier:

Bei der Fertigung von Öl-Papier isolierten Wandlern kommt es insbesondere beim Aufbringen der Papierisolation auf größtmögliche Sorgfalt an. Falten, Zwickel und überstehende Elektrodenkanten müssen auf jeden Fall vermieden werden. Halbautomatische sogenannte Bandagemaschinen unterstützen den Menschen. Trotzdem ist die Fertigung dieser Wandler von einem hohen manuellen Arbeitsanteil geprägt. Des Weiteren ist die Trocknung der Papierisolation, die Aufbereitung des Öles (Entgasung und Trocknung) sowie die zuverlässige Imprägnierung der Papierisolation von ausschlaggebender Bedeutung für die Langzeitzuverlässigkeit der Isolation.

### SF<sub>6</sub>- Gasisolation:

Hier kommt es auf absolute Sauberkeit an. Ein großer Teil der Fertigung findet in klimatisierten Räumen mit gefilterter Luft statt. Im Inneren der Wandler dürfen keine freien Partikel sein, sie würden zum inneren Überschlag während der Prüfung oder gar erst im Betrieb führen. Natürlich ist bei der SF<sub>6</sub>- Gasisolation eine sorgfältige Trocknung der Aktivteile und durchgehende Imprägnierung mit dem Isoliergas die Grundvoraussetzung für einen sicheren Langzeitbetrieb.

## 5 Sicherheitsaspekte

### 5.1 Luftabschluß und SF<sub>6</sub>-Gasüberwachung

Für ein zuverlässiges Langzeitverhalten ist ein dauerhaft öl- bzw. gasdichtes Gehäuse Voraussetzung. Bei Ölwandlern wird die Volumensänderung des Öles in Abhängigkeit von der Temperatur (ca. 7,5%/100K) heute üblicherweise durch Ausdehnungskörper aus korrosionsbeständigem Edelstahl ermöglicht. Der korrekte Ölinhalt kann sehr einfach mithilfe eines Ölstandsanzeigers überprüft werden.

Die Dichtigkeit des SF<sub>6</sub>- Wandlers und der erforderliche Fülldruck (Gasdichte) kann nur durch einen Dichtewächter (temperaturkompensiert) kontrolliert und überwacht werden. Häufig sind die Dichtewächter mit Alarmkontakten versehen, die den Druck- bzw. Dichteabfall auf vorgegebene Grenzwerte direkt in die Schaltwarte melden.

### 5.2 Verhalten bei innerem Lichtbogen bei Ölwandlern

Öl-Papier isolierte Wandler sollten mit einer kurzschlussfesten Ableitung ausgestattet sein. Im Falle eines inneren Durchschlages in den Aktivteilen, die sich in den dünnwandigen Metallgehäusen befinden wird der Kurzschlussstrom sicher über die Absteuerung im Isolator zur Erde abgeleitet, ohne im Isolatorbereich Folgelichtbögen zu verursachen. Ein Zerplatzen des Isolators ist damit unwahrscheinlich. Im Kopfgehäuse ist zum kontrollierten Druckablass ein dünnes Blech vorgesehen, das ähnlich wie eine Berstscheibe funktioniert. Die dünnwandigen Spannungswandlertöpfe lassen bei Spannungswandlerdurch- oder Überschlägen zudem nur einen begrenzten Druckanstieg zu und platzen z.B. kontrolliert an Schweißnähten auf. Falls es darüber hinaus Bedenken gegen Porzellanisolatoren gibt könne auch Ölwandler mit Kunststoff - Verbundisolatoren ausgestattet werden.

### 5.3 Verhalten bei innerem Lichtbogen bei SF<sub>6</sub>-Wandlern

SF<sub>6</sub>-Wandler sollten, da sie permanent unter Überdruck arbeiten, immer mit Verbundisolatoren versehen sein. Die Metallgehäuse sind im Design als Druckbehälter ausgelegt und Typengeprüft. Der im Vergleich zum Wandler mit Ölpapier-Isolation relativ langsame Druckanstieg bei innerem Fehler mit Lichtbogen kann zuverlässig durch eine metallische Berstscheibe mit definierter Öffnungscharakteristik begrenzt werden.

### 5.4 Brandverhalten

Anders als bei Ölwandlern ist bei SF<sub>6</sub>-Wandlern ein weiterer Feuerschaden durch ausgeworfenes brennendes Material auszuschließen.

## 6 Überwachungs- und Wartungsanforderungen

### 6.1 Wandler mit Öl-Papier Isolation

Öl-Papier isolierte Wandler sind wartungsfrei, lediglich im Rahmen der Anlageninspektion sollte auf Anzeichen von Ölundichtigkeiten und auf Gleichstand der Ölstandsanzeiger in einem Feld geachtet werden.

Nach besonderen Ereignissen wie Blitzeinschläge im Nahbereich oder bei Durchschlägen von benachbarten Geräten wird eine Ölprobe zur „Gas in Öl“ –Analyse nach Vorgabe des Herstellers empfohlen.

### 6.2 Wandler mit SF<sub>6</sub>-Gas Isolation

Da das Isoliergas SF<sub>6</sub> farb- und geruchlos ist, kann der Isoliergasdruck nur über einen Dichtewächter überwacht werden. Die Dichtewächter und insbesondere die Alarmkontakte sollten jährlich einer Funktionsprüfung unterzogen werden.

Den ordnungsgemäßen Zustand der metallischen Berstscheiben kann man praktisch nur durch eine Sichtinspektion überprüfen. Bei drucklosem Wandler sollten die Berstscheiben nach etwa 10 Jahren auf Korrosionsspuren hin untersucht werden. Falls auch nur leichte Korrosionserscheinungen gefunden werden, sollten die Berstscheiben ausgetauscht werden. Dies kann durch geschultes Personal in der Anlage erfolgen.

Bei Graphit-Berstscheiben wird empfohlen, sie nach ca. 10 Jahren gegen Metall-Berstscheiben auszutauschen.

## 7 Monitoring – Lebensdauererwartungen

### 7.1 Monitoring

Bei Öl-Papier isolierten Wandlern lässt sich die Qualität der Isolation durch folgende Prüfungen überwachen:

- Gas in Öl Analyse (besonders H<sub>2</sub> und C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)
- tan δ Messung
- Isolationswiderstandsmessung
- Visuelle Dichtigkeitsprüfung

Bei SF<sub>6</sub> – isolierten Wandlern ist nur eine permanente Dichtigkeitsüberwachung mithilfe des Dichtewächters möglich. Mit Isolationswiderstandsmessungen kann wie beim Ölwannder der ordnungsgemäÙe Zustand der Isolation zwischen den Kernen und Wicklungen untereinander und zur Erde geprüft werden.

## 7.2 Lebensdauererwartungen

Ölwannder sind bei langjährig bewährter Konstruktion nur durch Eindringen von Feuchtigkeit gefährdet. Hierbei kann es aufgrund des erhöhten  $\tan \delta$  zu Wärmedurchschlägen kommen. Korrosionsbeständige metallische Luftabschluß-AusdehnungsgefäÙe verhindern dies aber. Zu hohe innere Feldstärken durch falsche dielektrische Auslegung und Produktionsfehler könnten zu Teilentladungen im Betrieb mit X-Wachs Bildung und /oder Zerstörung der Papierisolation führen. Dies sollte aber durch eine sorgfältige Stückprüfung ausgeschlossen werden.

Bei langjährig erprobten Öl-Papier Wandlerkonstruktionen sind daher Alterungen der Isolation praktisch unbekannt, vorausgesetzt das Gerät ist äußerlich unbeschädigt und bestimmungsgemäÙ eingesetzt.

Bei SF<sub>6</sub>-Wandlern ist derzeit ebenfalls keine Alterung der Isolation bekannt, wenn die Dichtungen der Gehäuse in Ordnung sind.

Für beide Isolationsarten gilt eine Lebensdauererwartung von über 50 Jahren. Bei Ölwannder gelten über 40 Jahre als nachgewiesen.

## 8 Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkte

Im Spannungsbereich bis 170 kV sind Öl-Papier isolierte Wandler ( Einzel- und Kombiwannder) in der Regel kostengünstiger als SF<sub>6</sub>-isolierte Wandler. Ab 245 kV kann bei Kombiwandlern etwa Kostengleichheit erreicht werden. Bei Spannungen ab 420 kV ist der SF<sub>6</sub>-isolierte Kombiwannder im Kostenvorteil verglichen mit zwei Öl-Papier isolierten Einzelwandlern. Zusätzlich kommen hier Einsparungen bei den Fundamenten und im Platzbedarf hinzu.

In Bezug auf Wartungskosten ist der wartungsfreie Ölwannder im Vorteil. Die regelmäßigen Überprüfungen der Dichtewächter und Berstscheiben und gegebenenfalls deren Austausch sind dagegen bei den SF<sub>6</sub>-Wandlern zu berücksichtigen. Außerdem muss ein SF<sub>6</sub>-Handlingssystem in den Anlagen verfügbar sein.

## 9 Umweltfragen

### 9.1 Öl-Papier

Es wird reines Mineralöl mit der untersten Wassergefährdungsklasse WGK 1 (schwach wassergefährdend) eingesetzt.

Für Wasserschutzgebiete werden aber trotzdem häufig Öl-Verbote ausgesprochen oder bei Ölmengen über 100 l Ölwannen als Auffangbehälter vorgeschrieben.

Im Schadensfall mit innerem Lichtbogen verbrennt das austretende Öl sehr schnell. In der Regel wird aber trotzdem ein Bodenaustausch im Umfeld des Aufstellungsortes erforderlich sein. Dies insbesondere wenn es sich nur um einen mechanischen

Schaden oder um eine größere auslaufende Ölmenge handelt. Dabei wird nie der gesamte Ölinhalt auslaufen, da die größte Menge in der Papierisolation gebunden ist.

## 9.2 SF<sub>6</sub>

SF<sub>6</sub> ist grundsätzlich ungiftig und chemisch inaktiv. Durch die Energie eines Lichtbogens wird das SF<sub>6</sub> –Molekül aber aufgebrochen und es bilden sich dabei zum Teil giftige Metallfluoride und bei zusätzlicher Anwesenheit von Feuchtigkeit im Gas auch Säuren. Ein Einatmen ist gefährlich und kann zu inneren Verätzungen führen. Ebenso ist Augen- und Schleimhautkontakt unbedingt zu vermeiden. Durch Zersetzungsprodukte aufgrund von hohen Teilentladungen, z.B. innerhalb der Folien-Lagenisolation von Spannungswandlern können Isolationsmaterialien geschädigt werden.

SF<sub>6</sub> ist als eines von vielen Treibhausgasen bekannt und kann die Ozonschicht angreifen. Gemäß der Beschlüsse der Umweltkonferenz im Dezember 1997 in Kyoto ist die Emission von Treibhausgasen auf ein Minimum zu begrenzen. In der Bundesrepublik Deutschland hat sich eine Kommission aus Umweltministerium und Betreiber- und Industrieverbänden mit dem Thema beschäftigt. Eine freiwillige Selbstverpflichtung der Beteiligten zur weitestgehenden Reduzierung des Einsatzes von SF<sub>6</sub> steht unmittelbar vor der Veröffentlichung.

In Österreich wurde per Bundesgesetz vom 10.12.2002 der Einsatz von SF<sub>6</sub> mit strengen Meldevorschriften belegt. Auch EU-weit wird es Einschränkungen im Einsatz von SF<sub>6</sub> geben.

## 10 Zusammenfassung

Öl-Papier isolierte und SF<sub>6</sub>-Isolierte Wandler können heute als technisch gleichwertig angesehen werden. Der Anwender kann in Abwägung seiner Erfordernisse entscheiden, welche Technologie zum Einsatz kommen soll. Die folgende Tabelle stellt die wesentlichen Vergleiche zusammenfassend gegenüber:

Öl-Papier Isolation	SF <sub>6</sub> -Gasisolation
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jahrzehnte erprobte und gut eingeführte Konstruktion</li> <li>• Permanente Weiterentwicklung</li> <li>• Sicherheit bei internem KS</li> <li>• Wartungsfrei</li> <li>• Porzellan oder Verbundisolatoren</li> <li>• Nachgewiesene Betriebszeit 40 Jahre</li> </ul> <p>Erwartete Betriebszeit &gt;50 Jahre</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vergleichsweise neuere Technologie</li> <li>• Größere Abmessungen</li> <li>• Berstscheibe für Druckablass</li> <li>• Gasüberwachung erforderlich (Gas ist unsichtbar!)</li> <li>• Spezielle Vorschriften für Transport und Betrieb erforderlich (Druckbehälter!)</li> <li>• Umweltbeeinflussung von SF<sub>6</sub> ist mehr und mehr in Diskussio (Gasleckage &lt;1%/Jahr– Zersetzungsprodukte, Treibhausgas)</li> </ul>

# Methoden zur Erfassung des Isolationszustands von Messwandlern vor Ort

Thomas Heizmann, Vahe Der Houhanessian, Hans-Josef Knab, Reinhold Bräunlich  
Fachkommission für Hochspannungsfragen FKH, Zürich

## 1 Einleitung

Hochspannungs-Messwandler mit Öl-Papierisolation wie auch andere mit Öl-Papierisolationen ausgerüsteten Hochspannungsapparate sind prinzipiell einer Alterung unterworfen, welche ihre Isolationseigenschaften im Laufe der Einsatzjahre je nach Konstruktion und Betriebsumständen mehr oder weniger herabsetzt. Da Messwandler üblicherweise einige Jahrzehnte in Betrieb stehen, ist eine Zustandskontrolle oder Überwachung der Wandlerfunktion und insbesondere des Isolationssystems unerlässlich. Über alle Fabrikate und Hochspannungsebenen gemittelt, werden in Mitteleuropa etwa Ausfallsraten in der Grössenordnung von einem Promille pro Jahr festgestellt. Hauptgründe für Isolationsversagen sind Undichtigkeiten des Ölvolumens und damit Kontakt mit der Aussenwelt, Überlastung der Isolation durch Überspannungen, Fabrikationsmängel und mechanische Beschädigungen.

Folgende Diagnoseverfahren stehen heute zur Verfügung und sollen im Folgenden behandelt werden:

- **Messung von Teilentladungen (TE):** lokale Defekte in der Hochspannungs-Isolation und elektrisch überbeanspruchte Schwachstellen;
- **Messung des Polarisations- und Depolarisationsstroms (PDC):** Wassergehalt des Öls, Zellulosefeuchtigkeit sowie allgemeine Alterung;
- **Ölanalyse:** Bestimmung dielektrischen Öleigenschaften, des Wassergehalts des Isolieröls sowie Bestimmung von Abbauprodukten von Öl und Zellulose.

## 2 Vor-Ort-Teilentladungsprüfung von HS-Messwandlern

Teilentladungsmessungen (TE-Messungen) an Wandlern zeichnen sich gegenüber anderen Methoden dadurch aus, dass Sie den schädigenden Mechanismus bei elektrischer Überlastung von Fehlerstellen unmittelbar und in Echtzeit anzeigen. Gemessene Teilentladungen lassen sich ausserdem quantifizieren und bis zu einem gewissen Grad auch lokalisieren. Zur Feststellung des momentanen Isolationszustands von Hochspannungsmesswandlern stellt deshalb die TE-Messung die aussagekräftigste aber auch die aufwändigste Methode dar.

Eine Vor-Ort-TE-Prüfung an betriebsgealterten Messwandlern soll insbesondere bei älteren Wandlern mit unbekanntem Zustand der Isolation ein Kriterium liefern, welches die Entscheidung ermöglichen sollte:

- **ob der untersuchte Wandler weiterbetrieben werden kann,**
- **ob der Wandler im Werk näher überprüft werden soll,**
- **ob er ausgeschrieben werden muss.**

Bei Erfüllung dieses Hauptziels kann für einen Grossteil der Wandler der Transport ins Werk eingespart werden. Unsichere und kritische Fälle müssen dann nach wie vor weiteruntersucht werden.

Der Erfolg von Vor-Ort-TE-Messungen hängt in erster Linie von einer wirksamen Eliminierung der stets vorhandenen Hochfrequenz-Signalstörquellen ab. Der grösste Teil dieses Abschnitts beschäftigt sich deshalb mit der wohl schwierigsten Problematik der wirksamen Unterdrückung von Störungen, zumal ein aussagekräftiges Testergebnis nur möglich ist, wenn auch der Nachweis niedriger Pegel der scheinbaren Ladung (5 pC nach IEC 60044) noch gewährleistet ist.

Eine Vor-Ort-TE-Prüfmethode muss ausserdem genügend einfach und damit feldtauglich sein. Letztlich ist die Prüfprozedur zu standardisieren, damit eine reproduzierbare Durchführung und Auswertung der TE-Prüfung gewährleistet ist, welche auch Vergleiche aus verschiedenen Messkampagnen zulässt.

### 2.1 Prüfmethode und Einrichtungen

Bei der FKH wurden drei Prüfanordnungen näher untersucht, welche sich fallspezifisch angewendet alle als erfolgreich erwiesen haben (Tabelle I).

Bei allen drei Methoden werden die Wandler ausser Betrieb genommen und primär- und sekundärseitig von den Anschlüssen getrennt. Alle Methoden basieren auf einer TE-Brückenschaltung.

Bei der elegantesten Prüfanordnung (Methode 1) werden keine externe Hochspannungskomponenten benötigt: Zwei Spannungswandler oder Kombiwandler werden von der Niederspannungsmesswicklung her erregt und gemeinsam in Brückenschaltung geprüft (Abbildungen 1 und 2). Die dazu erforderliche Niederspannungsquelle soll mit Vorteil frequenzvariabel sein, wobei die Frequenz der Prüfspannung zwischen 45 und 80 Hz einstellbar sein soll.

Sowohl die Einspeisung zur Erzeugung der Prüfspannung wie auch die Auskopplung der TE-Impulse erfolgt an den Wandler-Messanschlusskästen.

	Einspeisung	Schaltung TE-Messkreis	Besonderheiten
<b>Methode 1</b> Selbst- erregung	Erregung von Unterspannungsseite der Spannungswandler	Brückenschaltung mit zwei Messwandlern, die gleichzeitig geprüft werden	Keine HS-Prüf-Komponenten notwendig Thermische Beanspruchung Spannungswandler muss abgeklärt werden Bei reinen Stromwandlern nicht möglich
<b>Methode 2</b> Serie- resonanz- kreis	Spannungserzeugung mit einem modularen Serieresonanzkreis	Brückenschaltung mit zwei Messwandlern, die gleichzeitig geprüft werden oder Brückenschaltung mit Koppelkondensator	Belastungskapazität notwendig, Es können auch 3 Wandler gemeinsam geprüft werden
<b>Methode 3</b> Prüftrafo	Prüfspannungserzeugung mit Prüftransformator	Wandler und Prüftrafo werden zu einer TE-Messbrückenschaltung verwendet	Jeder Wandler wird einzeln geprüft

**Tabelle I**            **Prüfkonfigurationen für die Teilentladungsmessung an Messwandlern**



**Abbildung 1**    **Vor-Ort-Teilentladungsprüfung zweier Messwandlergruppen, 150 kV, in Brückenschaltung nach Methode 1 (Verzasca AG, Zentrale Gordola).**  
**Im Vordergrund befindet sich die Prüfeinrichtung in offener Aufstellung, ohne Messwagen:**  
**Mitte:**            **Teilentladungsmesseinrichtung bestehend aus Teilentladungsmessbrücke (Tettex) und phasenauflösendes TE-Messsystem**  
**rechts:**           **Frequenzumformergruppe**

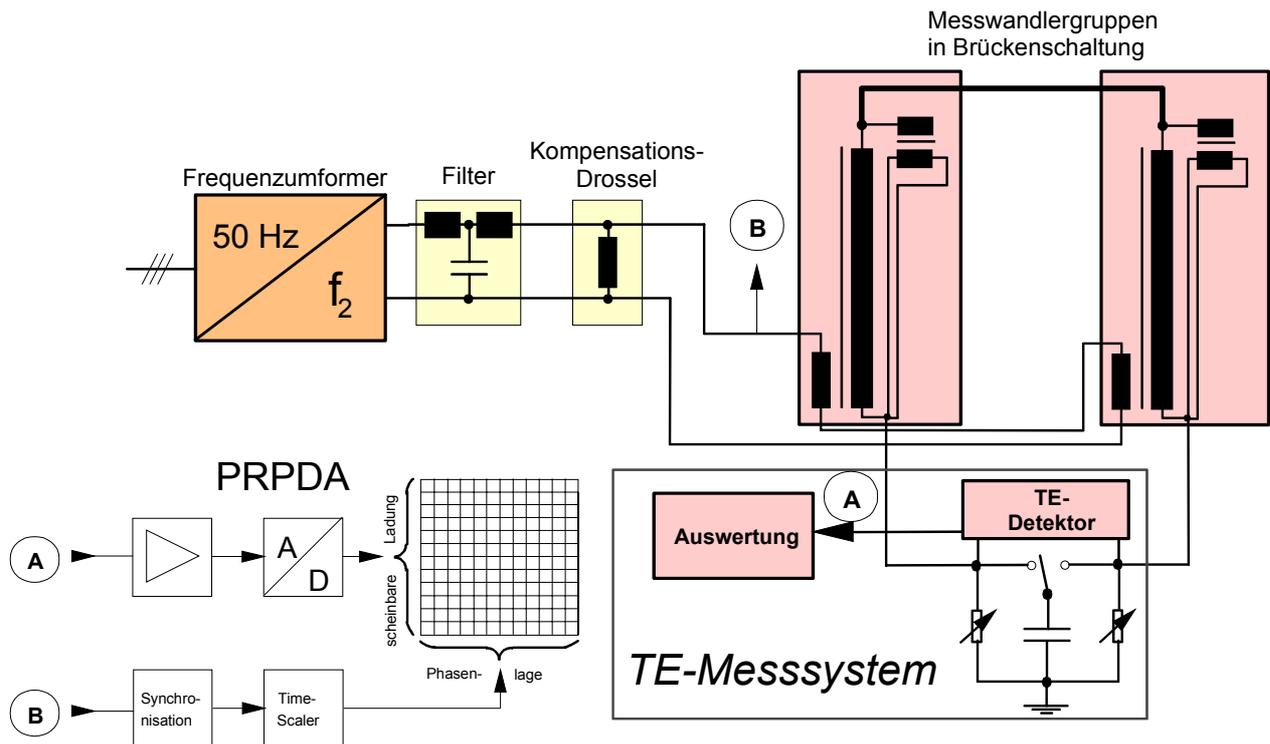


Abbildung 2 Blockschema der gesamten Teilentladungsmesseinrichtung nach Methode 1 mit zwei Messwandlergruppen in Brückenschaltung.

Bei der Prüfung von Stromwandlern oder wenn die thermische Belastung eine Eigenerregung nicht zulässt, kommen die Prüfvarianten 2 und 3 in Betracht (Abbildungen 3, 4 und 5).



Abbildung 3 Photographie der Teilentladungsmesseinrichtung mit allen drei Messwandlergruppen in Brückenschaltung und Prüfspannungserzeugung mittels Serienresonanzkreis (Methode 2)

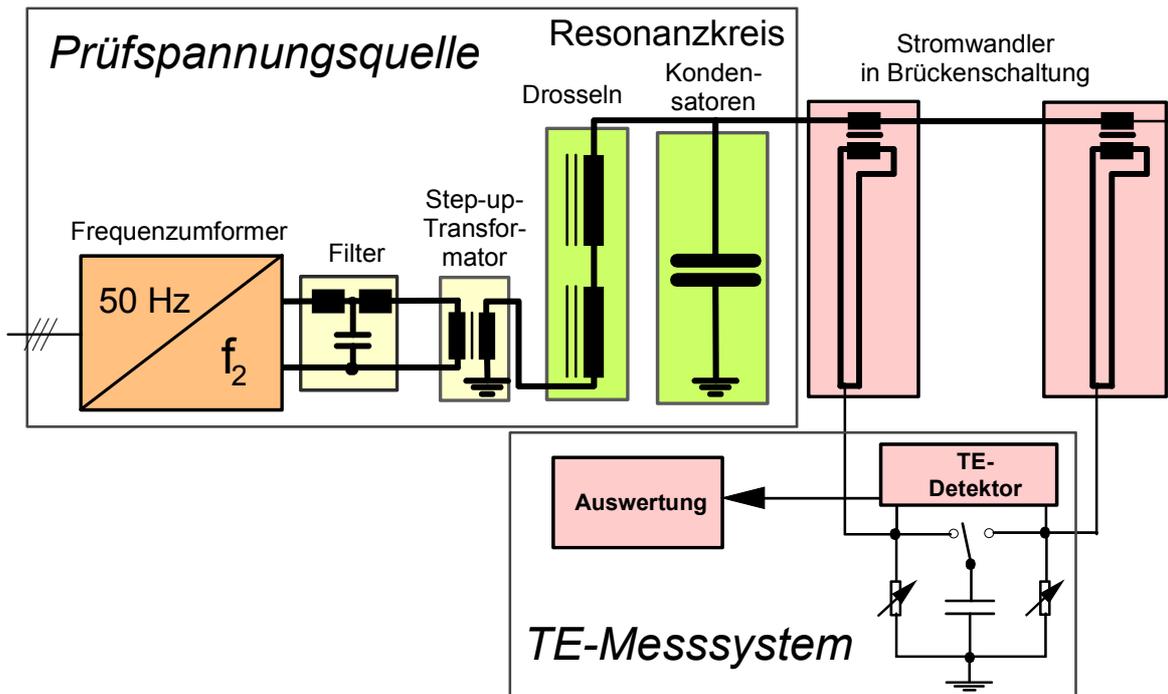


Abbildung 4 Blockscha der Teilentladungsmesseinrichtung mit zwei Messwandlergruppen in Brückenschaltung und Prüfspannungserzeugung mittels Serieresonanzkreis (Methode 2)

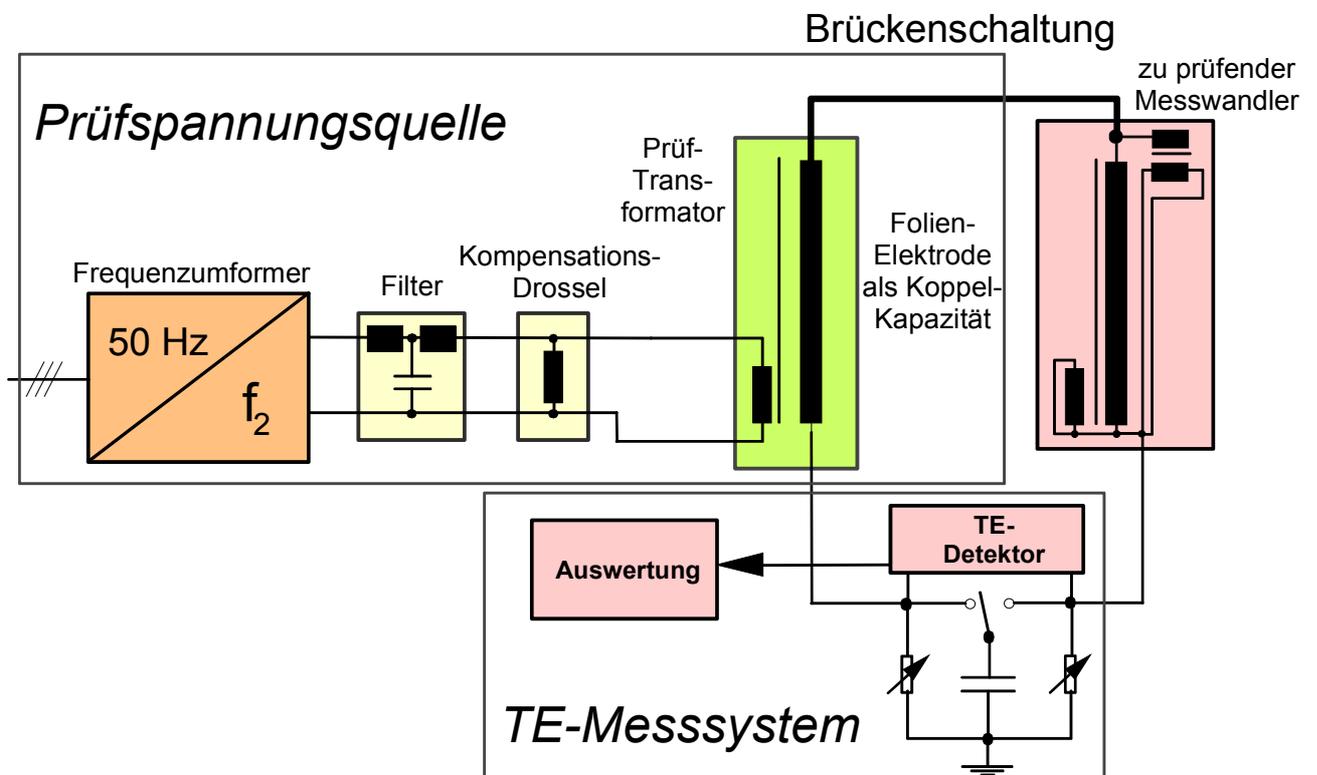


Abbildung 5 Blockscha der Teilentladungsmesseinrichtung nach Methode 3 mit einer Messwandlergruppe, Prüfspannungserzeugung mit einem Prüftransformator, der gleichzeitig als zweiter Brückenweig für die TE-Messung verwendet wird

Entscheidend für den praktischen Einsatz ist, dass die Prüfeinrichtung mobil ist, damit die Einrichtungszeit minimal ist und die Prüfanlage als ganzes mit geringem Aufwand von Wandler zu Wandler gefahren werden kann.

Im Bestreben, möglichst tiefe Ströme in den Sekundärwicklungen der Spannungswandler zu erreichen, wird eine frequenzvariable Speisespannung eingesetzt. Wichtig ist allerdings, dass die Speisequelle zur Unterdrückung eigener Störimpulse eine elektromagnetische Abschirmung und hochwertige Hochfrequenzleistungsfilter am Ein- und Ausgang besitzt. Bei Pulsbreitenmodulierten Frequenzumrichtern sind Dämpfungen der Störsignale von etwa 80 dB notwendig. Die Vorteile der Verwendung eines Frequenzumrichters können folgendermassen zusammengefasst werden:

1. **Unterdrückungen von Hochfrequenzstörimpulsen des Niederspannungsnetzes durch galvanische Entkopplung**
2. **Einsatz eines Serie-Resonanzkreises möglich**
3. **Möglichkeit zur elektronischen Diskriminierung von netzsynchronen Störimpulsen**
4. **Symmetrische Belastung aller drei Phasen des zur Einspeisung benützten Niederspannungsnetzes (typische Einspeiseleistung: 5...10 kW)**
5. **Vermeidung von Kernsättigung**
6. **Möglichkeit zur Minimierung des Stromes in den Sekundärwicklungen der zu prüfenden Spannungswandler durch Wahl der optimalen Frequenz.**

Teilentladungssignale von beiden Wandlern werden einem TE-Brückendetektor und von dort einer weiteren Signalverarbeitung zugeführt. Zur Registrierung der Teilentladungen werden alle Impulse während einer Minute bezüglich Amplitude (scheinbarer Ladung) und Phasenlage der Prüfspannung erfasst und in einem rechnergestützten phasenauflösenden Impulsauswertesystem ausgewertet. Das Ergebnis kann anschliessend als Impuls-Diagramm betrachtet werden, welches als Dokumentation für die aufgetretene TE-Aktivität dient.

## 2.2 Störunterdrückung

In Unterwerken können folgende Störquellen eine unerwünschte Beeinträchtigung von Teilentladungsmessungen an Wandlern hervorrufen. Sie sind nachstehend in absteigender Bedeutung aufgeführt:

1. **Äussere Teilentladungen**
2. **Rundfunksender im Mittelwellenbereich**
3. **Störungen aus der Anlage und dem Erdungssystem**
4. **Störungen aus dem Niederspannungsnetz:**

Die gesammelten Erfahrungen bei der Behandlung von Hochfrequenz-Störsignalen führten zum kombinierten Einsatz folgender Massnahmen:

1. **Brückenschaltung**
2. **Filterung und Schirmung der Speisequelle**
3. **Betrieb des TE-Messsystems über Netzfilter**
4. **Wahl einer von der Netzfrequenz abweichenden Frequenz der Prüfspannung**
5. **Eingrenzung der TE-Messbandbreite**
6. **Digitale Störunterdrückung mittels phasenauflösendem TE-Messsystem.**

Zur Verhinderung der Einkopplung nicht leitungsgebundener Hochfrequenzstörungen wird bei der Methode 1 die Verbindung Speisequelle-Prüfling doppelt abgeschirmt. Die unerwünschte Einkopplung von Schirmströmen in die Signalleitungen wird durch beidseitige Erdung aller äusseren Kabelschirme verhindert. Zu diesem Zweck wurden von der FKH spezielle Steckerplatten für die Anschlusskästen der Wandler angefertigt. Zur Untersuchung des Störspektrums und als Schmalbandfilter während der TE-Messung bietet sich der Einsatz eines Spektrumanalysators. Mit einem solchen Standardgerät lässt sich die Störunterdrückung im Frequenzbereich optimieren.

Wird mit einer von der Netzfrequenz abweichenden Prüffrequenz gemessen, so können die mit der Netzfrequenz korrelierten Störimpulse wirkungsvoll diskriminiert werden. Die Störimpulse erscheinen dann als Hintergrund über die ganze Diagrammbreite gleichmässig verteilt. Eigene Untersuchungen in der Versuchsstation der FKH in Däniken haben gezeigt, dass eine aussagekräftige TE-Messung selbst dann noch möglich, wenn der externe Störpegel den Teilentladungspegel übersteigt.

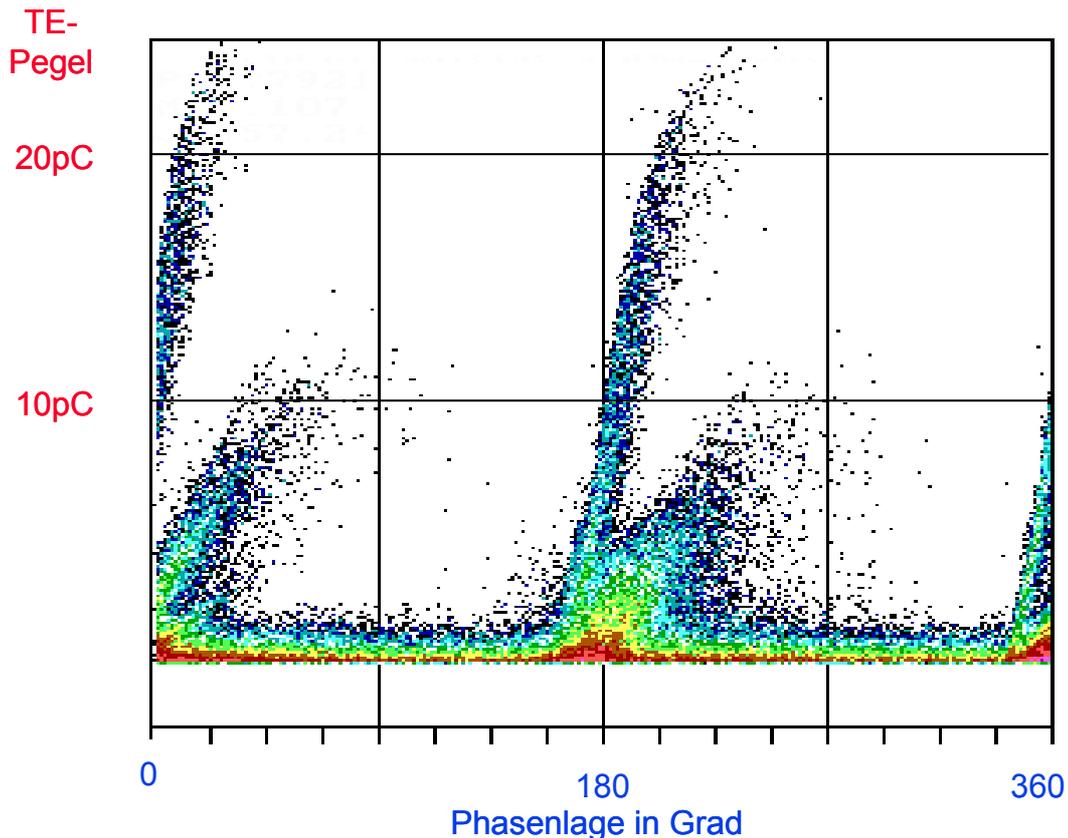
### 2.3 Prüfablauf und Ergebnisse

In Absprache mit der Fachkommission 38 des CES (Messwandler) wird folgendes Prüfverfahren vorgeschlagen, welches bisher in allen durchgeführten Versuchen konsequent angewendet wurde:

- Teilentladungsmessung bei  $U_0$ , (Dauer: 1 min)
- 5 min Belastung mit  $1.2 \times U_0$
- Teilentladungsmessung bei  $U_0$ , (Dauer: 1 min)

Während diesem Prozedere werden die zu prüfenden Wandler mit einer temporären Überspannung beansprucht, wie sie grundsätzlich auch im Betrieb auftreten könnte. Neben den absolut gemessenen Teilentladungspegeln sind bei diesem Verfahren vor allem auch Veränderungen des TE-Diagramms zwischen den Messungen vor und nach der 5-minütigen Überspannung von entscheidender Bedeutung. Ein Ansteigen des Teilentladungspegels oder das Auftreten einer neuen TE-Störstelle bei der zweiten Teilentladungsmessung weist auf eine fortschreitende Isolationsschädigung hin.

Ein Beispiel eines TE-Befunds zeigt die Darstellung Abbildung 6. Das Muster weist auf mehrere Entladungsstellen hin, die auf eine Delamination in der Feststoffisolation hinweisen. Die im phasenaufgelösten Diagramm als bogenförmige Strukturen erscheinende Impulshäufungen geben Hinweise auf den Teilentladungsmechanismus.



**Abbildung 6** Teilentladungsbefund bei einer bereits ausgemusterten 220-kV-Messgruppe bei den Rhonewerken in Mörel mit Schaden in der inneren Isolation. Prüfspannung 127 kV gegen Erde. Messzeit: 1 min.

## 2.4 Beurteilung der Teilentladungsbefunde

Zunächst müssen echte Teilentladungen von Störeinflüssen unterschieden werden. In den meisten Fällen bereitet die Unterscheidung zwischen den eigentlichen inneren Teilentladungen und den harmlosen äusseren Entladungen mit Hilfe der phasenaufgelösten Impulsdigramme keine besonderen Schwierigkeiten. Ausnahmen bilden Entladungen an der Aussenisolation mit Fremdbelag oder bei Nässe und auch Entladungen an Verbindungsstellen zwischen Metallarmaturen und Porzellan. In diesen Fällen kann die Abgrenzung gegenüber inneren Entladungen Schwierigkeiten bereiten, da Oberflächenentladungen das TE-Erscheinungsbild mannigfaltig formen können.

Ein richtbares Ultraschallempfangsgerät kann in solchen Situationen gute Dienste leisten. In speziellen Situation wurden auch schon akustische TE-Sensoren mit Körperschallwandlern als Diagnosehilfen angewendet. Dieses Hilfsmittel wird in erster Linie zur Bestätigung von elektrisch ermittelten Teilentladungsbefunden und für die Fehlstellenlokalisierung eingesetzt.

Die Interpretation von Teilentladungsergebnissen beruht weitgehend auf Erfahrung bzw. dem Wissen über Eigenheiten der zu beurteilenden Wandlerisolation. Einige Teilentladungsquellen hinterlassen eindeutige Spuren und lassen sich deshalb einer gewissen Fehlerstelle zuordnen. Oft sind jedoch die Kenntnisse über die möglichen Schwachstellen im Aufbau des Messwandlers im Gespräch mit dem Hersteller zu eruieren. Die Beurteilungen lassen sich wesentlich verbessern, wenn eine grössere Zahl gleicher Messwandler (10 Stück und mehr) untersucht werden.

Nach der Feststellung von inneren Teilentladungen stellt sich die Frage nach der eingangs erwähnten Triage in Wandler die weiterbetrieben werden können, die näher überprüft werden sollen und solche, die ausgeschieden werden müssen.

Infolge der unterschiedlichen Messempfindlichkeiten an den möglichen Fehlerstellen in der Wandlerisolation und wegen den konstruktiven Unterschieden bei den vorhandenen Fabrikaten ist die Festlegung eines eindeutigen Grenzpegels für innere Teilentladungen von Messwandlern eine Frage, die nur mit eingehender Erfahrung für einzelne individuelle Wandlerkonstruktionen beantwortet werden kann. Nach dem heutigen Stand des Wissens kann deshalb als konservative Lösung eine Anlehnung an die für neue Wandler gültigen Kriterien empfohlen werden: SEV-Regel Nr. 3304 "Teilentladungsmessung an Messwandlern".

Es wird deshalb vorgeschlagen, bei folgenden Befunden eine weitere Überprüfung des Wandlers vorzunehmen:

1. Feststellung innerer Teilentladungen bei Betriebsspannung  $U_0$  mit einer scheinbaren Ladung über 5 pC.
2. Veränderungen des TE-Bildes bei der zweiten TE-Prüfung nach der 5-minütigen Überspannung im Vergleich zur ersten TE-Prüfung. Sowohl ein generelles Ansteigen des Teilentladungspegels und der Impulszahl, wie auch die Feststellung eines weiteren Teilentladungseinsatzes bedeuten, dass die Teilentladungsaktivität nicht stabil ist und dass kurzfristig mit einer weiteren Zunahme des Pegels gerechnet werden muss.
3. Progressive Verschlechterung des TE-Befunds bei periodischer Überprüfung in längeren Zeitabständen (z.B. jährlich).

Eine gewisse Unsicherheit ergibt sich bei der Beurteilung von älteren Wandlern (Baujahr vor ca. 1970). Da bei früheren Isolationssystemen keine vollständige TE-Freiheit angestrebt wurde und an unkritischen Stellen TE zugelassen wurden. Bei solchen Wandler-Modellen können unter Umständen jahrelang aktive TE-Störstellen vorhanden sein, ohne dass an kritischen Stellen der Isolation Schäden auftreten. Als Kriterium für die Notwendigkeit zur Ergreifung weiterer Massnahmen wird dort fallweise ein höherer TE-Pegel als unter Punkt 1 angesetzt.

## 2.5 Folgerungen

Drei Prüfkonfigurationen für Vor-Ort-TE-Prüfungen an Wandlern wurden vorgestellt und ihre Einsatzmöglichkeiten erläutert. Mit den verfügbaren Messeinrichtungen können pro Tag die Wandler von mehreren Schaltfeldern einer Hochspannungsfreiluftschaltanlage mittels Teilentladungsmessung überprüft werden.

Durch eine optimierte Mess- und Prüfeinrichtung und insbesondere durch die Kombination verschiedener Störunterdrückungsmassnahmen bei der Speisequelle und in der Messkette kann der Teilentladungs-Grundstörpegel bei Vor-Ort-Prüfungen auf Werte reduziert werden, wie sie mit Standardausrüstungen nur in geschirmten Labors erreichbar sind. Damit können in der Regel mit den verwendeten Mitteln auch in Unterwerken die für Typprüfungen geltenden Grenzwerte der scheinbaren Ladungen von 5 pC bzw. 10 pC nachgewiesen werden (siehe auch SEV-Regel: 3304.1986 "Teilentladungsmessung an Messwandlern").

## 2.6 Literaturangaben

- [1] Aschwanden Th., Bräunlich R., Hässig M.: „TE-Prüfungen an Hochspannungsmesswandlern in Umspannwerken“, VDE-/ETG-Fachseminar „Teilentladungen (TE) in Betriebsmitteln der Elektrischen Energietechnik“, Esslingen, 1995.
- [2] Weber H.-J., Seeberger R. E., Stolpe G.; „Field Measurements of Partial Discharges in Potential Transformers“, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 5 (1986), pp. 34-38.
- [3] Zaengl W.S., Klaus A.: „On-site Surveillance of Potential Transformers by Means of PD-Measurements.“, CIGRE Symposium "New and Improved Materials for Electrotechnology", Wien, 1987, Paper 400.03.
- [4] Klaus A., Gerlach H.G.: „Teilentladungsmessungen an Hochspannungsapparaten in ungeschirmten elektrischen Verteilanlagen.“, Bull. SEV/VSE, Vol. 79 (1988), S. 769-774.

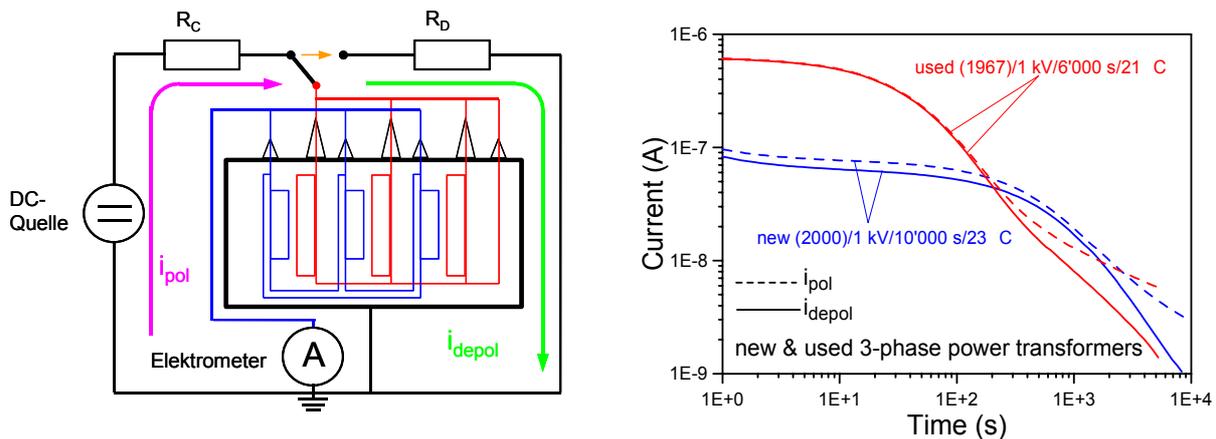
### 3 Messung des Polarisations- und Depolarisationsstroms (PDC):

Die Polarisation- und Depolarisationsstrommessung (PDC) ist eine neue, einfache Methode zur direkten Beurteilung des Isolationssystems von Öl/Papier isolierten Hochspannungsapparaten. Die Methode liefert die „dielektrische Antwortfunktion“ von Öl-Zellulose-Isolationssystemen aus Verläufen sehr kleiner Lade- und Entladeströmen über eine Messdauer von typisch je 3 Stunden [1].

Das Verfahren wurde an Leistungstransformatoren entwickelt und validiert und wird zur Zeit bereits in mehreren Ländern sowohl von Forschungs- und Prüfinstituten als auch von Herstellern mit Erfolg angewandt. Wegen der Verwandtschaft hinsichtlich des Isolationssystems von Leistungstransformatoren und Hochspannungsmesswandlern ist es naheliegend, die PDC-Messung und –Analyse auch auf diese anzuwenden.

#### 3.1 Messungen an Leistungstransformatoren

Bild 1 zeigt die Polarisations- sowie die Depolarisationsströme, die an einem seit 33 Jahren in Betrieb stehenden 220-kV-Transformator und an seinem neuen Ersatztransformator gemessen wurden.



**Bild 1** PDC-Messung: Anschlussdiagramm sowie Polarisations- und Depolarisationsströme eines neuen bzw. gealterten Transformators.

Mittels computerunterstützter Auswertung der gemessenen Ausgleichsvorgänge unter Berücksichtigung der Geometrie der Zelluloseplatten und Ölspalte können sowohl Werte der Ölleitfähigkeit wie auch des Feuchtigkeitsgehalts des Zelluloseanteils ermittelt werden. Aus den in den Bildern 2 und 3 gezeigten Vergleichen zwischen gemessenen und berechneten Stromverläufen wird ersichtlich, dass der neue Transformator eine Ölleitfähigkeit von 0.255 - 0.290 pS/m sowie ein Feuchtigkeitsgehalt der Zelluloseplatten von 1.0% aufweist.

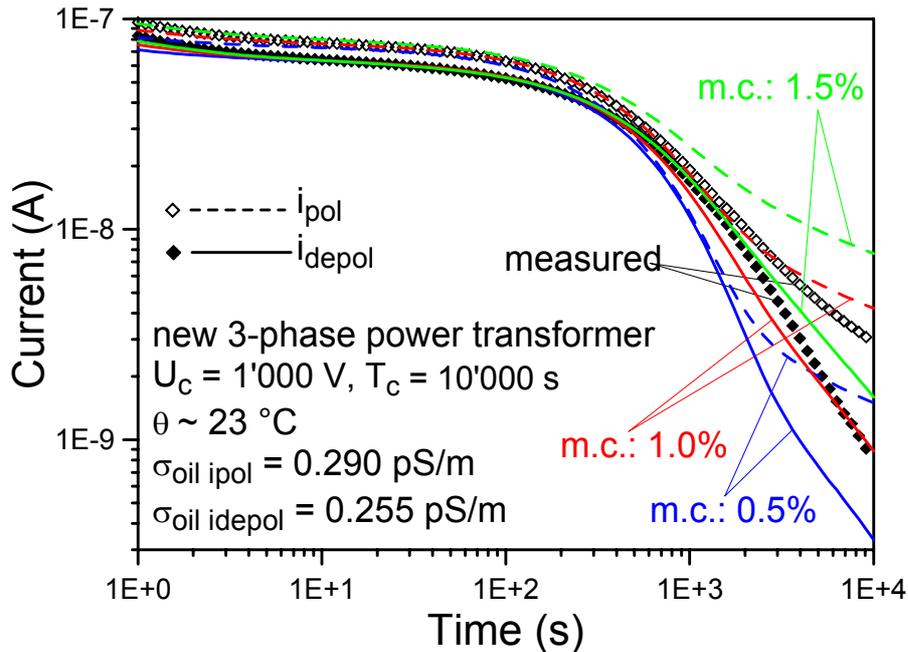


Bild 2

Vergleich zwischen den gemessenen und den berechneten Polarisations- und Depolarisationsströmen in Abhängigkeit des Feuchtigkeitsgehalts (m.c.: moisture content) in den Zelluloseplatten und den Abstandshaltern des neuen Transformators aus Bild 1.

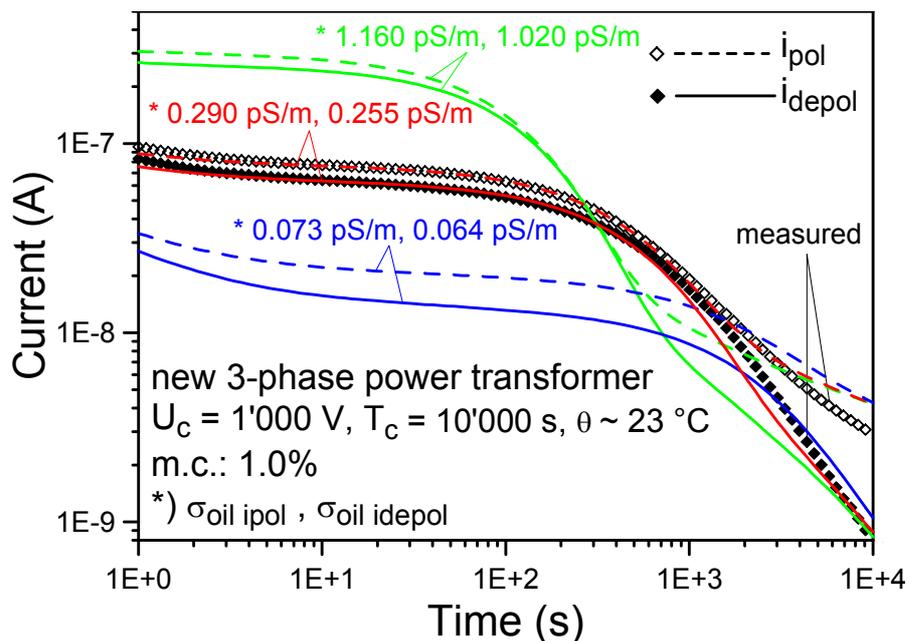
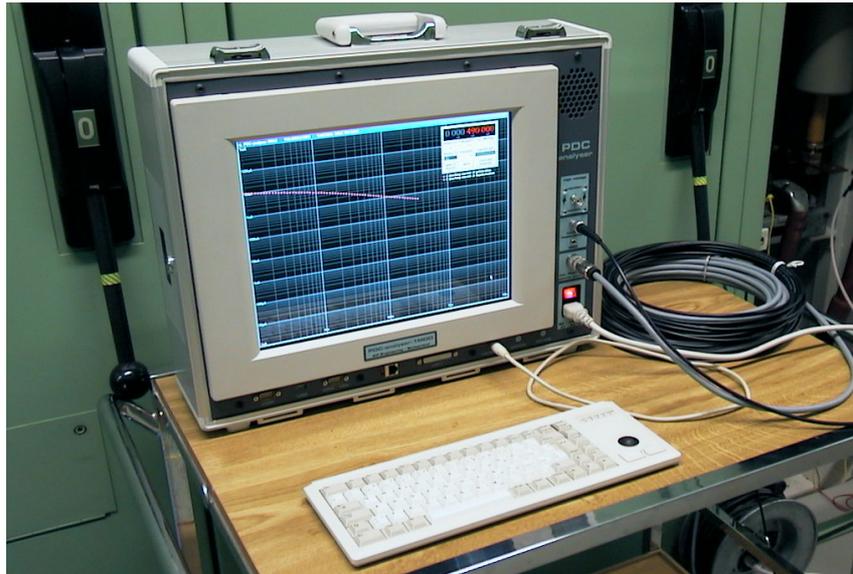


Bild 3

Gemessene und berechnete Polarisations- und Depolarisationsströme in Abhängigkeit der Ölleitfähigkeit  $\sigma$  des neuen Transformators aus Bild 1.

Die Polarisations- und Depolarisationsstrommessung (PDC) ist demnach eine Methode, die mit vernünftigem Aufwand (mit einem inzwischen im Handel erhältlichen Gerät, siehe Bild 4) vor Ort an Leistungstransformatoren angewandt werden kann und zuverlässige Informationen über den Wassergehalt der Isolieröls und des Zelluloseanteils der Isolierung liefert [2].

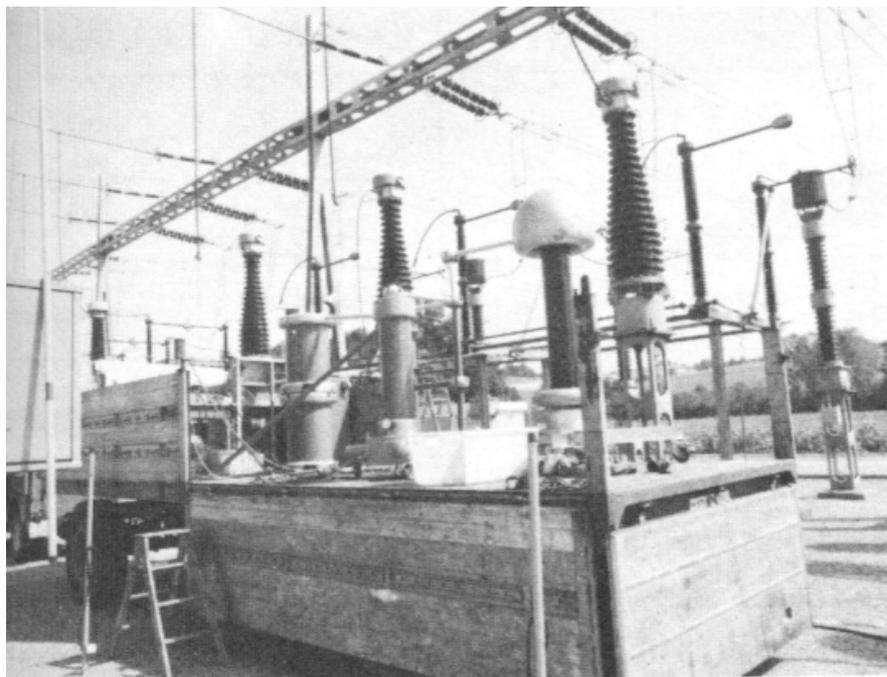


**Bild 4** Kommerzielles Gerät zur PDC-Messung [2].

### 3.2 Messungen an Hochspannungsmesswandlern

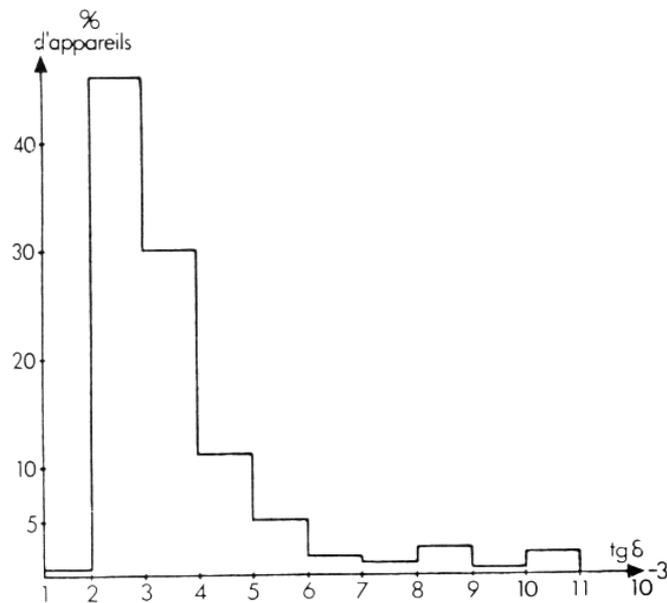
Neben der Messung von Teilentladungen ist es vor allem die Messung der dielektrischen Verluste, die für eine Vor-Ort-Diagnose erfolgreich angewandt wird. In [3] werden sowohl Verfahren für die Vor-Ort-Teilentladungsmessung als auch für die Verlustfaktormessung bei Netzfrequenz beschrieben. Die Arbeiten haben in den Jahren 1980 bis 87 zu einer Messkampagne im Netz der Westschweizer Elektrizitätswerke geführt.

Die Bilder 5 bis 7 wurden aus [3] entnommen. Bild 5 zeigt den Vor-Ort-Messaufbau für die Verlustfaktormessung im EOS-Unterwerk Romanel.



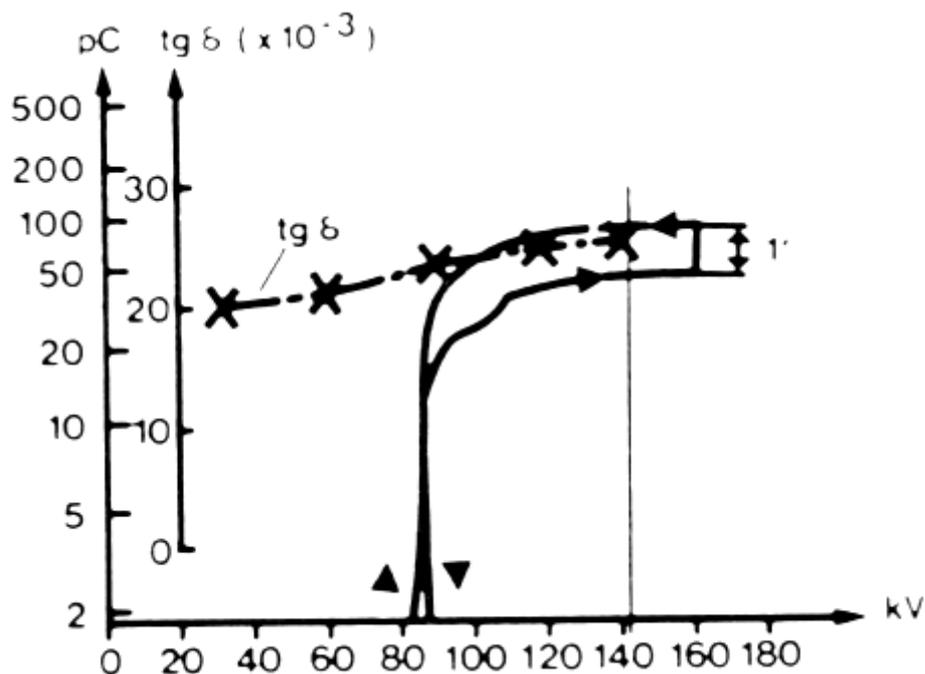
**Bild 5** Messaufbau für die Verlustfaktormessung im EOS-Unterwerk Romanel [3].

Bei den Messungen wurde grossen Wert auf die Störunterdrückung und die Korrektur von Messfehlern gelegt. Bild 6 zeigt ein Histogramm, welches Auskunft über die prozentuale Verteilung der gemessenen Verlustfaktorwerten gibt. Durch Reihemessungen an einer grossen Anzahl (200) von Messwandlern war es möglich, die am stärksten gealterten auszuscheiden.



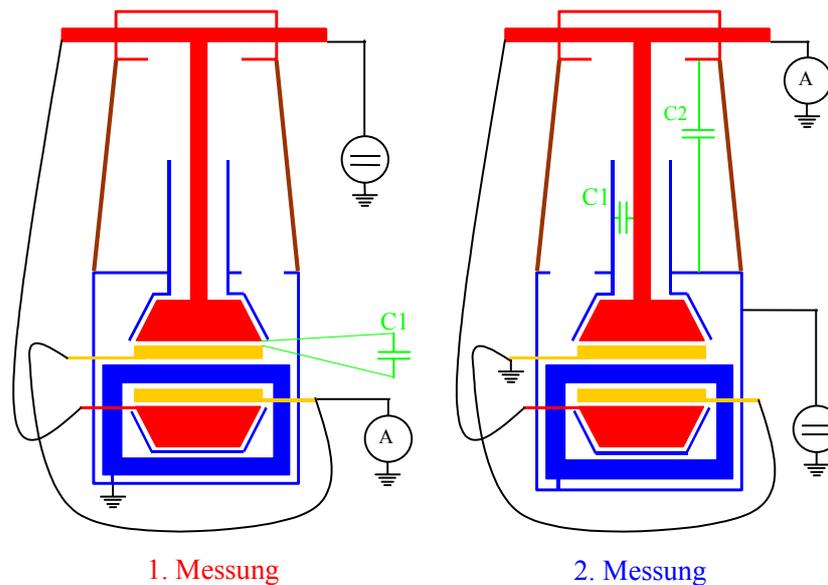
**Bild 6** Prozentuale Verteilung der gemessenen Verlustfaktorwerten [3].

Bild 7 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Verlustfaktor und Teilentladungsaktivität in einem stark gealterten Wandler.



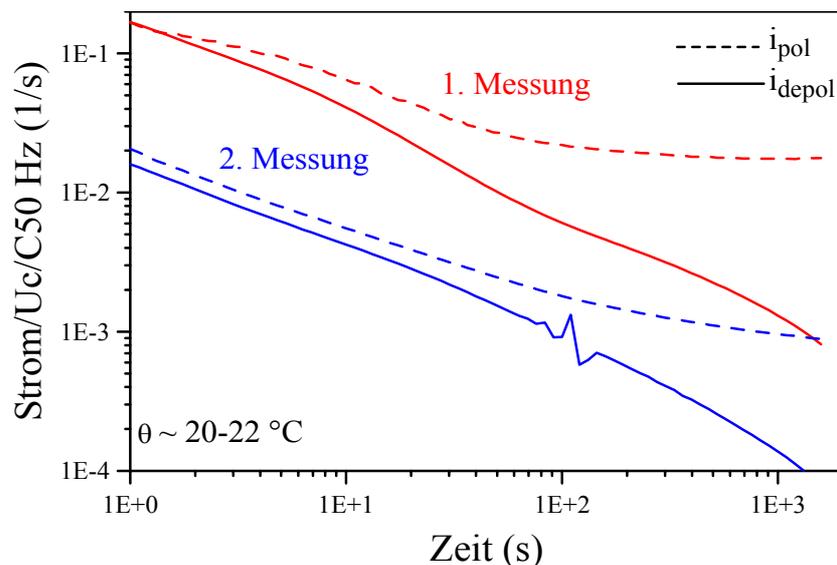
**Bild 7** Zusammenhang zwischen  $\text{tg}\delta$  und TE-Pegel in einem degradierten Wandler [3].

Die oben beschriebene Messung der Polarisations- und Depolarisationsströme liefert ebenfalls Informationen über die dielektrischen Verluste in einem bestimmten Frequenzbereich. Verglichen mit der Verlustfaktormessung bei Netzfrequenz ist der apparative Aufwand wesentlich geringer und die Messresultate liefern mindestens ebenso wertvolle Hinweise auf den Alterungszustand der Wandler. Bild 8 zeigt zwei mögliche Schaltungen für die PDC-Messung. Bei Schaltung 1 werden die Eigenschaften der Isolation zwischen Hochspannungs- und Niederspannungswicklung gemessen; bei Schaltung 2 im wesentlichen diejenigen der Isolierung zwischen Hochspannungswicklung und Kessel.



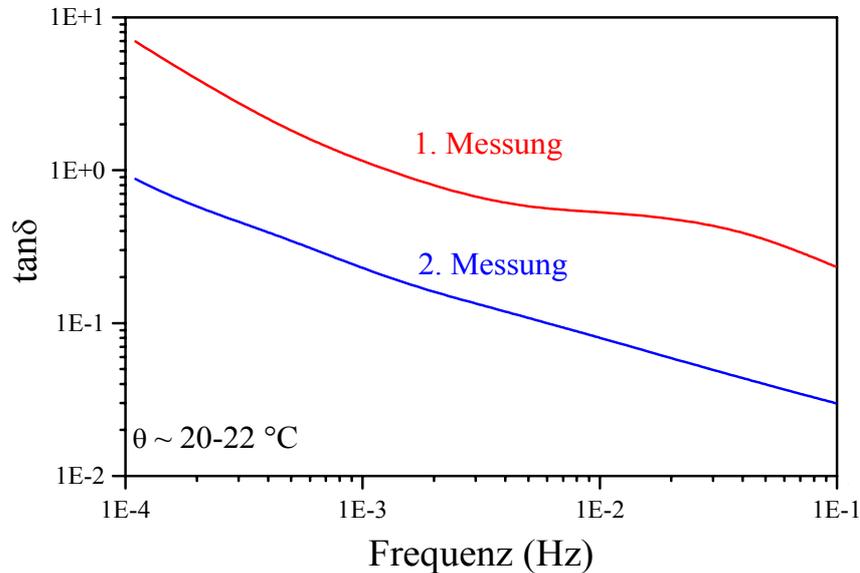
**Bild 8:** Messschaltungen für die PDC-Messung.

In Bild 9 sind die resultierenden Polarisations- und Depolarisationsströme (normiert auf die Ladespannung und die 50-Hz-Kapazität der betroffenen Isolation) dargestellt.



**Bild 9:** Polarisations- und Depolarisationsströme der Messschaltungen nach Bild 5.

Durch die Anwendung der Fast-Fourier-Transformation können aus den dielektrischen Daten im Zeitbereich die Werte des Verlustfaktors  $\tan\delta$  im Zeitbereich berechnet werden.



**Bild 10: Aus den Polarisations- und Depolarisationsströmen 9 berechnete Verlustfaktoren.**

Eine Analyse, die konkrete Angaben über die Feuchtigkeit von Öl und Zellulose liefert, wie dies in Abschnitt 2.1 für Leistungstransformatoren ausgeführt wurde, ist beim heutigen Kenntnisstand für Messwandler noch nicht möglich. Für eine weitergehende Interpretation ist insbesondere die genaue Kenntnis aller konstruktiven Details des Wandlers notwendig [4]. Wegen des gedrängten und komplizierten Ausbaus von HS-Messwandlern muss genau analysiert werden, welche Isolationsteile gemessen werden und, ob allenfalls unerwünschte Stromanteile (z.B. von den Durchführungen) die Messung verfälschen können.

Die Methode ist zur Zeit vor allem dann vielversprechen anzuwenden, wenn zu Vergleichszwecken verschiedene Wandler des gleichen Typs parallel gemessen werden können oder, wenn Wandler im Sinne einer Trendanalyse periodisch untersucht werden können.

### 3.3 Referenzen

- [1] Der Houhanessian, V. , W. S. Zaengl: "On-site diagnosis of power transformers by means of relaxation current measurements", Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, IEEE Publication 98CH36239, S. 28-34.
- [2] Alff, J.-J.: "Electrical Insulation Diagnostic System PDC-ANALYSER-1MOD" ALFF ENGINEERING, Gomweg 7, CH-8915 Hausen am Albis, Switzerland, ([www.alff-engineering.ch](http://www.alff-engineering.ch)).
- [3] Aguet, M.: "Mesures diélectriques préventives sur des transformateurs de mesure à haute tension en site propre" Bulletin ASE/UCS 73(1982)7, S. 300-305.
- [4] Zaengl, W.S.: "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment", erscheint 2003 im IEEE Electrical Insulation Magazine.

## 4 Isolierölanalysen<sup>1</sup>

### 4.1 Dielektrisch-chemische Analysen

Durch Oxidation, thermische Belastung und den Kontakt mit den übrigen Baustoffen eines Öl-isolierten Messwandlers verändern sich die Eigenschaften des Öles – es altert. Für die Betriebsüberwachung des Apparates ist es nun wichtig, die dielektrischen Öleigenschaften, die sich auf die Betriebssicherheit negativ auswirken können zu erfassen. Dies sind:

- die Durchschlagsfestigkeit und
- der dielektrische Verlustfaktor  $\text{tg}\delta$ .

Die Bestimmung dieser beiden Grössen gibt aber nur den momentanen Zustand des Öles zum Zeitpunkt der Probennahme wieder. Eine Prognose über die Betriebstüchtigkeit des Transformators während weiterer vier oder fünf Jahre ist mit der Kenntnis lediglich dieser beiden Grössen nicht möglich. Dazu müssen Öleigenschaften herangezogen werden, von denen man weiss, wie sich deren weitere Entwicklung auf die dielektrischen Eigenschaften des Öles und mit ihm des gesamten Isolationssystems auswirken können.

Verglichen mit Leistungstransformatoren, bei denen die Isolierölanalyse seit längerer Zeit Stand der Technik ist, und oft auch periodisch durchgeführt wird, sind bei Messwandlern die unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Verhältnis Öl : Papier, geringere Kupferverluste usw.) bei der Interpretation der Messresultate unbedingt zu berücksichtigen.

Die wichtigsten zu analysierenden chemischen Öleigenschaften werden im Folgenden kurz aufgelistet:

- Die Neutralisationszahl: Bei Zutritt von Sauerstoff oxidiert das Isolieröl und bildet saure Produkte. Die Neutralisationszahl (NZ) wird in mg KOH/g angegeben und ist die Menge Kaliumhydroxid, die zur Neutralisation eines Gramms des Probeöls benötigt wird.
- Die Grenzflächenspannung: Bei der Oxidation des Öles gebildete Tenside („oberflächenspannungsaktive Substanzen“) werden nachgewiesen. Die Grenzflächenspannung ist ein eher qualitatives, dafür aber sehr sensitives Mass einer beginnenden Ölalterung.
- Der Wassergehalt: Feuchte Fasern oder sonstige Partikel führen zu einer starken Absenkung der Durchschlagsfestigkeit. Die Kenntnis des Wassergehalts im Öl ist daher für die Beurteilung der weiteren Betriebssicherheit eines Wandler von grosser Bedeutung. Seine Bestimmung ist jedoch äusserst problematisch, da im Feuchtigkeitsgleichgewicht um Grössenordnungen mehr Wasser in der Zellulose als im Öl gebunden ist. Erfolgt die Probenentnahme im betriebswarmen Zustand, ist zu verhindern, dass Wasserdampf entweicht. Das beim Erkalten der Probe kondensierte Wasser muss mitberücksichtigt werden.

Tabelle 1 zeigt die in der zur Zeit noch gültigen Norm IEC 60422 empfohlenen Grenzwerte für Isolieröle in Betrieb. Die erwähnte Norm ist in Bearbeitung und die

---

<sup>1</sup> Das Kapitel ist im Wesentlichen ein Auszug aus [1]

Veröffentlichung der neuen Version, in der die Grenzwerte differenzierter behandelt werden, steht unmittelbar bevor.

		Wandler bis 170 kV	Wandler über 170 kV
Durchschlagsspannung	[kV]	min. 40	min. 50
Dielektrischer Verlustfaktor $\tan\delta$ bei 90 °C		max. 0.3	max. 0.2
Neutralisationszahl	[mgKOH/g]	max. 0.5	max. 0.5
Grenzflächenspannung	[nN/m]	min. 15	min. 15
Wassergehalt	[mg/kg]	max. 30	max. 20

Tabelle 1: Empfohlene Grenzwerte für Isolieröle in Betrieb (nach IEC 60422)

#### 4.2 Die Bestimmung im Öl gelöster Zersetzungsgase

Die bisher beschriebenen Untersuchungen dienen der analytischen Verfolgung der natürlichen Alterungsprozesse. Örtliche thermische Überbelastungen des Isolationssystems oder das Vorhandensein von Teilentladungen innerhalb der Festisolation, die Startpunkt zu weiterer Zerstörung sein und schliesslich zum Ausfall des Transformators führen können, werden auf diese Weise nicht erkannt. Mit der routinemässig durchgeführten Untersuchung der im Isolieröl gelösten Gase wurde ein völlig neues Kapitel zur Früherkennung örtlicher Unregelmässigkeiten im Isolationssystem aufgeschlagen und eine wichtige Lücke im Überwachungsprogramm für Transformatoren geschlossen.

In Tabelle 2 findet sich eine Zusammenstellung der von verschiedenen Fehlerarten erzeugten Zersetzungsgase.

Typ	Fehlerart	typische Gase	Ursache
1	stromschwache Teilentladungen niedriger Energiedichte	hauptsächlich H <sub>2</sub> ; wenig gesättigte, keine ungesättigten Kohlenwasserstoffe	schlechte Imprägnierung der Festisolation, Lufteinschlüsse
2	stromschwache Entladungen mit zum Teil hoher Energiedichte	wie Typ 1 jedoch mit Acetylen + Aethylen	schlechte Kontakte, Entladungen zwischen unterschiedlichen Potentialen
3	thermische Zersetzung bei Temperaturen < ca. 800 °C	gesättigte Kohlenwasserstoffe, mit steigender Temperatur wachsende Mengen an Aethylen	Überlastung; hoher Übergangswiderstand, Eisenbrand
4	stromstarke Entladungen hoher Energiedichte	wie Typ 3 mit steigenden Mengen Acetylen und Aethylen und mehr Wasserstoff	Funkenentladungen, Durchschlag

Tabelle 2: Grund-Fehlerarten, typische Gase und Beispiele für Fehlerursachen [2]

Die Interpretation der Ergebnisse der Gasanalysen bedingt grosse Erfahrung und umfangreiche Kenntnisse der Zusammenhänge und der konstruktiven Besonderheiten des zu beurteilenden Wandlers. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass selbst fehlerfrei arbeitende Messwandler Gase entwickeln, deren Gehalte einem Gleichgewichtswert zwischen Gasbildung und Abgabe nach aussen zustreben. Bei

Messwandlern ist insbesondere die Kenntnis der Art des Abschlussystems sehr wichtig, da das sehr kleine Wasserstoffmolekül durch eine Gummimembrane diffundieren kann, was bei metallischen Abschlüssen normalerweise unmöglich ist. Als Arbeitsgrundlage zur Beurteilung von Messungen können in die Tabelle 3 angeführten Werte dienen.

Gas	Menge [ppm = $\mu\text{L/L}$ ]
Wasserstoff $\text{H}_2$	300 (mit Metallabschluss 20 (mit Gummiabschluss)
Methan $\text{CH}_4$	30
Aethan $\text{C}_2\text{H}_6$	25
Aethylen $\text{C}_2\text{H}_4$	4
Acetylen $\text{C}_2\text{H}_2$	2
Kohlenmonoxid $\text{CO}$	330
Kohlendioxid $\text{CO}_2$	900

Tabelle 3: Typische „Normalgasgehalte“ in Messwandlern (nach CIGRE WG 15-01 TF 01, 90%-Vertrauensbereiche)

### 4.3 Furan-Analyse

Als letzte und aufwändigste Methode sei die Furan-Analyse erwähnt, die Auskunft über eine allfällige Zersetzung des Zelluloseanteils der Isolierung gibt. Die Furan-Analyse ist keine routinemässig anzuwendende Untersuchungsmethode wie die dielektrisch-chemische oder die gasanalytische Untersuchung des Isolieröls. Sie sollte aber angewendet werden, wenn wegen extrem hoher Kohlenoxidgehalte der Verdacht besteht, dass es im Messwandler Heissstellen gibt, in denen die Zelluloseisolation involviert sein könnte.

### 4.4 Probenentnahme

Ein fachgerechte Probenentnahme ist die Basis für eine erfolgreiche Ölanalyse; insbesondere für die Gas-in-Öl-Analyse muss peinlich genau darauf geachtet werden, dass kein Gas entweichen kann.

### 4.5 Referenzen

- [1] Knab, H.-J.: „Die Betriebsüberwachung von Transformatoren“ Bulltetin SEV/VSE 21/96, S. 41-47.
- [2] Dörnenburg, E.; Hutzel, O.: „Betriebsüberwachung durch Untersuchungen des Isolieröls“ etz-A 98(1977), S. 211-215.



## Eichen und weitere Aufgaben von METAS

Rudolf Kämpfer

Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), Bern-Wabern

### Zusammenfassung

Ist Eichen noch zeitgemäss? Der liberalisierte Markt und der globale Handel drängen nach immer mehr Unabhängigkeit und nach Abbau von Handelshemmnissen. Die Wirtschaft drängt darauf, ihre Produkte mit möglichst wenig staatlichen Auflagen abzusetzen. Demgegenüber stehen Bedürfnis und Recht des Konsumenten auf richtige Mengenangaben.

Die Einführung der Eichpflicht bezweckte, den Handel fair und transparent zu gestalten. Eichung steht dabei als Synonym zu richtiger Anzeige. Richtige Anzeige der Waage, des Thermometers oder des Elektrizitätszählers. Dies ist heute nicht anders als in der Zeit, wo das gesetzliche Messwesen seinen Anfang fand, wenn auch die modernen Einrichtungen und Verfahren wesentlich vielfältiger und komplexer geworden sind.

**Eichung:** amtliche Prüfung und Bestätigung, dass ein einzelnes Messmittel den gesetzlichen Vorschriften entspricht.

Mit der Eichung will der Gesetzgeber auch heute noch grundsätzlich den Verbraucherschutz sicherstellen. Im Gegensatz zu früher stellen sich mit dem weltweiten

Handel Fragen zur gegenseitigen und grenzüberschreitenden Anerkennung von Zulassung und Eichung.

In der Schweiz ist das Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung, METAS, mit der Organisation und Überwachung des Eichwesens beauftragt. Die Grundlage dazu findet sich im Bundesgesetz über das Messwesen. Die praktische Ausführung obliegt den Kantonen oder vom EJPD ermächtigten Eichstellen.

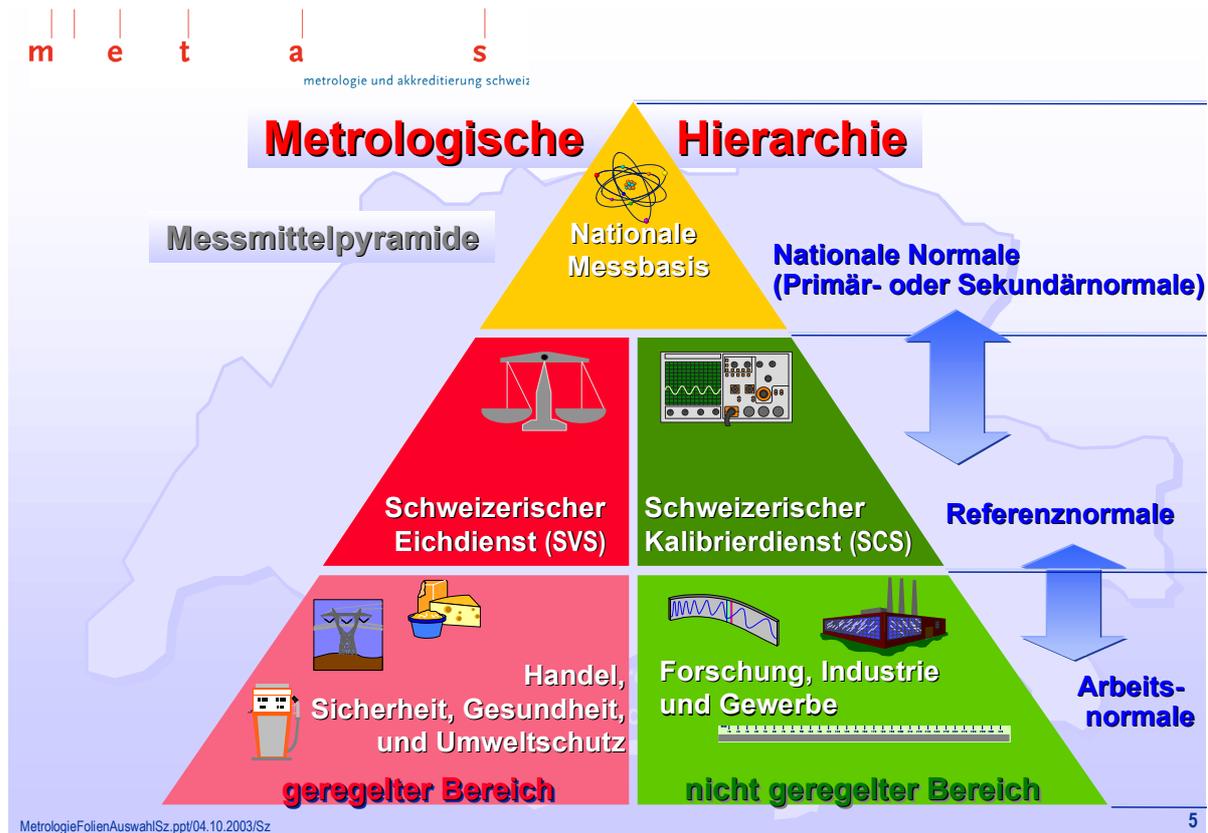
Um in all den Teilgebiete der Metrologie auf höchster Ebene der technologischen Entwicklung mitzuwirken, ist ein bedeutendes Grundlagenwissen Voraussetzung. Dazu betreibt METAS Grundlagenforschung im Basisbereich der Metrologie und pflegt eine enge Zusammenarbeit mit anderen nationalen Messinstituten, mit Universitäten und der Industrie.

Als nationales Messinstitut (NMI) arbeitet METAS zudem eng mit Verbänden und internationalen Organisationen zusammen.

Anhand einer pyramidenförmigen Darstellung (siehe Abbildung) soll die Struktur des schweizerischen Messwesens erläutert werden.

Der linke, geregelte Bereich stellt das gesetzliche Messwesen dar. Der Vollzug wird durch den schweizerischen Eichdienst SVS sichergestellt.

Der nicht geregelte, rechte Bereich beinhaltet die privatrechtlichen Kalibrier- und Messtätigkeiten. Sie werden vom Schweizerischen Kalibrierdienst (SCS) unterstützt.



Für die Rückführung der Referenznormale von Eichämtern, Eichstellen und von Kalibrierstellen stellt METAS ihren Anschluss an die nationalen Normale sicher. Die Schweizerische Akkreditierungsstelle, eine vom Metrologiebereich unabhängig betriebene Abteilung von METAS, sorgt mit ihren Akkreditierungen für die gegenseitige Anerkennung von Kalibrier- und Prüfzertifikaten.

# RC-Spannungswandler für Standardanwendungen, Quality Power Management und Diagnostik

Ruthard Minkner

Trench Switzerland AG, Basel

## Text zur Foliensammlung

Zu Seite 1<sup>1</sup>: Die ersten RC-Hochspannungsteiler waren ein Teil der Elektronen- und Ionenbeschleuniger für französische und amerikanische Forschungsinstitute. Die Beschleuniger wurden von der damaligen schweizerisch-französischen Firma Emil Haefely & Cie. AG für den Spannungsbereich von 300 kV – 1,5 Mio. Volt und unter Druckgas bis 4 Mio. Volt entwickelt und gebaut.

- Durch die hohe Zuverlässigkeit der RC-Teiler erfolgte 1960 der Einsatz in 525kV-Netzen der Bonneville Power Administration in den USA zur Messung von Überspannungen bei Schaltvorgängen.
- Der RC-Spannungswandler war neben den HS-Halbleitern eine Key-Komponente für die AC-DC-AC-Übertragungssysteme und die „weichen“ AC-DC-AC-Netzkupplungen.
- Von den Anlagebauern kamen in den letzten Jahren folgenden Forderungen an die Messwandlerhersteller:
  1. Entwicklung von kostengünstigen Messwandlern, die nicht auf dem Einsatz des induktiven und kapazitiven „Resonanz“-Messprinzips basieren, sondern
  2. andere erprobte Technologien benutzen.
  3. Erweiterung des Übertragungsbereichs für die zu messenden Signale nach unten bis 0 Hz, nach oben bis 2 MHz.

Das Bild auf Seite 2 zeigt die Schaltstation „Singlewell“ von NGC (England). Die 420 kV RC-Spannungswandler wurden von der Firma Trench Switzerland AG geliefert. Das Dielektrikum der Kondensatorelemente ist ein Al-Film, die Imprägnierflüssigkeit ein Mineralöl mit einem freien Ölvolumen von <10 l. Das Mineralöl ist umweltverträglich und ist durch Mikroben abbaubar.

Die Tabelle auf Seite 3 zeigt den Vergleich der Technologien, die für die Herstellung von Spannungswandlern eingesetzt werden.

Besonders die Eigenschaften

- Entladung von Hochspannungsleitungen (2),
- Auftreten von Ferroresonanzerscheinungen in Anlagen (3) und
- das transiente Verhalten des Messwandlers (4)

sind für den Anwender/Betreiber der Anlage von hohem Interesse.

---

1 Die Seiten-Angaben beziehen sich auf die im folgenden abgedruckte Foliensammlung. Die Seitennummern befinden sich auf den Folien jeweils rechts unten.

Das Ersatzschaltbild auf Seite 4 ist in der gezeigten Form nur gültig, wenn bei der Konstruktion des Aktivteils die Verbindungen der Kondensatorelemente für Signale bis 2 MHz geeignet und durch Messung erprobt sind.

Die Berechnung des RC-Netzwerkes ist unter Voraussetzung, dass die Streukapazitäten gegen Erde  $C_{ev}$ ,  $v$  von 1 bis  $n$  gleich sind, in geschlossener Form möglich [11].

Die Kapazität des Kabels (8) und die nicht eingezeichnete Bürde  $R_b$  müssen beim Abgleich je nach Grösse und Anforderungen an die Genauigkeit mit berücksichtigt werden. Die Klasse 0,1% (Amplitudenfehler) und der dazugehörige Fehlwinkel von  $\pm 5$  Min. ist möglich zu erreichen.

Den Aktivteil des RC-Spannungswandlers zeigen die Bilder auf Seite 5. Die Widerstandskette ist auf eine Isolierplatte montiert und wird als getrennte Baugruppe hergestellt. Auf dem rechten Bild sind die Al-Film Kondensatorelemente gut zu erkennen.

Für die Messung des Frequenzganges, Amplitudenverhältnis und Phasenverschiebung, dargestellt auf Seite 8, muss ein koaxial aufgebaute Sekundärteiler mit angepasstem Koaxialkabel benutzt werden. Das Schema auf Seite 6 zeigt die wesentlichen Elemente. Der Messaufbau ist schematisch auf Seite 7 dargestellt.

Die elektrischen Daten von zwei serienmässig gelieferten 420 kV RC - Spannungswandler sind auf den Seiten 9 - 12 angegeben. Die Anforderungen an die Teilentladungen sind IEC entsprechend, was auch auf die zulässigen mechanischen Kräfte zutrifft. In dem IEC Standard 60044-7 fehlen noch Anforderungen für den Frequenzgang. Einige Angaben über das Frequenzverhalten finden sich auf Seite 12.

Es ist interessant, dass auf dem Messgerätesektor die Eingangsimpedanzen (s. Seite 10) bereits die Anforderungen in den Standards 60044-7 und 60044-8 erfüllen, was für den Relaissektor nicht auf alle Hersteller zutrifft. Hier kann es nur einen Fortschritt geben, wenn die Anwender entsprechende Forderungen stellen, oder die multifunktionalen Messgeräte diese Aufgabe übernehmen.

Eine mögliche Kalibrierschaltung für RC-Spannungswandler ist auf Seite 13 dargestellt. Im Vortrag von Herr Dr. J. Schmid wird über den Einsatz der normalen Wandlermessbrücken mit Hilfe eines Impedanzwandlers berichtet.

Für einen idealen RC- Spannungswandler gelten die Formeln auf Seite 14.

Die durchgeführten Untersuchungen und Entwicklungen auf dem Gebiet der eingesetzten Widerstände sind auf den Seiten 15 - 23 beschrieben und dargestellt.

Die Stabilität / Lebensdauer in Abhängigkeit der Anzahl Schaltheftungen wurde mit mehreren Rückzündungen gemessen und in Abhängigkeit der Anzahl bipolarer Impulse untersucht.

Die Widerstände besitzen eine hervorragende Stabilität und zeigen keine messbare Alterung und stellen daher eine hoch zuverlässigere Komponente für das messen der Hochspannung dar.



Trench Transmisson Technology

## Ein RC-Spannungswandler für Hochspannungs-Versorgungsnetze

- **Bisher:** Messung der Spannung in Übertragungs- und Verteilnetzen mit induktiven und kapazitiven Spannungswandlern in den letzten 100 Jahren
- Der kapazitive Spannungswandler wird wegen seiner Zuverlässigkeit zu 90% für die Spannungsmessung eingesetzt.
- Die heutigen Forderungen der Diagnose-, Schutz- und Messtechnik an die Übertragungseigenschaften der kapazitiven und induktiven Spannungswandler können von diesen nicht erfüllt werden.
- **Zukunft:** Dagegen ist der RC-Spannungswandler (= RC-Teiler), in den 60er-Jahren entwickelt, hervorragend für diese Aufgaben geeignet.

09.10.2003

Seite 1



Trench Transmisson Technology

## 420 kV RC-Spannungswandler in der Station "Singlewell"



09.10.2003

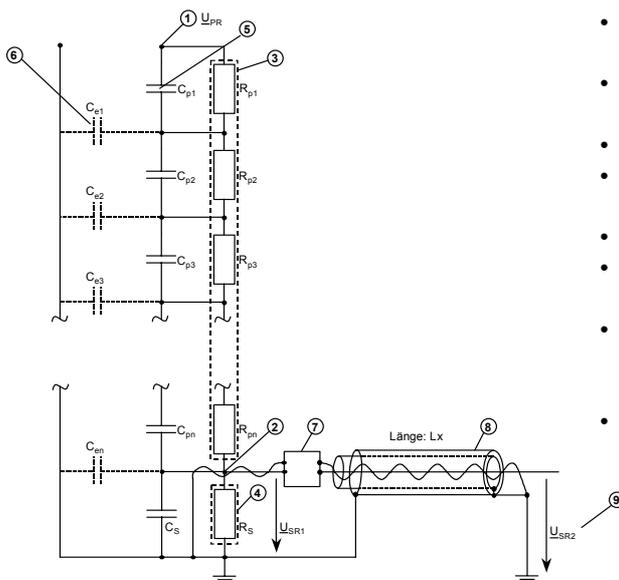
Seite 2

## Vergleich der Technologie von Spannungswandlern

Nr.	Technologie	Magnetischer Spannungswandler	Kapazitiver Spannungswandler	C-Spannungswandler	Kompensierter R- oder RC-Spannungswandler
1	<b>Eigenschaften</b> Stationäre Genauigkeit	(++) sehr gut	(+) gut	(+) gut	(++) sehr gut
2	Entladung von Hochspannungs-Leitungen und Sammelschienen	(++) ja	(-) nein	(-) nein	(+) ja; mit grosser Zeitkonstante
3	Ferroresonanz mit der Anlage oder Eigenschwingung	(-) ja	(-) ja	(++) nein; es können keine Ferroresonanz-Schwingungen auftreten	(++) nein; es können keine Ferroresonanz-Schwingungen auftreten
4	Transientes Verhalten	(-) 10 Hz...1 kHz genügend für langsamere Schutzfunktionen	(-) 45 (55) Hz...55 (65) Hz zusätzliche Dämpfung oder Relais-Korrektur notwendig	(+) 20 Hz...2 MHz genügend für die üblichen Schutzfunktionen	(++) sehr gut 0 Hz...2 MHz
5	Kurzschluss auf der Sekundärseite	(-) Sicherungen notwendig, um Schaden zu vermeiden	(-) Sicherungen notwendig, um Schaden zu vermeiden	(++) kann ohne Schaden für lange Perioden kurzgeschlossen werden	(++) kann ohne Schaden für lange Perioden kurzgeschlossen werden
6	Dielektrisches Verhalten gegen Stoss-Überspannungen	(+) äussere Spannungsverteilung muss durch Steuerung erzwungen werden. Stossfeste Lagen-Wicklungen erfordert hohen Engineeringaufwand	(++) lineare interne und externe Spannungsverteilung. Externe Spannungsverteilung ist durch die innere Spannungsverteilung gegeben	(++) lineare interne und externe Spannungsverteilung. Externe Spannungsverteilung ist durch die innere Spannungsverteilung gegeben.	(++) lineare interne und externe Spannungsverteilung. Externe Spannungsverteilung ist durch die innere Spannungsverteilung gegeben.
7	Bürden-Bereich	(++) Bürde muss innerhalb Spezifizierung liegen	(-) Ferroresonanz-Dämpfung steigt mit Bürde	(-) Übersetzung und Winkel ändern sich mit Bürde	(+) kann leicht angepasst werden

Beurteilung: (-) ungenügend, (-) teils genügend, (+) gut, (++) sehr gut

## Ersatzschaltbild eines Hochspannungs-RC-Spannungswandlers



- Hochspannungsanschluss für die Primärspannung  $U_{PR}$
- Sekundärspannungsanschluss für die Sekundärspannung  $U_{SR1}$
- Primärwiderstände
- Sekundärwiderstand  $R_S$  und Sekundärkondensator  $C_S$
- Parallelkondensatoren
- Streukapazitäten  $C_{e1} \dots C_{en}$  zwischen Teiler und Erde
- Korrektornetzwerk für Amplitude und Phase doppelt abgeschirmtes Kabel mit verdrilltem Innenleiter; Länge  $L_x$
- Ausgangsspannung  $U_{SR2}$



Trench Transmisson Technology

## Aktivteil des RC-Spannungswandlers



Teilansicht

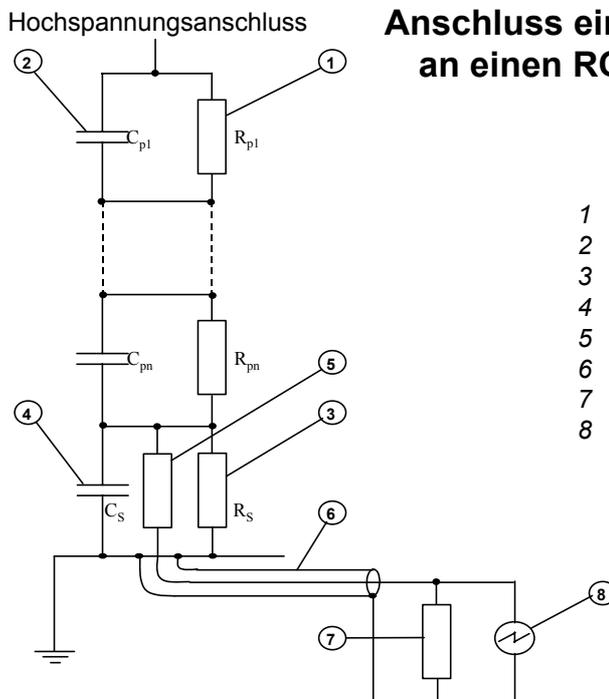
09.10.2003

Seite 5



Trench Transmisson Technology

## Anschluss eines 50 $\Omega$ -Koaxialkabels an einen RC-Spannungswandler



- 1  $R_P$  Widerstand Primärteiler
- 2  $C_P$  Kondensator Primärteiler
- 3  $R_S$  Widerstand Sekundärteiler
- 4  $C_S$  Kondensator Sekundärteiler
- 5 50  $\Omega$  Serienwiderstand für Koaxialkabel
- 6 50  $\Omega$  Koaxialkabel
- 7 1 M $\Omega$  Eingangswiderstand Oszilloskop
- 8 Oszilloskop

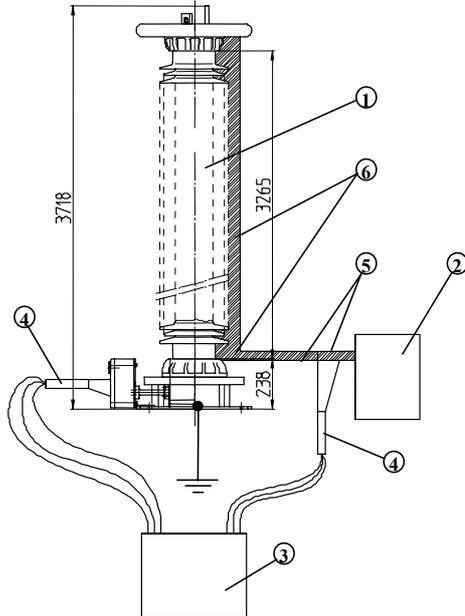
09.10.2003

Seite 6



Trench Transmisson Technology

### Frequenzgangmessung – schematische Darstellung



- 1 RC-Spannungswandler 420 kV
- 2 Frequenzgenerator
- 3 Oszilloskop, Fa. Tektronix, Typ TDS 3054B, [13]
- 4 HF-Proben 10:1
- 5 Cu-Bandleiter 0,5 mm · 20 mm
- 6 Fläche klein halten!

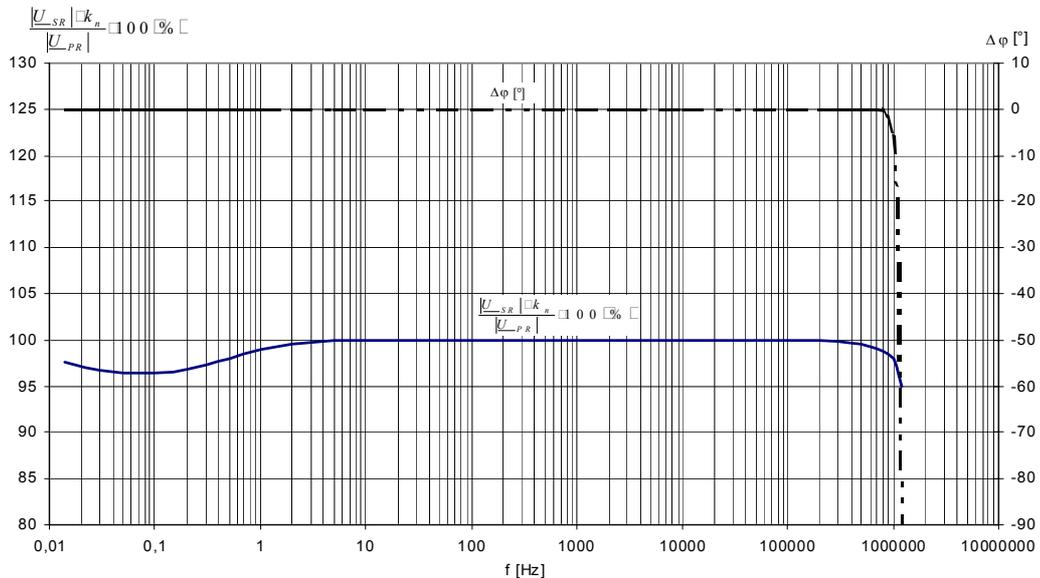
09.10.2003

Seite 7



Trench Transmisson Technology

### Frequenzgang eines 420 kV RC-Spannungswandlers



Nennübersetzungsverhältnis  $K_n = 3600$   
 Phasenverschiebung  $\Delta\varphi = \varphi_P - \varphi_S$   
 Primäre Nennspannung  $\underline{U}_{PR}$   
 Sekundäre Nennspannung  $\underline{U}_{SR}$

09.10.2003

Seite 8



Trench Transmisson Technology

### Elektrische Daten des 420 kV RC-Spannungswandlers in der Station " Singlewell " (NGC)

- Höchste Spannung für den RC-Spannungswandler  $U_m = 420 \text{ kV}_{\text{eff}}$
- Primäre Nennspannung  $U_{PR} = 396/\sqrt{3} \text{ kV}_{\text{eff}}$
- Nennübersetzungsverhältnis  $K_n = 3600$
- Prüfwechselspannung  $U_p = 630 \text{ kV}_{\text{eff}}, 1 \text{ Min.}$
- Blitz-Impulshaltespannung  $U_{BIL} = 1425 \text{ kV}_p; 1,2/50\mu\text{s}$
- Schalt-Impulshaltespannung  $U_{SIL} = 1050 \text{ kV}_p; 250/2500\mu\text{s}$
- Sekundäre Nennspannung  $U_{SR} = 110/\sqrt{3} \text{ V}$
- Teilentladungslevel
  - a) bei  $1,2 U_m/\sqrt{3} \text{ kV}_{\text{eff}}$   $< 5 \text{ pC}$
  - b) bei  $1,2 U_m \text{ kV}_{\text{eff}}$   $< 10 \text{ pC}$
- Mechanische Kräfte  $3150 \text{ N (horizontal)}$   
 $3150 \text{ N (vertikal)}$

09.10.2003

Seite 9



Trench Transmisson Technology

### Anwendung der 420 kV RC-Spannungswandler in der Station "Singlewell" (NGC)

- An die RC-Spannungswandler sind multifunktionale 3-Phasenmessgeräte (Diagnose, Schutz und Messung etc.) ION 7500/ION 7600 des Herstellers Power Measurement angeschlossen, die der DIN EN 50160 entsprechen  
Die Hauptfunktionen der Messungen sind:
  - Energy Metering
  - Harmonische bis zur 63. Oberwelle (127. Oberwelle mit ION-Enterprise Software)
  - Power Quality Monitoring
  - Spannung, Strom und Frequenz
- Die 3-Phasenmessgeräte besitzen für das Spannungssignal einen Eingangswiderstand von  $5 \text{ M}\Omega$  und sind direkt an den Sekundärabgriff mit der Sekundärspannung  $U_{SR}$  nach IEC 60044-7 angeschlossen.
- Das Interface für die Strommessung ist an alle Stromquellen nach IEC 60044-1 und IEC 60044-8 anpassbar

09.10.2003

Seite 10



Trench Transmisson Technology

## Die Daten der ausgelieferten RC-Spannungswandler RCVT 420 kV für Tennet (NL)

Anwendung: Schutz- und Messsystem für Kondensatoren-Bank

- Höchste Spannung für den RC-Spannungswandler  $U_m = 420 \text{ kV}$
- Primäre Nennspannung  $U_{PR} = 380 \text{ kV}/\sqrt{3}$
- Nennübersetzungsverhältnis  $k_n = 3800$
- Nennspannungsfaktor  $k_u = 1.2/\text{cont.}, 1.5/30 \text{ Sek.}$
- Nennwechselprüfspannung  $U_P = 630 \text{ kV} / 1 \text{ Min.}$
- Nennblitzstossspannung  $U_{BIL} = 1425 \text{ kV}_p; 1.2/50 \mu\text{s}$
- Nennschaltstossspannung  $U_{SIL} = 1050 \text{ kV}_p; 250/2500 \mu\text{s}$
- Nennsekundärspannung  $U_{SR} = 100 \text{ V}/\sqrt{3}$
- Sekundärseitige Prüfspannung  $U_{PS} = 4 \text{ kV}_{\text{eff}}/1 \text{ Min.}$
- Teilentladung
  - a) bei  $1.2 U_m / \sqrt{3} \text{ kV}_{\text{eff}}$   $< 5 \text{ pC}$
  - b) bei  $1.2 U_m \text{ kV}_{\text{eff}}$   $< 10 \text{ pC}$
- Nachprüfung der Löschspannung  $> 440 \text{ kV}$

09.10.2003

Seite 11



Trench Transmisson Technology

## Angaben zur Ausführung der RC-Spannungswandler RCVT 420 kV für Tennet (NL)

Anwendung: Schutz- und Messsystem für Kondensatoren-Bank

Anzahl der RC-Spannungswandler: 21

- Bürden**                      **Kabellänge:**                      **→ 50m (186 pF/m)**  
    **Bürdenwiderstand:**                      **→ 100 kΩ // 1 MΩ**

### Genauigkeitsklassen:

- Klasse 0.2 (Betragfehler  $\pm 0.2 \%$ ; Fehlwinkel  $\pm 10$  Minuten) bei 50 Hz
- Der Betragfehler soll zwischen 10 Hz und 3000 Hz nicht mehr als  $\pm 1\%$  abweichen
- Klasse 3P

Klasse	$U_p / U_{pn}$							
	2 %		5 %		100 %		150 %	
	$\epsilon_u$ $\pm \%$	$\varphi_{uv}$ $\pm \text{Min.}$						
3P	6	240	3	120	3	120	3	120

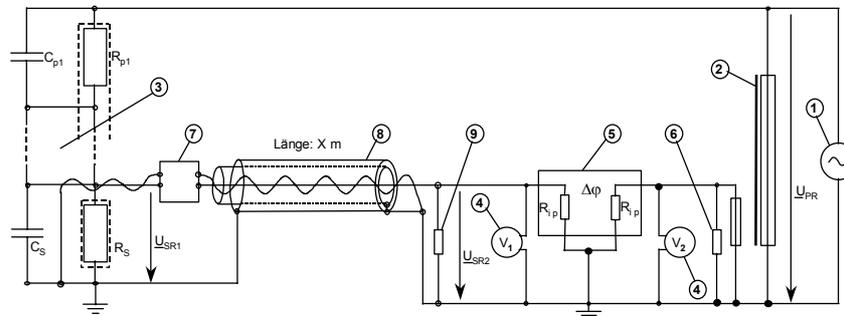
09.10.2003

Seite 12



## Trench Transmisson Technology

## Kalibrierschaltung für RC-Spannungswandler



- |  |   |
|--|---|
| 1 Hochspannungsquelle, -prüftransformator  | 6 Bürde für induktive Messwandler           |
| 2 Geeichter Messwandler  | 7 Korrektornetzwerk für Amplitude und Phase |
| 3 RC-Spannungswandler  | 8 Verbindungskabel                          |
| 4 Digitales Spannungsmessgerät, Fa. Agilent, Typ 34401A, [14]; Innenwiderstand $R_i = 1 \text{ M}\Omega$   | • Bürde des Anwenders                       |
| 5 Präzisions-Phasenmessgerät, Fa. Krohn-Hite, Typ 6620, [15]; Innenwiderstand $R_{iP} = 1 \text{ M}\Omega$ |   |

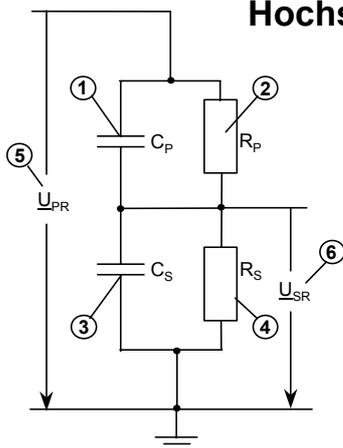
09.10.2003

Seite 13



## Trench Transmisson Technology

## Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Hochspannungs-RC-Spannungswandlers



$$\frac{U_{SR}}{U_{PR}} = \frac{R_S}{R_S + R_P} \frac{1 + R_P j\omega C_S}{1 + R_P j\omega C_P} = \frac{C_P}{C_P + C_S} \frac{1 + 1/j\omega C_S R_S}{1 + 1/j\omega C_P R_P}$$

Aus den Gleichungen folgt, dass für die Frequenzunabhängigkeit von  $\frac{U_{SR}}{U_{PR}}$

Folgende Bedingung besteht:  $R_P C_P = R_S C_S$ .

Weiterhin gilt:

• für  $\omega \ll 1$ :  $\frac{U_{SR}}{U_{PR}} \approx \frac{R_S}{R_P + R_S}$

b) für  $\omega \gg 1$ :

$$\frac{U_{SR}}{U_{PR}} \approx \frac{C_P}{C_P + C_S}$$

- |                             |
|-----------------------------|
| 1 Primärkondensator $C_P$   |
| 2 Primärwiderstand $R_P$    |
| 3 Sekundärkondensator $C_S$ |
| 4 Sekundärwiderstand $R_S$  |
| 5 Primärspannung $U_{PR}$   |
| 6 Sekundärspannung $U_{SR}$ |

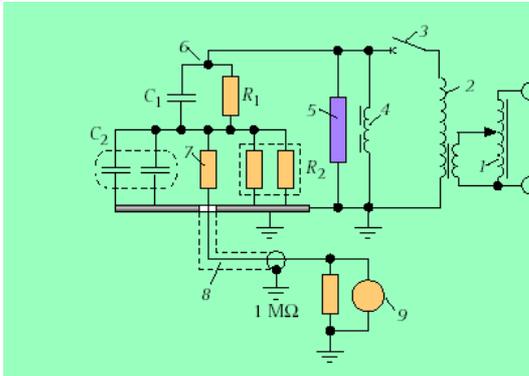
09.10.2003

Seite 14



Trench Transmisson Technology

## Prüfschaltung für Schaltbeanspruchungen



- 1 Stelltransformator
- 2 Hochspannungstransformator
- 3 Leistungsschalter 36 kV  
 $I_n = 250 \text{ A}$ ,  $I_{sc} = 16 \text{ kA}$   
Typ: 3AF-3722-4
- 4 Hochspannungsinduktivität, einstellbar
- 5 Prüfobjekt: Flanschspannungs-Sensor für  
gasisolierte Mittelspannungsanlagen
- 6 RC-Teiler mit koaxialem Sekundär-  
anschluss
- 7 Massewiderstand  $75 \Omega$
- 8 Koaxialkabel  $75 \Omega$
- 9 Digitaloszilloskop

09.10.2003

Seite 15



Trench Transmisson Technology

## Teilansicht des Prüfaufbaus



### Rechts:

das Prüfobjekt: Flanschspannungs- Sensor mit SF<sub>6</sub>-  
Luft-Durchführung

### Links:

der RC-Messteiler mit koaxialem Sekundäranschluss

### Oben:

Zuführung der Hochspannung zum RC-Messteiler  
und Prüfdurchführung.

### Unten links:

koaxiale Ausführung des Sekundärteilers

09.10.2003

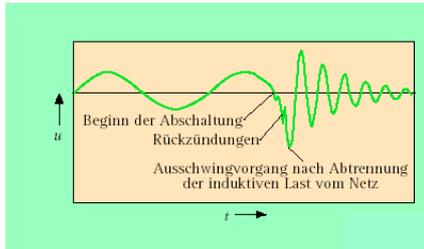
Seite 16



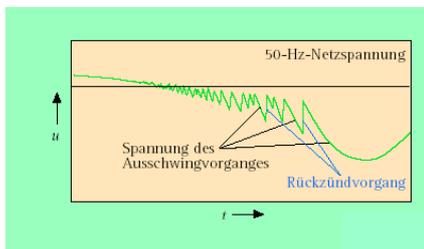
Trench Transmisson Technology

## Oszillogramme beim Schalteröffnen mit Rückzündungen

Schalter: Vakuumschalter



Oszillogramm der Spannung am Prüfobjekt (ohmscher Spannungsteiler) während des Abschaltvorgangs



Oszillogramm der Spannung am Prüfobjekt bei Lasttrennung

09.10.2003

Seite 17



Trench Transmisson Technology

## Dielektrische Standardprüfung der Dickschichtwiderstände

Prüfparameter	Dickschicht-Flachwiderstand	Dickschicht-Rundwiderstand
Nennwert	50 MΩ	35 MΩ
Temperaturbeiwert	$\alpha_1$ (10 Prüflinge) der Temperaturbeiwert $\alpha$ kann je nach Temperaturbereich zwischen $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bis $50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ liegen	$\alpha_1$ (5 Prüflinge) $\alpha_2 = \alpha_1/2$ (5 Prüflinge)
Anzahl der Prüflinge	10	10
Wechselspannung	17,4 kV; 1 min; 50 Hz	11,5 kV; 1 min; 50 Hz
Temperatur	< 88 °C	< 82 °C
Blitz-Stoßspannung	43 kV; Impulsform 1,2/ 50 $\mu\text{s}$	28 kV; Impulsform 1,2 / 50 $\mu\text{s}$
Anzahl der Stöße (je Prüfling)	15 · positiver Impuls 15 · negativer Impuls	15 · positiver Impuls 15 · negativer Impuls

09.10.2003

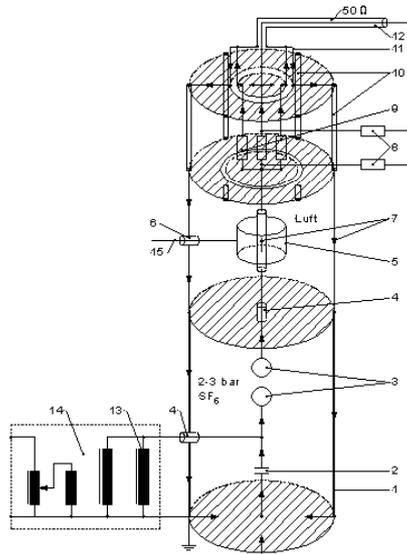
Seite 18



Trench Transmisson Technology

## Lebensdauerprüfung der Dickschichtwiderstände

Stossgenerator zur Erzeugung von bipolaren Impulsen  
mit einer Anstiegzeit von 5 ns bis 10 ns.



- 1 Drucktank
- 2 Niederinduktiver Stosskondensator
- 3 Schaltfunkenstrecke
- 4 Durchführung SF6-Luft
- 5 Pick-up-Elektrode für die Messung der Hochspannung
- 6 Durchführung Luft-Luft
- 7 Strombahnen
- 8 Tastköpfe für die Spannungsmessung
- 9 Prüflinge
- 10 Verbindungsrohre
- 11 Röhrenshunt für die Strommessung
- 12 50-Ω-Koaxialleitung für die Strommessung
- 13 Kompensationsdrosselspule (ca. 200 H)
- 14 Speisung
- 15 Anschluss für Sekundärteiler zur Messung der Hochspannung

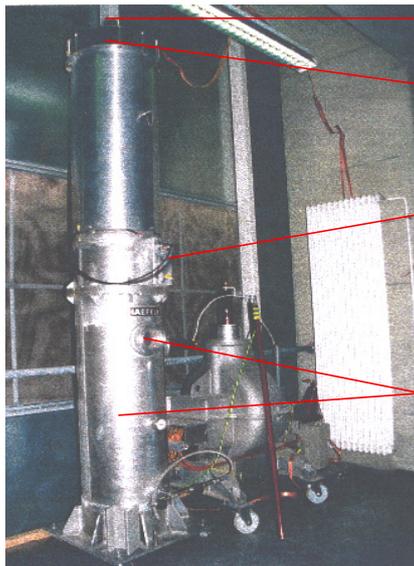
09.10.2003

Seite 19



Trench Transmisson Technology

## Koaxialer Stossgenerator mit Kompensationsdrosselspule (200 H) und Hochspannungstransformator



Röhrenshunt

Zugänglicher Teil für Prüflinge

Zylinderkondensator (Pick-up-Elektrode)  
für die Messung der HochspannungDrucktank mit Stosskondensator und verstellbarer  
Funkenstrecke. Das Fenster ist für das Beobachten  
der Funkenstrecke

09.10.2003

Seite 20



Trench Transmisson Technology

## Ergebnisse der dielektrischen Prüfungen

Typ	Dielektrisches Verhalten	$\Delta R/R$ in % bezogen auf den Widerstandswert vor den Prüfungen
Flachwiderstand	Keine Überschläge längs der Widerstände	$+5 \cdot 10^{-3} \dots -10 \cdot 10^{-3}$
Rundwiderstände	Keine Überschläge längs der Widerstände	5 Prüflinge ( $\alpha_1$ ) Sehr kleine negative Abnahme bei U (Wechselprüfspannung; 1 Min.; 50 Hz) und $\hat{u}$ (Blitz-Stossspannungsprüfwert; 1,2/50 $\mu$ s)  5 Prüflinge ( $\alpha_1 = \alpha_1/2$ ) Abweichungen mit Messmethode nicht erfassbar

09.10.2003

Seite 21



Trench Transmisson Technology

## Prüfergebnis mit üblichen Dickschichtwiderständen

Typ	Anzahl Prüflinge	Daten	Prüfspannung		Ergebnis $\Delta R/R$
			Scheitelwert	Anzahl der Stöße	
Rundwiderstand	5	l = 37 mm; D = 8 mm 35 M $\Omega$ , $\alpha_1$	12 kV	300000	+0,7 ... +0,9 %
	5	l = 52 mm; D = 8 mm 35 M $\Omega$ , $\alpha_2 = \alpha_1/2$	12 kV	300000	+0,9 %
Flachwiderstand	1	l = 75 mm; b = 20 mm 50 M $\Omega$ , $\alpha_1$	38 kV	12000	-7 %
	1	l = 75 mm; b = 20 mm 50 M $\Omega$ , $\alpha_1$	5 kV 26 kV 34 kV 38 kV	60000 20000 12000 10000	-1,6 %

09.10.2003

Seite 22



Trench Transmisson Technology

## Prüfergebnisse der Lebensdauerprüfung mit hochkonstanten Dickschichtwiderständen

Anzahl	Abmessungen	Temperatur-beiwert	Widerstands-wert	$\Delta R/R$
(a) 4	l = 50 mm; b = 20 mm	$\alpha_2 = \alpha_1/2$	25 M $\Omega$	0 % ... -0,015 %
(b) 1	l = 50 mm; b = 20 mm	$\alpha_2 = \alpha_1/2$	25 M $\Omega$	-0,012 %

09.10.2003

Seite 23



Trench Transmisson Technology

## Literatur Zusammenstellung

- [1] IEC 60044-2:2000-11 Instrument transformers – Part 2: Inductive voltage transformers. Genf/Schweiz: Bureau de la Commission Electrotechnique Internationale (zu beziehen über [www.iec-normen.de](http://www.iec-normen.de))
- [2] DIN EN 60044-2 (VDE 0414 Teil 2):1999-12 Messwandler – Teil 2: Induktive Spannungswandler. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [3] IEC/PAS 60044-5:2002-07 Instrument transformers – Part 5: Capacitor voltage transformers. Genf/Schweiz: Bureau de la Commission Electrotechnique Internationale (zu beziehen über [www.iec-normen.de](http://www.iec-normen.de))
- [4] E DIN IEC 38/249/CDV (E VDE 0414 Teil 44-5): 2000-11 Entwurf 60044-5 – Kapazitive Spannungswandler. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [5] IEC 60044-7:1999-12 Instrument transformers – Part 7: Electronic voltage transformers. Genf/Schweiz: Bureau de la Commission Electrotechnique Internationale (zu beziehen über [www.iec-normen.de](http://www.iec-normen.de))
- [6] DIN EN 60044-7 (VDE 0414 Teil 44-7):2000-11 Messwandler – Teil 7: Elektronische Spannungswandler. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [7] Minkner, R.; Schweitzer, E. O.: Low Power Voltage and Current Transducers for Protecting and Measuring Medium and High Voltage Systems. 26th Western Protective Relay Conference (WPRC), 25.10.–28.10.1999, Spokane, Washington/USA. Spokane, Washington/USA: Washington State University – Department of Electrical Engineering, 1999
- [8] [www.iec.ch](http://www.iec.ch)
- [9] IEC 60044-8:2002-07 Instrument transformers – Part 8: Electronic current transformers. Genf/Schweiz: Bureau de la Commission Electrotechnique Internationale (zu beziehen über [www.iec-normen.de](http://www.iec-normen.de))
- [10] Harada, T.; Aoshima, Y.: Development of a High Voltage universal Divider. IEEE Trans. On Power Appar. a. Syst. PAS-95 (1976) H. 2, S. 595–602
- [11] Wagner, K. W.: Operatorenrechnung und Laplacesche Transformation. Leipzig: Joh. Ambrosius Barth, 1950
- [12] Minkner, R.; Schmid, J.: Widerstandstechnologie für Mittelspannungssensoren. etz Elektrotech. + Autom. 121 (2000) H. 17, S. 18–21
- [13] [www.tek.com/de](http://www.tek.com/de)
- [14] [www.agilent.de](http://www.agilent.de)
- [15] [www.krohn-hite.com](http://www.krohn-hite.com)
- [16] [www.ptb.de](http://www.ptb.de)
- [17] Seljeseth, H.; Sæther, E.; Ohnstad, T.; Lien, I.: Voltage Transformer Response. Measuring Harmonics in Norwegian 300 kV and 132 kV Power System. IEEE 8th International Conference on Harmonics and Quality Power (ICHQP), 14.10.1998 in Athen/Griechenland. New-York/USA: IEEE, 1998 (zu beziehen über M.Sc. Helge Seljeseth, Sintef Energy Research, 7465 Trondheim/Norwegen, E-Mail: [helge.seljeseth@sintef.no](mailto:helge.seljeseth@sintef.no))
- [18] Fluri, R.: Frequenzgangmessung an einem 420 kV RC-Spannungswandler. Nicht veröffentlichter Versuchsbericht. Basel/Schweiz: Trench AG, 2001
- [19] Pohl, M.; Schröder, H.: Einfluss der Ausgleichsvorgänge in kapazitiven Spannungswandlern auf den Richtungsentscheid von Distanzschutzgeräten. ETZ-A Elektrotech. Z. 90 (1969) H. 4, S. 84–88
- [20] Hou, D.; Roberts, J.: Capacitive Voltage Transformer: Transient Overreach Concerns and Solutions for Distance Relaying. 22nd Annual Western Protection Relay Conference (WPRC), 24.10.–26.10.1995, Spokane, Washington/USA. Spokane, Washington/USA: Washington State University – Department of Electrical Engineering, 1995
- [21] Benmouyal, G.; Hou, D.; Roberts, J.; Tziouvaras, D.: The Effect of Conventional Instrument Transformer Transients on Numerical Relay Elements. 28th Annual Western Protection Relay Conference (WPRC), 23.10.–25.10.2001, Spokane, Washington/USA. Spokane, Washington/USA: Washington State University – Department of Electrical Engineering, 2001
- [22] [www.nationalgrid.com/uk](http://www.nationalgrid.com/uk)
- [23] [www.trench.de](http://www.trench.de)
- [24] [www.alstom.com](http://www.alstom.com)
- [25] [www.pml.com](http://www.pml.com)
- [26] DIN EN 50160:2000-03 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen. Berlin: Beuth
- [27] IEC 60044-1:1996-12 Instrument transformers – Part 1: Current transformers. Genf/Schweiz: Bureau de la Commission Electrotechnique Internationale (zu beziehen über [www.iec-normen.de](http://www.iec-normen.de))
- [28] DIN EN 60044-1 (VDE 0414 Teil 1):2001-11 Messwandler – Teil 1: Stromwandler. Berlin Offenbach: VDE VERLAG

09.10.2003

Seite 24

## « Kleinsignal-Strom- und Spannungswandler » für Mittelspannung

Joachim Schmid  
Trench Switzerland AG, Basel

### Zusammenfassung

Heutige konventionelle Strom- und Spannungswandler beruhen auf dem induktiven Übertragungsprinzip. Sie stellen den Sekundärgeräten für Schutz, Steuerung und Messung ein Signal zur Verfügung das dem genauen Abbild der Primärsignale entspricht. Die Energie, welche die früher verwendeten Mechanischen Relais benötigen wird durch diese Wandler ebenfalls zur Verfügung gestellt.

Nach Einführung der digitalen Sekundärtechnik wird diese Energie nicht mehr benötigt und die Wandler können für sehr viel geringere Bürden ausgelegt werden. Dies war auch der Ausgangspunkt von anderen Technologien für die Übertragung der Primärsignale. Dieser Beitrag befasst sich mit den dabei entwickelten Kleinsignalwandlern oder Low Power Instrument Transformer kurz LOPO genant.

Die neu entwickelte Kleinsignalwandler geben nur kleine Leistungen ab und sind ohne Zwischenwandlung an die digitale Welt der modernen Sekundärgeräte angeschlossen. Die Anforderungen, insbesondere an die Schnittstellen der Kleinsignalwandler sind in den neuen Normen IEC 60044 Teil 7 und Teil 8 zusammengestellt.

Die vorgestellten Kleinsignalwandler haben mehrere Vorteile gegenüber der heutigen konventionellen Technik. Neben den technischen Vorteilen haben sie ökonomische Vorteile, Anwendungsvorteile und infolge der dramatisch Reduzierung der unterschiedlichen Typen Vorteile in der Logistik des Schaltanlagenherstellers und des Anwenders.

Der Kleinsignalstromwandler basiert auf einer Sekundärwicklung auf einem optimierten Eisenkern, welche durch einen präzisen Shuntwiderstand kurzgeschlossen ist. Die Spannung über diesen Widerstand gibt ein genaues Abbild des Primärsignals. Diese Kleinsignalwandler sind linear bis zum Kurzschlussstrom und ein einziger Wandler kann für alle Schutz- und Messaufgaben verwendet werden.

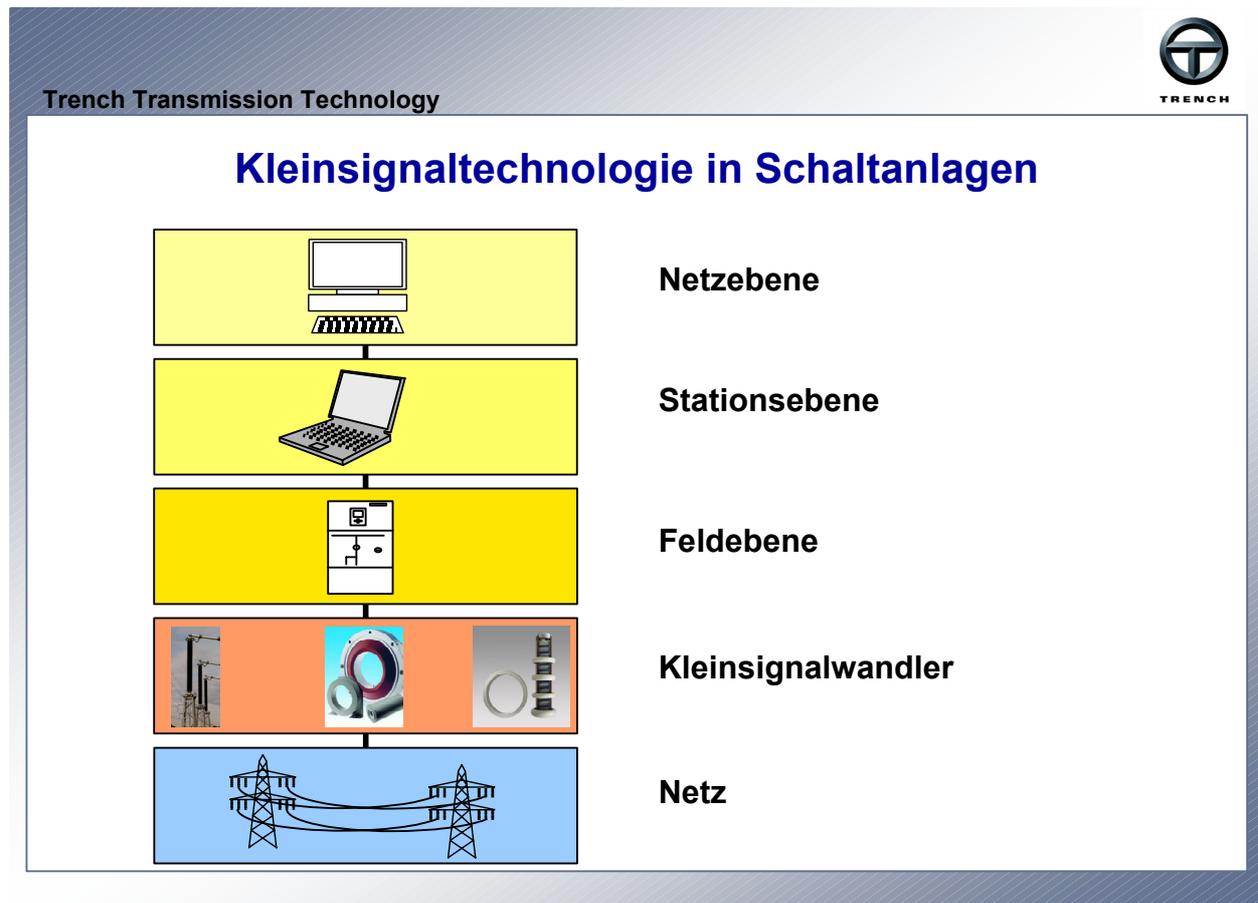
Der Kleinsignalspannungswandler basiert auf einem kompensierten Widerstandsteiler. Seine Sekundärspannung von wenigen Volt kann direkt an den A/D Umsetzer in den modernen Sekundärgeräten angeschlossen werden. Er kann für alle Mess- und Schutzaufgaben eingesetzt werden. Da er keinen Eisenkern besitzt besteht auch keine Möglichkeit von Ferro-Resonanzen.

Details des Designs und der Prinzipien werden in dem vorliegenden Beitrag erläutert, ebenso wie die Merkmale dieser neu entwickelten Kleinsignalwandler. Erfahrungen im Einsatz dieser Wandler in Mittelspannungsanlagen werden vorgestellt.

Die Messung der Genauigkeit benötigt durch die neu definierten Schnittstellen der Kleinsignalwandler abgeänderte Messaufbauten, welche ebenfalls kurz erläutert werden.

**Referenzen:**

- [1] IEC 60044-7: 12-1999 Instrument Transformers – Part 7: Electronic voltage transformers
- [2] IEC 60044-8: 07-2000 Instrument Transformers – Part 8: Electronic current transformers
- [3] Minkner, R.; Schmid, J.: Koaxiale Spannungssensoren in gasisolierten Mittelspannungsanlagen. Etz Elektrotech. + Automation. 119 (1999) H 19, S. 62 – 64
- [4] Herrmann, H-J.; Müller, A.; Schmid, J.: Optimierter Anlagenbetrieb in der Mittelspannung durch Kleinsignalwandler mit integrierten Schutz und Steuergeräten. IEE Conference Amsterdam, April 2001
- [5] Büscher, A.: Vom Sensor zur Schaltanlagenleittechnik. EVU Betriebspraxis 41 (2002) H 6, S 6-12





Trench Transmission Technology

## Vorteile von Kleinsignalwandler

- **Technische Vorteile**
  - grosser Messbereich
  - keine Probleme mit Sekundäranschlüssen
  - keine Ferro-Resonanzen
- **Ökonomische Vorteile**
  - niedrige Kosten der Kleinsignalwandler
  - einfache Montage wegen geringem Gewicht und Grösse
  - Ein Kleinsignalwandler für Mess- und Schutzzwecke
- **Anwendungsvorteile**
  - Wartungsfrei
  - kein Abhängen bei Kabel- oder Anlagenprüfungen
  - weniger Bauteile
- **Logistische Vorteile**
  - minimierte Anzahl verschiedener Typen
  - kleine Abmessungen und geringes Gewicht
  - vereinfachte Lagerhaltung



Trench Transmission Technology

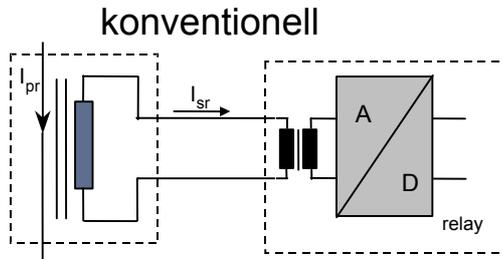
## IEC Normen für Wandler IEC 60044

IEC 60044-1	Current transformers (1996) (replacement of IEC 185)
IEC 60044-2	Voltage transformers (1997) (replacement of IEC 186)
IEC 60044-3	Combined transformers (1980)
IEC 60044-4	Measurement of partial discharge (1980)
IEC 60044-5	Capacitive voltage transformers (PAS)
IEC 60044-6	Requirement for protective current transformers for transient performance (1992)
<b>IEC 60044-7</b>	<b>Electronic voltage transformers (1999)</b>
<b>IEC 60044-8</b>	<b>Electronic current transformers (2002)</b>

Trench Transmission Technology



## Stromwandlerprinzip

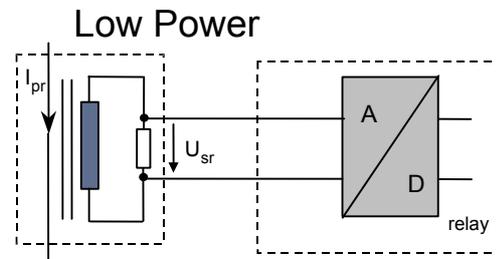


IEC 60044-1:

$$I_s(t) = N_1/N_2 i_p(t)$$

$$I_{sr} = 1 \text{ A or } 5 \text{ A}$$

$$\text{Bürde: } 5 - 60 \text{ VA}$$



IEC 60044-8:

$$u_s(t) = R_{sh} N_1/N_2 i_p(t)$$

$$U_{sr} = 22.5 \text{ mV or } 225 \text{ mV}$$

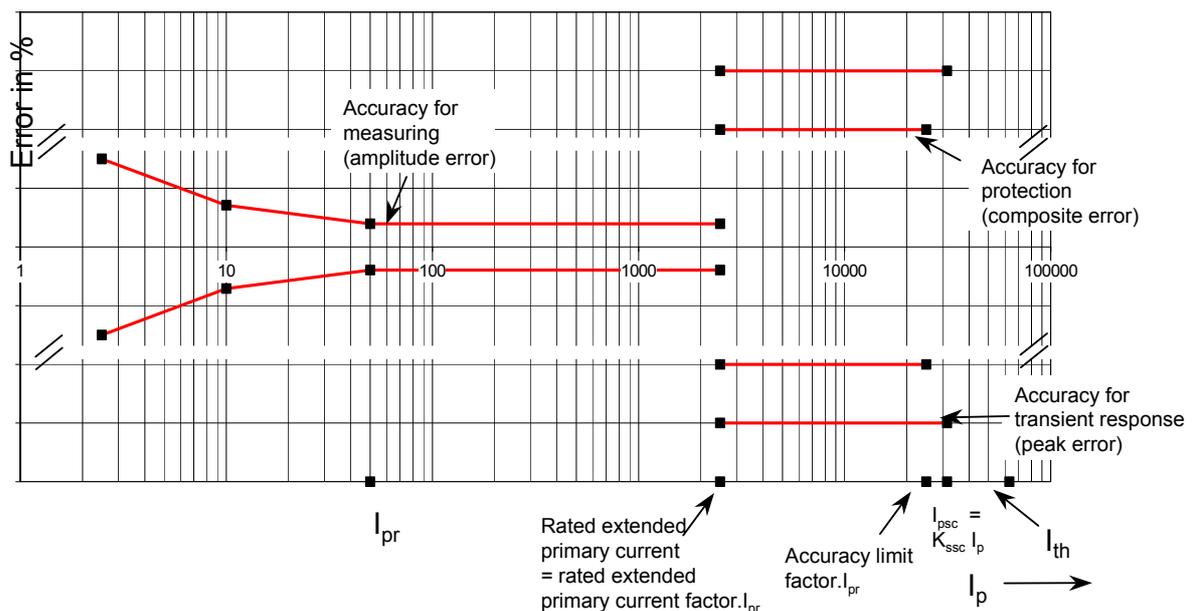
$$\text{Bürde: } 20 \text{ k}\Omega \text{ or } 2 \text{ M}\Omega$$

Trench Transmission Technology



## Genauigkeitsgrenzen der Mehrbereichswandler

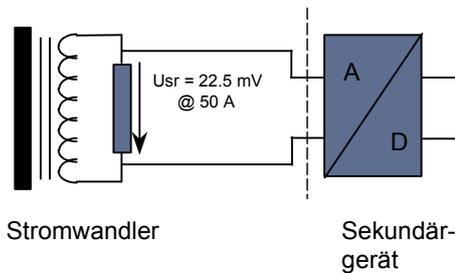
IEC 60044-8 Annex E





Trench Transmission Technology

## Kleinsignalstromwandler LOPO® Serie LPCT



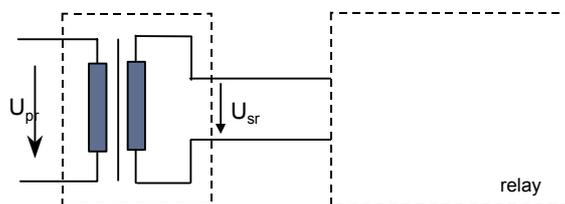
- ✓ Einsetzbar für einen grossen Primärstrombereich
- ✓ Beruht auf einem Eisenkernstromwandler mit integriertem Shunt welcher einen Spannungsausgang liefert
- ✓ Ein Kern für alle Mess- und Schutzaufgaben kann mehrerer konventionelle Kerne ersetzen
- ✓ Kleineres Gewicht und geringerer Platzbedarf
- ✓ Gemäss IEC 60044-1, 60044-6 und 60044-8



Trench Transmission Technology

## Spannungswandlerprinzip

konventionell



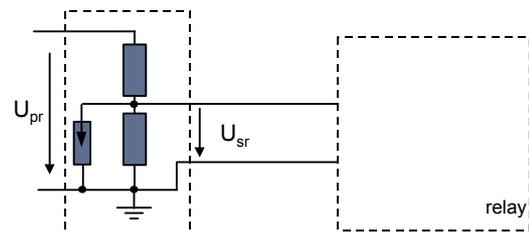
IEC 60044-2:

$$u_s(t) = N_2/N_1 u_p(t)$$

$$U_{sr} = 100/\sqrt{3} \text{ V}$$

Bürde: 30 – 200 VA

Low Power



IEC 60044-7:

$$u_s(t) = k u_p(t)$$

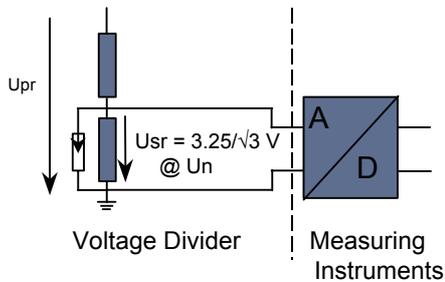
$$U_{sr} = 3.25\sqrt{3} \text{ V}$$

Bürde: > 200 kΩ



Trench Transmission Technology

## Kleinsignalspannungswandler LOPO® Serie LPVT

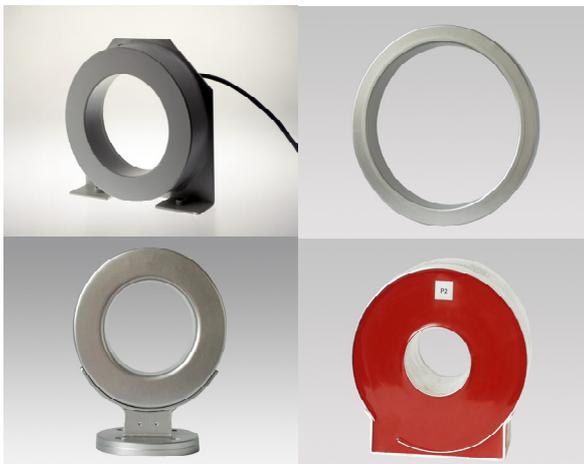


- ✓ **Einsetzbar für Betriebsspannungen 7,2 to 36 (40.5) kV (ph. to ph.)**
- ✓ **Beruhrt auf einem ohmschen Teiler für alle Mess- und Schutzaufgaben**
- ✓ **Kleineres Gewicht und geringerer Platzbedarf**
- ✓ **Kann während Kabel- und Anlagenprüfungen angeschlossen bleiben**
- ✓ **Keine Kippschwingungen möglich**
- ✓ **Gemäss IEC 60044-2 and 60044-7**



Trench Transmission Technology

## Kleinsignalwandler LOPO® für Mittelspannungsanlagen



LOPO Stromwandler

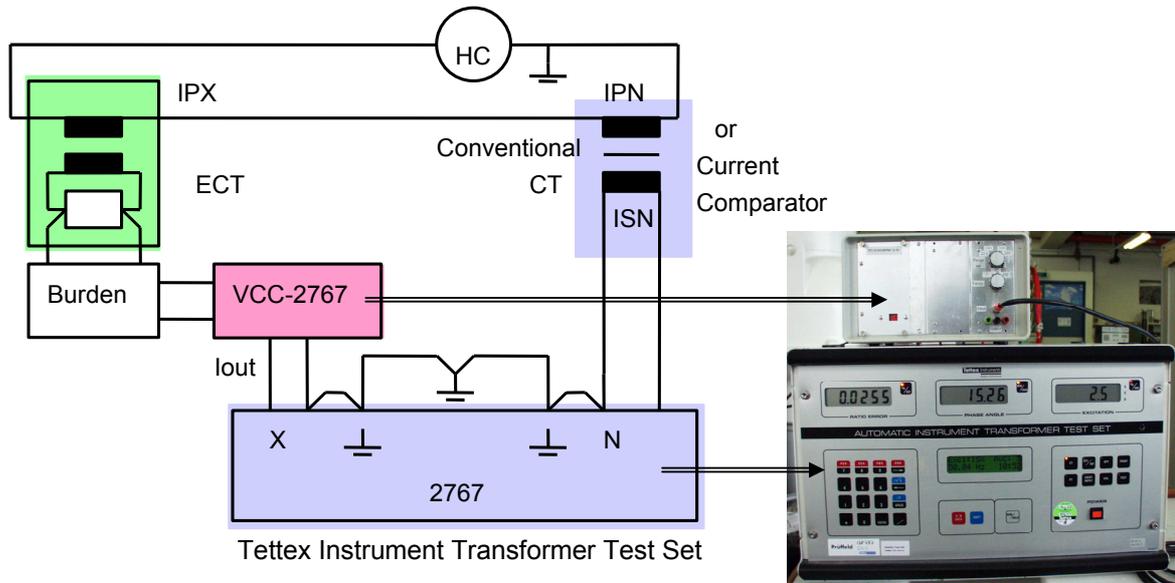


LOPO Spannungswandler



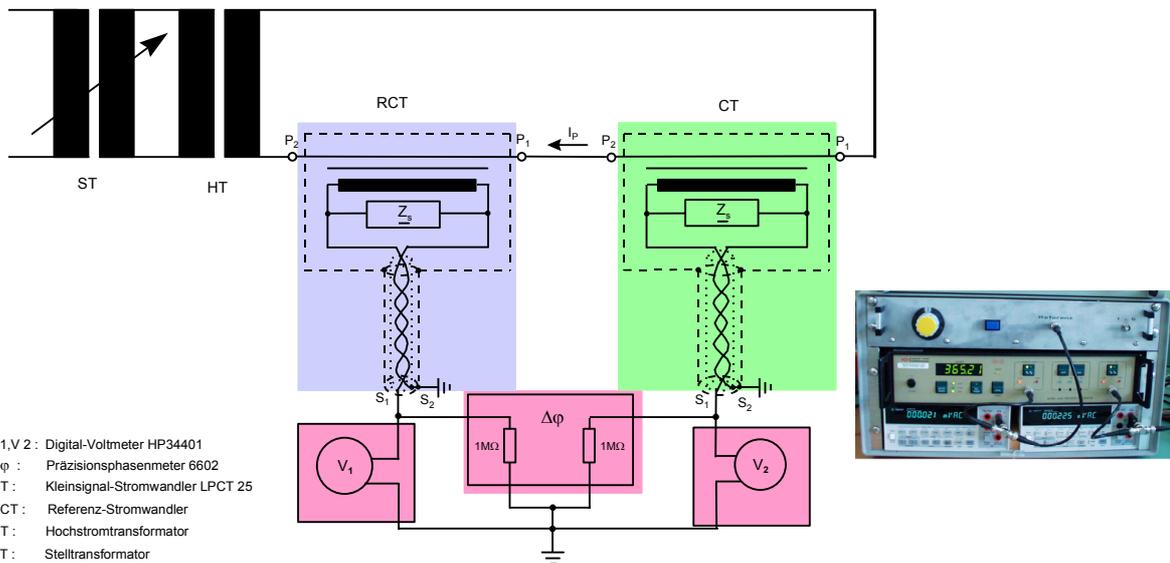
Trench Transmission Technology

## Genauigkeitsmessungen am Stromwandler Brückenmethode



Trench Transmission Technology

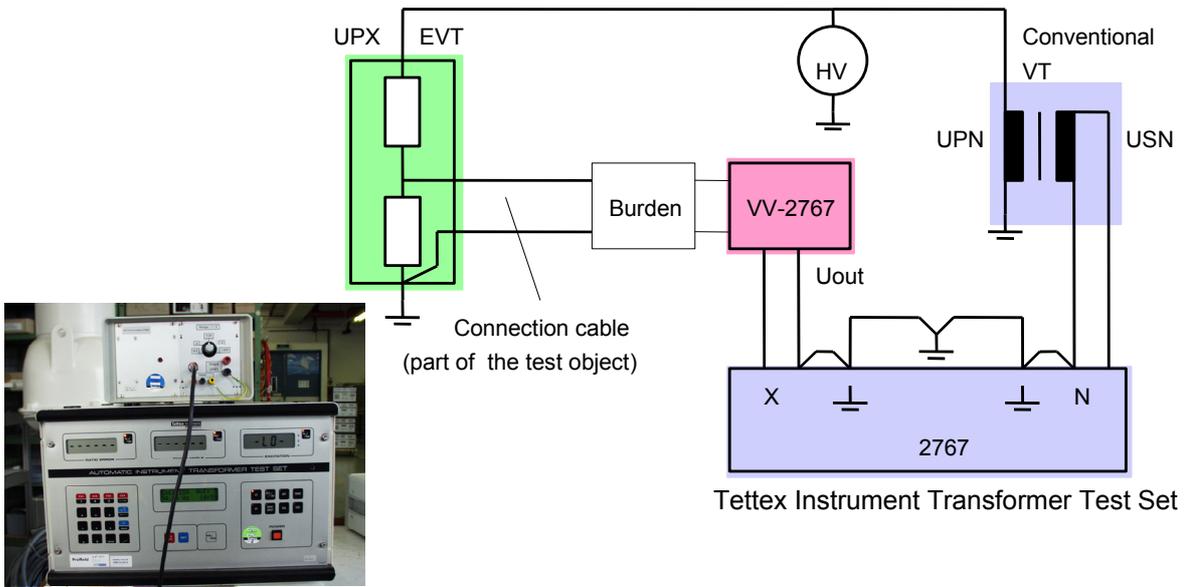
## Genauigkeitsmessungen am Stromwandler Vergleichsmethode





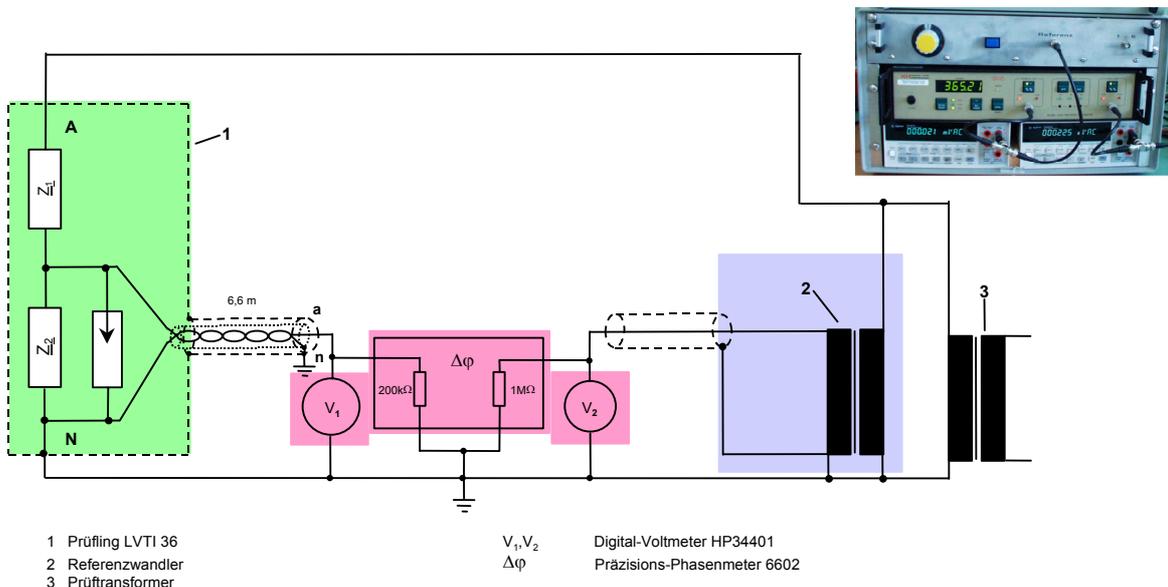
Trench Transmission Technology

## Genauigkeitsmessungen am Spannungswandler Brückenmethode



Trench Transmission Technology

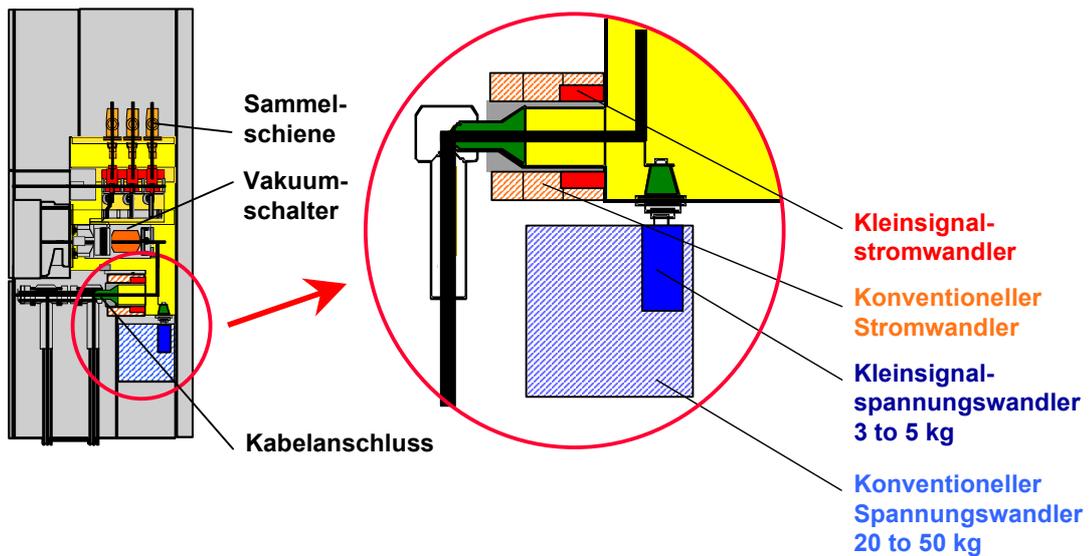
## Genauigkeitsmessungen am Spannungswandler Vergleichsmethode





Trench Transmission Technology

### Integration in MV Schaltanlagen



Trench Transmission Technology

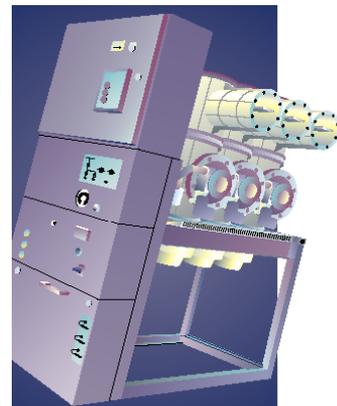
### Maputo Harbour, June 1999

Siemens Anlage 8DA10, 36 kV

12 Spannungswandler  
LPVT-G



UCON/O  
Verstärker



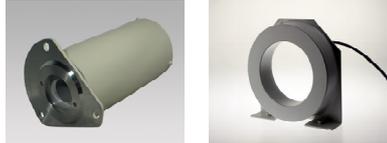


Trench Transmission Technology

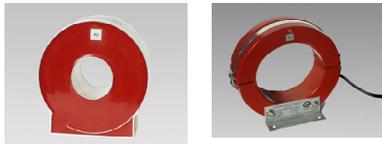
## Laubag, July 2001

### Siemens Anlage 8DC11, 24 kV

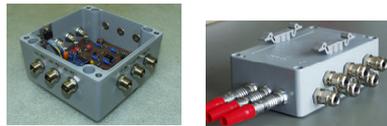
3 Spannungswandler LPVT-A  
15 Stromwandler LPCT-A



33 Stromwandler LPCT-D  
13 Stromwandler LPCT-K



Signalverteilboxen



Trench Transmission Technology



## LOPO in Alstom Switchgear



Spannungswandler  
LPVT-I

Anlagentyp GMA

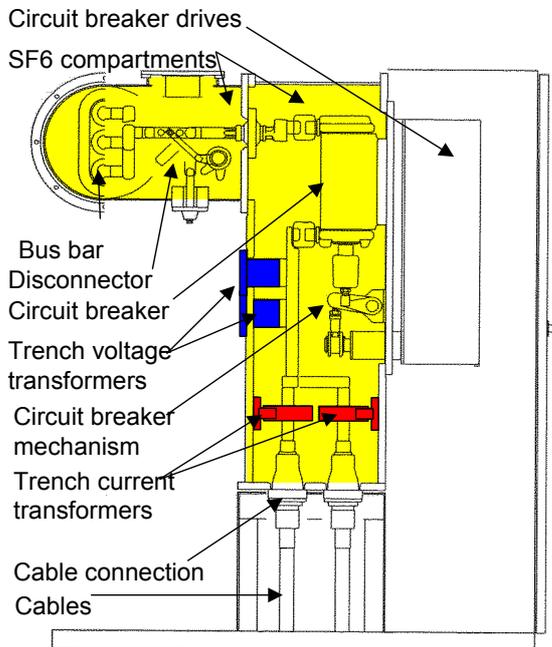


Stromwandler  
LPCT-E





Trench Transmission Technology



Hitachi switchgear 36 kV C-GIS



Trench Transmission Technology

# LOPO für Hitachi Switchgear



Spannungswandler LPVT-P



Stromwandler LPCT-B



# Einsatz konventioneller und nichtkonventioneller Wandler in der Sekundärtechnik

Hans-Joachim Herrmann

Siemens AG, PTD Power Automation, Nürnberg

## Kurzfassung des Vortrages

Die Genauigkeit und das Übertragungsverhalten von Wandlern beeinflussen das Verhalten der Sekundärtechnik. Durch die große Bandbreite hinsichtlich möglicher Nenn- und Kurzschlussströme ergibt sich eine hohe Varianz bei den Stromwandlern. Bei Schutzanwendungen ist insbesondere das dynamische Übertragungsverhalten (Gleichstromglieder bzw. mögliche Wandlersättigung) von Interesse.

Nach einer allgemeinen Einführung zur Gestaltung der Eingangskreise der Sekundärtechnik für die Erfassung von Strom und Spannung werden allgemeine Anforderungen an die Wandler formuliert. In den weiteren Ausführungen wird ausschließlich auf den Stromwandler eingegangen. Resultierend aus dem vollverlagerten Kurzschlussstrom wird die mögliche Wandlersättigung und deren schutztechnische Konsequenzen erläutert. Gleichzeitig wird gezeigt, wie der Schutz mit der Stromwandlersättigung umgeht und welche Anforderungen sich für die Wandlerauslegung ableiten. Neben den üblichen Wandlerdaten (Nennstrom, Genauigkeitsklasse, Leistung, Betriebsüberstromziffer) sind für die Abschätzung die Innenbürde und die Wandlerzeitkonstante von Interesse. Diese Daten sind zusätzlich vom Wandlerhersteller abzufragen. Als schutztechnisches Beispiel für die Stromwandlerauslegung wird der Transformator-differentialschutz ausgewählt.

Der zweite Teil des Vortrages behandelt die Veränderungen der Sekundärtechnik beim Einsatz nichtkonventioneller Wandler. In der Mittelspannung kommen Kleinsignalwandler zum Einsatz. Hierzu wird auf mögliche Lösungen eingegangen. Der „technische Reiz“ liegt insbesondere beim Stromsensor, der sich durch einen weiten Nennstrombereich, einer hohen Genauigkeit und einer großen Stromdynamik (bis hin zum Bemessungsgrenzstrom der Anlage) auszeichnet. Pro Schaltanlagentyp könnte man prinzipiell mit einem Stromwandler alle Anwendungen erfüllen und damit die Wandlervarianz deutlich reduzieren. Der Spannungssensor ist platzsparend, ebenfalls genau und deutlich kostengünstiger als der konventionelle Wandler. Er ist vorteilhaft pro Abgang einzusetzen, wodurch sich das Kostenargument etwas relativiert. Völlig neu ist die Schnittstelle. Sie basiert auf niedrigen Spannungspegeln im mV-Bereich für den Nennstrom und im Voltbereich für die Nennspannung. Im abschließenden Teil erfolgt die Diskussion von Markteintrittsbarrieren.

In der Hochspannung werden ebenfalls Arbeiten an nichtkonventionellen Wandlern durchgeführt. Neben Teilern zur Spannungsmessung und der Rogowskispule zur Stromerfassung werden auch optische Prinzipien (Faradayeffekt für die Strom- und Pockelseffekt für die Spannungsmessung) untersucht. Die Besonderheit der Hochspannungslösungen ist, dass in unmittelbarer Nähe der Sensoren eine

Wandlerelektronik notwendig ist. Demzufolge bietet sich eine serielle Kommunikation zwischen Sensor und Sekundärtechnik an. Es wird die typische Grundstruktur einer Anlagenkonfiguration vorgestellt und gleichzeitig auf noch zu lösende Aufgaben eingegangen. Neben der Wandlerelektronik ist ein Schwerpunkt die Kommunikation. Erste Ansätze bietet hierzu die IEC60044-8 bzw. die IEC61850-9-1 bzw. IEC61850-9-2. Der Vortragsteil wird mit einer Pilotlösung zum Einsatz eines optischen Stromwandlers abgeschlossen.

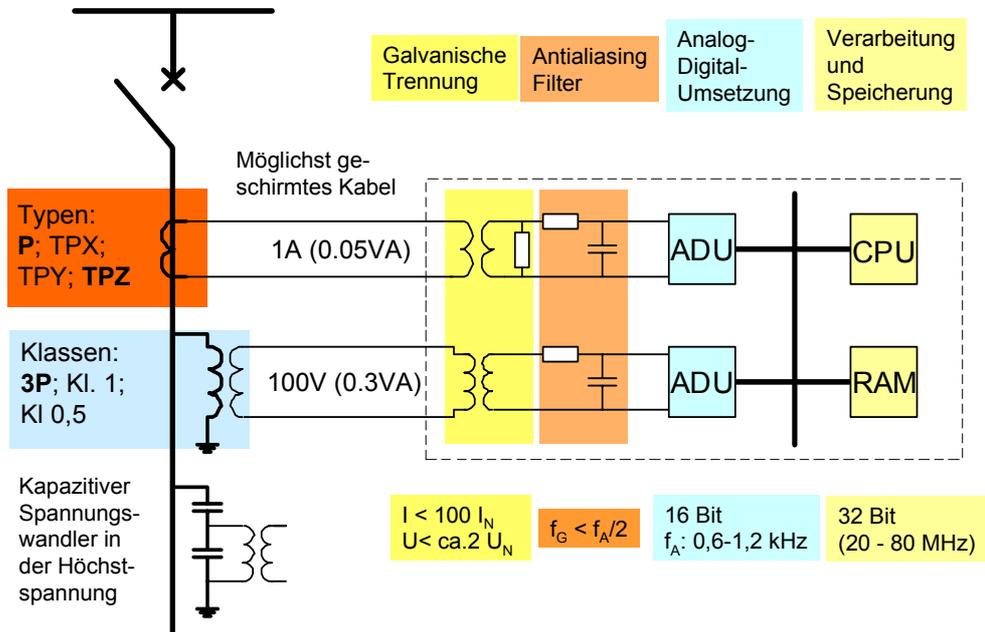


### Vortragsgliederung

- Konventionelle Spannungs- und Stromwandler
  - Spannungs- und Stromwandler aus Sicht des Schutzes
  - Dynamisches Übertragungsverhalten von Stromwandlern
- Kleinsignalwandler in der Mittelspannung
  - Grundidee, Messprinzipien
  - Gerätetechnische Realisierung
  - Reaktion des Marktes
- Nichtkonventionelle Wandler in der Hochspannung
  - Lösungsansätze
  - Serielle Kommunikation - Schnittstellennormung
  - Pilotlösung optischer Stromwandler



## Struktur aus Messwertverarbeitungssicht



SIEMENS

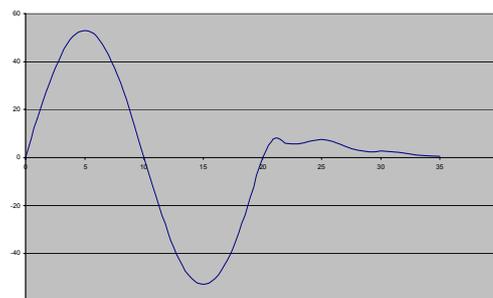
Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 3



## Spannungswandler

Moderne Feldgeräte sind aus Spannungswandlersicht hochohmig. Die Leistungsaufnahme der Geräte ist minimal.

- Induktive Spannungswandler
  - Neben Schutzwandlern (Kl. 3P) erfolgt der Anschluss auch häufig an Messwandler (z.B. Kl. 0,5)
  - Bezüglich des dynamischen Verhaltens gibt es keine Probleme
- Kapazitive Spannungswandler in der Höchstspannung
  - Aufgrund des Ausschwingverhaltens müssen insbesondere beim Distanzschutz messtechnische Maßnahmen ergriffen werden



**Fehler im Spannungsmaximum:**  
Hochfrequente Ausgleichschwingungen (500 Hz - 2000 Hz)  
→ Problemlos beherrschbar

**Fehler im Spannungsnulldurchgang:**  
Niederfrequenter Ausgleichsvorgang (5 Hz - 10 Hz)  
→ Zur Unterdrückung ist ein höherer messtechnischer Aufwand erforderlich

SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 4



## Stromwandler

Moderne Feldgeräte arbeiten nahezu leistungslos. Die angeschlossene Bürde wird durch Zuleitung bestimmt.

- Eingesetzte Typen
  - Stromwandler von Typ P (IEC60044-1) dominieren
  - Bei besonderen Anforderungen werden Linearwandler TPZ (IEC 60044-6) eingesetzt.
  - Bei Neuanlagen werden bevorzugt 1A-Typen eingesetzt, jedoch gibt es auch ein Beharren bei der 5A-Ausführung.
  - Anwenderseitig ist eine gewisse „Standardisierung - Vorzugstypen“ zu beobachten. Das führt teilweise dazu, dass die Schutzgeräte dauernd mit halben Wandlernennstrom betrieben werden.
  - Zunehmend wird auch auf Messfunktionen Wert gelegt → 5P
- Wandlerauswahl
  - Aus den Schutzanwendungen leiten sich Anforderungen an die Betriebsüberstromziffer (Kniepunktspannung) ab.
  - Exakte Berechnungen verlangen zusätzlich die Innenbürde und die Stromwandlerzeitkonstante.

SIEMENS

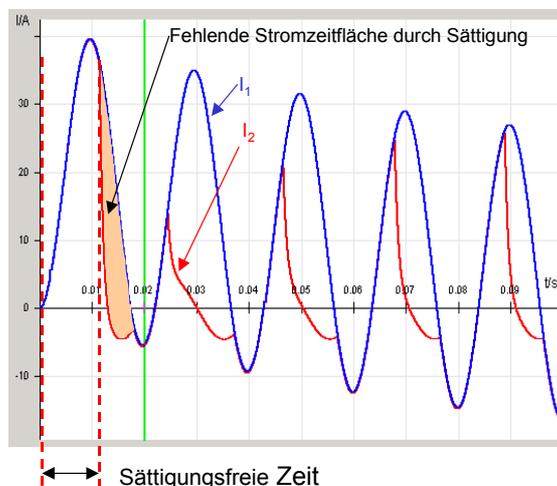
Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 5



## Stromwandlersättigung

Digitale Schutzeinrichtungen beherrschen deutlich besser die Stromwandlersättigung. Sie fordern eine minimale sättigungsfreie Zeit.

Das aperiodische Gleichstromglied führt zu einem zusätzlichen Magnetisierungsstrom und damit zu einer erweiterten Aussteuerung der Magnetisierungskennlinie (bis in den nichtlinearen Bereich).



### Geforderte sättigungsfreie Zeit:

- Sammelschienenschutz  
ca. 3 ms
- Differentialschutz (Leitung, Trafo)  
ca. 5 - 10 ms
- Distanzschutz  
Nahfehler (5 ms)  
Kippgrenze (15- 25 ms)
- Überstromzeitschutz  
ca. 5 ms für die Hochstromstufe

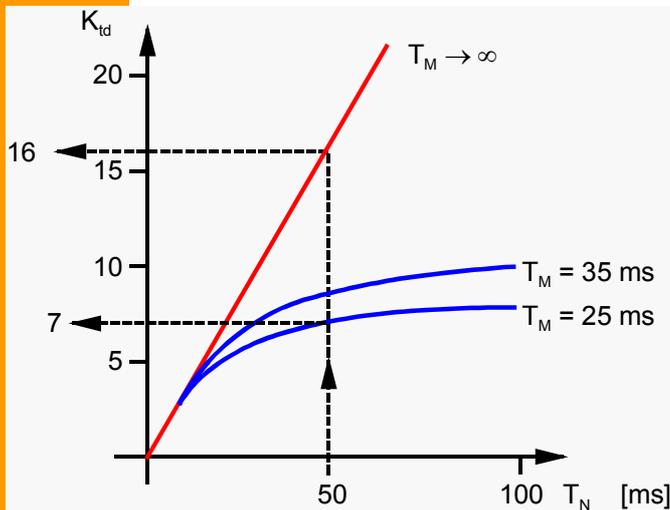
SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 6



## Die sättigungsfreie Zeit erfordert eine Überdimensionierung des Stromwandlers

Berechnung nach IEC 60044-8  
( $K_{td}$  rated transient dimensioning factor,  
**Überdimensionierungsfaktor**)



$$K_{td} = \frac{\omega T_N T_W}{T_N - T_W} \left( e^{-\frac{T_M}{T_N}} - e^{-\frac{T_M}{T_W}} \right) + 1$$

$T_M$  sättigungsfreie Zeit  
 $T_N$  Netzzeitkonstante  
 $T_W$  Wandlerzeitkonstante

Für  $T_W \gg T_N$  gilt:

$$K_{td} = 1 + \omega T_N \left( 1 - e^{-\frac{T_M}{T_N}} \right)$$

Für  $T_M < 10\text{ms}$  kann mit dem „Transient Factor  $K_{tf}$ “ gerechnet werden, da hier der sinusförmige Fluss bestimmend ist.

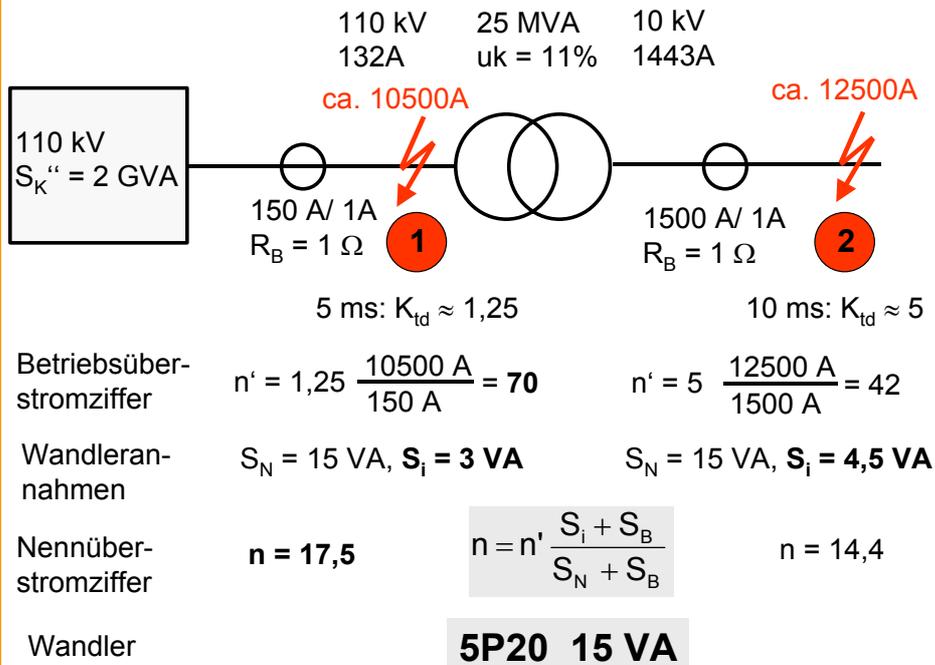
$$K_{tf} = \frac{\omega T_N T_W}{T_N - T_W} \left( e^{-\frac{t}{T_N}} - e^{-\frac{t}{T_W}} \right) - \sin \omega t$$

SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 7



## Stromwandlerauslegung Transformator-differentialschutz



SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 8



## Mittelspannung - Integration von Schutz, Steuerung und Messung in einem Sekundärgerät

### NXPLUS – GIS -Schaltzelle



- Schutz und Steuerung einschließlich Betriebsmessung
- Abzweigsteuerbild wird durch ein Grafikdisplay visualisiert
- Fernsteuerung über serielle Schnittstelle ist eine Standardeigenschaft
- Vor-Ort-Steuerung über spezielle Steuertasten am Gerät
- Messgenauigkeit wird durch die Genauigkeit der Stromwandler bestimmt

#### Anforderung:

Ein Weitbereichstromwandler pro Anlagentyp erfüllt die Schutz- sowie Messanforderungen und reduziert die Wandlervarianz. Per Einstellparameter erfolgt die Anpassung an den Nennstrom.

SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 9

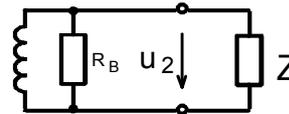


## Leistungsarmer Stromwandler mit einem weiten Arbeitsbereich und hoher Genauigkeit

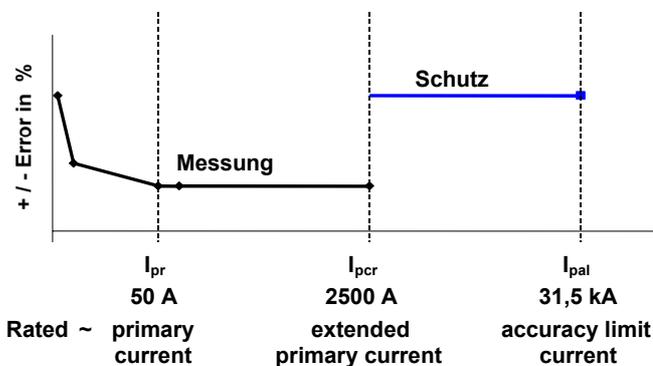
Norm: **IEC 60044-8**



Eisengeschlossener Stromwandler mit integrierter Bürde



Neu:  
Ausgangssignal  
ist eine  
Spannung



Beispiel:

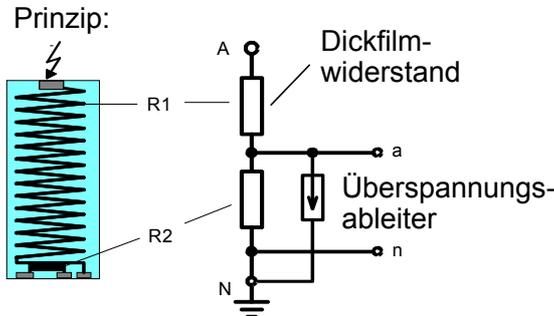
$I_{pr}$  50A  
 $U_{sr}$  22,5 mV  
 $K_{pcr}$  50  
 $Kl.$  0.5  
 $K_{alf}$  630  
 $I_{th}$  31,5 kA

SIEMENS

inn FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 10



Leistungsarmer Spannungssensor erfordert weniger Platz, hat ein geringeres Gewicht und ist preiswert



- Zusätzliche Vorteile:
- keine Ferroresonanz
  - Kein Trennen des Spannungswandlers während der Kabelprüfung
- Unterschiedliches Design ist möglich

IEC 60044-7



Beispiel:

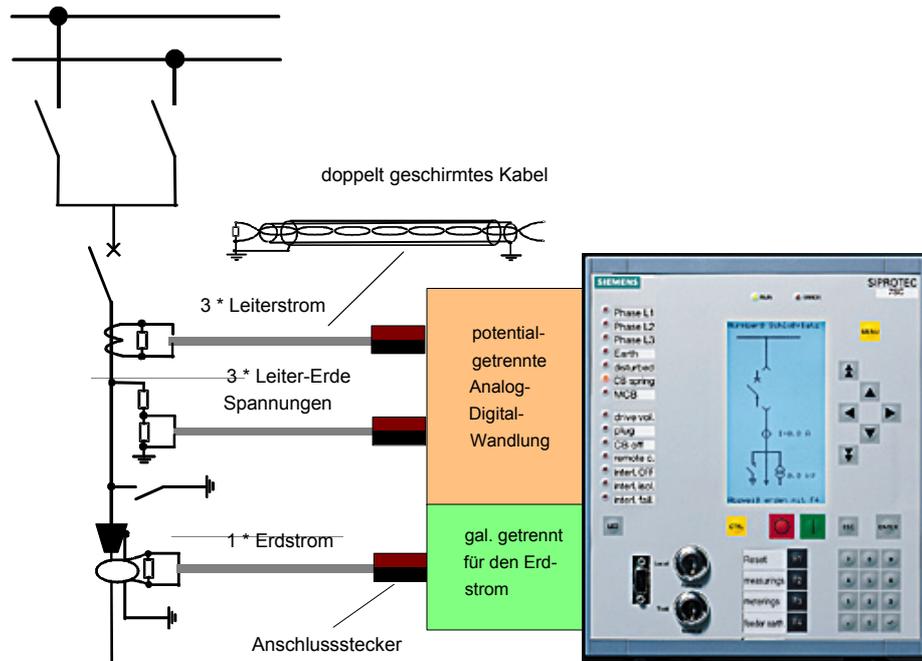
$U_m$	24 kV
$U_{pr}$	20 kV/ $\sqrt{3}$
$U_{sr}$	<b>3.25 V/<math>\sqrt{3}</math></b>
Kl.	0.5 und 3P

SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 11



Prinzipielle Ausführung eines Mittelspannungsabganges mit leistungsarmen Kleinsignalwandlern



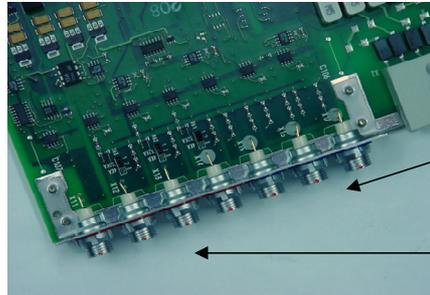
SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 12



## Kleinsignale erfordern eine zuverlässige Verbindungstechnik

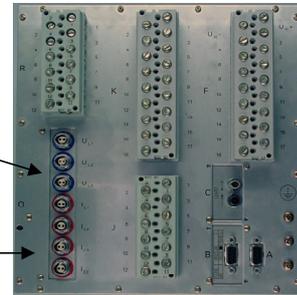
### Leiterplatte mit Kleinsignaleingängen



Spannungen

Ströme

### Geräterückansicht



- Verdrillt und doppelt geschirmtes Kabel
- Keine Klemmen zwischen Stecker und Wandler (direkter Anschluss)
- Isolationsspannung 2,5 kV (wie beim Schaltanlagenstandrad)
- Zuverlässiger Steckverbinder

SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 13



## Wie reagiert der Markt?

- Kostenvorteile ergeben sich, wenn die Funktionen Messen, Steuern und Schützen sowie Betriebszählung Kl. 1 genutzt werden. Das ist das „obere Segment“ des Mittelspannungsmarktes.
- Der Markt reagiert sehr konservativ auf Veränderungen an der Wandlerschnittstelle (z.B. Strom 1A sekundär ist jetzt 22,5 mV - 225 mV, je nach Abgangsnennstrom). Ein hoher Marketingaufwand ist auf Geräteherstellerseite erforderlich.
- Die Verantwortungsbereiche (Schutz, Prüfung Primäranlage, Sekundärgeräte) sind auf Anwenderseite noch konventionell organisiert. Die neue Technik erfordert jedoch eine neue Herangehensweise.



**Die Erwartungen der Gerätehersteller haben sich bisher nicht erfüllt.**

SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 14



## Nichtkonventionelle Wandler in der Hochspannung

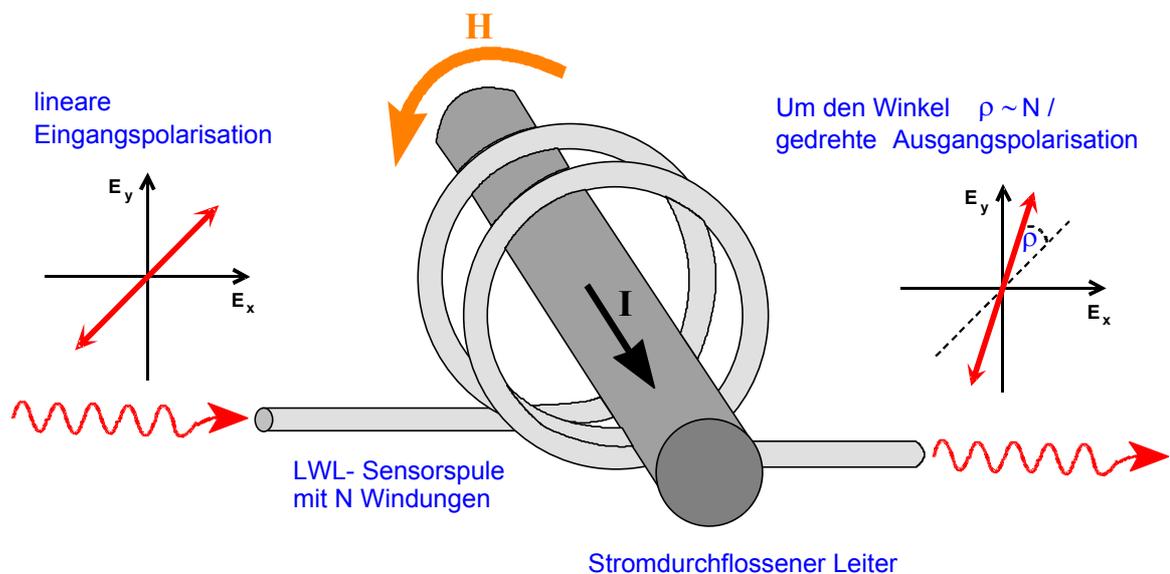
- ❑ Wandler (Sensoren) sind passiv bzw. aktiv ausgeführt und verfügen über eine Wandlerelektronik (Intelligenz)
- ❑ Das Ausgangssignal ist digital (Protokoll z.B IEC 61850-9-1 oder IEC61850-9-2)
- ❑ **Stromwandler**
  - ❑ Shunt mit Wandlerelektronik auf HS-Potential
  - ❑ Induktive Wandler (Rogowskispule, leistungsarme Wandler) mit Elektronik auf Erdpotential
  - ❑ Optische Wandler (Faraday-Effekt)
- ❑ **Spannungswandler**
  - ❑ Kapazitive bzw. kapazitiv-ohmsche Teiler
  - ❑ Optische Wandler (Pockels-Effekt)

SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 15



## Das Prinzip der optischen Strommessung (Faraday-Effekt)

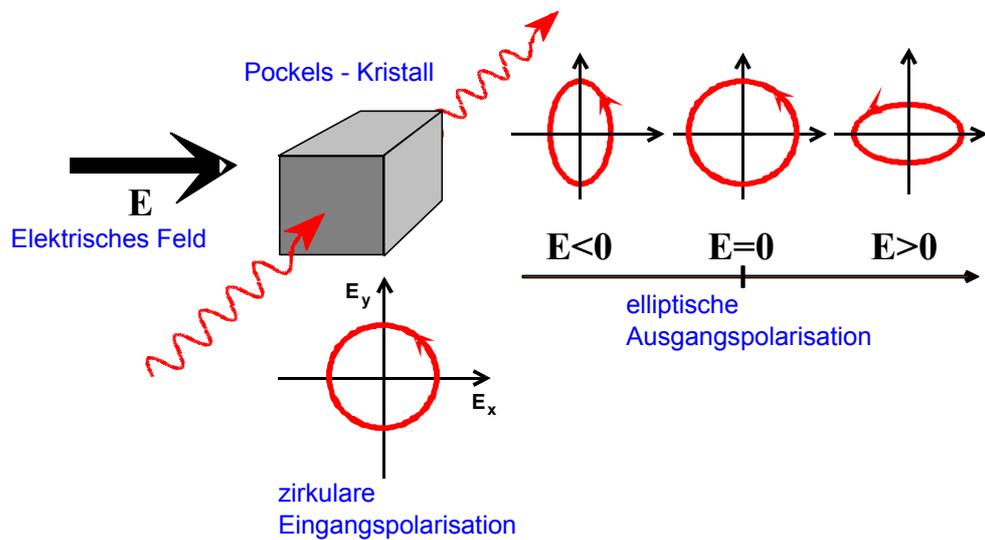


SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 16



## Das Prinzip der optischen Spannungsmessung (Pockels - Effekt)

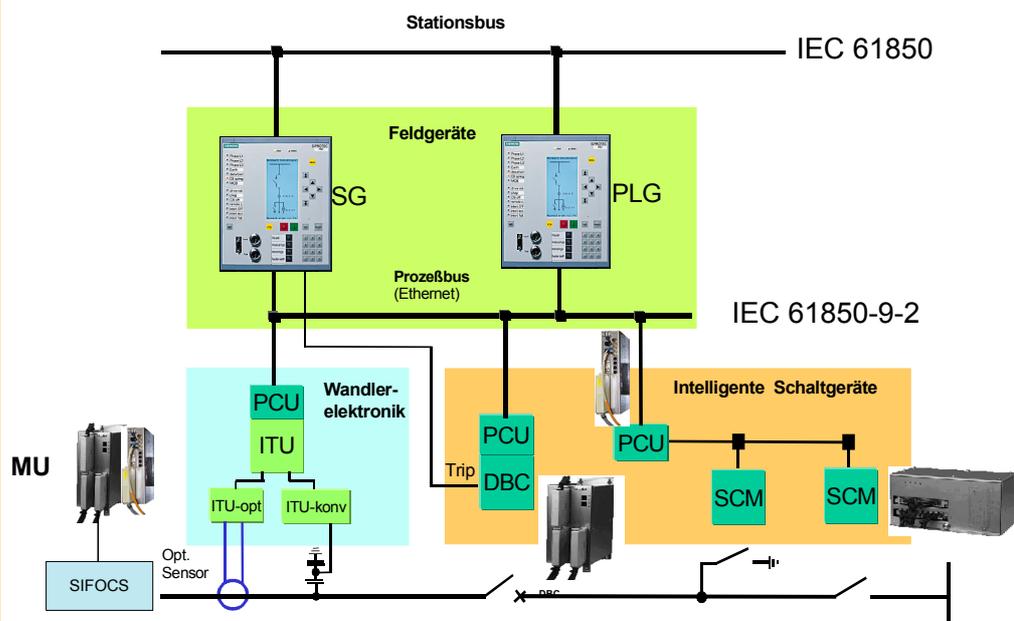


SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 17



## Modernes Leitungsabgangsfeld in der Hochspannung

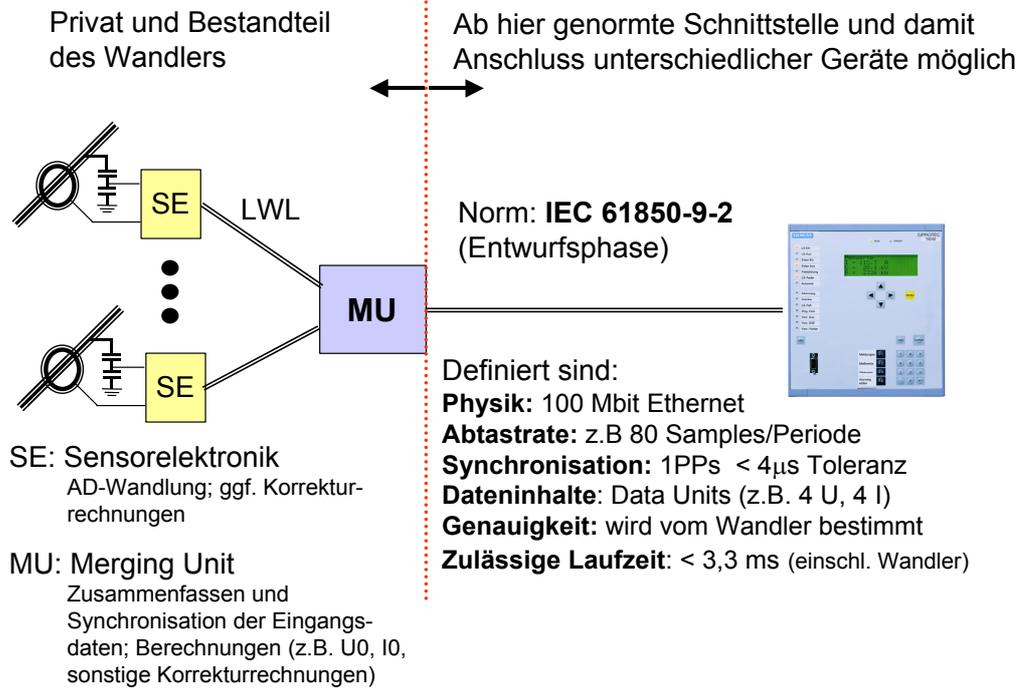


SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 18



## Standardisierte Schnittstelle bei nichtkonventionellen Wandlern

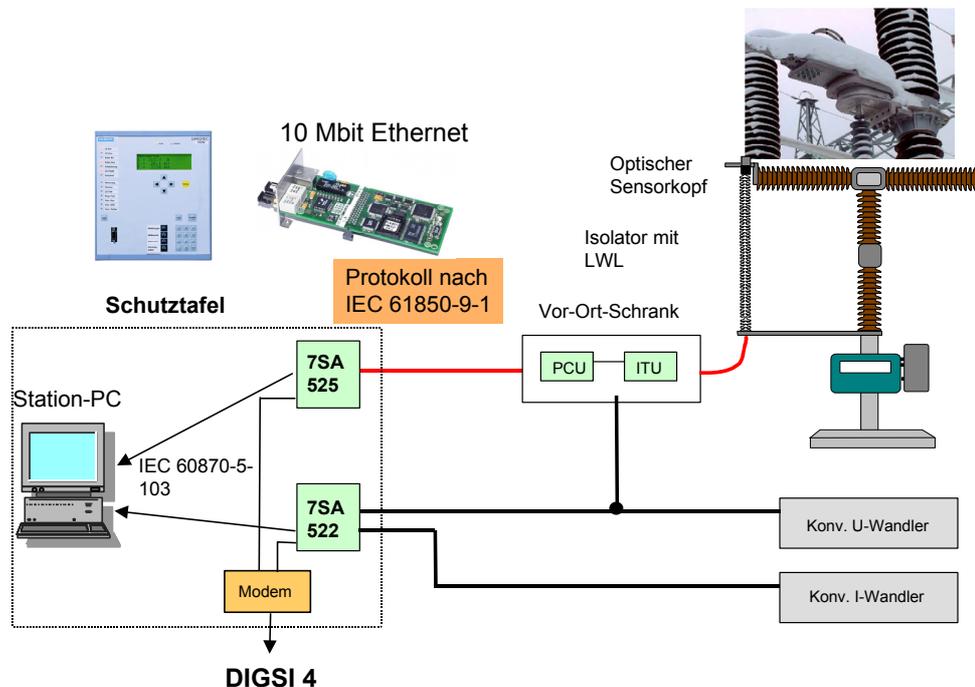


SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 19



## SIFOCS mit 7SA525 Piloteinsatz bei Fingrid im Jahr 2001



SIEMENS

Dr. Herrmann FKH Fachtagung "Wandler" 17.10.03 20

# Nichtlineare Schwingungen, Ferroresonanz in Wechsellspannungsnetzen (Kippschwingungen)

Reinhold Bränlich, FKH, Zürich

Ruthard Minkner, Trench Switzerland AG, Basel

## 1 Einleitung: Was ist Ferroresonanz?

Das Problem unerwünschter Ferroresonanzen in Hochspannungsanlagen, auch Kippschwingungen genannt, beschäftigt die technische Fachwelt seit der Zeit des Aufbaus der Hochspannungs-Energieversorgungsnetze. Wegen des äusserst vielfältigen Phänomens und den schwer einschätzbaren Bedingungen für dessen Entstehung, treten Ferroresonanzen auch heute immer wieder unerwartet auf. Da Kippschwingungen in der Regel mit Überspannungen und / oder Überströmen einhergehen, können sie Apparate überlasten und somit zu erheblichen Schäden mit Kurzschlüssen und Ausfällen führen.

Grundvoraussetzungen für die Entstehung solcher Ferroresonanzen sind die zahlreich vorhandenen induktiven Apparate mit ferromagnetischen Kernen (Transformatoren, Messwandler und Drosselspulen). Da sich alle ferromagnetischen Materialien prinzipiell nur bis zu einer gewissen Sättigungsflussdichte  $B_S$  magnetisieren lassen, trägt bei weiterer Steigerung des Stroms der Kern nicht mehr zur Erhöhung des magnetischen Flusses bei. Dies hat zur Folge, dass die Induktivität (Hauptinduktivität eines Apparats) auf einen kleinen Bruchteil zusammenbricht. Diese Übergänge vom normalen Betriebszustand in den gesättigten Zustand zeigen sich in Form einer starken nichtlinearen Abhängigkeit zwischen Strom und Spannung.

Da in elektrischen Netzen und Anlagen überall Kapazitäten gegen Erde vorhanden sind, die bei hohen Spannungen auch erhebliche Ladeströme erforderlich machen, bilden sie zusammen mit den induktiven Netzkomponenten schwingfähige Gebilde (L-C-Schwingkreise), mit ausgeprägten Resonanzen. Entscheidend ist nun, dass sich bei Kernsättigung eines induktiven Apparats die Resonanzbedingungen grundsätzlich verändern.

Bei Sättigung der Hauptinduktivität eines Spannungswandlers wird seine Induktivität stark herabgesetzt. Die obengenannte Resonanzfrequenz erhöht sich dadurch und kann sich dabei in den Bereich der Betriebsfrequenz verlagern.

Wegen der kurzfristig stark reduzierten „Wechselstromimpedanz“ im Sättigungszustand, können die Erdkapazitäten innerhalb einer kleinen Zeitspanne (ein Bruchteil einer Halbperiode der Netzfrequenz) umgeladen werden. Dies kann, wie später noch im Detail erklärt wird, zu einer charakteristischen nichtsinusförmigen Resonanzschwingung mit grosser Amplitude führen.

Die beschriebene Nichtlinearität der Induktivität führt gewissermassen zu einer Auffächerung der Resonanzfrequenzen, wobei ein mehr oder weniger ausgedehnter Frequenzbereich entsteht, in welchem bei Anregung eine Resonanzüberhöhung der Spannung möglich ist. In ungünstigen Fällen schliesst dieser Frequenzbereich die Netzfrequenz und ihre Harmonischen und Subharmonischen ein.

Der Name Kippschwingung kommt daher, dass im Scheitelwert des Stroms bzw. bei maximaler Sättigung des Kerns die Ladung einer externen Kapazität sehr rasch auf die entgegengesetzte Polarität umschwingt. Dieser Vorgang wird auch als „Kippschwingung“ bezeichnet.

## 2 Phänomenologische Beschreibung der Ferroresonanz

Ferroresonanzsituationen treten typischerweise dann auf, wenn eine Eiseninduktivität, z.B. eine Spannungswandlerhauptinduktivität, parallel mit Erdkapazitäten zusammengeschaltet ist und keine starre Netzspannung daran anliegt. Der betrachtete Anlagenteil mit der induktiven Komponente ist somit nicht geerdet. Eine weitere Voraussetzung für die Entstehung von Ferroresonanz ist, dass der nichtlineare Schwingkreis nur über eine Kapazität mit dem unter Spannung stehenden Netz gekoppelt ist. Ein Beispiel ist die in Abbildung 1 schematisch dargestellte Phase eines freigeschalteten Abgangsfelds einer Freiluftanlage. Die Ankopplung an das Netz erfolgt in diesem Fall über die Steuerkondensatoren des ausgeschalteten Leistungsschalters.

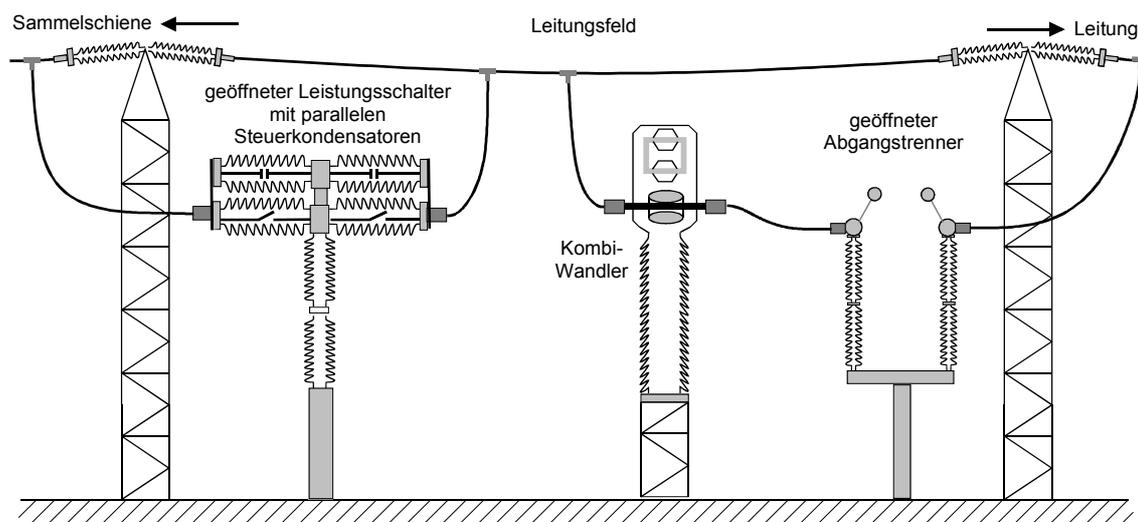


Abbildung 1 Kippschwingungsgefährdeter Konfiguration einer Hochspannungs-Freiluftschaltanlage nach [26]

In Netzen mit starr geerdetem Sternpunkt kann das Problem wie im obigen Beispiel einphasig behandelt werden. Für den Schaltzustand des Abgangsfelds im obigen Beispiel ergibt sich das Ersatzschaltbild nach Abbildung 2.

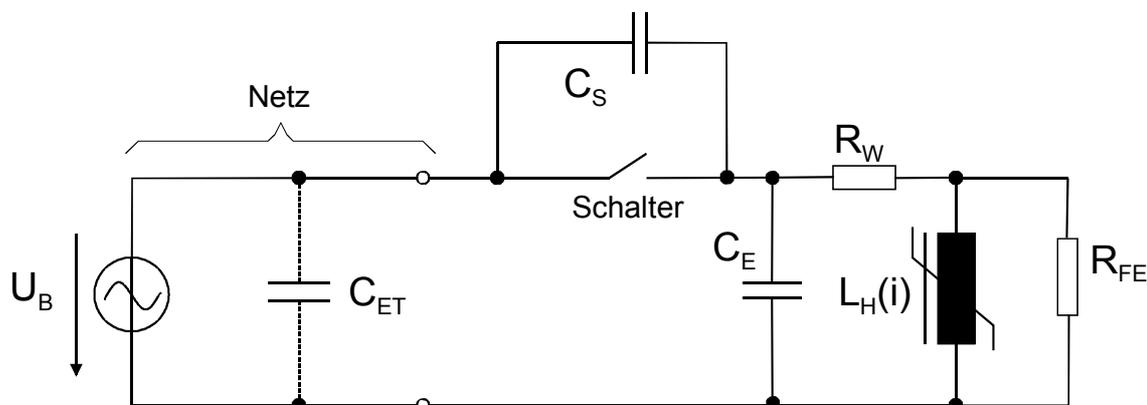


Abbildung 2 Ersatzschaltung für das Ausschalten eines induktiven Spannungswandlers durch einen Leistungsschalter mit Steuerkondensatoren (vgl. Skizze Abbildung 1)

Dieses Ersatzschaltbild kann durch Skalierung weiter auf einen einfachen Serienschwingkreis reduziert werden.

Die treibende Spannung wird dabei über das Verhältnis der Kapazitäten reduziert und der Einfluss der Erdkapazitäten  $C_E$  in die Schalterkapazität  $C_S$  eingerechnet. Die resultierende Kapazität wird neu als Koppelkapazität  $C_K$  bezeichnet (Abbildung 3).

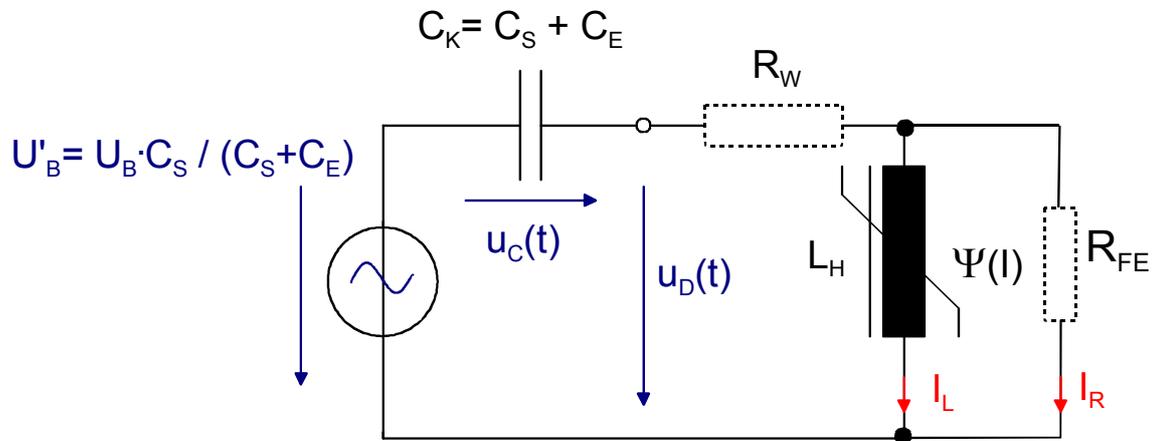


Abbildung 3 Zu einen Seriersonanzkreis reduziertes Ersatzschema. Der verkettete magnetische Fluss  $\Psi$  durch die Induktivität ist wegen Eisensättigung nichtlinear vom Strom abhängig

## 2.1 Beschreibung der Vorgänge bei der einphasigen netzfrequenten Ferroresonanz

Der Ablauf einer netzfrequenten Ferroresonanzschwingung wird im Folgenden schematisch in Anlehnung an die Arbeit von Bergmann [5] beschrieben. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Schwingkreis bereits so stark angeregt worden ist, dass der Kern der Hauptinduktivität im Strommaximum beider Polaritäten in den Sättigungszustand tritt.

Die Betrachtung geht von einer vereinfachten Sättigungskennlinie (Abbildung 3) aus und betrachtet die Vorgänge während einer Schwingungsperiode in vier zeitlichen Phasen, die mit den Nummern ① bis ④ gekennzeichnet sind. Die Strom- und Spannungsverläufe sind in Abbildung 4 dargestellt und beziehen sich auf die Ersatzschaltung Abbildung 2.

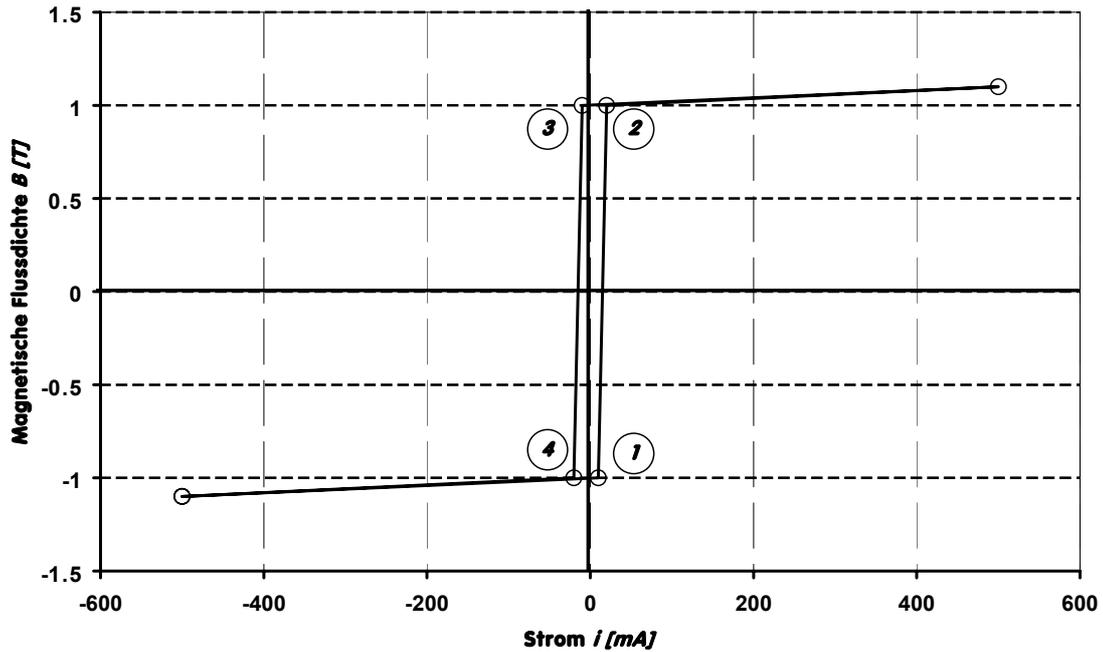


Abbildung 3 Idealierte Hystereseschleife einer Induktivität mit ferromagnetischem Kern

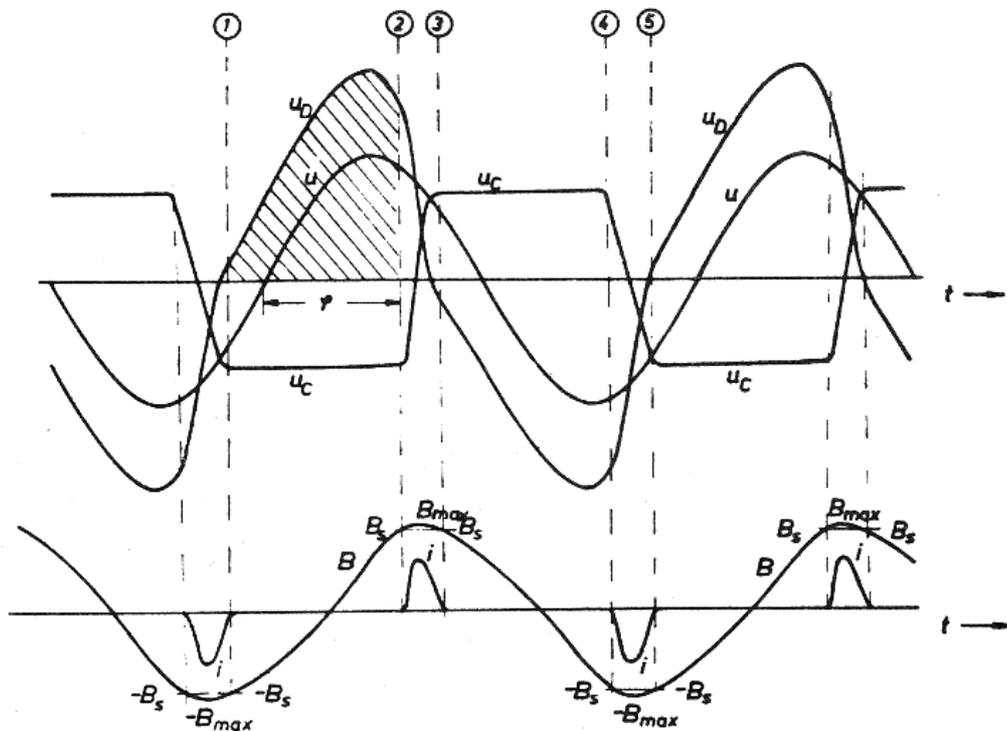


Abbildung 4 Idealisierter Verlauf einer einphasigen netzfrequenten Kippschwingung [5]

Die vereinfachte Beschreibung der Abläufe beginnt bei Punkt 1:

- ① Die Umladung hat gerade stattgefunden. Der Kern weist negative Sättigungsinduktion  $-B_s$  auf. Die Spannung an der Drossel  $u_D = u - u_C$  steigt (schraffierte

Spannungs-Zeit-Fläche). Der Magnetisierungsstrom  $i(t)$  ist dabei wie im Normalbetrieb sehr klein.

- ② Die Induktion im Kern erreicht die positive Sättigungsinduktion  $+B_S$ . Die Hauptinduktivität des Wandlers verringert sich auf einen sehr kleinen Wert. Dies wirkt sich aus wie das Parallelschalten einer kleinen Induktivität, wodurch ein stark veränderter Schwingkreis vorliegt. Infolge des gespeicherten Flusses besitzt die gesättigte Induktivität eine hohe treibende Spannung. Dieser Fluss wurde zuvor beim Durchlaufen der schraffierten Spannungs-Zeitfläche aufgebaut. Die treibende Spannung verursacht einen schwingenden Stromstoss, dessen Scheitelwert weit in die Sättigung reicht ( $B_{max}$ ). Die Kapazität  $C_K$  wird vom negativen zum positiven Scheitelwert umgeladen („Umkippen“). Bei schwacher Dämpfung kann diese Schwingung von einem aperiodischen Vorgang zu einer periodischen Oszillation übergehen, wodurch weitere Frequenzanteile entstehen können (vgl. später).
- ③ Der Stromstoss ist beendet und die Induktion hat erneut  $+B_S$  erreicht. Die Induktivität geht auf den hohen ungesättigten Wert zurück. Die Spannung über der Induktivität ist negativ geworden und bildet eine negative Spannungs-Zeit-Fläche, bis die negative Sättigungsinduktion  $-B_S$  erreicht ist.
- ④ Der Polaritätswechsel an der Kapazität wiederholt sich nun mit negativem Vorzeichen bzw. umgekehrtem Stromstoss. Nach Abschluss des Kippvorgangs geht die Induktivität bei Punkt ② wieder in den ungesättigten Zustand über.

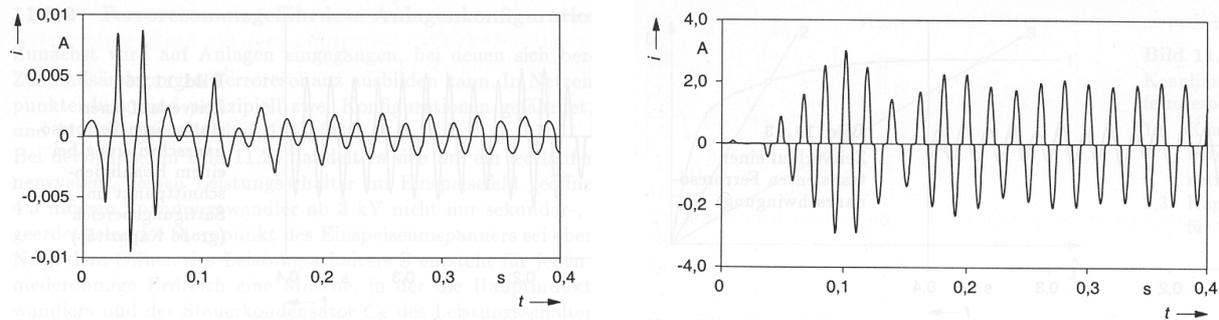
## 2.2 Voraussetzungen für das Auftreten von Kippschwingungen

Damit Kippschwingungen auftreten können, müssen folgende voneinander abhängende Bedingungen erfüllt sein:

- Die Koppelkapazität muss ausreichend gross sein, damit über sie ein Verschiebungsstrom fließen kann, der die Induktivität bis zur Sättigung magnetisieren kann.
- Die treibende Spannung an der Quelle muss aus demselben Grund ausreichend gross sein.
- Die Kreisdämpfung muss ausreichend gering sein.

Der Beginn von Ferroresonanzschwingungen kann spontan in einem instabilen Schaltzustand aufgeschaukelt werden („weiche Anregung“). Ferroresonanz kann aber auch in Folge einer Schalttransienten, durch welche der Kern in Sättigung gerät, ausgelöst, bzw. „getriggert“, werden („harte Anregung“). Durch die kurzzeitig zusammengebrochene Induktivität findet in diesem Fall dann eine erste Kippschwingung, d.h. das rasche Umladen der externen Kapazität statt. Die Ferroresonanzerscheinung kann in diesem Fall entweder abklingen oder auch stationär stehen bleiben. Beim Zuschalten von Spannungswandlern entscheiden oft Vormagnetisierungen des Kerns, ob Sättigung und Kippschwingungen auftreten.

In praktischen Anlagenkonfigurationen sind unter Umständen mehrere Resonanzfrequenzen möglich, welche je nach Schaltkonfiguration und Anfangsbedingung angeregt werden.



**Abbildung 5** Links transient auftretende und rechts stationäre Kippschwingung (Stromoszillogramme aus Heuck, Dettmann [24])

Kippschwingungen können synchron zur Netzfrequenz auftreten. Sie können aber auch die Frequenz einer Oberwelle (Vielfaches der Netzfrequenz) aufweisen oder mit einer Subharmonischen der Netzfrequenz schwingen (ganzzahliger Bruchteil der Netzfrequenz). In isolierten dreiphasigen Netzen kommen wegen des anregenden Oberwellenspektrums ungerade harmonische Ferroresonanzen bzw. ungerade subharmonische Ferroresonanzen bevorzugt vor. Schliesslich sind auch chaotische Schwingungsformen mit wechselndem Schwingverhalten ohne konstante Frequenz und gar ohne sichtbare Gesetzmässigkeit möglich. Schwebungsphänomene sind ebenfalls häufig anzutreffen. Die Amplitude der Ferroresonanzschwingung ist dann mit einer sehr tiefen Frequenz moduliert.

Da Spannung und Strom in der beteiligten Hauptinduktivität nichtlinear voneinander abhängen, kann sich das Schwingverhalten je nach Stärke der Anregung erheblich verändern.

Die Übertragungsfunktion eines linearen Resonanzkreises besitzt genau eine Resonanzstelle. Im nichtlinearen Schwingkreis mit gesättigter Induktivität ist offenbar der Zustand der Resonanz nicht mehr in gleicher Weise eindeutig definiert, wie bei einem linearen Kreis. Zum einen besitzen die Ferroresonanzschwingungen bereits intensive Oberwellen, zum anderen kann ein ganzes Spektrum von Grundfrequenzen existieren, innerhalb welchem die Übertragungsfunktion Amplitudenüberhöhungen aufweist. Dieses Spektrum wird in Abhängigkeit der Anregungsamplitude stark verändert. Zu jedem Schwingungsmodus der Ferroresonanz gehört demnach auch ein Amplitudenbereich, in welchem sie stationär werden kann. Anstelle einer Resonanzkurve wird deshalb zur Darstellung der Schwingeneigenschaften eines Ferroresonanzkreises eine zweidimensionale Karte erstellt, in welcher die stationär schwingfähigen Bereiche in Abhängigkeit der Amplitude und in Abhängigkeit der Schaltelementwerte dargestellt wird (Abbildungen 12 und 13).

### 3 Berechnung von Ferroresonanzen und theoretisch abgeleitete Bedingungen für ihr Auftreten:

Entsprechend der Ersatzschaltung Abbildung 3 können folgende Netzwerkgleichungen (1) und (2) für den Schwingkreis aufgestellt werden:

$$u'_B = (i_L + i_R) \cdot R_W + \frac{1}{C_K} \cdot \int (i_L + i_R) dt + i_R \cdot R_{FE} \quad (1)$$

$$u'_B = (i_L + i_R) \cdot R_W + \frac{1}{C_K} \cdot \int (i_L + i_R) dt + L_H \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (2)$$

Die Hauptinduktivität  $L_H$  ist stromabhängig bzw. abhängig von der magnetischen Flussdichte  $B$  im Kern. Meist wird diese Abhängigkeit ausgehend von einer gemessenen Kennlinie mathematisch approximiert. Nebst einer stückweise Linearisierung der Magnetisierungskennlinien werden etwa auch Polynome oder eine Funktion entsprechend Gleichung (3) verwendet (Petersen, Umlauf [9]).

$$L_H = \frac{n_2^2 \cdot A_{FE}}{l_{FE}} \cdot \left[ \frac{(1 - b \cdot |B|)^d}{c} + \mu_S \right] \quad (3)$$

Dabei bedeuten

- $n$ : Windungszahl der Hochspannungswicklung
- $A_{FE}$ : Eisenquerschnittsfläche des Kerns
- $l_{FE}$ : mittlere Eisenweglänge des Kerns
- $b, c, d$ : zu bestimmende Konstanten
- $B$ : magnetische Flussdichte im Kern
- $\mu_S$ : Restpermeabilität des Kerns im gesättigten Zustand.

Das mit den Gleichungen (1), (2), und (3) vorliegende nichtlineare Differentialgleichungssystem lässt sich ohne wesentliche Vereinfachungen in geschlossener Form nicht lösen.

### 3.1 Analytische Verfahren

Von Rüdberg [2] wird ein analytisches Verfahren zur näherungsweise Lösung der Gleichungen bzw. zur Bestimmung der ferroresonanzgefährdeten Betriebsbedingungen angegeben. Dabei werden die linearen Teile des Gleichungssystems im komplexen Frequenzbereich betrachtet.

Die Betrachtungen konzentrieren sich auf die Maschengleichung des Schwingkreises, der in Abbildung 6 in weiter vereinfachter Weise dargestellt wird. Die ausserhalb der Induktivität liegende Spannung, die nur von linearen Schaltelementen abhängt, setzt sich aus folgenden Teilen zusammen: der treibenden Spannung, der Kapazität und der Dämpfung ( $U_B + U_C + U_R$ ). Diese Spannung ergänzt sich mit jener über der nichtlinearen Induktivität ( $U_L$ ) zu null. Werden die beiden Spannungen als Kennlinien in ein Strom-Spannungs-Diagramm eingetragen, so ergibt sich bei Vernachlässigung von  $U_R$  und bei Umkehrung des Vorzeichens für den Spannungsabfall an der Kapazität die Darstellung in Abbildung 7. Vereinfacht betrachtet kennzeichnen die Schnittpunkte der beiden Kennlinien einen möglichen Betriebspunkt. Der untere Schnittpunkt bezeichnet den Normalbetrieb, der obere Schnittpunkt im gesättigten Kurvenbereich der Induktivität den Zustand der Ferroresonanz. Direkt ersichtlich ist aus dieser Betrachtung, dass bei nicht ausreichender Erregung oder bei zu kleiner Kapazität  $C_K$  (steiler Kapazitätskennlinie) kein Schnittpunkt mit der Induktivitätskennlinie im Bereich der Sättigung und somit keine Ferroresonanz erreicht werden kann.

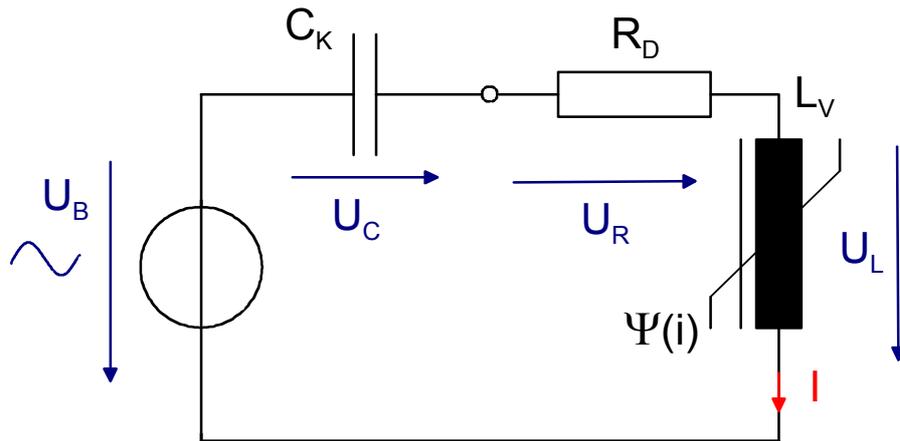


Abbildung 6 Vereinfachter Ferroresonanzkreis

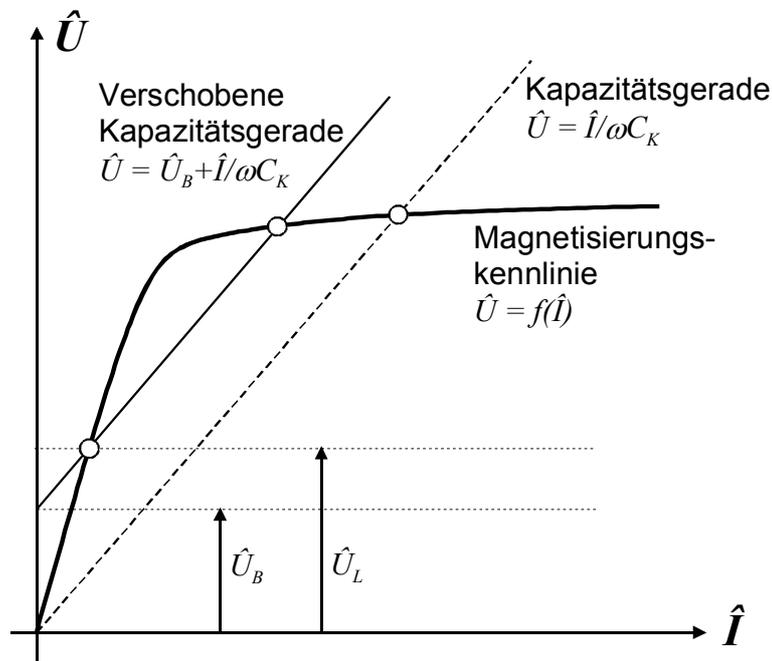


Abbildung 7 Modelldarstellung: Kennlinien der Schaltelemente im Ferroresonanzkreis zur Erklärung der möglichen Arbeitspunkte

Weitere Verfeinerungen dieser Betrachtungen geben Bergmann [6] und später Balzer [11] an, welche die Dämpfungen nach Schema Abbildung 2 mit einbeziehen. Dadurch gehen die Kapazitätsgeraden in Ellipsen über. Es kann auf graphischem Wege gezeigt werden, dass die Schnittpunkte im gesättigten Kurvenbereich durch ausreichende Bedämpfung vermieden werden können.

Die linearen Kreisgleichungen, welche strenggenommen nur für jeweils eine Frequenz gelten, lauten:

$$U'_B = U_L + I_L / j\omega C_K, \quad U_L = j\omega \cdot L_H \cdot I_L \quad (4)$$

$$U'_B \cdot j\omega C_K = U_L \cdot [j\omega \cdot C_K (1 + R_W / R_{FE}) + 1 / R_{FE}] + I_L \cdot (j\omega \cdot R_W \cdot C_K + 1) \quad (5)$$

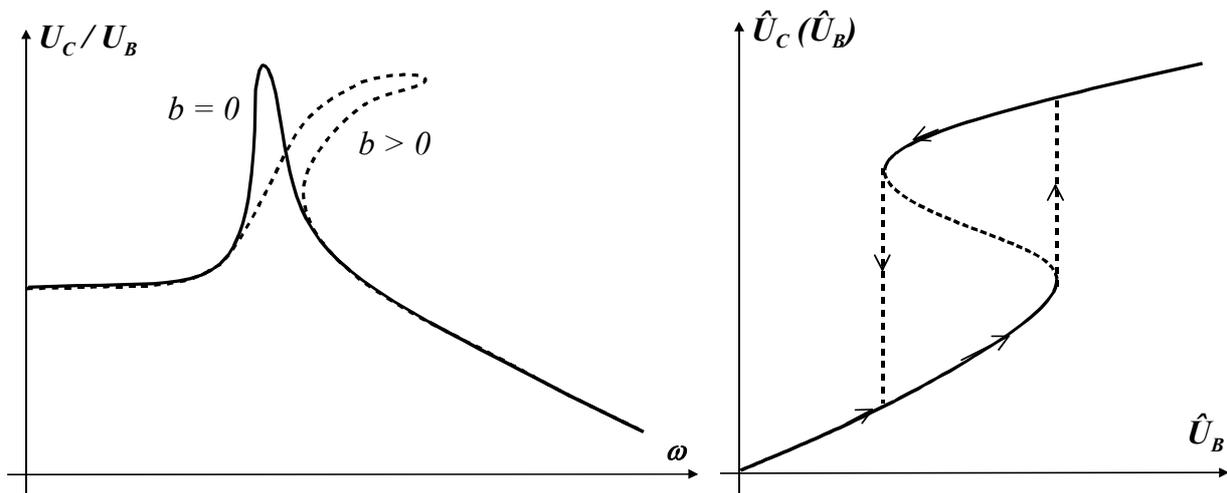
Die Bedeutungen der Symbole sind der Abbildung 3 zu entnehmen.

Die linearen Gleichungen erlauben nur qualitative Abklärungen und berücksichtigen das Durchlaufen der nichtlinearen Kennlinie während den Ferroresonanzschwingungen nicht. Sie setzen implizit sinusförmige Spannungs- und Stromverläufe voraus. Zumindest ermöglichen Sie aber durch die graphischen Betrachtungen in Abbildung 7 eine Beurteilung, ob Ferroresonanzen auftreten können oder nicht.

Analytische Lösungen des Gleichungssystems (1), (2), (3) sind in Form von Reihenentwicklungen zu erreichen, wenn die Magnetisierungskennlinie  $\psi(i)$  durch ein Polynom dritten Grades der Umkehrfunktion  $i(\psi)$  wie folgt approximiert wird:

$$i = a \cdot \psi + b \cdot \psi^3 \quad (6)$$

Das Einführen eines solchen vereinfachten Modells in die Gleichungen (1) und (2) führt zu einer analytisch lösbaren Differentialgleichung: die Duffing'sche Gleichung [23]. Die qualitative graphische Aufzeichnung der Lösungsfunktion in Abbildung 8 veranschaulicht, wie sich die Resonanzkurve des Serieresonanzkreises nach Abbildung 6 mit zunehmender Nichtlinearität verformt. Das Mass der Nichtlinearität der Magnetisierungskennlinie ist durch den Koeffizienten des Gliedes dritter Ordnung  $b$  gegeben.



**Abbildung 8** Links: Resonanzkurve  $U_C/U_B$  für linearen Serieresonanzkreis und Verformung durch Einführung einer nichtlinearen Induktivität entsprechend Gleichung (6)  
rechts: Darstellung des Amplitudensprungs und des Hystereseverhaltens beim Übergang in eine Ferroresonanzschwingung

### 3.2 Numerische Verfahren

Zur Ermittlung realitätsnaher Lösungen werden in der Regel numerische Verfahren angewendet. Sind die massgeblichen Netzkomponenten und die Magnetisierungskurve und Verluste der nichtlinearen Induktivität ausreichend genau bekannt, so kann für eine bestimmte Schaltsituation eine zuverlässige Lösung des Differentialgleichungssystem (1), (2), (3) erreicht werden. Wird die nichtlineare Magnetisierungskennlinie der Wandlerhauptinduktivität stückweise linearisiert (Abbildung 8), so ergibt sich für jedes Segment wiederum eine beschränkt gültige lineare Differenzialgleichung. Die Lösung kann in einem Zeitschrittverfahren erfolgen, wobei beim Wechsel von einem linearen Segment zum folgenden der Endzustand jeweils als Anfangsbedingung für den nächsten Integrationsschritt übernommen wird.

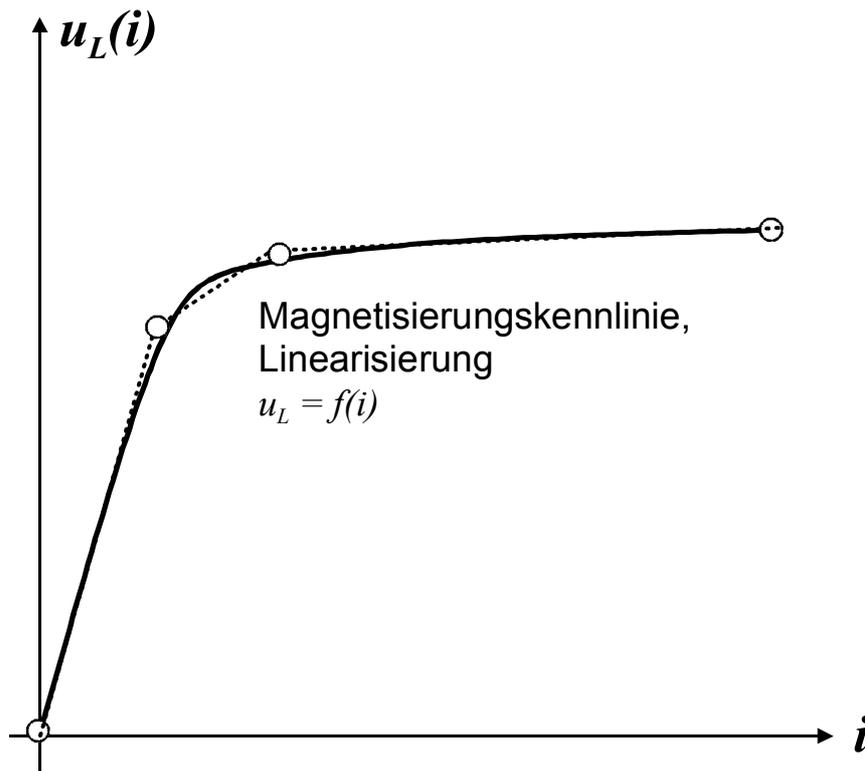


Abbildung 8 Linearisierung der Magnetisierungskennlinie einer Wandler-Hauptinduktivität

In der Praxis stellt die Ermittlung aller wesentlicher Parameter einen gewissen Aufwand dar. Durch Daten der Hersteller stehen aber heute in der Regel ausreichend genaue Daten zur Verfügung, um Kippschwingungsprobleme mit numerischen Programmen befriedigend zu berechnen. In unübersichtlichen Fällen wird teilweise berichtet, dass die Übereinstimmung zwischen Messungen und Berechnungen durch eine Variation der Parameter erreicht wird [26]. Nur ein zutreffendes Modell vermag die Massnahmen gegen Kippschwingungen auch zuverlässig zu bewerten.

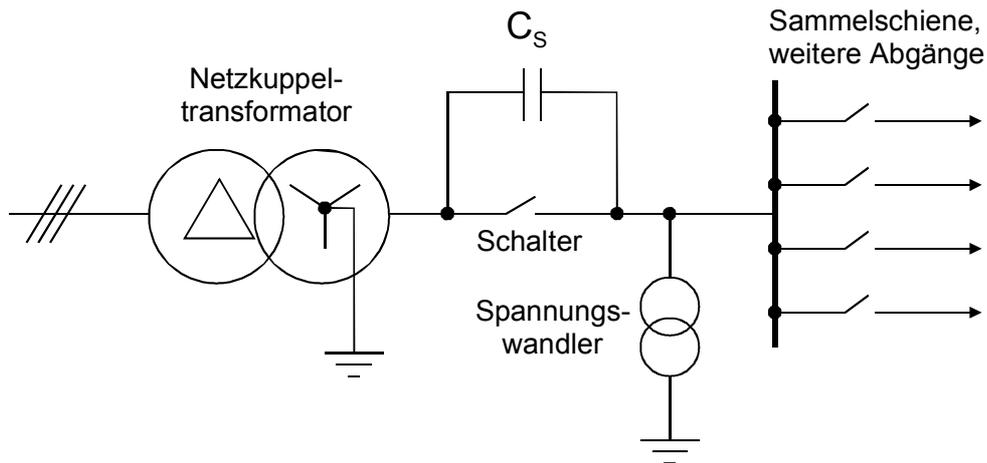
Der messtechnischen Untersuchung von Kippschwingungsproblemen kommt deshalb eine ergänzende Funktion im Rahmen einer Abklärung von Abhilfemassnahmen zu, indem sie eine Kontrolle und Anpassung der Simulationsmodelle erlaubt.

## 4 Ferroresonanz gefährdete Netzkonfigurationen

Als ferroresonanzgefährdete Anlagenkonfigurationen werden zwei für die Praxis wichtige Beispiele angegeben.

### 4.1 Induktive Spannungswandler

Abbildung 9 zeigt das bereits in der Einführung erläuterte Beispiel eines freigeschalteten Anlageteils (hier mit Sammelschiene), welches über die Steuerkapazität eines Leistungsschalters mit dem Netz verbunden ist.

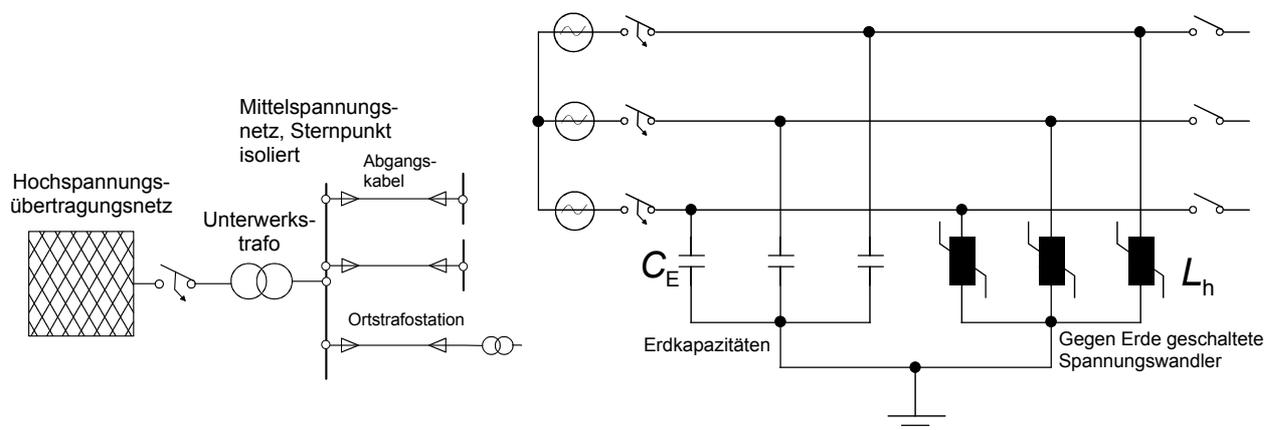


**Abbildung 9** Freigeschalteter Anlagenteil im starr geerdeten Netz mit einem induktiven Spannungswandler

Es handelt sich dabei um den einfachen Fall, in welchem die Phasen unabhängig voneinander betrachtet werden können. Abbildung 2 zeigt das zugehörige Ersatzschaltbild. Ebenso wichtig ist der Fall einer kapazitiven Kopplung einer ausgeschalteten aber nicht geerdeten Freileitung mit angeschlossenen Spannungswandlern. Bei parallel verlaufende Leitungen in Betrieb kann ein solches System leicht zu Ferroresonanzschwingungen angeregt werden (Köppl, u.A. [19] und Heuck [24]). Die Behandlung erfolgt anhand der gleichen Ersatzschaltung, Abbildung 2.

Komplizierter sind dreiphasige Ferroresonanzfälle im isolierten Netz, bei welchem grundsätzlich asymmetrische Schwingungen auftreten. Eine für Ferroresonanz anfällige Konfiguration entsteht in diesen Netzen, sobald Spannungswandler gegen Erde geschaltet werden (Abbildung 10). Grundsätzlich sind hier aber auch Ferroresonanzen in Zusammenhang mit Sternpunkt bildenden Transformatoren möglich.

In solchen Fällen werden die Ferroresonanzschwingungen in der Regel nur durch Schalthandlungen ausgelöst. Kernsättigung bei den Wandlern kann womöglich dadurch entstehen, dass die Phasen nicht exakt im gleichen Augenblick zugeschaltet werden.



**Abbildung 10** Isoliertes Mittelspannungsnetz mit gegen Erde geschalteten Spannungswandlern als dreiphasige ferroresonanzgefährdete Netzkonfiguration  
links: Netzkonfiguration,  
rechts: Ersatzschema

## 4.2 Kapazitive Spannungswandler

Kapazitive Messwandler können grundsätzlich auch ohne externe Kapazitäten Ferroresonanzschwingungen ausführen, da sie aus kapazitiven und induktiven Komponenten bestehen. Der dabei wirksame Serie-Ferroresonanzkreis entsprechend Abbildung 11 setzt sich aus den Kapazitäten  $C_2$  und  $C_1$  und aus der gesättigten Hauptinduktivität des Zwischenwandlers zusammen.

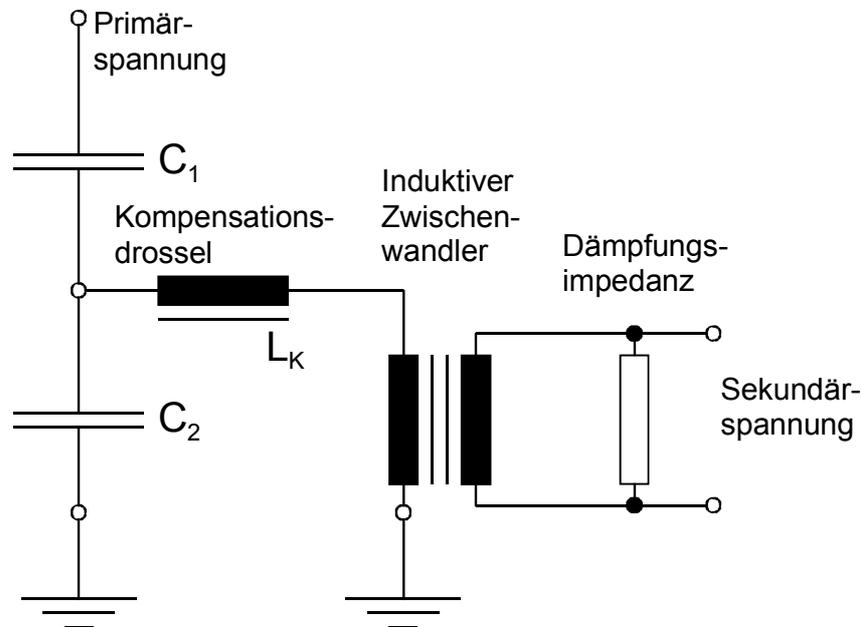


Abbildung 11 Ersatzschaltbild des kapazitiven Spannungswandlers

Ein Vorteil bei der Bekämpfung solcher Ferroresonanzen ist, dass das ihr Auftreten von bekannten Eigenschaften des Wandlers selbst bestimmt wird und nur wenig vom umgebenden Netz abhängt. Eine ausreichende Unterdrückung von Ferroresonanzen kann daher bei der Apparateentwicklung berücksichtigt und im Werk überprüft werden. Die IEC-Publikation 60044-5 „Instrument transformers, part 5, capacitive voltage transformers“ enthält eine Prüfanweisung und eine Mindestanforderung für die Dämpfung transient auftretender Ferroresonanzschwingungen.

## 5 Gegenmassnahmen

Die wesentlichen Parameter, mit welchen das Auftreten der Ferroresonanzen beeinflusst werden kann, wurden im wesentlichen bereits im Abschnitt 2 erwähnt. Eine Unterdrückung von Ferroresonanzen kann grundsätzlich mit folgenden Massnahmen angegangen werden:

1. Reduktion der Anregungsleistung, Verminderung der Koppelkapazität  $C_S$  (Abbildung 2)
2. Dämpfung, standardmässig auf der Sekundärseite von Wandlern oder zwischen nicht geerdeten Sternpunkten und Erde. Üblich sind:
  - lineare Bürden (Belastungswiderstände)
  - nichtlineare Bürden (Sättigungsdrosseln)
  - geschaltete Bürden (Zuschalten in kritischen Zuständen oder bei Schalthandlungen)

3. Veränderung der Erdkapazitäten  $C_E$ : entweder sehr klein oder ausreichend gross, so dass  $C_S/C_E$  und damit die über den Spannungswandler eingekoppelte Spannung klein wird
4. Vermeidung von Ferroresonanz auslösenden Zuständen und Vorgängen
5. Massnahmen, die zu einer Verflachung der Magnetisierungskennlinie der Kerne führen (Luftspalte, Verringerung der magnetischen Flussdichte im Kern)

Die genannten Massnahmen und Parameter stehen in gegenseitiger Wechselwirkung: Es handelt sich dabei einerseits um Magnetisierungseigenschaften, die den induktiven Apparat mit Eisenkern selbst betreffen. Andererseits spielen auch Faktoren eine Rolle, die von externen Einflüssen des umgebenden Netzes abhängen. Externe Parameter sind bei induktiven Wandlern die Kapazitäten und ein Anteil der Dämpfung, sowie die betrieblichen Einflüsse, wie Oberwellen und Transienten durch Schalthandlungen.

Die Graphiken in den Abbildungen 12 und 13 zeigen Wertebereiche der beteiligten Komponenten, in welchen Ferroresonanzen auftreten. Die Darstellungen lassen erkennen, dass eine Abhilfemassnahme unter Umständen nur für einen Teil der möglichen Schwingungsmoden ausreichend sind.

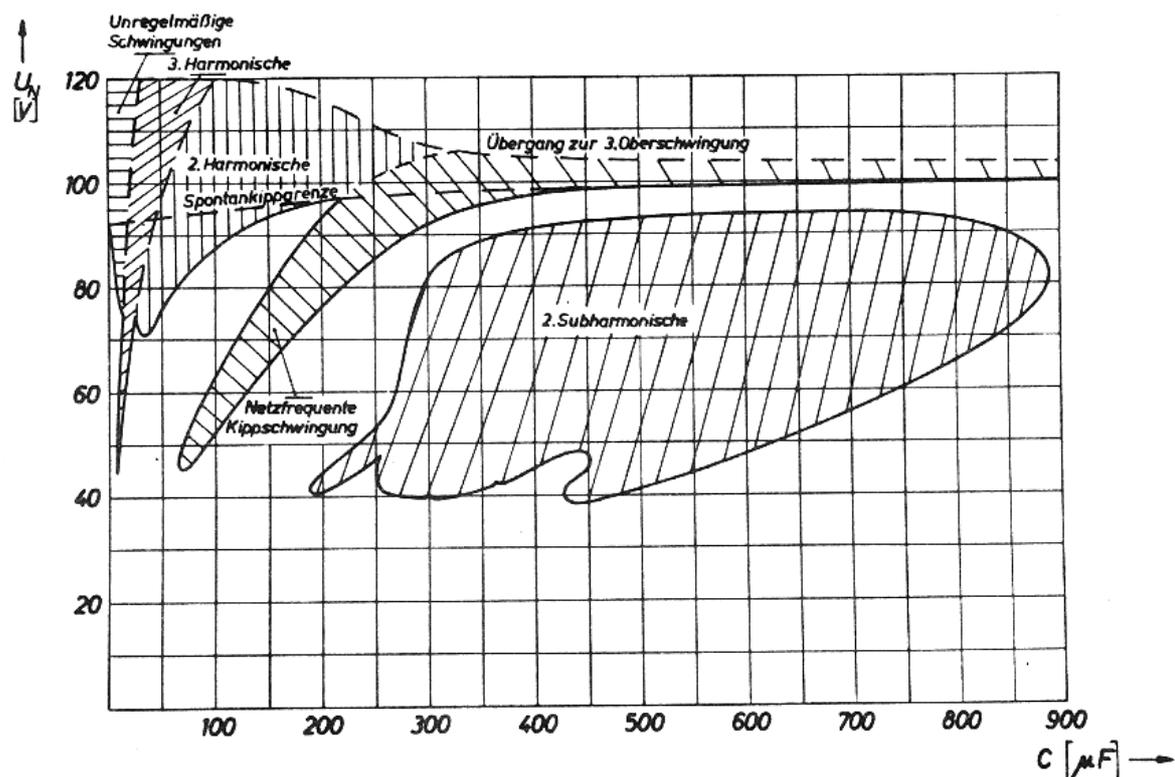


Abbildung 12 In einer einphasigen Konfiguration gemessene Bereiche der auftretenden Ferroresonanzmoden in Abhängigkeit der anregenden Spannung und der Erdkapazität (Bergmann [5])

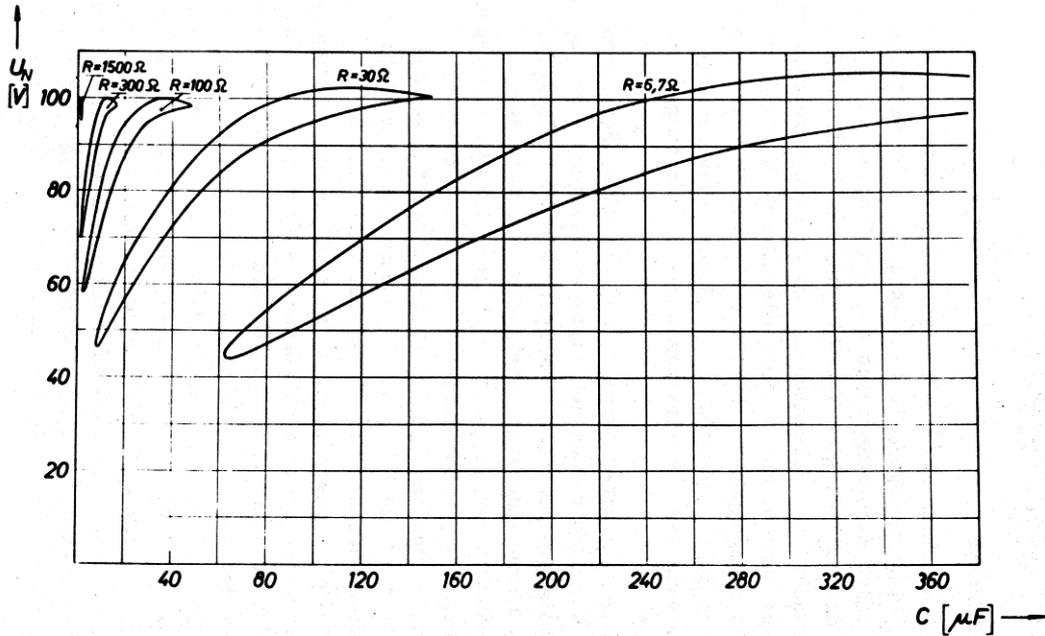


Abbildung 13 Bereiche der Kippschwingungen bei Veränderung eines Widerstands, der in Serie zum Ferroresonanzkreis liegt (Bergmann [5]).

Die notwendige Bedämpfung muss jeweils individuell für die vorliegende Netzsituation bestimmt werden (vgl. Abbildung 14). Entsprechende Beschaltungen werden aufgrund dieser Abklärungen ausgewählt.

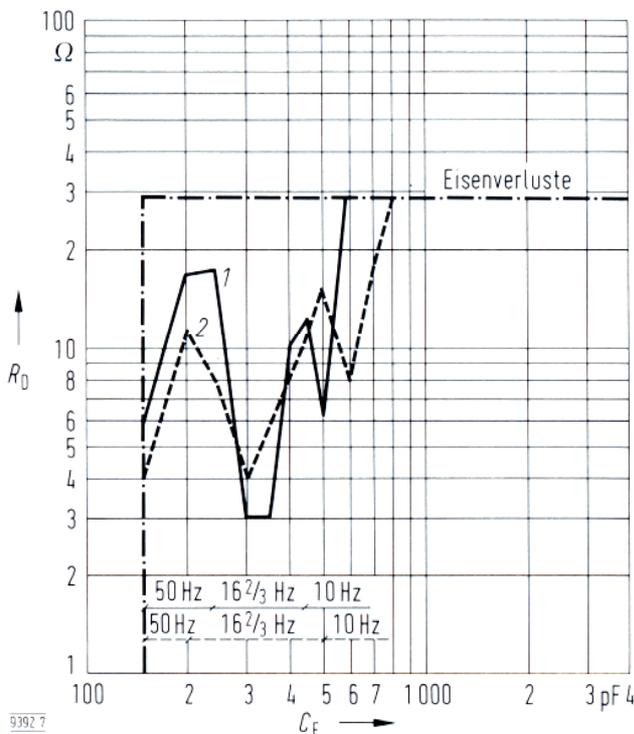


Abbildung 14 Ergebnis der Berechnungen von Petersen und Umlauf [9] für einen einphasigen Ferroresonanzkreis mit der Hauptinduktivität eines 245-kV-Spannungswandlers: Notwendiger Dämpfungswiderstand  $R_D$  für eine wirksame Bedämpfung der Ferroresonanz in Abhängigkeit der Erdkapazität  $C_E$ .

Verlauf 1 gilt für eine Schalterkapazität  $C_S$  von 280 pF

Verlauf 2 für eine Schalterkapazität  $C_S$  von 280 pF

Die Abbildungen 12 bis 14 zeigen die bereits im Abschnitt 2 gemachte Feststellung, dass bei ausreichender kleiner Anregung, oder auch bei ausreichender Bedämpfung (kleiner Dämpfungswiderstand im Sekundärkreis) Ferroresonanz ausgeschlossen werden kann.

Da ein ausreichend kleiner Dämpfungswiderstand an einer Sekundärwicklung des Wandlers mit hoher Bürdenleistung in der Regel eine Beeinträchtigung der Genauigkeitsklasse zur Folge hat, wird standardmässig eine dämpfende Beschaltung gewählt, welche möglichst nur im Ferroresonanzfall wirkt und sonst den Messwandlerkreis unbeeinflusst lässt. Die dabei verwendeten Lösungen umfassen:

- Als eine der Standardlösungen werden Dämpfungsdrosseln an die Sekundärwicklungen der Spannungswandler geschaltet, welche im Ferroresonanzfall in Sättigung gehen und dann Energie absorbieren.
- Aufwändiger ist der Einsatz eines Ferroresonanzschutzrelais, welches das Auftreten von Ferroresonanzschwingungen detektiert und kurzzeitig einen niederohmigen Dämpfungswiderstand 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 [9].
- In isolierten dreiphasigen Netzen werden Hilfssekundärwicklungen der Spannungswandler gegen Erde zusammen mit einem Dämpfungswiderstand zum Dreieck zusammengeschaltet. Im Normalbetrieb ergänzen sich die drei Spannungen zu Null und es fließt kein Ausgleichsstrom. Im Falle der Sättigung eines der Wandler entsteht eine Fehlerspannung und somit ein Strom durch den Dämpfungswiderstand, wodurch dem Ferroresonanzkreis Energie entzogen wird.
- Bei kompensierten Netzen kann durch eine Überkompensation (induktiver Erdschlussstrom) Ferroresonanz vermieden werden.

Externe Abhilfemassnahmen beschränken sich auf die Reduktion der Kopplungskapazitäten in Fällen, wo dies möglich ist. Dämpfungsmassnahmen im externen Hochspannungskreis sind in der Regel aufwändig und wenig wirksam.

## 6 Schlussfolgerungen

Das Prinzip der Entstehung von Ferroresonanzen wurde anhand einer Literaturstudie in vereinfachter Form rekapituliert. Ferroresonanzen entstehen in verschiedenen einphasigen und dreiphasigen Netzkonfigurationen, wobei meist mehrere Schwingungsmodi möglich sind.

Einfache analytische Abklärungen ergeben Anhaltspunkte über das Auftreten von Ferroresonanzen und über die Massnahmen zu ihrer Bedämpfung.

Mit digitalen Rechenmodellen können heute zuverlässige Studien durchgeführt werden, mit welchen die Frage der Ferroresonanz schon bei der Anlagenplanung berücksichtigt werden kann. Bei bestehenden Anlagen mit Ferroresonanzproblemen können gezielte und optimierte Massnahmen gegen das Auftreten der Kippschwingungen gefunden werden.

Messungen lassen folgende Untersuchungen zu:

- Überprüfung des Auftretens und der Art von Ferroresonanzen
- Überprüfung der Berechnungsmodelle
- Überprüfung der Wirksamkeit getroffener Massnahmen

Da in Netzanlagen eine Reihe von unabhängigen Bedingungen erfüllt sein müssen, um den Schnittpunkt der Magnetisierungskennlinie zu erreichen, tritt das Auslösen von

Kippschwingungen unter Umständen in der Praxis nur statistisch auf. Bei messtechnischen Untersuchungen müssen deshalb meist mehrere Versuche bei verschiedenen Anfangsbedingungen durchgeführt werden. Diesbezüglich ist zu beachten, dass Wandlerkerne je nach Vorgeschichte eine mehr oder weniger ausgeprägte Vormagnetisierung aufweisen, welche das Auftreten von Sättigung und Ferroresonanz entscheidend mitbestimmt.

## 7 Literatur:

- [1] Roth A. „Hochspannungstechnik“, Springer-Verlag Wien, 2. Auflage, 1938
- [2] Rüdenberg R. „Elektrische Schaltvorgänge in geschlossenen Stromkreisen von Starkstromanlagen“, Springer-Verlag, Berlin / Göttingen / Heidelberg, 4. Auflage, 1953
- [3] Lühr W.: „Untersuchungen an Schwingkreisen mit Ferroresonanz“, Dissertation TU Berlin-Charlottenburg, D83, Fakultät Elektrotechnik, 1960
- [4] Andrä W., Peoser R.: „Kippschwingungen in Drehstromnetzen“, ETZ-B Band 18 (1966), H. 22, S. 825-832
- [5] Bergmann C.: „Kippschwingungen in Drehstromnetzen“ Dissertation D83, Fakultät Elektrotechnik, TU Berlin 1966
- [6] Bergmann C., „Grundlegende Untersuchungen über Kippschwingungen in Drehstromnetzen“, ETZ-A Band 88 (1967), H. 12, S. 292-298
- [7] Kothari G.C., Ashok Kumar B.S., Parthasarathy K., Khincha H.P.: „Analysis of ferro-oscillations in power systems“, Proc. IEE, Vol. 121, No 7 (1974), pp 616-622
- [8] Heuck, K.; Kegel, R.: „Ferroresonanz bei Transformatoren mit freiem Sternpunkt“ etz Archiv, 1 (1979), S. 113-120
- [9] Petersen C., Umlauf A.: „Kippschwingungen in starr geerdeten Drehstromnetzen“, Elektrizitätswirtschaft, Band 79 (1980), Heft 7, S. 236-240
- [10] Kegel, R.; „Ein Beitrag zur Berechnung von Ferroresonanzerscheinungen in Energieversorgungsnetzen“, Dissertation Hochschule der Bundeswehr Hamburg 1981
- [11] Balzer G.: „Vermeidung von Ferroresonanzen in Drehstromnetzen“, etz Archiv, Band 4 (1982), Heft 4, S. 121-126
- [12] Dettmann, K.-D.: „Berechnung von Ferroresonanzerscheinungen unter besonderer Berücksichtigung von Remanenz, Hysterese- und Wirbelstromeffekten“ Dissertation Hochschule der Bundeswehr Hamburg 1984
- [13] Dettmann, K.-D. „Ferroresonanzgefährdete Betriebszustände in Netzen mit Spannungswandlern“, etz Archiv 7 (1985), S. 33-36
- [14] Dettmann, K.-D.; Heuck, K.; Kegel, R.: „Ferroresonanz in Netzen, insbesondere mit Spannungswandlern“, Seminar Meßwandler für Hochspannungsnetze, Technische Akademie Esslingen 1987
- [15] Dettmann, K.-D.; Heuck, K.; Kegel, R.: „Ferroresonanz vor allem in Netzen mit Spannungswandlern Teil 1: Entstehung der Ferroresonanzschwingungen“, etz 109 (1988), S. 780-783

- [16] Sander B., Dobsa J., Grandl J.: „Ableiterdefekte involge Ferroresonanz einer Transformatorbank in einer 220/65-kV-Schaltanlage“, Bulletin SEV/VSE, Band 81 (1990), Heft 19, S. 25-30
- [17] Schärli U., Krause G., „Bedingungen für das Auftreten von Kippschwingungen bei Hochspannungswandlern im Netz“, Haefely AG, Basel
- [18] Vorwerk H.-J. „Elektrische Messwandler aus der Sicht des Betreibers“, ETG-Sponsortagung mit Moser-Glaser & Co. AG, Ingenieurschule Muttenz, 1992
- [19] Köppl G., Läderach S., Lüke E., Umlauf A.: „Ferroresonanz – ein weiterhin aktuelles Problem“, Bulletin SEV/VSE, Band 19, 1995, S. 19-23
- [20] Jacobson D.A.N., Swatek D. R., Mazur R. W.: „Mitigating potential transformer ferroresonance in a 230 kV converter station“, Transaction of IEEE Power Distribution Conference, Los Angeles, 1996
- [21] Kunde K., Niedung L., Umlauf A., Neumann C.: „Einphasige Kippschwingungen in Netzen mit induktiven Spannungswandlern“, Elektrizitätswirtschaft, Band 95, (1996), Heft 4, S. 162-170
- [22] Janssens N., Craenenbroeck, Van Dommelen D., Van De Meulenbrouke F.,: „Direct calculation of the stability domains of three-phase ferroresonance in isolated neutral network with grounded-neutral voltage transformers“, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, NO. 3, 1996, pp 1546-1553
- [23] Philoppow E.S., Büntig W. G.: „Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme der Elektrotechnik“, Carl Hanser Verlag, 1992
- [24] IEE Colloquium „Warning! Ferroresonance can damage your plant“, The Scottish Engineering Centre, Teaching Building, Glasgow, 12. Nov. 1997, IEE Digest No. 1997/349
- [25] Heuck K., Dettmann K.-D.: „Elektrische Energieversorgung, Erzeugung, Transport und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis“, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 4. Auflage, 1999
- [26] Bayer R. Luhmann J., Mentel J., Neumann C.: „Simulation von einphasigen Kippschwingungen in Spannungswandlern mittels EMTP/ATP, Elektrie, Berlin, Band 56, (2002), Heft 1-4, S. 79-87
- [27] Prucker, U., Umlauf A. Niedung L. „On avoiding ferroresonance in networks with inductive voltage transformers“, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands 2003



## Teilnehmerverzeichnis

Alff	Jean-Jacques	Alff-Engineering	Hausen a. Albis
Amrein	Hanspeter	Centralschweizerische Kraftwerke	Luzern
Amrein	Franz	Centralschweizerische Kraftwerke	Luzern
Ansorge	Samuel	Sefag Ixosil AG	Altdorf
Arnold	Walter	Elektrizitätswerk Altdorf	Altdorf
Aschwanden	Thomas	BKW FMB Energie AG	Bern 25
Bärtschi	Walter	BKW FMB ENERGIE AG	Ostermundigen
Beer	Andreas	KW Frisal AG c/o Patvag Kraftwerke AG	Ilanz
Bertoli	Marco	Verzasca SA	Lugano
Bertschi	Beat	Pfiffner Messwandler AG	Hirschthal
Bissig	Andreas	Elektrizitätswerk Altdorf	Altdorf
Bleuel	Walter	Industrielle Werke Basel	Basel
Boss	Martin	Pfiffner Messwandler AG	Hirschthal
Bräunlich	Reinhold	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Braissant	Pierre	Service de l'électricité de la ville de Lausanne	Lausanne 9
Brettschneider	Josef	Elektrizitätswerke des Kantons Zürich	Zürich
Büsch	Werner	Alstom T&D AG	Oberentfelden
Büttler	Roland	Atel Netz AG	Olten
Campono	Flavio	Indeltra SA	Bellinzona
Casalini	Pascal	Aziende Industriali di Lugano SA	Lugano
Costa	Giuseppe Pino	Starkstrom-Gerätebau GmbH	Zürich
Cottens	Eric	Energie Ouest Suisse	Lausanne
Currit	Olivier	HYDRO-EXPLOITATION SA	Sion
Dagani	Giorgio	Verzasca SA	Lugano
Der Houhanessian	Vahe	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Düblin	Hanspeter	Industrielle Werke Basel	Basel
Egger	Brigitte	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Ehret	Jean-Michel	Trench Switzerland AG	Basel
Felder	Philipp	Aare Energie AG	Olten
Felley	Olivier	l'Energie de Sion-Région SA	Sion
Fessler	Peter	Elektrizitätswerk der Stadt Zürich	Zürich
Galli	Daniel	AEK Energie AG	Solothurn
Gambon	Pascal	Nordostschweizerische Kraftwerke	Baden
Gebhardt	Lutz	Trench Switzerland AG	Basel
Göldi	Jürg	Wasser- & Elektrizitätswerk der Gemeinde Buchs, EWB	Buchs
Grangier	Michel	Electricité Neuchâteloise SA	Corcelles
Grossenbacher	Peter	Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG	Däniken
Guillod	Charles	Atel Netz AG	Olten
Gwerder	Franz	Centralschweizerische Kraftwerke	Luzern
Gysi	Rudolf	Nordostschweizerische Kraftwerke	Baden
Hacksteiner	Markus	Gemeindebetriebe Windisch Elektrizitäts- und Wasserwerk	Windisch
Hediger	Josef	EW des Bezirks Schwyz	Schwyz
Heinrich	Bernhard	Weidmann Transformerboard Systems AG	Rapperswil

Heizmann	Thomas	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Chez-le-Bart
Herrmann	Hans-Joachim	Siemens AG PTD PA 13	Nürnberg
Hinow	M.	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	Zürich
Hischier	Kurt	Rhonewerke AG	Chippis
Hofstetter	Martin	ewz Verteilnetz	Zürich
Hürlimann	Thomas	Kraftwerke Hinterrhein AG	Thusis
Hunziker	Fritz	Pfiffner Messwandler AG	Hirschthal
Inglin	Hermann	Gemeindewerke Pfäffikon	Pfäffikon
Jäger	Kurt	St. Gallisch-Appenzellische Kraftwerke AG	St. Gallen
Jäggi	Urs	AEK Energie AG	Solothurn
Jakob	Roland	St. Gallisch-Appenzellische Kraftwerke AG	St. Gallen
Jenni	Werner	Nexans	Windisch
Jeske	Heinz-Jürgen	Trench Switzerland AG	Basel
Jordan	Nicolas	Rhonewerke AG	Chippis
Kämpfer	Rudolf	Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung	Bern
Karius	Volker	Trench Switzerland AG	Basel
Knab	Hans-Josef	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
König	Joachim	Kernkraftwerk Leibstadt AG	Leibstadt
Koepfer	Rolf	Trench Switzerland AG	Basel
Köppl	Georg	Köppl Power Experts	Wettingen
Krüsi	U.	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	Zürich
Küng	Markus	Industrielle Werke Basel	Basel
Kurmann	Beat	Eidg. Starkstrominspektorat	Fehraltorf
Lampart	Peter	AEW Energie AG	Aarau
Lehner	Markus	Elektrizitätswerk der Stadt Zürich	Zürich
Link	Andreas	Industrielle Werke Basel	Basel
Litscher	Stefan	Wasser- & Elektrizitätswerk der Gemeinde Buchs, EWB	Buchs
Lüscher	Robert	Alstom T&D AG	Oberentfelden
Luy	Claude-Alain	Service de l'électricité de la ville de Lausanne	Lausanne 9
Marthaler	Hanspeter	Elektrizitätswerke des Kantons Zürich	Zürich
Martinez	Gerard	Trench Switzerland AG	Basel
Mathis	Peter	Schweizerische Bundesbahnen	Zollikofen
Mele	Adamo	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Metzger	Fridolin	EGL-Grid AG	Laufenburg
Miesch	Markus	Alstom T&D AG	Oberentfelden
Miletic	D.	von Moos Stahl AG	Emmenbrücke
Minkner	Ruthard	Tench Swizerland AG	Pfeffingen
Morand	Pascal	Services Industriels de Bagnes	Le Châble
Moser	Urs	Elektrizitätswerk der Stadt Zürich	Zürich
Müller	Jörg	Elektrizitätswerk der Stadt Zürich	Zürich
Müller	René	Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG	Däniken
Muller	Pierre	Energie Ouest Suisse EOS	Lausanne
Noser	Valentin	Kernkraftwerk Leibstadt AG	Leibstadt
Oegerli	Arthur	Aare Energie AG	Olten
Pachoud	Philippe	Electrosuisse	Fehraltorf
Petar	Fausto	ATEL Rete SA	Bodio

Pronini	Roberto	Azienda Elettrica Ticinese	Bellinzona
Rahm	Rudolf	AEW Energie AG	Aarau
Renaud	François	Energie Ouest Suisse	Lausanne
Richard	Marcel	Electricité Neuchâteloise SA	Corcelles
Röthlisberger	Erhard	Atel Netz AG	Olten
Röthlisberger	Roman	Pfiffner Messwandler AG	Hirschthal
Rozner	Walter	Ingenieurbüro für Elektrotechnik	Steffisburg
Santa Cruz	Mirko	Alstom T&D AG	Oberentfelden
Sauvain	Hubert	Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg	Fribourg
Savary	Etienne	Maxwell Technologies SA	Rossens
Schädler	Toni	Elektrizitätswerk Obwalden	Kerns
Schaub	Jakob	Wasser- & Elektrizitätswerk der Gemeinde Buchs, EWB	Buchs
Schenk	Christoph	Alstom T&D AG	Oberentfelden
Schenk	Alain	BKW FMB Energie AG	Ostermundigen
Schmid	Joachim	Trench Switzerland AG	Basel
Schneeberger	Hans-Ulrich	Gemeindebetriebe Windisch Elektrizitäts- und Wasserwerk	Windisch
Schweizer	Martin	Pfiffner Messwandler AG	Hirschthal
Sobriel	Saintil	Alstom T&D AG	Oberentfelden
Sonderegger	Gallus	Nordostschweizerische Kraftwerke	Baden
Spiller	Corsin	Kraftwerke Hinterrhein AG	Thusis
Spirig	Friedrich	Atel Netz AG	Olten
Stauffer	Max	St. Gallisch-Appenzellische Kraftwerke AG	St. Gallen
Tröndle	Markus	Nordostschweizerische Kraftwerke	Baden
Vallotton	Jean-Daniel	Siemens Schweiz AG	Zürich
Vock	Edgar	Nordostschweizerische Kraftwerke	Baden
Voss	H.-Jürgen	KG Ritz Messwandler GmbH & Co.	Hamburg
Waishar	Roberto	Alstom T&D AG	Oberentfelden
Waser	Anton	Centralschweizerische Kraftwerke	Luzern
Weber	Hans-Jürg	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	Zürich
Wehrli	Peter	Städtische Werke Winterthur	Winterthur
Witschard	Daniel	HYDRO-EXPLOITATION SA	Sion
Zaengl	W.S.		Dübendorf
Zichanowicz	Karl	Kernkraftwerk Leibstadt AG	Leibstadt
Zimmerli	Roland	ZET Zimmerli Energie-Technik AG	Mühlethal
Zimmermann	Heinrich	Atel Netz AG	Olten



## Referentenadressen

Bertschi	Beat	Pfiffner Messwandler AG Lindenplatz 5042 Hirschthal	beat.bertschi@pmw.ch Tel.: 062 739 28 40 Fax: 062 739 28 10
Bräunlich Dr.	Reinhold	Fachkommission für Hochspannungsfragen Voltastrasse 9 8044 Zürich	braeunlich@fkh.ch Tel: 01 253 62 62 dir.: 01 253 62 63 Fax: 01 253 62 60
Heizmann Dr.	Thomas	Fachkommission für Hochspannungsfragen Voltastrasse 9 8044 Zürich	heizmann@fkh.ch Tel: 01 253 62 62 dir.: 032 725 24 85 Fax: 01 253 62 60
Herrmann Dr.	Hans- Joachim	Siemens AG PTD PA 13 Postfach 4806 D-90026 Nürnberg	hans- joachim.herrmann@siemens.com Tel. dir.: +49 911 433 8266 Fax: +49 911 433 8301
Kämpfer	Rudolf	Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung Metas Lindenweg 50 3003 Bern	rudolf.kaempfer@metas.ch Tel.: 031 323 31 11 Fax: 031 323 33 06
Minkner Dr.	Ruthard	Grenzweg 5 4148 Pfeffingen	rd.minkner@bluewin.ch Tel.: 061 753 97 80
Muller	Pierre	Energie Ouest Suisse EOS Place de la Gare 12 1001 Lausanne	pierre.muller@eos-gd.ch Tel. : 021 341 21 11 Fax : 021 341 20 49
Schmid Dr.	Joachim	Trench Switzerland AG Lehenmattstrasse 353 4028 Basel	schmid.joachim@trench-tsf.com Tel.: 061 315 51 11 dir.: 061 315 52 77 Fax: 061 315 59 18
Voss Dr.	Hans- Jürgen	KG Ritz Messwandler GmbH & Co. Horner Landstrasse 302-304 D-22096 Hamburg	hans-juergen.voss@ritz- international.de Tel.: +49(405)511 23-0